ISSN 1727-2769

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

№ 4 (61)
ОКТЯБРЬ–ДЕКАБРЬ
2023

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Журнал публикует статьи о новых конкретных результатах законченных оригинальных и особенно имеющих приоритетный характер исследований в области инноваций, а также в области физико-математических и технических наук по группам специальностей (в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28.12.2018 № 90-р):

Физико-математические науки

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

2.2.14 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

Технические науки

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

1.3.11 – Физика полупроводников

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

2.2.14 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Все рукописи рецензируются, по результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материалов. Для авторов публикация является бесплатной.

Редакция журнала «Доклады АН ВШ РФ» просит авторов при подготовке статей строго соблюдать правила, доступные по адресу http://journals.nstu.ru/doklady/rules. Статьи, оформленные с нарушением правил, отклоняются без рецензирования.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2023 октябрь – декабрь № 4 (61)

Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредитель

Новосибирский государственный технический университет

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)
Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония)
А. Загоскин, PhD (Великобритания)
Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)
М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина)
К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф.
И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.
А.О. Давидов, д-р техн. наук
Г.Н. Девятков, д-р техн. наук, проф.
В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц.
С.Л. Елистратов, д-р техн. наук
А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф.
И.Ф. Лозовский, д-р техн. наук, проф.
В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф.
М.И. Низовцев, д-р техн. наук, проф.
О.В. Нос, д-р техн. наук, проф.
В.П. Разинкин, д-р техн. наук, проф.
В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф.
А.Н. Сычев, д-р техн. наук, проф.
С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф.
С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.
В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций в 2021 г. (свидетельство ПИ № ФС 77–81374 от 30.06.2021 г.)

Адрес редакции, издателя: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 1, ком. 346, телефон: (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирский государственный технический университет, 2023 г.

S C I E N T I F I C J O U R N A L

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL ACADEMY OF SCIENCES

2023 October – December № 4 (61)

Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)
D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia)
A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom)
E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)
M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)
K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.)
G.N. Devyatkov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.)
A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof.
I.F. Lozovskiy, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof.
M.I. Nizovtsev, D.Sc. (Eng.), Prof.
O.V. Nos, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.P. Razinkin, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.N. Sychev, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc. (Eng.)

Editor and Publisher Address: Office 346, 20 bld. 1, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Tel: +7 (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk State Technical University, 2023

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

2023 октябрь – декабрь № 4 (61)

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Белкин А.А., Мачин Н.Я., Молчанова А.Е.
Об анизотропии диффузии углеродных нанотрубок
в жидкости 7

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Антипин Б.М., Виноградов Е.М., Туманова Е.И.
Оценка влияния непреднамеренных помех на линию вверх
канала управления беспилотного летательного аппарата 18

Киселев А.В., Таюров А.В.
Систематические ошибки установки углового положения
в матричных имитаторах радиоэлектронной обстановки 34

Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю., Мухина М.А., Садкин И.С.
Исследование параметров горения жидкого углеводородного топлива при его распылении перегретым водяным паром, углекислым газом и их смесью 45

Филатова С.Г., Вострецов А.Г., Бузук И.В.
Оценка потенциала импортозамещения электронной компонентной базы в Российской Федерации на основе анализа патентных документов 58

Чугунов А.А., Евсеев А.Д., Черных С.В., Галуев И.Б.
Алгоритм траекторной фильтрации источников радиоизлучения в многопозиционных пассивных радиолокационных системах с дополнительным наблюдением высоты полета 77

PROCEEDINGS OF RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES

2023 October – December № 4 (61)

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Belkin A.A., Machin N.Ya., Molchanova A.E.
On the anisotropy of diffusion of carbon nanotubes in liquids 7

TECHNICAL SCIENCES

Antipin B.M., Vinogradov E.M., Tumanova E.I.
Assessment of the impact of unintentional interference
on the uplink of the control channel of an unmanned aircraft.....18

Kiselev A.V., Tayurov A.V.
Systematic errors in setting the angular position in matrix simula-
tors of the radio-electronic environment 34

Kopyev E.P., Shadrin E.Yu., Mukhina M.A., Sadkin I.S.
Study of combustion of liquid hydrocarbon fuel when sprayed
with superheated water vapor, carbon dioxide and their mixture 45

Filatova S.G., Vostretsov A.G., Buzuk I.V.
Estimation of the import substitution potential of the electronic
components in the Russian Federation based on the patent
documents analysis.....58

Chugunov A.A., Evseev A.D., Chernyh S.V., Galuev I.B.
Trajectory filtering algorithm in multi-position passive radars
with additional flight altitude observation 77

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2023 октябрь–декабрь № 4 (61)

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 538.93

ОБ АНИЗОТРОПИИ ДИФФУЗИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ЖИДКОСТИ*

А.А. Белкин[1,2], **Н.Я. Мачин**[1], **А.Е. Молчанова**[1]
[1]*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет* (*Сибстрин*)
[2]*Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН*

В статье рассматриваются методика и результаты молекулярно-динамического моделирования диффузии углеродных нанотрубок в воде. Целью работы являлось изучение продольной и поперечной относительно оси нанотрубки диффузии гибких нанотрубок, определение автокорреляционных функций скорости и коэффициентов диффузии в этих направлениях. Взаимодействие молекул воды друг с другом описывалось потенциалом Леннард–Джонса, а молекул углеродной нанотрубки – потенциалом AIREBO. Диаметры нанотрубок принимали значения 1,15 и 1,44 нанометра, их длина варьировалась от 5 до 15 нанометров. Количество молекул воды в ячейке моделирования достигало ста тысяч. Показано, что автокорреляционная функция скорости центра масс нанотрубки в продольном направлении затухает существенно медленнее, чем в поперечном. Соответствующие значения коэффициентов диффузии различаются в 2–4 раза, это различие возрастает при увеличении отношения длины нанотрубки к ее диаметру. Осредненный по направлениям коэффициент диффузии гибких нанотрубок уменьшается с увеличением длины нанотрубок. Его значения превышают соответствующие значения для твердых аналогов этих нанотрубок. Обнаружено немонотонное затухание автокорреляционной функции скорости центра масс нанотрубок. Характерное время между точками перегиба этой функции совпадает с периодом изгибных колебаний нанотрубки.

Ключевые слова: диффузия, углеродные нанотрубки, анизотропия, молекулярно-динамическое моделирование.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-7-17

Введение

Интенсивное развитие нанотехнологий поставило задачу изучения механизмов процессов переноса в наножидкостях, двухфазных системах, состоящих из базовой жидкости и наночастиц с характерными размерами до ста нанометров. Наножидкости уже сегодня применяются в устройствах теплообмена и теплопередачи, технологиях создания уникальных композитных материалов, медицинских и других технологиях [1]. Типичными базовыми жидкостями являются вода, масла, различные хладагенты и биологические жидкости. Наночастицы, как правило, состоят из металлов и их оксидов и имеют форму, близкую к сферической. Вместе с тем в последнее время возрастает интерес к наножидкостям с углеродными наноструктурами, такими как пластины графена или нанотрубки. Для них часто характерна сильная анизотропия размеров. Так, например, отношение длины к диаметру углеродной нанотрубки (УНТ), представляющей собой свернутый лист графена, может составлять несколько тысяч. При этом диаметр одностенных УНТ меняется обычно от одного до 3…4 нм. УНТ обладают уникальными свойствами, в частности чрезвычайно высокой прочностью и теплопроводностью, что позволяет использовать наножидкости с УНТ в трибонике, для устройств теплопередачи, при создании уникальных нанокомпозитов [2, 3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00043).

© 2023 Белкин А.А., Мачин Н.Я., Молчанова А.Е.

Основными проблемами при использовании наножидкостей на базе УНТ является получение информации об их коэффициентах переноса и управление процессами переноса. Ключевым коэффициентом является коэффициент диффузии. Изучить экспериментально диффузию НТ достаточно тяжело, это связано с нестабильностью наножидкостей, агрегацией УНТ, влиянием используемых поверхностно-активных веществ. Тем не менее такие исследования ведутся [4, 5]. Важно, что диффузия УНТ анизотропна, можно выделить диффузию в направлении вдоль оси трубки (продольная диффузия) и перпендикулярно ей (поперечная диффузия). Экспериментальное изучение анизотропии диффузии практически невозможно.

