

ВЕСТНИК

воздушно-космической обороны

Научно-технический рецензируемый журнал

Выпуск № 1(17), 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

П.А. Созинов, д-р техн. наук, профессор

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

В.М. Алдошин, д-р техн. наук, профессор

А.С. Сумин, д-р техн. наук, профессор

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ:

Д.А. Леманский, канд. техн. наук, доцент

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

М.А. Горбачёв, д-р техн. наук

Б.Н. Горевич, д-р техн. наук, профессор

Н.С. Губонин, д-р техн. наук, профессор

А.И. Даниленко, д-р техн. наук

М.В. Жестев, канд. техн. наук

Г.В. Зайцев, д-р техн. наук

А.Б. Игнатьев, д-р техн. наук, профессор

В.А. Кашин, д-р техн. наук, профессор

С.К. Колганов, д-р техн. наук, профессор

В.И. Колесниченко, д-р техн. наук, профессор

Ю.Н. Кофанов, д-р техн. наук, профессор

В.С. Оконешиников, д-р техн. наук

А.А. Парамонов, д-р техн. наук, профессор

Н.В. Радчук, д-р техн. наук, профессор

С.П. Соколов, д-р техн. наук

П.И. Стариковский, д-р техн. наук

А.Ф. Страхов, д-р техн. наук, профессор

А.А. Трухачев, д-р техн. наук

Ю.Г. Шатраков, д-р техн. наук, профессор

Н.С. Щербаков, д-р техн. наук, профессор

Технический редактор: М.А. Лайков

Корректор: А.Н. Борзова

Компьютерная верстка: О.А. Пыхонина

☎ редакции (499) 940-02-22

доб. 16-42, 79-06, 70-19, 16-00

E-mail: aspirantura@gskb.ru

► **Проблемные вопросы построения систем и средств ВКО**

А.И. Колесников, И.А. Каплунов, К.А. Морозова, С.А. Третьяков

*Влияние рельефа поверхности на отражение
и пропускание электромагнитного излучения* 5

Т.П. Павлова

*Методологические основы обеспечения
технической безопасности в социо-техносфере* 12

С.Л. Старчак, В.В. Храмшин

*Задача выбора и критерии оптимальности вариантов
группировок зенитных ракетных войск
смешанного типа для условий полиценарной базы* 21

► **Применение сил и средств ВКО**

Г.Е. Арапов, Ю.Б. Дубов, В.Н. Желнин, В.И. Желонкин,

М.В. Желонкин, О.И. Ткаченко

*Исследование режимов сверхманёвренности
с использованием пилотажного комплекса ЦАГИ* 29

► **Исследования в сфере проектно-конструкторских
и технологических работ**

В.Ю. Антипов

*Основные принципы разработки аппаратно-программных средств
автоматизированного контроля бортовой аппаратуры ЗУР* 39

С.В. Березовский, Н.А. Михайлов, А.В. Штык, М.Б. Орехов

СВЧ-приёмный модуль для бортовой аппаратуры 44

С.И. Бойчук, Д.Д. Габриэльян, В.И. Демченко, А.О. Жуков,

А.Е. Коровкин, Д.Я. Раздоркин, А.В. Шипулин

*Двухполяризационная зеркальная антенна
радиолокационной системы обнаружения объектов* 48

А.Н. Бруевич

*Взаимная индуктивность круговых витков,
расположенных в параллельных плоскостях* 54

В.Я. Вайспир, В.С. Кийко

Бериллиевая керамика для современных областей техники 59

В.Н. Завалий, В.С. Оконешиников

*О преобразовании сигнала с V-образной ЧМ
и схемы параллельной обработки многобазового ЛЧМ импульса* 70

Вестник воздушно-космической обороны:
Научно-технический журнал/
ПАО «НПО «Алмаз», 2018 г.
№ 1(17). С. 1–132

Подписано в печать 21.03.2018 г.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 7,2. Тираж 1000 экз.
Заказ № 119611

Отпечатано в ООО «Издательство Юлиус»
392010, г. Тамбов, ул. Монтажников, д. 9

Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС77-63487

Учредитель: Публичное акционерное общество
«Научно-производственное объединение
«Алмаз» имени академика А.А. Расплетина»

125190, г. Москва,
Ленинградский проспект, дом 80, корп. 16.
Тел./факс (499)940-02-22/(499)940-09-99

Статьи рецензируются.

Незаконное тиражирование и перевод статей,
включенных в журнал, в электронном
и любом другом виде запрещено и карается
административной и уголовной
ответственностью по закону РФ
«Об авторском праве и смежных правах»

© ПАО «НПО «Алмаз», 2018

ISSN 2311-830X

Цена за 1 экз. – 600 руб.

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС: 70576
в каталоге агентства
«РОСПЕЧАТЬ»:
ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ

**А.П. Минеев, С.М. Нефедов, П.П. Пашинин, П.А. Гончаров,
В.В. Киселев**
Планарные ИК-лазеры с ВЧ-накачкой на смесях инертных газов 78

А.А. Трухачёв
*Эффективность обнаружения сигнала,
когда время корреляции флуктуаций отражающей поверхности цели
сопоставимо с длительностью когерентного зондирующего сигнала* 83

И.А. Чепурнов, В.Д. Мещеряков, С.Л. Старчак
*Оценка характеристик многокольцевых
фазированных антенных решёток с учётом
параметров амплитудного распределения на их раскрыве* 92

► Прикладные задачи применения информационных технологий

Ю.В. Безгодков, Г.Б. Гуров, Ю.Б. Лепихин, С.Ф. Семин
*Применение технологии виртуализации
и создание универсальной основы построения
автоматизированных систем управления. LXC-контейнеры*..... 98

И.В. Карельский, В.М. Алдошин
*Сравнительный обзор технологических, программных
и аналитических методов анализа управленческой информации
в целях формирования системы поддержки
принятия управленческих решений на предприятиях ОПК
на базе ПО MS Excel 2016* 109

► Аналитические исследования зарубежного опыта

А.Е. Свистунов, Н.А. Малеева, О.С. Черкашина
*Создание зарубежных систем радиоэлектронного поражения
для противодействия БЛА*..... 123

► Научные рецензии и отзывы..... 132

CONTENTS

► Topical issues on Aerospace defense system and elements arrangement

- A.I. Kolesnikov, I.A. Kaplunov, K.A. Morozova, S.A. Tretiakov**
Surface texture influence on reflection and transmission of electromagnetic radiation5
- T.P. Pavlova**
Methodological aspects of technical safety precautions in the socio- and technosphere 12
- S.L. Starchak, V.V. Khramshin**
Selection problem and optimality criteria of combined air missile defense grouping for poly-scenario base21

► Aerospace defense systems and components application

- G.E. Arapov, Yu.B. Dubov, V.N. Zhelnin, V.I. Zhelonkin, M.V. Zhelonkin, O.I. Tkachenko**
Research of supermaneuverability modes using TSAGI flight simulator29

► Design-engineering and technological research works

- V.U. Antipov**
Main development principles of hardware and software automated control of sam onboard equipment39
- S.V. Berezovskiy, N.A. Mihailov, A.V. Shtik, M.B. Orehov**
Microwave receiving module for on-board equipment44
- S.I. Boichuk, D.D. Gabrieliyan, V.I. Demchenko, A.O. Zhukov, A.E. Korovkin, D.Y. Razdorkin, A.V. Shipulin**
Dual-polarization mirror antenna of radar objects detection system48
- A.N. Bruevich**
Mutual inductance of circular turns, located in parallel planes54
- V.Ya. Waispapir, V.S. Kijko**
BeO-ceramic for modern applications59
- V.N. Zavaliy, V.S. Okoneshnikov**
Signal transformation with V-shape frequency modulation and scheme of multibased chirped pulse concurrent processing70
- A.P. Mineev, S.M. Nefedov, P.P. Pashinin, P.A. Goncharov, V.V. Kiselev**
Planar IR-lasers on inert gas mixture with HF-pumping78
- A.A. Trukhachev**
Effectiveness of signal detection for the case when correlation time of target cross-section fluctuations is comparable to duration of the coherent radar signal83
- I.A. Chepurnov, V.D. Meshcheryakov, S.L. Starchak**
Evaluation of multi-ring phased antenna arrays characteristics considering amplitude distribution parameters at its aperture92

IT applied application tasks

Yu.V. Bezgodkov, G.B. Gurov, Yu.B. Lepikhin, S.F. Semin

Application of virtualization technology and building of common basement for automated control systems LXC-containers..... 98

I.V. Karelskiy, V.M. Aldoshin

Comparative review of technological, software-based and analytical analysis methods of management information for building of executive decision-making support system at defense-industrial complex enterprises based on MS Excel 2016 109

► Foreign experience analytic research

A.E. Svistunov, N.A. Maleeva, O.S. Cherkashina

Development of foreign electronic warfare systems for C-UAV operations 123

► Scientific reviews and reference..... 132

Полный список опубликованных номеров журнала Вы можете увидеть на сайте
<http://www.raspletin.com/notes>

Журнал «**Вестник воздушно-космической обороны**» включён в сформированный Министерством образования и науки Российской Федерации перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (письмо Минобрнауки России от 01.12.2015 года № 13-6518. URL: <http://www.vak.ed.gov.ru/87.html>).

Включён в перечень ВАК по группам научных специальностей:

05.12.00 – Радиотехника и связь;

05.27.00 – Электроника.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ И СРЕДСТВ ВКО

УДК 535.243:543.42

ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НА ОТРАЖЕНИЕ И ПРОПУСКАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© Авторы, 2018

А.И. Колесников кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент, ФГБОУ ВПО Тверской государственный университет, г. Тверь

И.А. Каплунов доктор технических наук, профессор,
проректор по научной и инновационной деятельности,
ФГБОУ ВПО Тверской государственный университет, г. Тверь
E-mail: Kaplunov.IA@tversu.ru

К.А. Морозова

ФГБОУ ВПО Тверской государственный университет, г. Тверь

С.А. Третьяков

старший преподаватель, ФГБОУ ВПО Тверской государственный университет, г. Тверь

Созданы математическая модель и программное обеспечение, с помощью которых осуществляется точный расчёт индикатрис электромагнитного излучения, отражаемого и пропускаемого прозрачными и непрозрачными телами произвольной формы, из любого вещества с произвольным рельефом поверхностей: полированных, шлифованных (случайно-шероховатых), а также имеющих искусственный структурированный периодический рельеф с неровностями произвольной формы. Программный продукт прошёл тестовые испытания на кристаллах различных веществ, на пластмассах, стёклах, металлах. Перенесение расчётов из оптического диапазона в радиодиапазон (1 мм – 1 дм) предполагает получение информации о константах материалов для таких длин волн и проведение натурных экспериментов.

Ключевые слова: диффузное отражение, коэффициент пропускания, показатель поглощения, формулы Френеля, микрорельеф, нанорельеф, кристаллы германия.

The mathematical model and Software were developed which provide precise computation of electromagnetic radiation indicatrix, reflected and transmitted by transparent and opaque arbitrary shaped bodies, from any material with arbitrary surface patterns: polished, grind (accidentally-rough), and having artificial structured periodic texture with irregularities of arbitrary shape. The software product passed test runs on crystals of different material, on plastic, glasses, metals. Calculations conversion from optical band to radiofrequency band (1 mm – 1 dm) envisages obtaining information on material constants for such wavelengths and conducting of full-scale experiments.

Keywords: diffuse reflection, transmission coefficient, index of absorption, Fresnel's equations, micropattern, nanopattern, germanium crystals.

Введение

Описание взаимодействия потоков электромагнитного излучения с шероховатыми и вообще неровными поверхностями прозрачных и непрозрачных объектов до настоящего времени базируется на следующих принципах. Считается, что, в зависимости от соотношения между средними размерами неровностей a и длиной волны излучения λ , при $a \gg \lambda$ следует пользоваться законами геометрической оптики; при $a \sim \lambda$ следует применять волновую теорию, то есть

необходимо учитывать явления дифракции и интерференции вторичных волн, рассеянных различными участками поверхности. Значительно менее определённо теория отвечает на вопросы, связанные со случаем, когда $a \ll \lambda$, весьма важным как для оптического, так и для радиодиапазонов. Здесь, начиная с 80-х – 90-х годов, также господствует рассмотрение в волновом приближении в виде получившей приоритет и широкую популярность так называемой ЕМТ-теории эффективного слоя [1, 2]. В этой модели реальная поверхность с изломами заменяется «эквивалентной» плоской поверхностью с толщиной слоя, примерно равной средней глубине изломов (параметру R_a шероховатости), отсчитываемой по нормали Z к поверхности вглубь материала. Считается, что показатель преломления на внешней границе слоя равен показателю преломления внешней среды (например, воздуха), из которой падает свет, а на глубине h он равен показателю преломления материала n , т.е. $n(Z = 0) = 1$; $n(Z = h) = n$.

Главным недостатком ЕМТ является то, что в действительности функция $n(Z)$ неизвестна, а более или менее удовлетворительное согласие экспериментально измеряемых коэффициентов пропускания и отражения излучения образцами из различных материалов с результатами расчётов достигается только с помощью перебора многочисленных вариантов вида этой функции путём решения каждый раз новой системы уравнений Максвелла. При этом физическая картина взаимодействия излучения с реальной поверхностью фактически не рассматривается. Вследствие этого применение ЕМТ часто наталкивается на ряд невозможных в её рамках, но экспериментально наблюдаемых резких пороговых эффектов [3]. Так как в модели «эффективного слоя» функция $n(Z)$ изначально считается непрерывной, то при слабом изменении формы рельефа она не должна резко изменять свой вид. Между тем, эксперименты свидетельствуют как раз о том, что иногда чрезвычайно малые изменения рельефа, например, изменения углов при вершинах впадин треугольной формы, приводят к очень резким изменениям коэффициентов пропускания и отражения излучения элементами с такими поверхностями. Не удаётся в рамках ЕМТ корректно объяснить и, тем более, представить явления, исследованные в работах [3, 4]. Они состоят в том, что пластинки из алмаза [4] с искусственно нанесённым лазером периодическим микрорельефом, а также грубо отшлифованные (со случайно-шероховатым микрорельефом) пластинами из парателлуриата (α - TeO_2) [3] в видимом и ближнем ИК-диапазонах имеют сначала коэффициенты пропускания излучения меньше, чем отполированные по высокому классу чистоты пластинки такой же толщины из тех же материалов (что кажется естественным результатом). Однако при постепенном увеличении длины волны излучения в ИК-диапазоне, т.е. при уменьшении отношения a/λ , коэффициенты пропускания пластинок с неровностями не только сравниваются с коэффициентами пропускания полированных пластинок, но и при дальнейшем увеличении длины волны излучения существенно их превышают.

Анализ физической природы явлений такого рода, подтверждённых как авторскими экспериментами, так и экспериментами, приведёнными в других работах [4, 5], на других материалах, с поверхностями, имеющими различный микро- и нанорельеф, с электромагнитным излучением из различных спектральных диапазонов, послужил отправной точкой для теоретического описания соответствующих эффектов в рамках геометрического приближения.

Целями настоящей работы являлись: создание в рамках геометрического приближения математической модели и программного обеспечения, предназначенных для предельно точного расчёта индикатрис электромагнитного излучения, отражаемого (рассеиваемого) прозрачными и непрозрачными телами произвольной формы, из любого вещества с произвольным рельефом поверхностей – полированных, шлифованных (случайно-шероховатых) или имеющих искусственный периодический рельеф с неровностями произвольной формы; тестирование модели на ряде объектов с известными микрорельефом; прямые измерения спектрального пропускания излучения образцов с известным рельефом поверхностей.

Физическое обоснование геометро-оптического приближения. Попыток применения геометрической оптики при расчётах, связанных с отражением и пропусканием излучения шероховатыми поверхностями, относительно немного [6–8]. Наиболее разработанным методом в данной области является описание поверхности с помощью «функции микроплощадок», показывающей статистическое распределение поверхностей изломов по углам относительно нормали к общей поверхности [6, 8]. Данный метод (МГО) не является вполне геометрическим и относится к одной из разновидностей волнового представления [6, 7]. Следует заметить, что в период появления МГО и других вариантов волнового приближения отсутствовали и предпо-

сылки для прямого применения принципов геометрической оптики. Не существовало ни способов прецизионного получения и точной оцифровки реального микрорельефа (нанорельефа) поверхностей, ни достаточно быстродействующих компьютеров, способных обработать информацию о рельефе на больших участках поверхностей и производить расчёты траекторий огромного числа лучей с учётом многократных отражений и преломлений. В настоящее время все указанные ограничения сняты в связи с повышением на многие порядки быстродействия ЭВМ и появлением прецизионных цифровых приборов для получения изображений поверхностей с большой (до нм) разрешающей способностью – РЭМ (растровых электронных микроскопов), АСМ (атомно-силовых микроскопов) и, в особенности, интерференционных профилометров. Таким образом, оказалась возможной и апробация методов расчёта, использующих чисто геометро-оптическое приближение.

При таком приближении явления дифракции и интерференции исключаются из рассмотрения в случае, когда средние размеры неровностей рельефа a намного меньше длины волны излучения λ . Соотношение $a \ll \lambda$ означает, что параметры шероховатости поверхности R_a и S_a также отвечают условиям $R_a \ll \lambda$; $S_a \ll \lambda$. Физическим обоснованием отказа от рассмотрения взаимодействия элементарных волн служит в этом случае то обстоятельство, что интерферировать на максимум или минимум могут только лучи из падающего потока, во-первых, отстоящие (по фронту) на очень больших расстояниях $l \gg a$ и, во-вторых, отражённые под очень большими углами к поверхности. При этом соответствующие микроплощадки должны быть одинаково ориентированы относительно направления падающего потока излучения, что показано на рис. 1. Рассмотрим, например, условия гашения (интерференции на минимум лучей 2 и 2').

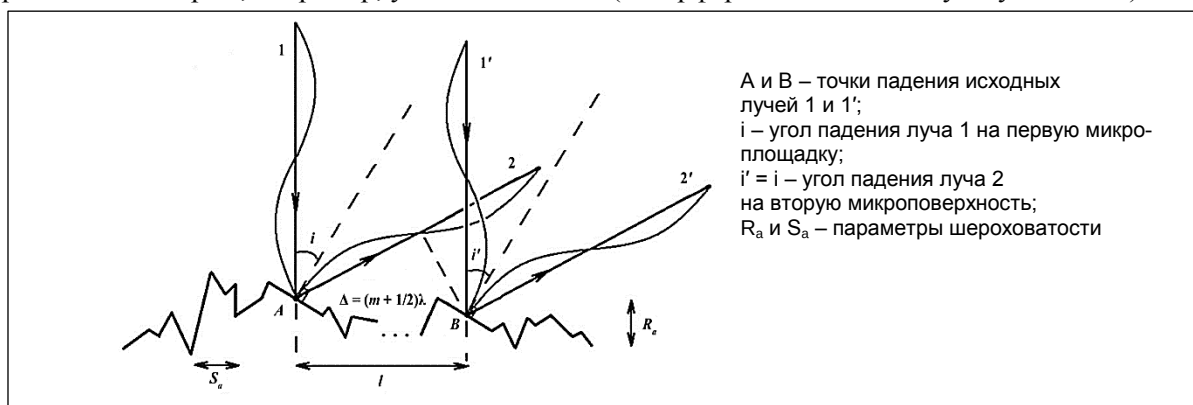


Рис. 1. К рассмотрению возможной интерференции между двумя лучами 2 и 2', отражёнными от двух микроплощадок, расположенных на большом расстоянии l друг от друга

Если параметр шероховатости поверхности S_a (среднее расстояние между неровностями рельефа) имеет порядок 20 нм (полировка чрезвычайно высокого качества), а длина волны излучения относится к видимому или ближнему ИК-диапазонам ($\lambda \sim 1 \mu\text{м}$), то для угла γ , характеризующего ориентацию площадки относительно поверхности ($\gamma = \frac{\pi}{2} - 2i$), косинус которого, например, равен 0.5, условие гашения лучей 2 и 2' означает, что поскольку:

$$\Delta = \frac{1}{2} \lambda = l \cos \gamma = k S_a \cos \gamma, \quad (1)$$

где k – число неровностей, разделяющих по поверхности точки А и В, это число должно быть порядка 50. Для первого интерференционного максимума ($\Delta = \lambda$) число k возрастает до 100. Для углублений поверхности с более пологими склонами ($\gamma = \frac{\pi}{2}$), например, для $\gamma = 78^\circ$, это число возрастает до 250, и, таким образом, точки А и В должны находиться друг от друга на расстоянии $l = 5 \mu\text{м}$. Вероятность того, что на таком большом (по сравнению с характерными размерами неровностей) расстоянии находятся микроплощадки с одинаковой ориентацией относительно падающего пучка, и к ним подходит плоская электромагнитная волна с коррелированной по фронту фазой, очевидно, чрезвычайно мала.

Она является ещё меньшей, если учесть:

- возможность попадания отражённых лучей в соседние выступы;
- возможность того, что площадки в точках A и B лежат в разных плоскостях;
- возможную различную поляризацию падающих лучей 1 и $1'$;
- ограниченную область пространственной когерентности для лучей. Для нелазерных источников она составляет не более 20–25 нм, а временная когерентность для точек A и B практически равна нулю.

Для волн (лучей), отражённых приблизительно в обратном направлении, невозможность интерференции ещё более очевидна. Действительно, вследствие малости параметра R_0 никакие разности хода Δ не могут быть сравнимы с величинами порядка $\lambda/2$ и составляют не более нескольких сотых длины волны. Вследствие этого отражённые волны имеют практически не изменённую фазу (кроме одинакового фазового скачка на π), и ни усиления, ни гашения волн не происходит. Таким образом, при расчёте параметров потоков излучения, отражаемого (или преломляемого) поверхностями, для которых выполняется условие $a \ll \lambda$, излучение можно рассматривать как совокупность отдельных лучей, интенсивности можно просто суммировать, а явления дифракции и интерференции – не учитывать.

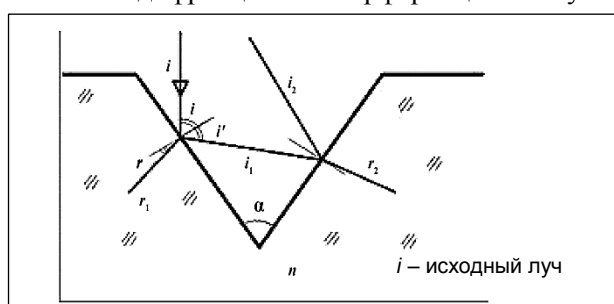


Рис. 2. Ход лучей в симметричной треугольной впадине в прозрачном материале

Расчётная модель. В простейшем двумерном варианте рассматривается односторонняя симметричная относительно нормали к поверхности впадина треугольной формы в прозрачном, оптически изотропном материале с показателем преломления n . Подобный подход применялся в работе [9], имеющей чисто практическую направленность, – поиски микротрещин на поверхности металла при помощи освещения её лазерным лучом. В ней также рассчитан ход лучей (без вычисления их интенсивностей) до выхода из трещины. В настоящей работе указанный случай представлен на рис. 2.

Для отражённых лучей использовано обозначение « i », для преломлённых в материал – « r ».

В основу расчётов положены:

- закон отражения $\angle i = \angle i'$;
- закон преломления $\sin i / \sin r = n$;
- формула Френеля для коэффициента отражения R от прозрачного вещества неполяризованного света:

$$R = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2[i - \arcsin(\frac{\sin i}{n})]}{\sin^2[i + \arcsin(\frac{\sin i}{n})]} + \frac{\text{tg}^2[i - \arcsin(\frac{\sin i}{n})]}{\text{tg}^2[i + \arcsin(\frac{\sin i}{n})]} \right\}. \quad (2)$$

При рассмотрении хода лучей, вошедших в материал в направлении второй – выходной поверхности, а также в направлении соседней впадины или входной поверхности, учитывалось явление полного внутреннего отражения в виде условия $r < \arcsin(1/n)$. Интенсивность последнего (перед выходом из впадины) луча с номером K определялась путём последовательного применения формулы Френеля:

$$I_K = IR_1 R_2 \dots R_K. \quad (3)$$

Таким образом, в самом простейшем варианте коэффициент отражения луча R определяется по формуле:

$$R = R_1 R_2 \dots R_K, \quad (4)$$

а коэффициентом пропускания T считалась величина:

$$T = 1 - R = 1 - R_1 R_2 \dots R_K. \quad (5)$$

Коэффициент поглощения света в материале p , входящий в закон Бугера-Ламберта [8]:

$$I = I_0 \exp(-pl), \quad (6)$$

где l – расстояние, на которое в материале распространяется луч, изначально имеющий интенсивность I_0 , I – интенсивность луча, прошедшего расстояние l , считался равным нулю. В работе [9] получена формула для числа отражений K , после которых он покидает впадину. В настоящей работе K имеет другое значение, которое рассчитывается по формуле:

$$K = \left\lceil \frac{180^\circ}{\alpha} - 0.5 \right\rceil, \quad (7)$$

где символ $\lceil \rceil$ означает верхнюю целую часть числа.

С помощью формул (2)–(7) получены зависимости $K(\alpha)$, а также зависимости коэффициентов пропускания света поверхностями от угла при вершине впадин для различных показателей преломления вещества n (см. рис. 2).

Анализ данных зависимостей позволяет понять физическую природу явления, описанного в нескольких публикациях, например, в [4]. Оно заключается в том, что при увеличении длины волны света, падающего на шероховатую поверхность, эта поверхность начинает пропускать больше света, чем идеально отполированная поверхность того же вещества. Не нашедшее объяснения в рамках волновой модели «эффективного слоя», оно прямо вытекает из рассмотрения многократных отражений и преломлений лучей в рамках геометрической оптики с учётом нормальной дисперсии. При увеличении длины волны падающего света уменьшается показатель преломления, вследствие чего коэффициент отражения света от впадин резко уменьшается, и суммарное пропускание оказывается большим, чем у гладкой поверхности.

Эксперимент. Измерения коэффициентов пропускания света кристаллами парателлурита и германия с гладкими и шероховатыми поверхностями были проведены с помощью инфракрасного спектрофотометра ИКС-29. На рис. 4 представлена спектрограмма кристалла парателлурита, представлявшего собой грубо отшлифованную с обеих сторон пластинку толщиной 12 мм. Для германия, имеющего большой показатель преломления ($n = 4$) и очень слабую дисперсию, рассматриваемый эффект почти неразличим. Для парателлурита со средним значением показателя преломления 2.5 и с очень высокой дисперсией эффект «просветления» шероховатой поверхности по сравнению с гладкой совершенно очевиден.

Развитие модели. Согласно теории, описанной в предыдущем параграфе, была разработана программа. Разработка велась на языке C++ в среде *Microsoft Visual Studio 2012*. Язык C++ выбран, как наиболее гибкий и показывающий высокую производительность, что в рамках поставленной задачи являлось одним из критериев. Графической системой визуализации является SDL2 как API для вывода графики на различных устройствах. Моделирование поверхности производится по принципу ломаной кривой, но, благодаря масштабированию (точки перелома возможно позиционировать с точностью до 1 нм), данное приближение не вносит серьёзных ошибок в расчёты. Замкнутая кривая образует область с собственными коэффициентом преломления и коэффициентом экстинкции. Таким образом, на пути светового потока можно расположить несколько видов материала. Моделирование светового потока является рекурсивной задачей геометрического двумерного луча. Имеется источник, из которого он берёт начало, и множество отрезков (ломаные линии поверхности), с которыми необходимо проверить пересечение. Если такое пересечение имеется, рассчитывается угол отражения

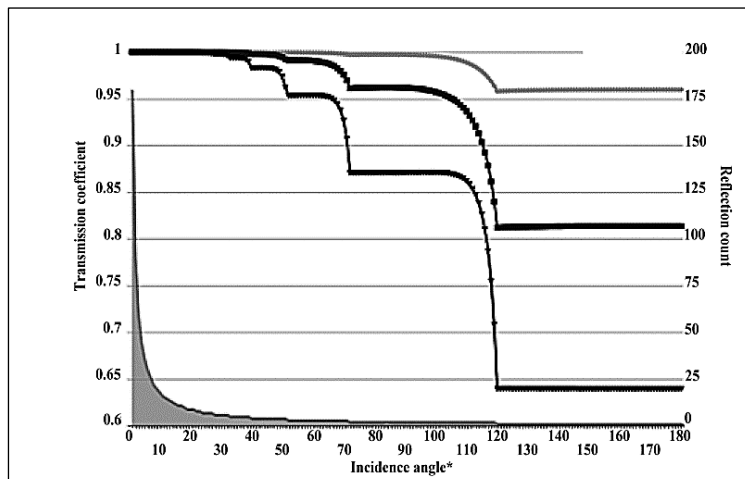


Рис. 3. Зависимости для коэффициентов пропускания света поверхностью (слева) и числа отражений лучей во впадинах (справа) от угла впадин для веществ с различными показателями преломления: $n = 4$ (германий), $n = 2.5$ (парателлурит), $n = 1.5$ (стекло)

и преломления в заданной точке пересечения и получаем два новых луча с началом уже в этой точке. Для вновь полученных лучей повторяем операцию.

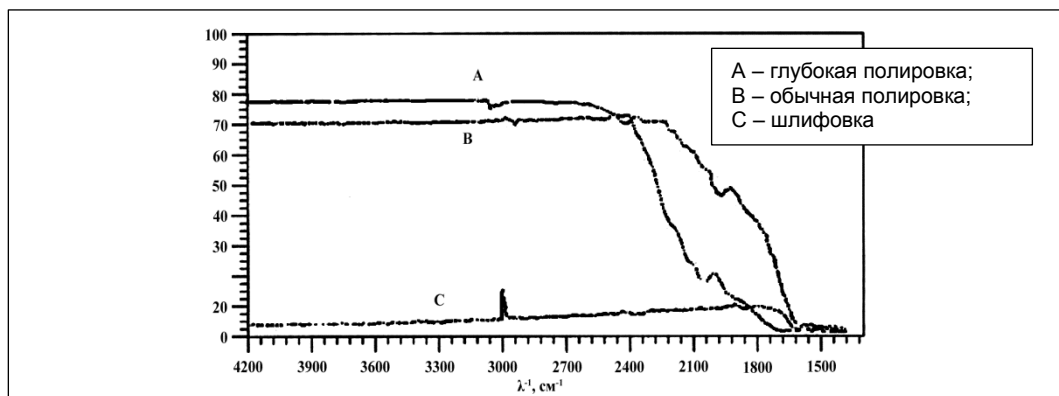


Рис. 4. Спектрограммы монокристаллов парателлуриата с поверхностями, имеющими различную степень шероховатости

Созданная на основе указанных принципов программа «Ray Tracing» прошла тестирование при расчёте коэффициентов пропускания и индикатрис рассеяния излучения пластинами с различной толщиной, из различных материалов и с различными искусственными периодическими или случайно-шероховатыми микрорельефами. Цифровые данные (в случае реальных образцов) о микро- (нано-) рельефе вводились в программу из блока интерференционного профилометра NanoMap 1000WLI. Соответствующие различным образцам результаты расчётов представлены на рис. 5–6, на которых показаны, помимо хода некоторых лучей в объектах и самих профилей, индикатрисы отражения излучения в переднюю и заднюю полусферу.

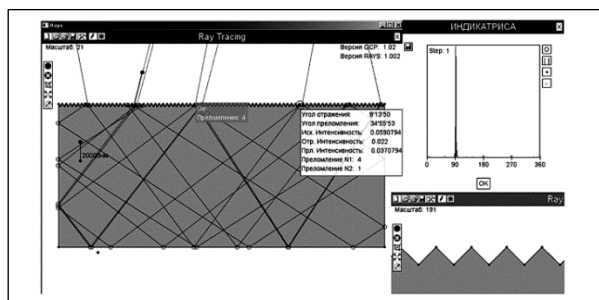


Рис. 5. Результаты расчёта программой «Ray Tracing» коэффициентов пропускания и индикатрис рассеяния излучения модельной пластинкой с микрорельефом на обеих поверхностях в виде периодических выступов с углом при вершинах 90°

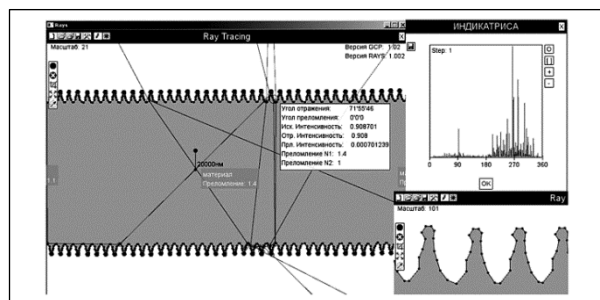


Рис. 6. Результаты расчёта программой «Ray Tracing» коэффициентов пропускания и индикатрис рассеяния излучения видимого диапазона прозрачным крылом бабочки с природным нанорельефом, описанном в работе [11]

Особый интерес представляет эффект «просветления» крыльев бабочки определённого вида, имеющих природный антиотражающий нанорельеф, делающий их прозрачными, экспериментально изученный в недавней работе [11], но не получивший физического объяснения. Машинные эксперименты с помощью программы «Ray Tracing» подтверждают уникально малое отражение излучения видимого диапазона в обратном направлении, достигаемое с помощью сложной формы выступов с параметрами 20–40 нм на поверхностях крыльев. При этом даже малые изменения этой формы и размеров выступов приводят к резкому уменьшению эффекта «просветления».

Заключение

На основе приближения геометрической оптики создана математическая модель и программное обеспечение, позволяющие с высокой точностью рассчитывать коэффициенты пропускания и индикатрисы рассеяния излучения объектами из любых веществ с известными показателями преломления и известным микрорельефом. Программа успешно прошла тестовые

испытания на ряде кристаллов и природных объектов со специальным антиотражающим периодическим или случайно-шероховатым рельефом. С её помощью получены объяснения ранее обнаруженных экспериментально эффектов «просветления» шероховатых поверхностей.

Исследованный случай, когда размеры неровностей рельефа намного меньше длины волны излучения, безусловно, характерен и для излучения радиодиапазона. Поэтому представляются перспективными как проведение соответствующих расчётов для диапазона 1 мм – 1 дм (для чего нужны константы интересующих материалов), так и натурные эксперименты, призванные оценить пригодность и точность аналогичных расчётов для этого диапазона.

Работа выполнена с использованием ресурсов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета в рамках государственного задания по научной деятельности (3.5786.2017/8.9).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Harris D.C.** *Proc.3 Intern. Conf. on Applications of Diamond Films and Related Materials.* – Washington, USA: NIST Spec. Publ. 1995, V.885. – P.539.
2. **Nyitrai G., Kukhlevsky S.V.** *Fields of optical waveguides as freespace wave // Diffractive Optics'01. Budapest.* – 2001. – P.18.
3. **Каравашкина К.А., Айдинян Н.В., Козинков С.Ю., Хохлов Д.В., Гавалян М.В., Колесников А.А., Гасымов К.Р., Бурак П.М.** Приближение геометрической оптики при расчете коэффициентов пропускания света шероховатыми поверхностями прозрачных материалов и его экспериментальная проверка // Вестник ТвГУ. Серия «Физика». – 2013, Выпуск 18. – С.63–70.
4. **Кононенко В.В., Кононенко Т.В., Конов И.И. и др.** Создание на поверхности алмазных пленок антиотражающих микроструктур методом лазерного рисования // Квантовая электроника. – 1999, Т.26, №2. – С.158–162.
5. **Каманина Н.В., Васильев П.Я., Студенов В.И.** Применение нанотехнологий в оптике: о возможности увеличения прозрачности и повышения поверхностной механической прочности материалов в УФ и ИК диапазонах спектра // Оптический журнал. – 2008, Т.75, №2. – С.57.
6. **Полянский В.К., Рвачев В.П.** Рассеяние света при отражении от статистически распределённых микроплощадок. Дифракционное рассмотрение // Оптика и спектроскопия. – 1967, Т.22. – С.279.
7. **Рытов О.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.Ж.** Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля. – М.: «Наука», 1978. – 463 с.
8. **Иванов А.П.** Оптика рассеивающих сред. – Минск: Наука и техника, 1969. – 571 с.
9. **Мордасов В.И., Сазонникова Н.А., Шорин В.П.** Оценка поверхностных повреждений оптическим методом // Известия Самарского Научного центра Российской академии наук. – 1999, № 2. – С.270–276.
10. **Wind L., Szymanski W.W.** Quantification of Scattering Corrections to the Beer-Lambert Law for transmittance in Turbid Media // Measurement Science and Technology. – 2002, V.13. – P.270–275.
11. **Siddique R.H., Gomard G., Holscher H.** The Role of random nanostructures for the omnidirectional anti-reflection properties of the glasswing butterfly // Nature Communications. 16:69091DOL:10.1038/ ncooms 7909/ www.nature.com/naturecommunications. 2015. – P.1–8.

SURFACE TEXTURE INFLUENCE ON REFLECTION AND TRANSMISSION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

A.I. Kolesnikov, I.A. Kaplunov, K.A. Morozova, S.A. Tretiakov

The mathematical model and Software were developed which provide precise computation of electromagnetic radiation indicatrix, reflected and transmitted by transparent and opaque arbitrary shaped bodies, from any material with arbitrary surface patterns: polished, grind (accidentally-rough), and having artificial structured periodic texture with irregularities of arbitrary shape. The calculations for crystal surfaces of different materials were fulfilled – germanium, paratellurite, lithium niobate, plastics, glasses, metals, – the data on surface micropattern of which were obtained using NanoMap WLI1000 interferometric profilometer. The calculations results on aggregate transmission coefficients, reflection coefficients, and radiation indicatrix, coming out from modeling objects, and diffused reflection indicatrix to backward semisphere, were compared to its true readings, measured by lasers and laser power meters of ultraviolet and visible bands, and in IR band 2–20 μm – using Fourier spectrometer. Difference between experimental and computation data didn't exceed 2%. The time of full radiation parameters calculation for the most complex shape objects and having accidentally-rough surface didn't exceed 3–4 minutes, usually not more than 10 sec. The program permits to estimate the dependence of released heat in object for transparent objects. Calculations conversion from optical band to radiofrequency band (1 mm – 1 dm) envisages, first of all, obtaining information on some material constants for such wavelengths and, secondly, conducting of full-scale experiments using the corresponding equipment onsite with specially manufactured surface pattern.

Поступила 6 июня 2017 года.

Уважаемые читатели!

Указом Президента Российской Федерации от 5.12.2016 года №646 утверждена новая Доктрина информационной безопасности Российской Федерации.

Доктрина представляет собой систему официальных взглядов на обеспечение национальной безопасности страны в информационной сфере.

Согласно документу, стратегической целью обеспечения информационной безопасности в области обороны России является защита жизненно важных интересов личности, общества и государства, как от внутренних, так и от внешних угроз, которые связаны с применением информационных технологий в военно-политических целях.

Обеспечение безопасности – крайне важная и многогранная задача, требующая глубокого изучения всей проблематики в этой области.

В связи с этим редакция журнала предлагает своим читателям статью Т.П. Павловой «Методологические основы обеспечения технической безопасности в социо-техносфере», в которой всесторонне с гносеологических позиций рассматриваются вопросы обеспечения безопасности.

УДК [101.8:62] (075.8)

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СОЦИО-ТЕХНОСФЕРЕ

© Автор, 2018

Т.П. Павлова кандидат философских наук,
доцент кафедры, МАИ, г. Москва
E-mail: vptp52@mail.ru

Статья рассматривает проблему технической безопасности в социо-техносфере. Особое внимание уделяется информационной безопасности как разновидности технической деятельности. Предлагаются новые методологические принципы управления проектами создания инновационной техники, нацеленные на снижение технических рисков. Показано, что в ходе информационной технической революции изменяется не только объект инженерной деятельности, но и сама деятельность, которая становится сложной и требует вовлечения в работу системных инженеров.

Ключевые слова: техническая безопасность, информационная безопасность, технократический дискурс, инженерия, квантовые технологии, риск, системотехника.

The paper reviews the technical safety problem in socio- and technosphere. A special attention is addressed to information security as a form of technical activity. New methodology principles are proposed for management of innovation technology development projects aimed to decrease technical risks. It was demonstrated that informational and technological revolution changes not only an object of engineering activity but an activity itself which becomes more sophisticated and requires involvement of system engineers.

Keywords: technical safety precautions, information security, technocratic discourse, software engineering, quantum technology, risk, system engineering.

Совокупность нынешних глобальных преобразований в мире воспринимается как становление нового типа социума, обозначаемого с различных позиций как общество высоких технологий, общество глобального мирового порядка, информационное общество, общество риска. Современный мир с его неустойчивостью и нестабильностью представляет собой неравновесную систему, для которой актуальны проблемы её безопасности.

Понятие «безопасность» целесообразно рассматривать с позиций системного подхода. Под системой понимается целостное образование, состоящее из организационно взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, в которых протекают различные процессы, приводящие к количественным и качественным изменениям системы. Понятие безопасности неразрывно связано

с понятие опасности, и прежде чем говорить о безопасности, необходимо определить понятие «опасность».

Под опасностью понимается возможность перехода системы из текущего устойчивого состояния в нестабильное, а затем в критическое, с последующей её качественной деградацией. В связи с этим ущерб – ухудшение или потеря значимых для человека свойств системы, имеющие место в результате её деградации или видоизменения.

Обеспечение безопасности – создание в результате управления таких условий в системе, при которых действие факторов, вызывающих дестабилизацию системы, ослабляется, то есть происходит снижение опасности до приемлемого уровня. Техническую безопасность можно рассматривать в рамках сложной социо-техносферы, в которой протекают процессы различной направленности, как ведущие к поддержанию стабильности и развитию системы, так и к её деструкции. Главным элементом данной системы является человек. Человек имеет ряд потребностей и вытекающих из них целей. Реализуя свои цели, человек воздействует на протекающие в системе процессы, изменяя их естественный ход, что даёт как отвечающие поставленной цели результаты, так и другие. Опасными являются естественные или возникшие в результате человеческой деятельности процессы, противоречащие целям и потребностям человека, приводящие к ущербу. Особую роль играют те, которые связаны с технической деятельностью.

В связи с этим представляет интерес концепция Л. Мемфорда, изложенная в работе «Миф о машине», где он утверждает, что человек – не «делающее», а «мыслящее» существо. Потому его отличает не делание, а мышление, не орудие, а дух, являющийся основой сущности человека».

Л. Мэмфорд на основе своей антропологии устанавливает различие между основными типами техники: политехникой и монотехникой. Политехника, или биотехника, – это первоначальная форма делания. Это тот вид техники, который находится в гармонии с многообразными потребностями и устремлениями жизни и функционирует как бы в демократической манере при реализации самых разнообразных человеческих потенций. В противоположность этому виду монотехника, или авторитарная техника, базируется на научной интеллигенции и ориентирована, главным образом, на экономическую экспансию, материальное насыщение и военное превосходство, говоря иными словами – на власть.

Очень важно подчеркнуть мысль о том, что Л. Мэмфорд не является сторонником простого отвержения техники. Он ставит перед собой цель провести разумное разграничение между двумя видами техники, один из которых находится в гармонии и согласии с человеческой природой, а другой – нет. Технику поэтому следует поощрять лишь в том случае, если она способствует усилению того аспекта человеческого бытия, который Л. Мэмфорд называет «личным», но не ограничивает и не сужает человеческую жизнь рамками власти и силы [1].

Ещё в 30-х годах XX века Р. Мертон выдвинул идею, что социальный институт науки тесно связан с этосом науки, где зафиксированы определённые правила и нормы. Одной из таких норм является норма бескорыстности, которая фиксирует не только заинтересованность учёного, но и неподвластность деятельности учёного технократическому дискурсу.

Технократический дискурс основан на следующих постулатах – во-первых, современный мир – это техногенная цивилизация, мир техники, где всё может быть сведено к техническим проблемам. «Технически» истолковываются все основные сферы человеческой деятельности. Инженерия и проектирование предназначены для создания инженерных и технических проектов. Во-вторых, технически ориентированное сознание человека рационально и блокирует все формы мысли, угрожающие существованию технической реальности. Опасность технократического дискурса техники заключается в том, что он всё больше увеличивает вероятность невозможности прогнозирования результатов инженерной деятельности. «Никакое суждение не приемлемо, если это тормозит ход развития науки и техники. Это также отказ от морального суждения. Что касается разума, то его рациональные аргументы очень легко оказывается повернуть в нужную сторону», – считает В.П. Рачков [2].

Начиная с 1985 года, после создания и развития глобальных информационно-коммуникационных сетей с использованием космических средств обеспечения, вопросы, связанные с информационной безопасностью (ИБ) как разновидностью технической деятельности, отражены во всех сферах человеческой деятельности. Проблема ИБ связана не только с хакерскими атаками или вредоносным программным обеспечением, но и с угрозами пропаганды радикальных взглядов

в глобальной сети Интернет или распространением ложной информации, которая может спровоцировать дестабилизацию обстановки внутри государства.

Категория «информационная безопасность» возникла с появлением средств информационных коммуникаций между людьми, а также с осознанием человеком наличия у людей и их сообществ интересов, которым может быть нанесён ущерб путём воздействия на средства информационных коммуникаций, обеспечивающие информационный обмен между всеми элементами социума.

Если использование информационных технологий становится одним из условий развития современного человека, то не менее важным условием такого развития должна быть признана информационная безопасность человека. Развитие современных информационно-коммуникационных технологий, расширяя сферу свободы информационной деятельности, расширяет также сферу её анонимности, неконтролируемости и лёгкой репродуцируемости информации. В условиях интенсификации информационных процессов проблема информационной безопасности приобретает особую остроту. Следует подчеркнуть, что проблема эта имеет комплексный характер, включает широкий круг не только естественнонаучных, научно-технических и технологических, но и юридических, психологических, этических вопросов.

Широкое видение информационной безопасности как практической и теоретической проблем представлено в работе А.А. Малюка «Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации». Информационная безопасность рассматривает проблемы надёжной защиты информации (т.е. предупреждения её искажения или уничтожения, несанкционированной модификации, злоумышленного получения и использования и т.п.), проблемы защиты от информации (людей и технических, главным образом, электронных, систем от разрушающего воздействия информации), а также проблемы обеспечения требуемого качества информации [3]. Общее определение информационной безопасности выглядит следующим образом: «Информационная безопасность – такое состояние рассматриваемой системы, при котором она, с одной стороны, способна противостоять дестабилизирующему воздействию внешних и внутренних информационных угроз, а с другой – её функционирование не создаёт угроз для элементов самой системы и внешней среды» [4]. Такой подход открывает возможности рассмотрения информационных угроз как для отдельных, так и для целых комплексов в различных ракурсах, которые могут относиться к самым разным информационным системам, включая живые и наделённые естественным интеллектом.

Современные научные исследования и следующие за ними технологические разработки, порождающие новые перспективы развития информационных технологий, ежедневно порождают вызовы информационной и технической безопасности. Иначе говоря, самостоятельность информационной составляющей в онтологическом многообразии мира определяется уже тем обстоятельством, что различия лишены материально или энергетически чувственного содержания – вся их реальность заключена в дифференцированности или сорасчленённости самой по себе, в «движении различения».

Александр Львовский [р. 1974] – доктор наук, профессор кафедры физики и астрономии университета Калгари, США, автор многих работ по квантовой физике, считает, что многие принципиальные открытия получаются совершенно случайно, и заслуга принадлежит именно фундаментальной науке. Изобретение транзистора стало основой для всей полупроводниковой электроники, компьютеров, Интернета, только благодаря развитию именно фундаментальной науки. Эффект этого открытия оказался намного выше, чем эффекты большинства прикладных разработок, которые, казалось бы, быстрее, чем фундаментальные науки, принесут свои плоды. И это явилось ускорителем проблем информационной и технической безопасности.

Другой глобальной вехой в развитии науки, определяющей информационные и технические проблемы безопасности, стали разработки в области квантовой физики. Гениальный физик XX века Ричард Фейнман как-то сказал, что квантовую физику вообще никто не понимает. И действительно, над кажущимися противоречивыми самым основам здравого смысла явлениями корпускулярно-волнового дуализма, квантовой интерференции, переплетённости и нелокальности вот уже на протяжении века ломают голову физики, занимающимися фундаментальными исследованиями. А с другой стороны, квантовые технологии становятся определяющим фактором технологического развития общества в будущем.

В 2012 году Нобелевскую премию в области физики получили французский ученый Серж Арош и американский ученый Дэвид Уайнленд за новаторские экспериментальные методы, позво-

ляющие измерять и контролировать отдельные квантовые системы. Квантовый компьютер изменит мир сильнее, чем это сделал персональный компьютер, дав возможность решать те задачи, которые сейчас кажутся неразрешимыми. И даже такие относительно простые технологии, как квантовые симуляторы, квантовые датчики, абсолютно защищённые квантовые коммуникации, которые могут появиться на пути к созданию квантового компьютера, имеют значительный потенциал практического применения и коммерциализации.

Но квантовые технологии могут нести и опасность: эра квантовых технологий идёт на смену нанотехнологии. Индивидуальные структуры в электронике уже стали предельно малы и сегодня они достигают нанометровых размеров (нанометр = 10^{-9} м, а размер атома = 10^{-10} м) и рано или поздно человечество вплотную подойдёт к фундаментальной границе, когда транзистор будет размером в атом вещества. А дальше наступает полная неизведанность. Микромир, живущий по своим законам, совершенно отличен от мира больших предметов, в котором живём мы. Все знания, умения и опыт человечества, накопленные за последние 100 лет, могут оказаться непригодными в изучении квантового мира. Единственное, в чём мы уверены, – развитие не остановится, и мы перейдём в новую технологическую эру. Однако, по мнению А. Львовского, это затронет и изменение сущности самого человека, так как «благодаря достижениям квантовых и биотехнологий мы научимся интегрировать технические и биологические системы» [5]. А это даёт возможность усилить деятельность самого человеческого мозга.

Эту же тему изменений, происходящих в социуме с появлением технауки, отмечает и Б. Латур, который является основоположником акторно-сетевой теории. Акторно-сетевая теория представляет собой концептуальную основу для изучения коллективных социотехнических процессов. Её сторонники предполагают, что функционирование науки принципиально не отличается от функционирования других социальных явлений. Производство научных знаний они не объясняют ни через природу (научный реализм), ни через культуру (социальный конструктивизм). Вместо этого они считают, что наука представляет собой процесс гетерогенной инженерии, в котором социальные, технические, концептуальные и текстуальные компоненты соединены вместе и трансформированы (или переведены). Как и другие антиэссенциалистские подходы, акторно-сетевая теория не делает различий между науками (знаниями) и технологиями (артефактами). Её сторонники не соглашались с противопоставлением общества и природы, истины и лжи, процессов и структур, текста и контекста, человеческого и нечеловеческого, знания и власти. Всё, что принято называть природой, обществом, субъективностью, структурой, фактом и вымыслом, всё это производится в результате совместной активности людей и «не-человеков» (*nonhumans*). Наука, таким образом, предстаёт как сеть гетерогенных элементов, соединённых набором разнообразных практик [6].

Б. Латур в статье «Дайте мне лабораторию, и я переверну мир» анализирует работу лабораторий в новом смысле, обращаясь при этом к опытам и деятельности Луи Пастера, который занимался изучением микроорганизмов. Разделяя проблемы «микро» и «макро» уровней, Латур отмечает: «... имеет место разделение труда между исследователями организаций, институтов, общественной стратегии, с одной стороны, и людьми, изучающими разногласия на микроуровнях внутри научных дисциплин, – с другой. Уловить общие черты среди этих разнонаправленных тематик настолько сложно, что люди склоняются к идее существования «макроскопических» проблем и к необходимости отдельного рассмотрения двух уровней исследования, осуществляемых учёными с различной специализацией, с помощью различных методов» [7]. Суть в том, что, когда мы переходим границу макроскопического мира, мира больших тел, в котором мы живём в микроскопический мир, мир элементарных частиц, начинают действовать совсем другие физические законы. Они для нас совершенно необычны, но предоставляют нам массу новых возможностей, и наша задача – научиться этими законами пользоваться, чтобы они нам помогали строить новую технику на основе квантовых законов, т.е. научиться управлять сложными квантовыми системами на уровне их индивидуальных компонентов. Прежде всего Б. Латур говорит об осознании скрытых технологических возможностей исследовательской деятельности, в результате которых меняются функции лаборатории. Они становятся обителью прикладной науки, т.е. науки, ориентированной на создание и совершенствование технологий. Именно лаборатории выступают в качестве отправной точки научно-технического прогресса. Латур пишет, что учёные «будут делать всё от них зависящее, чтобы распространить повсюду некоторые из условий, способствующих воспроизведению

благоприятных лабораторных практик. Поскольку научные факты производятся внутри лабораторий, то для обеспечения их свободного распространения необходимо создать дорогостоящие сети» [8].

В области технической информатики в направлении систем искусственного интеллекта быстро развивается научное направление нейроинформатики, связанное с исследованием и разработкой нового поколения средств информатики, в основе которых лежат принципы нейронных сетей и нейросетевых алгоритмов решения плохо формализованных задач. Ещё одно перспективное направление – наноинформатика, связанное с изучением, разработкой методов создания и поисков практического применения суперминиатюрных устройств информатики на основе использования нанотехнологий, обеспечивающих возможность искусственного синтеза новых материалов с помощью сборки их молекул из отдельных атомов.

На стыке технической и физической информатики начало формироваться новое научное направление, получившее название квантовой информатики. Оно состоит в изучении на квантовом уровне информационных свойств элементарных частиц материи и возможности создания на их основе принципиально новых средств информационных технологий, позволяющих передавать, хранить и обрабатывать информацию. В качестве носителей информации возможно использование фотонов – поляризованных частиц света, а также атомов вещества и т.д. Техническая реализация этих исследований может привести уже в ближайшие годы к появлению квантовых компьютеров, на порядки превосходящих в своей вычислительной производительности современные ЭВМ. Проблема создания квантовых компьютеров потребует также и создания нового направления в информатике – квантового программирования.

В области социальной информатики на первый план выходит проблема по созданию и эффективности использования информационных технологий электронного обучения, за рубежом получивших название *e-learning*. Исключительно актуальными также являются новые проблемы, связанные с обеспечением информационной и информационно-психологической безопасностью человека и общества. К ним можно отнести проблемы виртуализации общества, манипуляции общественным сознанием, информационного неравенства и многие другие. К. Колин показывает, что для решения вышеуказанных проблем понадобится развитие теоретических основ социальной информатики, создания теории социального информирования, а также исследования фундаментальных закономерностей реализации информационных процессов в социальной сфере [9].

Биоинформатика находится на стыке биологических, медицинских и физико-математических наук. Она охватывает широкий круг сложных и актуальных проблем и считается одним из важнейших направлений развития науки в XXI веке. Предметом исследования для неё являются информационные процессы в биологических системах, живых организмах и растениях. В последние годы появился ряд публикаций об экспериментах, свидетельствовавших, что биоинформатика имеет дело с новыми, ещё не изученными явлениями информационного взаимодействия, которые происходят в процессе функционирования и развития объектов живой природы. Изучение этих явлений методами информатики позволит раскрыть не только новые фундаментальные закономерности реального мира, но и использовать их при создании новых средств технической информатики [10].

В процессе применения открытых естественными науками законов для проектирования, конструирования, функционирования и совершенствования техники и технологии эти законы нужно не только модифицировать в форму, возможную для этого применения, но и воплотить их в новой технике и технологии. Этот процесс является наиболее трудным, ответственным и интересным в инженерной деятельности. Именно он придаёт этой деятельности творческий характер. Творчество – одна из важнейших характеристик инженерной деятельности. «Всё творчество сосредоточивается в области техники, – пишет Жак Эллюль (1912–1994), французский философ, социолог и юрист – и миллионы технических объектов выступают свидетельством этого творческого размаха, намного более поразительного, чем всё то, что сможет произвести художник или музыкант» [11].

Чтобы стать инженером, нужно иметь аналитический, математический склад ума, понимать физический смысл законов природы и, конечно же, иметь тягу и любовь к технике, умение правильно и вовремя использовать свои научные знания для решения инженерной задачи. Инженер в процессе своей деятельности непременно учитывает экономические, эргономические, организационные и другие факторы. Таким образом, для обеспечения технической безопасности инженер обязан:

– прогнозировать последствия своей деятельности;

- переводить непрогнозируемые последствия своей деятельности в прогнозируемые;
- разрабатывать методы и средства коррекции опасных последствий.

Риски тесно связаны с прогнозируемой тяжестью последствий возможных отказов, выявляемых по результатам системного анализа исследуемого технического объекта. Применяемая в настоящее время разработчиками классификация рисков для технических объектов с краткой характеристикой последствий отказов приведена в таблице (ГОСТ Р 51901.12-2007).

Таблица

Класс тяжести	Наименование отказа	Описание последствий
IV	Катастрофический	Отказ может привести к прекращению выполнения первичных функций системы и вызывает тяжёлые повреждения системы и окружающей среды и/или гибель и тяжёлые травмы людей
III	Критический	Отказ может привести к прекращению выполнения первичных функций системы и вызывает значительное повреждение системы и окружающей среды, но не представляет собой серьёзной угрозы жизни или здоровью людей
II	Минимальный	Отказ может ухудшить выполнение функций системы без заметного повреждения системы или угрозы жизни и здоровью людей
I	Ничтожный	Отказ может ухудшить выполнение функций системы, но не вызывает повреждений системы и не создаёт угрозы жизни и здоровью людей

При проведении анализа используется ряд терминов, уже устоявшихся и определённых в основных нормативно-технических документах. Однако и в настоящее время возникают спорные ситуации, при которых приведённая в таблице классификация тяжести последствий может зависеть от однозначности определения основных терминов и критериев, применяемых при анализе (для разработчиков это определяется чёткостью формулировок в техническом задании на технический объект). Для этого необходимо выбирать значения приемлемого риска.

Приемлемый риск сочетает в себе технические, экологические, социальные аспекты и представляет некоторый компромисс между приемлемым уровнем безопасности и экономическими возможностями его достижения, т.е. можно говорить о снижении, технического или экологического риска отдельно взятого технического объекта, но нельзя забывать о том, сколько за это придётся заплатить и каким в результате окажется риск на уровне вышестоящей системы (технического изделия или их совокупности, системы «человек-машина», системы «человек-машина-окружающая среда»).

Современный подход к моделированию сложных технических систем представляет собой синтез решений, направленных на выполнение задач функционирования и развития системы при сохранении её системных свойств. Моделирование позволяет выбрать оптимальные воздействия на элементы системы путём управления, направленного на поддержание её функционирования. Исследование сложных систем осложнено выбором определяющих факторов. На начальном этапе сложно определить значимость каждого фактора. При этом учёт всех возможных факторов ведёт к усложнению модели системы и к невозможности эффективного анализа её функционирования.

Наиболее перспективным подходом к анализу сложных технических систем является междисциплинарный синергетический подход, основные принципы которого были заложены Г. Хакеном и И.Р. Пригожиным. В данном подходе развитие открытой нелинейной сложной системы представляется как скачкообразный переход из одного устойчивого состояния в другое, а также как возможность самоорганизации системы вследствие флуктуации её параметров. Важным понятием при синергетическом подходе к анализу сложных систем является параметр порядка, существенно снижающий сложность описания системы путём замены множества факторов несколькими переменными, которые позволяют предсказать дальнейшее развитие системы. Корректный выбор параметров порядка является одной из важных задач при синергетическом анализе систем аэрокосмического комплекса. В настоящее время нет единого подхода к определению параметров порядка.

Создание такого подхода первоначально следует формировать, постепенно переходя от анализа одной подсистемы к комплексу, образующему целостную сложную систему. В результате должны быть получены общие закономерности, позволяющие определять параметры порядка не только для сложных технических систем, например, космического аппарата, но и для разнообразных социотехнических систем, где требуется формализация взаимодействия человека и машины – космодром Восточный, Международная Космическая станция.

Космические информационные системы являются одной из важнейших составляющих технической базы информационной инфраструктуры страны. Поэтому их информационную безопасность следует рассматривать в общем русле проблемы информационной безопасности России. Проанализируем в этом контексте основные закономерности и тенденции, связанные с данной проблемой:

- информация, включающая в себя постоянно обновляемые знания и различного рода сведения, превращается в ключевой информационный ресурс, определяющий эффективное и разумное использование природных богатств, труда и капитала;
- космические системы, благодаря присущей им природной глобальности, являются адекватными средствами для создания технической базы информационной инфраструктуры;
- политика безопасности информации в организации – совокупность документированных правил, процедур, практических приёмов или руководящих принципов в области безопасности информации, которыми руководствуется организация в своей деятельности;
- политика безопасности информационно-телекоммуникационных технологий – правила, директивы, сложившаяся практика, которые определяют, как в пределах организации и её информационно-телекоммуникационных технологий управлять, защищать и распределять активы, в том числе критичную информацию.

Действительно, спутниковые системы связи и передачи данных для огромной территории России с рассредоточенными на ней населёнными пунктами, являются, наверное, единственными экономически целесообразными средствами создания сетей связи средней производительности (до 150 Мбит/с), а также объединения в единую сеть существующих разнотипных наземных сетей.

В России космическая навигационная система ГЛОНАСС потенциально обеспечивает глобальное и непрерывное получение информации о географическом положении и едином времени неограниченному количеству самых разнообразных «потребителей» (всем видам наземного, воздушного и водного транспорта, спутникам, а также отдельным лицам).

Отдельно можно отметить развитие системного анализа рисков в технических системах, что дало толчок появлению нового научного направления – системотехнике. Системотехника, возникшая в США в начале 50-х годов, описывает своеобразные «правила поведения» инженера, конструирующего сложные системы. Основными задачами системотехники являются:

- выявление и описание наиболее общих системных характеристик и закономерностей, не зависящих от конкретного типа технических комплексов, но определяющих степень риска;
- разработка экспериментальных методов, разрешающих с достаточным уровнем достоверности и при условии приемлемого объёма ресурсов оценить или спрогнозировать ожидаемую степень риска и способов её понижения;
- разработка методов реализации принципов системотехники при создании и использовании конкретных систем с требуемым уровнем безопасности (низким риском).

В научной литературе встречается весьма различная трактовка термина «риск» и в него иногда вкладываются отличающиеся друг от друга содержания. Например, риск в терминологии экономиста, понимается как мера возможных последствий, которые проявятся в определённый момент в будущем. Ряд трактовок раскрывает риск как вероятность возникновения несчастного случая, опасности, аварии или катастрофы при определённых условиях (состоянии) производства или окружающей человека среды. В различных отраслях промышленности оперируют другим термином «опасность», что в принципе означает то же самое [12].