В такой ситуации разумной альтернативой становится моделирование дмффузии УНТ методом молекулярной динамики (МД) [6, 7]. В частности, именно с его помощью был установлен неклассический механизм диффузии сферических наночастиц [8]. Наряду с изучением физико-механических свойств самих УНТ [9], с помощью метода МД изучались и свойства переноса, в частности вращательная [10] и трансляционная [11] диффузия УНТ в жидкостях. В [11] была предложена методика и измерены продольный и поперечный коэффициенты диффузии нанотрубок. Однако ранее этим методом никак не изучалось влияние на диффузию изменений формы УНТ, связанных с их гибкостью, рассматривались твердые нанотрубки сравнительно небольших размеров.

Целью данной работы является определение коэффициентов диффузии гибких нанотрубок в воде в продольном и поперечном направлениях и получение зависимости коэффициента диффузии от длины и диаметра нанотрубок.

1. Постановка задачи

В работе моделировалась диффузия одиночной одностенной гибкой УНТ (рис. 1), окруженной молекулами воды. Для моделирования использовался классический метод МД [6]. Ячейка моделирования представляла собой параллелепипед, длина и ширина которого не изменялись и составляли 10 нм, а высота изменялась в пределах от 10 нм до 27 нм в зависимости от длины помещаемой УНТ. Использовались периодические граничные условия.

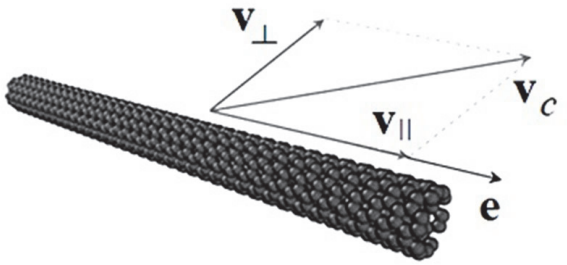


Рис. 1 – УНТ и составляющие скорости ее центра масс

Fig. 1 – CNT and its center of mass velocity components

Структура и диаметр УНТ определяются индексами хиральности [5]. В данной работе УНТ имели структуру типа «кресло» с индексами хиральности (6,6) и (8,8), что соответствует диаметрам 1,15 и 1,44 нм. Длина УНТ составляла 5, 10 и 15 нм, количество атомов в них менялось в зависимости от размеров в диапазоне от 504 до 1984. Расстояние между атомами углерода в гексагональной сетке графита равнялось 0,142 нм. Для описания взаимодействия атомов углерода

использовался потенциал AIREBO, широко используемый при моделировании углеродных наноструктур [12].

Взаимодействие молекул воды друг с другом определялось потенциалом Леннард-Джонса.

$$\Phi(r) = 4\varepsilon\left(\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^{6}\right), \tag{1}$$

где σ – эффективный диаметр молекулы; ε – глубина потенциальной ямы; r – расстояние между молекулами. Параметры потенциала Леннард-Джонса для молекул воды следующие: σ_w = 0,296 нм, ε_w = 545,37 К [11]. Взаимодействие атомов нанотрубки с молекулами воды описывалось также потенциалом (1), при этом константы потенциала определялись по константам воды и углерода (σ_c = 0,342 нм, ε_c = 27,7 К) с помощью комбинационных соотношений $\sigma_{cw} = \sqrt{\sigma_c \sigma_w}$, $\varepsilon_{cw} = \sqrt{\varepsilon_c \varepsilon_w}$.

Диффузия УНТ исследовалась при температуре T = 300 К и атмосферном давлении. В начальный момент молекулы моды располагались в ячейке моделирования равномерно, далее часть молекул удалялась, и в освободившееся место размещалась УНТ. Количество удаленных молекул подбиралось так, чтобы давление в получившейся наножидкости равнялось атмосферному. Давление определялось по теореме вириала [6]. Для поддержания температуры в системе использовался термостат Нозе–Хувера [12]. Расчеты коэффициентов диффузии проводились после того как система переходила в равновесное состояние. Количество молекул в системе зависело от размеров УНТ и менялось от 37 до 98 тысяч. МД-моделирование проводилось с помощью пакета LAMMPS [13], шаг интегрирования был равен одной пикосекунде.

Коэффициент трансляционной диффузии D нанотрубки определяется как интеграл по времени от автокорреляционной функции скорости (АКФС) φ_{vv} ее центра масс:

$$D = \int_0^{t_p} \varphi_{vv}(t)dt, \qquad \varphi_{vv}(t) = \frac{1}{3}\langle v_c(t_0) v_c(t_0 + t)\rangle. \tag{2}$$

Здесь v_c – скорость центра масс УНТ; t_p – время затухания АКФС, угловые скобки означают осреднение по результатам, полученным для разных начальных времен t_0.

Для изучения анизотропии диффузии УНТ было выделено два направления, вдоль и поперек оси нанотрубки (рис. 1). Положение продольной оси нанотрубки (иными словами, вектора **e** на рис. 1) определялось в каждый момент. Проектируя текущее значение скорости центра масс УНТ на эти направления, далее подставляя эти проекции в соотношение (2), можно определить коэффициенты диффузии УНТ в продольном направлении $D_{\|}$ и в поперечном $D_{\perp}$.

2. Результаты моделирования АКФС и коэффициентов диффузии

На рис. 2 представлены продольная, поперечная и осредненная по направлениям АКФС центра масс УНТ длиной 10 нм и диаметром 1,15 нм.

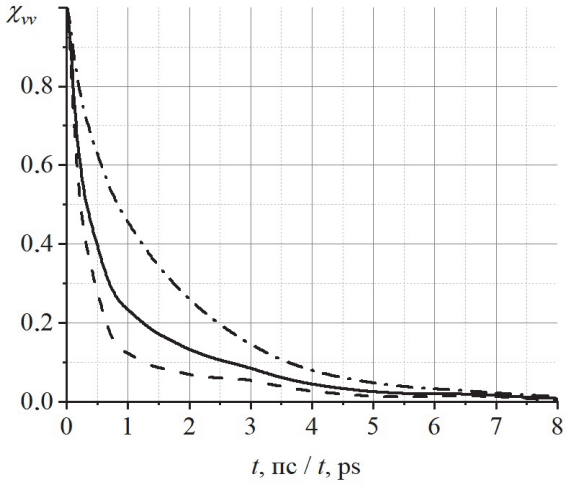


Рис. 2 – АКФС центра масс УНТ длиной 10 нм и диаметром 1,15 нм (сплошная линия), а также ее продольная (штрихпунктирная линия) и поперечная (штриховая линия) составляющие

Fig. 2 – VACF of the center of mass of a CNT with a length of 10 nm and a diameter of 1,15 nm (solid line), as well as its longitudinal (dashed-dotted line) and transverse (dashed line) components

Отметим, что вклад поперечной составляющей в осредненную в два раза больше, чем продольной, поскольку УНТ имеет два поперечных направления. АКФС на этом графике и ниже для удобства нормированы на свое значение в начальный момент $\chi_{vv}(t) = \varphi_{vv}(t)/\varphi_{vv}(0)$. Последнее определяется температурой системы и массой УНТ, для УНТ на рис. 2 оно равно 2,09 м^2/с^2.

Видно, что характер релаксации всех АКФС близок к экспоненциальному, при этом время релаксации поперечной составляющей скорости существенно меньше. При одинаковом значении $\varphi_{vv}(0)$ это приводит к достаточно высокому различию коэффициентов диффузии в продольном и поперечном направлении (в 2,4 раза, см. данные, приведенные в таблице). Эта разница обусловлена прежде всего различием характерной площади сечения УНТ при движении в разных направлениях. Для продольного направления она примерно равна 1 нм^2, для поперечного – на порядок больше и определяется длиной нанотрубки.

Естественно, при увеличении длины УНТ различие этих площадей будет возрастать, что должно приводить к увеличению отношения времен релаксации и коэффициентов диффузии в разных направлениях. Это подтверждается приведенными на рис. 3 данными о релаксации осредненной АКФС для УНТ разной длины. Видно, что время релаксации с увеличением длины снижается. При этом $D_{\|}$ меняется незначительно, не более чем на 5 % (см. таблицу), а $D_{\perp}$ снижается в 2,25 раза при изменении длины УНТ от 5 до 15 нм. В то же время монотонный характер затухания АКФС для УНТ разной длины сохраняется. Изменения в характере релаксации появляются при увеличении диаметра нанотрубок.

На рис. 4 приведены АКФС для УНТ того же диапазона длин, но с увеличенным в 1,25 раза диаметром. На начальном участке релаксации зафиксированы

перегибы на графиках АКФС, экспоненциальное затухание сопровождается осцилляциями с периодом, примерно равным 0,5 пикосекунды. Причины этих осцилляций будут обсуждаться ниже, здесь же отметим, что они не будут существенно влиять на значения коэффициентов диффузии. Этот коэффициент является интегральной характеристикой, и вклады в него в участках перегибов будут нивелироваться.

Коэффициенты диффузии (10^{-10} м^2/с) УНТ различной длины и диаметра, *d* = 1,15 нм и 1,44 нм (отмечено символом *)

Diffusion coefficients (10^{-10} m^2/s) of CNTs of various lengthsand diameter, *d* = 1,15 nm and 1,44 nm (marked with *)

	D	$D_{\parallel}$	$D_{\perp}$
L = 5 нм / *L* = 5 nm	2,29	3,31	1,78
L = 10 нм / *L* = 10 nm	1,87	3,07	1,27
L = 15 нм / *L* = 15 nm	1,58	3,13	0,80
L = 5 нм [11] / *L* = 5 nm [11]	1,70	2,11	1,49
L = 5* нм / *L* = 5* nm	1,96	2,80	1,54
L = 10* нм / *L* = 10* nm	1,43	1,79	1,25
L = 15* нм / *L* = 15* nm	1,17	2,43	0,54

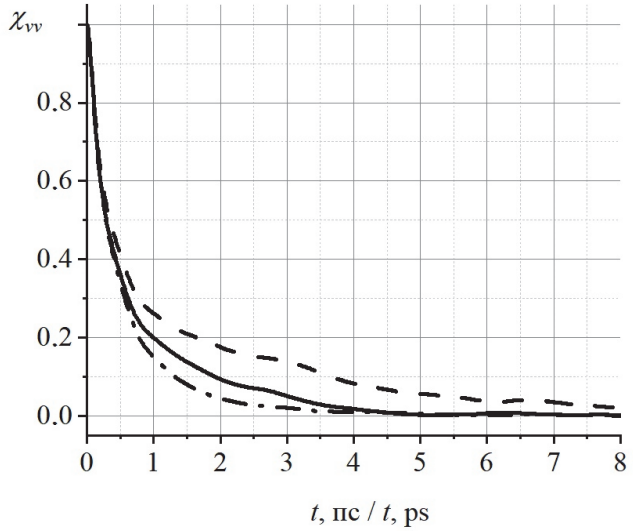


Рис. 3 – АКФС центра масс УНТ диаметром 1,15 нм и различной длины:

L = 5 нм (штрихпунктирная линия); *L* = 10 нм (сплошная линия); *L* = 15 нм (штриховая линия)

Fig. 3 – VACF of the center of mass of a CNT with a diameter of 1,15 nm and various lengths:

L = 5 nm (dashed-dotted line); *L* = 10 nm (solid line); *L* = 15 nm (dashed line)

Коэффициенты диффузии УНТ диаметром 1,44 нм меньше, чем для УНТ такой же длины и меньшего диаметра (таблица; рис. 5). Это отличие во многом определяется разностью тепловых скоростей УНТ разной массы, т. е. значением $\varphi_{vv}(0)$.

Однако увеличение массы на 25 % для УНТ большего диаметра не приводит к пропорциональному уменьшению коэффициента D. Для УНТ длиной 10 нм он уменьшается на 30 % , а при увеличении длины до 15 нм различие достигает 35 %. Это объясняется отличиями в характерных временах релаксации АКФС.

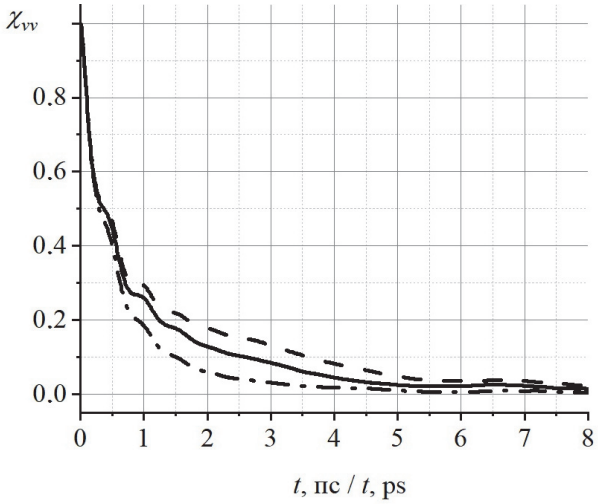


Рис. 4 – АКФС центра масс УНТ диаметром 1,44 нм и различной длины:
L = 5 нм (штрихпунктирная линия), L=10 нм (сплошная линия), L = 15 нм (штриховая линия)

Fig. 4 – VACF of the center of mass of a CNT with a diameter of 1,44 nm and various lengths:
L = 5 nm (dashed-dotted line), L = 10 nm (solid line), L = 15 nm (dashed line)

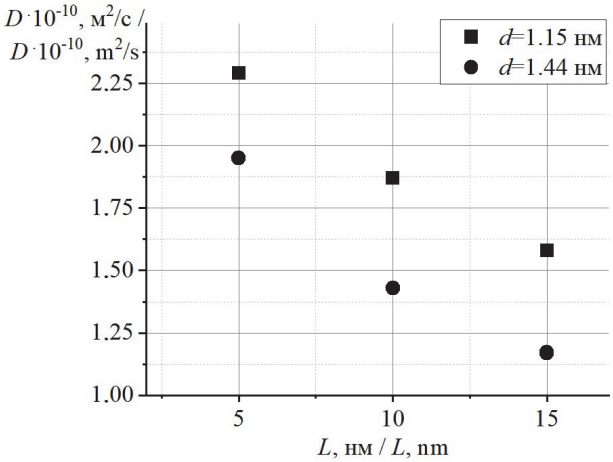


Рис. 5 – Зависимость коэффициентов диффузии УНТ различных диаметров d от длины нанотрубки L

Fig. 5 – Dependence of the diffusion coefficients of CNTs of various diameters d on the nanotube length L

Важно, что коэффициенты диффузии гибких УНТ достаточно сильно превышают значения для их твердых аналогов, полученные в работе [11]. Так, для нанотрубки длиной 5 нм и диаметром 1,15 нм это превышение составляет 35 % (см. таблицу). Отметим, наконец, что значения коэффициентов диффузии монотонно уменьшаются с ростом длины и диаметра УНТ (рис. 6). При этом разница между $D_{\parallel}$ и $D_{\perp}$ снижается с ростом диаметра УНТ.

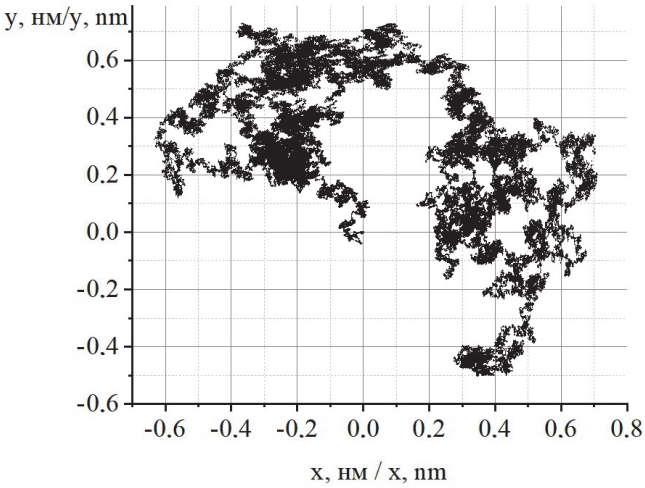


Рис. 6 – Диаграмма движения центральной области УНТ относительно оси нанотрубки

Fig. 6 – Motion diagram of the central region of the CNT relative to the nanotube axis

Заключение

Учет влияния деформаций УНТ на ее диффузию приводит к двум основным закономерностям. Во-первых, коэффициенты диффузии гибких УНТ превышают значения, полученные для твердых моделей [11]. Базовая жидкость является средой, в которой молекулы расположены очень плотно, расстояние между ними примерно равно их диаметру. В такой ситуации движущейся твердой нанотрубке сложнее пройти между молекулами, чем ее гибкому аналогу, который будет лучше подстраиваться под текущее расположение молекул жидкости. Разница в коэффициентах диффузии, как было показано, составляет десятки процентов.