Общим во всех применяемых трактовках является то, что риск включает неуверенность, произойдёт ли нежелательное событие и возникнет ли неблагоприятное состояние. Заметим, что в соответствии с современными взглядами риск обычно интерпретируется как вероятностная мера возникновения техногенных или природных явлений, сопровождающихся возникновением, формированием и действием опасностей, и нанесённого при этом социального, экономического, экологического и других видов ущерба и вреда.

Применение понятия риск, таким образом, позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий. Риск, фактически, есть мера опасности. Часто используют понятие «степень риска» (*Level of risk*), по сути не отличающееся от понятия «риск», но лишь подчеркивающее, что речь идёт об измеряемой величине.

Все названные (или подобные) интерпретации термина «риск» используются в настоящее время при анализе опасностей и управлении безопасностью (риском) технологических процессов и производств в целом. Формирование опасных и чрезвычайных ситуаций – результат определённой совокупности факторов риска, порождаемых соответствующими источниками. Схематично ключевые моменты теории анализа рисков показаны на рисунке.

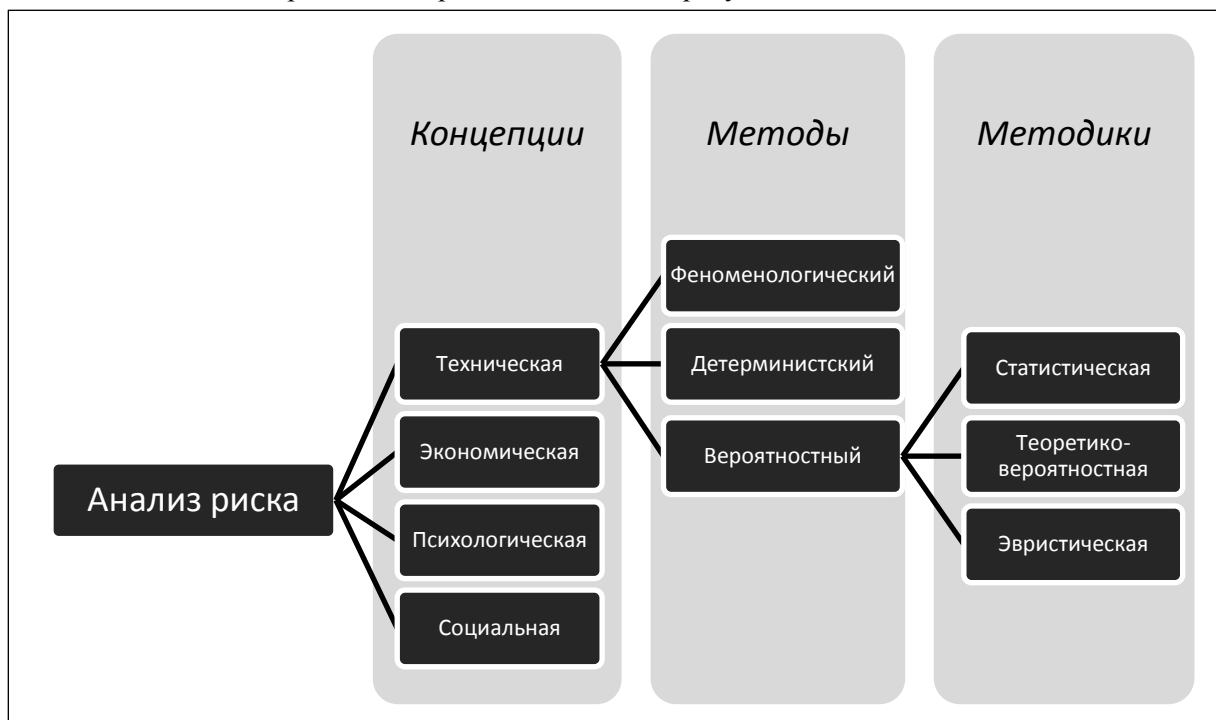


Рис. Структура анализа рисков

Применительно к проблеме безопасности технического объекта таким событием может быть авария или катастрофа технической системы или устройства, загрязнения или разрушение экологической системы, гибель группы людей или возрастание смертности населения, материальный ущерб от реализовавшихся опасностей или увеличения затрат на безопасность.

Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать индивидуальный, технический, экологический, социальный и экономический риск. Каждый вид его обуславливают характерные источники и факторы риска.

Техническая безопасность инженерной деятельности зависит:

- от степени изученности законов и механизмов развития процессов, которые инженерная деятельность затрагивает;
- от уровня развития средств и методов управления этими процессами.

Таким образом, развитие науки и техники необходимо рассматривать как целостный процесс, обусловленный не только собственно научными или техническими факторами, но также отражающий социальные взаимодействия. Следует периодически пересматривать в соответствии с изменяющимися условиями методики обеспечения технической безопасности. Чем достовернее эти знания, тем эффективнее деятельность, точнее прогнозы её последствий, эффективнее управляющие воздействия по предотвращению нежелательных последствий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мемфорд Л. Миф о машине: техника и развитие человечества. – М.: Логос, 2001.
2. Рачков В.П. Техника и ее роль в судьбах человечества. – Свердловск: Упринформпечать, 1991. – С.205.

3. **Малюк А.А.** Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – С.5–8.
4. Там же. С.12.
5. URL: <http://zarubegom.com/vy-dayushhiesya-lichnosti-russkogo-kalgari-aleksandr-i-vovskij-odin-samy-h-izvestny-h-v-mire-ucheny-h-v-oblasti-kvantovoj-fiziki> (дата обращения: 02.12.2016).
6. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%BED1%81%D0%B5%D1%82%D0%B5%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F (дата обращения: 27.11.2016).
7. **Латур Б.** Дайте мне лабораторию, и я переверну мир / пер. с англ. П. Куслий. – М.: Логос, 2002. – URL: <http://www.ruthenia.ru/logos/number/35/10.pdf>. – С.211–242.
8. Там же. С. 27–28.
9. **Колин К.К.** Эволюция информатики // Информационные технологии. – 2005, №1.
10. **Колин К.К.** Становление информатики как фундаментальной науки и комплексной научной проблемы // Сборник научных трудов «Системы и средства информатики» // спец. выпуск «Научно методологические проблемы информатики» / под ред. К.К. Колина. – М.: ИПИ РАН, 2006.
11. **Эллюль Ж.** Другая революция // Новая технократическая волна на Западе. – М., 1986. – С.148.
12. **Бехман Г.** Современное общество: общество риска, информационное общество, общество знаний. – 2-е изд. – М.: Логос, 2011. – С.73–75.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF TECHNICAL SAFETY PRECAUTIONS IN THE SOCIO- AND TECHNOSPHERE

T.P. Pavlova

The paper reviews the technical safety precautions problem in socio- and technosphere. The technical safety is examined as an element of complex techno system where processes are in progress in various directions, resulting in both system stability and development and in its degradation. Special attention is focused on information security as a form of technical activity related to research and development of a new generation computer technology means. Key risk points in Aerospace industry were analyzed. The conclusion substantiated that the requirements to engineering activity have been changing during technical revolution; new methodological principles are forming for management of innovative technology development projects.

Поступила 25 января 2017 года.

ЗАДАЧА ВЫБОРА И КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ ВАРИАНТОВ ГРУППИРОВОК ЗЕНИТНЫХ РАКЕТНЫХ ВОЙСК СМЕШАННОГО ТИПА ДЛЯ УСЛОВИЙ ПОЛИСЦЕНАРНОЙ БАЗЫ

© Авторы, 2018

С.Л. Старчак доктор технических наук, доцент, советник РАН,
профессор Учебного военного центра Военного института, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
E-mail: starchak@bmstu.ru

В.В. Храмшин
преподаватель, ЯВВУ ПВО, г. Ярославль
E-mail: khramshin_vasily@mail.ru

Сформулированы общая и частные задачи, уточнены критерии оптимальности и разработаны методики выбора вариантов группировок зенитных ракетных войск смешанного состава, оптимальных для заданных условий полисценарной базы и технико-экономической концепции развития ВВСТ.

Ключевые слова: боекомплект, группировка зенитных ракетных войск смешанного состава, сценарий, полисценарная база, целевая функция, обобщённое расстояние Хемминга, метод наименьших квадратов.

The general and specific tasks were stated, optimality criteria were specified, the selection techniques for variants of mixed air missile defense forces grouping were developed which are optimal for predetermined conditions of poly-scenario base and technical-and-economic concept of weapons, military and special equipment (WMSE) development.

Keywords: ammunition allowance, mixed air missile defense forces grouping, scenario, poly-scenario base, object function, Hemming generalized distance, least square method.

В ряду стратегических направлений развития зенитных ракетных войск (ЗРВ) может быть выделена задача комплексирования разнотипных информационных и огневых средств в рамках группировки смешанного состава [1].

Особенностью группировок смешанного состава будет являться наличие различных по тактико-техническим характеристикам средств перехвата (ЗУР). При этом, ЗУР ни одного из типов не обеспечивает перехват всех типов целей, с учётом условий фоно-целевой и помеховой обстановки, с эффективностью, не ниже заданной. Полагая, что информационное обеспечение и управление средствами группировки смешанного типа может быть реализовано с требуемой эффективностью, а для боевого применения каждого типа ЗУР в состав группировки могут быть введены соответствующие технические средства, тогда эффективность группировки может быть поставлена в зависимость от количественного и качественного состава ЗУР, т.е., от суммарного боекомплекта всех зенитных ракетных комплексов (ЗРК), включённых в группировку. Другим обстоятельством, заслуживающим внимания и требующим адекватного учёта при обосновании требований к перспективным группировкам ЗРВ смешанного состава, является широкий диапазон оперативно-тактических условий возможных сценариев боевых действий, в рамках которых ЗРВ должны решать боевые задачи. Очевидно, что создание нескольких вариантов группировок, даже под наиболее вероятные сценарии, по ряду очевидных причин, и нецелесообразно, и невозможно [2–4]. Таким образом, данные обстоятельства обуславливают современную актуальность задачи развития научно-методического аппарата обоснования требований к составу и характеристикам разнородного боекомплекта группировки зенитных ракетных войск смешанного состава, оптимального для заданных условий полисценарной базы и технико-экономической концепции развития ЗРВ.

Рассмотрим гипотетическую группировку ЗРВ смешанного состава, представленную совокупностью различных ЗРК, обеспечивающих применение одного и более типов ЗУР. В рамках группировки ЗРК интегрированы с информационно-управляющей системой. В состав группировки может быть включено любое средство из множества технически реализуемых $t_i \in T$.

Условия функционирования группировки ЗРВ представляются в виде возможных сценариев (вариантов ударов воздушного противника), образующих полисценарную базу $S = \{s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_{\bar{j}}\}$. Элементы полисценарной базы определяют составы и характеристики средств нападения, вспомогательных (обеспечивающих) средств, а также множество параметров, характеризующих условия, влияющих на процессы и эффективность функционирования компонентов группировки ЗРВ, при этом каждый сценарий характеризуют коэффициенты условной вероятности реализации p_j и относительной степени угрозы λ_j . Множества $P = \{p_j\}$ и $\Lambda = \{\lambda_j\}$ задают композицию частных сценариев в рамках данной полисценарной базы, позволяя, взвесив каждый из сценариев, выделить наиболее вероятный по возможности реализации и наиболее опасный по степени угрозы частные сценарии на рассматриваемом временном периоде. Каждый тип ЗРК описывается набором параметров $t_i = \{\{p\}_i, \{x\}_i, b_i, \{r\}_i\}$, где $\{p\}_i$ – признаки класса, типа и вида ЗРК, состав его основных средств; $\{x\}_i$ – тактико-технические характеристики ЗРК; b_i – боекомплект ЗРК i -го типа; $\{r\}_i$ – географические координаты дислокации ЗРК i -го типа. Варианты группировок ЗРВ образуют дискретное множество G , $G = \{g_\alpha\}$ $\alpha = 1, 2, \dots, \alpha, \dots, \bar{\alpha}$ и могут быть построены путём сочетания различных типов ЗРК, включаемых в состав группировки. В формализованном виде состав произвольной группировки представляется набором ЗРК: $g_\alpha = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_{\bar{i}}\}$, или $g_\alpha = \{\tau_i\}$, $i = 1, 2, \dots, i, \dots, \bar{i}$, где τ_i – количество ЗРК i -го типа, включённых в группировку. Интеграция ЗРК с управляющей системой, заданной совокупностью параметров Y , осуществляется на основе принципов построения системы обороны π . Допустимые варианты управляющей системы (ИУС) и варианты принципов построения заданы дискретно и образуют, соответственно, дискретные множества: $\{Y_\beta\}$, $\beta = 1, 2, \dots, \beta, \dots, \bar{\beta}$ и $\{\pi_\chi\}$, $\chi = 1, 2, \dots, \chi, \dots, \bar{\chi}$. Условия и ограничения заданы доктринальными положениями D , включающими:

$W_D^{ТРЕБ}$ – требования к эффективности противодействия средствам воздушно-космического нападения (СВКН) противника и устойчивости функционирования в условиях огневого и радиоэлектронного противодействия;

C_{lim} – ограничения на максимальную величину выделяемых ассигнований на создание и развитие группировки ЗРВ на рассматриваемом временном интервале.

Обоснование требований к облику группировки ЗРВ логично формализовать как некоторую задачу математического программирования – задачу выбора из множества вариантов G такого варианта состава g_α (оптимального), для которого, при выполнении ряда ограничений, некоторая целевая функция достигает экстремума:

$$F(g_\alpha) \rightarrow \min_{g_\alpha \in G}. \quad (1)$$

При этом действуют следующие ограничения:

– в состав группировки могут быть включены только реализуемые типы ЗРК:

$$\varphi_1(g_\alpha, T); \quad (2)$$

– группировки должны строиться на единых принципах:

$$\varphi_2(g_\alpha, \{\pi_\chi\}); \chi = 1, 2, \dots, \chi, \dots, \bar{\chi}; \quad (3)$$

– характеристики ИУС неизменны для всех вариантов группировок:

$$\varphi_3(g_\alpha, \{Y_\beta\}); \beta = 1, 2, \dots, \beta, \dots, \bar{\beta}; \quad (4)$$

– ограничения, вытекающие из доктринальных положений и устанавливающие требования к группировкам по реализуемой, минимально допустимой эффективности решения задач обороны (задача I), либо по заданной максимальной стоимости группировки (задача II), соответственно:

$$\varphi_4(g_\alpha, S) \geq W_D^{TPEB} \forall g_\alpha \in G \text{ или } \varphi_5(g_\alpha, S) \leq C_{\text{lim}} \forall g_\alpha \in G. \quad (5)$$

С учётом принятых выше условий и допущений в отношении группировки ЗРВ смешанного состава, будем полагать, что определение количественного и качественного состава боекомплекта $g_\alpha = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_k\}$, являющегося решением задачи (1)–(5), аналогично определению оптимального состава группировки ЗРВ смешанного состава. Очевидно, что в результате военно-технического анализа полисценарной базы в контексте каждого частного сценария могут быть определены оперативно-тактические требования к группировке и на их основе синтезирована оптимальная группировка такая, что $\{s_j\} \Rightarrow \{g_j\}$, $f(g_j | s_j) \Rightarrow \text{extr}$, $j = \bar{1}, \bar{J}$, J – общее число сценариев. Тогда, в соответствии с постановкой (1)–(5), критерий выбора разнородного боекомплекта группировки ЗРВ смешанного состава, оптимального для полисценарной базы, должен учитывать ряд факторов: разнокачественность частных сценариев, технико-экономические условия и ограничения создания группировки и степень соответствия параметров группировки предъявляемым к ней требованиям. Определение коэффициентов относительной вероятности реализации сценариев $P = \{p_j\}$ является трудно формализуемой задачей и, на данный момент, их значения могут быть получены только в рамках метода экспертных оценок [5–7]. Определение относительных коэффициентов степени угрозы $\Lambda = \{\lambda_j\}$ является, по существу, самостоятельной научной задачей, поскольку требует комплексного анализа и учёта большого количества разноплановых факторов, процессов и явлений. В качестве возможных подходов к определению $\Lambda = \{\lambda_j\}$ может быть указан ряд известных способов, отличающихся полнотой, точностью и простотой получения результата, таких как:

- метод экспертных оценок [5–7];
- имитационное моделирование двухсторонних боевых действий [8, 9];
- аналитическая оценка потенциального ущерба от потерь различных категорий. Так, например, потенциальный ущерб может быть представлен функцией вида:

$$\lambda_j = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L k_{ml} \alpha_l d_l, \quad (6)$$

где k_{ml} – коэффициент приведения к единой шкале меры, L – количество категорий потерь, α_l – коэффициент важности категории, d_l – относительное изменение категории l ($d_l = \frac{d_{\text{уничтожен}}}{d_{\text{начальное}}}$).

В целях ограничения объёма исследований будем полагать значения $\{p_j\}$ и $\{\lambda_j\}$ заданными в качестве исходных данных. Отметим, что значения $\{p_j\}$ и $\{\lambda_j\}$ удовлетворяют условиям:

$$\sum_{j=1}^J p_j = 1 \text{ и } \sum_{j=1}^J \lambda_j = 1. \quad (7)$$

Задачи создания боекомплекта группировки ЗРВ смешанного состава для условий полисценарной базы с учётом (5) могут быть сформулированы в следующих трактовках:

А. Построить группировку ЗРВ смешанного состава фиксированной стоимости, обладающую лучшей эффективностью на заданной полисценарной базе.

Б. Построить группировку ЗРВ смешанного состава средств с заданной эффективностью, обладающую лучшей стоимостной характеристикой на заданной полисценарной базе.

Отметим, что оперативно-тактические требования, сформулированные для различных сценариев, могут отличаться по количеству и типу потенциальных целей и оперативности их поражения. Но в случае постановки вида Б), требования по эффективности для каждого сценария окажутся одинаковыми. Т.е., вне зависимости от количества и типов целей, времени боевой работы задача по уничтожению средств противника должна быть выполнена с вероятностью не ниже $P_{ТРЕБ}$.

Группировки, построенные в соответствии с постановкой А), обладают одинаковыми стоимостями, ограниченными сверху величиной C_{lim} , и максимальными эффективностями для соответствующих сценариев:

$$c(g_1 | s_1) \approx c(g_2 | s_2) \approx \dots \approx c(g_j | s_j) \approx \dots \approx c(g_J | s_J) \leq C_{lim}, w(g_j | s_j) \rightarrow \max. \quad (8)$$

Группировки, построенные в соответствии с постановкой Б), обладают одинаковыми оценками эффективностями, ограниченными снизу значением $W_{ТРЕБ}$, и минимальными стоимостями для соответствующих сценариев:

$$w(g_1 | s_1) \approx w(g_2 | s_2) \approx \dots \approx w(g_j | s_j) \approx \dots \approx w(g_J | s_J) \geq W_{ТРЕБ}, c(g_j | s_j) \rightarrow \min. \quad (9)$$

Поясним на простом примере. Есть два сценария. В рамках первого сценария группировка g_1 осуществляет уничтожение n_1 целей за время не более Δt_1 с вероятностью P_1 . В рамках второго сценария группировка g_2 осуществляет уничтожение средств противника из n_2 целей за время Δt_2 с вероятностью P_2 . При этом $n_1 \neq n_2$, $\Delta t_1 \neq \Delta t_2$, группировки g_1 и g_2 имеют разный качественный и количественный состав, а оценки вероятности выполнения ими боевой задачи будут одинаковыми: $P_1 = P_2 = P_{ТРЕБ}$, например, 0.9. Независимо от варианта постановки задачи синтеза, каждая из построенных группировок будет оптимальна только для одного сценария и может обладать той или иной степенью рациональности для остальных сценариев. То есть, эффективность группировки $g_j, g_j \in \{g_j\}$, построенной для условий сценария $s_j, s_j \in \{s_j\}$, в рамках сценария $s_i, s_i \in \{s_j\}, i \neq j$, в общем случае, может быть меньше или больше, чем $w(g_j | s_j)$. Дифференцированность сценариев приводит к необходимости учёта, при выборе лучшей группировки, вероятности реализации и степени угрозы каждого сценария (7), а критерий выбора искомой группировки будет иметь следующую формулировку.

Для условий постановки А

Оптимальной на взвешенной полисценарной базе будет группировка, обладающая минимальным средневзвешенным отклонением в меньшую сторону по эффективности на множестве заданных сценариев:

$$g_j(\{s_j\}) \rightarrow opt : R^w(g_j) \rightarrow \min, \quad (10)$$

где $R^w(g_j)$ – функция средневзвешенного отклонения по эффективности g_j группировки на полисценарной базе.

То есть, должна быть выбрана группировка, которая обеспечивает минимальный уровень невыполнения боевых задач в условиях других сценариев.

В качестве теоретической основы для оценки показателя критерия (10) принято определение обобщённого расстояния Хемминга [10–12], адаптированного под специфику исследуемой задачи. Физический смысл критерия (10) может трактоваться как выбор варианта решения, которое находится на минимальном удалении от центра, задаваемого наиболее вероятным сценарием, наиболее угрожаемым сценарием и сценарием, в рамках которого группировка вносит наибольший вклад в уничтожение СВКН противника. Методика, реализующая выбор субоптимальной группировки в условиях ресурсных ограничений (1)–(5) с учётом критерия (10), будет иметь следующее построение. Исходными данными методики являются: $S = \{s_j\}$, $s_j = \{p_j, \lambda_j, k'_j\}$, $j = \overline{1, J}$ – полисценарная база, каждый из сценариев которой взвешен по вероят-

ности реализации p_j , степени угрозы λ_j и вкладу СВКН k'_j , J – общее количество сценариев; $G = \{g_i\}$ – множество вариантов группировок, построенных в рамках задачи I и соответствующих частным сценариям $g_i = f(s_j)$, $i = j$, $i = \overline{1, I}$, $I = J$; $W = \{w_i\}$ – оценки показателей эффективности оптимальных вариантов группировок для частных сценариев $w_i = f(g_i | s_j)$, $i = j$.

Взвешивание сценариев по вкладу СВКН осуществляется путём нормирования коэффициентов относительного вклада СВКН в эффективность боевых действий противника:

$$k'_j = \frac{K_{Vj}}{\sum_{j=1}^J K_{Vj}}. \quad (11)$$

Алгоритм методики содержит следующие построения:

1. Для каждого варианта группировки $g_i, i = \overline{1, I}$ оценивается показатель эффективности $w_{ij} = f(g_i, s_j)$, $i \neq j, j = \overline{1, J}$ и строится массив показателей эффективностей множества группировок на полисценарной базе:

$$W(I, J) = \begin{Bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1j} & \dots & w_{1J} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2j} & \dots & w_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{i1} & w_{i2} & \dots & w_{ij} & \dots & w_{iJ} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{I1} & w_{I2} & \dots & w_{Ij} & \dots & w_{IJ} \end{Bmatrix}, \quad (12)$$

где w_{ij} – оценка показателя эффективности i -ой группировки для условий j -го сценария, если $i = j$, то w_{ij} – эффективность оптимальной группировки для j -го сценария.

2. Путём нормирования определяются интегральные коэффициенты взвешивания сценариев:

$$\mu_j = \frac{p_j \cdot \lambda_j \cdot k'_j}{\sum_{j=1}^J p_j \cdot \lambda_j \cdot k'_j}. \quad (13)$$

3. Строится массив взвешенных разностей показателей эффективности группировок в рамках каждого сценария относительно эффективности оптимальной группировки:

$$i = \overline{1, I}; j = \overline{1, J}; \Delta w_{ij} = (w_{ij(i=j)} - w_{ij(i \neq j)}) \cdot \mu_j, \Delta W(I, J) = \begin{Bmatrix} 0 & \Delta w_{12} & \dots & \Delta w_{1j} & \dots & \Delta w_{1J} \\ \Delta w_{21} & 0 & \dots & \Delta w_{2j} & \dots & \Delta w_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta w_{i1} & \Delta w_{i2} & \dots & 0 & \dots & \Delta w_{iJ} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta w_{I1} & \Delta w_{I2} & \dots & \Delta w_{Ij} & \dots & 0 \end{Bmatrix}, \quad (14)$$

где $w_{ij(i=j)}$ – эффективность i -ой группировки, оптимальной для j -го сценария ($i = j$), $w_{ij(i \neq j)}$ – эффективность i -ой группировки для условий j -го сценария ($i \neq j$).

4. Из массива $\Delta W(I, J)$ исключаются отрицательные элементы $\Delta w_{ij} < 0$, соответствующие условию $w_{ij(i \neq j)} > w_{ij(i=j)}$, т.е., когда i -я группировка эффективнее, чем j -я группировка, оптимальная для j -го сценария.

5. Для каждого варианта группировки определяется показатель средневзвешенного отклонения от оптимальных значений эффективностей для частных сценариев:

$$i = \overline{1, I}, r_i^w = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J \Delta w_{ij}. \quad (15)$$

6. $R^w(I) = \min \arg \{r_i^w\}$ – выбирается элемент с минимальным значением, а его индекс будет соответствовать номеру оптимальной группировки на взвешенной полисценарной базе по критерию (10).

Для условий постановки Б

Оптимальной на взвешенной полисценарной базе будет группировка, обладающая минимальными средневзвешенными отклонениями в большую сторону по стоимости и, в меньшую сторону по эффективности на множестве заданных сценариев:

$$g_j(\{s_j\}) \rightarrow \text{opt} : R^{w2}(g_j) R^{c2}(g_j) \rightarrow \min, \quad (16)$$

где $R^{c2}(g_j)$ – функция наименьшего квадратичного отклонения по стоимости g_j группировки на полисценарной базе, $R^{w2}(g_j)$ – функция наименьшего квадратичного отклонения по эффективности группировки на полисценарной базе. То есть, должна быть выбрана группировка с наиболее оправданными затратами, направленными на парирование наиболее вероятного сценария, наиболее угрожаемого сценария, а также сценария, в рамках которого группировка наиболее значима и, в то же время, обеспечивающая наименьший риск невыполнения боевых задач в условиях других сценариев.

С учётом физического смысла, отражающего необходимость выбора варианта решения, лучшего по средневзвешенным показателям, для оценки показателей критерия (16) целесообразно применить метод наименьших квадратов [13]. Методика, реализующая выбор субоптимальной группировки в условиях ресурсных ограничений (1)–(5), с учётом критерия (16), будет иметь следующее построение. Исходными данными для методики являются множества значений, приведённых в предыдущем подразделе, дополненные характеристиками стоимостных показателей группировок $C = \{c_i\}$.

Методика оценки средневзвешенных квадратичных отклонений по эффективности повторяет пункты 1–2 вышеизложенного алгоритма (12)–(13). Далее строится массив квадратов взвешенных разностей показателей эффективности группировок, в рамках каждого сценария относительно эффективности оптимальной группировки:

$$i = \overline{1, I}; j = \overline{1, J}; \Delta w_{ij}^2 = (w_{ij(i=j)} - w_{ij(i \neq j)})^2 \cdot \mu_j, \Delta W(I, J) = \begin{Bmatrix} 0 \Delta w_{12}^2 \cdots \Delta w_{1j}^2 \cdots \Delta w_{1J}^2 \\ \Delta w_{21}^2 0 \cdots \Delta w_{2j}^2 \cdots \Delta w_{2J}^2 \\ \cdots \\ \Delta w_{i1}^2 \Delta w_{i2}^2 \cdots 0 \cdots \Delta w_{iJ}^2 \\ \cdots \\ \Delta w_{J1}^2 \Delta w_{J2}^2 \cdots \Delta w_{Jj}^2 \cdots 0 \end{Bmatrix}, \quad (17)$$

где $w_{ij(i=j)}$ – эффективность i -ой группировки, оптимальной для j -го сценария ($i = j$), $w_{ij(i \neq j)}$ – эффективность i -ой группировки для условий j -го сценария ($i \neq j$).

Для каждого варианта группировки определяется показатель средневзвешенного квадратичного отклонения от оптимальных значений эффективностей для частных сценариев:

$$i = \overline{1, I}, r_i^{w2} = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J \Delta w_{ij}^2. \quad (18)$$

Алгоритм оценки средневзвешенного квадратичного отклонения по стоимости содержит следующие основные построения:

1. Строится массив квадратов взвешенных отклонений стоимостей группировок для каждого сценария относительно стоимости оптимальной для j -го сценария группировки:

$$i = \overline{1, I}; j = \overline{1, J}; \Delta c_{ij}^2 = (c_{ij(i=j)} - c_{ij(i \neq j)})^2 \cdot \mu_j, \Delta C(I, J) = \begin{Bmatrix} 0 \Delta c_{12}^2 \dots \Delta c_{1j}^2 \dots \Delta c_{1J}^2 \\ \Delta c_{21}^2 0 \dots \Delta c_{2j}^2 \dots \Delta c_{2J}^2 \\ \dots \\ \Delta c_{i1}^2 \Delta c_{i2}^2 \dots 0 \dots \Delta c_{iJ}^2 \\ \dots \\ \Delta c_{I1}^2 \Delta c_{I2}^2 \dots \Delta c_{IJ}^2 \dots 0 \end{Bmatrix}, \quad (19)$$

где $c_{ij(i=j)}$ – стоимость i -ой группировки, оптимальной для j -го сценария ($i = j$), $c_{ij(i \neq j)}$ – стоимость i -ой группировки, построенной для другого сценария ($i \neq j$).

2. Для каждого варианта группировки определяется показатель средневзвешенного квадратичного отклонения от оптимальных значений стоимости для частных сценариев:

$$i = \overline{1, I}, r_i^{C2} = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J \Delta c_{ij}^2. \quad (20)$$

3. Далее определяется комплексный показатель отклонения по эффективности и стоимости:

$$r_i^{WC} = r_i^{W2} \cdot r_i^{C2}. \quad (21)$$

4. $R^{WC}(I) = \min \arg \{r_i^{WC}\}$ – выбирается элемент с минимальным значением, а его индекс будет соответствовать номеру оптимальной группировки на взвешенной полисценарной базе по критерию (16).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абросимов В.Н., Дементьев И.В.** Методический подход к совместному применению зенитного ракетного комплекса средней дальности и зенитного ракетно-пушечного комплекса при отражении ударов ОТБР // Сборник докладов XV Всероссийская НПК «Проблемы развития и применения средств ПВО на современном этапе», 2-3 октября 2014: секции 1-5. – Ярославль, ВКА им. А.Ф. Можайского (филиал, г. Ярославль), 2014. – 458 с.
2. Экономика военного строительства: новая парадигма / под ред. Г.А. Лавринова, С.Ф. Викулова. – Ярославль: ООО ИПК «Литера», 2008. – 413 с.
3. **Буренок В.М., Ляпунов В.М., Мудров В.И.** Теория и практика планирования и управления развитием вооружения. – М.: Граница, 2005. – 519 с.
4. **Буренок В.М., Погребняк Р.Н., Скотников А.П.** Методология обоснования перспектив развития средств вооруженной борьбы общего назначения. – М.: Издательство «Машиностроение», 2010. – 368 с.
5. **Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г.** Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.
6. **Евланов Л.Г.** Принятие решений в условиях неопределенности. – М.: ИУНХ, 1976. – 196 с.
7. **Карданская Н.** Принятие управленческого решения. – М.: ЮНИТИ, 1999. – 407 с.
8. **Сирота А.А.** Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. – М.: Техносфера, 2006. – 280 с.
9. Основы исследования операций в военной технике / под ред. Ю.В. Чуева. – М.: Сов. радио, 1965. – 383 с.
10. **Осипов Г.С.** Методы искусственного интеллекта // ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 296 с.
11. **Блейхут Р.** Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – М.: Мир, 1986. – 576 с.
12. **Michael D. Lee** Algorithms for representing similarity data / D. Lee Michael. – DSTO – RR – 0152. – DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory.
13. **Линник Ю.В.** Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – 2-е изд. – М., 1962.

SELECTION PROBLEM AND OPTIMALITY CRITERIA OF COMBINED AIR MISSILE DEFENSE GROUPING FOR POLY-SCENARIO BASE

S.L. Starchak, V.V. Khrumshin

In order to define effective strength and characteristics of air missile defense forces (AMDF) grouping of mixed type, intended for mission accomplishment in conditions of various options of enemy airstrikes, the formation of which can be done in accordance with one of possible technical-and-economic concepts, the following optimality criteria of grouping were defined:

- Minimal weighted variance in effectiveness measure of the grouping under array of scenarios, defined as Hamming modified distance;
- Minimal squares multiplication of weighted variances in cost and effectiveness measures of the grouping under array of scenarios, estimated via least square method.

Developed techniques provide selection of the best, quasi-optimal, variant of AMDF grouping of mixed type from amongst optimum for specific scenarios. The obtained result is an approximate solution for assigned poly-scenario base. The technique considers that majority of specific scenarios is weighted in probability of its realization and level of air and space threats (AST) contribution to the effectiveness of enemy combat operations.

Поступила 28 февраля 2017 года.

ПРИМЕНЕНИЕ СИЛ И СРЕДСТВ ВКО

УДК 629.735.33.015.075

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СВЕРХМАНЁВРЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИЛОТАЖНОГО КОМПЛЕКСА ЦАГИ

© Авторы, 2018

Г.Е. Арапов

инженер, ФГУП «ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Московская обл.

Ю.Б. Дубов доктор технических наук,

ведущий научный сотрудник, ФГУП «ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Московская обл.

В.Н. Желнин кандидат технических наук,

ведущий инженер, ФГУП «ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Московская обл.

В.И. Желонкин кандидат технических наук,

старший научный сотрудник, ФГУП «ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Московская обл.

М.В. Желонкин

научный сотрудник, ФГУП «ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Московская обл.

О.И. Ткаченко кандидат технических наук,

начальник отдела, ФГУП «ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Московская обл.

E-mail: Flight15@tsagi.ru

В данной статье рассматриваются специфические манёвры ближнего воздушного боя, связанные с использованием сверхманёвренности. Работы по данному направлению проводились в ЦАГИ с начала 80-х годов XX века под руководством кандидата технических наук Юрия Николаевич Желнина. Он был идеологом использования таких режимов в ближнем воздушном бою (БВБ). Под его непосредственным руководством с участием ОКБ Сухого, ГосНИИАС и ЛИИ был проведён большой объём расчётов, испытаний в аэродинамических трубах, моделирование на пилотажном стенде и испытаний свободно-летающей модели. Показано, что использование сверхманёвренности применительно к БВБ в некоторых случаях увеличивает эффективность боевого применения.

Ключевые слова: сверхманёвренность, угол атаки.

This article reviews specific maneuvers of close air combat (CAC) related with the use of supermaneuverability. The works in this direction have been carried out at Central Institute of Aerohydrodynamics (TSAGI) since early 80th of XX century under the Yury Nikolaevich Zhelnin leadership, PhD in Technical Sciences. He was an ideologue of use of such modes in close air combat. Under his direct supervision and with the participation of the Sukhoi, the State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS) and the Gromov Flight Research Institute (LII) a huge amount of calculations and testing in aerodynamic tunnels, man-in-the-loop simulation and free-flying model tests were carried out. The article demonstrated that the use of supermaneuverability in relation to close-in dogfight in some cases increases the combat effectiveness.

Keywords: supermaneuverability, angle of attack.

В статье рассматриваются специфические манёвры ближнего воздушного боя, связанные с использованием сверхманёвренности, под которой понимается динамический выход (т.е. без балансировки в общепринятом понимании) на углы атаки до 90° и более. Работы по данному направлению проводились в ЦАГИ с начала 80-х годов XX века под руководством кандидата технических наук Юрия Николаевич Желнина. Он был идеологом использования таких режимов в БВБ. Под его непосредственным руководством с участием ОКБ Сухого, ГосНИИАС

и ЛИИ был проведён большой объём расчётов, испытаний в аэродинамических трубах, моделирование на пилотажном стенде и испытаний свободно-летающей модели.

В 1989 году лётчиком ОКБ Сухого В.Г. Пугачёвым был выполнен динамический вход на углы атаки $\sim 90\text{--}110^\circ$. Этот манёвр в дальнейшем получил название «Кобра Пугачёва», и лёг в основу каскада фигур БВБ с использованием больших углов атаки.

По результатам этих работ были сделаны выводы о целесообразности применения режима сверхманёвренности применительно к БВБ [1, 2, 3, 4].

Исследования, результаты которых изложены в данной статье, проводились с использованием КМВБ самолётов ПС-10М ЦАГИ (см. ниже).

Способность самолёта маневрировать на больших углах атаки позволяет придать ему ряд принципиально новых свойств, которые могут сыграть решающую роль в манёвренном воздушном бою. Среди них следует отметить следующие:

- резкое кратковременное увеличение угла атаки с быстрым доворотом оси самолёта на противника и применение оружия;
- интенсивное аэродинамическое торможение без перемещения РУДа.

Математическое и полунатурное моделирование показало, что указанные свойства истребителя обеспечивают ему полутора – двукратное преимущество над противником в БВБ, не обладающим возможностью реализации режима сверхманёвренности.

Очевидна также польза расширения допустимых углов атаки с точки зрения повышения безопасности полётов при маневрировании на обычных углах атаки [1]. Динамический выход выполняется обычно за время $3\div 6$ секунды в зависимости от скорости полёта. Величины реализуемых углов атаки $\alpha_{\max}$ и время выхода на $\alpha_{\max}$ зависят от приборной скорости $V_{\text{пр}}$ и степени продольной устойчивости самолёта m_z^{cy} (см. рис. 1).

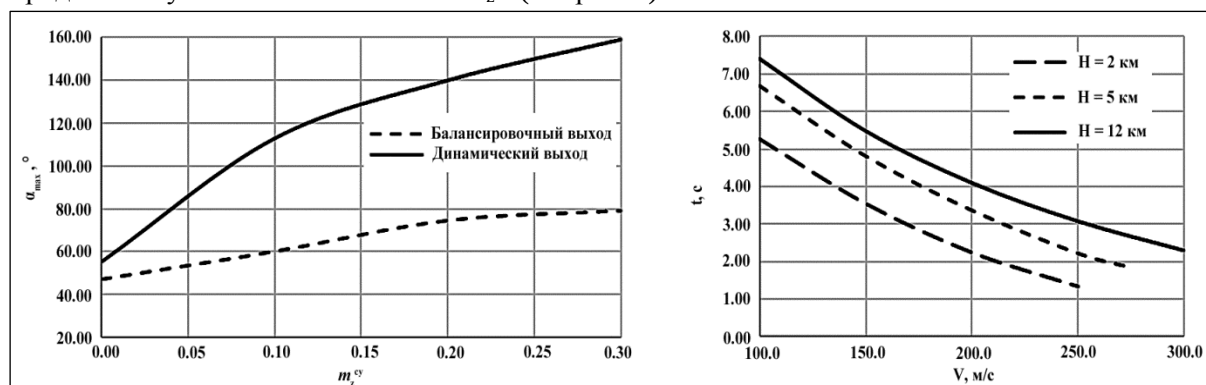


Рис. 1. Характеристики динамического выхода в зависимости от $V_{\text{пр}}$ и m_z^{cy}

Динамический выход на большие углы атаки ввиду возможности сваливания и штопора требует от лётчика определённой осторожности и опыта при его выполнении, характеризуется высоким темпом изменения угла атаки, кратковременностью воздействия перегрузок, а также наличием дополнительных составляющих перегрузок в кабине лётчика, связанных с большими угловыми скоростями и ускорениями относительно центра масс, а также с выносом кабины относительно центра масс.

Спецификой режима сверхманёвренности является потеря скорости при его выполнении. Это обстоятельство существенно расходится с принятой тактикой ведения воздушного боя, согласно которой потеря скорости в воздушном бою недопустима. Тактика сверхманёвренного истребителя в условиях одиночного боя должна быть ориентирована на опережающее применение оружия за счёт выхода на большие углы атаки с последующим занятием безопасного положения относительно атакуемого противника на время, в течение которого можно восстановить скорость.

Кратковременность манёвра выхода на большие углы атаки, большие угловые скорости и высокая потребная точность выполнения манёвра требуют высокой степени автоматизации функционирования системы управления в специальном режиме. Потеря эффективности органов аэродинамического управления в условиях падения скоростного напора требует оценки возможности использования энергетических средств стабилизации и управления, среди кото-

рых одно из главных мест занимает ОВТ. В настоящее время в России создано и внедрено в серию отклоняемое в одной плоскости сопло, с углом поворота струи $\pm 15^\circ$, разработан и экспериментально в полёте проверен вариант двухстепенного сопла, т.е. сопла с отклонением струи в двух плоскостях. Управляющие силы и моменты от ОВТ превосходят аэродинамические на относительно малых скоростях ($V_{пр} \leq 300$ км/час), а на больших скоростях полёта их доля существенно меньше. Поэтому основная цель применения ОВТ на самолёте-истребителе обеспечение управляемости на режимах с малыми скоростями полёта, вплоть до нулевых, и на больших углах атаки вплоть до углов атаки $\sim 180^\circ$. Использование ОВТ обеспечивает:

- повышение безопасности полёта за счёт сохранения высокой управляемости и, как следствие этого, малая вероятность попадания самолёта на режимы сваливания и штопора (практически свободное и безопасное пилотирование самолёта лётчиком при любом управлении);
- увеличение боевой эффективности истребителя за счёт обеспечения высокого уровня устойчивости и управляемости самолёта вплоть до максимальных балансировочных углов атаки $\sim 60^\circ, \dots, 70^\circ$;
- реализацию новых нетрадиционных манёвров на режимах сверхманёвренности («Кобра», манёвр Хербста, «Хук» и др.).

Основные факторы, определяющие повышение боевой эффективности при использовании управления ОВТ:

- увеличение скорости разворота фюзеляжа на цель;
- увеличение интенсивности торможения и манёвренности на скоростях меньше эволютивных;
- повышение компактности манёвра.

Для исследования перечисленных выше вопросов в НИО-15 ЦАГИ был разработан КМВБ самолётов, позволяющий отрабатывать, в том числе, и групповые манёвры в БВБ с участием лётчиков. Остановимся кратко на описании этой установки.

Комплекс моделирования воздушного боя самолётов

Структура комплекса

Комплекс моделирования воздушного движения (см. рис. 2) состоит из ПС со сферической системой визуализации (радиус экрана ~ 4 м, угол обзора $\pm 120^\circ$ по горизонтали и $+120 - -20^\circ$ по вертикали). Кабина пилотажного стенда оснащена реальными рычагами управления с 3-канальной электромеханической загрузкой рычагов управления и приборной индикацией на ЖК-мониторах с сенсорным управлением. ПС объединён с несколькими специализированными комплексами оборудования РМЛ, РМР, РМИ.

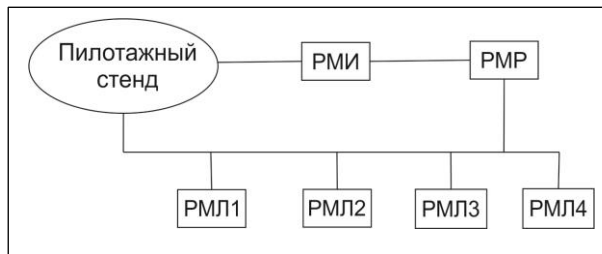


Рис. 2. Схема комплекса моделирования воздушного движения самолётов

МО основных элементов комплекса

Все объекты комплекса объединены в локальную вычислительную сеть.

Головной ПК

Головной ПК как пилотажного стенда, так и рабочих мест содержит комплект программ, включающих:

- уравнения пространственного движения самолёта;
- алгоритмы системы улучшения устойчивости и управляемости;
- алгоритмы системы траекторного управления;
- модели авиационных средств поражения;
- алгоритмы управления элементами изображения МФИ и КАИ;
- приём сигналов с рычагов управления и разовых команд;
- управление периферийными ПК;
- архивацию результатов эксперимента.

Система визуализации

Изображение внекабинного пространства реализуется по законам линейной перспективы центральной проекции. Используется искусственная модель рельефной текстурированной подстилающей поверхности. Воспроизводимые объекты заданы в земной системе координат

с фиксированным центром. Используется правая ортогональная система координат. В зависимости от высоты полёта осуществляется ограничение дальности видимости путём наложения на поверхность градиентного тумана комбинированного серого цвета. В системе визуализации имеется возможность наложения на внекабинное пространство центрального окна визуализации КАИ. Частота смены кадров определяется частотой межмашинного обмена (задаётся на головной ПК). Математическое обеспечение системы визуализации разработано для операционной системы Windows на языке C/C++ с использованием графического интерфейса OpenGL.

Система имитации ИУП

Для решения задач эргономической оптимизации видов отображения пилотажной и боевой информации на бортовых дисплеях и индикаторах на лобовом стекле используется специализированная программная система «SEGAMBIS» [5]. Идеологическое построение процесса моделирования ИУП или его частей позволяет реализовать в комплексной системе КМВД стенда моделирование практически неограниченного количества информационных кадров без существенных изменений структуры программ, входящих в математическое обеспечение данного комплекса. Руководитель эксперимента обеспечивает:

- включение/выключение (включая аварийное) и подготовку комплекса к работе, контроль за работоспособностью систем комплекса;
- ввод необходимых исходных данных, включая исходный сценарий упражнения;
- ввод полётного задания (конфигурация, маршрут, полёт одиночного самолёта и в паре) и условий его выполнения (время суток, погодные условия, условия видимости);
- оперативное изменение условий полётного задания;
- проведение объективного контроля и оценки действий операторов;
- анализ и документирование результатов объективного контроля по выполненным упражнениям.

Инженер-исследователь выполняет следующие функции:

- включение/выключение (включая аварийное) пилотажного стенда и всех его систем;
- запуск необходимого программного обеспечения (система визуализации, приборная доска, индикатор на лобовом стекле, внешний вид);
- проведение объективного контроля и оценки действий лётчиков-операторов.

РМЛ в количестве 4 шт. используются для полунатурного моделирования воздушного боя совместно с лётчиком в кабине стенда ПС-10М. В состав РМЛ входят:

- 2 компьютера с ЖКИ 19";
- стойка компьютерная;
- стойка монтажная;
- кресло;
- переговорное устройство;
- имитаторы РУС, РУД.

На верхнем мониторе отображается внешняя обстановка и кадры обзорно-прицельной системы, на нижнем – приборная индикация. Дополнительно РМЛ оснащается монитором («повторителем») общей обстановки воздушного боя.

Система сетевого обмена

Используемые в КМВБ персональные компьютеры объединены в стандартную локальную сеть типа ETHERNET с использованием стандартных сетевых плат типа NE-2000. В качестве сетевого протокола обмена используются стандартные сетевые протоколы UDP в широковещательном режиме. Межмашинная связь осуществляется в многостороннем режиме, когда головной ПК осуществляет синхронные послышки по сети без подтверждения приёма от подчинённых ПК, которые работают в асинхронном режиме по признаку прихода послышки по локальной сети. Такой режим обмена реализован и внутри рабочих мест.

Основные тактические приёмы в БВБ

Использование режимов сверхманёвренности вызывает потребность разработки специальных манёвров и тактических приёмов для их реализации. Рассмотрим некоторые из них.

Выше отмечалось, что за счёт использования сверхманёвренности в ближнем воздушном бою достигается опережающее использование оружия (в частности – пуска ракеты), что в большинстве случаев предопределяет исход боя. Однако применение данного режима приводит к потере скорости, что лишает истребитель возможности эффективно маневрировать

в пространстве. Данное обстоятельство может иметь опасные последствия для него как со стороны других истребителей противника, так и со стороны атакованного им (в том случае если ракета по какой-либо причине не уничтожила цель).

В связи с этим, важно знать, когда применение режимов сверхманёвренности позволяет достичь максимальной эффективности и безопасности. Основными параметрами, определяющими эффективность их применения в воздушном бою, являются:

- максимальный угол атаки при выполнении манёвров;
- время выхода на максимальный угол атаки и схода с него, полное время манёвра;
- потеря скорости и вариации высоты при выполнении манёвров;
- время восстановления скорости после выполнения манёвров;
- максимальная угловая скорость разворота по курсу.

Одними из основных тактических манёвров боевого применения режимов сверхманёвренности являются манёвры, условно названные «Хук» и «Геликоптер». В общепринятом значении манёвр «Хук» представляет собой кратковременный выход на закритические углы атаки на вираже в горизонтальной плоскости с углом крена $\gamma \approx 90^\circ$. Выполняется этот манёвр с максимальной скоростью выхода на $\alpha_{\max}$ за счёт взятия ручки на себя с максимальным темпом. Схема выполнения атаки противника с использованием манёвра «Хук» приведена на рис. 3.

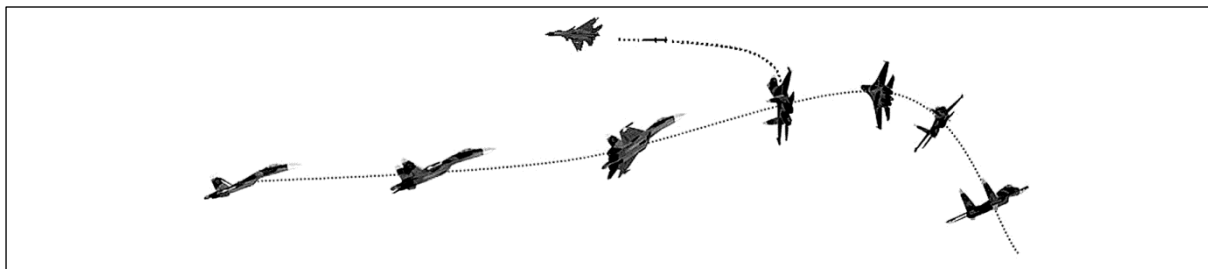


Рис. 3. Манёвр «Хук». Схема атаки

Ниже термин «манёвр «Хук» используется в более широком значении, в том числе и тогда, когда лётчик осуществляет кратковременный выход на закритические углы атаки в произвольно ориентированной плоскости, например, в плоскости прицеливания. Второй рассматриваемый манёвр под названием «Геликоптер» предусматривает следующую последовательность действий лётчика рычагами управления. Начало манёвра аналогично манёвру «Хук», а именно, создаётся крен порядка 90° , затем РУС полностью отклоняется «на себя» и, при достижении максимальных углов атаки, самолёт переводится во вращение относительно связанной оси Y. Манёвр может выполняться, в частности, и с использованием разнотяга двигателей. Схемы манёвра без смены направления вращения и со сменой направления вращения приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

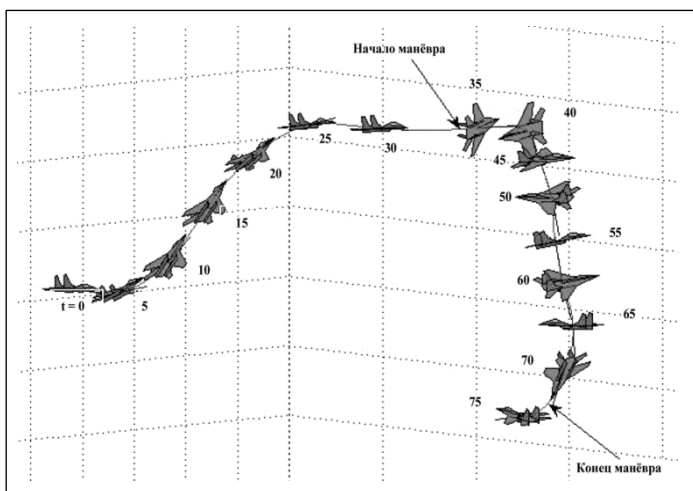


Рис. 4. Манёвр «Геликоптер»
без смены направления вращения

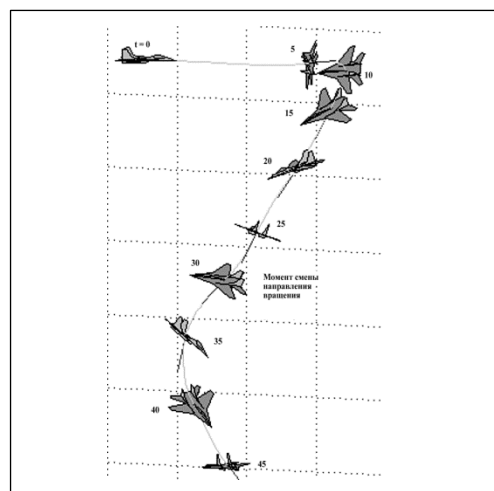


Рис. 5. Манёвр «Геликоптер»
со сменой направления вращения

Применение режимов сверхманёвренности при правильном выборе момента начала манёвра обеспечивает опережение в пуске ракеты относительно возможного пуска противником, однако это не гарантирует достижение однозначного преимущества. В том случае, если достигнутое опережение в пуске больше времени полёта ракеты, реализуется вариант, при котором вероятность поражения противника в бою будет увеличиваться. Однако данная вероятность не является стопроцентной, и потому важно предусмотреть ситуации, при которых воздушный бой продолжится. Возможен вариант, когда опережение в пуске меньше времени полёта ракеты, и существует вероятность ответного пуска ракеты противником. В этом случае возможно «взаимное» поражение противников. Поэтому важным фактором для сверхманёвренного истребителя является возможность уклониться от ответного пуска противника. Далее рассматриваются несколько типовых вариантов развития воздушного боя сверхманёвренного истребителя с истребителем, не обладающим сверхманёвренностью, после опережающего пуска ракеты.

За счёт выхода на большие углы атаки (манёвр «Хук») сверхманёвренный истребитель реализует опережающий пуск ракеты и оказывается внутри виража противника, не давая ему возможности осуществить ответный пуск в течение первого витка виража. После этого возможны следующие варианты дальнейших действий.

Вариант 1. Быстро уменьшив угол атаки и перейдя в пикировании с углами наклона траектории $-20, \dots, 30^\circ$ и движении, близком к прямолинейному за счёт увеличения скорости, уйти от ответного пуска ракеты противником.

Направление движения самолёта в процессе выхода из боя является результатом определённого компромисса. Ранний выход на участок прямолинейного полёта обеспечивает более быстрое восстановление скорости, но сокращает время выхода противника в прицельные условия. Более поздний выход на участок прямолинейного движения увеличивает время выхода противника в прицельные условия, но зато задерживает процесс «разгона» для восстановления скорости. Схема манёвра и основные параметры относительного движения противников приведена на рис. 6.

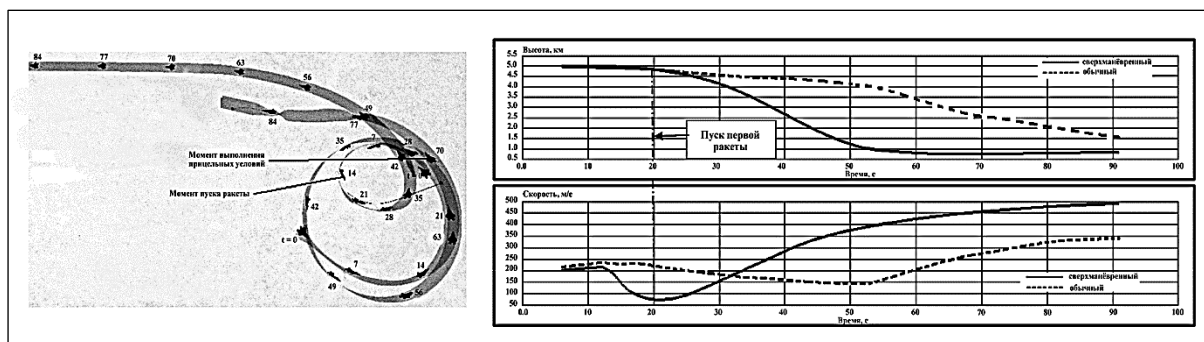


Рис. 6. Применение манёвра «Хук» с последующим выходом из боя

Видно, что в момент выполнения прицельных условий противника скорость сверхманёвренного истребителя близка или выше скорости противника, а дальность превышает разрешённую – пуск ракеты невозможен.

Уклонение от ответного пуска обеспечивается за счёт уменьшения времени манёвра («Хук») и, следовательно, более высокой скорости в конце манёвра, более раннего начала разгона, большего угла пикирования и большего времени на «разгон».

Как следует из результатов моделирования, технические возможности сверхманёвренного истребителя позволяют реализовать успешное уклонение от ответного пуска. Неудачные реализации манёвра уклонения в основном определялись неоптимальными действиями оператора в процессе боя, а именно – запаздыванием по реализации намеченных действий. Это ещё раз подчеркивает необходимость подготовки и тренировки операторов, что очевидно будет происходить и в лётной практике при освоении режимов сверхманёвренности.

Вариант 2. Другим вариантом продолжения боя после пуска ракеты является разгон до скорости, необходимой для повторного выполнения манёвра «Хук» и повторного пуска ракеты. Схема выполнения манёвра и характер изменения скорости сверхманёвренного истребителя приведена на рис. 7.

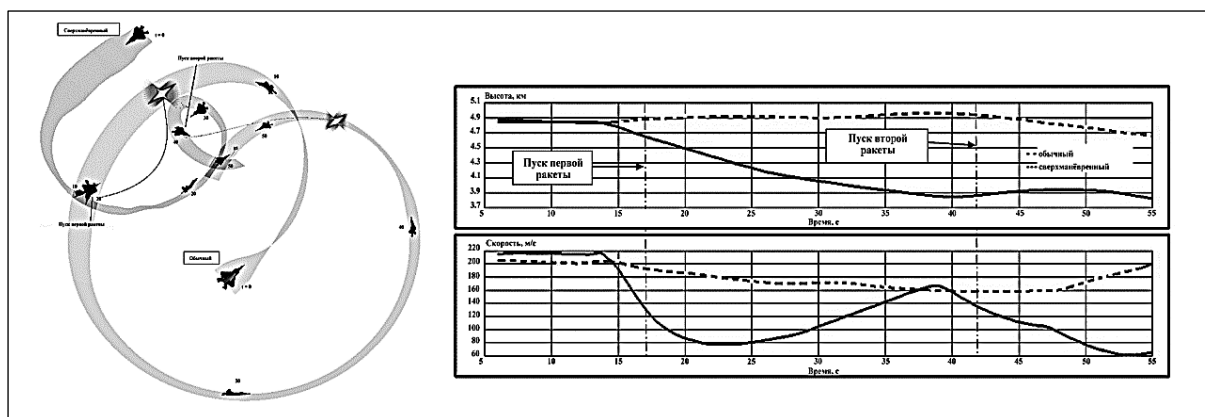


Рис. 7. Применение манёвра «Хук» с последующим набором скорости и повторной атакой противника

Вариант 3. Так же возможен переход из манёвра «Хук» в манёвр «Геликоптер» (см. рис. 8) с возможностью последующей повторной атаки. В этом случае, оставаясь внутри виража противника, сверхманёвренный истребитель повторно выполняет прицельные условия и пуск ракеты, если характеристики управляемости и угловая скорость разворота по курсу при выполнении этого манёвра позволят ему это сделать.

Для этого самолёт должен иметь возможность изменять (увеличивать) угол тангажа, поскольку манёвр происходит с существенной потерей высоты, и реализовывать угловую скорость разворота по курсу существенно больше угловой скорости виража противника. Как показали результаты моделирования этого манёвра, такие возможности, правда, в различной степени, у сверхманёвренных истребителей имеются.

Вариант 4. Возможна реализация комбинации манёвров «Косая петля» + «Хук». В верхней точке траектории сверхманёвренный истребитель, используя манёвр «Хук», получает возможность совершить опережающий пуск ракеты.

Следует иметь в виду, что в данном случае, даже если ракета по какой-то причине не достигнет цели, сверхманёвренный истребитель, имея преимущество над противником по высоте, имеет возможность перейти к манёвру «Геликоптер» и, продолжая контролировать цель, совершить очередной пуск ракеты. Схема выполнения этого манёвра приведена на рис. 9.

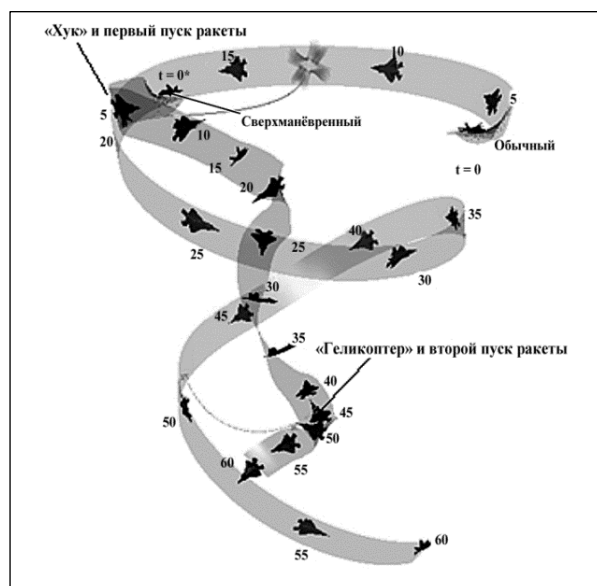


Рис. 8. Перевод самолёта из манёвра «Хук» в манёвр «Геликоптер»

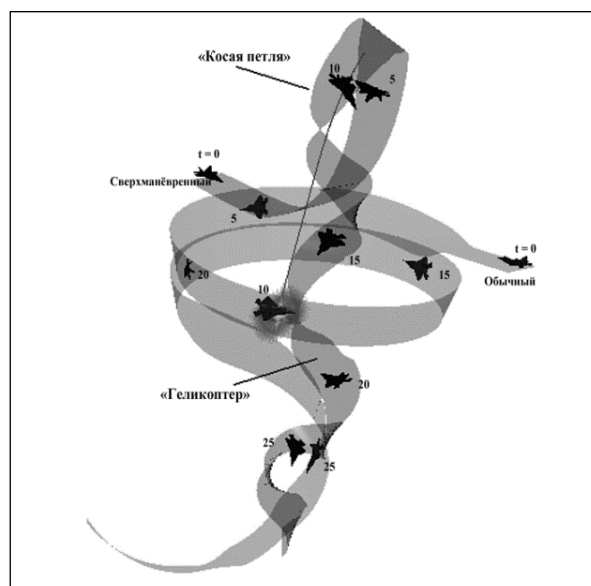


Рис. 9. Манёвр «Косая петля» с последующим переходом к манёвру «Геликоптер»

Граница применимости режима сверхманёвренности

Для определения границы возможного применения сверхманёвренности для различных тактических условий воздушного боя на комплексе ПС-10М было проведено статистическое моделирование (с ограничением эксперимента по времени $t_{\text{мод}} = 2$ мин) по следующей методике:

- задаются начальные условия, завязка боя происходит на встречно пересекающихся курсах;
- оператор на пилотажном стенде во время боя за счёт использования режима сверхманёвренности стремится опередить противника в пуске ракеты и уклониться от ответной атаки;
- оператор на РМЛ также старается занять выгодное положение для применения оружия, используя при этом режимы полёта, обеспечивающие ему максимальную угловую скорость разворота по курсу.