Во-вторых, для АКФС центра масс УНТ диаметром выше 1,3…1,4 нм характерны осцилляции с частотой около 0,5 пикосекунды для диаметра 1,44 нм. Естественно, они должны быть связаны с определенными колебаниями нанотрубки. Продольные колебания УНТ имеют меньшие частоты [2], поэтому ключевую роль здесь должны играть изгибные колебания. Они, в свою очередь, делятся на два типа: изгиб оси УНТ и деформация ее поперечного сечения. На рис. 6 изображена траектория движения центральной области нанотрубки относительно ее продольной оси. Ось проведена через центры крайних сечений УНТ. Видно, что изгиб оси действительно имеет место, характерные отклонения составляют несколько десятых нанометра. Однако преобразование Фурье изображенного на рисунке сигнала не зафиксировало в нем колебания с периодом, близким к одной пикосекунде. Кроме того, осцилляции были обнаружены для УНТ большего диаметра, где изгиб оси должен быть меньше.

Изучение деформаций поперечного сечения нанотрубок выполнено в работе [14]. Там были смоделированы деформационные колебания и измерены частоты различных мод колебаний УНТ нескольких диаметров. В частности, было показано, что период основной моды колебаний УНТ диаметром около полутора нанометров равняется 0.5 пикосекунды, что совпадает с периодом осцилляций АКФС, зафиксированных в данной работе. Таким образом, именно деформации поперечного сечения УНТ будут влиять на релаксацию скорости ее центра масс.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Колмаков А.Г., Баринов С.М., Алымов М.И.** Основы технологий и применение наноматериалов. – М.: Физматлит, 2012. – 208 с.
2. **Saeed Ê., Ibrahim Ê.** Carbon nanotubes–properties and applications: a review // Carbon Letters. – 2013. – Vol. 14 (3). – P. 131–144. – DOI: 10.5714/CL.2013.14.3.131.
3. **Лозовик Ю.Е., Попов А.М.** Образование и рост углеродных наноструктур – фуллеренов, наночастиц, нанотрубок и конусов // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167 (7). – С. 751–774.
4. Diffusion of single-walled carbon nanotube under physiological conditions / J. Judkins, H.H. Lee, S. Tung, J.W. Kim // Journal of Biomedical Nanotechnology. – 2013. – Vol. 9 (6). – P. 1065–1070.
5. **Rudyak V.Ya., Tretiakov D.S.** On diffusion of single-walled carbon nanotubes // Thermophysics and Aeromechanics. – 2020. – Vol. 27. – P. 847–855. – DOI: 10.1134/S08698643 20060062.
6. **Хеерман Д.В.** Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике. – М.: Наука, 1990. – 176 с.
7. **Rapaport D.C.** The art of molecular dynamics simulation. – New York: Cambridge University Press, 2004. – 549 p.
8. **Rudyak V.Ya., Kharlamov G.V., Belkin A.A.** Diffusion of nanoparticles and macromolecules in dense gases and liquids // High Temperature. – 2001. – Vol. 39 (2). – P. 264–271. – DOI: 10.1023/A:1017578917614.
9. **Mejía-Rosales S.** Mechanical properties of MoS_2 nanotubes under tension: a molecular dynamics study / S. Mejía-Rosales, S.A. Sandoval-Salazar, A. Soria-Sánchez, L.Y. Cantú-Sánchez // Molecular Simulation. – 2021. – Vol. 47 (6). – P. 471–479. – DOI: 10.1080/ 08927022.2021.1880577.
10. **Dong R., Cao B.** Investigation of rotational diffusion of a carbon nanotube by molecular dynamics // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2015. – Vol. 15. – P. 2984–2988.
11. **Belkin A.A., Rudyak V.Ya., Krasnolutskii S.L.** Molecular dynamics simulation of carbon nanotubes diffusion in water, molecular simulation // Molecular Simulation. – 2022. – Vol. 48. – P. 752–759. – DOI: 10.1080/08927022.2022.2053119.
12. **H¨unenberger P.H.** Thermostat algorithms for molecular dynamics simulations // Advances in Polymer Science. – 2005. – Vol. 173. – P. 105–149. – DOI: 10.1007/b99427.
13. LAMMPS – a flexible simulation tool for particle-based materials modelling at the atomic, meso, and continuum scales / A.P. Thompson, et al. // Computer Physics Communications. – 2022. – Vol. 271. – P. 108171. – DOI: 10.1016/j.cpc.2021.108171.
14. Собственные частоты изгибных колебаний углеродных нанотрубок / С.В. Дмитриев, И.Р. Сунагатова, М.А. Ильгамов, И.С. Павлов // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91 (11). – С. 1732–1737.

ON THE ANISOTROPY OF DIFFUSION OF CARBON NANOTUBES IN LIQUIDS

Belkin A.A.[1,2], Machin N.Ya.[1], Molchanova A.E.[1]

[1]*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia*
[2]*Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia*

This article discusses the methodology and results of molecular dynamics simulation of the diffusion of carbon nanotubes in water. The main goals of this work were to study diffusion longitudinal to an axis of the nanotube and transverse to this axis and determine the velocity autocorrelation functions and diffusion coefficients in these directions. The interaction of water molecules with each other was described by the Lennard-Jones potential, and that of carbon nanotube molecules by the AIREBO potential. The diameters of the nanotubes were 1.15 and 1.44 nanometers, their length varied from 5 to 15 nanometers. The number of water molecules in the simulation cell reached one hundred thousand. It is shown that the nanotube center of mass velocity autocorrelation function in the longitudinal direction decays much more slowly than in the transverse direction. The corresponding values of the diffusion coefficients differ by a factor of 2–4; this difference increases with increasing ratio of the nanotube length to its diameter. The directionally averaged diffusion coefficients of flexible nanotubes decrease with increasing nanotube length. Its values exceed the corresponding values for their solid analogues. A nonmonotonic decay of the nanotubes center of mass velocity autocorrelation function was discovered. The characteristic time between the maxima of this function coincides with the period of bending vibrations of the nanotube.

Key words: diffusion, carbon nanotubes, anisotropy, molecular dynamics simulation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-7-17

REFERENCES

1. Kolmakov A.G., Barinov S.M., Alymov M.I. *Osnovy tekhnologii i primenenie nanomaterialov* [Fundamentals of technology and application of nanomaterials]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 208 p.
2. Saeed Ê., Ibrahim Ê. Carbon nanotubes–properties and applications: a review. *Carbon Letters*, 2013, vol. 14 (3), pp. 131–144. DOI: 10.5714/CL.2013.14.3.131.
3. Lozovik Yu.E., Popov A.M. Formation and growth of carbon nanostructures – fullerenes, nanoparticles, nanotubes and cones. *Physics-Uspekhi*, 1997, vol. 40 (7), pp. 717–737. DOI: 10.1070/pu1997v040n07abeh000253. Translated from *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1997, vol. 167 (7), pp. 751–774.
4. Judkins J., Lee H.H., Tung S., Kim J.W. Diffusion of single-walled carbon nanotube under physiological conditions. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 2013, vol. 9 (6), pp. 1065–1070. DOI: 10.1166/jbn.2013.1527.
5. Rudyak V.Ya., Tretiakov D.S. On diffusion of single-walled carbon nanotubes. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2020, vol. 27, pp. 847–855. DOI: 10.1134/S0869864320060062.
6. Heerman D.W. *Computer simulation methods in theoretical physics*. Springer, 1986. 148 p. (Russ. ed.: Kheerman D.V. *Metody komp'yuternogo eksperimenta v teoreticheskoi fizike*. Moscow, Nauka Publ., 1990. 176 p.).
7. Rapaport D.C. *The art of molecular dynamics simulation*. New York, Cambridge University Press, 2004. 549 p.
8. Rudyak V.Ya., Kharlamov G.V., Belkin A.A. Diffusion of nanoparticles and macromolecules in dense gases and liquids. *High Temperature*, 2001, vol. 39 (2), pp. 264–271. DOI: 10.1023/A:1017578917614.
9. Mejía-Rosales S., Sandoval-Salazar S.A., Soria-Sánchez A., Cantú-Sánchez L.Y. Mechanical properties of MoS_2 nanotubes under tension: a molecular dynamics study. *Molecular Simulation*, 2021, vol. 47 (6), pp. 471–479. DOI: 10.1080/08927022.2021.1880577.