Эффективность применения режима сверхманёвренности определяется выполнением следующих условий:

- «захвата» цели бортовым обзорно-прицельным комплексом и удержания цели в зоне обзора необходимое время;
- достижения цели ракетой без срыва наведения при старте на больших углах атаки по маневрирующей цели;
- уклонения от ответного пуска ракеты противником.

На рис. 10 схематично приведены варианты завязки ближнего воздушного боя истребителей, при которых возможно применение режима сверхманёвренности.

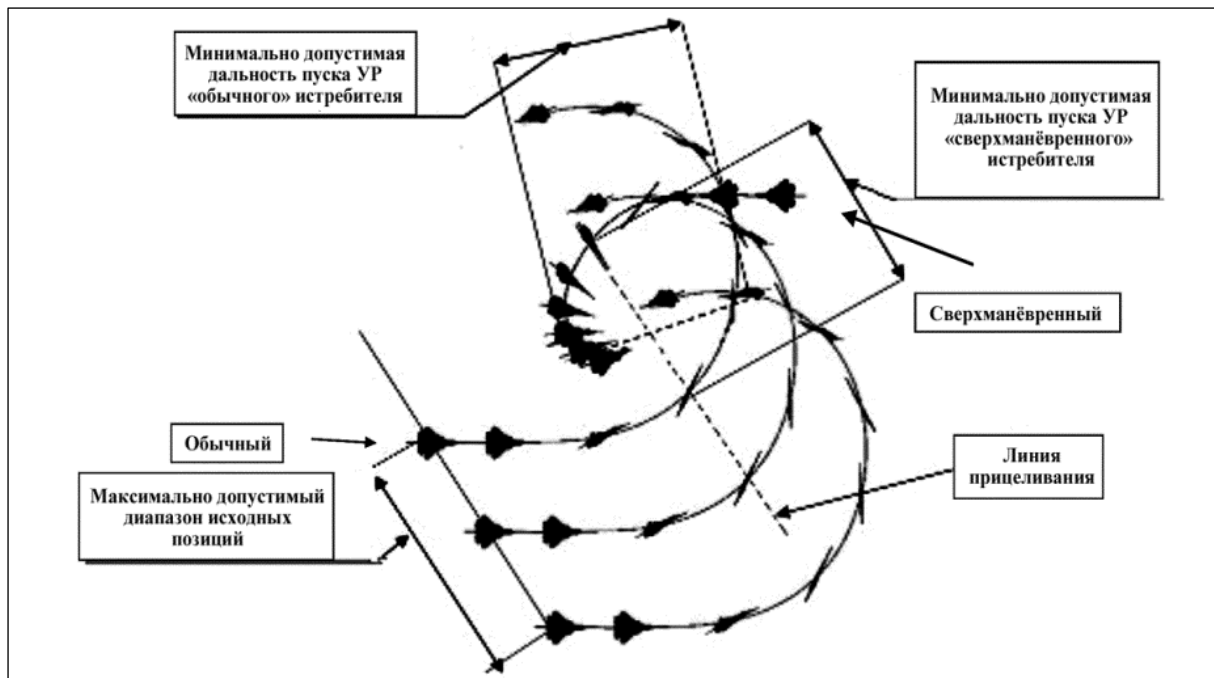


Рис. 10. Граница области применимости режима сверхманёвренности

Первое условие при воздушном бое на виражах, определяющее границу области применения сверхманёвренности, – «захват» цели бортовым обзорно-прицельным комплексом. Для его выполнения необходимо, чтобы суммарная угловая скорость разворота корпуса самолёта существенно превосходила угловую скорость линии визирования.

Второе условие. Минимальная начальная дальность, при которой выполняются прицельные условия, возможен «захват» цели и пуск ракеты, зависит от угла пеленга цели. С увеличением дальности до цели условия «захвата» существенно облегчаются, однако при больших дальностях вероятность ответного пуска увеличивается, а время «опережения» существенно уменьшается.

Третье условие, при выполнении которого после пуска ракеты сверхманёвренный истребитель оказывается внутри виража противника, что обеспечивает ему возможность дальнейшего маневрирования.

По результатам моделирования была получена зависимость вероятности успешного пуска ракеты, под которым подразумевается поражение противника (без учёта таких факторов, как отказ ракеты, поражение ложных целей и другие (см. рис. 11)), от расстояния между противниками. Также по результатам моделирования была определена область возможного применения режимов сверхманёвренности в ближнем воздушном бою (см. рис. 12).

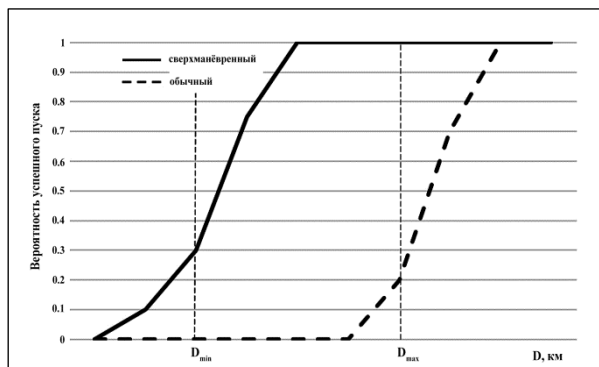


Рис. 11. Вероятность пуска по противнику

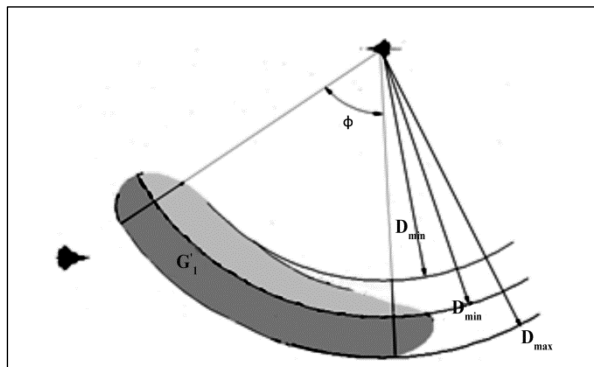


Рис. 12. Границы области применимости сверхманевренности с учётом характеристик ракеты

Полученную область можно аппроксимировать с помощью двух параметров – дальности между самолётами (D) и угла пеленга (Φ):

$$D \in (D_{\max}, D_{\min}) \quad \Phi \in (\Phi_{\max}, \Phi_{\min}),$$

где G'_1 – область применения сверхманёвренности с учётом границы поражения ракеты, $D_{\min}$ – минимальная дальность из условия прицеливания, $D'_{\min}$ – минимальная дальность из условия поражения противника ракетой сверхманевренного самолёта, $D_{\max}$ – максимально допустимая дальность из условия уклонения от ответного пуска противника, Φ – диапазон углов пеленга области применения сверхманёвренности.

В заключение следует отметить, что область эффективного применения режимов сверхманёвренности зависит от большого количества факторов, в том числе от:

- параметров относительного движения истребителей;
- характеристик манёвренности, управляемости и устойчивости;
- характеристик обзорно-прицельного комплекса;
- характеристик бортового комплекса вооружения и ракет.

Сформировать аппроксимационными средствами области применения режимов сверхманёвренности в пространстве перечисленных факторов достаточно сложно. Наиболее перспективным представляется формирование этих областей на основе метода интегрирования уравнений движения сверхманевренного истребителя и «фиктивного» пуска ракеты в режиме реального времени. Как показывают оценки, быстродействие бортовых компьютеров позволяет реализовать эту процедуру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Желнин Ю.Н. Устойчивость, управляемость самолёта при динамическом выходе на большие закритические углы атаки. – ТВФ, 1994, №1–2.
2. Желнин Ю.Н. Сверхманёвренность истребителя. Динамические режимы // Сборник «Проблемы создания перспективной авиационно-космической техники». – Москва, Физматлит, 2005.
3. Желнин Ю.Н. Анализ продольного движения самолета при динамическом выходе на большие закритические углы атаки. Динамические режимы сверхманевренности. – 2013, Труды ЦАГИ, выпуск 2718.
4. Желонкин М.В., Желнин Ю.Н. Анализ бокового движения самолета при динамическом выходе на большие закритические углы атаки. – 2013, Труды ЦАГИ, выпуск 2733.
5. Желонкин В.И. Система поддержки исследований по выбору и оптимизации видов электронной индикации. – Вестник МНАПЧАК, 2007, №3.

RESEARCH OF SUPERMANEUVERABILITY MODES USING TSAGI FLIGHT SIMULATOR

G.E. Arapov, Yu.B. Dubov, V.N. Zhelnin, V.I. Zhelonkin, M.V. Zhelonkin, O.I. Tkachenko

The article considers the specific maneuvers of close-in dogfight related with engagement of supermaneuverability which means a dynamic changeover (i.e. without trim balance in the ordinary way) to angles of attack up to 90° and more degrees. The works in this direction had been carried out at Central Institute of Aerohydrodynamics (TSAGI) since early 80th of XX century under the Yury Nikolaevich Zhelnin leadership, PhD in Technical Sciences. He was an ideologue of use of such modes in close air combat. Under his direct supervision and with the participation of the Sukhoi, the State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS) and the Gromov Flight Research Institute (LII) a huge amount of calculations and testing in aerodynamic tunnels, man-in-the-loop simulation and free-flying model tests were carried out. Distinctive feature of super maneuverability mode is a stall during its completion. This fact substantially contradicts the traditional tactics of close-in dogfight which stipulates that the stalling during air-to-air fighting is inadmissible.

The tactics of air-superiority fighter in single dogfight conditions should be aimed at advanced weapon employment due to changeover to high angles of attack with the subsequent safety positioning relative to attacked enemy for a time necessary to recover speed. The short-duration of changeover maneuver to high angles of attack, high angular speeds and high required accuracy of maneuver completion demand a high level of automation and operation of control system in special mode. Loss of aerodynamic controls efficiency in conditions of ram-air flow decay requires an estimation of possibility to use power stabilization and control aids.

Поступила 10 февраля 2017 года.

ИССЛЕДОВАНИЯ В СФЕРЕ ПРОЕКТНО- КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

УДК 623.462.2

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ ЗУР

© Автор, 2018

В.Ю. Антипов

начальник отдела, АО «МКБ «Факел», г. Химки, Московская обл.

E-mail: antvju@gmail.com

В статье рассмотрены основные принципы проектирования средств автоматизированного контроля бортовой аппаратуры зенитных управляемых ракет. На основе опыта АО «МКБ «Факел» проанализированы ключевые задачи, стоящие перед разработчиками контрольно-проверочной аппаратуры, перечислены наиболее важные проблемы и систематизированы данные о способах их решения. Предложен новый подход к разработке контрольно-испытательных комплексов, основанный на применении современного высокотехнологичного оборудования и инновационных принципов программной конфигурации аппаратной части.

Ключевые слова: зенитная управляемая ракета, бортовая аппаратура, контрольно-проверочная аппаратура, автоматизация, моделирование.

The article considers main development principles of hardware and software automated control instruments of surface-to-air missiles (SAM) onboard equipment. Based on JSC «Fakel» «Machine Engineering Design Bureau» («МКБ «Fakel») experience the key objectives were analyzed, which are set for test and control equipment designers; major problems were specified and data on methods of its solution were organized. A new approach to a development of control and test complexes, based on employment of modern high-tech equipment and innovative principles of hardware component program configuration was proposed.

Keywords: surface-to-air missile (SAM), on-board equipment, test and control equipment, automation, modeling.

Введение

Современные условия ведения боевых действий предъявляют жёсткие требования к эффективности вооружения и обуславливают необходимость использования высокоточного оружия. При этом важнейшим показателем обороноспособности является наличие мощных систем ПВО и ПРО, эффективность которых напрямую зависит от тактико-технических характеристик входящих в их состав зенитных управляемых ракет (ЗУР). В основе современных ЗУР лежит совокупность радиоэлектронных блоков, называемых бортовой аппаратурой (БА). Каждый блок представляет собой сложное техническое устройство, характеризующееся комплексом параметров. Специфика

предъявляемых к ЗУР требований приводит к необходимости обеспечения высокой надёжности БА при возрастающей с каждым годом сложности и производительности. Одним из ключевых факторов обеспечения надёжности БА является строгий контроль работоспособности каждого блока из состава ЗУР – как на этапе ОКР, так и в серийном производстве. В целях проверки исправности БА ЗУР используется специализированная контрольно-проверочная аппаратура (КПА). Создание КПА для БА современных ЗУР сопряжено с рядом технических сложностей, решение которых будет рассмотрено в статье.

Значение наземного контроля

ЗУР как объект контроля имеет ряд особенностей, обусловленных спецификой применения. В первую очередь, это отсутствие возможности лабораторного контроля и отладки БА ЗУР в ходе выполнения боевой задачи. Каждое изделие предназначается для единственного пуска, по результатам которого цель должна быть поражена с заданной в ТТЗ вероятностью. При этом необходимым условием успешного пуска является корректная работа всех установленных в ЗУР блоков БА. Выход из строя хотя бы одного блока, как правило, приводит к невозможности выполнения ЗУР боевой задачи. Эти обстоятельства регламентируют острую потребность при производстве ЗУР в тщательном контроле как отдельных блоков БА, так и изделия в целом.

Основные задачи

В общем случае, эффективность контроля БА ЗУР напрямую зависит от его глубины. С другой стороны, глубокий контроль работоспособности приводит к увеличению длительности испытаний в связи с необходимостью проверки десятков электрических параметров. На этапе серийного производства ЗУР это может существенно увеличить технологический цикл. Таким образом, можно сформулировать первую задачу: сокращение времени контроля БА при заданной глубине. Второй проблемой является человеческий фактор, влияющий на точность измерений при использовании ручной обработки получаемых в ходе испытаний данных. Одним из способов решения указанных проблем является автоматизация КПА, при которой минимизируется доля ручного труда и существенно снижается длительность проверок.

Третья важная проблема представляет собой потребность разработчика в контрольно-проверочной аппаратуре как на различных этапах ОКР на ЗУР, так и непосредственно по окончании предварительных и государственных испытаний. Иными словами, КПА должна разрабатываться параллельно с разработкой ЗУР. Очевидно, что при таком подходе аппаратура должна быть достаточно гибкой, чтобы иметь возможность сравнительно простой доработки при изменении параметров БА ЗУР в ходе ОКР. Также в современных условиях актуальной проблемой является необходимость разработки КПА в сжатые сроки силами небольшого коллектива специалистов. Данные требования обусловлены задачами, стоящими перед отраслью в целом, и экономической целесообразностью создания КПА. Таким образом, можно выделить следующие аспекты разработки КПА: аппаратура должна быть автоматизированной, гибкой и не требовать на свою разработку большого количества человеческих ресурсов и времени.

Сквозное проектирование средств моделирования и контроля

Существуют два подхода к разработке средств автоматизированного контроля: отдельная (самостоятельная) разработка программного и аппаратного обеспечения на каждом этапе ОКР и использование единой аппаратно-программной базы для решения всех поставленных задач. Учитывая ограниченное финансирование и сжатые сроки разработки, первый путь видится нецелесообразным как с технической, так и с экономической точки зрения. Второй подход, базирующийся на принципах сквозного проектирования единого аппаратно-программного комплекса, является более эффективным и позволяет решать поставленные задачи сравнительно небольшим коллективом специалистов.

Применительно к средствам контроля это означает использование на всех этапах ОКР единого программного обеспечения для проверки функционирования каждого блока БА и единой аппаратной базы, не требующей принципиальных модификаций. Стоит отметить, что помимо разработки КПА, необходимой составной частью процесса проектирования и наземной отработки ЗУР является также создание средств моделирования работы блоков БА.

Как правило, создание средств моделирования предшествует разработке КПА и является технической и идеологической основой средств контроля. В ходе создания ЗУР разработчики реализуют следующую цепочку действий: «создание математической модели ЗУР» → «создание математической модели блока БА» → «создание прототипа блока БА» → «создание образца блока

БА» → «объединение блоков БА в единый комплекс» → «создание ЗУР». Этой последовательности соответствует разработка целого комплекса аппаратно-программных средств моделирования: имитационных математических моделей (ИММ), математических имитационно-моделирующих стендов (МИМС), комплексных имитационно-моделирующих стендов (КИМС), стендов полунатурного моделирования (СПМ) и т.д.

Наличие большой номенклатуры разрабатываемых стендов делает рациональным преимуществом технических наработок и использование единого аппаратно-программного базиса. При таком подходе средства моделирования и контроля представляют собой единый комплекс, предназначенный для оценки соответствия ЗУР требованиям ТТЗ на всех этапах ОКР и жизненного цикла. При этом заключительным и наиболее важным этапом наземной отработки является создание автоматизированной контрольно-испытательной станции (АКИС), используемой для контроля работоспособности всего комплекса БА в составе ЗУР на поздних этапах ОКР и в ходе серийного производства. Таким образом, ещё одной важной задачей, стоящей перед разработчиками КПА, является преемственность программно-аппаратных ресурсов средств моделирования.

Специфика создания аппаратно-программных средств моделирования

В основе разработки средств моделирования заложена поведенческая модель функционирования каждого из блоков БА. Модель отражает алгоритмы функционирования блока в составе ЗУР, включая описание всех интерфейсов обмена данными с другими блоками. Как правило, модель создаётся на одном из высокоуровневых языков программирования, таких как C++, MATLAB или LabVIEW. На основании поведенческой модели разрабатывается имитатор блока. Имитатор строится на базе промышленного компьютера, в состав которого включаются унифицированные модули различного назначения, которые позволяют на физическом уровне воспроизводить работу блока. В зависимости от архитектуры блока модули могут представлять собой интерфейсные платы (RS-232, MIL-STD 1553), аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, прочие специализированные приборы. Управление модулями промышленного компьютера осуществляется программно на основании данных, поступающих из поведенческой модели. Модель, в свою очередь, использует данные, получаемые с входов модулей. Также помимо моделей и имитаторов работы блоков БА разрабатываются модели и соответствующие имитаторы окружающей обстановки.

Необходимость использования промышленного компьютера с программно-управляемыми модулями обусловлена требованием к гибкости разрабатываемой системы, поскольку модель подвергается изменениям на протяжении всего времени разработки ЗУР. Особенностью подобной архитектуры является необходимость сопряжения модели с программным обеспечением (драйверами), обеспечивающим работу модулей промышленного компьютера. Логическим продолжением имитационного моделирования является формирование характеристик контролепригодности – перечня параметров БА ЗУР, подлежащих контролю в процессе производства. В свою очередь, на основании характеристик контролепригодности разрабатывается контрольно-проверочная аппаратура. Таким образом, реализуется взаимосвязь между средствами моделирования и средствами контроля. Указанная взаимосвязь обуславливает необходимость использования единых технических средств для решения различных задач наземной отработки.

Использование модульной платформы PXI

Анализ существующих технических решений показывает, что для унификации аппаратно-программных средств моделирования и средств контроля целесообразно использовать модульную платформу PXI. Идеология построения систем на основе платформы PXI подразумевает реализацию специализированных алгоритмов обработки и формирования сигналов на программном уровне при использовании стандартизированной аппаратной части [1]. PXI – это модульная платформа, предназначенная для построения комплексных измерительных систем. Представляет собой шасси с проложенными шинами передачи данных (стандарт *CompactPCI*), синхронизации и тактирования. К шинам подключаются модули различного назначения, в том числе контроллер, управляющий работой всей системы. Ключевой особенностью платформы является то, что все устанавливаемые модули управляются посредством высокоуровневого языка программирования LabVIEW. Благодаря своей архитектуре и принципам построения платформа PXI позволяет решать весь спектр задач, стоящих перед разработчиками контрольно-проверочных средств.

Программная конфигурация используемых модулей (генераторов, осциллографов и т.д.) даёт возможность реализации всех алгоритмов моделирования и контроля БА ЗУР на программном уровне. При этом в случае изменения алгоритмов разработчик программного обеспечения имеет

возможность в сжатые сроки корректировать работу КПА без доработки аппаратной части. Таким образом, достигается высокая гибкость разрабатываемой аппаратуры. Подобная конфигурация платформы PXI позволяет также добиться высокого коэффициента автоматизации за счёт программной обработки результатов испытаний. За счёт использования в качестве платформы для создания КПА оборудования PXI могут быть достигнуты также и высокие экономические показатели. Использование в качестве базовой составляющей КПА унифицированной аппаратной части позволяет существенно сократить время разработки. Программное обеспечение *LabVIEW* за счёт простоты освоения даёт возможность разработчикам сконцентрироваться на непосредственной реализации алгоритмов контроля без необходимости длительного освоения языка.

Основные принципы создания КПА

Базовые аспекты создания КПА для БА ЗУР закономерно вытекают из методики построения средств моделирования. При проектировании КПА необходимо руководствоваться заданными характеристиками контролепригодности БА – перечнем выдаваемых сигналов и контролируемых параметров, к которым могут относиться напряжение питания, цифровые и аналоговые низкочастотные сигналы, сигналы СВЧ различной формы и диапазона и т.д.

На основании характеристик контролепригодности формируется список необходимых для использования приборов – унифицированных модулей формата PXI. В случае отсутствия в линейке стандартных модулей требуемых приборов допускается создание специализированных устройств узкого назначения. При этом в ходе разработки необходимо учитывать, что использование специализированных устройств не должно негативно влиять на гибкость аппаратно-программного комплекса КПА. Исходя из того, что характеристики контролепригодности формируются в процессе моделирования работы БА, унифицированные и специализированные приборы, используемые в КПА, как правило, аналогичны используемым при прототипировании блоков из состава ЗУР.

Заключительным этапом создания КПА является разработка специального программного обеспечения на основании алгоритмов контроля БА. Задача СПО заключается в управлении модулями PXI для выдачи и анализа сигналов заданной формы и номинала в заданный момент времени в соответствии с циклограммой проверок.

Выводы

Разработка контрольно-проверочной аппаратуры является необходимым этапом создания БА ЗУР. При этом разработчики КПА сталкиваются с рядом технических задач, к числу которых относятся необходимость автоматизации, гибкости и сокращения сроков разработки аппаратуры. Указанные задачи могут быть решены с помощью методики построения КПА, основанной на использовании унифицированной программно-конфигурируемой платформы PXI. Такой подход позволяет также в полной мере задействовать аппаратно-программные ресурсы, созданные в ходе моделирования и прототипирования работы блоков БА ЗУР на всех этапах наземной отработки.

Рассмотренные принципы успешно внедрены на практике, примером чего является создание автоматизированной контрольно-испытательной станции для проверки работоспособности БА в составе собранной ЗУР [2]. Планируется использование данного подхода и при проектировании КПА для перспективных ЗУР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головастов А. Стандарт PXI – технология и оборудование для построения контрольно-измерительных комплексов // «Компоненты и технологии». – 2012, №3.
2. Антипов В.Ю., Доронин В.В., Куликов В.И., Токарев Е.Г. Технология создания контрольно-проверочной аппаратуры и автоматизированных контрольно-испытательных станций для комплекса наземной отработки и серийного производства // Общероссийский научно-технический журнал «Полёт». – 2013, МКБ «Факел», 2013.

MAIN DEVELOPMENT PRINCIPLES OF HARDWARE AND SOFTWARE AUTOMATED CONTROL OF SAM ONBOARD EQUIPMENT

V.U. Antipov

The article states engineering design issues of test and control equipment which is used during onboard equipment manufacturing of surface-to-air missiles (SAM). The article theme discloses a modern approach to development of avionics equipment lying in using of unified technology of modular software-configurable platforms.

The main objectives are systematized in the article, which are set for designers of modern hardware and software functional control instruments, and it's suggested a variant of its complex solution. The main point of suggested solution concludes in using of end-to-end design principle that implicates using of single hardware and software base during development of all assortments of modeling and control tools. Such an approach permits to reduce control time at preselected level, to increase automatization and minimize manual work share, to provide expansion of functional via aggregate method and operational alignment of checking algorithms, to reduce development cost and duration.

The article provides the theoretical description of formulated principles and considers its practical realization, consisting of test and control equipment composition on the base of PXI modular platform managed by LabVIEW high-order assembly language. The article concludes with positive results of practical application of suggested solutions and with approach rationality based on use of unified software-configurable platforms.

Advantage of work done is that formulated conceptions in the article were introduced practically during development of modern military hardware items. The use of foreign equipment and software can be referred to disadvantages. The core value of the article is that the author has carried out system analysis of objectives assigned for test and control equipment designers, and that the up-to-date approach to its solution was performed.

Поступила 8 июня 2017 года.

СВЧ-ПРИЁМНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

© Авторы, 2018

С.В. Березовский

руководитель группы, ФГУП «РНИИРС», г. Ростов-на-Дону

Н.А. Михайлов кандидат технических наук,

руководитель группы, ФГУП «РНИИРС», г. Ростов-на-Дону

А.В. Штык

руководитель группы, ФГУП «РНИИРС», г. Ростов-на-Дону

E-mail: antonshtyk@mail.ru

М.Б. Орехов

зам. начальника отдела, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва

В статье приводятся результаты разработки и измерения характеристик приёмного модуля X-диапазона частот. Конструктивное исполнение приёмного модуля, отличающееся минимальными массой и габаритами составных частей, и локальной герметизацией составных частей обеспечивает устойчивость приёмного модуля к механическим и климатическим воздействиям, характерным для бортовой аппаратуры. Приведена структурная схема приёмного модуля, определены составные части оказывающие наибольшее влияние на характеристики приёмного модуля. Описана новая, конструкция квадратурного направленного ответвителя на дифференциальных трансформаторах, где связанные индуктивности выполнены в виде проводников специальной формы в слоях LTCC-платы. Приведена схема усилителя промежуточной частоты, обеспечивающего заданную зависимость выходной мощности от уровня входного сигнала.

Ключевые слова: СВЧ-приёмный модуль, бортовая аппаратура, квадратурный направленный ответвитель, низкотемпературная керамика (LTCC).

The article considers results of development and measuring of X-band receiving module characteristics. The structural design of receiving module, characterized by minimum mass and dimensions of integrated parts and localized waterproofing of integrated parts provide rigidity of receiving module to mechanical and climatic effects specific to on-board equipment. The receiving module structural scheme is presented, integrated parts was defined which have a max effect on receiving module characteristics. A new design of quadrature directional coupler on differential transformers was described, where coupled inductances are performed as special form conductors in layers of low temperature cofired ceramic (LTCC) card. The intermediate frequency amplifier circuit was performed, providing specific dependence of output power on input signal level.

Keywords: microwave receiving module, on-board equipment, quadrature directional coupler, low temperature cofired ceramic (LTCC).

Повышение эффективности бортовых комплексов связи может быть достигнуто либо за счёт модернизации существующих, либо за счёт разработки новых систем. Разработка новых систем позволяет получать комплексы со значительно лучшими характеристиками, однако требует существенных временных и финансовых затрат. Модернизация существующих систем главным преимуществом имеет относительную дешевизну и оперативность. Важным элементом бортовых комплексов связи является радиоприёмный тракт. Разработка бортового радиоприёмного тракта с улучшенными характеристиками необходима для повышения эффективности комплекса в целом, и потому является актуальной задачей. Целью настоящей работы является разработка СВЧ-приёмного модуля (приёмный модуль) для бортовой аппаратуры связи, выполняющего функции преобразования частоты, частотной селекции и усиления, и обладающего улучшенными характеристиками. При разработке приёмного модуля решались следующие задачи:

- определение конструктивных требований, выполнение которых обеспечит устойчивость к воздействию механико-климатических факторов;
- разработка составных частей приемного модуля – СВЧ-части, квадратурного сумматора и усилителя;

– техническая реализация приёмного модуля.

Разрабатываемый приёмный модуль в диапазоне рабочих температур от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ при воздействии повышенной влажности 100% и других климатических и механических факторов должен отвечать следующим требованиям:

- X-диапазон входных частот;
- КВ-диапазон выходных частот;
- коэффициент шума по входу – не более 4 дБ;
- коэффициент передачи при слабосигнальном (мощность входного сигнала менее -30 дБм) воздействии – $18, \dots, 22\text{ дБ}$;
- выходная мощность ($P_{\text{вых}}$) при воздействии на вход сигнала мощностью $+3\text{ дБм}$ – $13 \pm 1.5\text{ дБм}$;
- подавление помехи по зеркальному каналу – более 17 дБ;
- коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) входов – не более 1.8;
- прочность к воздействию на вход непрерывной мощности – 2 Вт.

Устойчивость к механическим воздействиям обеспечивается за счёт минимизации массогабаритных характеристик сборочных единиц приёмного модуля.

Структурная схема приёмного модуля, обеспечивающая требуемые электрические характеристики, приведена на рис. 1. Отдельными сборочными единицами приёмного модуля являются преобразователь и усилитель.

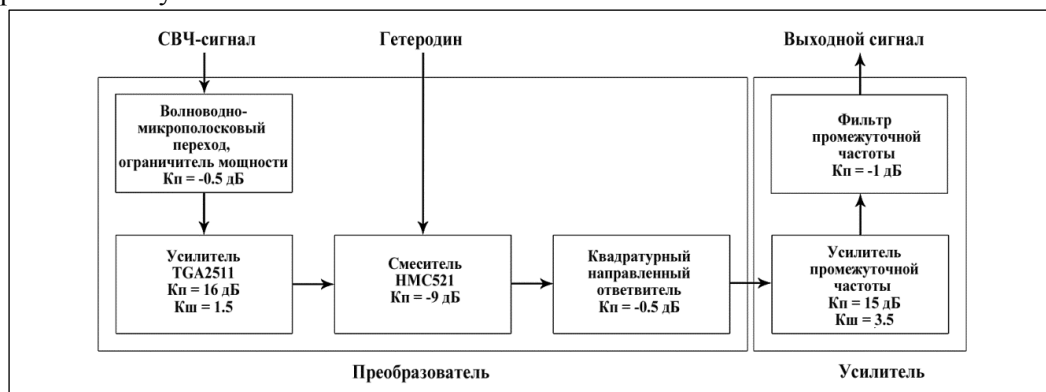


Рис. 1. Структурная схема приёмного модуля

Расчёт структуры тракта приёмного модуля проведён при двух уровнях входной мощности сигнала. Расчёт коэффициента шума при слабосигнальном воздействии выполнен по формуле Фриса [1], расчёт уровня выходной мощности при поступлении на вход сигнала с максимальным рабочим уровнем мощности проведён алгебраическим сложением коэффициентов передачи, полученных из экспериментального измерения характеристик входящих устройств (усилителей, смесителя, квадратурного сумматора). При использовании микросхем TGA2511 в качестве усилителя и HMC521 в качестве смесителя, для обеспечения коэффициента шума приёмного модуля достаточно использовать один усилительный СВЧ-каскад, при этом общий коэффициент передачи преобразователя составляет $6 \pm 1\text{ дБ}$, коэффициент шума – $2.5 \pm 0.2\text{ дБ}$. Элементом, который в большей мере определяет характеристику подавления зеркального канала преобразователя, является квадратурный сумматор в полосе промежуточной частоты. В литературе [2] описан квадратурный направленный ответвитель (КНО) на дифференциальных трансформаторах, схема которого приведена на рис. 2.

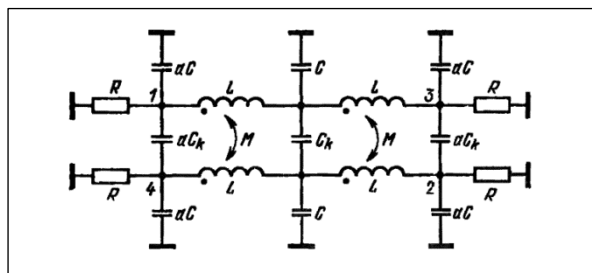


Рис. 2. Схема КНО на дифференциальных трансформаторах

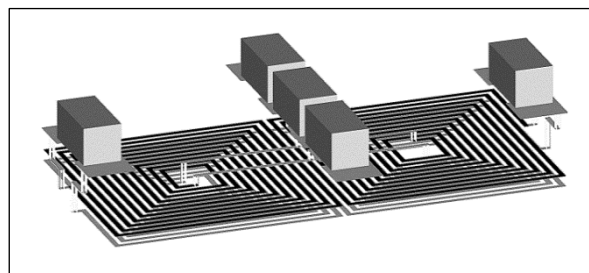


Рис. 3. Трёхмерная модель КНО, выполненного по технологии LTCC

В приёмном модуле применена новая конструкция КНО на дифференциальных трансформаторах, трёхмерная модель которого приведена на рис. 3. Традиционная реализация такого КНО на основе сосредоточенных элементов в диапазоне промежуточных частот приёмного модуля характеризуется трудоёмкой настройкой, большими габаритами (и как следствие – низкой устойчивостью к механическим воздействиям). Для реализации КНО в рамках данной работы выбрана технология LTCC, позволяющая объединить КНО и входную СВЧ-часть на одной плате.

Дифференциальные трансформаторы выполнены во внутренних слоях платы, а керамические конденсаторы установлены на поверхность платы. Расчёт параметров элементов КНО выполнен в 2 этапа. На первом этапе определены значения номиналов элементов КНО. На втором этапе проведён расчёт геометрических размеров структуры трансформаторов [3], электродинамическое моделирование трансформаторов и оптимизация. Размеры КНО составили $11 \times 6 \times 2,9$ мм.

Преобразователь реализован на единой девятислойной керамической плате, внешний вид которой приведён на рис. 4. Размеры преобразователя составляют $27 \times 15 \times 3,3$ мм. Реализация преобразователя с использованием технологии LTCC обеспечила компактность, необходимую для вибро- и удароустойчивости. Усилитель промежуточной частоты должен, во-первых, обеспечивать низкий коэффициент шума при слабосигнальном воздействии. Во-вторых, при поступлении на вход приёмного модуля мощности $+3$ дБм, обеспечивать фиксированный уровень выходной мощности $13 \pm 1,2$ дБм, и таким образом компенсировать зависимость коэффициента передачи преобразователя от температуры. Принципиальная схема усилителя, обеспечивающего требуемые характеристики, представлена на рис. 5.

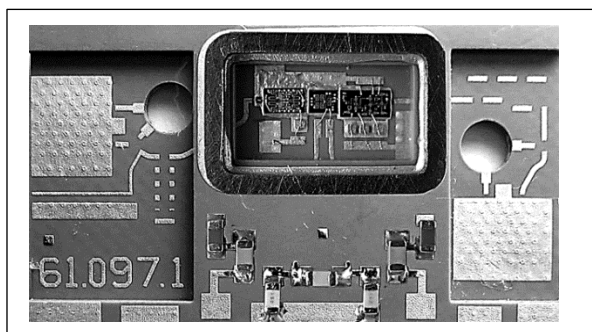


Рис. 4. Внешний вид преобразователя

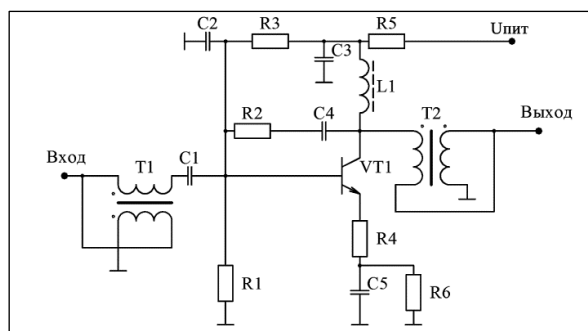


Рис. 5. Принципиальная схема усилителя промежуточной частоты

В качестве основного элемента усилителя, выполненного по схеме с общим эмиттером [4], выбран транзистор 2Т399А, обладающий собственным коэффициентом шума по входу менее 3,5 дБ.

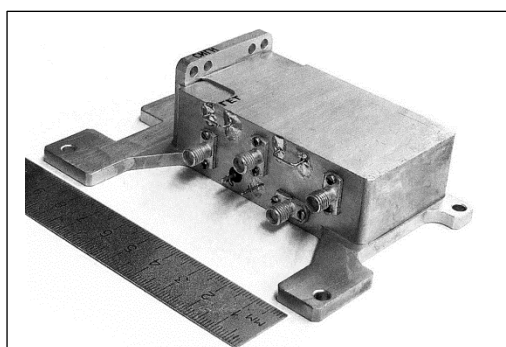


Рис. 6. Внешний вид разработанного приёмного модуля

Коэффициент передачи усилителя в слабосигнальном режиме составляет 15 ± 1 дБ. Входной импеданс транзисторного каскада усилителя составляет 600 Ом, и является оптимальным по минимальному значению коэффициента шума каскада, выходной импеданс – 225 Ом. Ограничивающим выходную мощность фактором является стабилизированное напряжение питания усилителя.

Разработанный приёмный модуль (см. рис. 6) представляет собой металлический корпус оригинальной конструкции, в состав которого отдельными сборочными единицами входят преобразователь (см. рис. 4), выполненный в виде керамической платы на титановом основании, и усилитель, выполненный в виде стеклотекстолитовой платы. Бескорпусные полупроводниковые элементы, заключены в герметичный объём, созданный в полости керамической платы. Другие компоненты и линии защищены герметиком.

В результате измерения характеристик 30 образцов приёмных модулей, в том числе при воздействии таких факторов, как импульсная и широкополосная вибрация, одиночные и многократные удары, пониженное и повышенное давление, получены следующие характеристики:

- коэффициент шума по входу – 3.2,...,3.5 дБ;
- коэффициент передачи при слабосигнальном воздействии – 18,...,22 дБ;
- $P_{\text{вых}}$ при воздействии на вход сигнала мощностью +3 дБм – 13 ± 1.2 дБм;
- подавление помехи по зеркальному каналу – 21,...,27 дБ;
- КСВН входов – менее 1.6.

Выводы

Конструктивное исполнение приёмного модуля, отличающееся минимальными массой и габаритами составных частей (размер СВЧ-части, включая квадратурный сумматор в КВ-диапазоне частот, составляет $27 \times 15 \times 3.3$ мм), и локальной герметизацией составных частей обеспечивает устойчивость приёмного модуля к механическим и климатическим воздействиям, характерным для бортовых устройств связи. Новая конструкция квадратурного сумматора, в которой связанные индуктивности выполнены в виде проводников специальной формы в слоях LTCC платы, при геометрических размерах – $11 \times 6 \times 2.9$ мм, обеспечивает амплитудную неидентичность – менее 0.8 дБ и фазовую ошибку – менее 2° между каналами в полосе частот более 1.2 октавы. Такие электрические характеристики квадратурного сумматора позволяют получить подавление зеркального канала приемного модуля более 27 дБ. Усилитель промежуточной частоты, отличающийся тем, что максимальная выходная мощность ограничена напряжением питания в диапазоне от 11.8 до 14.2 дБм при изменении температуры от -50°C до $+65^\circ\text{C}$, обеспечивает требуемую точность выходной мощности. Разработанный приёмный модуль X-диапазона частот, за счёт улучшения электрических параметров относительно ранее применяемого аналога (коэффициент шума по входу снижен на 10 дБ, подавление зеркального канала приёма увеличено на 17 дБ), позволяет увеличить дальность действия, повысить помехоустойчивость бортовых комплексов связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буга Н.Н., Фалько А.И., Чистяков Н.И. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов / под ред. Н.И. Чистякова. – М.: Радио и связь, 1986. – С.22–27.
2. Заенцев В.В., Катушкина В.М., Лондон С.Е., Модель З.И. Устройства сложения и распределения мощностей высокочастотных колебаний / под ред. З.И. Моделя. – М.: Сов. радио, 1980. – С.138–141.
3. Карлов В.М., Малышев В.А., Перевощиков И.В. Широкополосные устройства СВЧ на элементах с сосредоточенными параметрами / под ред. В.А. Малышева. – М.: Радио и связь, 1984. – С.37–42.
4. Морозов А.Г. Электротехника, электроника, импульсная техника. – М.: Высш. шк., 1987. – С.360–381.

MICROWAVE RECEIVING MODULE FOR ON-BOARD EQUIPMENT

S.V. Berezovskiy, N.A. Mihailov, A.V. Shtik, M.B. Orehov

The microwave receiving module was developed within the frames of on-board communication complexes upgrading to increase its effectiveness.

The article states development results of X-band receiving module for on-board communication equipment, performing function of frequency conversion, frequency discrimination and amplification.

The features of receiving module construction design were described, providing rigidity to mechanical and climatic effects specific to on-board equipment.

Technical requirements for the receiving module, its structural scheme are stated, the integrated parts which have a max effect on receiving module characteristics were defined. The sequence of path structure calculation to provide required characteristics was described. A new design of quadrature directional coupler on differential transformers and its estimation particularities were described, where coupled inductances are performed as special form conductors in layers of low temperature cofired ceramic (LTCC) card.

An intermediate frequency amplifier circuit is performed, which provides specific dependence of output power on input signal level.

The article states characteristics measurement results of 30 receiving modules items, including under influence of impulse and broad-band vibration, single and multiple impacts, reduced and increased pressure.

Поступила 8 июня 2017 года.

ДВУХПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ЗЕРКАЛЬНАЯ АНТЕННА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

© Авторы, 2018

С.И. Бойчук

руководитель группы, ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи» ФНПЦ, г. Ростов-на-Дону

Д.Д. Габриэлян доктор технических наук, профессор,

зам. начальника НТК по науке, ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи» ФНПЦ, г. Ростов-на-Дону

E-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru

В.И. Демченко кандидат технических наук,

руководитель НТК, ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи» ФНПЦ, г. Ростов-на-Дону

А.О. Жуков

ведущий инженер, ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи» ФНПЦ, г. Ростов-на-Дону

А.Е. Коровкин

ведущий инженер, ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи» ФНПЦ, г. Ростов-на-Дону

Д.Я. Раздоркин

зам. начальника НТК, ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи» ФНПЦ, г. Ростов-на-Дону

А.В. Шипулин

руководитель подразделения, ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи» ФНПЦ, г. Ростов-на-Дону

В статье рассматривается двухполяризационная зеркальная антенна, предназначенная для использования в составе мобильной радиолокационной станции (РЛС), обеспечивающей автоматическое обнаружение низколетящих воздушных объектов в пределах заданной зоны и выдачу данных РЛС автосопровождения. Получаемая информация о радиолокационных характеристиках объектов используется для их идентификации. Предлагается вариант построения антенно-волноводного тракта, обеспечивающий формирование трёх лучей в вертикальной плоскости, в каждом из которых обеспечивается излучение сигналов линейных ортогональных поляризации и приём согласованной и кроссполяризационной составляющих. Рассматриваются также вопросы оценки повышения эффективности применения РЛС при использовании двухполяризационной антенны.

Ключевые слова: двухполяризационная зеркальная антенна, антенно-волноводный тракт, матрица рассеяния, поляризационная анизотропия, поворот базиса объекта, согласованная и кроссполяризационная составляющие сигнала.

The article considers the dual-polarization reflector antenna designed for use in a mobile radar station (radar), which provides automatic detection of low-flying aerial objects within a given zone and issuing an autotracking radar data. Received information on radar characteristics of objects is used for its identification. The variant of the antenna-waveguide feeder construction is proposed, which provides the formation of three beams in vertical plane, in each of which the signals radiation of linear orthogonal polarizations and receiving of coherent and cross-polarization components is provided. The evaluation questions of radar efficiency improvement during use of dual-polarization antenna are considered as well.

Keywords: dual-polarization reflector antenna, antenna and waveguide feeder, scattering matrix, polarization anisotropy, rotation basis object, coherent and cross-polarization components of the signal.

Задача повышения эффективности РЛС при обнаружении и идентификации низколетящих объектов с малой эффективной площадью рассеяния (ЭПР) может быть решена при условии получения дополнительных признаков. В системе распознавания объектов могут использоваться различные радиолокационные портреты, основанные на различных признаках: мощностном, флуктуационном, частотно-корреляционном, частотно-резонансном, поляризационном, дальностном, картинном, спектральном [1].

Одно из перспективных направлений повышения эффективности обнаружения и распознавания объектов в РЛС связано с использованием таких параметров радиолокационного сигнала (признаков объекта), как поляризационная степень анизотропии μ и угол ориентации собственного базиса объекта относительно измерительного α [2].

Поскольку информация о признаках содержится в принимаемых сигналах, которые являются результатом взаимодействия зондирующих сигналов с объектом, то одним из путей получения дополнительных признаков может быть использование зондирующих сигналов на ортогональных поляризациях, вертикальной и горизонтальной. Это следует из того, что определяемые радиолокационные характеристики объекта зависят как от линейных размеров самого объекта, так и от поляризации зондирующих сигналов и могут быть описаны с помощью матрицы рассеяния (матрицы Стокса):

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sqrt{\sigma_{hh}} \exp(i\varphi_{hh}) & \sqrt{\sigma_{hv}} \exp(i\varphi_{hv}) \\ \sqrt{\sigma_{vh}} \exp(i\varphi_{vh}) & \sqrt{\sigma_{vv}} \exp(i\varphi_{vv}) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

следующим образом:

$$\mu = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2). \quad (2)$$

В соотношениях (1), (2) λ_1 и λ_2 – собственные числа матрицы Σ ; σ_{hh} , σ_{hv} , σ_{vh} и σ_{vv} – ЭПР объекта при излучении сигналов горизонтальной (h), вертикальной (v) поляризации и приёме согласованной или кроссполяризационной составляющей отражённых сигналов; φ_{hh} , φ_{hv} , φ_{vh} и φ_{vv} – фазы соответствующих составляющих принимаемых сигналов. Параметр α при этом определяется как разность фаз несущих колебаний ортогональных поляризаций.

Вариантом построения антенной системы, обеспечивающей излучение сигналов двух ортогональных поляризаций, является зеркальная антенна (ЗА). Достоинством такой антенны является возможность формирования высокого энергетического потенциала радиолинии при относительно невысокой, по сравнению с антенной решёткой, стоимости антенны.

Кроме того, зеркальная антенная система достаточно просто обеспечивает круговой обзор по углу азимута, что является необходимым требованием к РЛС обнаружения объектов с учётом априорной неопределённости их появления. В этой связи представляет интерес построение РЛС на основе ЗА, излучающей сигналы на ортогональных линейных поляризациях и принимающей отражённые сигналы на совпадающих и кроссполяризационных составляющих.

Цель настоящей статьи – изложение разработанного предложения по схемному построению и конструктивной реализации двухполяризационной ЗА для РЛС обнаружения и идентификации объектов.

С выбранного ракурса в статье будут рассмотрены и решены следующие задачи:

1. Разработка схемной реализации двухполяризационной зеркальной антенны РЛС обнаружения объектов.
2. Оценка повышения эффективности применения двухполяризационной ЗА в РЛС обнаружения объектов по сравнению с использованием ЗА на одной поляризации.

Разработка схемной реализации

двухполяризационной зеркальной антенны РЛС обнаружения объектов

К основным отличиям рассматриваемой двухполяризационной ЗА РЛС обнаружения объектов в сравнении с аналогичными РЛС на основе зеркальных антенн с механическим сканированием луча в горизонтальной плоскости можно отнести:

- использование когерентных в каждом канале зондирующих сигналов на ортогональных линейных поляризациях с возможностью параллельного или последовательного излучения;
- формирование зоны обзора в вертикальной плоскости из нескольких (трёх-четырёх) лучей, пересекающихся по уровню половинной мощности, с одновременным использованием в каждом луче зондирующих сигналов на разных несущих частотах;
- возможность изменения зоны обзора в вертикальной плоскости за счёт качания рефлектора в виде несимметричной вырезки из параболоида вращения при неподвижном многоэлементном облучателе;

– возможность стационарного размещения аппаратуры передачи и приёма сигналов за счёт установки по оси азимута двухканального вращающегося перехода, обеспечивающего малые потери, на волноводе круглого сечения.

Обеспечение кругового обзора по углу азимута возможно на основе двух различных решений по построению зеркальной антенны:

– в первом случае вся аппаратура антенны, включая генераторы СВЧ-сигналов, устанавливается на вращающейся вокруг вертикальной оси платформе;

– во втором случае на вращающейся платформе устанавливаются только зеркальная, облучающая системы и часть антенно-волноводного тракта, обеспечивающая при излучении разделение сигналов с различной частотой несущей по соответствующим облучателям и их объединение в один тракт при приёме сигналов. Вся остальная аппаратура размещается на неподвижной платформе.

Недостатком первой схемы является сложность построения тракта силового питания аппаратуры, сигналов РЛС для последующего использования получаемой об объектах информации и большая масса оборудования, устанавливаемого на вращающейся платформе.

Второй вариант размещения аппаратуры РЛС, включая ЗА, лишён данных недостатков.

Структурная схема варианта построения антенно-волноводного тракта (АВТ) двухполяризационной ЗА применительно к случаю одновременного формирования трёх лучей в вертикальной плоскости приведена на рис. 1.

Антенно-волноводный тракт состоит из облучателя, образованного тремя излучателями, расположенными в вертикальной плоскости, четырёх частотных триплексеров, двухканального вращающегося перехода, двух модулей разделения каналов приёма/передачи на основе фазовых циркуляторов и соединительных волноводов.

В качестве излучателей рассматриваются рупоры с присоединёнными ортомодовыми преобразователями, образующими ортогонально-поляризованные входы/выходы. Частотные триплексеры представляют собой каждый волноводное устройство, образованное тремя полосно-пропускающими фильтрами с общим входом (выходом).

В режиме передачи они обеспечивают суммирование без потерь сигналов с разными несущими частотами от передатчиков на один выход и разделение этих сигналов для подачи на входы излучателей.

В режиме приёма частотные триплексеры суммируют сигналы каждой поляризации, поступающие с выходов излучателей, на один выход.

При одновременном приёме сигналов двух ортогональных поляризаций сигнал каждой поляризации будет являться суперпозицией двух составляющих: сигнал вертикальной поляризации – vv и hv составляющих, сигнал горизонтальной поляризации – hh и vh составляющих. При этом сигнал кроссполяризационной составляющей на 10,...,20 дБ ниже по уровню сигнала согласованной поляризации.

Для разделения этих составляющих (формирования полной матрицы Стокса) необходимо использовать сложные сигналы с различными параметрами для двух ортогональных излучаемых сигналов. Это позволит в приёмном канале для сигналов каждой из поляризаций провести разделение кроссполяризационной и согласованной составляющих: vv и hv составляющих в канале приёма сигналов вертикальной поляризации, hh и vh составляющих в канале приёма сигналов горизонтальной составляющей.

Трансляция сигналов разных поляризаций от передающей аппаратуры к облучателю и, соответственно, от облучателя к приёмной аппаратуре при круговом вращении антенны обеспечивается с помощью двухканального вращающегося перехода на круговых модах H_{11} круглого волновода, образованного двумя сборками, состоящими из 90°-поляризатора и ОМП, и дроссельного сочленения.

При реализации в поляризаторе фазового сдвига между ортогональными составляющими (90 ± 2)° поляризационные потери в таком устройстве не превысят 0.1 дБ.

Построение РЛС на основе такой антенны при использовании современных аппаратно-программных средств цифровой обработки принимаемых сигналов позволит получить значительные преимущества перед традиционными РЛС при обнаружении низколетящих объектов с малым ЭПР и выделении их информативных признаков.

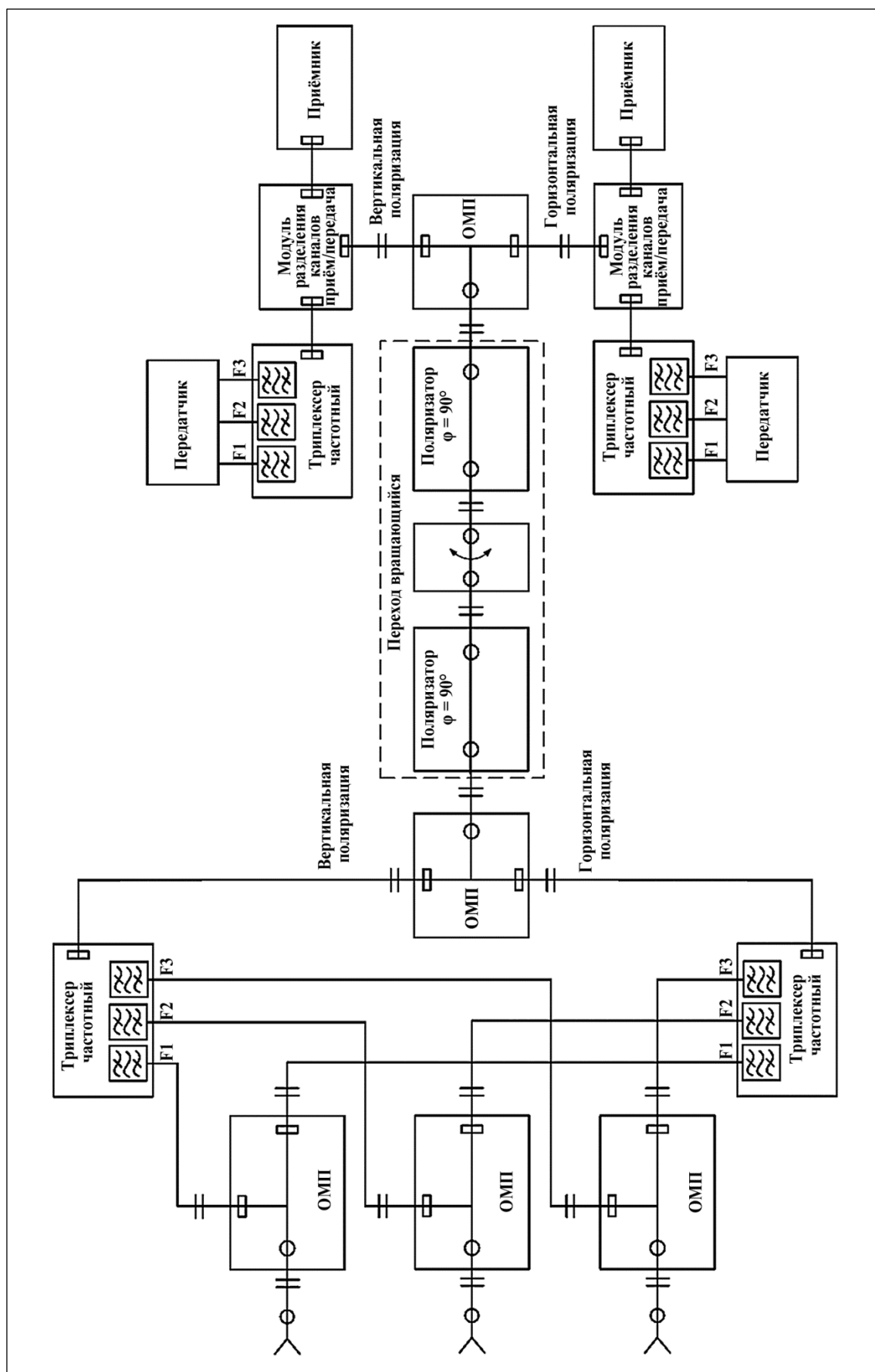


Рис. 1. Структурная схема двухполяризационной ЗА с формированием трёх лучей в вертикальной плоскости

Оценка повышения эффективности применения двухполяризационной ЗА в РЛС обнаружения объектов по сравнению с использованием ЗА на одной поляризации

Использование сигналов двух ортогональных линейных поляризаций, как отмечалось выше, даёт возможность повысить точность оценивания параметров μ и α , характеризующих тип обнаруженного объекта, что повышает вероятность его правильной идентификации. Точность оценивания указанных параметров характеризуется их дисперсией, которая может быть найдена на основе плотности распределения $p(\mu)$ и $p(\alpha)$ [2]. Результаты исследований приведены на рис. 2.

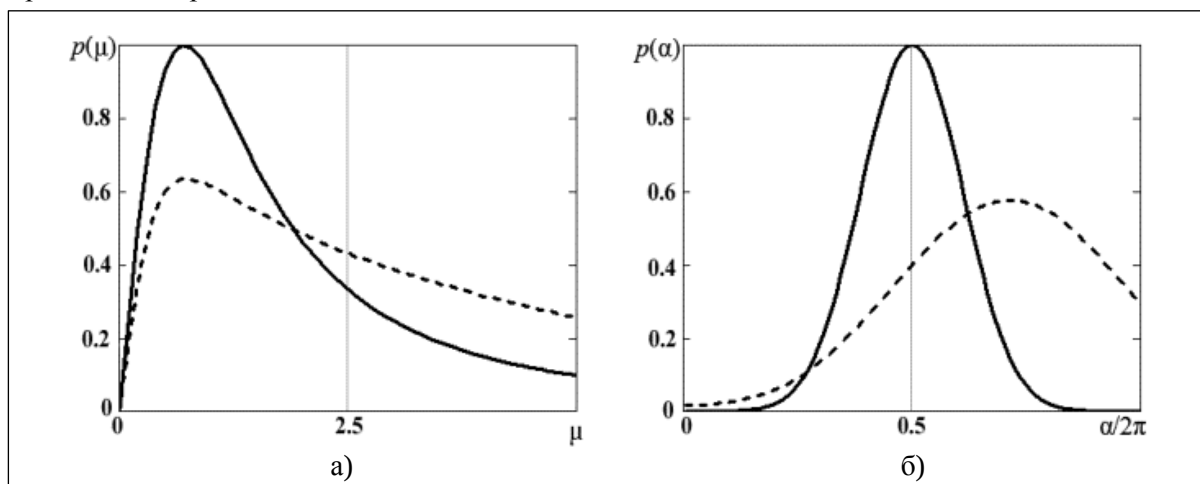


Рис. 2. Распределение плотности вероятности оценок радиолокационных параметров объекта: а – поляризационной анизотропии; б – ориентации собственного базиса

Моделирование проводилось для случая отношения «сигнал/шум» при приёме сигналов основной поляризации 10 дБ и 0 дБ при приёме кроссполяризационной составляющей. Сплошная линия соответствует случаю использования двухполяризационной зеркальной антенны, штриховая линия – зеркальной антенне, работающей на одной поляризации. В случае двухполяризационной ЗА производилось определение всех четырёх элементов матрицы Стокса, на основе которых находились параметры μ и α .

Для однополяризационной антенны рассматривался случай поочерёдного облучения цели сигналами вертикальной и горизонтальной поляризаций и приём сигналов согласованных поляризаций. В этом случае использовалась матрица (1), внедиагональные элементы которой равны нулю.

При моделировании рассматривалась цель с поляризационной анизотропией $\mu = 0.6$ и разностью фаз несущих в каналах ортогональных поляризаций – $\alpha = 180^\circ$, как один из наиболее сложных случаев идентификации и обнаружения цели.

На основе приведённых зависимостей было получено, что достигаемое повышение эффективности применения РЛС состоит в уменьшении дисперсии оценок поляризационной анизотропии и ориентации собственного базиса объекта (сплошная и штриховая линии на рис. 2а для поляризационной анизотропии, сплошная и штриховая линии на рис. 2б для ориентации собственного базиса цели). При этом дисперсия оценки поляризационной анизотропии уменьшается в 1.6 раза, дисперсия ориентации собственного базиса объекта – в 1.4 раза.

Кроме того, использование однополяризационной ЗА при таком подходе приводит к смещению оценки разности фаз несущих сигналов ортогональных поляризации $80^\circ, \dots, 90^\circ$, в то время как для двухполяризационной ЗА оценка является несмещённой (сплошная и штриховая линии на рис. 2б для ориентации собственного базиса цели). В совокупности это позволяет повысить вероятность правильной идентификации обнаруживаемого объекта.

Заключение

1. Выполненный анализ схем реализации двухполяризационной зеркальной антенны РЛС обнаружения объекта показал преимущества схемы, в которой зеркальная и облучающая системы совместно с поляризатором, ортомодовым преобразователем располагаются на вращающейся платформе, а передатчик, приёмник и модуль разделения сигналов совместно

с системой энергоснабжения – на неподвижной платформе. Антенно-волноводный тракт при такой схеме построения с формированием трёх лучей в вертикальной плоскости состоит из трёх облучателей, расположенных в вертикальной плоскости, четырёх частотных триплексеров, двухканального вращающегося перехода, двух модулей разделения каналов приёма/передачи на основе фазовых циркуляторов и соединительных волноводов.

В качестве облучателей рассматриваются рупоры с присоединёнными ортомодовыми преобразователями, образующими ортогонально-поляризованные входы/выходы. Частотные триплексеры представляют собой каждый волноводное устройство, образованное тремя полосно-пропускающими фильтрами с общим входом (выходом).

В режиме передачи обеспечивается суммирование без потерь сигналов с разными несущими частотами от передатчиков для одного выхода и разделение этих сигналов для подачи на входы излучателей. В режиме приёма частотные триплексеры суммируют сигналы каждой поляризации, поступающие с выходов излучателей, на один выход.

Трансляция сигналов разных поляризаций от передающей аппаратуры к облучателю и, соответственно, от облучателя к приёмной аппаратуре при круговом вращении антенны обеспечивается с помощью двухканального вращающегося перехода на круговых модах H_{11} круглого волновода, образованного двумя сборками, состоящими из 90° -поляризатора и ОМП, и дроссельного сочленения. При реализации в поляризаторе фазового сдвига между ортогональными составляющими $(90 \pm 2)^\circ$ поляризационные потери в таком устройстве не превысят 0.1 дБ.

2. Проведённое для случая приёма сигналов, отражённых от цели с поляризационной анизотропией $\mu = 0.6$ и $\alpha = 180^\circ$ при отношении «сигнал/шум» для сигналов основной поляризации 10 дБ и 0 дБ при приёме кроссполяризационной составляющей, моделирование показало, что достигаемое повышение эффективности применения РЛС с двухполяризационной ЗА по отношению к РЛС с однопозиционной ЗА составляет:

- уменьшение дисперсии оценки поляризационной анизотропии в 1.6 раза;
- уменьшение дисперсии ориентации собственного базиса объекта в 1.4 раза;
- устранение смещения оценки ориентации собственного базиса цели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик А.Л., Барабаш Ю.Л., Кривошеев О.В., Эпштейн С.С. Селекция и распознавание целей на основе локационной информации / под ред. А.Л. Горелика. – М.: Радио и связь, 1990.
2. Лукьянов С.П. Эффективность поляризационных радиолокаторов в задаче обнаружения стабильных целей на фоне пассивных помех // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2000, №5. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may00/5/text.pdf>.

DUAL-POLARIZATION MIRROR ANTENNA OF RADAR OBJECTS DETECTION SYSTEM

S.I. Boichuk, D.D. Gabrielyan, V.I. Demchenko, A.O. Zhukov, A.E. Korovkin, D.Y. Razdorkin, A.V. Shipulin

The article considers the dual-polarization reflector antenna designed for use in a mobile radar station (radar), which provides automatic detection of low-flying aerial objects within a given zone and issuing an autotracking radar data. The variant of the antenna-waveguide feeder construction is proposed, which provides the formation of three beams in vertical plane, in each of which the signals radiation of linear orthogonal polarizations and receiving of coherent and cross-polarization components is examined.

Antenna construction stipulates the scheme in which the mirror system and exciter jointly with polarizer, orthomode converter, are mounted on rotating platform, and the transmitter, receiver and signals separation module jointly with power supply system – on stationary platform.

Поступила 8 июня 2017 года.

ВЗАИМНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ КРУГОВЫХ ВИТКОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЛОСКОСТЯХ

© Автор, 2018

А.Н. Бруевич доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ведущий инженер, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва
E-mail: info@raspletin.com

Вычислена взаимная индуктивность круговых витков, расположенных в параллельных плоскостях. Для больших расстояний между витками получены простые расчётные соотношения.

Ключевые слова: взаимная индуктивность, круговой виток, векторный потенциал.

The mutual inductance of circular turns located in parallel planes is calculated. For large distances between turns, simple calculation relationships were obtained.

Keywords: mutual inductance, circular turn, vector potential.

Введение

При конструировании ВЧ тракта радиотехнической аппаратуры может потребоваться рассчитать взаимную индуктивность двух цилиндрических катушек с параллельными осями. В известной автору литературе, например [1, 2], и других приводятся соотношения для расчёта взаимной индуктивности катушек, расположенных на одной оси. Между тем, для проектирования печатных плат требуется расчёт взаимной индуктивности катушек, расположенных на одной плоскости. Автору не известны работы, в которых приводились бы соответствующие соотношения. Данная работа призвана восполнить этот пробел. В ней приводятся соотношения, позволяющие рассчитать взаимную индуктивность двух бесконечно тонких круговых витков, расположенных в двух параллельных плоскостях. Для случая, когда расстояние между витками много больше их радиусов, получены простые расчётные соотношения для величины взаимной индуктивности.

Для витков, расположенных в одной плоскости и не перекрывающих друг друга, путём численного интегрирования определены значения взаимной индуктивности, что позволяет оценить точность упомянутого выше приближения.

Расчётные соотношения для параллельных витков

С помощью метода векторного потенциала в работе [1] выведено общее соотношение, определяющее взаимную индуктивность двух замкнутых, произвольно расположенных витков, как это показано на рис. 1. Это соотношение имеет вид двойного интеграла по двум замкнутым контурам. Если относительная магнитная проницаемость среды равна единице, то расчётная формула в [1] получает вид:

$$M = \iint \frac{dl_1 dl_2}{R(l)}, \quad (1)$$

где $dl_1 dl_2$ – скалярное произведение дифференциалов при обходе первого и второго витков по контуру, $R(l)$ – расстояние между этими дифференциалами.

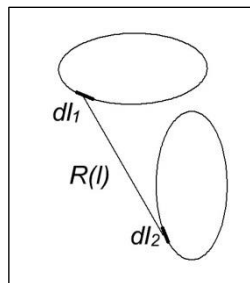


Рис. 1. Два замкнутых, произвольно расположенных витка

Используем данное соотношение для случая, когда витки являются круговыми и расположены в двух параллельных плоскостях. В данном случае система является полностью симметричной относительно этих витков, поэтому, не нарушая общности, присвоим большему витку номер 1, а меньшему – номер 2. Соответственно, первый виток лежит в первой плоскости, а второй – во второй. Проведём через центры витков третью

плоскость, перпендикулярную двум первым. Сечение пространства этой плоскостью показано на рис. 2. Центры витков расположены на расстоянии R друг от друга. Расстояние между плоскостями равно H . Расположение витков в пространстве показано на рис. 2 в проекции на третью плоскость. Расстояние между центром первого витка и центром проекции второго на первую плоскость равно L . Угол между направлением R и вертикалью равен Ψ .

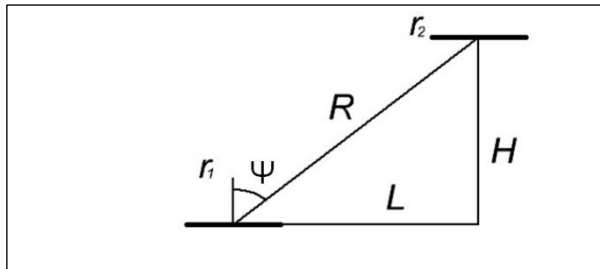


Рис. 2

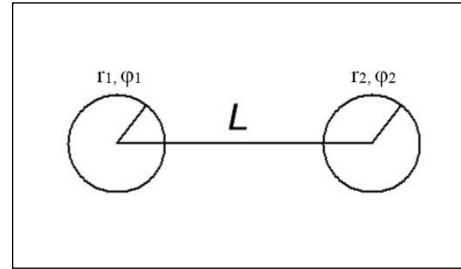


Рис. 3

Очевидно, что размеры R , H , L связаны соотношением:

$$H = R \cos \Psi; \quad L = R \sin \Psi. \quad (2)$$

Перейдём к расчёту элементов подынтегральной функции в (1). Для этого спроектируем второй виток на первую плоскость. Тогда получим картину, изображённую на рис. 3. Для обхода витков по контуру введём полярные координаты r и угол φ , который меняется от 0 до 2π . Поскольку дифференциалы dl_1 и dl_2 расположены в параллельных плоскостях, то их скалярное произведение есть:

$$(dl_1 dl_2) = r_1 r_2 \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2) d\varphi_1 \cdot d\varphi_2. \quad (3)$$

Далее найдём декартовы координаты, соответствующие обходу первого и второго витков:

$$\begin{aligned} x_1 &= r_1 \cdot \cos \varphi_1; & y_1 &= r_1 \cdot \sin \varphi_1; \\ x_2 &= L + r_2 \cdot \cos \varphi_2; & y_2 &= r_2 \cdot \sin \varphi_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Наконец, учитывая геометрию расположения витков, (см. рис. 2 и рис. 3) найдём расстояние между точками их обхода:

$$R^2(l) = H^2 + (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2. \quad (5)$$

Напомним, что радиус первого витка больше радиуса второго, и введём две следующие относительные величины, первая из которых всегда меньше единицы, а вторая мала в дальней зоне:

$$a = r_2 / r_1 < 1; \quad e = r_1 / R. \quad (6)$$

Теперь подставим (4) в (5), учтём связь расстояний (2) и обозначения (6). Далее раскроем скобки и приведём подобные члены. Тогда для расстояния между точками контуров получим:

$$R(l) = R \sqrt{1 + 2m(\varphi_1, \varphi_2)}. \quad (7)$$

Входящую сюда функцию углов $m(\varphi_1, \varphi_2)$ представим как ряд по степеням параметра e , который в дальней зоне является малым:

$$m(\varphi_1, \varphi_2) = e \cdot \alpha(\varphi_1, \varphi_2) + e^2 \cdot \beta(\varphi_1, \varphi_2). \quad (8)$$

В свою очередь функции, не зависящие от расстояния между витками e :

$$\alpha(\varphi_1, \varphi_2) = \sin \Psi (a \cos \varphi_2 - \cos \varphi_1); \quad \beta(\varphi_1, \varphi_2) = (1 + a^2) / 2 - a \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (9)$$

Подставив все эти обозначения в (1), получим для взаимной индуктивности:

$$M = \frac{r_1 r_2}{R} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} [\cos(\varphi_1 - \varphi_2) / \sqrt{1 + 2m(\varphi_1, \varphi_2)}] d\varphi_1 d\varphi_2. \quad (10)$$

Полученное выражение даёт точное значение взаимной индуктивности двух бесконечно тонких параллельно расположенных кольцевых витков. Как видим, оно сводится к необходимости вычисления двойного интеграла, что в общем случае можно сделать только численно. Исключение составляет случай соосных витков, когда $\Psi = 0$. Тогда, как видно из (9), функция $\alpha(\varphi_1, \varphi_2) = 0$, а функция $m(\varphi_1, \varphi_2)$ (8) зависит только от разности углов. При этом один интеграл вычисляется, и взаимная индуктивность выражается через эллиптические интегралы [1]. Однако в общем случае такие вычисления достаточно трудоёмки, поэтому сейчас получим

простое приближённое соотношение, справедливое при больших расстояниях между витками. При этом для расчётов удобно использовать значение взаимной индуктивности, нормированное к радиусу первого витка. С учётом обозначений (6), имеем:

$$M_{\mu} = M / r_1 = ea \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} [\cos(\varphi_1 - \varphi_2) / \sqrt{1 + 2m(\varphi_1, \varphi_2)}] d\varphi_1 d\varphi_2. \quad (11)$$

Взаимная индуктивность для разнесённых витков

Покажем теперь, что в случае разнесённых витков для расчёта взаимной индуктивности можно получить простое аналитическое выражение. Очевидно, что в случае сильно разнесённых витков $R \gg r_1$, и потому параметр $e \ll 1$.

Теперь, используя формулы [3], разложим корень в знаменателе (10) в ряд по степеням малой величины m :

$$1 / \sqrt{1 + 2m} = 1 - m + (3/2)m^2 - (5/3)m^3 + (35/8)m^4 \dots \quad (12)$$

Далее в правую часть (12) следует подставить малую величину m в виде двучлена по степеням e (8), произвести возведение в соответствующие степени и сгруппировать члены по степеням e . В результате получим:

$$1 / \sqrt{1 + 2m} = 1 - e\alpha + e^2(3\alpha^2 / 2 - \beta) + e^3(3\alpha\beta - 5\alpha^3) + e^4(3\beta^2 / 2 - 15 - 5\alpha^2\beta + 35\alpha^4 / 8). \quad (13)$$

Наконец, (13) следует подставить в двойной интеграл (11) и произвести интегрирование. Выполнить это не сложно, хотя и несколько трудоёмко. В результате оказывается, что интегралы от членов нулевого, первого и третьего порядков малости по e обращаются в ноль. Остаются только интегралы от квадратичного члена и члена четвёртого порядка. Они вычисляются элементарно. Тогда, для взаимной индуктивности удаётся получить достаточно простое приближённое выражение. При этом, как сказано выше, удобно нормировать взаимную индуктивность к радиусу большего витка r_1 , а остальные размеры выразить через относительные величины (6):

$$M_{\mu} = \pi^2 e^3 a^2 [2 - 3\sin^2 \Psi + 3e^2(1 + a^2)(-1 + 5\sin^2 \Psi - 35\sin^4 \Psi / 8)]. \quad (14)$$

Если витки соосны, то $\Psi = 0$ и из (14) получаем:

$$M_{\mu} = \pi^2 e^3 a^2 [2 - 3e^2(1 + a^2)]. \quad (15)$$

В наших обозначениях (15) совпадает с аналогичным разложением точного выражения [1], содержащего эллиптические интегралы.

Интересно отметить, что из (14) следует, что существует угол, при котором магнитная связь между витками отсутствует. Определить этот угол достаточно просто. Полагая правую часть (14) равной нулю и отбрасывая, для простоты, в квадратных скобках члены порядка e^2 , получаем уравнение:

$$2 - 3\sin^2 \psi_0 = 0 \text{ и, значит, } \psi_0 = 54.7^\circ. \quad (16)$$

Таким образом, располагая катушки под таким углом, можно значительно ослабить магнитную связь между ними.

Наконец, в наиболее интересном для данной статьи случае, когда катушки расположены на одной плоскости, $\Psi = \pi/2$. В результате для взаимной индуктивности получим следующее приближённое выражение:

$$M_{\mu} = -\pi^2 e^3 a^2 [1 + 9(1 + a^2)e^2 / 8 + \dots]. \quad (17)$$

Для того чтобы оценить точность этого приближения, получим точные значения путём численного вычисления соответствующих двойных интегралов.

Численный расчёт взаимной индуктивности

Если витки расположены в одной плоскости, то на их размеры следует наложить дополнительное условие. Очевидно, что в этом случае сумма радиусов двух витков должна быть меньше расстояния между центрами, т.е. витки не должны пересекаться. В наших обозначениях (6) это даёт:

$$r_1 + r_2 < R \rightarrow e < 1 / (1 + a). \quad (18)$$

При расчётах считалось, что радиусы витков одинаковы, т.е. $a = 1$. Этот случай представляет наибольший практический интерес. Как видно из (18), при $a = 1$ параметр $e < 0.5$. Автором при расчётах принято наибольшее значение $e = 0.49$, для того чтобы витки не перекрывались с учётом толщины проводов.

Вычисление двойного интеграла (11) производится с помощью формулы Симпсона. Вначале производится интегрирование по φ_2 , а далее – по φ_1 . В данном случае положение облегчается тем, что подынтегральная функция является периодической. Поэтому значение первого и последнего членов суммы одинаково, и они могут быть объединены. При этом вся последовательность коэффициентов в ряду Симпсона становится регулярной.

Все расчёты автором делались при делении интервала $(0, \dots, 2\pi)$ на 200 частей. Для проверки точности таких вычислений был рассмотрен очень неблагоприятный случай: $a = 1$ и $e = 0.49$ при числе интервалов 400. Сравнение результатов расчётов показало, что эти два результата отличаются на величину порядка 2×10^{-4} . Такая точность намного превосходит точность, требующую для радиотехнических расчётов.

Результаты расчёта взаимной индуктивности по точной формуле (11), полученные путём численного вычисления двойного интеграла и по приближённой формуле (17) с учётом одного и двух слагаемых в квадратных скобках, показаны в таблице. В первом столбце таблицы приведена величина, обратно пропорциональная расстоянию между центрами витков (6). Во втором столбце таблицы приведено точное значение взаимной индуктивности (11), полученное путём численного вычисления двойного интеграла. В третьем и четвёртом столбцах приведены результаты расчёта взаимной индуктивности по приближённой формуле (17) с учётом одного и двух слагаемых в квадратных скобках. Наконец в пятом и шестом столбцах приведена относительная ошибка расчётов этих приближённых значений в %. При расчётах считалось, что радиусы витков одинаковы, то есть $a = 1$ (6). Этот случай представляет наибольший практический интерес. Напомним, что при $a = 1$ из практических соображений автором при расчётах принято наибольшее значение $e = 0.49$.

Таблица

e	M_{11}	P_1	P_2	O_1	O_2	e	M_{11}	P_1	P_2	O_1	O_2
.49	-3.629	-1.161	-1.788	-68.0	-50.7	.32	-.426	-.323	-.398	-24.1	-6.7
.48	-2.952	-1.091	-1.657	-63.0	-43.9	.31	-.380	-.294	-.358	-22.6	-5.8
.47	-2.500	-1.025	-1.534	-59.0	-38.6	.30	-.338	-.266	-.320	-21.1	-5.1
.46	-2.158	-.961	-1.418	-55.5	-34.3	.29	-.299	-.241	-.286	-19.6	-4.4
.45	-1.886	-.899	-1.309	-52.3	-30.6	.28	-.265	-.217	-.255	-18.2	-3.8
.44	-1.661	-.841	-1.207	-49.4	-27.3	.27	-.234	-.194	-.226	-16.9	-3.3
.43	-1.471	-.785	-1.111	-46.6	-24.5	.26	-.206	-.173	-.200	-15.6	-2.8
.42	-1.308	-.731	-1.021	-44.1	-21.9	.25	-.180	-.154	-.176	-14.4	-2.4
.41	-1.166	-.680	-.938	-41.6	-19.6	.24	-.157	-.136	-.154	-13.3	-2.0
.40	-1.041	-.632	-.859	-39.3	-17.5	.23	-.137	-.120	-.134	-12.2	-1.7
.39	-.931	-.585	-.786	-37.1	-15.6	.22	-.118	-.105	-.117	-11.1	-1.4
.38	-.834	-.542	-.718	-35.0	-13.9	.21	-.102	-.091	-.100	-10.1	-1.2
.37	-.746	-.500	-.654	-33.0	-12.4	.20	-.087	-.079	-.086	-9.1	-1.0
.36	-.668	-.460	-.595	-31.1	-11.0	.19	-.074	-.068	-.073	-8.2	-.8
.35	-.598	-.423	-.540	-29.2	-9.7	.18	-.062	-.058	-.062	-7.4	-.6
.34	-.535	-.388	-.489	-27.5	-8.6	.17	-.052	-.048	-.052	-6.6	-.5
.33	-.478	-.355	-.442	-25.8	-7.6	.16	-.043	-.040	-.043	-5.8	-.4

Из таблицы видно, что два члена разложения дают точность около 20% уже в случае, когда $e < 0.41$, то есть если расстояние между центрами катушек $R > 2.44r$, т.е. катушки расположены весьма близко. Один член разложения даёт подобную точность, если расстояние между центрами катушек $R > 3.45r$.

В качестве примера практического использования данной таблицы отметим, что типовая конструкция катушки, используемой в ВЧ-тракте, состоит из цилиндрической части диаметром 5 мм, которая соединена с квадратным основанием. Сторона квадрата равна 7 мм, а наружный диаметр обмотки равен 6 мм. При этом средний радиус витка равен 2.75 мм. Расстояние между центрами не может быть меньше стороны квадрата, когда катушки стоят вплотную друг к другу. Таким образом, для катушек такой конструкции всегда параметр $e < 0.394$. Как видно из таблицы в этом случае два члена разложения (17) дают точность порядка 16%, что вполне достаточно для расчётов. Впрочем, если требуется большая точность, то для расчётов можно использовать точные значения, приведённые во втором столбце таблицы.

Заключение

Полученные выше соотношения для взаимной индуктивности двух кольцевых витков могут быть положены в основу расчёта взаимной индуктивности катушек конечной длины. Если длина катушек много меньше размеров витка, то взаимная индуктивность таких катушек будет в n^2 раз больше, где n число витков. Если длина катушки сравнима с размером витков, то такую катушку следует разбить по высоте на несколько коротких элементарных катушек. Рекомендации о действиях в этом случае приведены в [2] и в данной статье не рассматриваются.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Калантаров П.Л., Нейман Л.Р.** Теоретические основы электротехники. – Ленинград – Москва, Государственное энергетическое издательство, 1951.
2. **Котельников В.А., Николаев А.М.** Основы радиотехники. – Москва, Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1951.
3. **Градштейн И.С., Рыжик И.М.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – Москва, Физматгиз, 1963.

MUTUAL INDUCTANCE OF CIRCULAR TURNS, LOCATED IN PARALLEL PLANES

A.N. Bruevich

A general relation is obtained that allows one to calculate the mutual inductance of two circular turns located in two parallel planes. For the case when the distance between the turns is much greater than the radius of the turns, simple calculation relationships are given.

It is shown that for a certain arrangement of turns in space, there is no magnetic connection between the turns.

For the most interesting case, when the turns are located in the same plane, the accuracy of approximate relations is estimated. For this purpose, the integration of double integrals, allowing the exact value of the mutual inductance, has been numerically integrated. It is shown that the error in calculating the mutual inductance doesn't exceeds 20% even if the distance between the centers of the turns is 2.4 times larger than the radius.

Поступила 26 мая 2017 года.

УДК 666.65:661.845.02

БЕРИЛЛИЕВАЯ КЕРАМИКА ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ ТЕХНИКИ

© Авторы, 2018

В.Я. Вайспапир доцент,
зам. начальника НТО-4, АО «НПО НИИИП-НЗиК», г. Новосибирск
E-mail: waispapor@rambler.ru

В.С. Кийко доктор технических наук,
профессор кафедры химической технологии керамики и огнеупоров, ФГАОУ ВПО УрФУ, г. Екатеринбург
E-mail: v.kijko@mail.ru

Керамика на основе оксида бериллия обладает комплексом уникальных физико-химических свойств, таких как высокая химическая, термическая, механическая, радиационная стойкость, теплопроводность, скорость распространения звука, высокое удельное электросопротивление, малые диэлектрические потери, прозрачность для вакуумного, УФ, рентгеновского, видимого, ИК и СВЧ-излучений. Вместе с тем многие технические характеристики BeO-керамики и её возможные применения в различных экстремальных условиях, например, в условиях космоса, полностью не изучены. Это делает исследования свойств BeO-керамики особенно перспективными, поскольку такая керамика может найти широкое применение не только в электронике, но в аэрокосмической и других областях современной техники.

Ключевые слова: BeO-керамика, электрофизические свойства, примеси, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, СВЧ-техника.

Ceramic materials based on beryllium-oxide ceramics (BeO) have a lot of unique physical-chemical properties, such as high chemical, heat, mechanical and radiation resistance, thermal conductivity, high sound speed, high electrical resistivity, low dielectric loss, and transparency for vacuum, ultraviolet, X, visible light, infrared and RF radiation. At the same time, many technical characteristics and possible application of BeO-ceramic materials in different extremal conditions, for example in space, are not fully studied. It makes research of BeO-ceramic materials properties very promising, because BeO-ceramic materials can be widely applied not only in electronics, but also in aerospace and other fields of state-of-the-art technology.

Key words: BeO-ceramic, electro-physical properties, impurity, dielectric constant, dielectric loss factor, microwave equipment.

Некоторым свойствам бериллиевой керамики (BeO-керамики) посвящены две известные монографии, вышедшие на русском языке [1, 2]. Вместе с тем свойства BeO-керамики из-за возможностей её широкого применения в электронной промышленности, аэрокосмической и военной техники ждут дальнейшего изучения [1–15].

Как известно [2, 10, 11, 13], Россия до настоящего времени не имеет собственного достаточно крупного производства изделий из BeO-керамики, поэтому нужды электронной промышленности России по производству изделий из BeO-керамики частично компенсирует завод «Зенит-К» (бывший до 2015 года «КазМетизПром», находящийся в г. Усть-Каменогорске, Республика Казахстан). Возобновилось также производство керамики на Ульбинском металлургическом заводе, находящемся в этом же городе. Изделия на данных производствах получают по традиционным технологиям методами полусухого прессования и шликерного литья из термопластичных шликеров на органической основе [1, 2].

Внедрение нанотехнологий в промышленность позволило бы получать оптически прозрачную BeO-керамику с теоретической плотностью и высокими механическими свойствами. Такая технология до сих пор не создана из-за высокой токсичности BeO. Особенно высокотоксичны порошки, нанопорошки и пары бериллия. Основной проблемой при внедрении такого метода в промышленность является стопроцентное улавливание наночастиц порошка BeO в процессе технологического передела и получения керамики [2, 3, 13]. Спечённая BeO-керамика практически не токсична. Керамика на основе оксида бериллия в отличие от других широко

известных керамик на основе оксидов обладает уникальными физико-химическими свойствами, сочетающими в себе высокие химическую, термическую, радиационную стойкость и теплопроводность. Керамика обладает высокой скоростью звука, составляющей $\sim 12 \cdot 10^3$ м/с. Теплопроводность ВеО-керамики сравнима с теплопроводностью металлов (золота, серебра, меди) и уступает только алмазу. Последние измерения, выполненные авторами, показали, что теплопроводность ВеО-керамики может достигать значений от 300 до 320 Вт/(м·К), что незначительно отличается от теплопроводности химически чистой меди, у которой она составляет ~ 400 Вт/(м·К) [3, 14, 15]. Вместе с тем, обладая уникальной теплопроводностью, ВеО-керамика является хорошим электроизолятором – это широкозонный диэлектрик с шириной запрещенной зоны $E_g \approx 10.8$ эВ. Удельное электросопротивление керамических образцов из оксида бериллия при комнатной температуре находится в пределах от 10^{14} до 10^{15} Ом·см. ВеО-керамика является прозрачным материалом для вакуумного ультрафиолетового (ВУФ), рентгеновского и сверхвысокочастотного (СВЧ) излучений [2, 12].

В настоящее время изделия из обычной ВеО-керамики, полученной по традиционным технологиям (методами полусухого прессования или шликерного литья), широко применяются в качестве [2, 11, 13–15]:

- огнеупорного материала в специальной металлургии в качестве тиглей для плавления металлического бериллия, урана и драгоценных металлов;
- изоляторов-теплоотводов, подложек кристаллодержателей мощных транзисторов и микросхем в электронной, радио- и электротехнической промышленности для диссипации тепла, выделяемого при работе различных элементов функциональной электроники;
- окон и изоляторов для СВЧ-техники, в том числе и для радаров с фазированной антенной решёткой;
- диэлектрических разрядных трубок, резонаторов и полых диэлектрических волноводов в газовых ОКГ широкого спектрального диапазона (от ВУФ до ИК области спектра);
- тепловых труб, в криогенной технике, где теплопроводность при температуре от 45 до 50 К может составлять десятки тысяч Вт/(м·К);
- материала тепловыделяющего матричного элемента в ядерных реакторах;
- отражателя нейтронов в составе нейтронных фильтров, с примесями (например, бора) для защиты от нейтронов различных энергий.

В течение последних нескольких десятилетий были значительно расширены возможности применения такой керамики в различных современных технических устройствах. Установлено, что плотная (в том числе и светопрозрачная) ВеО-керамика может применяться в качестве [2, 3, 14, 15]:

- высокоэффективного материала для брони из-за благоприятных механических и физико-химических свойств. В этом плане особо необходимо отметить высокие теплофизические свойства (теплопроводность, термостойкость), высокую твёрдость (9 единиц по шкале Мооса) и скорость звука ВеО-керамики;
- материала звукопроводов, способных пропускать мощное ультразвуковое излучение с высокой скоростью (до $12 \cdot 10^3$ м/с) и малыми потерями;
- сцинтилляторов для тканеэквивалентных сцинтилляционных дозиметров нового поколения (более надёжных и технологичных);
- рабочего вещества для тканеэквивалентных термостимулированных люминесцентных, экзотермических и электронного парамагнитного резонанса дозиметров ионизирующего излучения;
- в качестве эффективных электроизоляторов для получения высокотемпературной замедленной водородной плазмы с магнитным обжатием (проект МАГО, Российский федеральный ядерный центр);
- кристаллического излучателя (и переизлучателя) в ВУФ области спектра;
- электропроводящая керамика на основе ВеО с добавками некоторых элементов (например, титана) может быть использована в качестве высокоэффективных анодов в газовых лазерах среднего ИК-диапазона (на CO_2), керамических проводников электрического тока в электрохимических устройствах и искусственного пробирного камня в пробирном надзоре.

Бериллиевая керамика очень чувствительна к примесной фазе. Примеси, попадающие в ВеО-керамику из исходных бериллий-содержащих порошков и в процессе спекания из атмо-

сферы печи (частично на уровне от 10^{-4} до 10^{-3} мас.%), способны изоморфно замещать ионы бериллия в катионной подрешётке. Избыточное содержание примесной фазы располагается на гранях микрокристаллов и пор, образуя поверхностные микроструктуры. Химический анализ спечённой промышленной керамики BeO показывает присутствие в её составе примесей ряда элементов C, Fe, Si, Al, Ca и др., попадающих в керамику с исходным порошком BeO и в процессе технологического передела получения керамики. Среди них наибольшее количество приходится на примеси железа и углерода. Примесные фазы, возникающие в процессе получения керамики BeO, обуславливают появление в ней серых и тёмных окрашенных зон, оказывают влияние на микроструктуру керамики (средний размер микрокристаллов BeO в окрашенных зонах изделий в 1.5–3.5 раза больше по сравнению с белыми), а также и на величины поглощения и рассеяния ею СВЧ-электромагнитного излучения [2, 16–19].

Установлено, что примеси железа (в количестве от 10^{-2} до 10^{-1} мас.%) при определённых термодинамических условиях оказывают значительное влияние на микроструктуру, прочность, скорость роста кристаллов, плотность и эксплуатационные характеристики BeO-керамики [2, 17]. Примеси редкоземельных элементов (РЗЭ), B_2O_3 , Li_2O и TiO_2 влияют на интенсивность стационарной рентгенолюминесценции, импульсной катодолюминесценции и экзoeлектронной эмиссии, на радиационные, оптические характеристики и электропроводность [2, 7–9, 12, 17, 18].

Керамика на основе BeO обладает высокой радиационной, химической и термической стойкостью, слабо реагирует с расплавами многих металлов и солей вплоть до температуры 2 170 К. Напомним, что температура плавления BeO составляет 2 820 К. Как установлено авторами, керамика BeO химически инертна по отношению к расплавам урана, плутония, железа, никеля, молибдена, золота, серебра, платины, свинца, кобальта, кремния, титана (кроме редкоземельных металлов).

Для увеличения механической прочности керамику BeO спекают в частично восстановительной атмосфере. Спекание керамики при $\sim 2\,220$ К в форвакуумных печах с углеродными нагревателями в графитовой засыпке приводит к увеличению содержания углерода в керамике. Поэтому бериллиевая керамика содержит различное количество примесей углерода [2, 19].

Углерод и другие примеси, в первую очередь, железо, оказывают значительное влияние на механизм и кинетику роста кристаллов BeO в керамике. Впервые методом ядерного гамма-резонанса в составе керамики BeO обнаружено присутствие нескольких примесных фаз, соответствующих, вероятно, карбиду железа и его оксикарбидам переменного состава [2, 17].

При спекании BeO-керамики в графитовой засыпке часть изделий приобретает тёмно-серую или серую окраску. Петрографическим методом впервые определены дефекты микроструктуры в серых и тёмных зонах керамических изделий. Окрашивание керамики в серый и тёмные цвета всегда сопровождается увеличением среднего размера зерна в них, по сравнению с белыми. Наличие серых зон в керамических изделиях (например, в трубках, идущих на изготовление разрядных трубок газовых лазеров) приводит к неравнозернистости микроструктуры изделий и возникновению сильных термических напряжений при их эксплуатации, что часто приводит к выходу их из строя [2, 17].

Рентгеноэлектронным методом на поверхности BeO-керамики обнаружены примеси Fe, Ca, C, Na, Si, Al и Cl. Облучение образцов ионами Ag^+ в вакууме сопровождается диффузией углерода на поверхность образцов керамики [18, 19]. Этот процесс зависит от величины подзарядки поверхности. Впервые установлено, что диффузия углерода из объёма керамики на поверхность в результате бомбардировки ионами Ag^+ происходит под действием сильных электрических полей, возникающих в результате образования на поверхности и в приповерхностной области BeO электрического заряда, медленно релаксирующего с поверхности образцов из-за их плохой электропроводности. На кинетические кривые диффузии углерода на поверхность образцов значительное влияние оказывает температура и его концентрация в приповерхностной области. Предложена методика очистки поверхности и приповерхностной области BeO-керамики от примесей углерода на примере газоразрядных диэлектрических трубок, используемых в газовых ОКГ [2, 19].

Для повышения качества изделий из BeO-керамики впервые предложено дополнительное химическое удаление примесей железа и части других примесей из исходного порошка BeO или керамической заготовки. Для этого разработана специальная технология [2, 20, 21].

Спекание керамики в промышленных печах при температурах от 2 240 до 2 270 К после удаления части примесей приводит к получению плотных (с плотностью от 2.95 до 2.99 г/см³) изделий из BeO-керамики с однородной микроструктурой, имеющих белый цвет. Напомним, что теоретическая плотность BeO составляет 3.01 г/см³ [2, 20, 21].

Разработана технология получения прозрачной BeO-керамики, имеющей теоретическую плотность и удовлетворительную прозрачность в широком спектральном диапазоне [2, 4, 9].

Исследованы электрофизические характеристики такой керамики BeO, имеющей теоретическую плотность, полученной методом высокотемпературного прессования порошка BeO с использованием в качестве модификатора Li₂CO₃. Установлено, что средние значения диэлектрической проницаемости в образцах изменялись в пределах от 5.9 до 6.8, при этом значения tgδ – в диапазоне от 5.0·10⁻⁴ до 8.0·10⁻⁴ [2, 9]. Измерения удельного электрического сопротивления при комнатной температуре показали, что введенные примеси Li₂CO₃ в небольших количествах (от 0.2 до 0.3 мас.%) практически не оказывали заметного влияния на величину удельного сопротивления. Сопротивление образцов при 300 К изменялось в пределах от 10¹⁴ до 10¹⁵ Ом·см. Горячепрессованная керамика BeO с теоретической плотностью, стабильной микроструктурой и высокими оптическими характеристиками намного превосходит аналогичную керамику, полученную традиционным способом. Такая BeO-керамика может быть также использована для создания глухих диэлектрических зеркал для ИК-лазеров на CO₂. Как показали опыты по отражению ИК-излучения на реальном лазере (λ = 10.6 мкм), образцы прозрачной керамики, отполированные по 12–13 классу, отражали от 95% до 97% падающего излучения. Повышение класса обрабатываемой поверхности и напыление тонких плёнок некоторых элементов приводило к увеличению отражения до 99.5% [2, 9].

Исследованы перспективы применения светопрозрачной BeO-керамики в дозиметрии ионизирующего излучения [2, 4, 9]. Применение для целей дозиметрии монокристаллов BeO ограничено как технологическими трудностями их получения, так и сложностью создания в их объёме оптических и эмиссионно-активных центров. Эти проблемы можно устранить, используя в качестве материала детектора в дозиметрах прозрачную BeO-керамику. Сочетание высокой технологичности (методом высокотемпературного прессования можно получать сравнительно крупные изделия), тканезквивалентности ($Z_{\text{эфф}}$ BeO составляет 7.13, в то время как $Z_{\text{эфф}}$ биологической ткани равна 7.43), чувствительности к ионизирующему излучению, светопропусканию в широком спектральном диапазоне (особенно в УФ-области спектра) и высокого качества чистоты обрабатываемой поверхности способствует успешному применению прозрачной керамики BeO в дозиметрии ионизирующих излучений в качестве сцинтилляторов, рабочих тел для термолюминесцентного, экзоэмиссионного и электронного парамагнитного резонанса дозиметров [2, 4, 9].

Примеси (например, редкоземельных металлов), способные отнимать кислород у бериллия, приводят к образованию на поверхности микрокристаллов BeO кислородных вакансий, значительно повышающих интенсивность собственной люминесценции BeO, пика 4.9 эВ. При этом, как правило, собственное свечение примеси совсем не регистрируется или же регистрируется как весьма слабое [2, 4, 9, 22].

Впервые показано, что с помощью специальных примесей в BeO-керамике можно регулировать выход люминесценции и экзoeлектронной эмиссии, формируя на поверхности микрокристаллов BeO оптические и эмиссионно активные центры. Таким образом, горячее прессование позволяет создавать в прозрачной BeO-керамике дополнительные люминесцирующие и эмиссионные центры не только в том случае, когда примеси изоморфно замещают катионы бериллия в кристаллической решётке оксида, но и когда они располагаются по границам микрокристаллов и пор BeO, образуя поверхностные микроструктуры [2, 4, 9, 22].

На основе оксида бериллия путём добавления в шихту диоксида титана в количестве от 5 до 30 мас.% и спекания в восстановительной атмосфере получена плотная проводящая керамика. В зависимости от количества добавленного TiO₂ удельное электросопротивление керамики уменьшается на 9–12 порядков по сравнению с чистой BeO-керамикой [2, 7, 8, 23].

Значительное снижение электросопротивления керамики BeO+TiO₂ по сравнению с чистой BeO-керамикой связано, по-видимому, с наличием электропроводящей фазы оксида титана, образующейся только в процессе спекания шихты BeO+TiO₂ в восстановительной атмосфере (в водороде, СО и графитовой засыпке). Установлено, что проводящая керамика BeO+TiO₂

представляет практический интерес для разработки на её основе детекторов для термостимулированного экзоэмиссионного дозиметра [2, 7, 23]. Такая керамика также обладает повышенным поглощением электромагнитного СВЧ-излучения [23]. Керамика $\text{BeO}+\text{TiO}_2$ является каталитически активным материалом и может быть использована в качестве анодов для мощных CO_2 -лазеров [2, 8, 23].

Важной характеристикой BeO -керамики, которая может применяться при высоких и низких температурах (в диапазоне от 77 до 1 300 К) в качестве эффективных химически и термически устойчивых ультразвуковых концентраторов и звукопроводов, является скорость звука – v . Изучено распространение ультразвуковых волн в BeO -керамике [2, 6, 14, 24]. Измерения скорости распространения ультразвука и его поглощения в образцах различной конфигурации из керамики на основе оксида бериллия проводили импульсным методом на частотах 38 кГц, 25 кГц и 5.15 кГц. Было установлено, что средние значения скорости распространения ультразвуковой волны слабо зависят от частоты ультразвука при комнатной температуре и составляют от 10.20 до 12.20 км/с, а поглощение находится в диапазоне от 0.035 до 0.046 дБ/мм.

С увеличением плотности BeO -керамики до 3.01 г/см^3 скорость распространения ультразвука увеличивалась до 12.4 км/с, а его поглощение уменьшалось. В процессе охлаждения BeO -керамики от 300 К до температуры $\sim 200 \text{ К}$ величина поглощения ультразвукового излучения значительно уменьшается ($\sim$ в 5 раз) [2, 6, 14, 24].

Благодаря обнаруженному свойству керамики на основе BeO распространять с высокой скоростью ультразвуковые волны, она может быть использована для изготовления концентраторов ультразвукового излучения в устройствах для передачи ультразвука при введении ультразвукового излучения в различные химически агрессивные среды и сплавы. Поскольку керамика BeO имеет сравнительно малые значения поглощения ультразвукового излучения как при комнатной, так и при более высоких и низких температурах (вплоть до температуры кипения жидкого азота), она может быть использована в устройствах по передаче ультразвука в аэрокосмической, металлургической, атомной, радиоэлектронной промышленности и в приборах специального назначения.

Проведены измерения скорости и поглощения ультразвука на пластинах из керамики BeO с добавкой 30 мас.% диоксида титана (TiO_2). Пластины получены методом полусухого прессования и последующего спекания в форвакууме и в восстановительной атмосфере. Плотные керамические пластины имели кажущуюся плотность 3.2 г/см^3 и сравнительно высокую электропроводность. Измерения проводили на приборах УДЗ-103 на частотах 15 и 25 МГц. Установлено, что скорость ультразвука в пластинах составляла 10.74 и 10.40 км/с. Керамические пластины из $\text{BeO}+\text{TiO}_2$ показали значительное увеличение коэффициента затухания в диапазоне от 0.46 до 0.79 дБ/мм по сравнению с чистыми (без специального введения примесей) образцами керамики BeO . Таким образом, можно утверждать, что примесная фаза диоксида титана в количестве 30 мас.% оказывает влияние и на скорость распространения ультразвуковой волны (уменьшая её значения), но самое главное, – значительно повышает поглощение ультразвука [2, 14, 24].

Особый интерес представляли опыты по измерению скорости и поглощения ультразвука в условиях охлаждения керамических образцов, так как такие термодинамические условия характерны для космического пространства. При небольшом охлаждении керамических образцов наблюдается значительный рост амплитуды распространяющейся ультразвуковой волны. Это приводит к уменьшению поглощения энергии ультразвука керамикой [2, 24].

Для диэлектриков с большой шириной запрещённой зоны, к каковым относится BeO , потери энергии при прохождении ультразвука обусловлены фонон-фононным рассеянием. При температуре значительно ниже температуры Дебая Θ_D (для BeO -керамики $\Theta_D \sim 1\,200 \text{ К}$) можно пренебречь процессами переброса волнового вектора при столкновении фононов. В этом случае длина свободного пробега фононов $l \sim \exp \Theta_D / 2T$ [2, 6, 11, 14, 24], т.е. с понижением температуры величина l растёт. Этот процесс продолжается до тех пор, пока величина l не достигнет среднего размера микрокристалла. Этот эффект и объясняет уменьшение потерь энергии ультразвука при понижении температуры. При более высоких температурах (выше Θ_D) $l \sim 1/T$, т.е. с ростом температуры величина l уменьшается и потери ультразвуковой энергии соответственно увеличиваются.

Относительно изменения скорости ультразвука при нагревании образцов керамики до высоких температур экспериментальные данные отсутствуют. Следует ожидать, что увеличение температуры делает керамику менее жёсткой и, следовательно, уменьшает скорость звука и модуль упругости, тем самым увеличивая величину поглощения ультразвуковой энергии из-за уменьшения упругих свойств микрокристаллов ВеО-керамики [2, 12, 14, 24].

ВеО кристаллизуется в гексагональной системе и имеет структурный тип B_4 (вюртцит, простр. группа $C6mc$). Скорость звука в твёрдых телах определяется модулями упругости вещества. Ранее [2, 12, 24], основываясь на результатах первопринципных квантовохимических расчётов упругих постоянных монокристалла ВеО и их последующей аппроксимации для ВеО-керамики, авторами были проведены оценки ряда термомеханических параметров беспримесной ВеО-керамики, модуля сдвига G , модуля всестороннего сжатия B , усреднённой скорости звука $V_{\text{ср}}$ в сравнении с экспериментальными значениями, полученными другими авторами [2, 12, 24–29]. Эти данные, а также экспериментальные данные авторов приведены в таблице.

Таблица

Усредненная скорость звука, $V_{\text{ср}}$ [км/с]	7.656	8.240 [26]
Температура Дебая [K]	1 188	1 280 [26, 27]
Максимальная скорость звука по данным измерений авторов, v [км/с]	–	до 12.4 [2, 14, 24, 28]
Модуль всестороннего сжатия, B [ГПа]	198.39	210 [2, 28]
Модуль сдвига, G [ГПа]	145.59	142 [2]; 102 [2, 26]

Таким образом, экспериментально установлено, что скорость ультразвука в ВеО-керамике зависит от следующих факторов:

- плотности полученных образцов. С увеличением плотности образцов наблюдалось незначительное увеличение скорости распространения ультразвука в них;
- преимущественной ориентации микрокристаллов ВеО в полученных образцах (т.е. наблюдаются некоторые различия в скорости распространения ультразвуковой волны в образцах ВеО-керамики, полученных методами полусухого прессования, шликерного литья и, в наиболее значительной степени, экструзии керамической массы, где измерения проводили вдоль и поперёк направления вытягивания;

- среднего размера микрокристаллов в керамике. С увеличением размера микрокристаллов скорость ультразвука в керамике увеличивается. В монокристаллах ВеО скорость распространения ультразвуковой волны достигает максимальных значений (около 12.4 км/с) [2, 12, 24, 28].

Охлаждение керамических образцов от 300 до 200 К не сопровождается значительными изменениями скорости распространения ультразвука в них. При этом наблюдается значительный рост амплитуды ультразвуковой волны, что связано с уменьшением поглощения ультразвука в образцах. Нагревание керамических образцов, наоборот, приводит к увеличению поглощения ультразвука в них [2, 6, 14, 24, 28]. Установлено, что примесная фаза диоксида титана в количестве 30 мас. % (введённая в состав ВеО-керамики) оказывает влияние и на скорость распространения ультразвуковой волны (несколько уменьшая её значения), но самое главное, значительно повышает коэффициент поглощения ультразвука [2, 6]. На основании проведённых экспериментов можно констатировать, что материалом, пригодным для использования в качестве проводника ультразвука в температурном интервале от 100 до 300 К, является плотная (с плотностью, близкой к теоретической 3.02 г/см³), чистая (без специально введённых примесей) бериллиевая керамика со специальной преимущественной ориентацией микрокристаллов в ней. Механизмы распространения ультразвука в ВеО-керамике схожи с распространением тепла в ней, поскольку определяются средней длиной свободного пробега фононов. Коэффициент теплопроводности λ для диэлектриков с широкой запрещённой щелью (т.е. фоновой теплопроводностью) определяется выражением:

$$\lambda = \frac{\rho}{3M} c_m v_{\text{ср}} l, \quad (1)$$

где: M – молекулярный вес, c_m – мольная теплопроводность, ρ – плотность, l – длина свободного пробега фонона.

Усреднённая скорость звука v_{cp} , км/с, определяется формулой:

$$v_{cp} = \left[\frac{1}{3} \left(\frac{2}{v_{cp}} + \frac{1}{v_t} \right) \right]^{-\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где: v_{cp} и v_t – соответственно поперечная и продольная компоненты скорости звука.

Определение длины свободного пробега фонона составляет основную проблему при вычислениях λ . При температурах, заметно меньших, чем температура Дебая, длину свободного пробега фонона вычисляют по формуле [2, 12, 28]:

$$l = l_0 e^{\frac{\Theta}{2T}}, \quad (3)$$

где: l_0 – минимально возможная длина свободного пробега фонона в элементарной ячейке.

С понижением температуры величина l будет расти. При достаточно низких температурах величина l может достичь размера зерна керамики $l_{кр}$, тогда при дальнейшем понижении T длина свободного пробега фонона остаётся постоянной. Размер зерна ВеО-керамики колеблется от 2 до 70 мкм в зависимости от технологии её получения. Кроме того, следует учитывать рассеяние фононов на примесях, т.е. максимально возможное значение $l = l_{кр}$ может достигаться при длине свободного пробега l , значительно меньшем относительно размера зерна. Значение параметра l_0 можно определить из соотношения:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} l = l_0. \quad (4)$$

Для случая монокристаллического образца ВеО $l_0 = V_{з.я.}^{\frac{1}{3}}$, где $V_{з.я.}$ – объём элементарной ячейки, т.е. $l_0 \sim 3\text{Å}$. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности ВеО-керамики при значениях $l_{кр} = 50, 10$ и 1 мкм показана на рис. 1. На вставке показана температурная зависимость теплопроводности монокристалла ВеО.

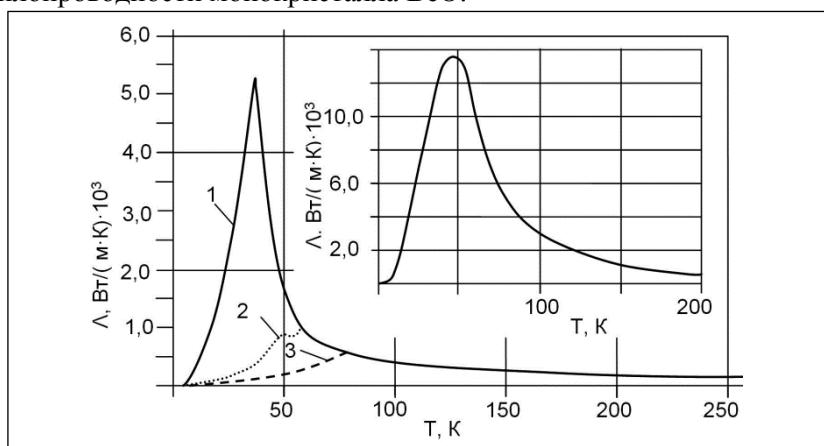


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности ВеО-керамики

Видно, что все температурные зависимости имеют экстремумы при определённых температурах $T_{кр}$. Рост λ при $T < T_{кр}$ обусловлен увеличением теплоёмкости, а последующее уменьшение λ (при $T > T_{кр}$) определяется уменьшением длины свободного пробега фонона. Важно подчеркнуть, что, согласно нашим расчётам, с уменьшением $l_{кр}$ (т.е. с уменьшением размера зерна керамики или увеличением концентрации примеси) максимум $\lambda(T)$ смещается в сторону более высоких температур, а его высота (величина $\lambda_{кр}$) понижается. К сожалению, соответствующие экспериментальные данные нам неизвестны. На вставке рис. 1 для сравнения приведена экспериментальная температурная зависимость коэффициента теплопроводности для монокристалла оксида бериллия [29]. Видно, что отмеченные закономерности изменения $\lambda(T)$ для ВеО-керамики подтверждаются: для монокристалла максимум $\lambda(T)$ расположен в области наиболее низких температур ($T_{кр} \sim 40$ K), а $\lambda_{кр}$ оказывается максимальным: $13\,500$ Вт/(м·К) [2, 29].

Чистая ВеО-керамика с высокой плотностью является радиопрозрачным материалом и хорошо пропускает СВЧ-электромагнитное излучение в широком спектральном диапазоне. Это

свойство, а также высокая теплопроводность (от 300 до 320 Вт/мК) делают ВеО керамику незаменимой при использовании в мощных электронных устройствах СВЧ-диапазона в качестве высокоэффективных электрических изоляторов. Малые значения диэлектрической проницаемости и незначительные диэлектрические потери характеризуют ВеО-керамику как один из лучших материалов колпаков и окон вывода мощного электромагнитного излучения радаров. Высокая теплопроводность керамики и высокое электрическое сопротивление позволяют использовать её для вакуумных электронных излучающих ламп (ламп бегущей волны – ЛБВ) и клистронов в качестве эффективных высокочастотных изоляторов. Введение примесей в состав ВеО-керамики может сопровождаться изменением её физико-химических свойств и приводить к значительному увеличению её электропроводности и поглощающей способности СВЧ-излучения. Получена плотная, эффективно поглощающая СВЧ-излучение электропроводная керамика с высокой теплопроводностью. Изделия из поглотительного материала с высокой теплопроводностью необходимы для применения в мощных СВЧ-усилителях ламп бегущей волны [2, 7, 8, 23]. Интерес вызывает взаимодействие тиглей из ВеО-керамики с металлическими расплавами, содержащими в своём составе примеси f -элементов [2, 22]. РЗ-металлы обладают более сильно выраженным химическим сродством к кислороду по сравнению с бериллием, поэтому ионы РЗМ способны отнимать кислород у ионов Be^{2+} , восстанавливая Ве в керамике [2, 22]. Установлено, что разрушение ВеО-тиглей при контакте с расплавами, содержащими в качестве примесей f -элементы, обусловлено тем, что при высоких температурах ВеО взаимодействует с РЗМ с образованием оксидов РЗМ. Особенно интенсивно это происходит в присутствии бескислородной (инертной или восстановительной) атмосферы. В жидком состоянии взаимодействие ВеО-керамики с РЗМ происходит по реакции: $2\text{M} + 3\text{ВеО} = \text{M}_2\text{O}_3 + 3\text{Ве}$ (где М – РЗМ) с образованием, в конечном итоге, твёрдого раствора, который имеет температуру плавления около 1 557 К. Когда температура расплава РЗМ с другими металлами превосходит 1 773–1 873 К, наблюдается разрушение стенок тигля из ВеО-керамики [2, 22].

Большой интерес представляет применение ВеО-керамики в аппаратуре СВЧ-диапазона в качестве конструктивных элементов для установки ферритовых изделий в волноводных устройствах высокого уровня мощности. Здесь ВеО-керамика, кроме функции конструктивных элементов, выполняет функции теплоотвода, участвует в формировании необходимых фазовых соотношений передаваемых сигналов. В качестве примера на рис. 2 показан мощный быстродействующий высокочастотный переключатель дециметрового диапазона, предназначенный для поочередного переключения сигнала генератора на два входа высокочастотного тракта и переключения отражённого (приёмного) сигнала, поступающего в переключатель из высокочастотных трактов, на вход приёмного устройства. Принцип работы переключателя состоит в следующем: сигнал генератора разделяется на два сигнала с помощью квадратурного ответвителя и далее поступает на входы двух управляемых сдвоенных ферритовых фазовых секций, на выходе которых установлен сдвоенный волноводный тройник, выходы которого являются двумя входами волноводного тракта. Основным управляющим элементом переключателя являются двухканальные ферритовые фазовые секции, каналы которой имеют противофазное управление и создают управляемое 90-градусное изменение фазы проходящего сигнала, в результате чего и происходит переключение сигнала генератора на один из входов высокочастотного тракта. Отражённые сигналы, проходя в обратном направлении через ферритовые фазовые секции, получают соответствующее изменение фазы и поступают в приёмное устройство.

Конструкция ферритовой фазовой секции с открытой верхней стенкой показана на рис. 3. Видно, что ферритовые пластины установлены в плоскости E каждой волноводной секции по её центру. Крепление ферритов выполнено клеевым способом на пластины из ВеО-керамики. Согласование феррит-керамических структур осуществляется при помощи кварцевых стекол. В данном переключателе при работе в стационарном режиме на полную нагрузку ферритовые пластины, наклеенные с двух сторон на ВеО-керамику, нагреваются до температуры выше 90 °С и без охлаждения происходит их разрушение. Отвод тепла от ферритовых пластин осуществляется через ВеО-керамику, далее через латунные верхнюю и нижнюю стенки – в движущийся по каналам охлаждения (расположенным в стенках) турбулентный поток охлаждающей жидкости. В качестве охлаждающей жидкости использован 66%-ный раствор этиленгликоля в дистиллированной воде. Для повышения электрической прочности внутренних объём переключателя заполняется элегазом под небольшим избыточным давлением.

Из рис. 3 видно, что ВеО-керамика в данной конструкции переключателя одновременно выполняет функции установочного элемента (держателя феррита), теплоотвода, а также принимает непосредственное участие в формировании фазовых соотношений передаваемых СВЧ-сигналов.

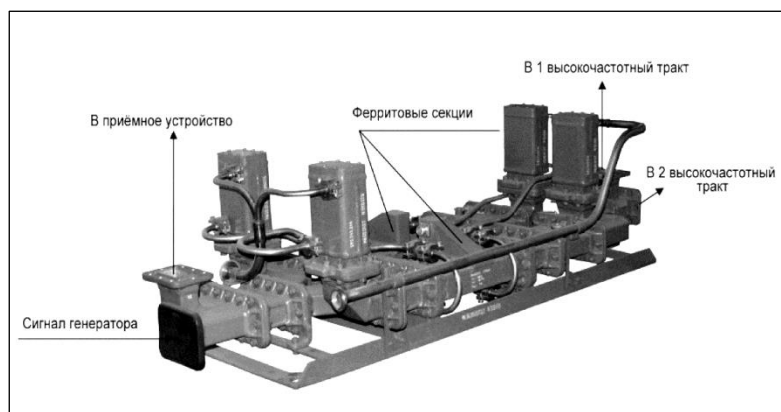


Рис. 2. Внешний вид высокочастотного переключателя

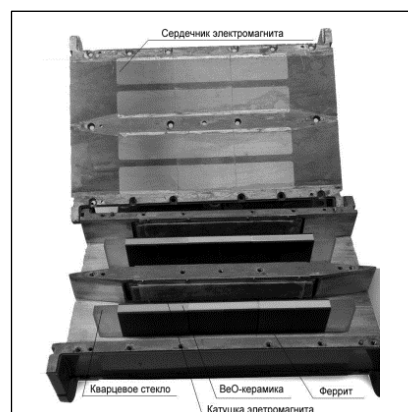


Рис. 3. Фазовая секция в открытом состоянии

Разработка такого устройства на среднюю мощность порядка 25 кВт, проведенная творческим коллективом предприятия АО «НПО НИИИП-НЗиК», оказалась возможной благодаря применению ВеО-керамики. Расчёты и экспериментальные исследования, выполненные разработчиками, показали, что для обеспечения эффективной работы переключателя теплопроводность пластин керамики должна быть не менее 250 Вт/(мК), диэлектрическая проницаемость в районе 7 единиц с разбросом между пластинами не более 0.02 единицы, тангенс угла диэлектрических потерь не более $3 \cdot 10^{-3}$. Усть-Каменогорский завод при изготовлении пластин из ВеО-керамики данные параметры из-за отсутствия соответствующей метрологической базы не контролирует, в связи с чем на предприятии был разработан специализированный стенд проверки параметров пластин из ВеО-керамики ИВАМ.442274.001 [30]. В основу данного стенда легли уникальные разработки ФГУП «СНИИМ» (г. Новосибирск): испытательное оборудование РВД-БК и установка ТПР-БК. На рис. 4 показано измерение толщины пластин ВеО-керамики и теплопроводности, а на рис. 5 – измерение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Внедрение в производство указанного оборудования позволило на стадии входного контроля осуществлять отбор пластин из ВеО-керамики и формировать комплекты данных пластин с минимальными разбросами по диэлектрической проницаемости.

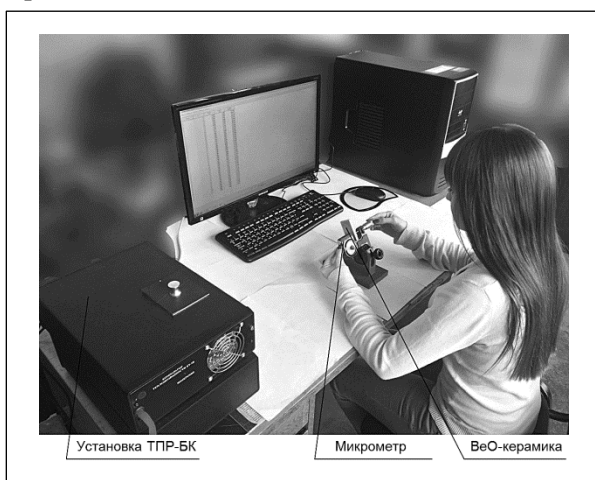


Рис. 4. Измерение толщины керамики и теплопроводности



Рис. 5. Измерение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь

На рис. 6 показана ещё одна разработка предприятия: волноводный регулируемый аттенюатор высокого уровня мощности, создание которого также стало возможным благодаря использованию ВеО-керамики [31].



Рис. 6. Внешний вид регулируемого аттенюатора на высокий уровень мощности

Заключение

Керамические изделия на основе оксида бериллия, благодаря их уникальным физико-химическим свойствам, находят широкое применение в специальной металлургии, атомной, лазерной, радиоэлектронной, электротехнической и других областях промышленности и специального приборостроения. ВеО-керамика может найти применение и в аэрокосмической отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев Р.А. Окись бериллия. – М.: Атомиздат, 1980. – 221 с.
2. Кийко В.С., Макурин Ю.Н., Ивановский А.Л. Керамика на основе оксида бериллия: получение, физико-химические свойства и применение. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 440 с.
3. Кийко В.С., Вайспапир В.Я. Теплопроводность и перспективы применения ВеО-керамики в электронной технике // Стекло и керамика. – 2014, №11. – С.12–16.
4. Kortov V.S., Milman I.I., Slesarev A.I., Kijko V.S. New BeO Ceramics for TL-ESR Dosimetry // Radiation Protection Dosimetry. Nucl. Technol. – 1993, V.47, №4. – P.267–270.
5. Кийко В.С. Состояние сырьевой базы и необходимость производства в России керамики на основе оксида бериллия // Новые огнеупоры. – 2014, №2. – С.58–60.
6. Патент РФ №231786 на изобр. по заявке №2006122394/28 (024310) Устройство для передачи ультразвука / Кийко В.С., Ивановский А.Л., Макурин. Заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО УГТУ-УПИ и ИХТТ УрО РАН; опубл. 27.02. 2008.
7. Патент РФ №2326091 на изобр. по заявке №2005140821/03 (045452) Способ получения электропроводной керамики на основе оксида бериллия / Кийко В.С., Ивановский А.Л., Акишин Г.П., Макурин Ю.Н. Заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО УГТУ-УПИ и ИХТТ УрО РАН; опубл. 10.06. 2008.
8. Кийко В.С., Горбунова М.А., Макурин Ю.Н., Неуймин А.Д., Ивановский А.Л. Микроструктура и электропроводность композиционной (ВеО+TiO₂)–керамики // Новые огнеупоры. – 2008, №11. – С.68–74.
9. Кийко В.С. Прозрачная бериллиевая керамика для лазерной техники и дозиметрии ионизирующего излучения // Новые огнеупоры. – 2004, №5. – С.40–48.
10. Акишин Г.П., Турнаев С.К., Вайспапир В.Я., Кийко В.С., Шеин И.Р., Плетнева Е.Д., Тимофеева М.Н. Свойства оксидной бериллиевой керамики // Новые огнеупоры. – 2010, № 10. – С.42–47.
11. Кийко В.С. Микроструктура порошка оксида бериллия в процессе технологического передела // Новые огнеупоры. – 2015, №12. – С.34–41.
12. Ивановский А.Л., Шеин И.Р., Макурин Ю.Н., Кийко В.С., Горбунова М.А. Электронная структура и свойства оксида бериллия // Неорганические материалы. – 2009, Т.45, №3. – С.263–275.
13. Кийко В.С., Вайспапир В.Я. Технологические особенности получения и свойства керамических изделий из смеси низко- и высокообожженного порошков ВеО // Новые огнеупоры. – 2016, №8. – С.54–58.
14. Кийко В.С., Шеин И.Р., Желонкин Н.А., Ивановский А.Л. Теплопроводность и скорость распространения ультразвука в керамиках на основе оксида бериллия // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010, №4–5. – С.45–48.
15. Акишин Г.П., Турнаев С.К., Вайспапир В.Я., Горбунова М.А., Макурин Ю.Н., Кийко В.С., Ивановский А.Л. Теплопроводность бериллий-оксидной керамики // Новые огнеупоры. – 2009, №12. – С.43–47.
16. Турнаев С.К., Бицоев Г.Д., Кильговатов Г.М., Кийко В.С. Примесные фазы в оксидной бериллиевой керамике // Новые огнеупоры. – 2012, №10. – С.48–55.

17. **Kijko V.S., Shabashov V.A., Dmitriev I.A., Mukoseev A.G.** The state of iron impurities in a beryllium ceramic as determined from NGRS data // *Ceramics International*. – 2004, V.30, №1. – P.1–7.
18. **Кийко В.С., Макурин Ю.Н., Балакирев В.Ф.** Состав и свойства промышленной керамики из оксида бериллия // *Химическая технология*. – 2004, №1. – С.7–14.
19. **Кийко В.С., Кашеев И.Д., Макурин Ю.Н., Дмитриев И.А., Желонкин Н.А.** Радиационностимулированная диффузия углерода в оксиде бериллия // *Известия АН СССР. Неорганические материалы*. – 1989, № 9. – С.1570–1572.
20. **Турнаев С.К., Кийко В.С., Кильговатов Г.М.** Получение и свойства оксидной бериллиевой керамики // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2012, №3. – С.14–18.
21. **Турнаев С.К., Кийко В.С., Кильговатов Г.М.** Влияние пропитки растворами карбоната натрия на свойства оксидной бериллиевой керамики // *Новые огнеупоры*. – 2013, №9. – С.49–52.
22. **Кийко В.С., Макурин Ю.Н., Софронов А.А., Плетнева Е.Д.** Взаимодействие тиглей из BeO-керамики с расплавами РЗМ // *Стекло и керамика*. – 2002, №11. – С.18–20.
23. **Кийко В.С., Шабунин С.Н., Макурин Ю.Н.** Получение, физико-химические свойства и пропускание СВЧ-излучения керамикой на основе BeO // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2004, №10. – С.8–17.
24. **Кийко В.С., Комоликов Ю.И., Макурин Ю.Н. и др.** Скорость распространения и поглощение ультразвука в керамиках на основе BeO, Al₂O₃, ZrO₂ и SiO₂ // *Неорганические материалы*. – 2007, Т.43, №12. – С.1510–1514.
25. **Hill R.** The Elastic Behaviour of a Crystalline Aggregate // *Proc. Phys. Soc. London*. – 1952, A 65. – P.349–357.
26. **Ryshkewitch E.** Rigidity Modulus of Some Pure Oxides and Bodies // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1951, V.34, №10. – P.322–326.
27. **Chang K.J., Cohen M.L.** Theoretical study of BeO: structural and electronic properties // *Solid State Commun.* – 1984, V.50, №6. – P.487–491.
28. **Шеин И.Р., Кийко В.С., Макурин Ю.Н. и др.** Упругие параметры моно- и поликристаллических вюрцитоподобных BeO и ZnO: первопринципные расчеты // *ФТТ*. – 2007, Т.49, вып. 6. – С.1015–1020.
29. **Slack G.A.** Nonmetallic crystals with high thermal conductivity // *J. Phys. Chem. Solids*. – 1973, V.34, № 2. – P.321–335.
30. **Вайспапир В.Я., Галенчикова О.А.** Неразрушающий контроль бериллиевой керамики // *Российская научно-техническая конференция «Информатика и проблемы телекоммуникаций»: Материалы конференции, том 1.* – СибГУТИ, Новосибирск, 2007. – С.298.
31. **Вайспапир В.Я., Галенчикова О.А.** Конструктивные особенности СВЧ аттенюатора промежуточного тракта // *Российская научно-техническая конференция «Информатика и проблемы телекоммуникаций»: Материалы конференции, том 1– СибГУТИ, Новосибирск, 2006.* – С.115–116.