10. Dong R., Cao B. Investigation of rotational diffusion of a carbon nanotube by molecular dynamics. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2015, vol. 15, pp. 2984–2988. DOI: 10.1166/jnn.2015.9678.
11. Belkin A.A., Rudyak V.Ya., Krasnolutskii S.L. Molecular dynamics simulation of carbon nanotubes diffusion in water, molecular simulation. *Molecular Simulation*, 2022, vol. 48, pp. 752–759. DOI: 10.1080/08927022.2022.2053119.
12. H¨unenberger P.H. Thermostat algorithms for molecular dynamics simulations. *Advances in Polymer Science*, 2005, vol. 173, pp. 105–149. DOI: 10.1007/b99427.
13. Thompson A.P., et al. LAMMPS – a flexible simulation tool for particle-based materials modelling at the atomic, meso, and continuum scales. *Computer Physics Communications*, 2022, vol. 271, p. 108171. DOI: 10.1016/j.cpc.2021.108171.
14. Dmitriev S.V., Sunagatova I.R., Ilgamov M.A., Pavlov I.S. Natural frequencies of bending vibrations of carbon nanotubes. *Technical Physics*, 2022, vol. 67, pp. 7–13. DOI: 10.1134/S1063784222010042. Translated from *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 2021, vol. 91 (11), pp. 1732–1737.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Белкин Александр Анатольевич – родился в 1969 году, д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической механики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). Области научных интересов: неравновесная статистическая механика процессов переноса в дисперсных жидкостях, включая наножидкости, микро- и нанотечения жидкостей, моделирование методом молекулярной динамики. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113. E-mail: a.belkin@sibstrin.ru).

Belkin Alexandr Anatolievich (b. 1969) – Doctor of Sciences (Phys. & Math.), Associate Professor, Head of the Theoretical Mechanics department, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. His research interests are currently focused on nonequilibrium statistical mechanics of transport processes in dispersed fluids, including nanofluids, micro and nanoflows, molecular dynamics simulations. He is author of more than 100 scientific papers. (Address: 113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russia. E-mail: a.belkin@sibstrin.ru).

Мачин Никита Яковлевич – родился в 2002 году, студент Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) по специальности «Информационные системы и технологии». Область научных интересов: моделирование методом молекулярной динамики. (Адрес: 630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113. E-mail: n.machin@sibstrin.ru).

Machin Nikita Yakovlevich (b. 2002) – Student of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, specializing in information systems and technologies. Research interests: molecular dynamics simulations. (Address: 113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russia. E-mail: n.machin@sibstrin.ru).

Молчанова Алена Евгеньевна – родилась в 2002 году, студентка Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) по специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений». Область научных интересов: моделирование методом молекулярной динамики, процессы переноса в наножидкостях. (Адрес: 630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113. E-mail: alyona20020114@gmail.com).

Molchanova Alena Evgenievna (b. 2002) – Student of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, specializing in the construction of unique buildings and structures. Research interests: molecular dynamics simulation, transport processes in nanofluids. (Address: 113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russia. E-mail: alyo-na20020114@gmail.com).

Статья поступила 17 октября 2023 г.
Received October 17, 2023[†]

To Reference:

Belkin A.A., Machin N.Ya., Molchanova A.E. Ob anizotropii diffuzii uglerodnykh nanotrubok v zhidkosti [On the anisotropy of diffusion of carbon nanotubes in liquids]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 4 (61), pp. 7–17 . DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-7-17.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2023 октябрь–декабрь № 4 (61)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.396.7

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ НА ЛИНИЮ ВВЕРХ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА*

Б.М. Антипин, Е.М. Виноградов, Е.И. Туманова
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Рассматривается метод оценки влияния непреднамеренных помех, создаваемых стационарными наземными радиоэлектронными средствами, содержащими радиопередающие устройства, на прием сигналов, передаваемых по линии вверх канала радиоуправления беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Полезный сигнал, поступающий с пульта управления в радиоприемник БПЛА, является сигналом с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Мешающие сигналы имеют непрерывную несущую частоту. Предполагается, что траектория движения БПЛА известна, выбраны точки траектории, в которых осуществляется анализ влияния помех на прием полезного сигнала по линии вверх канала радиоуправления БПЛА, и определена область на поверхности земли, в которой находятся передатчики, источники возможных помех. Известны координаты этих передатчиков, параметры их излучений и пространственное расположение диаграмм направленности их антенн. Поскольку мощность мешающих сигналов, поступающих в приемник БПЛА, зависит от того, как взаимодействуют диаграммы направленности антенны приемника БПЛА и мешающего передатчика (боковыми или главными лепестками диаграмм направленности), предложен способ определения этого взаимодействия. Для оценки качества принимаемого полезного сигнала в условиях действия непреднамеренных помех применяется защитное отношение. Метод реализован в виде процедуры, результаты которой могут быть использованы при планировании полетов гражданских БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, канал радиоуправления, линия вверх, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, непреднамеренные помехи, защитное отношение.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-18-33

Введение

Развитие техники приводит к тому, что человека все больше заменяют технические устройства, управляемые дистанционно с помощью специализированных программных средств. К числу таких устройств относятся беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Современные БПЛА приобретают все большую значимость в решении многих народнохозяйственных задач [1–5]. Гражданские БПЛА решают, например, такие задачи, как доставка товара, наблюдение подстилающей поверхности, аэрофотосъемка выбранных участков местности, видеосъемка, проведение воздушного наблюдения за состоянием удаленных и труднодоступных объектов (нефте- и газопроводов, линий электропередач и пр.), геолокация, охрана. При решении этих задач БПЛА могут испытывать непреднамеренные помехи со стороны других радиоэлектронных средств (РЭС). Однако вопросам, связанным с анализом качества работы гражданских БПЛА в условиях непреднамеренных помех со стороны других гражданских РЭС, почти не уделяется внимания. Данная работа направлена на то, чтобы несколько заполнить этот пробел.

Исследование выполнено в рамках выполнения прикладных научных исследований по государственному заданию СПбГУТ на 2023 год, регистрационный номер 123060900012-6 в ЕГИСУ НИОКТР.

© 2023 Антипин Б.М., Виноградов Е.М., Туманова Е.И.

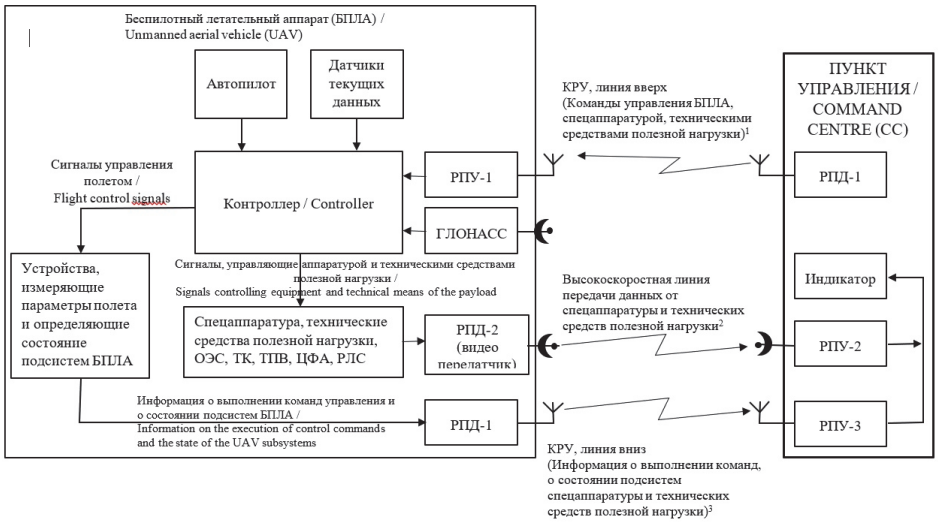


Рис. 1 – Упрощенная структура рассматриваемого БПЛА, пункта управления и каналов связи между ними:

КРУ – канал радиоуправления / radio control channel (RCC); ОЭС – оптико-электронные средства / optical-electronic means; ТК – телевизионная камера / television camera; ТПВ – тепловизионная камера / thermal imaging camera; ЦФА – цифровой фотоаппарат / digital camera

Fig. 1 – Simplified structure of the overview of the UAV, command centre and communication channels between them:

RCC, up line (UAV control commands, special equipment, payload technical means); High-speed data transmission line from special equipment and payload technical equipment; RCC, line down (Information on the execution of commands, on the status of special equipment subsystems and payload hardware)

Управление работой БПЛА происходит с пункта управления (ПУ). Упрощенная структурная схема БПЛА – ПУ представлена на рис. 1. В состав БПЛА и ПУ входят радиоприемные устройства (РПУ) и радиопередатчики (РПД). В частности, на борту БПЛА находится радиоприемное устройство, обозначенное на рис. 1 как РПУ-1, которое является составной частью канала радиоуправления (КРУ) (линия «вверх»), по которому на борт БПЛА поступают команды управления полетом, а также команды управления работой специальной аппаратуры и средствами полезной нагрузки. В структуру БПЛА входят два передатчика (РПД-1 и РПД-2), один из которых является составной частью высокоскоростной линии передачи данных, полученных со специализированных приборов и средств полезной нагрузки на ПУ, а другой входит в состав линии «вниз» канала радиоуправления. Информация, передаваемая на ПУ по линии «вниз», содержит сведения о результатах выполнения команд, переданных с ПУ, сведения о состоянии подсистем специальной аппаратуры и технических средств полезной нагрузки.

Поскольку БПЛА в канале радиоуправления (линия вверх) содержит радиоприемное устройство с антенной, то наземные передатчики, работающие на частотах близких к частоте этого РПУ или на частотах, совпадающих с рабочей частотой этого РПУ, могут создавать помехи, искажающие информацию, передаваемую на БПЛА по каналу радиоуправления. Это может привести к неправильной работе как системы управления полетом БПЛА, так и специальной аппаратуры, установленной на его борту. Для оценки степени влияния непреднамеренных помех на работу канала управления БПЛА будет использовано защитное отношение. Подобная ситуация требует своего более подробного рассмотрения и анализа.

1. Принятые допущения и обозначения

В качестве источников потенциально опасных излучений для приемника, находящегося на борту БПЛА, рассматриваются только наземные стационарные РЭС, которые располагаются на ограниченной территории и рабочие частоты которых находятся в ограниченной полосе частот. Нелинейные явления в РПУ не рассматриваются. Отбор передатчиков РЭС с потенциально опасными излучениями осуществляется по частоте и расстоянию.

Отбор передатчиков по расстоянию проводится в каждой выбранной точке траектории движения БПЛА, для которой осуществляется анализ. Размеры территории на поверхности земли, которая располагается под этой точкой, задает аналитик, выполняющий анализ. В качестве ориентира для определения границ территории может использоваться расстояние от БПЛА до радиогоризонта или, если известна максимальная ожидаемая мощность наземных стационарных передатчиков вдоль трассы полета БПЛА, расстояние до передатчика, при котором в свободном пространстве передатчик создаст на входе приемника БПЛА уровень сигнала, равный его чувствительности.

Из передатчиков, находящихся на выбранной территории, в качестве потенциально опасных для приема сигнала ППРЧ выберем передатчики, рабочие частоты которых лежат в полосе, занимаемой сигналом ППРЧ, и которые располагаются в пределах не более двух каналов от частот, составляющих сигнал ППРЧ. Излучения передатчиков на этих частотах подлежат исследованию на предмет создания недопустимого уровня помех в структуре ПУ – БПЛА.

Индексы параметров и переменных, используемые в расчетах, указывают, к какому устройству или объекту относится данный параметр или переменная, а именно:

T – параметр или переменная относится к передатчику;

R – параметр или переменная относится к приемнику;

ЛА – параметр или переменная относится к беспилотному летательному аппарату;

ПУ – параметр или переменная относится к пункту управления;

РЭС – параметр или переменная относится к радиоэлектронному средству.

Значение других индексов в расчетных формулах поясняется по мере их появления.

Местоположение рассматриваемых радиосредств описывается в декартовой системе координат (x, y, h) с ПУ в начале координат $(0, 0, h_{\text{ПУ}})$. Координата h соответствует высоте антенны, используемой рассматриваемым прибором или объектом.

Параметры диаграмм направленности антенн представлены в сферической системе координат.

2. Процедура вычислений

На первом шаге выбирают размеры области, в которой будут отобраны наземные стационарные РЭС, излучения которых могут снижать качество сигналов в канале управления БПЛА. Далее на намеченной траектории движения БПЛА выбирают точки, в которых будет выполнена оценка влияния излучений наземных стационарных РЭС на прием полезного сигнала приемником БПЛА (приемник РПУ-1 на рис. 1). Максимальный шаг между точками не превышает размера выбранной области вдоль траектории движения БПЛА.

Частотный отбор учитывает специфику сигнала, который используется в линии вверх КРУ. Обычно это сигнал с псевдослучайной перестройкой рабочей

частоты (сигнал ППРЧ). Обозначим B_S ширину полосы полезного сигнала, поступающего на вход приемника БПЛА,

$$B_S = f_{\max} - f_{\min},$$

где $f_{\max}$ и $f_{\min}$ – граничные частоты B_S. Если эту полосу занимают M каналов сигнала ППРЧ, то ширина полосы B_R, занимаемая одним каналом (с учетом защитных интервалов), составляет

$$B_R = B_S \ / \ M$$

с центральными частотами, по которым происходит перестройка:

$$f_j = f_{\min} + (j + 1/2)B_R, \qquad j = 0, 1, 2, \ldots, (M-1).$$

В процессе частотного отбора определяем передатчики стационарных наземных РЭС, частоты которых f_i отличаются от f_j не более чем на 2,5 B_R:

$$\Delta f_{ij} = \ | f_i - f_j | \le 2{,}5 B_R, \tag{1}$$

Выражение (1) позволяет сформировать множество сигналов РЭС с частотами f_i и элементов полезного сигнала с частотами f_j, для качественного приема которых сигналы РЭС представляют потенциальную опасность. Отобранные частоты f_i подлежат дальнейшему анализу на предмет их действительного влияния на прием выделенных элементов и полезного сигнала в целом. Ниже рассмотрим анализ для одной частоты f_i, поскольку для других f_i он проходит аналогично.

В качестве критерия, определяющего степень опасности помехи, используется защитное отношение, представляющее минимальное отношение сигнал/помеха на входе приемника $(S/I)_{\text{защ}}$, дБ, при котором еще обеспечивается требуемое качество приема полезного сигнала.

При использовании защитного отношения необходимо вычислить мощности сигнала и помехи, приведенные ко входу приемника БПЛА в исследуемой ситуации. Для передатчика РЭС, работающего на частоте f_i, эквивалентная мощность мешающего сигнала $I(f_{0R})$, дБм, приведенная ко входу приемника на частоте его настройки f_{0R} в полосе пропускания приемника при условии, что разность частот передатчика РЭС f_i и элемента ППРЧ сигнала, имеющего частоту f_i, удовлетворяет неравенству (1), составляет

$$I(f_{0R}) = P_T(f_i) + G_{TR}(f_i) + G_{RT}(f_i) - L(f_i) - \gamma - CF(\Delta f_{ij}), \tag{2}$$

здесь $P_T(f_i)$ – мощность передатчика РЭС на частоте f_i, дБм; $G_{TR}(f_i)$, $G_{RT}(f_i)$ – коэффициенты усиления антенн на частоте f_i соответственно, антенны передатчика в направлении на приемник и антенны приемника в направлении на передатчик, дБи; $L(f_i)$ – потери в пространстве распространения на частоте f_i, дБ; γ – потери из-за несовпадения поляризаций приходящей электромагнитной волны и приемной антенны, дБ; $CF(\Delta f_{ij})$ – коэффициент частотной коррекции, учитывающий ослабление помехи из-за ее отстройки от частоты полезного сигнала (1) и возможное превышение шириной спектра помехи ширины полосы пропускания приемника, дБ.

Если помеху данному элементу сигнала создают излучения нескольких передатчиков, то мощность суммарной помехи получают суммированием приведенных ко входу приемника мощностей одиночных передатчиков.

Для полезного сигнала, учитывая, что в этом случае можно положить $\gamma = 0$, $CF(\Delta f_{ij}) = 0$, а коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника имеют максимальное значение, соответственно G_{0T} и G_{0R}, уравнение (2) приобретает вид

$$S(f_{0R}) = P_T(f_{0R}) + G_{0T} + G_{0R} - L(f_{0R}), \quad (3)$$

где f_{0R} – центральная частота полезного сигнала, принимаемого приемником.

В уравнениях (2) и (3) напрямую не указаны омические потери в антенно-фидерных трактах (АФТ) и потери рассогласования сопротивления антенн и их нагрузок. Предполагаем, что они включены в коэффициенты усиления антенн.

Остановимся на вычислении мощности помехи с использованием выражения (2). Мощность мешающего передатчика на его рабочей частоте определена в исходных данных задачи. Важным моментом анализа является определение коэффициентов усиления антенн в требуемых направлениях: усиления антенны передатчика рассматриваемого РЭС в направлении на БПЛА и усиления антенны приемника БПЛА в направлении рассматриваемого РЭС.