BeO-CERAMIC FOR MODERN APPLICATIONS

V.Ya. Waispapor, V.S. Kijko

BeO-ceramic materials have extremum properties depending on thermodynamic and other effects on it. Therefore, materials based on BeO are widely used in functional and constructional materials that applied in different technical devices. In space, BeO-ceramic materials must perform in high radiation fields, in a broad range of temperature fluctuations, high vacuum, under the influence of pulsed power ultrasonic, heat, electromagnetic fields, herewith should remain functional.

Application of BeO-ceramic materials in special metallurgy, electric, laser and nuclear technology, in ionizing radiation dosimetry was studied in this research. The transmission of heat, RF and ultrasonic radiation through the ceramic materials were examined more detailed. Based on the research, the application of BeO-ceramic materials in ultrasonic technic and electronic devices was proposed. However, many technical characteristics of BeO-ceramic materials and its possible application in a variety of extreme conditions, for example in space, are not fully studied. This makes study of BeO-ceramic materials properties very promising, because of its wide application not only in electronics, but also in aerospace and other fields of state-of-the-art technology.

Поступила 16 февраля 2017 года.

О ПРЕОБРАЗОВАНИИ СИГНАЛА С V-ОБРАЗНОЙ ЧМ И СХЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОБАЗОВОГО ЛЧМ ИМПУЛЬСА

© Авторы, 2018

В.Н. Завалий доктор технических наук, профессор,
советник генерального директора, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва
В.С. Оконешников доктор технических наук,
советник генерального конструктора по ПРО, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва
E-mail: info@raspletin.com

В функции неопределённости сигнала с V-образной ЧМ имеется пьедестал, что ограничивает область применения этого сигнала. Рассматривая сигнал с V-образной ЧМ как импульс, составленный из двух ЛЧМ подимпульсов со спектром в одном диапазоне частот, представлено преобразование этого импульса, когда спектры подимпульсов разнесены и расположены в двух присоединённых диапазонах частоты. Вычисляются функции неопределённости сигнала с V-образной ЧМ и сигнала с преобразованной V-образной ЧМ. Показано, что в функции неопределённости сигнала с преобразованной V-образной ЧМ со спектром подимпульсов в двух диапазонах частот пьедестал отсутствует.

Ключевые слова: сигнал с V-образной ЧМ, функция неопределённости, пьедестал, составной ЛЧМ импульс, ЛЧМ подимпульсы, двухдиапазонная ЧМ.

There is a pedestal in uncertainty function of signal with V-shape frequency modulation (FM) that limits an application area of this signal. Examining the signal with V-shape FM as a pulse composed of two linear frequency modulation (LFM) subpulses with spectrum in one frequency band, this pulse processing was performed when subpulses spectrum are distributed and placed in two joined frequency bands. The uncertainty functions of signal with V-shape FM and signal with transformed V-shape FM were evaluated. It's demonstrated that there is no pedestal in uncertainty function of signal with transformed V-shape FM with spectrum of subpulses in two frequency bands.

Keywords: signal with V-shape frequency modulation (FM), uncertainty function, pedestal, composite chirp (linear frequency modulation, LFM) pulse, LFM subpulses, two-band FM.

Введение

Сигнал с V-образной [1] или с симметричной линейной ЧМ [2] используется в радиолокации для некоррелированного измерения дальности и скорости цели. Данное свойство этого сигнала, по сравнению с ЛЧМ-сигналом, связано с расщеплением отклика согласованного фильтра на два отдельных сигнала, когда доплеровский сдвиг частоты вызывает рассогласование принимаемого сигнала и согласованного фильтра.

Однако отмеченное положительное свойство сигнала с V-образной ЧМ (расщепление на два сигнала) сопровождается и основным недостатком (образование пьедестала в его функции неопределённости), что существенно снижает динамический диапазон разрешаемых целей. Вызвано это тем, что кроме сжатия каждого ЛЧМ-сегмента его автокорреляционной частью согласованного фильтра, одновременно происходит и растяжение этого сегмента взаимно-корреляционной частью согласованного фильтра. Растягивается каждый сегмент на двойную его длительность и располагается с одной стороны автокорреляционной функции. С запаздывающей для автокорреляционной функции первого сегмента и с опережающей стороны для автокорреляционной функции второго сегмента. При совмещении во времени автокорреляционных функций пьедестал (взаимно корреляционные функции) занимает длительность $4T$,

амплитуда пьедестала составляет величину $\frac{1}{2\sqrt{\Delta f \cdot T}}$, где Δf – девиация частоты в сегменте,

T – длительность сегмента. Наличие такого пьедестала значительно ограничивает область применения сигнала с V-образной ЧМ.

В данной статье представлен сигнал с преобразованной V-образной ЧМ, которая позволяет исключить пьедестал в его функции неопределённости.

Характеристики сигнала с V-образной ЧМ

Можно считать, что сигнал с V-образной ЧМ состоит из двух прямоугольных ЛЧМ сегментов и записывается в виде:

$$U(t) = \begin{cases} U_0 e^{j(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2})t - jbt^2} & \text{при } -T \leq t \leq 0 \\ U_0 e^{j(\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2})t + jbt^2} & \text{при } 0 \leq t \leq T \end{cases}, \quad (1)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ – центральная частота сегментов, $\Delta\omega = 2\pi f$ – девиация частоты, $b = \pi\Delta f / T$ – крутизна девиации частоты, T – длительность ЛЧМ сегмента.

Закон изменения частоты и форма огибающей сигнала с V-образной ЧМ показаны на рис. 1 (а, б).

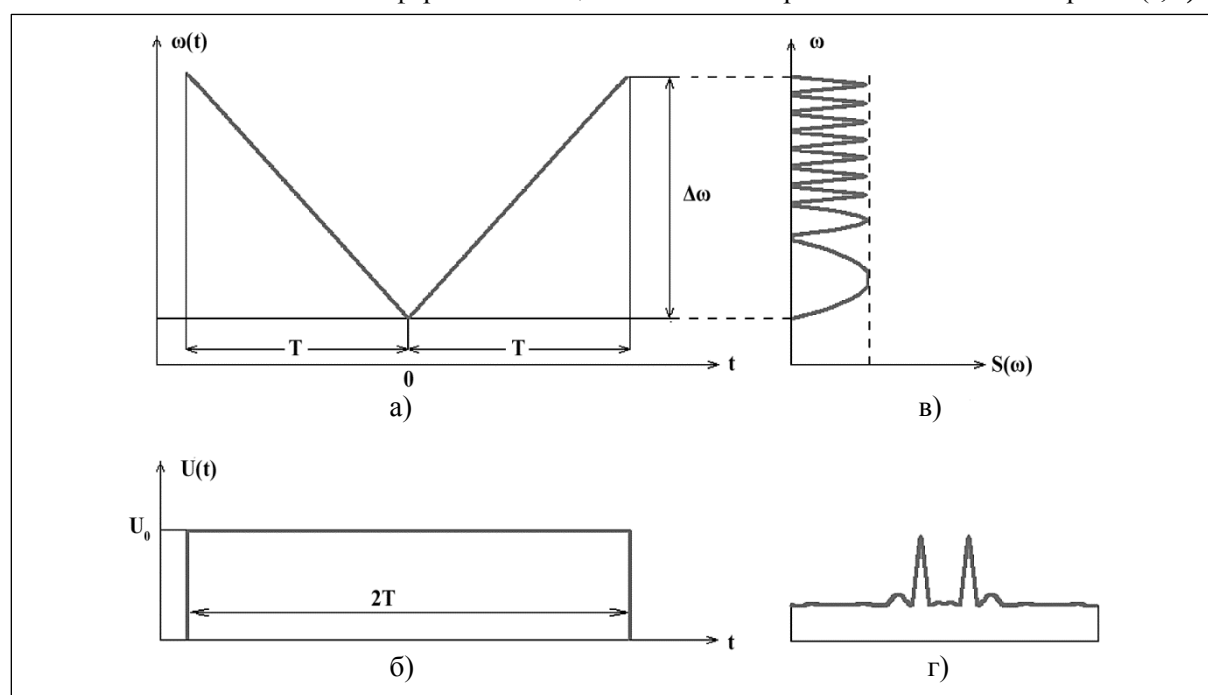


Рис. 1. Характеристики сигнала с V-образной ЧМ:

а – закон изменения частоты; б – форма огибающей; в – амплитудный спектр; г – сигнал на выходе согласованного фильтра

Нетрудно определить спектр комплексной огибающей сигнала с V-образной ЧМ. Спектр каждого сегмента $S_1(\omega)$ и $S_2(\omega)$ описывается известным интегральным выражением Френеля для спектра прямоугольного ЛЧМ-импульса [1, 2]. Спектр всего составного сигнала с V-образной ЧМ есть сумма спектров $S_1(\omega)$ и $S_2(\omega)$. Можно показать, что $S_2(\omega) = S_1^*(\omega)$.

Если:

$$S_1(\omega) = |S_1(\omega)| e^{j\varphi_1(\omega)}, \quad (2)$$

то

$$S(\omega) = 2|S_1(\omega)| \cdot \cos \varphi_1(\omega). \quad (3)$$

Заменяя интегральное выражение Френеля для $S_1(\omega)$ асимптотической формулой [2]:

$$S_1(\omega) = \sqrt{\frac{T}{\Delta f}} \cdot e^{j\left[\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4b} - \frac{\pi}{4}\right]}, \quad (4)$$

что допустимо для больших баз $\Delta f \cdot T$, получаем:

$$S(\omega) = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{T}{\Delta f}} \cdot \cos\left[\frac{(\omega - \omega_0)}{4b} - \frac{\pi}{4}\right] & \text{при } 0 < \omega - \omega_0 < \Delta\omega \\ 0 & \text{при } \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (5)$$

Итак, спектр сигнала с V-образной ЧМ есть действительная функция частоты, которая имеет осциллирующий характер (см. рис. 1в).

Функция неопределённости сигнала с V-образной ЧМ, как сигнала, составленного из двух примыкающих друг к другу во времени ЛЧМ сегментов, состоит из четырёх членов: двух автокорреляционных членов и двух взаимно корреляционных членов. Основной вклад в эту функцию вносят автокорреляционные члены. Этот основной вклад быстро спадает до уровня более низкого пьедестала, определяемого взаимно корреляционными членами [1]. Схематически сечение функции неопределённости представлено на рис. 1г. Наличие пьедестала в функции неопределённости представляет существенный недостаток сигнала с V-образной ЧМ.

С целью исключения пьедестала были предложены составные ЛЧМ-сигналы, сегменты которых припасованы друг к другу по спектру, но смещены во времени [3, С.149]. В этом случае огибающая составного сигнала есть действительная функция времени и имеет осциллирующий характер. Подобные сигналы с зубчатой ЧМ могли бы найти применение в РЛС с многоканальным формированием и излучением зондирующего импульса, но в целом такое решение имеет лишь теоретический интерес. Поэтому целесообразно рассмотреть сигнал, составленный из двух сегментов противоположной крутизны девиации, разнесённых по спектру и следующих друг за другом. Условно обозначим этот сигнал как сигнал с преобразованной V-образной ЧМ.

Функции неопределённости сигналов с V-образной и преобразованной V-образной ЧМ

Преобразование сигнала с V-образной ЧМ заключается в следующем: сохраняя присоединение сегментов друг к другу во времени, вводится присоединение этих сегментов друг к другу по спектру, путём смещения спектра одного сегмента относительно спектра другого сегмента на величину, равную девиации частоты Δf . Это позволяет, как и в сигнале с зубчатой ЧМ, устранить пьедестал в функции неопределённости сигнала с V-образной ЧМ при неизменной огибающей этого сигнала, что так необходимо в мощных радиолокаторах, в которых невозможно управлять изменением амплитуды излучаемого импульса.

Проведём сравнение функций неопределённости сигналов с V-образной и преобразованной V-образной ЧМ. Представим функцию неопределённости сигнала с V-образной ЧМ, состоящую из четырёх членов, в виде:

$$g(t, \omega_d) = g_{11}(t, \omega_d) + g_{22}(t, \omega_d) + g_{12}(t, \omega_d) + g_{21}(t, \omega_d). \quad (6)$$

Обозначим амплитуду комплексной огибающей как $\sqrt{\frac{1}{2T}}$ [1, С.113]. Используя (1), трудно показать, что первый автокорреляционный член, соответствующий сегменту с отрицательной крутизной девиации частоты, имеет вид:

$$g_{11}(t, \omega_d) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{|t|}{T}\right) \frac{\sin\left[\left(\frac{\omega_d}{2} - bt\right)(T - |t|)\right]}{\left(\frac{\omega_d}{2} - bt\right)(T - |t|)} e^{j\left(\omega_0 + \frac{\omega_d}{2}\right)t} \quad \text{при } -T < |t| < T, \quad (7)$$

а второй автокорреляционный член, соответствующий сегменту с положительной крутизной девиации частоты, имеет соответственно следующий вид:

$$g_{22}(t, \omega_d) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{|t|}{T}\right) \frac{\sin\left[\left(\frac{\omega_d}{2} + bt\right)(T - |t|)\right]}{\left(\frac{\omega_d}{2} + bt\right)(T - |t|)} e^{j\left(\omega_0 + \frac{\omega_d}{2}\right)t} \quad \text{при } 0 < |t| < 2T, \quad (8)$$

где T – длительность сегмента, $b = \pi\Delta f/T$ – крутизна девиации частоты, Δf – девиация частоты, ω_0 – центральная частота сигнала с V-образной ЧМ и ω_d – доплеровский сдвиг частоты (см. рис. 2а).

Найдём взаимно корреляционные члены $g_{12}(t, \omega_d)$ и $g_{21}(t, \omega_d)$. Для $g_{21}(t, \omega_d)$ при $t > 0$ запишем:

$$\begin{aligned} g_{21}(t, \omega_d) &= \sqrt{\frac{1}{2T}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2T}} \int_t^T e^{j(\omega_0 + \omega_d)S - jbs^2} \cdot e^{j\omega_0(t-S) - jbt(t-S)^2} dS = \\ &= \frac{1}{2T} e^{j\omega_0 t - jbt^2} \int_t^T e^{-j2b \left[S^2 - St \left(1 + \frac{\omega_d}{2b} \right) \right]} dS \quad \text{при } t > 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Дополняя до полного квадрата в показателе выражения под интегралом и меняя местами пределы интегрирования, получаем:

$$g_{21}(t, \omega_d) = \frac{e^{j\omega_0 t - jbt^2 - \frac{jbt^2}{2} \left(1 + \frac{\omega_d}{2b} \right)^2}}{2T} \int_T^t e^{j2b \left[S - \frac{t}{2} \left(1 + \frac{\omega_d}{2b} \right) \right]^2} dS. \quad (10)$$

Полагая $x = 2\sqrt{\frac{b}{\pi}} \left[S - \frac{t}{2} \left(1 + \frac{\omega_d}{2b} \right) \right]$, имеем:

$$g_{21}(t, \omega_d) = \frac{1}{4T} \sqrt{\frac{\pi}{b}} e^{j\omega_0 t - jbt^2 - \frac{jbt^2}{2} \left(1 + \frac{\omega_d}{2b} \right)^2} \int_{x_1}^{x_2} e^{j\frac{\pi}{2} x^2} dx, \quad (11)$$

где $x_1 = 2\sqrt{\frac{b}{\pi}} \left[T - \frac{t}{2} \left(1 + \frac{\omega_d}{2b} \right) \right]$, $x_2 = \sqrt{\frac{b}{\pi}} t \left(1 - \frac{\omega_d}{2b} \right)$ при $0 < t < T$.

Можно показать, что и при $t < 0$ приходим к аналогичному выражению (11). Следовательно, взаимно корреляционный член $g_{21}(t, \omega_d)$ определяется интегральным выражением Френеля (11) с пределами:

$$x_1 = 2\sqrt{\frac{b}{\pi}} \left[T - \frac{|t|}{2} \left(1 + \frac{\omega_d}{2b} \right) \right]; \quad x_2 = \sqrt{\frac{b}{\pi}} |t| \left(1 - \frac{\omega_d}{2b} \right) \quad \text{при } -T < t < T.$$

Следует отметить, что взаимно корреляционный член $g_{21}(t, \omega_d)$ длительностью $2T$ располагается перед автокорреляционным членом $g_{22}(t, \omega_d)$.

Аналогично взаимно корреляционный член $g_{12}(t, \omega_d)$ также определяется выражением (11), только взаимно корреляционный член $g_{12}(t, \omega_d)$ длительностью $2T$ располагается после автокорреляционного члена $g_{11}(t, \omega_d)$. Следовательно, взаимно корреляционные члены $g_{12}(t, \omega_d)$ и $g_{21}(t, \omega_d)$ есть пьедестал функции неопределённости в пределах от $-2T$ до $2T$ и амплитудой при $\omega_d = 0$.

$$\begin{aligned} |g_{12}(t, 0) + g_{21}(t, 0)| &= \frac{1}{4T} \sqrt{\frac{\pi}{b}} |2(x_1) + 2(x_2)| = \\ &= \frac{1}{4T} \sqrt{\frac{\pi}{b}} \left\{ [c(x_1) + c(x_2)]^2 + [c(x_1) - c(x_2)]^2 \right\}^{1/2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $x_1 = 2\sqrt{\frac{b}{\pi}} \left[T - \frac{|t|}{2} \right]$, $x_2 = \sqrt{\frac{b}{\pi}} |t|$ при $-2T < t < 2T$.

Учитывая, что комбинация интегралов в (12) равна $\approx \sqrt{2}$, а $b = \pi\Delta f/T$, имеем высоту пьедестала $0.5/\sqrt{2\Delta f T}$. Во многих случаях это существенно ограничивает диапазон разрешаемых целей по ЭПР, особенно при небольших базах сигнала с V-образной ЧМ, когда $2\Delta f \cdot T < 100$.

Оценив высоту пьедестала, определим сумму автокорреляционных членов при $\omega_d = 0$. Как следует из (7) и (8):

$$g_{11}(t, 0) + g_{22}(t, 0) = \left(1 - \frac{|t|}{T} \right) \frac{\sin(bt(T - |t|))}{bt(T - |t|)} e^{j\omega_0 t} \quad \text{при } -T < t < T. \quad (13)$$

При $\omega_d = 0$ происходит суммирование сжатых ЛЧМ-сигналов на центральной частоте сегментов ω_0 ; амплитуда сжатого сигнала увеличивается вдвое, длительность обработанного

сигнала сохраняется. На рис. 2б схематически показано сечение функции неопределённости сигнала с V-образной ЧМ вдоль оси t при $\omega_d = 0$.

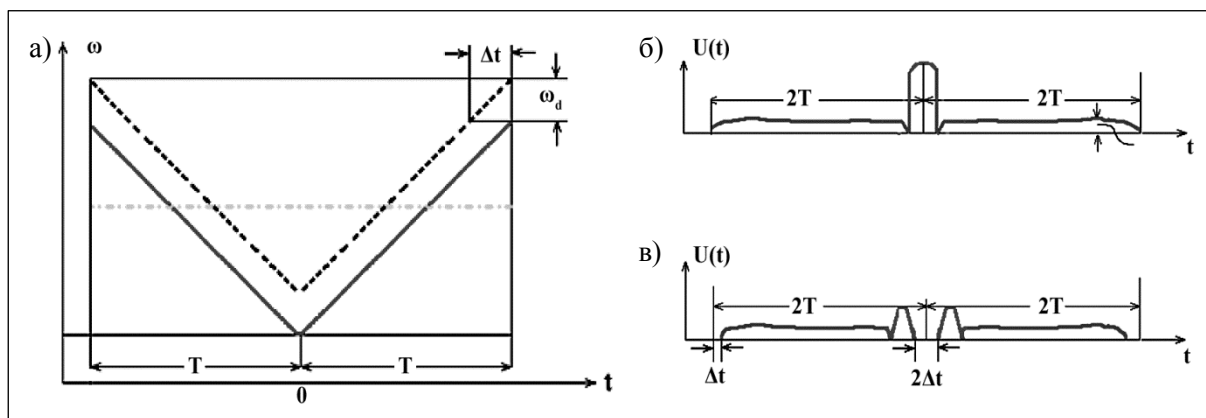


Рис. 2. Графики: а – изменение частоты в сигнале с V-образной ЧМ; эскизы сечений функции неопределённости: б – при $\omega_d = 0$; в – при $\omega_d > 0$

На рис. 2в схематически показано сечение функции неопределённости вдоль оси t при положительном доплеровском сдвиге частоты. Автокорреляционный член $g_{11}(t, \omega_d)$ приобретает большую задержку и смещается вправо на величину Δt . Автокорреляционный член $g_{22}(t, \omega_d)$ приобретает меньшую задержку и смещается влево на величину Δt . Длительность этих сигналов соответствует длительности автокорреляционной функции сигнала с V-образной ЧМ, а амплитуда сигналов уменьшается в соответствии с функцией неопределённости каждого автокорреляционного члена.

Рассмотрим сигнал с преобразованной V-образной ЧМ. На рис. 3а показана диаграмма изменения частоты в этом сигнале. Центральная частота его соответствует начальной частоте каждого сегмента. В первом сегменте за время от $-T$ до 0 частота уменьшается на $\Delta\omega$, а во втором сегменте – за время от 0 до T увеличивается на $\Delta\omega$.

Автокорреляционные члены функции неопределённости в этом случае определяются как:

$$g_{11}(t, \omega_d) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{|t|}{T} \right) \frac{\sin \left[\left(\frac{\omega_d}{2} - bt \right) (T - |t|) \right]}{\left(\frac{\omega_d}{2} - bt \right) (T - |t|)} e^{j \left(\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} + \frac{\omega_d}{2} \right) t} \quad \text{при } -T < |t| < T, \quad (14)$$

$$g_{22}(t, \omega_d) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{|t|}{T} \right) \frac{\sin \left[\left(\frac{\omega_d}{2} + bt \right) (T - |t|) \right]}{\left(\frac{\omega_d}{2} + bt \right) (T - |t|)} e^{j \left(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} + \frac{\omega_d}{2} \right) t} \quad \text{при } 0 < |t| < 2T. \quad (15)$$

Взаимно корреляционные члены при $\omega_d = 0$ равны нулю и автокорреляционная функция сигнала с преобразованной V-образной ЧМ есть сумма автокорреляционных функций двух сегментов:

$$g(t, 0) = g_{11}(t, 0) + g_{22}(t, 0) = \left(1 - \frac{|t|}{T} \right) \cdot \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \frac{\sin btT \left(1 - \frac{|t|}{T} \right)}{btT \left(1 - \frac{|t|}{T} \right)} e^{j\omega_0 t} \quad \text{при } 0 < |t| < 2T. \quad (16)$$

Сечение функции неопределённости сигнала с преобразованной V-образной ЧМ есть произведение автокорреляционной функции сегмента (с удвоенной амплитудой) на функцию косинуса с длительностью периода $1/\Delta f$. Это означает, что при суммировании двух автокорреляционных функций происходит не только удвоение амплитуды, как и при суммировании авто-

корреляционных функций в сигнале с V-образной ЧМ, но и дополнительное увеличение в два раза разрешающей способности по дальности (см. рис. 3б). Определяется это тем, что увеличение девиации частоты до $2 \cdot \Delta f$ приводит к длительности главного лепестка $1/2\Delta f$.

В этом плане функция неопределённости сигнала с преобразованной V-образной ЧМ более приближена к кнопочной функции неопределённости, чем функция неопределённости сигнала с V-образной ЧМ [4, С.136].

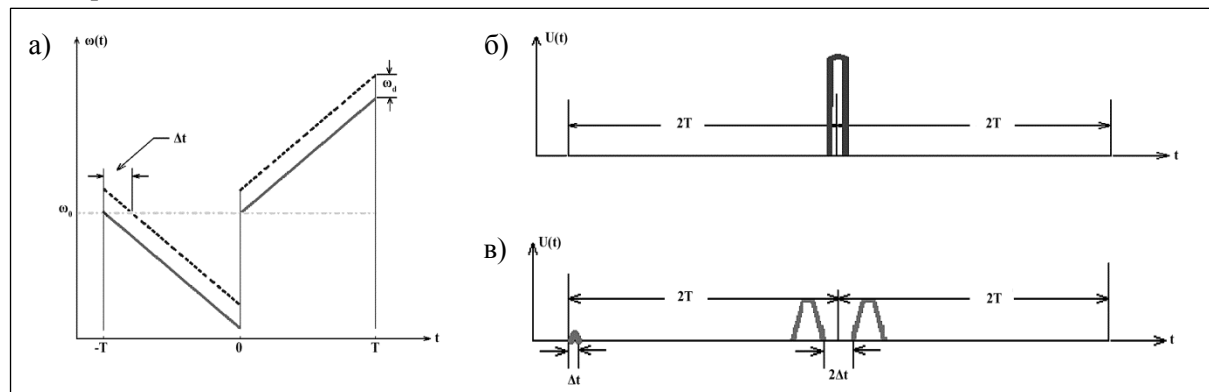


Рис. 3. Графики: а – изменение частоты в сигнале с преобразованной V-образной ЧМ; эскизы сечений функции неопределённости: б – при $\omega_d = 0$; в – при $\omega_d > 0$

При доплеровском сдвиге частоты образуются взаимно корреляционные члены в функции неопределённости сигнала с преобразованной V-образной ЧМ. Это $g_{21}(t, \omega_d)$ при положительном смещении доплеровской частоты или $g_{12}(t, \omega_d)$ при отрицательном смещении доплеровской частоты. На рис. 3в схематически показано сечение функции неопределённости вдоль оси t при $\omega_d > 0$. Взаимно корреляционный член $g_{21}(t, \omega_d)$ занимает очень малый временной отрезок $2\Delta t$, расположенный на значительном удалении от автокорреляционных членов. Амплитуда этого члена $g_{21}(t, \omega_d)$ не превышает высоту пьедестала, определяемого выражением (12), и учитывая его удалённость от центральной части функции неопределённости, этим пьедесталом можно пренебречь.

Расщепление главного пика функции неопределённости при доплеровском сдвиге частоты на два автокорреляционных члена длительностью $1/\Delta f$ и разнесённых на $2\Delta t$ происходит также как и в сигнале с V-образной ЧМ.

О преобразовании схемы параллельной обработки многобазового ЛЧМ-импульса

Относительно увеличения разрешающей способности в два раза за счёт суммирования двух автокорреляционных функций ЛЧМ-сегментов, здесь уместно отметить, что это справедливо при большой базе ЛЧМ-сегментов и только вблизи главного лепестка автокорреляционной функции. Действительно, только при больших значениях $\Delta f T$ и малых значений t можно пренебречь в выражении (16) величиной $|t|/T$ по сравнению с 1 и записать:

$$g(t, 0) = \cos \frac{\Delta \omega t}{2} \cdot \frac{\sin btT}{btT} e^{j\omega_0 t} = \frac{\sin 2btT}{2btT} e^{j\omega_0 t}. \quad (17)$$

Только функции $\sin x/x$, разнесённые по частоте $\Delta \omega$, при суммировании обеспечивают функцию $\sin 2x/2x$.

Что касается суммирования автокорреляционных функций двух ЛЧМ-сигналов, разнесённых по частоте, на $\Delta \omega$ при малых базах показано на рис. 4 для базы $\Delta f T = 16$. Как исходная автокорреляционная функция (см. рис. 4а), так и получаемая суммарная функция (см. рис. 4б) существенно отличаются от функции $\sin x/x$. Это приводит к тому, что в случае весовой обработки, которая применяется при сжатии ЛЧМ-сигналов, нет возможности получить низкий уровень боковых лепестков (УБЛ), соответствующий весовой функции. Так в схемах обработки многобазового ЛЧМ-импульса в n параллельных каналах [1, С.177; 5, С.286], в которых принципом обработки многобазового ЛЧМ-импульса является укорочение в n раз сжатых n ЛЧМ-подимпульсов, разнесённых по частоте на величину девиации частоты. Укорочение и получение низкого УБЛ при последующей весовой обработке возможно, если сжатые ЛЧМ-

импульсы есть функции $\sin 2x / 2x$. Для этого и база ЛЧМ-подимпульсов должна быть также значительной. Так, для УБЛ -40 дБ необходимо, чтобы база подимпульсов была не менее 150. Это не всегда возможно, особенно при сверхширокополосных многобазовых ЛЧМ-импульсах.

В тех случаях, когда база ЛЧМ-подимпульсов невелика, для получения низкого УБЛ в указанных схемах с параллельными каналами необходимо обеспечить форму сжатого сигнала на выходе каналов в виде функции $\sin x / x$ и выполнить весовую обработку суммарного сигнала вида $\sin nx / nx$. Для этого сжатие ЛЧМ-подимпульсов в каналах необходимо производить в частотной области с использованием обратных френелевских пульсаций в амплитудно-частотной характеристике фильтров сжатия [6]. В этом случае в спектре сжатого ЛЧМ-сигнала устраняются френелевские пульсации и по форме этот спектр приближается к прямоугольному. На рис. 4в представлена автокорреляционная функция идеализированного ЛЧМ-импульса со спектром прямоугольной формы при $D = 32$.

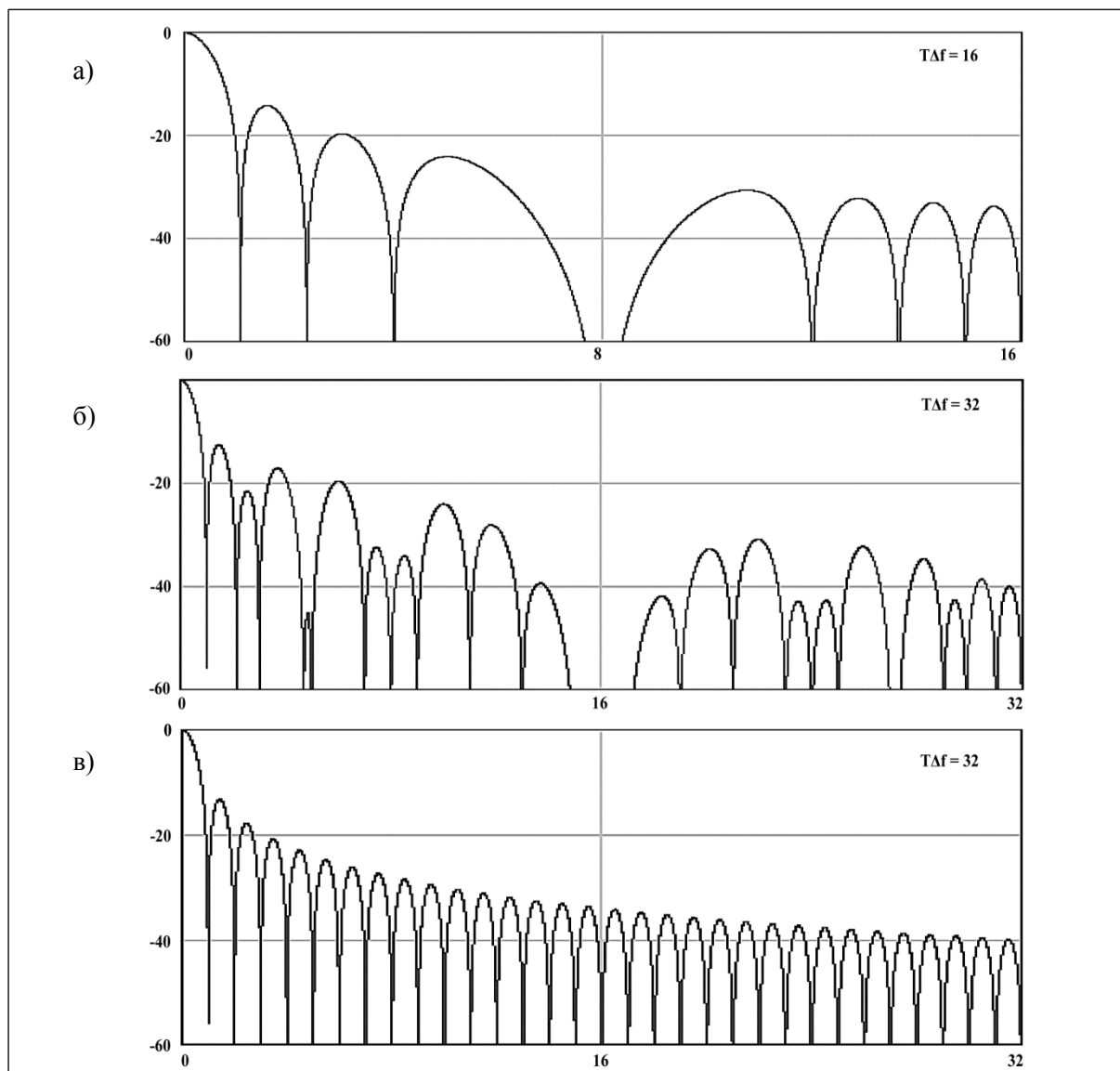


Рис. 4. Графики: а – автокорреляционная функция ЛЧМ-импульса;
б – сумма двух автокорреляционных функций, соприкасающихся по спектру;
в – автокорреляционная функция идеализированного ЛЧМ-импульса
со спектром прямоугольной формы

Это преобразование схемы параллельной обработки позволяет получить низкий УБЛ укороченного (суммарного) многобазового широкополосного ЛЧМ-импульса при большом числе параллельных каналов и малой базе ЛЧМ-подимпульсов. Примером решения такой задачи мо-

жет служить работа [7], в которой представлены результаты обработки многобазового широкополосного ЛЧМ-импульса в 36 параллельных каналах и очень малой базе ЛЧМ-подимпульсов $D = 16$.

Выводы

1. Исследована функция неопределённости сигнала с V-образной ЧМ. Получено аналитическое решение по вычислению высоты пьедестала этой функции (амплитуды взаимно корреляционных членов функции неопределённости).

2. С целью устранения пьедестала представлено решение по преобразованию импульса с V-образной ЧМ путём разнесения спектров ЛЧМ-подимпульсов.

3. Исследована функция неопределённости сигнала с преобразованной V-образной ЧМ. Показано, что пьедестал отсутствует, а автокорреляционная функция имеет увеличенную в 2 раза разрешающую способность по сравнению с сигналом с V-образной ЧМ.

4. На примере суммирования двух разнесённых по частоте автокорреляционных функций с противоположной крутизной девиации, обсуждается суммирование двух разнесённых по частоте автокорреляционных функций с одинаковой крутизной девиации частоты. Показано, что в том и другом случае суммарный сигнал имеет одинаковую форму и при малых базах ЛЧМ-подимпульсов существенно отличается от функции $\sin x / x$, которая необходима при строгом подходе к укорочению сигнала.

5. Обоснована целесообразность использования обратных френелевских пульсаций в фильтрах сжатия схемы обработки многобазового ЛЧМ-импульса в параллельных каналах, что позволяет получить сжатые ЛЧМ-подимпульсы в виде функции $\sin x / x$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. Пер. с англ. / под ред. В.С. Кельзона. – М.: Сов. Радио, 1971.
2. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. – М.: изд-во «Советское радио», 1970. – 376 с.
3. Кочемасов В.Н., Белов Л.А., Оконешников В.С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: «Радио и связь», 1983. – 192 с.
4. Скольник М. Справочник по радиолокации. Т.1. Основы радиолокации / под ред. Я.С. Ицхоки. – М.: Сов. Радио, 1976. – 456 с.
5. Амиантов И.Н. Избранные вопросы статистической теории связи. – М.: Сов. Радио, 1971. – 416 с.
6. Оконешников В.С., Кочемасов В.Н. Сжатие частотно-модулированных сигналов с небольшим произведением девиации частоты на длительность импульса // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987, №1. – С.82–94.
7. Оконешников В.С. и др. Обработка составного ЛЧМ импульса в виде последовательности ЛЧМ подимпульсов // Журнал «Вестник воздушно-космической обороны». – М.: ГСКБ «Алмаз-Антей», 2014, Выпуск №4(4). – С.78–83.

SIGNAL TRANSFORMATION WITH V-SHAPE FREQUENCY MODULATION AND SCHEME OF MULTIBASED CHIRPED PULSE CONCURRENT PROCESSING

V.N. Zavaliy, V.S. Okoneshnikov

The pulses transformation with V-shape frequency modulation was examined, when spectra subpulses with opposite slope frequency deviation are distributed that eliminates the pedestal in uncertainty function of this signal. The uncertainty functions of reference and transformed FM signals were examined. It was demonstrated that there is no pedestal in transformed signal and range resolution is increased into two times.

As an example of integration of two compressed LFM subpulses, the spectra of which are distributed, the feasibility of Fresnel back ripples in compression filters of multibase LFM pulse-processing circuit in parallel channels was proved.

Поступила 26 июля 2017 года.

ПЛАНАРНЫЕ ИК-ЛАЗЕРЫ С ВЧ-НАКАЧКОЙ НА СМЕСЯХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

© Авторы, 2018

А.П. Минеев кандидат физико-математических наук, доцент,
зам. директора – зав. лаборатории, ФГБУН ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва
E-mail: Mineev@kapella.gpi.ru

С.М. Нефедов

старший научный сотрудник, ФГБУН ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва
П.П. Пашинин доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник, ФГБУН ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

П.А. Гончаров кандидат технических наук,

старший научный сотрудник, ФГБУН ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

В.В. Киселев кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, ФГБУН ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

Экспериментально исследованы характеристики излучения непрерывных планарных Хе-Не, Ар-Не и Кр-Не лазеров ИК-диапазона, возбуждаемых поперечным высокочастотным разрядом с диффузионным охлаждением активной среды объемом 41 см^3 и неселективным гибридным неустойчивым оптическим резонатором. Впервые получена лазерная генерация на смесях газов Ар-Не и Кр-Не с ВЧ-накачкой. Определены оптимальные параметры давления рабочей смеси газов и процентного содержания активного газа: для Хе – давление 65 Тор, содержание газа 1%; для Ар – 80 Тор, 4%; для Кр – 65 Тор, 2%. При оптимальных параметрах рабочей смеси и мощности накачки 640 Вт для Хе-, Ар- и Кр-лазеров максимальная мощность излучения составила 300, 130 и 65 мВт соответственно. Исследован спектральный состав излучения лазеров и получена генерация на следующих длинах волн: 2.03; 2.65; 3.51; 3.65 мкм (Хе); 1.79 мкм (Ар) и 2.52 мкм (Кр).

Ключевые слова: лазеры ИК-диапазона, высокочастотный разряд, планарная электродно-волноводная структура, оптический резонатор.

The radiation characteristics of planar continuous wave Xe-He, Ar-He and Kr-He IR lasers excited by transverse radio-frequency (RF) discharge with active medium diffused-cooling of 41 cm^3 volume and nonselective hybrid unstable optical resonator were experimentally examined. For the first time the laser generation on Ar-He and Kr-He gas mixture with RF pumping was obtained. Gas mixture optimal pressure parameters and percentage composition of active gas were defined: for Xe – pressure is 65 torr, gas content is 1%; for Ar – is 80 torr, 4%; for Kr – 65 torr, 2%. At optimal gas mixture parameters and 640 W pumping power for Xe-, Ar- and Kr-lasers, the maximum radiation power was 300, 130 and 65 mW correspondingly. The spectral composition of lasers radiation was examined and the generation on the following wavelength was obtained: 2.03; 2.65; 3.51; 3.65 μm (Xe); 1.79 μm (Ar) and 2.52 μm (Kr).

Keywords: infrared laser, radio-frequency discharge, planar electrode-waveguide structure, optical resonator.

Введение

В последнее время возрос интерес к созданию лазерных систем различного назначения, работающих в условно-безопасном для глаз спектральном диапазоне 1.5–5 мкм. Это диктуется широкими возможностями применения приёмно-передающих устройств этого диапазона как в научных исследованиях, так и в прикладных областях: лидарные комплексы, дальнометры, медицинские приборы. Лазер на атомарных переходах инертных газов считается в настоящее время одним из перспективных источников излучения в ближнем ИК-диапазоне ввиду возможности использования больших объёмов рабочей среды и КПД более 1% [1]. Получена генерация в интервале длин волн 1.73–3.8 мкм в широком диапазоне давлений (0.05–14 атм), удельных мощностей накачки (от 1 Вт/см³ до 10 кВт/см³), длительностях накачки от 10 нс до непрерывной, при различном составе рабочей смеси газов [2]. Для накачки таких лазеров используются: электрический разряд, электронные пучки, ядерные реакции.

В работе [3] было показано, что использование ВЧ-накачки активной среды лазера на смеси газов Хе-Аг-Не при средних давлениях приводит к резкому ($\sim 10^3$ раз) росту мощности по сравнению с известными лазерами низкого давления и он был отнесён к классу мощных лазеров. Последующие исследования (см, напр., [4, 5]), в частности, лазеров с планарными активными средами, продемонстрировали перспективность использования Хе-лазеров с наибольшей мощностью на длинах волн 2.03 и 2.65 мкм [6, 7].

Экспериментальному и теоретическому исследованию характеристик непрерывных лазеров, работающих на переходах атома Хе, посвящено большое количество работ, однако статьи о лазерах, работающих с непрерывной высокочастотной накачкой в ИК области на переходах атомов Кг и Аг, немногочисленны.

Экспериментальная установка

Лазерный излучатель представляет собой электродно-волноводную структуру, помещённую в кварцевую трубу длиной 600 мм, с внутренним диаметром 160 мм, герметизированную металлическими фланцами, установленными на резиновых прокладках. Полностью металлическая, без боковых диэлектрических стенок, электродно-волноводная структура образована охлаждаемыми проточной водой медными позолоченными электродами, рабочие поверхности которых отполированы с высоким качеством и имеют размер 38×385 мм, межэлектродное расстояние равно 2.8 мм. Неустойчивый резонатор образован вогнутыми диэлектрическими зеркалами с коэффициентом отражения около 99%. Радиусы кривизны зеркал 379.3 мм и 431.1 мм, что соответствует коэффициенту геометрического увеличения $M = -1.137$, отверстие связи $a_0 = 2a(1+1/M) = 4.82$ мм, что соответствует коэффициенту пропускания выходного зеркала 12% (геометрическое приближение). Объём активной среды равен 41 см^3 .

Источником ВЧ-мощности служил генератор CESAR (частота – 40.68 МГц) с выходной мощностью до 2 кВт. Исследование распределения мощности излучения лазера по спектру проводилось с помощью монохроматора MS-2004 (обратная линейная дисперсия 11.9 нм/мм) и измерителя мощности NOVA-2 фирмы OPHIR с термоэлектрической головкой и постоянной продолжительностью времени 1 сек. Использовались газы Хе, Аг и Кг с содержанием примесей не более 0.001%.

Результаты экспериментов

Снижение мощности генерации при давлениях выше оптимальных (см. рис. 1) может быть вызвано столкновительным тушением верхних лазерных уровней атомами Хе, Аг или Кг в основных состояниях [2].

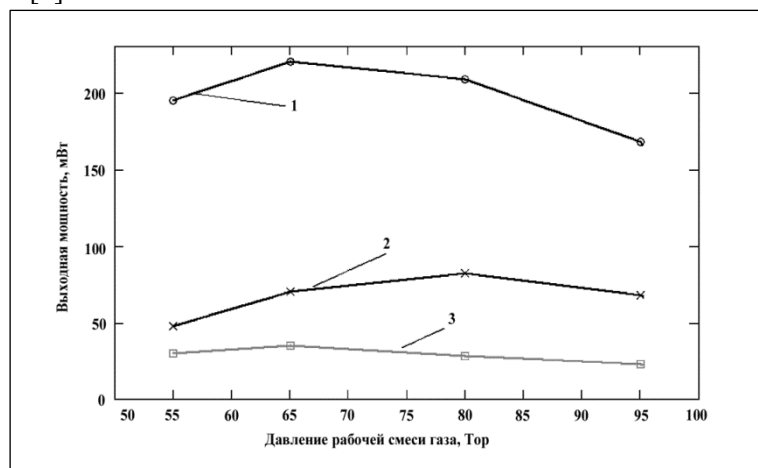


Рис. 1. Зависимость выходной мощности лазера от давления рабочей смеси газа: 1 – содержание Хе (1%); 2 – содержание Аг (4%); 3 – содержание Кг (2%).
Буферный газ – Не. Вкладываемая мощность накачки 350 Вт

Оптимальное содержание рабочего газа (M) в смеси (см. рис. 2), по-видимому, связано с двумя конкурирующими процессами. При увеличении относительного содержания M растёт наработка молекулярных ионов (с дальнейшей их диссоциативной рекомбинацией, которая приводит к заселению верхнего лазерного уровня), а с другой стороны, это приводит к увеличению тушения верхних рабочих уровней атомами M .

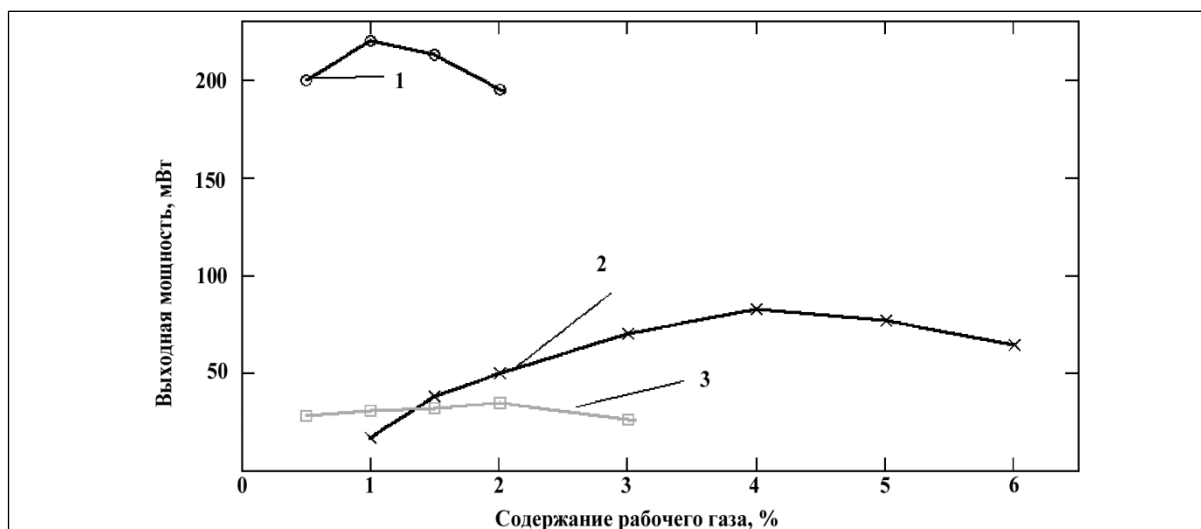


Рис. 2. Зависимость выходной мощности лазера от процентного содержания рабочего газа: 1 – Xe, давление рабочей смеси 65 Тор; 2 – Ar, давление рабочей смеси 80 Тор; 3 – Kr, давление рабочей смеси 65 Тор. Буферный газ – He. Вкладываемая мощность накачки 350 Вт

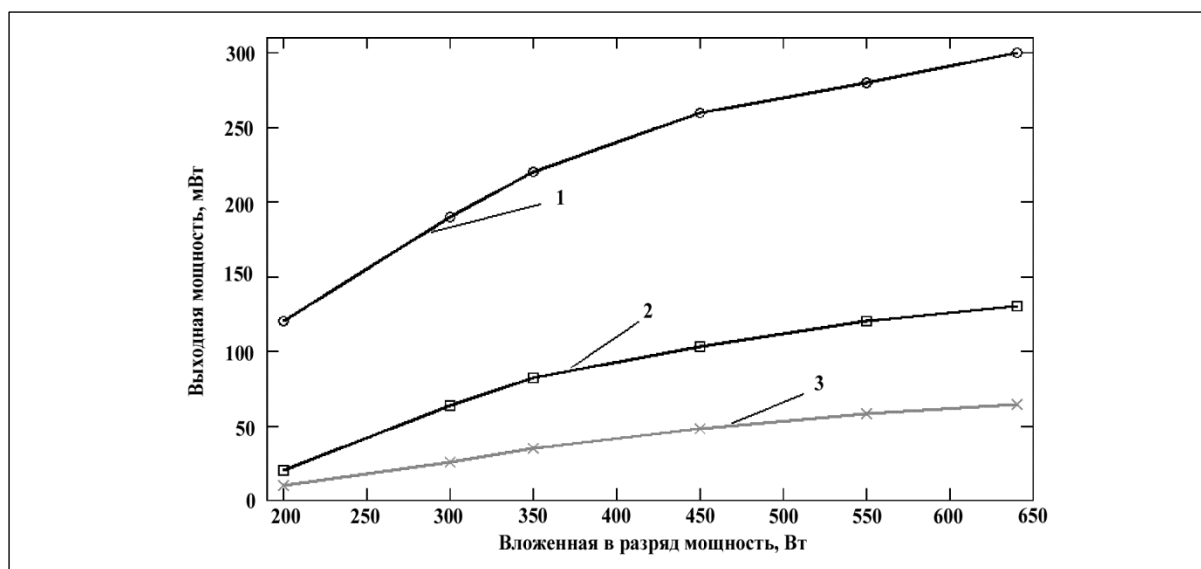


Рис. 3. Зависимость выходной мощности лазера от вкладываемой в разряд мощности: 1 – Xe (1%), давление рабочей смеси 65 Тор; 2 – Ar (4%), 80 Тор; 3 – Kr (2%), 65 Тор. Буферный газ – He

В результате оптимизации лазерных параметров по парциальному составу Xe, Ar, Kr, при мощности накачки 640 Вт, максимальная мощность излучения составила 300, 130 и 65 мВт соответственно (см. рис. 3).

Спектральные характеристики излучения ИК-лазеров

В ходе экспериментов получена генерация на следующих длинах волн (см. рис. 4):

- длина волны излучения Kr лазера – 2.52 мкм;
- длина волны излучения Ar лазера – 1.79 мкм;
- длины волн излучения Xe лазера – 2.03, 2.65, 3.51 и 3.65 мкм, при соотношении мощностей излучения на данных длинах волн: 1.0 : 0.19 : 0.11 : 0.4 .

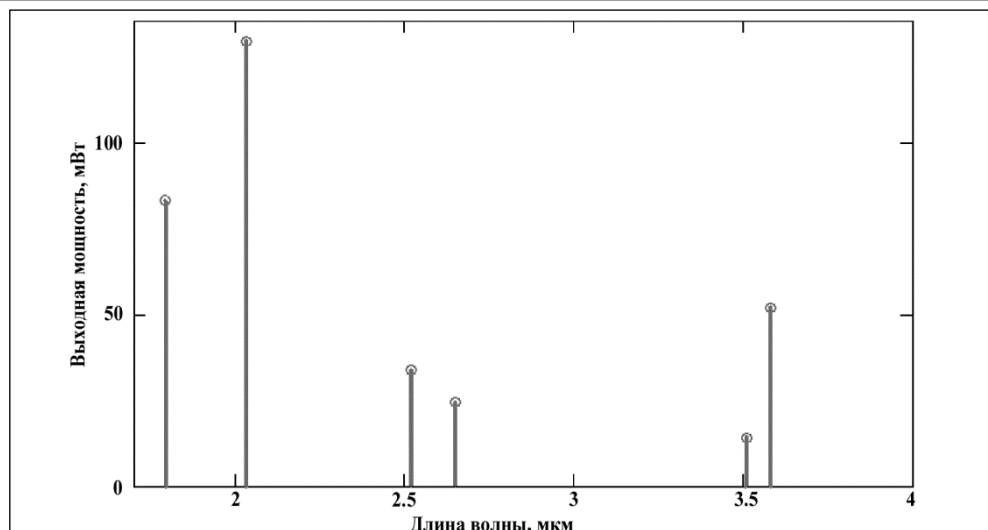


Рис. 4. Спектральные характеристики линий генерации ИК-лазера.
Вкладываемая мощность накачки 350 Вт, давление
и процентное содержание рабочего газа, оптимальное для каждой смеси

На рис. 5 представлено пространственное распределение интенсивности выходного пучка лазерного излучения на расстоянии 40 см от выходного зеркала (Xe-He смесь). Распределение получено с использованием неохлаждаемой пирозлектрической линейки HPL-256-500. Как показано в работе [6], в Xe-лазере механизм накачки, по-видимому, наиболее эффективен в приэлектродных областях. Это связано с тем, что у электродов существует градиент сильного электрического поля, где рождаются высокоэнергетические электроны, необходимые для эффективной накачки рабочей среды Xe-лазера.

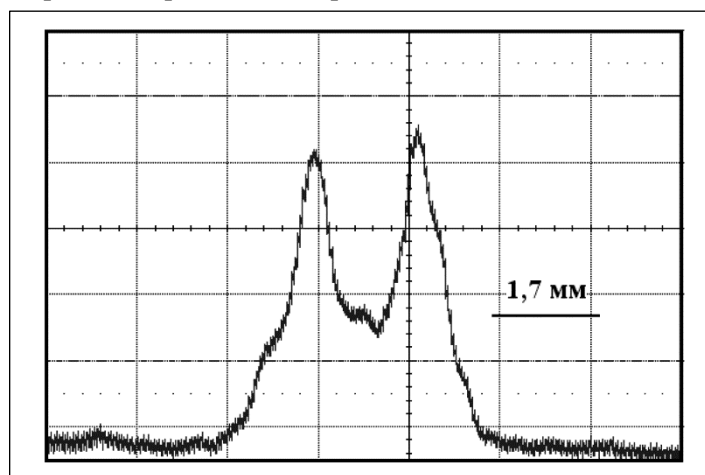


Рис. 5. Пространственное распределение интенсивности выходного пучка лазерного излучения

Обсуждение результатов

При высоких давлениях Ag- и Kr-лазеры работают на переходах между мультиплетами $3d(4d)$ и $4p(5p)$. Кинетика процессов в активных средах этих лазеров исследовалась в работе [8]. Модель, которая предложена в данной статье, рассматривает ИК-лазеры на переходах атомов Xe, Kr, Ag с единых позиций и основана на селективном заселении уровней nd только за счёт процесса диссоциативной рекомбинации гомоядерных ионов M_2^+ с электронами.

Лазерные уровни $3d[1/2]_1^0$ атома Ag и $4d[1/2]_1^0$ атома Kr, с которых начинаются генерационные линии 1.79 и 2.52 мкм, являются нижними среди состояний $3d$ и $4d$ атомов Ag и Kr. Заселение этих уровней может происходить как непосредственно в результате диссоциативной рекомбинации, так и за счёт столкновительных каскадных переходов из более высокорасположенных состояний [9]. Дезактивация нижних лазерных уровней $(n+1)p$ происходит в результате

столкновений с атомами буферного газа. В смеси Хе-Не наблюдается достаточно сильная генерационная линия 3.65 мкм, принадлежащая переходам $7p - 7s$ атома Хе. Появление этой линии, возможно, связано с заселением уровней $7p$ в результате процессов тройной рекомбинации $\text{Xe}^+ + e + e(\text{He}) \rightarrow \text{Xe}^* + e(\text{He})$ и последующих каскадных переходов [10]. Отметим, что эта линия при непрерывной накачке активной смеси получена впервые. Как показано в работе [7], при уменьшении межэлектродного расстояния следует ожидать увеличения выходной мощности (эффективности) такого лазера.

Заключение

Впервые получена лазерная генерация на смесях Ar-He и Kr-He в планарном лазере, возбуждаемым поперечным непрерывным высокочастотным разрядом. Определены оптимальные параметры давления (65–80 Тор) рабочей смеси газов и процентного содержания активного газа (1–4%) для Хе-, Ar- и Kr-лазеров. При оптимальных параметрах рабочей смеси и мощности накачки 640 Вт для Хе-, Ar- и Kr-лазеров максимальная мощность излучения составила 300, 130 и 65 мВт соответственно. Исследован спектральный состав излучения лазеров и получена генерация на следующих длинах волн: 2.03, 2.65, 3.51, 3.65 мкм (Хе); 1.79 мкм (Ar) и 2.52 мкм (Kr). Показана перспективность использования планарных лазеров, возбуждаемых поперечным высокочастотным разрядом, в качестве источников излучения с длинами волн в диапазоне 1.79–3.65 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холин И.В. Квантовая электроника, 33, 129 (2003).
2. Карелин А.В., Симакова О.В. Квантовая электроника, 34, 129 (2004).
3. Udalov Yu.B., Peters P.J.M., Heeman-Ilieva M.B. et.al. *Appl.Phys. Letts*, 63, 721 (1993).
4. Tskhai S.N., Udalov Yu.B., Peters P.J.M. et.al. *Appl.Phys.Letts*, 66, 801 (1995).
5. Vitruk P.P., Morley R.J., Baker H.J., Hall D.R. *Appl.Phys.Letts*, 67, 1366 (1995).
6. Илюхин Б.И., Очкин В.Н., Цхай С.Н., Кочетов И.В., Напартович А.П., Виттеман В.Я. Квантовая электроника, 25, 512 (1998).
7. Минеев А.П., Дроздов А.П., Нефедов С.М., Пашинин П.П., Гончаров П.А., Киселев В.В. Квантовая электроника, 42, 575 (2012).
8. Мельников С.П., Синянский А.А. Ж.Т.Ф. 62.6 (1992).
9. Карелин А.В., Синянский А.А., Яковленко С.И. Квантовая электроника, 24, № 5 (1997).
10. Конак А.И., Мельников С.Л., Синянский А.А. Ж.Т.Ф. 62.3 (1992). – С.24.

PLANAR IR-LASERS ON INERT GAS MIXTURE WITH RF-PUMPING

A.P. Mineev, S.M. Nefedov, P.P. Pashinin, P.A. Goncharov, V.V. Kiselev

The radiation characteristics of planar continuous wave Xe-He, Ar-He and Kr-He IR lasers excited by transverse radio-frequency (RF) discharge at 40.68 MHz with active medium diffused-cooling of 41 cm³ volume and nonselective hybrid unstable optical resonator were experimentally examined. The laser emitter represents an electrode-waveguide structure placed into quartz tube of 600 mm length, with 160 mm internal diameter, pressurized with metal flanges, mounted on rubber gaskets. Fully metallic, without side dielectric walls, electrode-waveguide structure is formed by flowing water-cooled copper cold-plated electrodes, the working surfaces of which are polished to a high quality and have 38×385 mm dimensions, interelectrode spacing is 2.8 mm. The hybrid unstable optical resonator with one-side radiation coupling was formed by concaved dielectric mirrors with ~99% of reflectivity factor and 379.3 mm and 431.1 mm of radius of curvature that corresponded to ~12% of transmission coefficient of output mirror in geometric approximating. For the first time the laser generation on Ar-He and Kr-He gas mixture with RF pumping was obtained. Gas mixture optimal pressure parameters and percentage composition of active gas were defined: for Xe – pressure is 65 torr, gas content is 1%; for Ar – is 80 torr, 4%; for Kr – 65 torr, 2%. At optimal gas mixture parameters and 640 W pumping power for Xe-, Ar- and Kr-lasers, the maximum radiation power was 300, 130 and 65 mW correspondingly. The spectral composition of lasers radiation was examined and the generation on the following wavelength was obtained: 2.03; 2.65; 3.51, 3.65 μm (Xe); 1.79 μm (Ar) и 2.52 μm (Kr).

Поступила 27 июня 2017 года.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА, КОГДА ВРЕМЯ КОРРЕЛЯЦИИ ФЛУКТУАЦИЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕЛИ СОПОСТАВИМО С ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ КОГЕРЕНТНОГО ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА

© Автор, 2018

А.А. Трухачев доктор технических наук, старший научный сотрудник,
зам. начальника отдела, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва
E-mail: info@raspletin.com

Проведён анализ когерентной обработки принимаемого радиолокационного сигнала в условиях, когда из-за флуктуаций отражённого сигнала когерентность сигнала начинает разрушаться. Оценены энергетические потери в зависимости от соотношения между длительностью сигнала и временем корреляции флуктуаций отражающей поверхности цели.

Ключевые слова: обнаружение радиолокационного сигнала, когерентная обработка сигнала, время корреляции флуктуаций, энергетические потери.

Analysis of the coherent signal processing of the received radar signal is performed for the case when the coherence of the signal degrades because of fluctuations of the target cross-section. Loss in signal-to-noise ratio vs ratio of signal duration to correlation time of these fluctuations is estimated.

Keywords: radar target detection, coherent signal processing, correlation time of fluctuations, signal-to-noise ratio loss.

Введение

Характеристики обнаружения цели определяются энергией зондирующего сигнала. Для повышения характеристик необходимо увеличить энергию. Одним из способов увеличения энергии является увеличение длительности зондирующего сигнала.

Если излучается когерентный сигнал и обработка принимаемого сигнала осуществляется в предположении, что отражённый сигнал тоже когерентный, то увеличение длительности сигнала не может быть беспредельным. Отражённый сигнал флуктуирует. Флуктуациям подвергаются амплитуда сигнала и фаза сигнала. И если длительность сигнала большая, то фазовая структура обрабатываемого сигнала будет известна не точно. Разрушение когерентности отражённого сигнала ведёт к ухудшению характеристик обнаружения цели. Увеличение длительности зондирующего сигнала может не дать желаемых результатов.

В данной работе осуществляется исследование обработки сигнала в случае, когда начинает сказываться разрушение когерентности сигнала. Оцениваются возможности по увеличению длительности когерентного зондирующего сигнала.