Диаграмма направленности антенны (ДНА) разбивается на две области: область главного лепестка (ГЛ) и область боковых лепестков (БЛ), куда включена и задняя полусфера. В угловом выражении область ГЛ определена шириной ДНА по уровню –3дБ. Учитывая относительно узкую полосу частот, в которой рассматриваются потенциально опасные передатчики, определенную выражением (1), коэффициент усиления антенны РПУ БПЛА в этой области принимаем равным максимальному значению усиления G_{0R}, указанному в спецификации антенны, с учетом принятых омических потерь в АФТ и на рассогласование. То же относится к антеннам передатчиков наземных РЭС. В области ГЛ их коэффициенты усиления определены значениями, приведенными в спецификациях на соответствующие антенны. Остальная область ДНА – это область БЛ. Здесь коэффициент усиления принимается равным среднему значению в этой области m_G плюс его среднеквадратическое отклонение σ_G. Значения m_G и σ_G представлены в табл. 1 [6, 7]. Переходной областью от ГЛ к БЛ в этой модели ДНА пренебрегаем.

Таблица 1 / Table 1

Статистические параметры антенн в области бокового усиления

Statistical parameters of antennas in the lateral gain region

Коэффициент усиления антенны / Antenna gain factor	Частота / Frequency	Поляризация / Polarization	m_G, дБи	σ_G, дБ
$G_0 > 25$ дБи	Рабочая / Operating frequency	Любая / Any	–10	14
	Побочная / Side emission			
$10 < G_0 \le 25$ дБи	Рабочая / Operating frequency	Рабочая / п	–10	11
		Ортогональная / Orthogonal	–20	13
	Побочная / Side emission	Любая / Any polarization	–10	10
$G_0 \le 10$ дБи	Рабочая / Operating frequency	Рабочая / Worker	0	6
		Ортогональная / Orthogonal	–13	8
	Побочная / Side emission	Любая / Any	–3	6

Уравнение (2) показывает, что мощность помехи на входе приемника зависит от областей взаимодействия диаграмм направленности приемной и передающей антенн. Поэтому важным этапом при оценке мощности является определение областей взаимодействия этих ДНА.

На рис. 2 представлен один из вариантов взаимного расположения ПУ, БПЛА и РЭС, возможного источника помехи в линии вверх КРУ. Если отобрано несколько РЭС, оценка областей взаимодействия ДНА БПЛА и РЭС проводится для каждого РЭС отдельно.

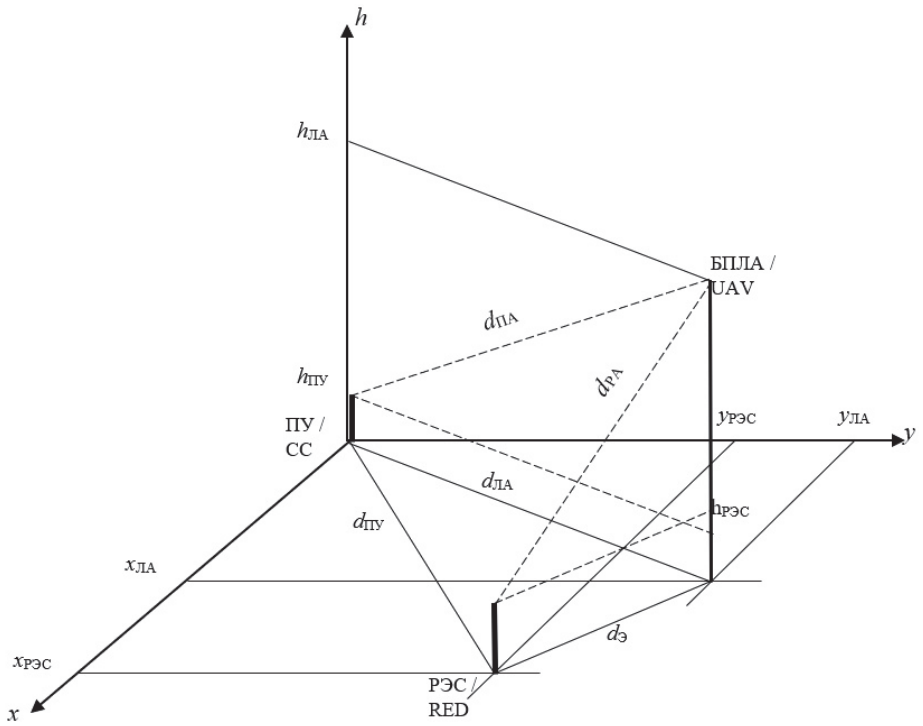


Рис. 2 – Вариант расположения ПУ БПЛА, РЭС и координаты их антенн

Fig. 2 – Option for the location of the UAV Control Center, RED and coordinates of their antennas

Исходные данные, описывающие антенну и ее ДНА и используемые для определения областей взаимодействия диаграмм направленности антенн РЭС и БПЛА, включают:

– азимутальное направление ГЛ ДНА, φ: $0° \le \varphi \le 360°$;

– угломестное направление ГЛ ДНА, θ: $-90° \le \theta \le 90°$;

– ширину ГЛ ДНА в горизонтальной плоскости α;

– ширину ГЛ ДНА в вертикальной плоскости β;

– координаты местоположения антенн (x, y, h).

Угол φ отсчитывается от оси x, а θ – от плоскости $x0y$.

Расстояние $d_Э$ между РЭС и БПЛА на плоскости $x0y$:

$$d_Э = \sqrt{(x_{ЛА} - x_{РЭС})^2 + (y_{ЛА} - y_{РЭС})^2}\ .$$

Определение областей взаимодействия ДНА РЭС и БПЛА

Главный лепесток ДНА передатчика или приемника направлен на интересующий объект, если линия, соединяющая антенну с объектом, лежит в пределах главного лепестка диаграмм направленности антенны как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Если эта линия находится за пределами ГЛ хотя бы одной из указанных диаграмм, то ДНА направлена на объект боковым лепестком. Угол, под которым в вертикальной плоскости из точки расположения РЭС виден БПЛА, определяет выражение (рис. 3):

$$\Delta_{\text{РЭС}} = \left[\operatorname{arctg}\left(\frac{h_{\text{ЛА}} - h_{\text{РЭС}}}{d_{\text{Э}}} \right) \right]. \tag{4}$$

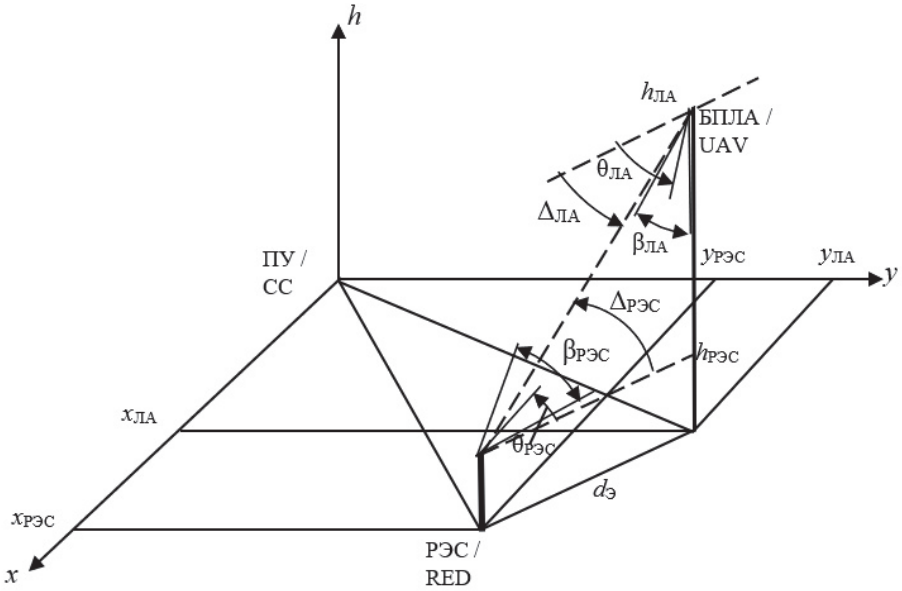


Рис. 3 – Определение областей взаимодействия ДНА РЭС и БПЛА в вертикальной плоскости

Fig. 3 – Determination of interaction areas between the RED ARP and the UAV in the vertical plane

Учитывая принятое правило отсчета углов в угломестной плоскости, угол в вертикальной плоскости, под которым из точки расположения БПЛА видно РЭС, определяется как

$$\Delta_{\text{ЛА}} = -\,\Delta_{\text{РЭС}}. \tag{5}$$

Теперь, если $\alpha_{\text{РЭС}} = 360°$ и выполняется неравенство

$$\theta_{\text{РЭС}} - \beta_{\text{РЭС}} / 2 \le \Delta_{\text{РЭС}} \le \theta_{\text{РЭС}} + \beta_{\text{РЭС}} / 2, \tag{6}$$

то ГЛ ДНА РЭС направлен на БПЛА. Если неравенство (6) не выполняется, то ДНА РЭС направлена на БПЛА боковым лепестком.