Общие соотношения

Полагаем, что зондирующим сигналом является прямоугольный импульс без внутриимпульсной модуляции. Параметры принимаемого сигнала (задержка, частота) точно совпадают с параметрами, на которые настроен один из каналов обнаружения сигнала. Начало отсчёта времени t выберем таким, чтобы сигнальная составляющая реализации на входе этого канала была отлична от нуля на интервале времени от 0 до T , где T – длительность импульса.

Математическая модель канала обнаружения исследовалась в [1]. Применительно к рассматриваемой здесь задаче эту модель можно представить схемой на рис. 1. В этой схеме ω является частотой, на которую настроен канал обнаружения, σ^2 является дисперсией нормальных случайных величин X и Y в случае отсутствия полезного сигнала, $x(t)$ и $y(t)$ – сигнальные составляющие, $n_x(t)$ и $n_y(t)$ – шумовые составляющие.

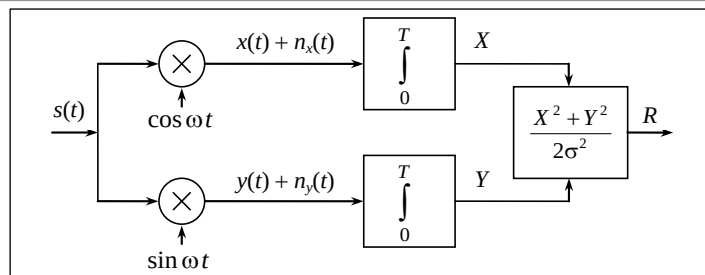


Рис. 1. Математическая модель обработки сигнала

Входное воздействие $s(t)$ запишем в виде:

$$s(t) = U(t) \cos[\omega t - \psi(t) + \varphi] + n(t), \quad (1)$$

где $U(t)$ – амплитуда сигнальной составляющей, $\psi(t)$ – изменяющаяся во времени фаза сигнальной составляющей, φ – начальная фаза, $n(t)$ – шумовая составляющая (белый гауссовский шум).

Амплитуду отражённого сигнала считаем рэлеевской случайной величиной. Начальная фаза распределена равномерно на интервале от 0 до 2π . В таком случае сигнальная составляющая входного воздействия является узкополосным гауссовским случайным процессом.

Задержка сигнала в выражении (1) не представлена, так как при выбранном начале отсчёта времени задержка равна нулю.

Здесь $\psi(t)$ не является модуляцией зондирующего сигнала. Это – случайная функция, порождённая флуктуациями. Изменения амплитуды $U(t)$ и фазы $\psi(t)$ на интервале времени от 0 до T обусловлены флуктуациями отражающей поверхности цели. Если время корреляции флуктуаций значительно превышает время наблюдения T , то $U(t)$ и $\psi(t)$ за время T не меняются. Тогда они превращаются в случайные величины, а начальной фазой сигнала служит величина $-\psi(t) + \varphi$.

Чтобы оценить характеристики обнаружения полезного сигнала, необходимо вначале найти плотности распределения вероятностей выходных случайных величин X , Y и R . Для этого понадобятся статистические характеристики случайных процессов, поступающих на вход интеграторов. Чтобы получить характеристики процессов, воспользуемся изложенной в [2] теорией.

Случайные функции $x(t)$ и $y(t)$ являются сигнальными составляющими квадратурных компонент. Функцию $x(t)$ записываем в виде: $x(t) = \{U(t) \cos[\omega t - \psi(t) + \varphi]\} \cos(\omega t) = E(t) \cos \Phi(t) + \dots$, где $E(t) = U(t)/2$, $\Phi(t) = \psi(t) - \varphi$. Многоточием заменены составляющие, осциллирующие с частотой 2ω . Эти составляющие оказываются за пределами полосы пропускания рассматриваемой схемы. Поэтому далее они будут отброшены.

Аналогичные преобразования можно выполнить для $y(t)$. Получим:

$$x(t) = E(t) \cos \Phi(t), \quad y(t) = E(t) \sin \Phi(t). \quad (2)$$

В [2, С.256] дано определение огибающей и фазы стационарного случайного процесса. Формулы (2) по внешнему виду совпадают с представленными в [2] формулами, с помощью которых определяются огибающая и фаза. Однако имеется принципиальное отличие.

Рассматриваемые здесь процессы $x(t)$ и $y(t)$ отличны от нуля только на интервале времени от 0 до T , т.е. не являются стационарными процессами. А выполненный в [2] анализ огибающей и фазы относится к стационарным процессам.

Чтобы использовать результаты из [2], поступим следующим образом.

При теоретическом анализе будем считать, что сигнальная составляющая отлична от нуля на всей временной оси. Разумеется, такая крайность физически нереализуема. Но высказанное предположение позволит считать, что все случайные процессы стационарны. А на окончательный результат это предположение не должно повлиять, так как интегрирование в схеме (см. рис. 1) осуществляется на интервале времени от 0 до T . И любые изменения входного воздействия вне этого интервала никак не повлияют на значение выходной величины, формируемое схемой.

Теперь считаем, что вместо случайных процессов $x(t)$ и $y(t)$ в схеме действуют стационарные случайные процессы $u(t)$ и $v(t)$, для которых справедливо представление:

$$u(t) = E(t) \cos \Phi(t), \quad v(t) = E(t) \sin \Phi(t), \quad (3)$$

где $E(t)$ и $\Phi(t)$ являются огибающей и фазой случайного процесса $u(t)$. Исходя из формул (3), считаем, что $v(t)$ – случайный процесс, сопряжённый с процессом $u(t)$ [2]. Случайный процесс $v(t)$ образован по случайному процессу $u(t)$ с помощью преобразования Гильберта.

Зададимся корреляционной функцией $B(\tau) = \overline{u(t)u(t+\tau)}$ процесса $u(t)$. Черта над выражением означает усреднение по случайным переменным. Корреляционная функция процесса $v(t)$, сопряжённого с $u(t)$, совпадает с корреляционной функцией $B(\tau)$ процесса $u(t)$. Взаимно корреляционная функция $B_{uv}(\tau) = \overline{u(t)v(t+\tau)}$ и корреляционная функция $B(\tau)$ являются парой преобразований Гильберта [2]. При этом $B_{uv}(\tau) = -B_{vu}(\tau)$.

Следовательно, задавшись корреляционной функцией, с помощью преобразования Гильберта можно найти взаимно корреляционные функции. А в [2] показано, что использование преобразования Гильберта можно свести к использованию преобразования Фурье.

Спектральная плотность средней мощности $S(\omega)$ и корреляционная функция $B(\tau)$ стационарного случайного процесса представляют собой пару взаимных преобразований Фурье:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad B(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega. \quad (4)$$

Спектральная плотность $S(\omega)$ определена для положительных и отрицательных значений частоты. В [3] такая спектральная плотность названа двусторонним математическим спектром. А в [2] используется односторонний физический спектр $S^+(\omega)$, отличный от нуля лишь при положительных частотах. При этом взаимные преобразования имеют вид:

$$S^+(\omega) = 4 \int_0^{\infty} B(\tau) \cos \omega\tau d\tau, \quad B(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S^+(\omega) \cos \omega\tau d\omega, \quad \omega \geq 0. \quad (5)$$

В [2] показано, что взаимно корреляционные функции можно находить по формуле:

$$B_{uv}(\tau) = -B_{vu}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S^+(\omega) \sin \omega\tau d\omega. \quad (6)$$

На интервале времени от 0 до T случайные процессы $x(t)$ и $y(t)$ мы отождествляли со стационарными случайными процессами $u(t)$ и $v(t)$. Далее будем считать, что на этом интервале времени одинаковы соответствующие корреляционные и взаимно корреляционные функции:

$$\overline{x(t_1)x(t_2)} = \overline{y(t_1)y(t_2)} = B(t_2 - t_1), \quad \overline{x(t_1)y(t_2)} = -\overline{y(t_2)x(t_1)} = B_{uv}(t_2 - t_1).$$

Теперь рассмотрим статистические характеристики выходных случайных величин в схеме, представленной на рис. 1.

Поскольку значения входного воздействия $s(t)$ являются нормальными случайными величинами, а X и Y получены в результате линейного преобразования $s(t)$, то случайные величины X и Y будут также нормальными. В этом случае для нахождения плотности распределения X и Y нужно определить их средние значения, дисперсии и коэффициент корреляции.

Квадратурные составляющие X и Y являются суммами сигнальных и шумовых компонент:

$$X = X_c + X_{ш}, \quad Y = Y_c + Y_{ш}, \quad X_c = \int_0^T x(t) dt, \quad Y_c = \int_0^T y(t) dt, \quad X_{ш} = \int_0^T n_x(t) dt, \quad Y_{ш} = \int_0^T n_y(t) dt.$$

Средние значения случайных процессов равны нулю, поэтому: $\overline{X_c} = 0$, $\overline{Y_c} = 0$, $\overline{X_{ш}} = 0$, $\overline{Y_{ш}} = 0$, $\overline{X} = 0$, $\overline{Y} = 0$. Величина σ^2 на рис. 1 является дисперсией шумовых составляющих $X_{ш}$ и $Y_{ш}$. Для дисперсии сигнальных составляющих получаем:

$$\sigma_c^2 = \overline{(X_c)^2} = \overline{(Y_c)^2} = \overline{\left(\int_0^T x(t_1) dt_1 \right) \left(\int_0^T x(t_2) dt_2 \right)} = \int_0^T \int_0^T \overline{x(t_1)x(t_2)} dt_1 dt_2 = \int_0^T \int_0^T B(t_2 - t_1) dt_1 dt_2.$$

Корреляционную и взаимно корреляционную функцию случайных процессов запишем в виде $B(\tau) = \alpha \rho_0 b(\tau)$, $B_{uv}(\tau) = \alpha \rho_0 b_{uv}(\tau)$, где ρ_0 – отношение «сигнал/шум», α – некоторый нормировочный коэффициент, $b(\tau)$ и $b_{uv}(\tau)$ – коэффициенты корреляции (нормированные функции). Коэффициент α будет выбран таким, что $b(0) = 1$.

Под отношением «сигнал/шум» ρ_0 подразумеваем отношение среднего значения энергии принимаемого сигнала к односторонней спектральной плотности мощности шума [1].

Найдём среднее значение выходной случайной величины:

$$\bar{R} = \overline{(X^2 + Y^2)/(2\sigma^2)} = \overline{X^2}/\sigma^2 = \left(\overline{(X_c)^2} + \overline{(X_{ш})^2} \right) / \sigma^2 = \eta \rho_0 \alpha T^2 / \sigma^2 + 1, \quad (7)$$

где

$$\eta = \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T b(t_2 - t_1) dt_1 dt_2.$$

Учитывая, что $b(-\tau) = b(\tau)$, двумерный интеграл в формуле для η можно свести к одномерному интегралу. В результате получается:

$$\eta = \frac{2}{T^2} \int_0^T (T - \tau) b(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Будем считать, что коэффициент α не зависит от скорости флуктуаций. Если флуктуации очень медленные, то коэффициент корреляции $b(\tau)$ не меняется на интервале времени от 0 до T . Тогда $\eta = 1$. Кроме того, в таких случаях $\bar{R} = 1 + \rho_0$ (см., например, [1]). Поэтому из (7) следует $\alpha = \sigma^2 / T^2$.

Если $\alpha = \sigma^2 / T^2$, то при произвольной скорости флуктуаций $\bar{R} = 1 + \rho$, $\rho = \eta / \rho_0$.

Найдём смешанный второй момент случайных величин X и Y :

$$\overline{XY} = \overline{(X_c + X_{ш})(Y_c + Y_{ш})} = \overline{X_c Y_c} = \int_0^T \int_0^T \overline{x(t_1)y(t_2)} dt_1 dt_2 = \int_0^T \int_0^T B_{uv}(t_2 - t_1) dt_1 dt_2.$$

Из условия $B_{uv}(\tau) = -B_{uv}(-\tau)$ можно получить, что $\overline{XY} = 0$.

Нормальные случайные величины X и Y некоррелированы. Поэтому выходная случайная величина R распределена по экспоненциальному закону:

$$W(R) = \frac{1}{1 + \rho} \exp \left\{ -\frac{R}{1 + \rho} \right\}, \quad \rho = \eta \cdot \rho_0.$$

Поскольку значения $b(\tau)$ не превышают 1, то $\eta \leq 1$. Причём максимальное значение $\eta = 1$ достигается тогда, когда $b(\tau) = 1$ на интервале времени от 0 до T . При этом начальная амплитуда и фаза сигнала за время обработки входной реализации не меняются. Процедура обнаружения сигнала будет оптимальной.

Потери в отношении «сигнал/шум»

Если на интервале времени T амплитуда и фаза сигнала будут подвержены изменениям из-за флуктуаций, то множитель η уменьшится. Обработка не будет оптимальной. Эффективность обнаружения сигнала будет определяться не отношением «сигнал/шум», а произведением отношения «сигнал/шум» и η . Поэтому величина η является коэффициентом энергетических потерь.

Потери появляются из-за того, что процедура обнаружения рассчитана на обнаружение такого флуктуирующего сигнала, у которого за время обработки входной реализации амплитуда и начальная фаза не меняются. А в действительности амплитуда и фаза меняются случайным образом.

Количественной мерой скорости флуктуаций является время корреляции флуктуаций. Существуют разные определения времени корреляции флуктуаций. Будем считать, что время корреляции T_k определяется формулой [3]:

$$T_k = \int_0^\infty b(\tau) d\tau. \quad (9)$$

Рассмотрим два частных случая.

Если $T_k \gg T$, то значения $b(\tau)$ при τ на интервале от 0 до T будут близки к 1. Заменяя $b(\tau)$ в подынтегральном выражении единицей, после интегрирования получим $\eta = 1$. Энергетические потери отсутствуют.

Если $T_k \ll T$, то $T - \tau$ в подынтегральном выражении можно заменить на T . После интегрирования получим $\eta = 2T_k / T$. Энергетические потери существенны. При неограниченном увеличении длительности импульса произведение $\eta \cdot \rho_0$ будет оставаться неизменным, а эффективность обнаружения полезного сигнала будет такой же, как при оптимальном обнаружении импульса, длительность которого составляет $2T_k$.

Чтобы оценить энергетические потери, необходимо задаться коэффициентом корреляции $b(\tau)$ случайных процессов в квадратурных каналах. И при этом необходимо осуществлять контроль, насколько правильно была задана корреляционная функция. Для этого вместе с потерями будем оценивать статистические свойства огибающей $E(t)$ случайного процесса $u(t)$.

Огибающая $U(t)$ сигнальной составляющей во входном воздействии (1) есть не что иное, как флуктуирующая амплитуда полезного сигнала. Далее, исходя из физических представлений, будем полагать, что квадрат амплитуды сигнала пропорционален отражающей поверхности цели. Учитывая, что $E(t) = U(t) / 2$, приходим к выводу, что коэффициент корреляции квадрата огибающей $E^2(t)$ является и коэффициентом корреляции отражающей поверхности цели.

Коэффициент корреляции $k(\tau)$ квадрата огибающей $E^2(t)$ случайного процесса $u(t)$ в соответствующих случаях будем называть коэффициентом корреляции отражающей поверхности цели.

Итак, задавшись коэффициентом корреляции $b(\tau)$ квадратурных составляющих, можно оценить энергетические потери и, соответствующий этим потерям коэффициент корреляции флуктуаций отражающей поверхности цели.

Разумеется, логично было бы в качестве исходных данных задавать коэффициент корреляции $k(\tau)$ флуктуаций отражающей поверхности цели, затем, по заданному коэффициенту находить коэффициент корреляции $b(\tau)$ квадратурных составляющих, и наконец, оценивать потери. Но такой путь будет связан с математическими трудностями. Поэтому осуществим оценки для нескольких вариантов коэффициента корреляции $b(\tau)$. Затем, основываясь на полученных результатах, сделаем обобщающие выводы.

Ищем корреляционную функцию квадрата огибающей случайного процесса $u(t)$:

$$K(\tau) = \overline{[u^2(t) + v^2(t)][u^2(t + \tau) + v^2(t + \tau)]}.$$

Значения $u(t)$, $v(t)$, $u(t + \tau)$, $v(t + \tau)$ в этом выражении являются нормальными случайными величинами с известными плотностями распределения вероятностей. Поэтому вычисление $K(\tau)$ сводится к вычислению смешанных моментов нормальных случайных величин. В частности, в качестве промежуточных результатов можно получить:

$$\overline{u^2(t)u^2(t + \tau)} = \overline{v^2(t)v^2(t + \tau)} = \sigma_c^4[1 + 2b^2(\tau)], \quad \overline{u^2(t)v^2(t + \tau)} = \overline{v^2(t)u^2(t + \tau)} = \sigma_c^4[1 + 2b_{uv}^2(\tau)],$$

где σ_c^2 – дисперсия нормальных случайных величин.

$$\text{Окончательно получаем } K(\tau) = 4\sigma_c^4[1 + k(\tau)], \quad k(\tau) = b^2(\tau) + b_{uv}^2(\tau).$$

Поскольку $k(\tau)$ является коэффициентом корреляции флуктуаций отражающей поверхности цели, то время корреляции флуктуаций отражающей поверхности будет определяться формулой:

$$T_{\text{ц}} = \int_0^{\infty} k(\tau) d\tau. \quad (10)$$

Рассмотрим примеры.

В первом примере коэффициент корреляции сигнальной компоненты квадратурной составляющей задаётся формулой: $b(\tau) = \exp\left(-\frac{\pi}{4} \cdot \frac{\tau^2}{T_k^2}\right)$, где T_k – время корреляции компоненты. График коэффициента корреляции имеет вид гауссовской кривой, поэтому этот коэффициент корреляции будем называть гауссовским.

Если в формуле (5) в подынтегральное выражение вместо $B(\tau)$ подставить $b(\tau)$, то получим нормированный односторонний физический спектр:

$$s^+(\omega) = 4 \int_0^{\infty} b(\tau) \cos \omega \tau d\tau = 4T_k \exp\left(-\frac{\omega^2 T_k^2}{\pi}\right).$$

Заменяя в (6) $S^+(\omega)$ на $s^+(\omega)$, получаем коэффициент взаимной корреляции:

$$b_{uv}(\tau) = \frac{4T_k}{2\pi} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{\omega^2 T_k^2}{\pi}\right) \sin \omega \tau d\omega.$$

Используя табличный интеграл из [4, С.494], получаем:

$$b_{uv}(\tau) = \frac{\tau}{T_k} \exp\left(-\frac{\pi \tau^2}{4 T_k^2}\right) {}_1F_1\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{\pi \tau^2}{4 T_k^2}\right),$$

где ${}_1F_1(\dots)$ – вырожденная гипергеометрическая функция.

Вырожденная гипергеометрическая функция имеется в составе ряда математических компьютерных программ. А при больших значениях аргумента для ориентировочных оценок целесообразно применять численное интегрирование в исходной формуле для $b_{uv}(\tau)$.

По представленным формулам были построены графики для рис. 2.

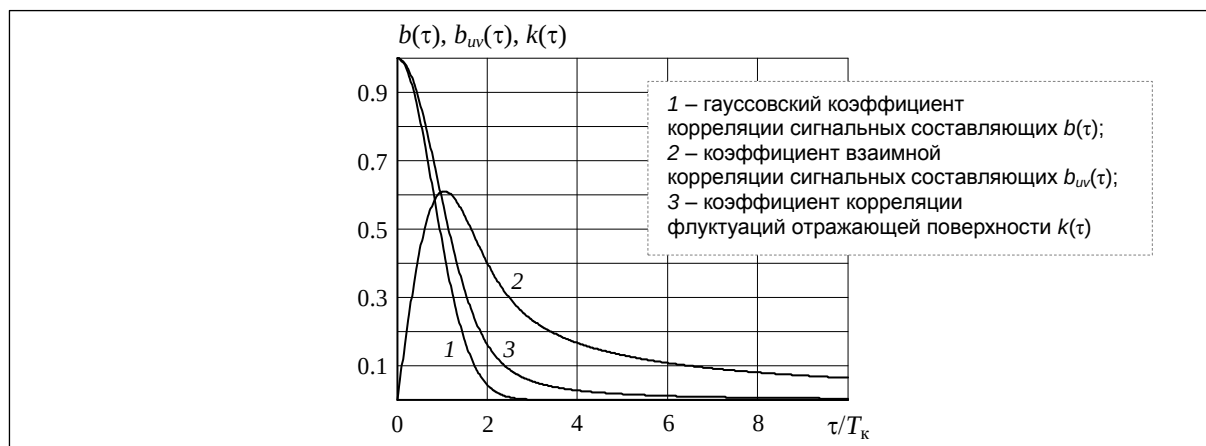


Рис. 2. Характеристики случайных процессов (первый пример)

Судя по рис. 2, график коэффициента корреляции флуктуаций отражающей поверхности шире графика коэффициента корреляции гауссовского случайного процесса. Численными расчётами по формулам (9) и (10) было получено, что $T_{\text{ц}}/T_k \approx 1.414$.

Заметим, что возможно другое определение времени корреляции. Временем корреляции можно было бы считать значение аргумента коэффициента корреляции, при котором коэффициент корреляции равен $1/2$. Численными расчётами для гауссовского коэффициента корреляции $b(\tau)$ было получено следующее. Если $T_{\text{ц}}^{(1/2)}$ и $T_k^{(1/2)}$ являются решениями уравнений $k(T_{\text{ц}}^{(1/2)}) = 1/2$ и $b(T_k^{(1/2)}) = 1/2$, то $T_{\text{ц}}^{(1/2)}/T_k^{(1/2)} \approx 1.209$.

На рис. 3 представлены энергетические потери в зависимости от отношения длительности импульса к времени корреляции флуктуаций отражающей поверхности. При расчёте коэффициента потерь η по формуле (8) использовался коэффициент корреляции $b(\tau)$, в выражение для которого вместо T_k подставлялось $T_{\text{ц}}/1.414$.

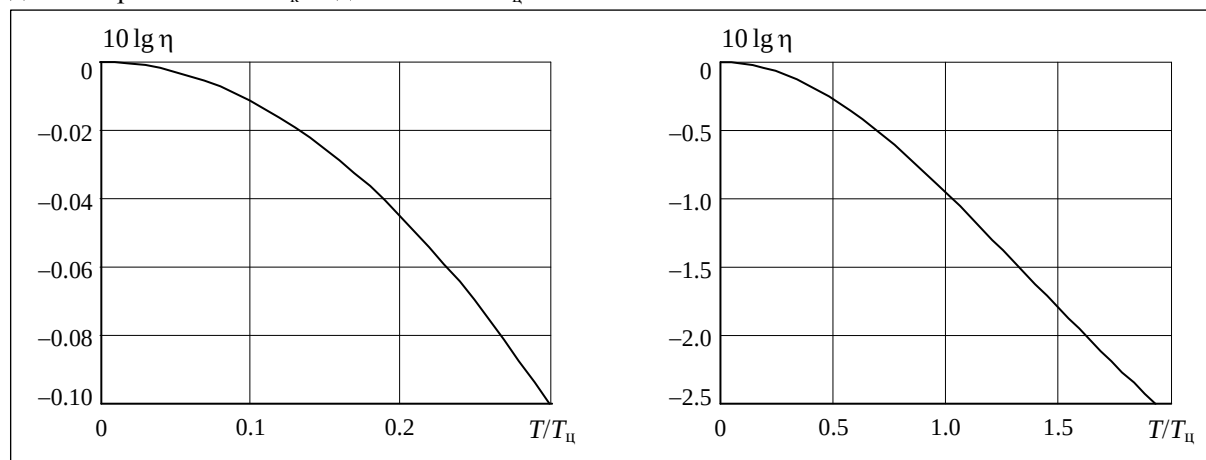


Рис. 3. Энергетические потери при гауссовском коэффициенте корреляции сигнальных составляющих

Теперь перейдём ко второму примеру.

Во втором примере коэффициент корреляции задаётся формулой $b(\tau) = \exp\left(-\frac{|\tau|}{T_k}\right)$.

Этот коэффициент корреляции будем называть экспоненциальным.

Нормированный односторонний физический спектр: $s^+(\omega) = 4 \int_0^{\infty} b(\tau) \cos \omega \tau d\tau = \frac{4T_k}{1 + (\omega T_k)^2}$.

Коэффициент взаимной корреляции $b_{uv}(\tau) = \frac{4T_k}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{1 + (\omega T_k)^2} \sin \omega \tau d\omega$ с помощью таблиц [4, С.420] можно свести к интегральной показательной функции. В данном случае вычисления осуществлялись по формулам: $b_{uv}(\tau) = [e^{-x} \text{Ei}(x) - e^x \text{Ei}(-x)]/\pi$, $x = \tau/T_k$,

$\text{Ei}(x) = C + \ln(|x|) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^k}{k \cdot k!}$, $C = 0.577\ 215\ 664\ 901\ 532\ 5$. Здесь C – постоянная Эйлера.

Численными методами было получено, что при экспоненциальном коэффициенте корреляции $T_{\Pi} / T_k \approx 1$.

Результаты расчётов характеристик даны на рис. 4 и 5.

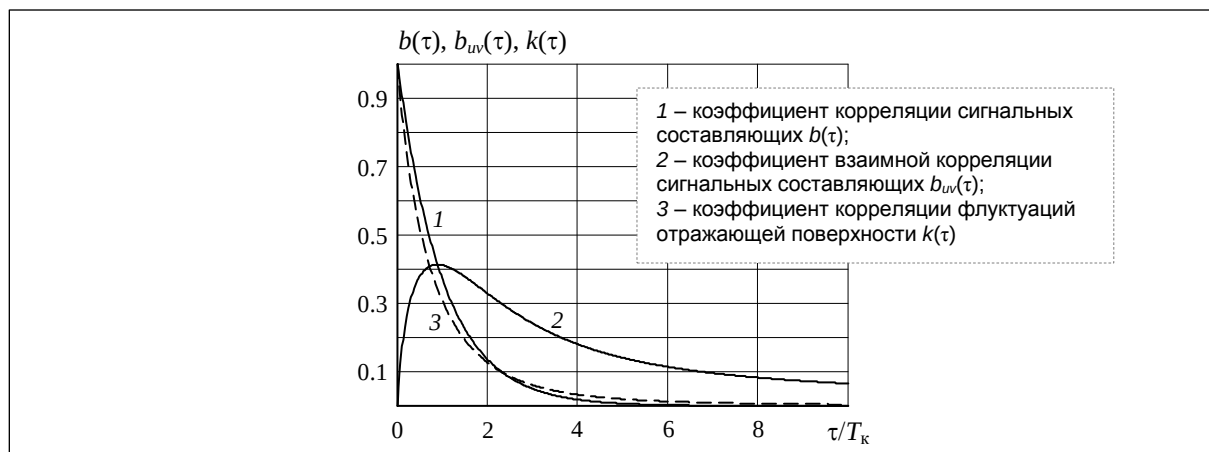


Рис. 4. Характеристики случайных процессов (второй пример)

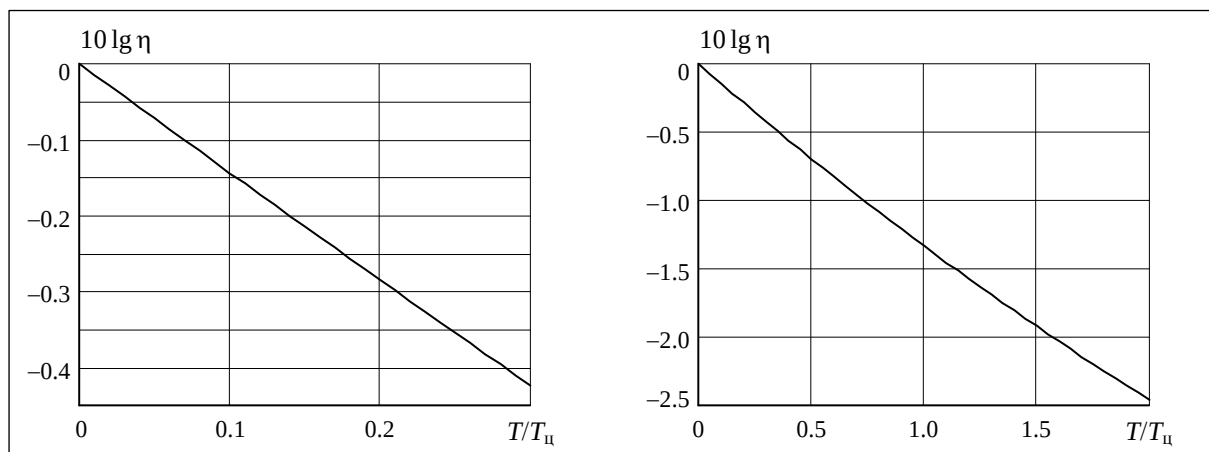


Рис. 5. Энергетические потери при экспоненциальном коэффициенте корреляции сигнальных составляющих

При описании следующих примеров будут использоваться готовые таблицы преобразований Гильберта.

Зададимся коэффициентом корреляции:

$$b(\tau) = \frac{\sin(a\tau)}{a\tau}, \quad a = \frac{\pi}{2T_k}. \quad (11)$$

Из содержащихся в [5] таблиц следует, что $b_{uv}(\tau) = \frac{1 - \cos(a\tau)}{a\tau}$. Теперь несложно получить формулу для коэффициента корреляции флуктуаций отражающей поверхности цели $k(\tau) = \left(\frac{\sin(a\tau/2)}{a\tau/2} \right)^2$.

Результаты расчётов представлены на рис. 6 и 7.

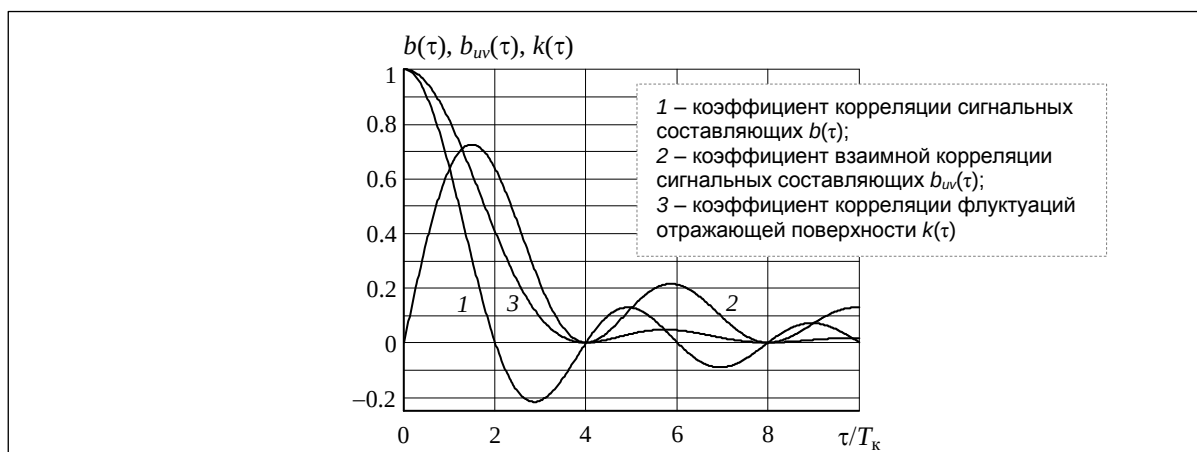


Рис. 6. Характеристики случайных процессов (третий пример)

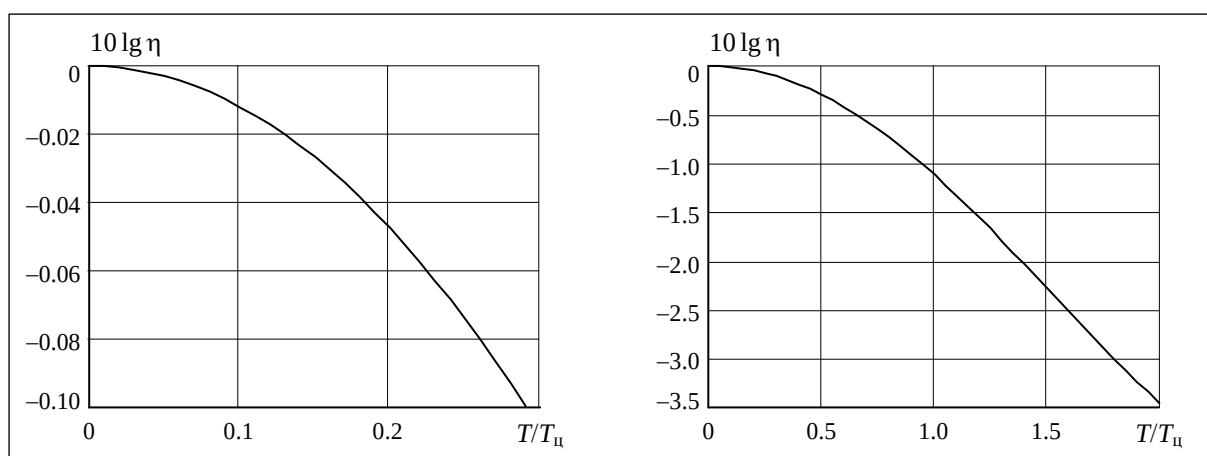


Рис. 7. Энергетические потери (третий пример)

При коэффициенте корреляции, задаваемом формулой (11), T_c ровно в 2 раза больше, чем T_k .

Если задаться коэффициентом корреляции

$$b(\tau) = \frac{1}{1 + (a\tau)^2}, \quad a = \frac{\pi}{2T_k},$$

то по таблице из [5] можно найти преобразование Гильберта, а затем и $k(\tau)$ – коэффициент корреляции флуктуаций отражающей поверхности цели. И оказывается, что в данном случае выражение для $k(\tau)$ в точности совпадает с выражением для $b(\tau)$. Следовательно, и время корреляции T_c совпадает со временем корреляции T_k . Энергетические потери не превышают 0.1 дБ, если длительность импульса составляет менее 24% от времени корреляции флуктуаций эффективной отражающей поверхности цели.

Рассмотренные примеры позволяют сделать вывод, что энергетические потери зависят не только от отношения времени наблюдения к времени корреляции, но и от вида корреляционной функции флуктуаций отражающей поверхности цели. В трёх примерах потери равны 0.1 дБ, если длительность импульса составляет 24,...,30% от времени корреляции флуктуаций эффективной отражающей поверхности цели. Но если график коэффициента корреляции имеет остроконечную вершину, то требования к длительности импульса ужесточаются (см. рис. 4 и 5). В этом случае при допустимых потерях 0.1 дБ длительность импульса не должна превышать 7% от времени корреляции флуктуаций эффективной отражающей поверхности цели.

Применение полученных результатов к обнаружению когерентной пачки импульсов

Представленные результаты относятся к обнаружению прямоугольного импульса без внутри-импульсной модуляции. Но изложенный метод анализа пригоден и для других сигналов. При этом следует ожидать, что получаемые в таких случаях соотношения будут более громоздкими.

Но можно высказать мнение, что углубляться в детальные исследования для каких-либо других сигналов нет никакой особой необходимости. Дополнительный анализ показывает, что представленные выше результаты применимы и к процедуре обнаружения когерентной пачки импульсов. Коэффициент энергетических потерь при обнаружении когерентной пачки можно оценивать по формуле (8), если в этой формуле под величиной T подразумевать длительность когерентной пачки импульсов. А длительностью пачки следует считать произведение числа импульсов на период повторения импульсов.

Формула (8) справедлива для прямоугольного импульса. А если эту формулу применить для когерентной пачки импульсов, то из-за подобной «подмены» сигнала появится какая-то погрешность. Однако эта погрешность оказывается настолько малой, что её не следует принимать во внимание. Поэтому все представленные в данной статье графики с энергетическими потерями можно отнести и к когерентной пачке импульсов.

Заключение

Из представленных в статье результатов следует важный вывод: время когерентной обработки принимаемого радиолокационного сигнала нельзя беспредельно увеличивать. Максимальное время эффективной когерентной обработки сигнала сопоставимо по порядку величины с временем корреляции флуктуаций отражающей поверхности цели. Бесконтрольное увеличение времени когерентной обработки может привести к существенным энергетическим потерям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трухачёв А.А. Анализ процедур и алгоритмов обнаружения сигналов. – М.: Радио и связь, 2003. – 248 с.
2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
3. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
4. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1963. – 1100 с.
5. Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований, том II. Перевод с английского. – М.: Наука, 1970. – 328 с.

EFFECTIVENESS OF SIGNAL DETECTION FOR THE CASE WHEN CORRELATION TIME OF TARGET CROSS-SECTION FLUCTUATIONS IS COMPARABLE TO DURATION OF THE COHERENT RADAR SIGNAL

A.A. Trukhachev

Features of coherent radar signal detection are analyzed for the case when the coherence of reflected signal starts degrading because of target cross-section fluctuations. The method to calculate the loss in signal-to-noise ratio caused by these fluctuations is presented. Parameters estimations are given for several examples of correlation function of the target cross-section. For three examples signal-to-noise ratio loss is equal to 0.1 dB if duration of the radar signal is 24 to 30% of the fluctuations correlation time of the target cross-section. And in one example the admissible loss of 0.1 dB limits signal duration by the value of 7% of fluctuations correlation time. The method of loss estimations is applicable both to pulse signals and coherent pulse trains signals as well.

Поступила 5 апреля 2017 года.

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКОЛЬЦЕВЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК С УЧЁТОМ ПАРАМЕТРОВ АМПЛИТУДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ИХ РАСКРЫВЕ

© Авторы, 2018

И.А. Чепурнов кандидат технических наук, доцент,
профессор Учебного военного центра, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

В.Д. Мещеряков кандидат технических наук,
зам. начальника Учебного военного центра, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
E-mail: vitauskas@yandex.ru

С.Л. Старчак доктор технических наук, доцент, советник РАРАН,
профессор Учебного военного центра Военного института, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
E-mail: starchak@bmstu.ru

Предложена методика учёта параметров амплитудного распределения в задаче оценки характеристик многокольцевых фазированных антенных решёток. Выработан математический аппарат, позволяющий применять данную методику при оценке характеристик многокольцевых фазированных антенных решёток различной структуры с учётом диапазона волн. Представлены результаты применения предлагаемой методики для некоторых известных законов амплитудного распределения.

Ключевые слова: фазированная антенная решётка, амплитудное распределение, уровень боковых лепестков, диаграмма направленности, коэффициент использования поверхности антенны.

The parameters registration technique of amplitude distribution in characteristics assessment problem of multi-ring phased antenna arrays was proposed. The mathematical apparatus was formulated, permitting to apply this technique during assessment of multi-ring phased antenna arrays of different structure considering the wavelength. The application results of proposed technique for some known amplitude distribution laws were presented.

Keywords: phased antenna array, amplitude distribution, side-lobes level, directional pattern, antenna aperture efficiency.

Одной из важнейших задач современного развития теории и техники антенн является изыскание путей построения фазированных антенных решёток (ФАР), обладающих широким сектором сканирования и числом элементов, приближающимся к теоретически минимальному. Решить поставленную задачу в определённой мере позволяют многокольцевые ФАР (МКФАР).

В МКФАР излучатели располагаются вдоль концентрических колец. Благодаря круговой симметрии кольцевые ФАР могут использоваться для создания направленных диаграмм направленности (ДН), мало меняющихся при сканировании в пределах больших углов отклонения от нормали к антенной плоскости. При разработке и испытаниях МКФАР важным этапом является оценка их характеристик. Характеристики МКФАР зависят не только от их параметров и структуры, но и от закона распределения амплитуд токов, возбуждающих элементарные излучатели решётки, то есть, от амплитудного распределения (АР) на её раскрытии. Вариации параметров АР на раскрытии МКФАР позволяют управлять шириной и формой главного лепестка ДН, изменять уровень боковых лепестков (УБЛ) ДН и коэффициент использования поверхности (КИП) решётки [1, 2, 3]. Однако, те немногочисленные работы, в которых рассматриваются кольцевые ФАР, либо были опубликованы в 1960-х годах [4, 5], когда возможности существовавших на то время вычислительных средств не позволяли производить полноценное математическое моделирование сложных МКФАР, либо содержат только теоретические выводы [6, 7].

Уровень современной вычислительной техники наряду с появлением таких прикладных программных математических пакетов, как *Mathcad* и *MATLAB*, позволяют успешно подхо-

доть к численному решению широкого круга задач электродинамики, распространения радиоволн и антенной техники, которые раньше считались совершенно недоступными для аналитических методов.

Предлагаемая в настоящей работе методика учёта параметров АР в задаче оценки характеристик МКФАР обладает универсальностью и удобством практического применения. Математический аппарат, составляющий основу данной методики, позволяет применять её при оценке характеристик МКФАР различной структуры и диапазона волн.

Основными этапами оценки характеристик МКФАР и учёта АР являются:

1. Выбор параметров и структуры МКФАР.
2. Выбор АР на раскрые МКФАР и его параметров.
3. Расчёт и построение ДН МКФАР.
4. Оценка характеристик МКФАР по ДН без отклонения главного лепестка и с его отклонением.
5. Анализ зависимости характеристик МКФАР от параметров АР.

На первом этапе оценки задаются, а при необходимости рассчитываются параметры и структура МКФАР. Для всех вариантов МКФАР пространственное размещение излучателей осуществляется вдоль concentрических колец (см. рис. 1).

Расстояние между соседними излучателями в кольцах плоской МКФАР выбираются из условия [3, 4]: $d_n \leq 0.5 \cdot \lambda_B$ (λ_B – длина волны). Если радиусы колец задать как:

$$R_n = \frac{n \cdot \lambda_B}{2}, \quad 0 \leq n \leq N_K - 1, \quad (1)$$

то количество излучателей в каждом кольце МКФАР будет равно:

$$M_n = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ \frac{2\pi \cdot R_n}{d_n}, & n > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Общее же количество излучателей в решётке:

$$M_\Sigma = \sum_{n=0}^{N_K-1} M_n. \quad (3)$$

Диаметр МКФАР рассчитывается по радиусу самого большого кольца:

$$D_a = 2R_{N_K-1} + \frac{\lambda_B}{2}. \quad (4)$$

Угловое расстояние между излучателями в кольцах МКФАР задаётся выражением:

$$\Phi_n = \begin{cases} 0, & n = 0 \\ \frac{2\pi}{M_n}, & n > 0 \end{cases} \quad (5)$$

Амплитудно-фазовое распределение на раскрые МКФАР можно представить как:

$$J(m, n) = I(n) \cdot e^{-j \cdot \psi(m, n)}, \quad (6)$$

где: $I(n)$ – АР на раскрые МКФАР, $\psi(m, n)$ – фазовое распределение (ФР) на раскрые МКФАР, m – номер излучателя в кольце, n – номер кольца.

Выразим ФР на раскрые МКФАР:

$$\psi(m, n) = k_B \cdot R_n \cdot \sin \theta_0 \cdot \cos(m \cdot \Phi_n - \varphi_0), \quad (7)$$

где: $k_B = 2\pi / \lambda_B$ – волновое число, а θ_0 и φ_0 – углы, определяющие направление главного максимума ДН.

Выбор АР на раскрые МКФАР, как правило, связан с компромиссным решением ряда задач:

- обеспечение максимального значения энергетического потенциала в направлении максимума ДН;
- снижение УБЛ;

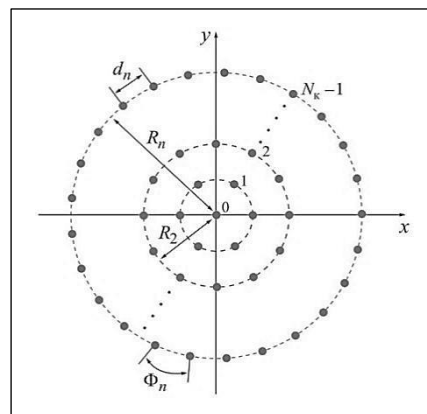


Рис. 1. Структура многокольцевой ФАР

- уменьшение ширины главного лепестка ДН;
- обеспечение широкоугольного сканирования заданного сектора обзора.

От выбранного типа и параметров АР зависит значение КИП МКФАР $k_{ип}$, который, в свою очередь, определяет такие характеристики, как:

- эффективная поверхность МКФАР;
- коэффициент направленного действия (КНД) МКФАР;
- коэффициент усиления (КУ) МКФАР.

Эффективная поверхность (площадь) МКФАР рассчитывается, как [1, 8]:

$$S_a = \frac{k_{ип} \cdot \pi \cdot D_a^2}{4} \cdot \cos \theta_0 \cos \varphi_0. \quad (8)$$

КНД является мерой способности МКФАР концентрировать энергию электромагнитного излучения в узком луче. КНД МКФАР пропорционален её эффективной поверхности:

$$k_{нд} = \frac{S_a \cdot 4\pi}{\lambda_B^2}. \quad (9)$$

КУ МКФАР может интерпретироваться как количественная мера способности МКФАР концентрировать мощность электромагнитной волны в узком луче, но в отличие от КНД, ещё и учитывающую потери в элементах конструкции МКФАР и объектах, расположенных в ближней зоне. Таким образом, КУ МКФАР однозначно связан с КНД через коэффициент полезного действия (КПД) МКФАР $k_{пд}$:

$$G_a = k_{пд} \cdot k_{нд}. \quad (10)$$

ДН ФАР может изображаться в полярной системе координат или в сечении этой системы, а также в декартовых (прямоугольных) координатах [8]. Чаще всего ДН ФАР представляют именно в декартовой системе координат. Несмотря на то, что такое представление менее наглядно, чем в полярных координатах, однако его преимущество состоит в большем угловом разрешении боковых лепестков, что очень важно для анализа ДН ФАР.

В случае изотропных излучателей ДН МКФАР можно представить как:

$$F(\theta, \varphi) = \left| \sum_{n=0}^{N_k-1} \sum_{m=1}^{M_n} J(m, n) \cdot \exp[jk_B R_n \sin \theta \cos(m\Phi_n - \varphi)] \right|. \quad (11)$$

Перед построением ДН нормируется – все значения $F(\theta, \varphi)$ делятся на её максимальное значение $F(\theta_0, \varphi_0)$:

$$F_0(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) / F(\theta_0, \varphi_0). \quad (12)$$

Для удобства дальнейшего анализа графики нормированной ДН рекомендуется представлять в логарифмическом масштабе.

ДН МКФАР позволяет графически определить ширину её главного лепестка и оценить УБЛ. Ширина главного лепестка ДН МКФАР $\Delta\theta$ измеряется на уровне -3 дБ ДН, представленной в логарифмическом масштабе. УБЛ ДН МКФАР равен уровню максимумов первых (ближайших к главному) боковых лепестков ДН.

Рассмотрим применение предлагаемой методики на примере оценки характеристик плоской МКФАР сантиметрового диапазона ($\lambda_B = 6$ см) с количеством колец: $N_k = 22$ (с учётом центрального излучателя, принимаемого за нулевое кольцо). Используя выражения (1–4), определим общее количество излучателей в МКФАР и её диаметр: $M_\Sigma = 1\,441$, $D_a = 1.29$ м.

Известно [1, 2], что максимальный энергетический потенциал в направлении максимума ДН ФАР обеспечивает равномерное АР:

$$I(n) = 1. \quad (13)$$

Однако, ДН МКФАР при равномерном АР имеет высокий УБЛ. Снизить УБЛ позволяет использование АР, спадающих к краю раскрыва.

К таким АР, применительно к МКФАР, можно отнести:

- АР типа «Парабола на пьедестале».
- АР типа «Гауссовское на пьедестале» различного порядка.

АР типа «Парабола на пьедестале» (см. рис. 2) определяется функцией:

$$I(n) = 1 - (1 - \Delta) \left(\frac{n}{N_k - 1} \right)^2, \quad (14)$$

где: Δ – пьедестал АР.

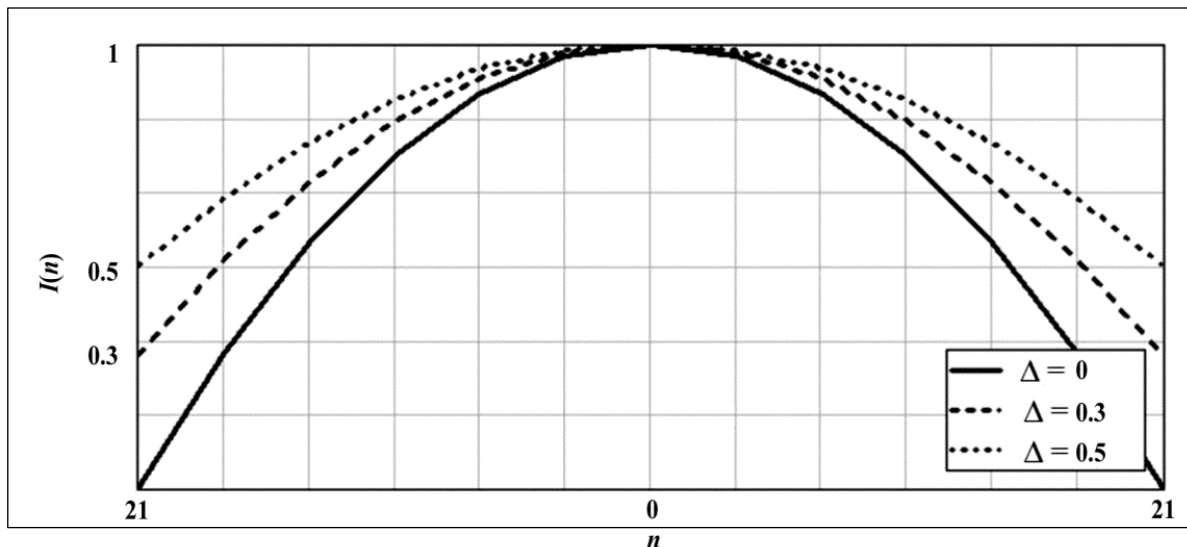


Рис. 2. АР типа «Парабола на пьедестале» на раскрые МКФАР ($N_k = 22$)

АР типа «Гауссовское на пьедестале» (см. рис. 3) описывается следующим выражением:

$$I(n) = \Delta + (1 - \Delta) \left(1 - \left(\frac{n}{N_k - 1} \right)^2 \right)^p, \quad (15)$$

где: p – порядок АР.

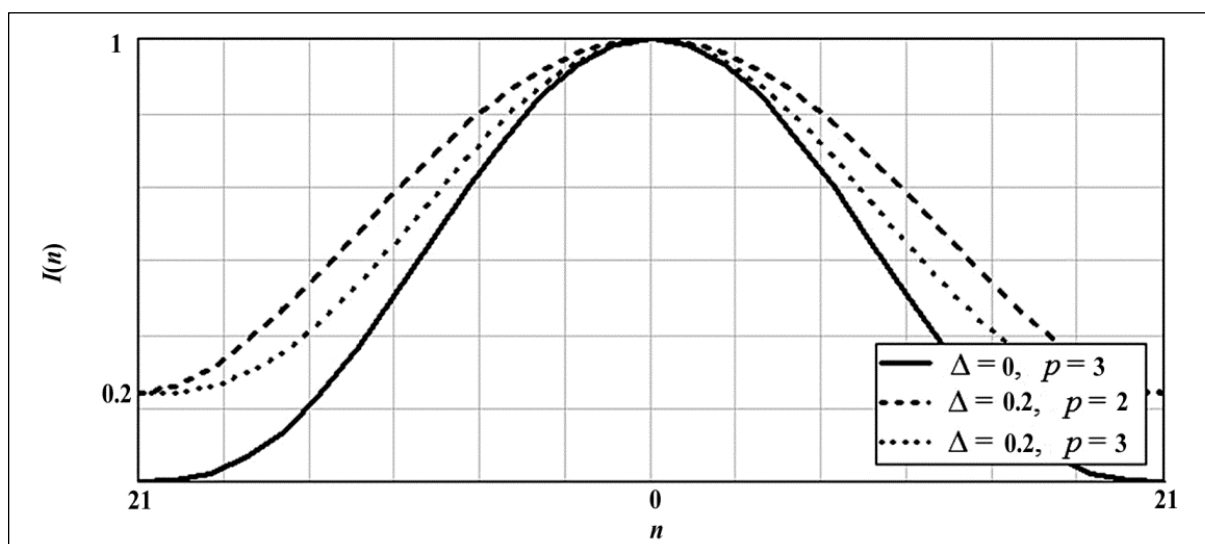


Рис. 3. АР типа «Гауссовское на пьедестале» на раскрые МКФАР ($N_k = 22$)

На рис. 4–6 представлены рассчитанные с использованием прикладного программного математического пакета *Mathcad* ДН оцениваемой МКФАР с равномерным АР, АР типа «Парабола на пьедестале» ($\Delta = 0.3$) и АР типа «Гауссовское на пьедестале» ($\Delta = 0.2$, $p = 3$), соответственно.

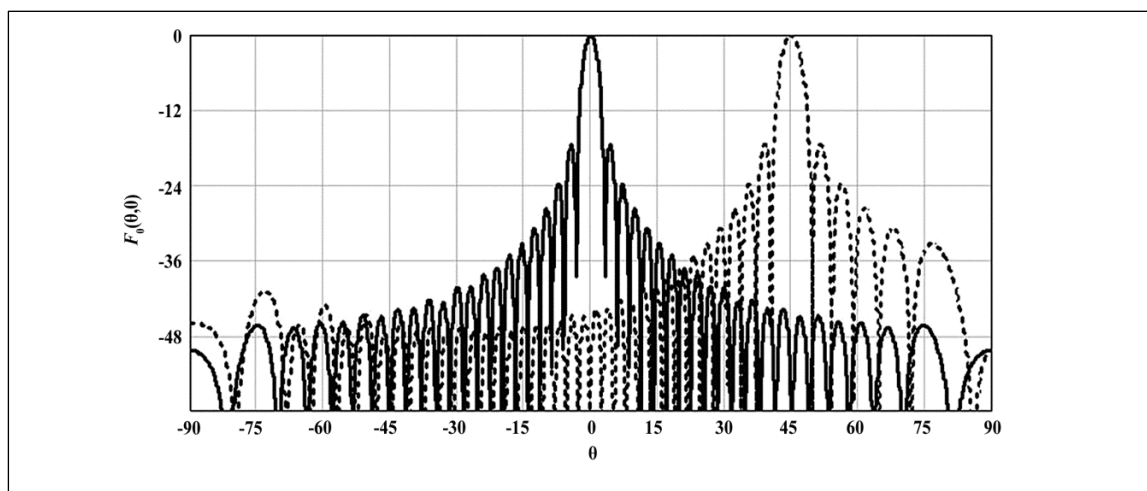


Рис. 4. ДН МКФАР с равномерным АР

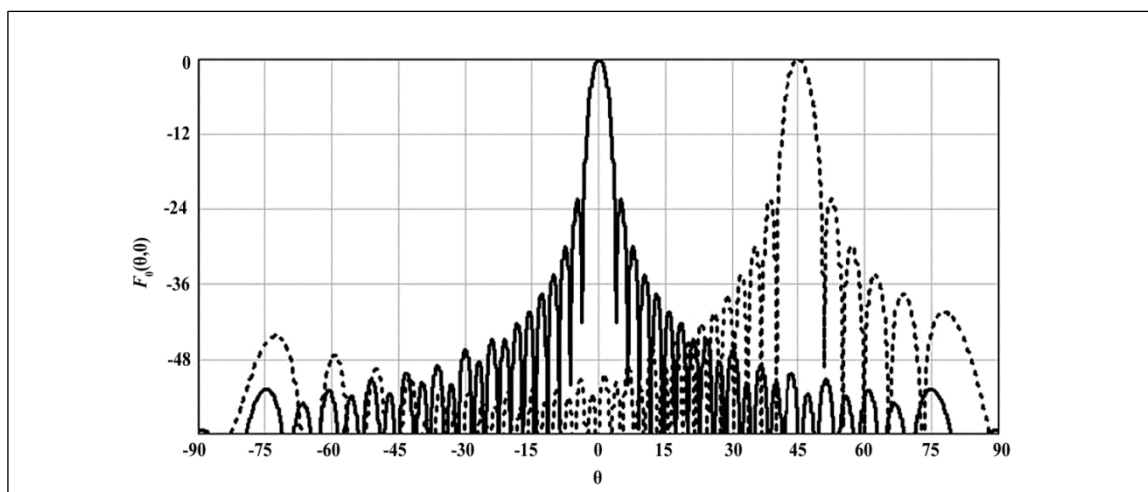


Рис. 5. ДН МКФАР с АР типа «Парабола на пьедестале» ($\Delta = 0.3$)

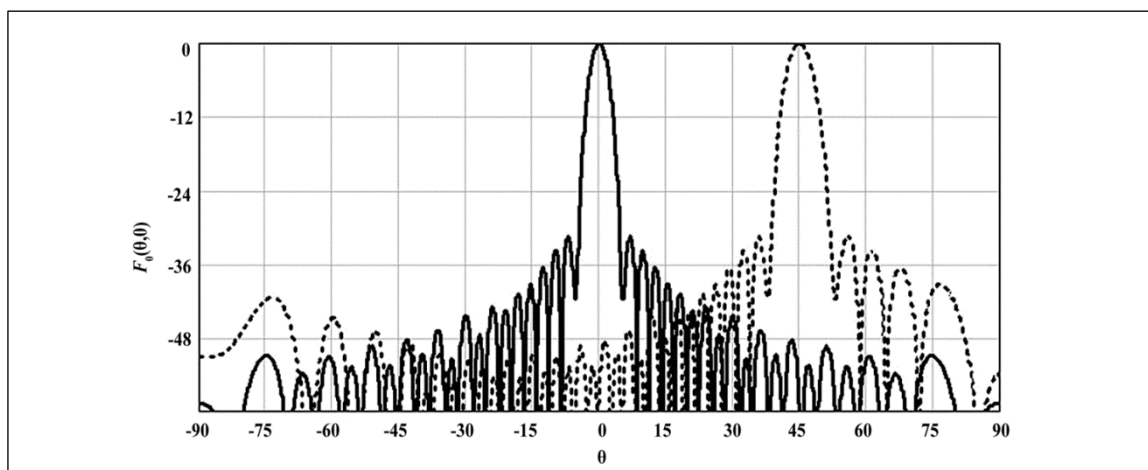


Рис. 6. ДН МКФАР с АР типа «Гауссовское на пьедестале» ($\Delta = 0.2, p = 3$)

Приведённые на рисунках ДН для неотклонённого и отклонённого на 45° главного лепестка позволяют оценить влияние выбранных параметров АР на характеристики МКФАР. Результаты оценки характеристик МКФАР с учётом параметров заданного АР сведены в таблицу.

Результаты оценки характеристик МКФАР

АР	Δ	p	УБЛ, дБ	θ_0 , град	$\Delta\theta$, град	КИП	S_{a_2} , м ²	G_a , дБ
$I(n) = 1$	–	–	-17.6	0	2.74	0.99	1.29	36.5
				45	3.94	0.7	0.92	35
$I(n) = 1 - (1 - \Delta) \left(\frac{n}{N_k - 1} \right)^2$	0.3	–	-22.8	0	3.1	0.92	1.2	36.1
				45	4.42	0.65	0.85	34.6
$I(n) = \Delta + (1 - \Delta) \left(1 - \left(\frac{n}{N_k - 1} \right)^2 \right)^p$	0.2	3	-31.4	0	3.33	0.64	0.83	34.5
				45	4.77	0.45	0.59	33.1

Заключение

Представленные результаты оценки характеристик МКФАР демонстрируют эффективность предложенной методики. Математический аппарат, лежащий в основе данной методики, обладает универсальностью для заданной структуры МКФАР и для диапазона волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М. Устройства СВЧ и Антенны. – М.: Изд-во «Радиотехника», 2006. – 376 с.
2. Чепурнов И.А., Старчак С.Л. Методика учёта параметров амплитудного распределения в задаче оценки характеристик многокольцевых фазированных антенных решёток // Труды IV Всероссийской научно-технической конференции РТИ Системы ВКО. – 2017. – С.270.
3. Чепурнов И.А., Некрасов Е.Г. Методика оценки влияния амплитудного и фазового распределения на характеристики диаграммы направленности фазированной антенной решётки // Инженерный вестник. – 2013, №9. – С.3.
4. Бененсон Л.С., Журавлев В.А. и др. Антенные решётки. Методы расчёта и проектирования. – М.: Советское радио, 1966. – 368 с.
5. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование антенно-фидерных устройств. – М.: Энергия, 1966. – 648 с.
6. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию. – М.: Science Press, 2001. – 232 с.
7. Филиппов В.С., Пономарев Л.И. и др. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решёток: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1994. – 592 с.
8. Чепурнов И.А., Серов С.А., Воротнюк Ю.С. Военно-техническая подготовка. Введение в специальность. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 376 с.

EVALUATION OF MULTI-RING PHASED ANTENNA ARRAYS CHARACTERISTICS CONSIDERING AMPLITUDE DISTRIBUTION PARAMETERS AT ITS APERTURE

I.A. Chepurnov, V.D. Meshcheryakov, S.L. Starchak

Multi-ring phased antenna arrays (PAA) have a wide practical application due to wide scan angle and low-level side-lobes of directional pattern with elements number approximating to theoretically minimal.

The primary stage during multi-ring PAA development and tests is an assessment of its characteristics. The multi-ring PAAs characteristics depend not only on its parameters and structure, but on the currents amplitude distribution law, exciting radiating elements, i.e. from amplitude distribution at its aperture. Variations of amplitude distribution parameters at aperture of multi-ring PAAs permit to control the beam width and envelope of side-lobe of directional pattern, to change side-lobes level of directional pattern and PAA aperture efficiency.

The article proposes parameters registration technique of amplitude distribution in characteristics assessment problem of multi-ring PAAs, which have an adequate versatility and practical application convenience. The formulated mathematical apparatus was described, permitting to apply this technique during assessment of multi-ring PAAs of different structure considering the wavelength. The application results of proposed technique for some known amplitude distribution laws were presented.

Поступила 16 марта 2018 года.

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 681.3.062

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛИЗАЦИИ И СОЗДАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ. LXC-КОНТЕЙНЕРЫ

© Авторы, 2018

Ю.В. Безгодков

зам. начальника ОКБ, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва

Г.Б. Гуров кандидат технических наук,

начальник ОКБ, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва

Ю.Б. Лепихин

начальник отдела, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва

С.Ф. Семин

зам. начальника СКБ, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва

E-mail: info@raspletin.com

В статье показаны возможности применения технологии контейнерной LXC-виртуализации для построения автоматических систем управления военного назначения. Также рассмотрена возможность применения технологии контейнерной виртуализации для построения систем жёсткого реального времени. Проведены сравнительные исследования быстродействия параллельных вычислений на основе контейнеров и стандартного распараллеливания на потоки. Применение контейнерной виртуализации для систем реального времени предоставляет почти все преимущества виртуализации, включая индустриализацию разработки при сохранении высоких характеристик вычислительной эффективности.

Ключевые слова: программное обеспечение, LXC-контейнеры, виртуализация, автоматизированная система управления, индустриализация разработок.

The article states application possibility of container LXC-virtualization technology for building of military-purpose automated control systems. The application possibility of container virtualization technology to build a hard real-time system was examined as well. The comparative studies of parallel computations respond speed based on containers and standard paralleling into threads. Container virtualization application for real-time systems provides almost all virtualization advantages including development industrialization while maintaining hot-performance capabilities of computational efficiency.

Keywords: software, LXC-containers, virtualization, automated control system, development industrialization.

Введение

В предыдущей статье [3] рассмотрена возможность применения технологии полной виртуализации для построения больших автоматизированных систем управления (БАСУ). Поскольку БАСУ часто состоят из многих компонентов, построенных на различных программных платформах, для их формирования наилучшим решением представляется именно полная виртуализация. Однако существует и другая технология виртуализации, виртуализация на основе

операционных систем, или контейнерная виртуализация. Этот тип виртуализации не требует наличия гипервизора, который, с одной стороны, позволяет запускать различные операционные системы на одном хосте, но с другой стороны, «оттягивает» на себя часть вычислительных ресурсов, что уменьшает быстродействие системы. Технология контейнерной виртуализации позволяет строить на её основе как отдельные структурные элементы БАСУ, так и системы управления реальным временем вплоть до систем с жёсткими требованиями по времени обработки сигналов. В настоящей статье рассмотрена возможность применения технологии LXC-контейнеров при построении автоматизированных систем управления. Но сначала краткое описание технологии.

Контейнерная (лёгкая) виртуализация

Контейнерная виртуализация [1, 2] – это система виртуализации на уровне операционной системы для запуска нескольких изолированных экземпляров операционной системы *Linux* на одном хосте. Существует несколько систем контейнерной виртуализации. Авторы остановили свой выбор на использовании LXC-контейнеров (от англ. *LinuxContainers*) как наиболее эффективной, защищённой и активно развивающейся системе.

LXC-контейнеры создают виртуальное окружение с собственным пространством процессов и сетевым стеком. Все экземпляры LXC-контейнеров используют один и тот же экземпляр ядра операционной системы хост-машины. Контейнерная виртуализация обеспечивает:

- фактическое отсутствие падения производительности вычислительных процессов (отсутствие эмуляции машинных команд) – все системные вызовы исполняются непосредственно ядром ОС *Linux*;
- гибкое распределение ресурсов хост-машины между отдельными контейнерами (ядро процессора, оперативная память, дисковое пространство, сетевые интерфейсы и прочее);
- функционирование контейнеров как отдельных *Linux*-машин;
- определённую независимость от аппаратного состава и архитектуры хост-машины – необходима лишь совместимость по версии ядра;
- очень простой механизм миграции с одного хоста на другой хост (что очень важно для повышения живучести АСУ, организации аварийного резервирования).

Необходимо отметить, что контейнерная виртуализация, в отличие от полной виртуализации, не может обеспечить исполнение на хосте ОС отличных от ОС *Linux*, а также ОС *Linux* с существенно иными версиями ядра, чем на хост-машине.

Ниже будут рассмотрены две различные области применения LXC-контейнерных технологий:

- построение АРМ КСА (отдельного комплекса систем автоматизации – КСА) из состава БАСУ;
- применение в составе АСУ как основы построения центральных вычислительных комплексов, в которых имеются жёсткие требования ко времени обработки сигналов по большому количеству информационно-управляющих каналов одновременно.

Построение КСА БАСУ

В этой части рассматривается применение контейнерной виртуализации для построения системы АРМ-ов КСА БАСУ.

Основой построения такой системы может послужить ОС *ALT Linux*, причины выбора которой как основы построения АСУ, а равно и корпоративных сетей, были приведены в предыдущей статье [3].

На рис. 1 представлена возможная принципиальная схема организации отдельного КСА при использовании LXC-контейнеров на сервере КСА. Основным принцип такой схемы: «один пользователь – один контейнер на сервере».

ЭВМ на рабочем месте фактически исполняют роль «толстого клиента», при этом могут обладать самой минимальной конфигурацией, обеспечивающей необходимое качество графического изображения и качество звука. Требования к объёму дискового пространства и быстродействию минимальны. Единственная программа, которая выполняется на клиентской ЭВМ – графический клиент подключения к серверу *vpviewer*. При этом цена такой ЭВМ также минимальна. Вся информация каждого пользователя хранится в контейнере на сервере и обрабатывается также на сервере.

Необходимо отметить, что все программы, установленные на сервере в стандартных общих директориях, автоматически наследуются LXC-контейнерами. Нет необходимости установки

общих программных пакетов, например таких, как офисный пакет, интернет-браузеры и прочее, на каждом клиентском контейнере. Обновление всего общего ПО происходит только в одном экземпляре на сервере и автоматически наследуется пользовательскими контейнерами при их следующем запуске.

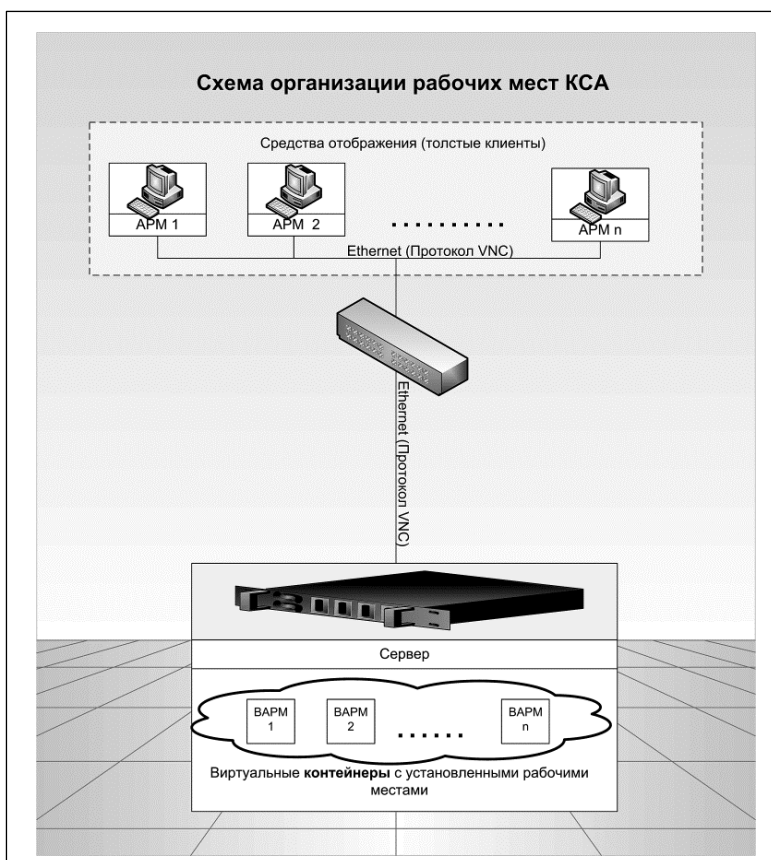


Рис. 1. Схема КСА с использованием виртуальных LXC-контейнеров

Имеется возможность для каждого пользователя установить специфическое для него ПО непосредственно в контейнере пользователя. Применение подобной схемы имеет следующие преимущества:

- сильно снижается стоимость ЭВМ, используемых на рабочих местах, в некоторых случаях – в десятки раз;
- фактически полностью отпадает необходимость работ по администрированию клиентских ЭВМ;
- существенно увеличивается защищённость информации от несанкционированного доступа, так как она хранится и обрабатывается пользователями на сервере, при этом информация не распространяется по сети, даже в случае обмена ею между пользователями;
- упрощается ведение специального контроля за хранимой и обрабатываемой пользователями информацией по тем же причинам, которые указаны в предыдущем пункте;
- упрощается процесс администрирования сети, весь процесс связан с администрированием сервера и контейнеров пользователей, также находящихся на сервере;
- пользовательские настройки – пространство имён (имена пользователей), IP-адреса, MAC-адреса, номера портов и т.д. никак не связаны с соответствующими пространствами, номерами и адресами на сервере (при соблюдении простейших ограничений, например, на значения UID и GID), что даёт возможность организации простого мигрирования пользовательских контейнеров с сервера на сервер, возможность независимого изменения настроек сервера, включая сетевые настройки, вплоть до полной переустановки на нём ОС, без внесения каких-либо изменений в контейнерах;
- в случае применения платных лицензионных программ при контейнерной организации АРМ-ов пользователей требуется только одна лицензия для его установки на сервере.

Организация ввода/вывода печатной информации представлена на рис. 2. Основной её принцип – «одно помещение – один принтер/сканер».

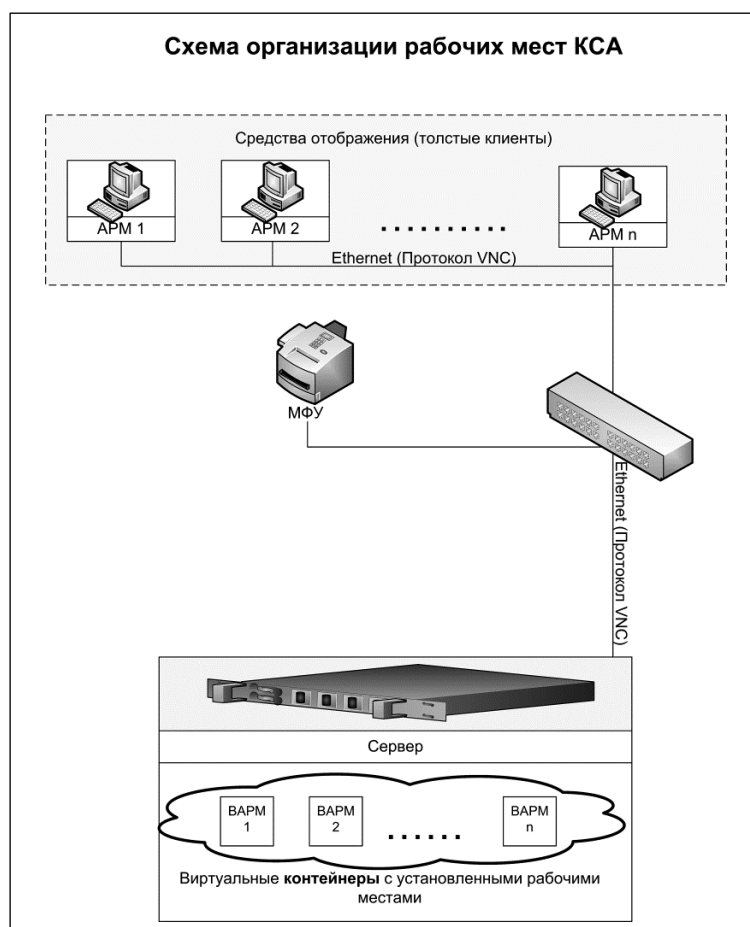


Рис. 2. Организация ввода/вывода печатной информации при контейнерной организации построения КСА (используется принцип «одно помещение – один принтер/сканер»)

Таким образом, видно, что на основе контейнерной виртуализации можно довольно просто создавать КСА БАСУ, если все АРМ-мы создаются на одной платформе, позволяющей применить контейнерную виртуализацию. При этом сохраняются все преимущества полной виртуализации и добавляются новые, как то: увеличение быстродействия, упрощение обслуживания, повышение безопасности и т.п.

Организация высокопроизводительного сервера автоматического управления процессами на LXC-контейнерах

В этой части рассматривается применение технологии LXC-контейнеров [4] для построения высокопроизводительного сервера автоматического управления процессами. Рассмотрим классический вариант построения многоканального сервера управления, основанного на параллельной обработке сигналов от различных источников с выработкой сигналов управления по схеме «один источник – один сетевой канал связи – один обработчик». Примерная схема организации такого сервера «традиционными» методами на хосте приведена на рис. 3.

Поскольку стандартный планировщик *Linux* не всегда может обеспечить необходимое выделение ресурсов при жёстких требованиях по времени обработки сигналов по различным каналам управления, возникает необходимость разработки специальной программы-планировщика, обеспечивающей выделение каждой программе-обработчику необходимых ресурсов, а именно:

- ядер процессора;
- оперативной памяти;
- сетевых портов;
- квантов времени;

- приоритетов выполнения, если необходимо;
- иных ресурсов.

При использовании LXC-контейнеров обеспечение выделения каждому контейнеру ресурсов производится штатными методами и описываются в конфигурационных файлах для каждого контейнера в отдельности. При этом использование специальной программы-планировщика не требуется, что, конечно же, упрощает построение сервера управления. Общая схема построения сервера с использованием LXC-контейнеров изображена на рис. 4.

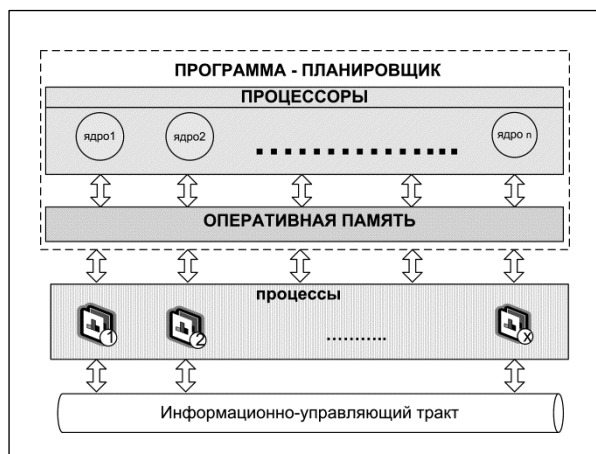


Рис. 3. Сервер обработки сигналов с жёсткими требованиями к времени обработки классической архитектуры

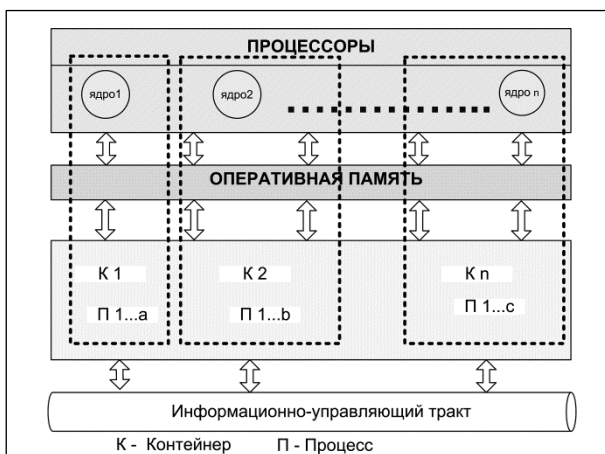


Рис. 4. Сервер обработки сигналов с жёсткими требованиями к времени обработки, построенный на основе LXC-контейнеров

Надо отметить, что фактически LXC-контейнеры, работая как самостоятельные виртуальные Linux-машины, обеспечивают лёгкую масштабируемость системы, возможность построения сервера с заданными функциями из уже готовых и преднастроенных модулей. Процедура создания единого комплекса из различных модулей предельно упрощается.

Резервное копирование сервера на LXC-контейнерах

Возможная схема миграции и резервного копирования LXC-контейнеров с сервера на сервер (резервный сервер) представлена на рис. 5.

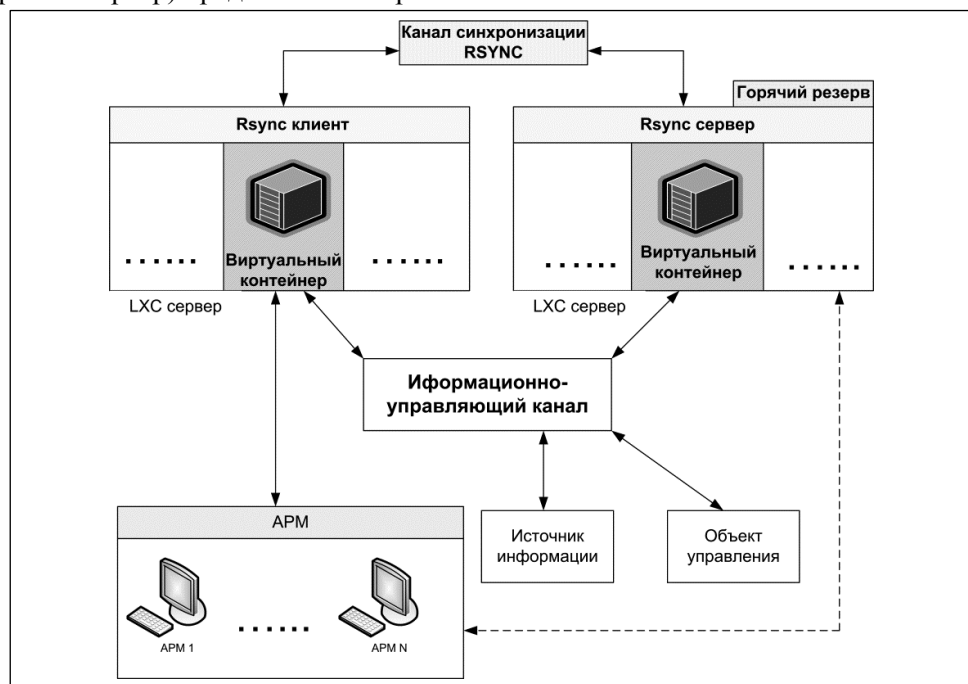


Рис. 5. Возможная схема организации резервного копирования (миграции) LXC-контейнеров

В основе её реализации лежит использование стандартной для ОС *Linux* команды «*rsync*». Эта команда производит синхронизацию файлов и каталогов между двумя серверами с минимизацией трафика, используя кодирование при необходимости. Фактически передаются только изменения в синхронизируемых областях. Утилита проверяет идентичность оригинала и зеркальной копии на основе сравнения контрольных сумм, вычисленных по специальному алгоритму.

Сеансы копирования LXC-контейнеров могут производиться по разовому запросу, либо периодически, например, с использованием планировщика задач «*cron*».

О возможности создания более эффективных методов горячего резервирования и построения отказоустойчивой архитектуры КСА с применением контейнерных технологий при реализации кластерной структуры КСА будет сказано в заключении настоящей статьи.

Оценка возможности построения КСА с жёсткими требованиями ко времени обработки сигналов с классической схемой построения и с применением LXC-контейнеров

Основные результаты работ по сравнительным оценкам работы КСА двух модификаций, а именно – классической схемы и с применением LXC-контейнеров, были получены на стенде, состоящем из двух ПЭВМ, представленном на рис. 6.

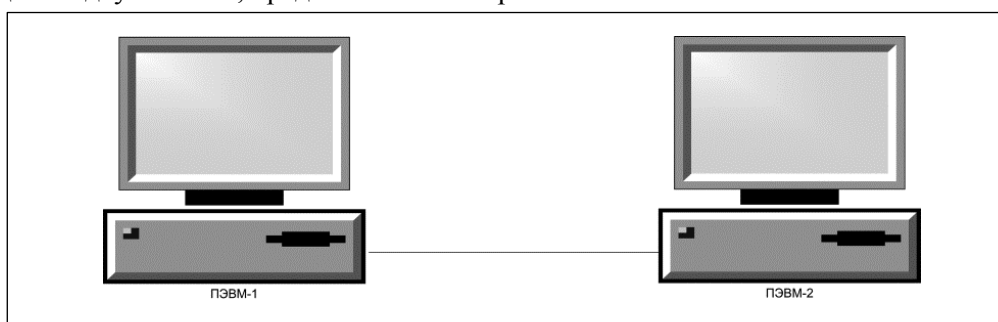


Рис. 6. Схема стенда по получению сравнительных характеристик работы КСА как по классической технологии, так и с использованием LXC-контейнеров

Характеристики ПЭВМ стенда приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики ПЭВМ стенда

ПЭВМ-1	ОС: «ALTWorkstation», выпуск 8.1 (<i>june</i>) 64-разрядный, ядро <i>Linux</i> 4.4.47-std-def-alt0.M80P.2 x86_64. МАТЕ 1.12.1. Память: 3.9 Гбайт. Процессор: Intel® Core™ i7 CPU 960 @ 3.2GHz x 8
ПЭВМ-2	ОС: «ALTWorkstation», выпуск 8.1 (<i>june</i>) 64-разрядный, ядро <i>Linux</i> 4.4.47-std-def-alt0.M80P.2 x86_64. МАТЕ 1.12.1. Память: 15.6 Гбайт. Процессор: Intel® Core™ i7 3770 CPU @ 3.4GHz x 8

Тестовая модельная задача для получения сравнительных характеристик двух методов построения КСА должна удовлетворять следующим простым требованиям:

- лёгкость реализации в обоих вариантах;
- простая возможность разделения на отдельные подзадачи для выполнения в параллельных потоках (имитация классической схемы построения сервера КСА) и на отдельных LXC-контейнерах;
- возможность изменения соотношения вычислительной составляющей, объёма информации, передаваемой отдельным потокам и/или контейнерам.

В качестве такой задачи выбрана задача интегрирования некой функции на определённом интервале с разбиением интервала на регулируемое количество отрезков (от 3000 и выше).

При этом расчёт производился тремя разными способами:

- простое интегрирование;
- разбиение полного интервала на n частей и интегрирование каждой части в отдельном потоке с дальнейшим сложением результатов;
- разбиение полного интервала на n частей и интегрирование каждой части в LXC-контейнере с дальнейшим сложением результатов.

Тестовая задача запускалась на ПЭВМ-1, все потоки, исполняющие тестовую задачу, также исполнялись на ПЭВМ-1. Всего для выполнения тестов было создано 14 LXC-контейнеров, распределение которых по ПЭВМ приведено в табл. 2.

Таблица 2

Распределение LXC-контейнеров по ПЭВМ стенда

Кол-во задействованных контейнеров	На каких ПЭВМ задействованы
от 1 до 7	все на ПЭВМ-1
от 8-до 14	7 на ПЭВМ-1, остальные на ПЭВМ-2

Каждый контейнер жёстко связывался с одним из ядер процессора, что в случае LXC-контейнера делается очень просто в конфигурационном файле для его запуска. При проведении теста для построения сети использовался гигабитный коммутатор сети. На графиках ниже приведены усреднённые результаты выполнения тестовой задачи в зависимости от разбиения её на n подзадач, каждая из которых выполнялась одним потоком, либо одним LXC-контейнером.

NMAX – условная величина, прямо пропорциональная количеству подинтервалов, на которые разбивается интервал интегрирования (кол-во подинтервалов $\sim 3000 \cdot \text{NMAX}$). Чем больше NMAX, тем, соответственно, большее время занимает расчёт конечного результата задачи. Для стандартизации процедуры обмена информации с контейнерами использовались сетевые сокет. Результаты сравнительных измерений представлены на рис. 7–13. По оси X на графиках отложено количество потоков или контейнеров, каждый из которых параллельно вычисляет часть задачи. По оси Y отложено время исполнения тестовой задачи в секундах. На всех нижеприведённых графиках приняты следующие маркеры: «○» – решение задачи целиком; «×» – решение задачи частями в потоках; «◇» – решение задачи частями в контейнерах.

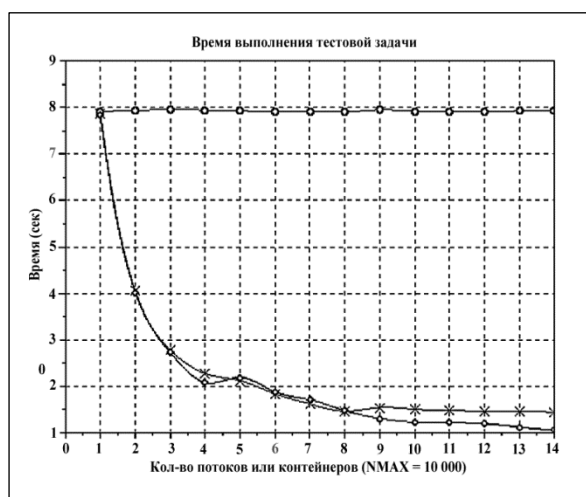


Рис. 7. Время выполнения задачи при NMAX = 10000 в зависимости от числа потоков или контейнеров при параллельном вычислении задачи по частям

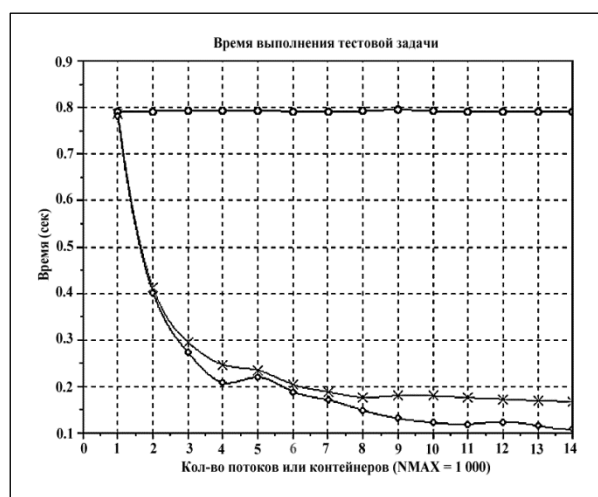


Рис. 8. Время выполнения задачи при NMAX = 1000 в зависимости от числа потоков или контейнеров при параллельном вычислении задачи по частям

Процессоры на используемых ПЭВМ-1 и ПЭВМ-2 имеют по 4 двухпоточных ядра (ядра с гипертррейдингом), то есть эффективно по 8 ядер. Поскольку многопоточную задачу можно запустить только на одном хосте (нельзя потоки экспортировать на другой компьютер), то, при числе потоков более 8, эффективность решения задачи параллельными потоками перестаёт расти, а при большем количестве потоков даже слегка падает. При вычислении же тестовой задачи контейнерами ситуация другая, поскольку контейнеры можно запускать на разных компьютерах. Из рис. 3 можно видеть, что с привлечением к вычислению задачи контейнеров второй ПЭВМ скорость решения тестовой задачи продолжает линейно увеличиваться.

Следует заметить, что передача данных контейнерам и получение ответа от контейнеров в данном случае производились по сети TCP/IP. Влияние скорости обмена данными с контейнерами, находящимися на других ПЭВМ, видно на рис. 4. Полное время выполнения задачи

увеличивается при включении контейнеров, начиная с восьмого (см. табл. 2) из-за увеличения времени обмена с ними.

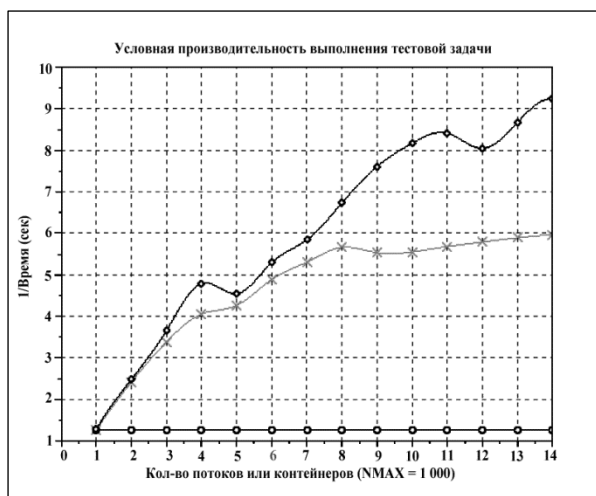


Рис. 9. Условная производительность выполнения тестовой задачи при $NMAX = 1000$ в зависимости от числа потоков или контейнеров (скорость выполнения теста в инверсных координатах по времени)

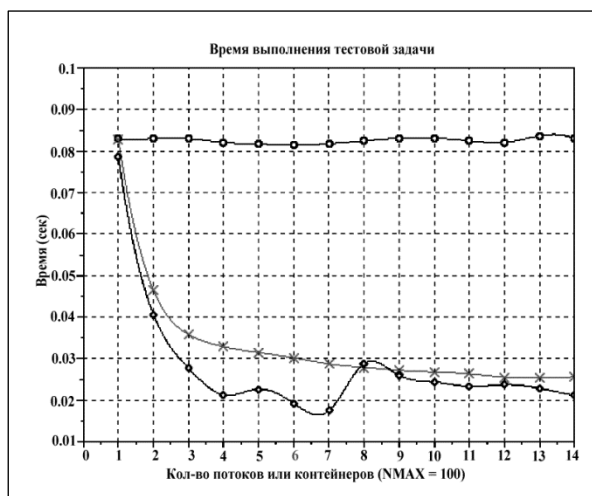


Рис. 10. Время выполнения задачи при $NMAX = 100$ в зависимости от числа потоков или контейнеров при параллельном вычислении задачи по частям

В случае малых времён, как на рис. 10, контейнеры второй ПЭВМ использовать нецелесообразно из-за существенных затрат на передачу информации по сети.

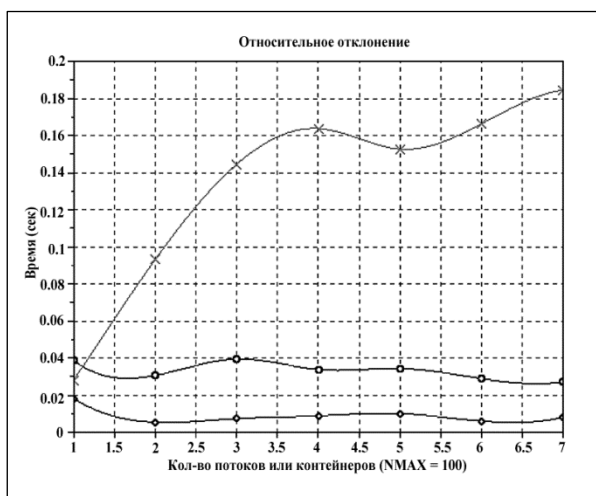


Рис. 11. Время выполнения задачи при $NMAX = 10$ в зависимости от числа потоков или контейнеров при параллельном вычислении задачи по частям

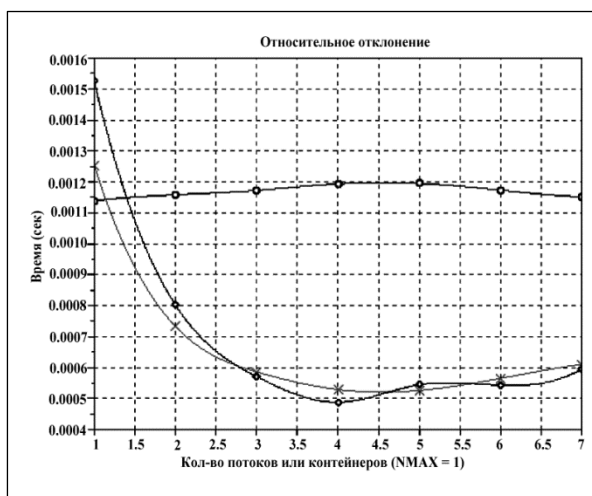


Рис. 12. Время выполнения задачи при $NMAX = 1$ в зависимости от числа потоков или контейнеров при параллельном вычислении задачи по частям

Очень интересным является вопрос по временной детерминированности выполнения задачи различными способами. На рис. 13 представлены зависимости относительного стандартного отклонения времени выполнения задачи от числа выполняющих её потоков или контейнеров при $NMAX = 100$.

Из рис. 13 видно, что наиболее детерминированным по времени выполнения тестовой задачи является метод её выполнения на LXC-контейнерах. Конечно, применив специальные и весьма не простые настройки планировщика для улучшения временной детерминированности

выполнения задач отдельными потоками, возможно снизить величину среднего относительного отклонения по времени выполнения задачи.

Важно отметить, что, если для задачи важно минимальное время обмена информацией между хост-машиной и контейнерами на хост-машине, а равно между различными контейнерами хоста, в полной мере может использовать преимущества обмена через общую межпроцессную память (*sharedmemory*) и межпроцессную синхронизацию через мьютексы.

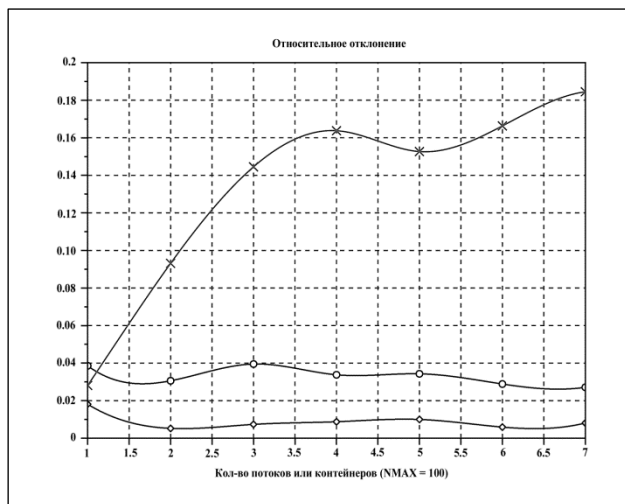


Рис. 13. Относительное отклонение среднего времени выполнения задачи при $NMAX = 100$ в зависимости от числа потоков или контейнеров при параллельном вычислении задачи по частям

Результаты сравнения и заключения по итогам тестирования

По результатам проведённых тестов можно заключить следующее. Время выполнения тестовой задачи параллельными вычислениями на одной ПЭВМ в контейнерах не выше, а в некоторых случаях даже ниже, чем время выполнения её параллельными потоками. При увеличении количества параллельных потоков свыше количества ядер хоста время выполнения комплексных задач перестаёт падать, тогда как при использовании контейнеров есть возможность передать часть подзадач на выполнение другому хосту с запущенными на нём контейнерами. При этом время счёта продолжает уменьшаться с увеличением количества контейнеров.

Выводы

Применение виртуальных LXC-контейнеров в автоматизированных системах, вплоть до систем, имеющих жёсткие требования по времени обработки сигналов, возможно. При этом использование контейнеров имеет ряд существенных преимуществ. При использовании контейнерных технологий:

- возрастает защищённость обрабатываемой информации, так как информация при её обработке и обмене между пользователями не передаётся по сети;
- облегчается специальный контроль за обрабатываемой пользователями информацией (по тем же причинам, что названы в предыдущем пункте);
- повышает защищённость АСУ от несанкционированного доступа к информации;
- упрощается создание резервных серверов;
- процесс переноса виртуальных контейнеров, как функциональных блоков центральных вычислительных комплексов, так и АРМ пользователей вместе со всей информацией с сервера на сервер (при замене «железа», либо с целью резервирования) не представляет никаких проблем, не требует перенастроек сети;
- даёт возможность разработки контейнеров разными коллективами разработчиков, что особенно важно при разработке БАСУ промышленными методами;
- создаётся возможность создания конкретных серверов из готовых преднастроенных контейнеров, что даёт возможность лёгкого масштабирования АСУ;
- обеспечивает лёгкий переход с одних вычислительных комплексов на другие, связанный, в частности, с их модернизацией, без необходимости внесения каких-либо изменений в контейнеры;

- упрощает организацию АСУ, имеющих жёсткие требования по времени обработки сигнала, и повышает эффективность их работы, так как при использовании LXC-контейнеров отпадает необходимость написания специальной программы-планировщика;

- существенно снижаются затраты на оборудование за счёт применения простейших ПЭВМ в качестве устройства отображения на рабочих местах;

- существенно снижаются трудозатраты на администрирование сети, поскольку вся информация обрабатывается на центральном сервере, обслуживание и администрирование клиентских станций минимально;

- снижаются затраты на приобретение лицензионного ПО;

- снижаются трудозатраты по администрированию АСУ.

Заключение

Применение LXC-контейнеров для построения АСУ с жёсткими требованиями по времени обработки сигналов вполне возможно и оправданно. По крайней мере, если характерные времена такой АСУ в пределах десятков микросекунд. При более жёстких требованиях к быстродействию начинает играть роль время пересылки данных по сети. Насколько это существенно и как можно ускорить этот процесс – предмет дальнейшего исследования.

При этом с некоторыми ограничениями сохраняются многие из преимуществ, которыми обладают большие автоматизированные системы управления (БАСУ), построенные с применением методов полной виртуализации (KVM – виртуализация), а именно:

1. Эффективное использование вычислительных ресурсов. С помощью контейнерной виртуализации можно достичь значительно более эффективного использования ресурсов, поскольку она обеспечивает объединение стандартных ресурсов инфраструктуры в единый пул и преодолевает ограничения устаревшей модели «одно приложение на сервер».

2. Снижение затрат на программное обеспечение. Поскольку программное обеспечение, установленное на хост-машине, наследуется зеркально всеми LXC-контейнерами, лицензию необходимо приобретать только на один экземпляр ПО, вне зависимости от числа контейнеров, его использующих.

3. Повышение гибкости и скорости реагирования системы: технологии виртуализации предлагают новые методы управления ИТ-инфраструктурами и помогают ИТ-администраторам затрачивать меньше времени на выполнение повторяющихся процедур. Поскольку LXC-контейнер фактически функционирует как самостоятельные виртуальные вычислительные машины, вместо установки, настройки ОПО, ОСПО и СПО на реальных вычислительных комплексах можно запустить набор готовых виртуальных контейнеров с уже установленным и настроенным ПО.

4. Несовместимые приложения могут работать на одном компьютере. Приложения, написанные различными коллективами разработчиков, использующие различные и возможно взаимоисключающие настройки среды, могут одновременно работать на одном хосте.

5. Возможности лёгкой архивации. Поскольку виртуальный LXC-контейнер представляет собой отдельную директорию, расположенную на каком-либо физическом носителе хост-машины, контейнерная виртуализация даёт возможность простого копирования этой директории на резервный носитель как средство архивирования и резервного копирования контейнера на резервный сервер, причём такое «зеркалирование» легко выполняется автоматически штатными средствами ОС *Linux*, что также даёт возможность полностью «поднять» сервер из архива.

6. Повышение управляемости инфраструктуры: использование централизованного управления виртуальной инфраструктурой позволяет сократить время на администрирование серверов, обеспечивает балансировку нагрузки и «живую» миграцию виртуальных машин.

7. Использование LXC-контейнеров в качестве одного из элементов построения БАСУ открывает возможность построения КСА БАСУ на кластерной основе, где контейнер является основной структурной единицей построения кластера. При этом достигается повышение доступности приложений и обеспечение непрерывности работы как отдельно взятого ПО, так и АСУ в целом. Благодаря надёжной системе резервного копирования и миграции виртуальных контейнеров целиком, без перерывов в обслуживании, возможно сократить периоды планового, либо аварийного простоя и обеспечить быстрое восстановление системы в критических ситуациях. «Падение» одного виртуального контейнера не ведёт к потере остальных виртуальных контейнеров.

Наиболее интересными для рассматриваемой нами области построения АСУ являются отказоустойчивые кластеры.

Однако кластерные технологии выходят за рамки статьи и возможности их реализации при построении БАСУ являются темой дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хэлсли Мэт.** LXC: контейнерные утилиты *Linux*, *developerWorks* Россия, 14.07.2009, URL: <http://www.ibm.com/developerworks/ru/index.html>.
2. Centos-admin.ru, Наш опыт тестирования LXC (*LinuxContainers*) на примере *DebianWheezy*, Хабрахабр. /habrahabr.ru/company/centosadmin/blog/202482. 19.11.2013.
3. **Безгодков Ю.В., Гуров Г.Б., Лепихин Ю.Б., Семин С.Ф.** Применение технологий виртуализации и создание универсальной основы построения автоматизированных систем управления // Журнал «Вестник воздушно-космической обороны». – М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2017, Выпуск №1(13). – С.107–117.
4. **Баранов А.В., Николаев Д.С.** Использование контейнерной виртуализации в организации высокопроизводительных вычислений. – Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН, 2015.

APPLICATION OF VIRTUALIZATION TECHNOLOGY AND BUILDING OF COMMON BASEMENT FOR AUTOMATED CONTROL SYSTEMS. LXC-CONTAINERS

Yu.V. Bezgodkov, G.B. Gurov, Yu.B. Lepikhin, S.F. Semin

The article states application possibility of container virtualization technology (operating system level virtualization) for building of military-purpose automated control systems. The possibility of this technology application was shown for building of AWS-system (automated working stations) of Grand automated control system (GACS) Integrated automation system (IAS). Such IAS building increases the system fault tolerance, simplifies its administration while maintaining all virtualization advantages, mentioned in [3].

The application possibility of container virtualization technology to build a hard real-time system was examined as well. The comparative studies of parallel computations respond speed based on containers and standard paralleling into threads. It's shown that efficiency of parallel computing through containers is not less effective than computing through parallel threads. It's noted that containers application for tasks paralleling in real time systems permits the following:

- To simplify resource management, provided for separate threads;
- To increase the system fault tolerance;
- To simplify the system development and support as a whole and its individual parts as well.

Container virtualization application for real-time systems provides almost all virtualization advantages including development industrialization, noted in the previous article [3], while maintaining high-performance capabilities of computational efficiency. Container virtualization application along with high-availability clusters can provide high degree of fault tolerance and recovering speed.

Поступила 22 марта 2017 года.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ, ПРОГРАММНЫХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЦЕЛЯХ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОПК НА БАЗЕ ПО MS EXCEL 2016

© Авторы, 2018

И.В. Карельский

начальник отдела, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва

E-mail: i.karelskiy@yandex.ru

В.М. Алдошин доктор технических наук, профессор,

зам. начальника научно-образовательного центра, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва

В статье представлены различные методы реализации принципов технологии Business Intelligence на базе технологической платформы MS Excel с использованием подсистемы «Power BI». Основной задачей, стоявшей перед авторами при написании представленной работы, была демонстрация возможности синтеза различных технологий анализа данных для получения универсального инструмента для обработки и анализа управленческой информации.

Ключевые слова: бизнес-анализ, хранилище данных, business Intelligence, BI, ETL, DWH, MS Excel.

The article states different methods of the Business Intelligence technology principles implementation on the base of MS Excel technological platform using the Power BI subsystem. The main objective of the work is to demonstrate the synthesis possibilities of different data analysis techniques in order to obtain a multipurpose tool for management information processing and analysis.

Keywords: business analysis, data storage, business Intelligence, BI, ETL, DWH, MS Excel.

Введение

В современных условиях жёсткой конкурентной среды, влияния таких внешних факторов, как экономические санкции, распространяющиеся в первую очередь на высокотехнологичные предприятия оборонно-промышленного комплекса (ОПК), нестабильность внутренней и внешней конъюнктуры рынка, а также в ответ на требования руководства страны по чёткому и своевременному выполнению поставленных перед ОПК задач, на первый план выходит вопрос эффективного управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятия.

При этом эффективность деятельности предприятия сводится к качеству принятия «управленческого решения», которое должно быть *своевременным, оперативным и результативным*. Для обеспечения всех трёх приведённых составляющих особо важным является наличие в распоряжении руководства системы поддержки принятия решений, позволяющей: оперативно собирать и обрабатывать информацию из разных источников (*своевременность*), преобразовывать её в режиме реального времени в оптимальных для восприятия и принятия решения руководством вид (*оперативность*), а также оценивать результаты принятого решения (*результативность*).

Данные требования невыполнимы без использования современных подходов к обработке и анализу информации. Компетенции в указанных областях дают существенные конкурентные преимущества организации, так как позволяют существенно повысить эффективность повседневной деятельности, сэкономить время, трудовые и финансовые ресурсы предприятия. Таким

образом, вопрос применения технических и программных средств для формирования системы поддержки принятия управленческих решений на предприятиях ОПК в настоящий момент является крайне актуальным.

На сегодняшний день рынок услуг в области реализации подобного рода автоматизированных систем весьма широк и в связи с высокой стоимостью как готовых решений, так и внедрений «под ключ» составляет, по данным компании *Gartner*, порядка 18.3 млрд долларов [1].

В то же время, хотя это мало кому известно, повсеместно используется инструмент, позволяющий строить системы класса *Self-BI* – это *Microsoft Excel*, который входит в пакет программ *Microsoft Office*.

Отметим, что *BI (Business Intelligence)* – это набор технологических, программных и аналитических методов преобразования неструктурированной информации для последующего эффективного применения в целях поддержки принятия управленческого решения. Под термином *Business* («Деятельность») подразумевается весь спектр деятельности предприятия, будь то научная деятельность, технология производства, коммерческая деятельность, юридическая деятельность, деятельность, направленная на обеспечение безопасности и т.д. Информационные взаимосвязи между указанными видами деятельности можно определить как *Intelligence system* («Интеллектуальная система сбора и анализа информации») – «возможность постижения взаимосвязей между имеющимися фактами для использования на пути достижения поставленных задач» [2].

Несмотря на потребность в эффективных методах анализа информации и доступности *MS Excel*, мало кто из пользователей владеет в достаточной мере технологиями, представленными в указанном программном продукте.

Более того, зачастую профильные специалисты предприятий не владеют даже базовыми навыками построения систем, позволяющих эффективно производить анализ информации и обеспечивать лицо, принимающее решение, необходимыми данными, не говоря уже о таких современных технологиях, как «*Microsoft BI*». Дадим краткую характеристику данной технологии.

В 2013 году компания *Microsoft* в составе ПО *MS Excel* представила набор технологий для анализа и обработки данных, который получил общее название «*Power BI*» (*Power Business Intelligence*), что можно перевести как «Эффективный бизнес-анализ». Термин «Бизнес» не должен вводить в заблуждение, т.к. технология адресована широкому кругу пользователей – начиная от управленческого состава и заканчивая разработчиками и учёными [2].

Программный комплекс, представленный *Microsoft*, начал разрабатываться ещё в 1994 году под кодовым названием «*Gemini*» («Созвездие») и впервые был представлен публике в 2011 году (*Power Pivot & Power Query*). Технология пришла из мощных серверных систем обработки данных *MS SSAS (Microsoft Server Analysis Services)* и *MS SSRS (Microsoft SQL Server Report Services)*, реализованных на базе системы управления базами данных (СУБД) «*MS SQL Server*». Аналитическая система *Tabular* (ядро обработки данных до недавнего времени носило название «*VertiPaq*», с недавних пор называется «*xVelocity*») используется во всех основных вариантах аналитических подсистем аналитической инфраструктуры *Microsoft*: персональные решения (*MS Excel* и *Power BI*), серверные решения в Интранет (*SSAS*, *SSRS*) и облачные технологии в сети Интернет (*Power BI Pro & BI Premium*) (см. рис. 1).

Основным преимуществом работы *Tabular* перед предыдущей реализацией системы *Multidimensional* является особенность работы ядра *xVelocity*, заключающаяся в сжатии данных «на лету» и последующей работы с ними непосредственно из «быстрой» виртуальной памяти. Кроме того, для обеспечения высокого уровня производительности при построении и выводе аналитических разрезов используется концепция хранения данных в виде не строк, а колонок, по сути – индексов, что позволяет реализовать мгновенное построение сводных отчётов по выборкам данных.

Очевидно, что данная преемственность «старших» и «младших» программных продуктов обеспечивает высокую гибкость разрабатываемых решений, т.к. при достижении ограничений в объёме или сложности модели обрабатываемых данных есть возможность относительно безболезненно перейти на решение более высокого уровня.

Декларируемая цель реализации технологии «*Power BI*» состоит в предоставлении аналитику персонального инструмента, не уступающего по возможностям профессиональным программным средствам администраторов-аналитиков мощных баз данных.

По мнению авторов, компания с успехом справилась с данной целью, но «в массы» продукт движется не так быстро, как того заслуживает. Это связано с тем, что профессиональный уровень пользователей указанных технологий требуется гораздо выше среднего. Для эффективного использования необходимо понимание как классических технологий работы с MS Excel, таких как язык формул, работа со сводными таблицами, так и основ работы с реляционными базами данных, а также теоретических и практических навыков программирования.

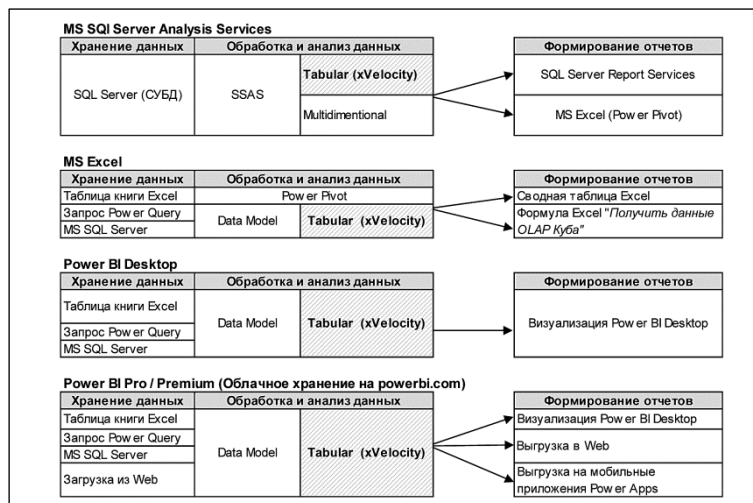


Рис. 1. Применение Power BI инфраструктуры в ПО Microsoft

Возможно, именно поэтому реализованная на высоком уровне технология, бесшовно объединённая с классическим Excel и предоставляющая в сочетании с уже апробированным инструментарием Excel мощные возможности по обработке и анализу данных, пока редко используется на предприятиях российского ОПК. Этому способствуют инерция пользователей соответствующего программного обеспечения, а также отсутствие источников информации о данной технологии. В качестве примера можно привести тот факт, что к настоящему времени в продаже практически отсутствует русскоязычная обучающая литература по рассматриваемой теме.

Получив в свой состав вышеописанные технологии, программный продукт MS Excel теперь способен обрабатывать гораздо больший объём данных (миллиарды строк), а с использованием «классических» функций – способен справиться с построением сложных моделей обработки и анализа информации, что крайне актуально в интересах создания систем поддержки принятия управленческих решений на предприятиях ОПК.

Продemonстрируем это утверждение обзором технологий MS Excel начиная с классических методов обработки данных.

Ключевые технологические решения

Самое распространённое и доступное программное обеспечение (ПО) для работы с числовыми данными на текущий момент – это разработанное компанией Microsoft приложение MS Excel в составе пакета офисных программ MS Office.

Если изначально (1993) эта программа была просто заменой калькулятору (хотя и очень продвинутому), на текущий момент это цифровой комбайн, которому под силу дать грамотному пользователю такие возможности, которыми он может заменить коллектив статистического отдела (а то и целого управления) образца 80-х/90-х годов прошлого века.

Количество возможностей и различных технологий на строку программного кода, положенного в основу Excel, на голову превосходит все возможности остальных компонентов комплекта Microsoft Office вместе взятых, таких как Word, Power Point, Project, Visio, OneNote, перечисленные приложения представляют довольно узкоспециализированные программы, направленные на написание текстов, подготовку презентаций или рисование схем.

Лишь кратко перечислим возможности Excel-2016: построение формул любого уровня сложности, вплоть до высшей математики, с элементами визуального программирования (в том числе такие логические конструкции, как «if/else/then», проверка ошибок и т.д., построение формул массивов, обеспечивающих выполнение операций над векторами и матрицами,

построение сводных таблиц с реализацией технологии анализа OLAP-кубов, построение графиков и визуализаций, встроенный язык программирования высокого уровня *Visual Basic for Application* с возможностью объектно-ориентированного программирования (реализованы концепции классов, объектов, наследования).

С 2013 года в *Excel* интегрирован пакет *Power BI* – технология обработки хранения и анализа данных из произвольных источников, которая, совместно с предыдущими технологиями, позволяет, не прибегая к специализированным СУБД, строить полноценные приложения анализа данных [3]. Ниже будет дана краткая характеристика упомянутых технологий по отдельности и представлено видение их комплексного использования в целях формирования системы поддержки принятия управленческих решений на предприятиях ОПК.

Язык программирования формул MS Excel

Основным функционалом, используемым большинством пользователей *MS Excel*, является визуальное отображение чисел в виде таблицы и построение простых и сложных взаимосвязей между ячейками этой таблицы – «формул».

Язык формул *Excel* представляет собой своеобразный визуальный язык программирования, в котором инструкции (операторы) объединены с обрабатываемыми данными в объекте, представляющем собой виртуальную матрицу (таблицу). Таблица может содержать как значения для обработки, так и формулы (команды). Концепция несёт в себе как сильные, так и слабые стороны.

Сильные стороны языка формул MS Excel:

а) лёгкость использования – простые математические формулы могут использоваться пользователем с минимальным опытом владения программой. Это элементарные функции сложения, умножения, деления и вычитания. В сочетании с лёгкостью построения простейших таблиц, любой пользователь может посчитать и распечатать систематизированную информацию, будь то расписание, прайс-лист, смета, лист с меню или же сложный статистический расчёт специалиста или студента вуза;

б) наглядность – таблица с расчётами находится перед глазами пользователя. В любой расчёт можно «провалиться» (от англ. «*Drill down*») и посмотреть, каким образом был выполнен расчёт интересующего значения в таблице (или убедиться, что данное число занесено вручную и является исходными данными для расчёта);

в) большое разнообразие видов операторов «на все случаи жизни» – это операторы условий, работы с текстом (поиск, замена и пр.), математические формулы, формулы поиска значений (поиск по другим таблицам), формулы для статистического анализа и многое другое;

г) возможность построения сложных формул («мегаформул») – уровень вложенности одних формул в другие в версии *Excel-2016* достиг 64, что позволяет строить формулы, заменяющие собой целые подпрограммы с достаточно сложной логикой ветвления. Есть, правда, ограничение на длину формулы в 255 символов, но оно обходится разбиением расчёта на несколько ячеек.

Слабые стороны языка формул MS Excel:

а) сложность восприятия сложных формул (особенно написанных в «плохом стиле») – в случае с простейшими формулами восприятие книги *Excel* выигрывает у обычного языка программирования за счёт возможности «потрогать» данные, т.к. инструкции и данные объединены в одном визуальном объекте. В случае же сложных «мегаформул» это работает против пользователя. Если в любом классическом языке программирования алгоритм можно реализовать с написанием комментариев к каждой строке кода, кроме того, сама концепция написания программы подразумевает некую структуру, которая легче воспринимается при анализе, в языке формул вся программа должна быть уместена в одно «предложение». Комментарии в строке формул не предусмотрены, хотя можно ухитриться и разместить их в самой ячейке, но это не сравнится с удобством среды разработки;

б) отладка формул – в случае разработки программы в среде разработки к услугам программиста целый набор инструментов: это точки останова, возможность просмотра содержимого переменных, удобная контекстная справка, окно моментального исполнения кода (*immediate window*) и прочие удобства. В случае языка формул, пользователь ограничен возможностью пошагового исполнения формул в маленьком окошке и вычисления промежуточного значения отлаживаемой формулы (по кнопке F9). В принципе, этого хватает для продвинутого пользователя, но в первое время вызывает затруднение;

в) проблема «съехавших строк» – данный «народный» термин довольно часто можно услышать даже от продвинутых пользователей. Проблема следует из одного из преимуществ *Excel* – возможности указания относительных и абсолютных ссылок на ячейки таблицы. В случае указания в определённой таблице ссылки на другую таблицу (особенно в другом файле) в момент добавления новых данных ссылка может по ряду причин начать ссылаться на «неправильные» данные, т.е. координаты исходных данных будут некорректными. Особенностью ошибки является сложность обнаружения и, как правило, неточность обнаруживается в самый неподходящий момент (например, во время презентации отчёта руководству) и вот в этот момент возникает пресловутое «строка съехала». В случае работы с классическими СУБД данная ситуация исключена.

В любом случае, технология «Язык формул *Excel*» лежит в основе программы и любой пользователь на время использования *Excel* превращается в программиста (даже не задумываясь об этом). В этом и есть основное преимущество данной технологии. Кроме того, гибкость языка формул позволяет реализовывать модели данных большой сложности, главное не забывать о «слабых сторонах» данной технологии и следить за корректностью ссылок, либо использовать «защищённые» (от англ. «Robusted») формулы, динамически подключающиеся к таблицам – источникам данных, в том числе и используя язык формул массива.

Язык программирования формул массива (*Array formulas*)

В отличие от рассмотренной в предыдущем разделе технологии ввода «обычных» формул, возможность ввода формул массива (от англ. «*Array formulas*») вряд ли знакома большинству пользователей *MS Excel*. Для ввода формулы массива используется тот же инструментарий, что и для ввода обычных формул, но окончательный ввод должен сопровождаться «секретной» комбинацией клавиш «*Ctrl-Shift-Enter*», при нажатии на которую введённая формула заключается в фигурные скобки { }.

Данный вариант ввода формул в *Excel* позволяет использовать в формуле ссылки на блоки ячеек, а также получать результат работы формулы в виде массива значений. Данный инструмент *MS Excel* открывает большие возможности по реализации итерационных вычислений, но в связи с ограниченностью визуальных средств разработки и отладки таких формул, разработка и отладка алгоритмов с использованием формул массивов превращается в искусство. Необходимо так же отметить, что в мире существует всего одна не переведённая пока на русский язык книга Майкла Гирвина «*Mastering Excel Array Formulas*» («Освоение формул массива в *Excel*») [4], посвящённая данной технологии. Перечислим сильные и слабые стороны указанной технологии.

Сильные стороны языка формул массива:

а) использование конструкций стандартного языка формул *Excel* – для начала программирования на языке формул массива достаточно освоить базовые конструкции стандартного языка формул. По мере понимания особенностей построения таких формул, сложность написанных формул будет увеличиваться, в итоге сложность реализации будет не в формуле, а в написании самого алгоритма решения задачи;

б) гибкость – язык формул массива позволяет реализовывать в одной строке достаточно сложные программные задачи, например, формирование списка уникальных значений, различные варианты реализации поиска, сортировки или распределения по группам значений;

в) мгновенность расчёта – в отличие от технологий сводных таблиц и *Power BI* формулы массива рассчитываются сразу, как и обычные формулы, что исключает вероятность передачи «не пересчитанной» таблицы потребителю, а также позволяет быть уверенным в актуальности данных на листе.

Слабые стороны языка формул массива:

а) как было указано выше, написание таких формул является нетривиальной задачей, так как обрабатываются не отдельные ячейки, а сразу группы ячеек. В связи с отсутствием удобных средств отладки формул, а также необходимости свести весь алгоритм в одно «предложение», данный механизм по уровню наглядности и удобства существенно проигрывает технологиям *Power BI*. К сожалению, на данный момент *Excel* не позволяет сохранять массив полученных данных в одной ячейке для последующего обращения из других ячеек/формул, что в случае реализации позволило бы проводить декомпозицию алгоритма, возможно, это будет реализовано в будущем;

б) обратной стороной возможности выполнения параллельных вычислений над массивами данных является увеличение требований к оптимизации формул в части быстродействия. Некорректно написанная формула может оказаться невыполнимой и привести к сбою в работе приложения и к потере данных. При написании формул массива желательно использовать мониторинг потребления ресурсов центрального процессора и оперативной памяти ПК. Существуют специальные утилиты для оценки скорости работы формул, например, утилита *FastExcel* ([сайт] URL: <http://www.DecisionModels.com>).

Несмотря на перечисленные недостатки данной технологии, рассмотренное технологическое решение при соответствующем уровне подготовки пользователя является весьма эффективным.

Язык программирования макросов VBA

Язык программирования VBA (*Visual Basic for Applications*) – подвид языка программирования *Visual Basic*, встроенный в линейку продуктов MS Office [5].

Идея реализации данного технологического решения была получена по наследству от поглощённой компанией *Microsoft* программного продукта-конкурента «*Lotus 1-2-3*».

Первая редакция VBA была выпущена на рынок в 1995 году в составе программы *Excel_5*. Основной устоявшийся функционал был реализован в *Office 97* и с тех пор претерпел лишь незначительные изменения.

Ключевой идеей данной технологии стала возможность с помощью языка программирования высокого уровня автоматизировать рутинные действия, совершаемые пользователем в MS Excel. Для этого, в частности, был реализован автоматический метод «записи» операций, выполняемых пользователем и перевод их в формат языка VBA.

VBA обладает всеми атрибутами современного объектно-ориентированного языка программирования, такими как возможность создания классов, объектов, методов, наследования.

Интерфейс разработки кода включает в себя различные инструменты отладки, такие как контрольные значения (от англ. «*Watch*»), точки останова (от англ. «*Break point*»), проверка вычислений (от англ. «*Intermediate*»), суфлёр кода, контекстная помощь и прочее (см. рис. 2).

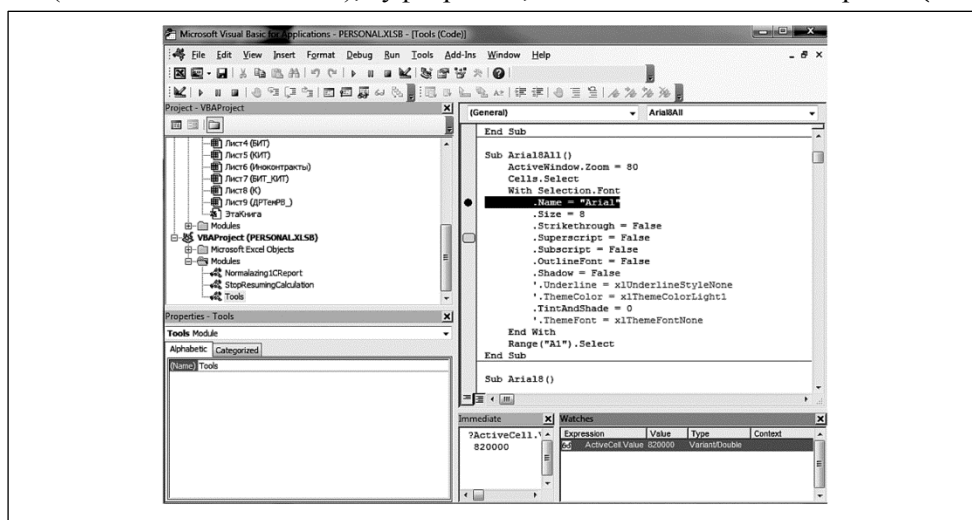


Рис. 2. Экранный снимок редактора VBA

В VBA имеется возможность создавать свои формы ввода данных, подключаться к внешним источникам данных, реализовывать полноценные циклы/ветвления, проводить декомпозицию алгоритмов с помощью подпрограмм/функций, применять классы и объекты.

Одним из вариантов использования VBA является написание пользовательских функций, которые можно использовать совместно с встроенным набором стандартных формул листа *Excel*. Кроме того, в арсенал средств VBA включена объектная модель *Excel*, которая позволяет оперировать непосредственно такими объектами, как книги/листы/ячейки/именованные диапазоны и прочее.

Рассмотрим слабые стороны технологии VBA: данный функционал практически в неизменном виде существует с 1997 года. За эти годы современные средства разработки шагнули

далеко вперёд, как с точки зрения интерфейса, так и функционального наполнения. При разработке программ на VBA не хватает таких возможностей, как контроль за версиями разработанных модулей, более информативных сообщений об ошибках, общедоступных библиотек реализованных функций и других удобств, предоставляемых современными средствами разработки.

Построение сводных таблиц «Pivot Tables»

Одной из наиболее эффективных технологий анализа данных, реализованных в середине 1990 годов в MS Excel и получившей дальнейшее развитие в виде реализации механизмов ETL под названием «Power BI», явилась технология создания «Сводных таблиц» (от англ. «Pivot Tables») [6]. За основу реализации данной технологии была взята концепция OLAP («Онлайн аналитическая обработка данных» – от англ. *Online analytical processing*) представляющая собой метод многомерного анализа реляционных электронных таблиц [7].

Идея проста – в случае наличия нормализованного набора данных с определённым набором полей данные поля выступают в качестве граней виртуального «кубика Рубика», вращении которых на месте пересечения определённых элементов граней (выбранных аналитик – «фильтров» или «измерений») формируются суммарные значения (см. рис. 3).

Реализация данной концепции дала мощные возможности по анализу таблиц, позволяющие строить отчёты разного уровня вложенности, а также осуществлять фильтрацию данных «на лету», не прибегая к помощи программистов.

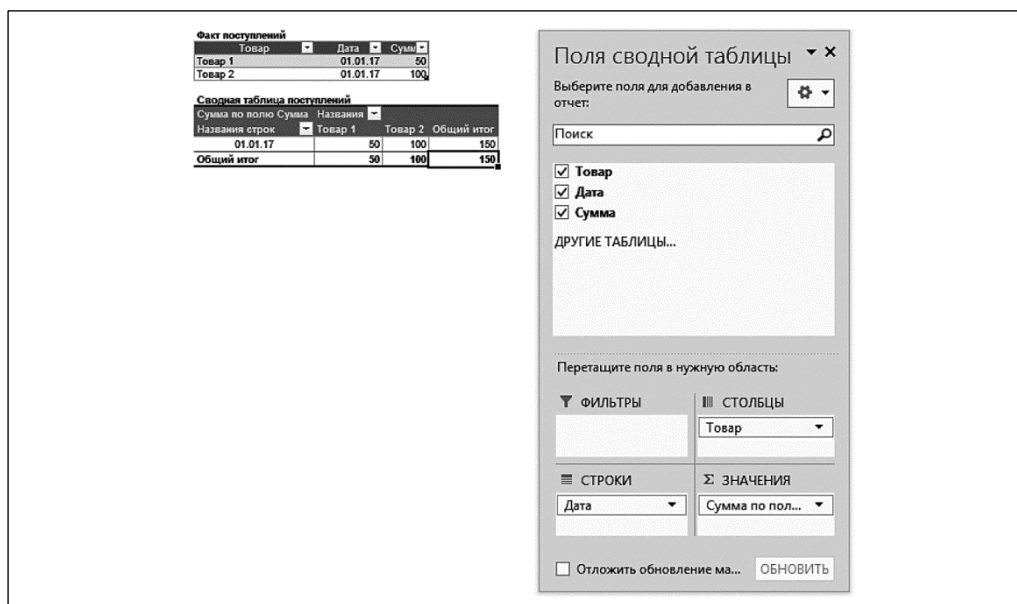


Рис. 3. Экранная форма инструмента «Сводная таблица»

В качестве примера можно привести задачу построения списка уникальных значений одной из аналитик набора данных, что до реализации технологии «Сводных таблиц» было нетривиальной задачей.

В качестве недостатков реализации технологии создания «Сводных таблиц» можно отметить следующие моменты:

- для обновления данных (в отличие от формул массива) необходимо принудительно обновлять полученные результаты;
- необходимо иметь базовые знания о концепции нормализации исходных данных для расчёта (основы реляционных баз данных) [8];
- отсутствует возможность строить отчёт по нескольким связанным таблицам, таким образом, приходится «расширять» таблицы, что нарушает принципы нормализации таблиц, что в свою очередь влечёт увеличение потребления ресурсов и приводит к потере наглядности модели. Данные недостатки были устранены в реализации технологии Power BI, которая рассматривается ниже.

В целом можно заключить, что для своего времени данная технология являлась прорывной за счёт предоставления пользователю универсального механизма для построения отчётов без

необходимости прибегать к помощи программистов. Для формирования отчётов был необходим только подготовленный соответствующим образом набор данных.

Введение в концепцию ETL. Реализация принципов ETL в MS Excel

В начале 2010-х годов в MS Excel сначала в виде подключаемой настройки, а затем и непосредственно в самой программе был реализован функционал, реализующий преимущества концепции ETL [7], который получил название Power BI [9].

Концепция ETL представляет собой комплекс методов, реализующих процесс переноса исходных данных из различных источников в аналитическое приложение или поддерживающее его хранилище данных.

Необходимость возникновения концепции ETL родилась из сложившейся практики, когда выборка исходных данных из разнородных источников затруднена несоответствием форматов хранения, а также наличием в источнике «мусорных данных». Кроме того, информация обычно должна обновляться с различной периодичностью, что предполагает многократную повторную обработку исходных данных.

Для решения указанных проблем используется концепция ETL: «Извлечение» (E), «Преобразование» (T), «Загрузка» (L).

Модуль ETL в MS «Power BI» содержит две взаимосвязанные подсистемы: «Power Query», в которой реализованы извлечение и обработка исходных данных и «Power Pivot», который содержит «Хранилище данных» (от англ. «Data model») и аналитический инструментарий DAX («Выражения для анализа данных» – от англ. «Data Analysis Expressions»).

Рассмотрим основные возможности указанных технологий.

Получение и обработка исходных данных с помощью инструмента «Power Query» и языка запросов «М»

Инструмент «Power Query» из состава «Power BI» отвечает за реализацию двух из трёх компонентов концепции ETL – «Extract» («Извлечение») и «Transformation» («Трансформация»). Основой решения является новый язык программирования «М», ориентированный на загрузку и обработку данных из различных источников. Среда разработки языка программирования содержит визуальный интерфейс с основным набором команд по загрузке и преобразованию данных и возможность ввода программы вручную. При использовании инструментов записывается последовательность шагов трансформации данных, а в фоновом режиме формируется текст программы-запроса, доступный для последующего использования или доработки. Сформированная таким образом программа обработки данных в последствии может использоваться по мере необходимости или в автоматическом режиме для поддержания аналитической модели в актуальном состоянии (см. рис. 4). Язык «М» обладает широкими функциональными возможностями и позволяет создать переменные, организовывать ветвления, циклы, осуществлять декомпозицию алгоритма за счёт реализации функций. Кроме того, имеет уже реализованные объекты для работы с данными, такими как «таблицы», «записи», «метаданные» и различные функции для работы с ними: такие как функции обработки строк, числовых данных, временных данных, нормализация, слияние/разбиение данных и прочее.

Перечислим основные функции визуального интерфейса среды разработки «Power Query»:

а) подключение и загрузка информации из различных источников: базы данных, файлы Excel, файлы Access, текстовые файлы, внешние источники в сети Интернет и т.д. В качестве пути к файлу может быть выбрана файловая папка, таким образом, для того, чтобы обновить данные модели, достаточно просто скопировать в неё файл с новыми данными;

б) преобразование типов данных – как в стандартные типы (текст, десятичное число, целое число), так и интеллектуальное преобразование, например, из текстовой даты в стандартный серийный формат даты;

в) фильтрация, сортировка исходных данных;

г) работа с ошибками преобразования данных;

д) возможность сворачивания/отмены сворачивания данных – распространённый вариант предоставления данных для последующей обработки – перекрёстные таблицы («шахматки») (от англ. «Cross tabulated tables»). Данный вид представления информации не является нормализованным, что ограничивает возможности применения сводных таблиц и влечёт невозможность реализации реляционной модели данных с последующей обработкой в «Power Pivot» таблицах. В данном случае «Power Query» помогает нормализовать («Unpivot») таблицу с данными.

е) возможность каскадирования запросов. Например, когда из одного источника данных необходимо получить несколько разных таблиц, имеется возможность до определённого момента работать с одним запросом после чего результат расчёта передать далее для обработки, что экономит машинные ресурсы ПК.

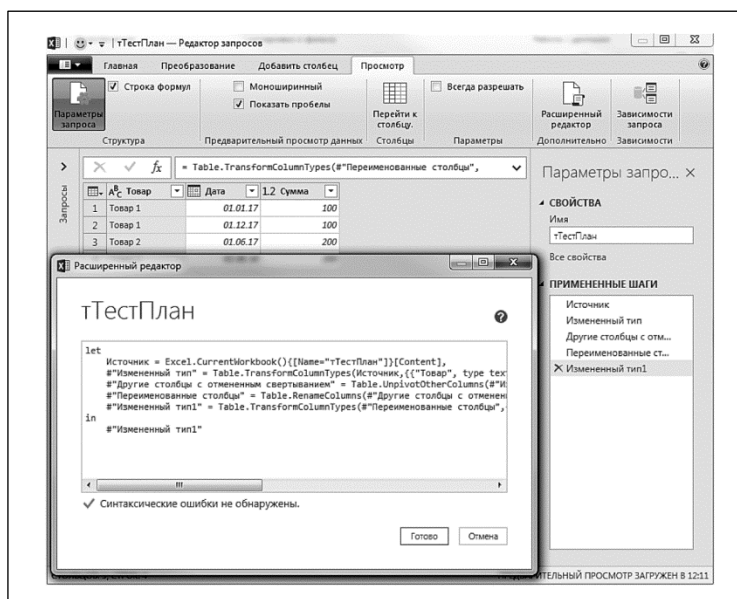


Рис. 4. Экранная форма редактора запросов Power Query

Перечисленные возможности инструмента *Power Query* наглядно демонстрируют удобство работы с различными источниками данных, но эти функции сходны с вариантами реализации ETL программными средствами-аналогами от *Oracle*, *IBM*, *Linq* и др. А вот реализация третьего, аналитического компонента концепции ETL – *Load* («Загрузка») заслуживает отдельного внимания, т.к. он расширен новым средством анализа информации – языком DAX («Выражения для анализа данных» – от англ. «*Data Analysis Expressions*»).

Хранение и обработка информации с помощью модели данных «Power Pivot» и языка анализа данных «DAX»

Третьим, ключевым этапом концепции ETL является L – «*Load*» – загрузка предварительно подготовленной информации в «Хранилище данных» (от англ. «*Data Warehouse*») для последующего анализа. Концепция хранилища данных подразумевает определённое пространство машинной памяти (физической, виртуальной, облачной), в которой сохраняются преобразованные для последующего анализа исходные данные.

Реализацией данного этапа ETL от *Microsoft* является инструмент «*Power Pivot*» подсистемы «*Power BI*». В данном инструменте объединены механизм загрузки подготовленной с помощью «*Power Query*» информации в хранилище данных «*Data Model*» и мощный инструмент анализа данных – язык анализа данных «DAX» [3].

Язык «DAX» будет рассмотрен в следующем разделе, а здесь дадим характеристику базовым функциям хранения и предварительной обработки исходных данных в «*Power Pivot*»:

- загрузка данных из произвольных источников данных: базы данных, файлы *Excel*, текстовые файлы, таблицы *Excel* – «связанные таблицы»;
- загрузка предварительно подготовленных данных из «*Power Query*»;
- построение связей между таблицами по аналогии с современными СУБД (*MS SQL*, *MS Access*, *MySQL* и др.) (см. рис. 5);
- возможность произвольного преобразования типов данных;
- возможность сохранять модели в облаке «*PowerBI.com*», откуда имеется возможность загружать аналитические отчёты в *Web* и на различные типы устройств.

Результатом работы *Power Pivot* является сводная таблица, визуально не отличающаяся от сводных таблиц, рассмотренных в разделе «Построение свободных таблиц «*Pivot Tables*», но имеющая гораздо более широкие возможности. Благодаря каскадированию таблиц-источников

имеется возможность строить отчёты произвольной сложности, в т.ч. реализуя ставший классическим подход, в котором данные разделены на таблицы фактов и таблицы измерений. Кроме того, в *Power Pivot* используются виртуальные расчётные поля, использующие преимущества языка анализа данных DAX (см. рис. 6). Отрицательной стороной рассматриваемой технологии является факт возникновения периодических сбоев при разработке аналитических моделей. Кроме того, сказывается отсутствие литературы и руководств на русском языке. Будем надеяться, что эти проблемы будут устранены компанией-разработчиком в ближайшем будущем.

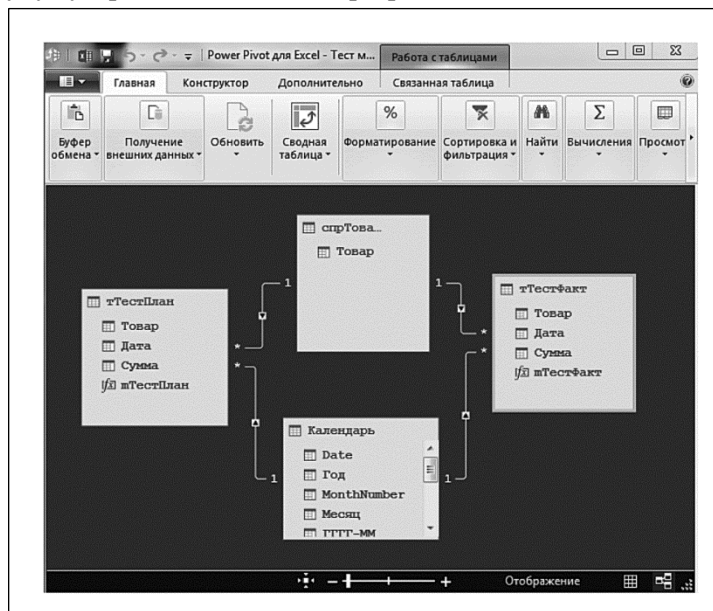


Рис. 5. Каскадирование таблиц-источников в Data Model по схеме «многие к одному»

Язык анализа данных «DAX»

Ключевой особенностью реализации технологии ETL в составе *Power BI* является внедрение в *Power Pivot* мощного инструмента анализа данных под названием «DAX» («Выражения для анализа данных» – от англ. «Data analysis Expressions»), являющегося, по сути, реализацией программного языка работы для работы с информацией в хранилище данных [10].

Товар	Год	Месяц	2017	2018
Товар 1	Декабрь	Июль	100	100
Товар 2	Декабрь	Июль	200	200
Общий итог	Декабрь	Июль	100	200

Рис. 6. Пример построения сводной таблицы *Power Pivot* с использованием каскада «таблиц фактов» и «таблиц измерений»

Ключевым понятием языка «DAX» является понятие «Меры» (от англ. «Measure»). Мера при первом приближении напоминает формулу *Excel*, но на самом деле является подпрограммой с возможностью передачи в неё исходных данных – «контекста» для фильтрации и расчёта, получаемого из настроек экранной формы сводной таблицы или генерируемого разработчиком модели непосредственно в подпрограмме (см. рис. 7).

Синтаксис языка «DAX» выглядит непривычно для пользователя классических формул, так как оперирует абстракциями более высокого уровня нежели таблицы *Excel*. Понятийный аппарат обработки данных в таблицах расширяется такими понятиями, как «контекст фильтра», «контекст строки», «итеративная обработка», «транзакция фильтра строк в фильтр контекста» и проч.

Однако по мере изучения объектной и синтаксической конструкций языка «DAX» приходит понимание гибкости и богатых возможностей, предложенных разработчиками. В качестве примера можно привести возможность временного анализа: «сравнить результаты расчёта с другим произвольным периодом (год, квартал, промежуток с начала года) или выбрать данные с начала года и сравнить с таким же периодом прошлого года. Также благодаря «DAX» можно программным образом модифицировать настройки, выбранные пользователем, а также выбирать информацию из связанных таблиц для реализации гибких алгоритмов. Конкурентным преимуществом «DAX» является возможность строить произвольные запросы данных из каскада таблиц «*Data Model*» наподобие конструкций языка SQL, таких как SELECT, GROUP BY и прочие.

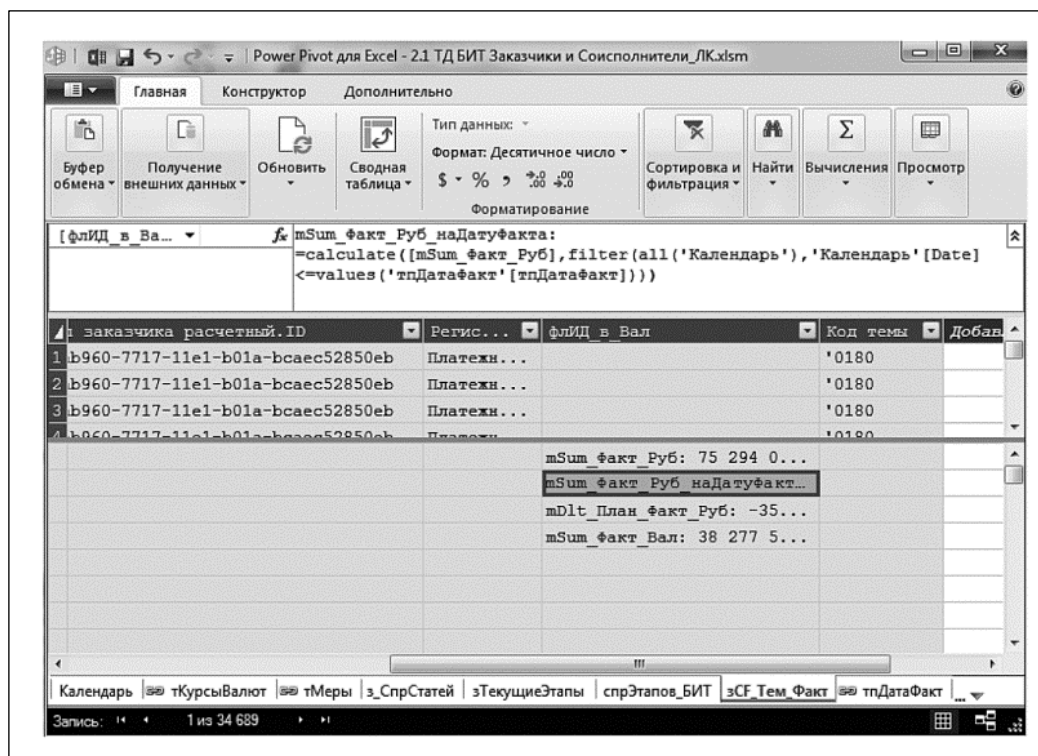


Рис. 7. Диалоговое окно ввода формулы-меры DAX в Power Pivot MS Excel

С реализацией «Power BI» создание аналитических моделей стало гораздо эффективней, например, если пользователю потребовалась дополнительная аналитика в формируемом отчёте, достаточно просто добавить в хранилище данных дополнительный классификатор с таблицей соответствия и указать необходимые связи между таблицами. После этого появляется возможность модификации существующих отчётов, как с помощью визуальных средств разработки, так и с помощью модификации существующего набора запросов DAX. Результат данной работы можно вывести в *on-line* режиме в существующую сводную таблицу или «вытянуть» из хранилища данных с помощью формул «OLAP-кубов».

При использовании классических подходов к построению моделей в MS Excel, когда любое изменение исходных таблиц требует пересмотра работы каскада формул, указанные возможности были встречены сообществом аналитиков с большим воодушевлением, например, популярный мировой журнал о компьютерных технологиях PC Magazine (майский выпуск за

2017 год) присвоил MS Power BI статус «*Editor's choice*». Консалтинговая компания *Gartner* не первый год в своём «Магическом квадрате решений BI» выдвигает технологии BI от *Microsoft* на первое место с большим отрывом от конкурентов (см. рис. 8) [11]. Кроме реализации в составе *Excel*, технология «Power BI» представлена отдельным приложением «*Power BI Desktop*», ориентированном на визуализацию данных, а также технологией создания пользовательских мобильных приложений *Power Apps*. Также развёрнуто облако для работы с данными онлайн, мощность которого позволяет обслужить неограниченное количество пользователей аналитической модели (при условии достаточности финансовых ресурсов у Заказчика).

Подводя итог, можно сказать, что технология *Power BI* в общем, и DAX в частности, стали настоящей революцией в области обработки и представления данных. К сожалению, в связи с инерцией пользователей и отсутствием информации на русском языке, крайне низкий процент отечественных пользователей MS *Excel* знакомы с описанными технологиями.

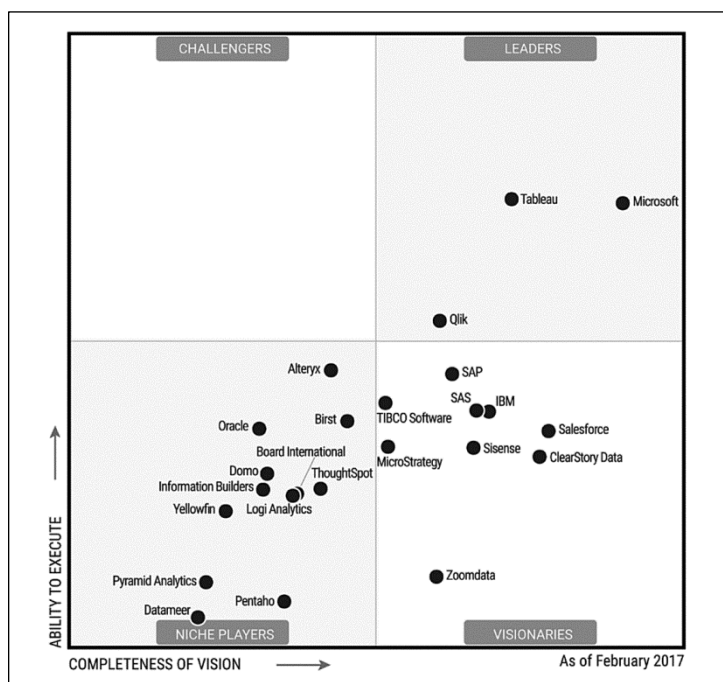


Рис. 8. «Магический квадрат» Gartner в области технологий BI за 2017 год

В то же время применение данных технологий несёт существенные технологические и экономические преимущества. Рассмотрим их в следующем разделе.

Оценка производственной и экономической эффективности применения технологий обработки и анализа данных в MS Excel. Возможные риски

Представленный выше краткий обзор демонстрирует высокую производственную эффективность арсенала методов анализа в MS *Excel*. В отличие от жёстко заданных моделей, реализованных в «готовых» системах, аналитику предлагаются расширенные возможности моделирования без привлечения программистов, консультантов, покупки дорогостоящих средств разработки, мощных серверов и прочего.

Единственным видимым ограничением является объём обрабатываемых данных. Но и здесь есть решение: описываемые технологии *Power BI* заимствованы из мощных аналитических систем SSAS и SSRS, которые являются составными частями MS «*SQL Data Analysis System*». Данные системы предназначены для работы с «большими данными», когда количество обрабатываемых записей может достигать миллиардов единиц, а на недавно прошедшей конференции PASS 2017 («Ассоциация профессионалов SQL» – от англ. «*Professional Association for Sql Server*») была представлена модель, оперирующая триллионом строк [12].

Несомненным плюсом является совместимость разработанных моделей в упомянутых системах с *Power BI* с моделями в MS *Excel*. Кроме того, доступна облачная инфраструктура обработки данных с возможностью в случае покупки лицензии к развёртыванию на выделенных серверах предприятия.

Таким образом, можно говорить о гибкости как в технологическом плане (по мере роста потребностей можно легко перейти на более масштабную систему с минимальными вложениями в обучение), так и в экономическом: если рассматривать существующие системы поддержки принятия решений, к классу которых относятся такие современные ERP системы, как SAP, MS *Dynamic AX*, 1C, аналитические системы управленческого учёта *Cognos*, *Linq* и прочие, то стоимость вложений в MS *Excel* минимальна – цена 1 лицензии составляет порядка 100 долларов США. Для сравнения можно привести оценки по разработке и внедрению системы управленческого учёта на базе «1С Бит-Финанс» на крупном предприятии ОПК. Стоимость автоматизации контура управленческого учёта лежит в диапазоне 10–20 млн рублей. И это один из самых бюджетных вариантов внедрения такого рода систем. Если брать в расчёт программные продукты иностранного производства, то стоимость внедрения увеличивается на порядки.

При этом результат внедрения «1С Бит-Финанс» по удобству пользования системой аналитиками даже близко не приближается к тем возможностям, которые теперь доступны в обычном MS *Excel* с технологией *Power BI*. Основными рисками использования MS *Excel* является, несомненно, иностранное производство данного ПО. К сожалению, на отечественном рынке программного обеспечения подобных аналитических инструментов не существует. Возможно в связи с государственной программой импортозамещения будут реализованы шаги для реализации подобного рода проектов. Существует также рынок свободного программного обеспечения с открытыми кодами, которое возможно верифицировать на отсутствие «закладок» иностранных силовых ведомств, однако возможности такого рода ПО, как правило, существенно отстают от проприетарного мэйнстрима.

Заключение

Очевидно, что в настоящее время нашей стране брошены серьёзные вызовы в области внешней и внутренней политики, включая её оборонные и технологические возможности.

Степень соответствия данным вызовам, в том числе, напрямую зависит от качества и эффективности продукции оборонного назначения, что влечёт высокие требования к профессионализму персонала, вовлечённого в данный вид наукоёмкой деятельности. Принятие своевременных и взвешенных управленческих решений напрямую зависит от обеспеченности предприятия рациональным сочетанием высококвалифицированного персонала и используемыми информационными системами. При этом современный аналитический инструментарий может оказать существенную поддержку как в принятии таких управленческих решений, так и в оптимизации производственного процесса. Речь идёт как о снижении производственных издержек (благодаря анализу узких мест в производстве), так и экономии расходов на управление, когда один специалист со знанием описанных технологий может заменить работу целого отдела, продолжающего работать по старым методам.

Учитывая вышесказанное, можно утверждать, что рассмотренные методы поддержки управленческих решений с использованием аналитических средств MS *Excel*, их совершенствование и развитие являются крайне актуальными и своевременными для продвижения на предприятиях ОПК России.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Analytics Trends to Be Explored at Gartner Data & Analytics Summits 2017*, Gartner, SYDNEY, Australia, 2017.
2. Luhn H. A Business Intelligence System. *IBM Journal*, 1958, т.2, №4. – P.314–319.
3. Rob Collie A.S. *Power Pivot and Power BI., Holy Macro!* – Books, 2016.
4. Girvin M. *Ctrl+Shift+Enter. Mastering Excel Array Formulas., Holy Macro!* – Books, 2016.
5. Киммел П., Грин Д. и Боуви Р. *Excel 2003 и VBA., WROX*, 2006.
6. Джелен Б. и Александер М. *Сводные таблицы в Microsoft Excel 2013.* – Вильямс, 2017.
7. Mukherjee R. and Kar P. *IEEE 7th International Advance Computing Conference, A Comparative Review Of Data Warehousing ETL Tools With Trends And Industry Insight*, 2017.
8. Дэйт К.Д. *Введение в системы баз данных.* – Вильямс, 2017.
9. Russo M. and Ferrari A. *MS PowerPivot for Excel 2010 Give Your Data Meaning*, Microsoft Press, 2011.
10. *Data Analysis Expressions (DAX) Reference*, Microsoft, 2012.
11. Sallam Rita L., Howson Cindi, Idoine Carlie J., Oestreich Thomas W., Richardson James Laurence, Tapadinhas Joao. *Magic Quadrant for Business Intelligence and Analytics Platforms.* – Gartner, 2017.
12. PASS Summit 2017. Available: <http://www.pass.org/summit/2017/Live.aspx>.

COMPARATIVE REVIEW OF TECHNOLOGICAL, SOFTWARE-BASED AND ANALYTICAL ANALYSIS METHODS OF MANAGEMENT INFORMATION FOR BUILDING OF EXECUTIVE DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEM AT DEFENSE-INDUSTRIAL COMPLEX ENTERPRISES BASED ON MS EXCEL 2016

I.V. Karelskiy, V.M. Aldoshin

Different methods of the Business Intelligence technology principles implementation on the base of MS Excel technological platform using the Power Business Intelligence (BI) subsystem were examined.

It was demonstrated that the Business Intelligence is a set of technological, software-based and analytical content transformation methods for further effective application with a view to support executive decision-making.

Despite of need in effective data analysis methods and MS Excel accessibility there is a few users who masters processing properly presented in the mentioned software product.

Furthermore, subject matter specialists of enterprises oftentimes don't possess base skills of building systems permitting effectively conduct the data analysis and provide decision-maker with necessary information aside from such state-of-the-art technology as the Microsoft BI.

Synthesis possibilities of different data analysis techniques in order to obtain a multipurpose tool for management information processing and analysis were demonstrated, including origination and specifications processing using the Power Query tool.

An estimation of operation and cost-effective excellence in application of data processing and analysis technology in MS Excel was performed.

Поступила 5 декабря 2017 года.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА

УДК 623.09

СОЗДАНИЕ ЗАРУБЕЖНЫХ СИСТЕМ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОРАЖЕНИЯ ДЛЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БЛА

© Авторы, 2018

А.Е. Свистунов

начальник отдела, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва

E-mail: info@raspletin.com

Н.А. Малеева

ведущий аналитик отдела, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва

О.С. Черкашина

аналитик отдела, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва

В статье представлен обзор некоторых зарубежных систем оружия направленного действия различных типов, предназначенных для противодействия малоразмерным и тактическим беспилотным летательным аппаратам. Приведены результаты испытаний.

Ключевые слова: радиоэлектронное поражение, операции по противодействию беспилотным летательным аппаратам (БЛА), система поражения целей электромагнитным импульсом (ЭМИ-оружие), радиочастотное оружие, постановка помех, оружие направленной энергии (ОНЭ).

The article states a review of some foreign directed energy systems of different types that are intended for countering small-size tactical unmanned air vehicles. The tests results are performed as well.

Keywords: electronic warfare, counter-unmanned air vehicles operations, electromagnetic pulse weapon, radio frequency weapon, jamming, directed energy weapon.

В настоящее время наряду с развитием систем оружия, предусматривающих кинетическое воздействие на цель, всё большее распространение получают системы, имеющие обозначение «оружие на новых физических принципах», в частности, энергетическое оружие направленного действия. Зарубежные специалисты небезосновательно полагают, что оно окажет значительное влияние на характер ведения боевых действий в будущем. Радиочастотное оружие, относящееся как лазерное и пучковое оружие к энергетическому оружию направленного действия, может применяться как для вывода из строя радиоэлектронной аппаратуры, так и для воздействия на личный состав противника.

Так, актуальной задачей становится поиск различных способов противодействия беспилотным летательным аппаратам (БЛА), так как угрозу представляют как мини-БЛА (mUAV менее 20 кг) и малоразмерные БЛА (sUAV, 20–150 кг), так и тактические БЛА.

Малоразмерные беспилотные летательные системы являются малозаметными и имеют малую сигнатуру для всех областей: оптической, акустической, радиолокационной и инфракрасной. Обнаружение в данных областях будет выполнено посредством применения средств радиоэлектронного сканирования частот, используемых для управления БЛА или сканирования

передачи видеосигналов по каналу «борт-земля» с камеры БЛА. В действительности, плотный спектр электромагнитных волн в городских условиях представляет серьёзную проблему при обнаружении и селекции целей. Способы противодействия БЛА могут включать: вывод из строя радиоэлектронного оборудования (управление каналом постановки помех, подавление спутникового (GPS)-канала и радиодезинформация, ослепление датчиков или нарушение работы радиоэлектронных средств) и непосредственное поражение целей (высокоэнергетические лазерные системы или артиллерийско-ракетный перехват посредством кинетического воздействия).

Системы поражения целей электромагнитным импульсом (ЭМИ-оружие)

ЭМИ-оружие высокой мощности *Phaser*

Официальные представители армии США 5 октября 2016 года опубликовали данные об испытаниях ЭМИ-оружия высокой мощности дальнего действия *Phaser* производства компании *Raytheon* [1]. Данные испытания проводились в 2013 году на территории полигона Центра огневой подготовки армии США (*Army Fires Center of Excellence*) в Форт Силл штата Оклахома. Ранее информация о данных испытаниях не подлежала разглашению.

В ходе данных испытаний системой *Phaser* было осуществлено обнаружение и сопровождение малоразмерных БЛА *Flanker* и *Tempest*, а также передача целеуказаний для поражения целей (см. рис. 1). Основной целью данных испытаний стало уничтожение реальных целей системой оружия направленного действия, поражение более одного типа целей, а также поражение нескольких целей одновременно на рабочих дальностях. Данные об использовании системы *Phaser* (см. рис. 2) вне испытательного полигона отсутствуют.

В состав системы *Phaser* входит СВЧ-излучатель высокой мощности (*high powered microwave cannon*). Излучатель *Phaser* установлен на транспортном контейнере высотой 6 м. Обнаружение и сопровождение целей осуществляется посредством радиолокационной станции (РЛС) *MPQ-64 Sentinel* или тактической РЛС ближнего боя *Close Combat Tactical Radar*. Отмечается, что система *Phaser* обладает двумя рабочими режимами: вывод из строя цели и уничтожение цели. Точные данные по мощности и дальности данной системы не раскрываются.

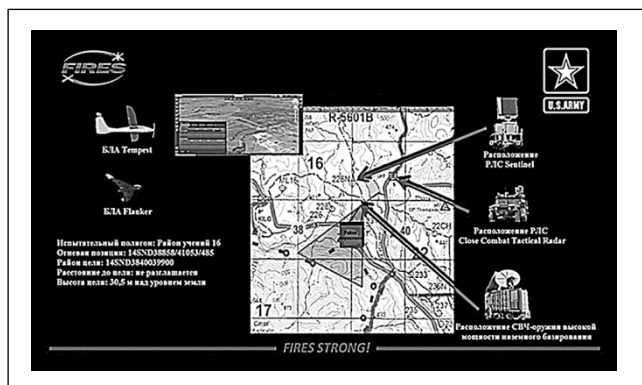


Рис. 1. Представление данных о проведении испытаний системы *Phaser*

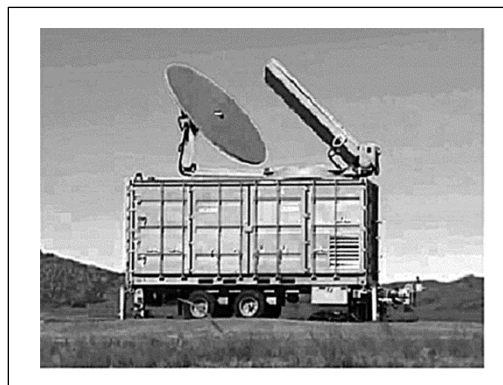


Рис. 2. Система *Phaser* производства компании *Raytheon*

В настоящее время официальные представители компании *Raytheon* заявляют, что габариты системы *Phaser* были уменьшены в два раза после проведения испытаний в 2013 году. Планируется, что система будет готова к оперативному развёртыванию к концу 2018 года.

Система *CHAMP*

Официальные представители Комитета Сената США по вооружённым силам (*U.S. Senate Committee on Armed Services*) 23 марта 2016 года [2] заявили о выделении денежных средств в размере 10 млн долларов [3] на продолжение работ в рамках программы создания ракеты, оснащённой СВЧ-излучателем высокой мощности *CHAMP* (*Counter-Electronics High Power Microwave Advanced Missile Project*), предназначенной для вывода из строя радиоэлектроники противника за счёт применения электромагнитного импульса. Данный контракт был заключён с компанией *Raytheon*, Национальной лабораторией Сандия (*Sandia National Laboratory*), а также с научно-исследовательской лабораторией ВВС США AFRL (*Air Force Research Laboratory*). В рамках контракта компании *Raytheon* были выделены денежные средства в размере 4,8 млн долларов на обновление двух комплектов системы *CHAMP*, оставшихся после завершения

первоначальной программы CHAMP JCTD (*Counter-Electronics High Power Microwave Advanced Missile Project Joint Capability Technology Demonstration*) в 2012 году. Также компания должна выполнить обновление двух крылатых ракет воздушного базирования (КРВБ) с неядерной боевой частью, в которые интегрируется система CHAMP. Кроме того, компания должна выполнить поставку ракет, оснащённых системой CHAMP Научно-исследовательской лаборатории ВВС США AFRL (см. рис. 3).

В рамках данного контракта ВВС США выделили Национальной лаборатории Сандия 1.8 млн долларов на обновление генератора ЭМИ системы CHAMP. Источником питания для системы CHAMP является генератор импульсного высокого напряжения, разработанный Национальной лабораторией Сандия. Интеграция полного комплекта системы в КРВБ AGM-86 осуществляется компанией *Boeing*. Для выполнения работ Научно-исследовательской лабораторией ВВС США AFRL были получены денежные средства в размере 3.8 млн долларов.

Данный контракт является первым крупным контрактом в рамках проекта CHAMP после успешной демонстрации системы в октябре 2012 года. Отмечается, что новый контракт предусматривает создание только двух комплектов системы CHAMP, готовых для лётных испытаний. Однако в настоящее время проведение испытаний не планируется.

В рамках проекта CHAMP JCTD, открытого ВВС США в 2009 году, разрабатывается СВЧ-излучатель, способный выводить из строя и уничтожать электронное оборудование средств нападения противника. Данный излучатель планируется устанавливать на небольшие платформы воздушного базирования, например, крылатые ракеты или БЛА. Целью данного проекта является создание нескольких опытных летательных аппаратов, несущих на себе излучатель высокой мощности, а также проведение оценки эффективности их работы.

Испытания ракеты, оборудованной системой CHAMP, были проведены 22 октября 2012 года [4]. В ходе испытаний ракета, оборудованная системой CHAMP, выполняла полёт по заданной программе, а также генерировала мощные ЭМИ, эффективно осуществляя вывод из строя электронных подсистем и уничтожая данные без нанесения физических разрушений. В ходе испытаний были выведены из строя семь различных типов целей, после чего произошло самоуничтожение ракеты над территорией полигона компании *Boeing* в штате Юта.

Отмечается, что система CHAMP способна генерировать до 100 ЭМИ в течение нескольких минут во время полёта ракеты [5]. Кроме того, система способна осуществлять подавление цели в трёх режимах: при минимальном уровне подавления требуется перезагрузка электронного оборудования цели; при среднем уровне подавления цели требуется частичный ремонт системы; при максимальном уровне подавления осуществляется уничтожение электронного оборудования системы. Отмечается, что степень ущерба зависит от степени защиты целей, однако в ходе испытаний система CHAMP осуществила выведение из строя электроники, находящейся в защищённом в противоядерном отношении сооружении для хранения химического и биологического оружия.

В дальнейшем планируется выполнить дополнительные работы с целью уменьшения габаритов системы CHAMP. Специалисты отмечают, что массогабаритные характеристики являются наиболее серьёзным ограничением для размещения данной системы на борту летательного аппарата (ЛА). Так, разработчикам системы была поставлена задача сохранения эффективности системы CHAMP при уменьшении габаритов от 30% до 50% в зависимости от платформы базирования. Кроме того, при интеграции системы CHAMP в состав платформы-носителя необходимо осуществить защиту электроники платформы. Также специалисты отмечают необходимость работы системы CHAMP воздушного базирования при высоких перепадах температур, давления, а также в условиях воздействия вибрации.

В случае если опытный образец CHAMP JCTD будет соответствовать требованиям ВВС США, развёртывание крылатых ракет или БЛА с излучателем высокой мощности на борту

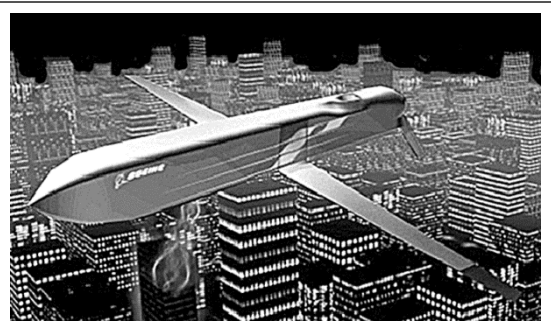


Рис. 3. Модель ракеты, оснащённой системой CHAMP компании *Boeing*

станет возможным в краткосрочной перспективе. Данное оружие позволит осуществлять массированное поражение электронно-вычислительных средств, поддерживающих оборонительные сети А2/АД противника (в качестве основных положений концепции А2/АД руководством Пентагона предусматриваются ударные действия средствами воздушно-космического нападения, направленные на «снижение темпов развёртывания и воспреещение доступа сил и средств противника в зону ответственности на театре военных действий или принуждение противника действовать вне зоны военного конфликта, а также недопущение, или ограничение совершения им манёвров и оперативного развёртывания в районе боевых действий»), такие как сети систем оперативного управления, РЛС захвата цели и компонентов систем противовоздушной и противоракетной обороны (ПВО-ПРО). Дальнейшее развитие оружия направленной энергии (ОНЭ), которое может быть размещено на БЛА, обладающих возможностью преодоления систем ПВО-ПРО, может привести к появлению более мощных систем с увеличенной зоной действия, в которой будет осуществляться вывод из строя большего количества электронной аппаратуры вероятного противника.

Системы подавления радиосигнала

Система противодействия БЛА AUDS

Официальные представители компании *Blighter Surveillance Systems* 18 января 2017 года заявили о присвоении системе противодействия БЛА AUDS (*Anti-UAV Defense System*) 9 уровня технологической готовности TRL (Демонстрация технологии в окончательном виде при лётных испытаниях образца – *Technological Readiness Level 9*) [6]. Отмечается, что система AUDS (см. рис. 4) является первой полностью интегрированной системой противодействия БЛА, получившей 9 уровень технологической готовности. Система получила данный уровень после принятия на вооружение ВС США 12 января 2017.

Система AUDS, произведённая группой компаний *Blighter Surveillance Systems*, *Chess Dynamics* и *Enterprise Control Systems*, способна осуществлять обнаружение БЛА на дальности 10 км, сопровождение посредством высокоточных ИК-камер, камер дневного наблюдения с программным обеспечением (ПО) видеотелевизионного сопровождения целей (*Video tracking software*). Кроме того, система выполняет поражение целей дополнительно посредством некинетической системы подавления радиосигналов.

Разработчики системы AUDS отмечают, что система способна осуществлять обнаружение, сопровождение и поражение цели за 8–15 секунд, а также работать при любых погодных условиях в любое время суток.

Оценка и испытания системы AUDS (см. рис. 5) осуществлялись в течение 18 месяцев, в ходе которых было продемонстрировано соответствие тактико-техническим требованиям, а также выполнено наблюдение за возможными наземными и воздушными угрозами.



Рис. 4. Система противодействия БЛА AUDS

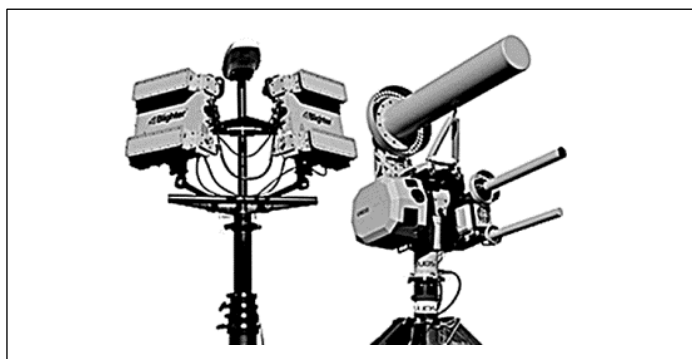


Рис. 5. Система AUDS производства компании *Blighter* (радар A422 производства компании *Blighter* с двумя антеннами W20S)

Данная система предназначена для осуществления противодействия БЛА на важных объектах государственной инфраструктуры или стратегически важных объектах, местах проведения массовых мероприятий. Так, отмечается возможное использование системы AUDS для обороны атомных электростанций, государственных границ, площадок проведения политических и спортивных мероприятий, а также территории аэропортов и авиабаз.

В настоящее время Федеральным управлением гражданской авиации США (*U.S. Federal Aviation Administration*) осуществляется оценка возможностей системы AUDS (см. рис. 6) по обороне основных аэропортов США в рамках программы *Pathfinder*. Так, Федеральное управление авиации США подписало соглашение о проведении совместных НИОКР с компанией *Liteye Systems*, которая является координатором работ по системе AUDS в Северной Америке, направленное на проведение испытаний данной системы в аэропортах США, выбранных Федеральным управлением гражданской авиации США.

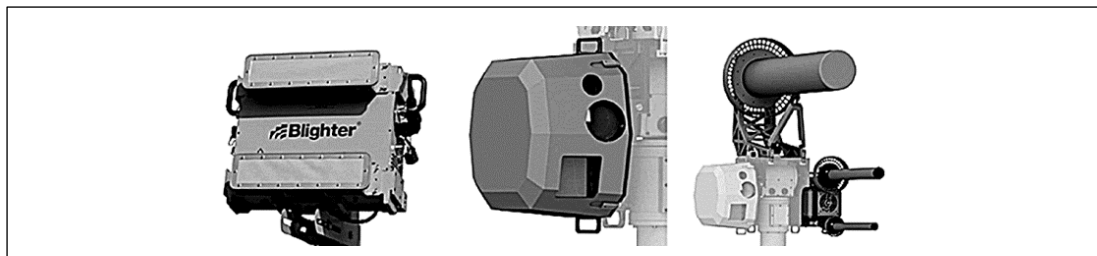


Рис. 6. Компоненты системы AUDS: РЛС *Blighter* серии *A400*, оптико-электронное устройство видеотелевизионного сопровождения целей *Hawkeye*, система подавления радиосигналов направленного действия

Кроме того, с целью расширения возможностей использования системы AUDS (см. таблицу) в настоящее время ведётся разработка новых стационарных, полустационарных и временных платформ для системы. Так, сообщается о разработке платформы, позволяющей обеспечить установку системы AUDS на крышах зданий; полевого мачтового варианта системы (*field mast system*) для обороны таких полустационарных объектов, как передовые оперативные базы, авиабазы или полевые лагеря военнослужащих; а также варианта системы, предназначенного для быстрого развёртывания.

Таблица

Тактико-технические характеристики системы AUDS [7]

Радар <i>Blighter A400</i>	
Головной разработчик	<i>Blighter Surveillance Systems</i>
Дальность	10 км
Минимальный размер цели (ЭПР)	0.01 м ²
Диапазон частот	K _u
Тип радара	Доплеровский частотно-модулированный радар непрерывного излучения кругового обзора с электронным сканированием
Выходная мощность	4 Вт
Зона обзора по азимуту	180° (стандартная), 360° (возможная)
Зона обзора по углу места	10° (антенны M10S) или 20° (антенны W20S)
Зона обзора по углу места в диапазоне	-40° до +30° при использовании устройства регулирования наклона по углу места BRTS (<i>Blighter Tilting System</i>)
Оптико-электронное устройство видеотелевизионного сопровождения целей <i>Hawkeye</i>	
Головной разработчик	<i>Chess Dynamics</i>
Целеуказатель <i>Viper Dynamic</i>	Зона обзора по азимуту: непрерывная; зона обзора по углу места: -50° до +60°; максимальная скорость: 60° в секунду
Камера <i>Piranha 46 HR</i>	Тип: Цветная камера высокой чёткости 2.3 МП; оптическое увеличение: x30; цифровое увеличение: x12; фокусировка: автоматическая
Тепловизор	Тип: Gen 3 с охлаждением; разрешение: 640×512 пикселей; длина волны: 3–5 мкм; изменение зоны обзора при увеличении: 24°–1.8°
Оптико-электронное устройство видеотелевизионного сопровождения целей	Цифровое устройство видеотелевизионного сопровождения и обнаружения целей <i>Vision4ce</i>
Оптическая система дезорганизации/ <i>Optical disruptor</i> (дополнительно)	Тип: пучок высокой интенсивности 1.4°

Система подавления радиосигналов направленного действия	
Головной подрядчик	Enterprise Control Systems Ltd
Антенна	Четырёхдиапазонная антенна с высоким коэффициентом усиления (существует пятидиапазонная модификация 5.8 ГГц)

Система противодействия БЛА Drone Dome

Израильская система противодействия БЛА *Drone Dome* (см. рис. 7) производства компании *Rafael* была впервые продемонстрирована 12 апреля 2016 года на международной выставке LAAD в Бразилии. Данная система предназначена для поражения электроники микро-БЛА и



Рис. 7. Израильская система противодействия БЛА *Drone Dome*

нано-БЛА [8]. В состав системы входит РЛС RPS-42, многоцелевая система наблюдения MEOS и устройство глушения радиосигналов широкого спектра C-GUARD RD. Данная система способна осуществлять круговой обзор воздушного пространства при любых погодных условиях, характеризуется малым временем реакции.

Система осуществляет обнаружение возможной цели посредством РЛС, а также оптико-электронных и инфракрасных компонентов. После обработки данных в случае опознавания цели система оповещает операторов о нахождении БЛА противника в зоне наблюдения за воздушным пространством. Затем в автоматическом режиме

или оператором приводится в действие средство радиоэлектронного подавления системы *Drone Dome*, которое выводит из строя БЛА противника посредством подавления сигналов спутниковой навигации или каналов радиосвязи.

Другие системы радиоэлектронного излучения для противодействия БЛА

Система **FALCON SHIELD** компании *Selex-ES* (в настоящее время *Finmeccanica Airborne & Space Systems*) разработана для обнаружения и поражения микро- и мини-БЛА, в которой используется масштабируемая модульная архитектура. За последние три года компания проводила разработку за собственные финансовые средства системы **FALCON SHIELD**, принцип работы которой построен на пяти сегментах: поиск, определение местоположения, сопровождение, идентификация и поражение. На выставке DSEI-2015 представители компании *Selex-ES* заявили, что, кроме постановки помех, система может быть дополнена ИК/ОЭ турельными установками большой дальности действия семейства **NERIO**; системой управления **C2 VANTAGE** и интерфейсом оператора; тепловизионной камерой высокого разрешения **HORIZON**.

В октябре 2015 года израильская компания *Israel Aerospace Industries (IAI)* представила новую систему **DRONE GUARD**, предназначенную для обнаружения, идентификации и противодействия БЛА. С целью обнаружения малозаметных, низколетящих и малоскоростных воздушных целей, компания *IAI ELTA* адаптировала для выполнения данных задач трёхкоординатные РЛС, а именно **ELM-2026D** (10 км), **ELM-2026B** (15 км) и **ELM-2026BF** (20 км), имеющие специальные алгоритмы обнаружения и сопровождения БЛА, а также модифицировала их для работы с оптоэлектронными (ОЭ) датчиками для визуального опознавания целей.

С целью противодействия БЛА вероятного противника, компания *IAI ELTA* разработала усовершенствованные адаптивные системы постановки помех, которые могут быть использованы при взаимодействии с датчиками обнаружения и идентификации или в качестве непрерывно работающей автономной системы. После постановки помех полёт БЛА может быть нарушен, совершено принудительное возвращение БЛА на базу или осуществлён вывод из строя БЛА с последующей вынужденной (аварийной) посадкой.

Были проведены масштабные успешные испытания системы **DRONE GUARD** с противодействием различным типам БЛА и при отработке различных сценариев, включая одновременную групповую атаку БЛА или нарушение воздушного пространства БЛА [9].

Компания *Airbus Defence & Space (DS)* разработала систему противодействия БЛА, работающей на дальности от 5 км до 10 км. В системе используется РЛС **AESA SPEXER 500n**, ОЭ датчик **Z:NightOwl** и радиопеленгатор **PTP MRD7** для обнаружения, классификации и сопровождения

БЛА. Радиопеленгатор также способен проводить триангуляцию и обнаружение местоположения оператора БЛА.

В качестве средства противодействия БЛА компанией *Airbus DS* при разработке используется технология интеллектуальной постановки помех быстрого реагирования. Так, используется вариант защиты техники от самодельных взрывных устройств (C-IED) ВС Германии. Многоцелевой постановщик помех VPJ-R6, предназначенный для нарушения линии связи между оператором и БЛА. В состав оборудования включается компактный блок оборудования радиотехнической разведки с запоминающим устройством большой ёмкости с данными о вероятных целях противника, позволяющий в режиме реального времени проводить анализ обнаруженных сигналов управления, и постановщик помех, способный обнаруживать и нарушать передачу до 750 000 сигналов в секунду на всех стандартно используемых диапазонах. Учитывая сложность исполнения, данная система способна нарушить передачу данных только на интересующих частотах без оказания воздействия на другие каналы связи. При необходимости может быть организована постановка помех сигналов GPS и радиодезинформация.

Разрабатываемая компанией *Lockheed Martin* компактная радиоэлектронная система наблюдения и разведки **ICARUS** массой менее 10 кг способна распознавать сигналы управления БЛА. Функции основного датчика могут быть дополнены при установке других компонентов оборудования, акустических и оптико-электронных. Затем объединённые данные могут быть отображены на дисплее, включая географические и разведывательные элементы. Противодействие, включающее постановку помех по частоте, используется для установления контроля полёта БЛА. Дополнительная информация по системе или дальности действия не раскрывается представителями компании. Тем не менее, известно, что ввиду модульного принципа конструкции система ICARUS может быть оснащена различными типами оружия, включая кинетические средства перехвата.

Компания *Eletttronica* (EL)T и IDS реализуют совместный проект создания объединённой сетевой многосенсорной разведывательной системы обнаружения БЛА **NIMRUD** (*Networked Integrated Multisensor Reconnaissance Detection*), объединяющей ряд различных датчиков обнаружения и распознавания: РЛС ПВО, наземные РЛС обзора, средства радиотехнической разведки, радиопеленгаторы, радио и видеокогерентные локации, инфракрасные (ИК)/ОЭ и акустические датчики.

В настоящее время проект объединяет использование различных стационарных и динамических датчиков и предусматривает работу по различным типам БЛА. В качестве средства противодействия используются селективный маломощный постановщик помех и перехватчик связи, работающие с применением технологии отношения уровня сигнала и искажений, способных осуществить перехват канала передачи данных, декодировать и дублировать его, тем самым получая полный контроль над управлением БЛА. Возможным также является воздействие посредством применения лазерных систем и постановка дезориентирующих помех сигналам GPS.

Компания *Batelle* разработала портативную быстроразвёртываемую высокоточную систему противодействия БЛА в полёте **DroneDefender** (см. рис. 8). В системе *DroneDefender* используются технологии радиоуправляемого частотного нарушения работы для безопасного прекращения полёта БЛА в воздушном пространстве до момента угрозы военным или гражданским объектам. Являясь недорогостоящей, с уменьшенной массой



Рис. 8. Портативная система противодействия БЛА *DroneDefender*

и лёгкой в применении с дальностью действия 400 метров, система обеспечивает непосредственное устранение угрозы посредством быстрого нарушения работы БЛА. Данный способ минимизирует подрыв или разрушение БЛА и снижает риск угрозы безопасности населения.

Подобное временное решение было реализовано с применением собственных средств Института кибербезопасности Армии США в рамках проекта создания киберсистемы винтовочного типа (*Cyber Capability Rifle*) в 2015 году.

Данная система способна нейтрализовать небольшой квадрокоптер на дальности 10 метров. Данное техническое решение, как и другие компактные многодиапазонные системы РЭП, может быть востребовано в городских условиях проведения военных операций с возможностью постановки помех или вывода из строя различных электронных технических средств: устройства дистанционного управления, сотовые телефоны, *WiFi*-роутеры и камеры наблюдения [9].

Другим усовершенствованным и мощным устройством противодействия БЛА является разработанная компанией CPM система постановки помех БЛА DJ-1204B (120 Вт в 4 диапазонах), включает два GPS сигнала (L1 и L2), 2.4 ГГц для линии управления и 5.8 ГГц для телевизионного канала связи. Возможность работы на различных частотах в зависимости от типа целей и средств нападения (от 20 МГц до 6 ГГц), обычно используемых в ходе борьбы с самодельными взрывными устройствами (C-IED), может быть реализовано в зависимости от требований заказчика. Облегченная версия представляет собой систему **DRONE FIGHTER**, которая установлена на рамке винтовочного типа с различным набором радиоантенн.

Заказ системы DJ-1204B уже сделали Индонезия, Мексика, ОАЭ и Турция. В перспективе компания IDS совместно с компанией CPM планируют интегрировать постановщик помех с комплексной системой, включающей РЛС и ОЭ/ИК систему наблюдения, а также командный пункт [9].

Тем не менее, обнаружение и способы противодействия БЛА должны быть спланированы с учётом тактической обстановки. Защита войск, развёрнутых в передовом оперативном районе, отличается от обеспечения безопасности на территории коммерческого аэропорта. Переполненный стадион представляет решение других проблем обеспечения безопасности по сравнению с защитой одиночного корабля ВМС на море; и соответственно обеспечение постоянной безопасности на важных объектах инфраструктуры требует организации особых мероприятий по сравнению с обеспечением временных мер безопасности в ходе важного политического события.

Таким образом, с учётом наличия различных беспилотных средств нападения и сценариев их применения в настоящее время становится актуальным вопрос организации способов противодействия БЛА, принимая во внимание увеличение степени применения и доступности на коммерческом рынке БЛА, что вызывает серьёзную озабоченность руководящего состава оборонных ведомств. Так, военно-политическое руководство США, столкнувшись с применением БЛА противником в качестве средства террористической угрозы и средства воздушного нападения на боевые корабли и другие платформы при выполнении боевых задач за пределами США, отметило необходимость разработки и принятия на вооружение энергетического оружия направленного действия как наиболее перспективного средства противодействия БЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Evan Ackerman.** Raytheon Sets Phasers to Drone Destruction with Directed Energy Weapon Test // *IEEE Spectrum*, 28.11. 2016.
2. Релиз компании Raytheon. *US Air Force awards Raytheon \$4.8 million to continue work on EW payload for cruise missiles*, 23.03.2016.
3. Релиз Sandia National Laboratory. *Raytheon Wins Contract for a «Directed-Energy» Missile*, 02.05.2016.
4. Релиз компании Boeing. *Boeing Non-kinetic Missile Records 1st Operational Test Flight*, 22.10.2012.
5. **Chris Pocock.** *High-Powered Microwave Weapons Note Quite Ready* // Статья новостного ресурса *AINonline*, 10.07.2016.
6. Релиз компании *Blighter Surveillance Systems*. *AUDS Counter-drone System First to Achieve TRL-9 Status Following Successful Deployment with U.S. Forces*, 18.01.2017.
7. Брошюра компании *Blighter Surveillance Systems*. *TTX системы AUDS*.
8. **Arie Egozi.** *Rafael unveils «Drone Dome» anti-UAV system* // Статья новостного ресурса *FlightGlobal*, 12.04.2016.
9. **Massimo Annati.** Способы противодействия БЛА // Журнал *Military Technology*, Выпуск 5, 2016.

DEVELOPMENT OF FOREIGN ELECTRONIC WARFARE SYSTEMS FOR C-UAV OPERATIONS

A.E. Svistunov, N.A. Maleeva, O.S. Cherkashina

Nowadays, along with weapon systems development, specified for kinetic target engagement, the greater expansion refers to systems designated as «weapons based on new physical principles», particularly the directed energy weapon. Foreign specialists reasonable believe that it will considerably effect on future warfare nature. The radio frequency weapon related as the laser and particle beam weapon to the directed energy weapon and can be used for electronic equipment software kill and exposure to enemy personnel as well.

So that, the search for different methods in countering of unmanned air vehicles (UAV) becomes relevant, since the threat is represented by mUAV (less than 20 kg), sUAV (20-150 kg) and tactical UAVs.

Counter-UAV operations can include: soft kill (jamming countermeasures channel control, GPS-signal suppression and deception communications, sensors blinding or radio-electronic equipment operation breakdown) and direct targets engagement (high-energy laser systems or artillery-missile interception via kinetic impact).

The article states a review of some foreign directed energy systems of different types that are intended for countering small-size tactical unmanned air vehicles. The tests results are performed as well.

Поступила 24 января 2018 года.

НАУЧНЫЕ РЕЦЕНЗИИ И ОТЗЫВЫ



Катулев А.Н., Храмичев А.А., Ягольников С.В. Цифровая обработка 2D слабоконтрастных изображений, формируемых оптико-электронным прибором в сложных фоновых условиях. Обнаружение, распознавание, сопровождение динамических объектов. Монография. – М.: Радиотехника, 2018. – 408 с.

Рецензенты: д-р. ф.-м. наук, профессор, академик РАН А.С. Сигов; д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой, МГТУ им. Г.Э. Баумана Г.П. Слукин.

В книге изложены новые оптимальные методы и алгоритмы для этапов обнаружения, сопровождения и распознавания типа обнаруженных динамических объектов по их изображениям на двумерных фоноцелевых кадрах оптико-электронных приборов, а также результаты оценки характеристик качества функционирования алгоритмов в реальных условиях. В целом авторами развита вейвлет-фрактально-корреляционная теория и созданы новые эффективные методы и алгоритмы обнаружения, распознавания

и сопровождения динамических объектов в условиях априорной неопределённости относительно технических, траекторных характеристик объектов, характеристик оптического излучения объектов и фонов. Предложенные методы опережают достигнутый уровень в известных работах по близким проблемам отечественных и зарубежных авторов и определяют их научную значимость.

Книга предназначена для специалистов, проектирующих программные комплексы обработки информации в оптико-электронных информационных системах, а также студентов, аспирантов и преподавателей вузов, занимающихся проектированием информационных оптико-электронных систем.



Журавлев А.В. Новые способы обеспечения электромагнитной совместимости техники радиоподавления и аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем: монография. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2017. – 152 с.

Рецензенты: д-р воен. наук, профессор Ю.Е. Донсков, д-р ф.-м. наук, профессор В.И. Костылев, д-р техн. наук, профессор В.П. Лихачев.

В книге изложены результаты синтеза инновационных технических способов обеспечения электромагнитной совместимости работающих одновременно в общих полосах частот отечественных средств создания радиопомех навигационной аппаратуре потребителей (НАП) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и отечественной НАП ГНСС без снижения эффективности радиоподавления НАП ГНСС противника. Основу предлагаемых технических способов обеспе-

чения электромагнитной совместимости составляют методы пространственной компенсации помеховых сигналов с использованием пеленгования источников радиопомех, а также временной и частотной компенсации формируемых путём прямого цифрового синтеза помеховых сигналов с известными структурой и параметрами.

Книга предназначена для научных работников, инженеров, преподавателей, аспирантов и студентов профильных специальностей технических вузов.