Поскольку ДНА БПЛА и ПУ направлены друг на друга главными лепестками, то

$$\theta_{ПУ} = \left[\operatorname{arctg}\left(\frac{h_{ЛА} - h_{ПУ}}{d_{ЛА}} \right) \right];$$

$$d_{ЛА} = \sqrt{x_{ЛА}^2 + y_{ЛА}^2};$$

$$\theta_{ЛА} = -\,\theta_{ПУ}.$$

Если $\alpha_{ЛА} = 360°$ и выполняется неравенство

$$\theta_{ЛА} - \beta_{ЛА}/2 \le \Delta_{ЛА} \le \theta_{ЛА} + \beta_{ЛА}/2, \tag{7}$$

то ГЛ ДНА РПУ БПЛА направлен на РЭС. Если неравенство (7) не выполняется, то на РЭС направлен боковой лепесток ДНА РПУ БПЛА.

На рис. 4 представлено расположение проекций антенн объектов, приведенных на рис. 2, и главных лепестков диаграмм направленности РЭС и БПЛА в плоскости $x0y$. В дальнейшем для разного взаимного положения будет использоваться угол, обозначенный на рис. 4 как ψ_1, значение которого, как следует из рисунка, определяется как

$$\psi_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_{ЛА} - y_{РЭС}}{x_{ЛА} - x_{РЭС}} \right). \tag{8}$$

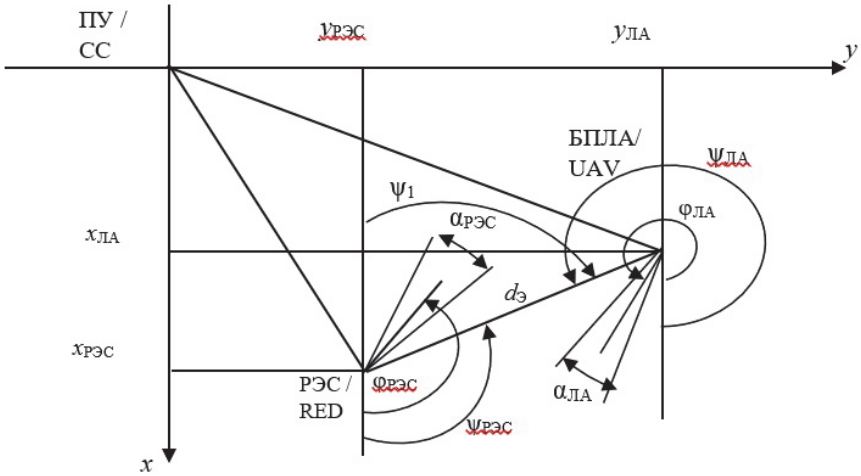


Рис. 4 – Определение областей взаимодействия ДНА РЭС и БПЛА в горизонтальной плоскости

Fig. 4 – Determination of interaction areas between the RED ARP and the UAV in the horizontal plane

Рассмотрим процедуру определения области ДНА РЭС, направленной на БПЛА для этого случая. В данном частном случае угол $\psi_{РЭС}$, определяющий направление от РЭС на БПЛА, учитывая, что, как следует из (8) и принятого направления отсчета углов в плоскости $x0y$, $\psi_1 < 0$, имеет значение

$$\psi_{РЭС} = 180° + \psi_1.$$

Теперь, если удовлетворяется неравенство

$$\varphi_{РЭС} - \alpha_{РЭС} / 2 \le \psi_{РЭС} \le \varphi_{РЭС} + \alpha_{РЭС} / 2 \quad (9)$$

и неравенство (6), то ГЛ ДНА РЭС направлен на БПЛА. Если хотя бы одно из указанных неравенств не удовлетворяется, то на БПЛА направлен боковой лепесток ДНА РЭС.

Что касается направления БПЛА – РЭС, то, как следует из рис. 4,

$$\psi_{ЛА} = 360° + \psi_1.$$

Если в это или в последующие выражения вида $360° + \psi_1$ будет входить $\psi_1 \ge 0$, то результат следует считать равным ψ_1.

С другой стороны, ГЛ ДНА БПЛА всегда направлен на ПУ. Рассматривая ПУ как РЭС с координатами $x_{РЭС} = y_{РЭС} = 0$, найдем для этого случая из (8):

$$\psi_1 = \mathrm{arctg}\,(y_{ЛА} / x_{ЛА});$$

$$\varphi_{ЛА} = 180° + \psi_1, \text{ если } x_{ЛА} > 0;$$

$$\varphi_{ЛА} = 360° + \psi_1, \text{ если } x_{ЛА} < 0.$$

Теперь, если удовлетворяется неравенство

$$\varphi_{ЛА} - \alpha_{ЛА} / 2 \le \psi_{ЛА} \le \varphi_{ЛА} + \alpha_{ЛА} / 2 \quad (10)$$

и неравенство (6), то ГЛ ДНА РПУ БПЛА направлен на РЭС. Если хотя бы одно из указанных неравенств не удовлетворяется, то на РЭС направлен боковой лепесток ДНА РПУ БПЛА.

Аналогично рассмотренному примеру можно провести оценку углов $\psi_{РЭС}$ и $\psi_{ЛА}$ для других ситуаций. Результаты оценки представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Углы в плоскости *x0y*, определяющие положение отрезка РЭС – БПЛА

Angles in the x0y plane that determine the position of the RED - UAV segment

Положение объектов на оси *x* / Position of objects on the x-axis	Направление / Direction	
	РЭС – БПЛА / RED – UAV	БПЛА – РЭС / UAV – RED
$x_{РЭС} < x_{ЛА}$	$\psi_{РЭС} = 360° + \psi_1$	$\psi_{ЛА} = 180° + \psi_1$
$x_{РЭС} > x_{ЛА}$	$\psi_{РЭС} = 180° + \psi_1$	$\psi_{ЛА} = 360° + \psi_1$

Для любого положения РЭС и БПЛА, удовлетворяющего условиям первого столбца табл. 2, уравнения (4), (5) и (8) и выполнение или невыполнение неравенств (6), (7), (9) и (10) определяют области взаимодействия диаграмм направленности антенн передатчика РЭС и приемника БПЛА.

Особые случаи взаимного положения рассматриваемых объектов представляют ситуации, когда совпадают одна или две координаты местоположения РЭС и БПЛА, кроме высоты. В случае, когда $x_{РЭС} = x_{ЛА}$ и $y_{РЭС} = y_{ЛА}$, для рассматриваемого типа средств имеет место взаимодействие обеих ДНА по боковым лепесткам. Для других ситуаций по значениям углов $\psi_{РЭС}$ и $\psi_{ЛА}$ области взаимо-

действия диаграмм направленности определяют так, как это происходит с параметрами, представленными в табл. 2. Значения $\psi_{РЭС}$ и $\psi_{ЛА}$ для этих ситуаций приведены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Особые случаи взаимного положения РЭС и БПЛА

Special cases of mutual position of RED and UAV

Положение объектов / Position of objects							
$x_{РЭС} = x_{ЛА}$				$y_{РЭС} = y_{ЛА}$			
$y_{РЭС} < y_{ЛА}$		$y_{РЭС} > y_{ЛА}$		$x_{РЭС} < x_{ЛА}$		$x_{РЭС} > x_{ЛА}$	
$\psi_{РЭС} = 90°$	$\psi_{ЛА} = 270°$	$\psi_{РЭС} = 270°$	$\psi_{ЛА} = 90°$	$\psi_{РЭС} = 0°$	$\psi_{ЛА} = 180°$	$\psi_{РЭС} = 180°$	$\psi_{ЛА} = 0°$

Заметим, что $\varphi_{РЭС}$ является исходным данным при проведении расчетов, связанных с определением области ДНА РЭС, направленной на БПЛА. Значение $\varphi_{ЛА}$, используемое для определения области ДНА РПУ БПЛА, направленной на РЭС, рассчитывается по приведенным выше формулам, поскольку ГЛ ДНА РПУ БПЛА всегда направлен на ПУ для приема полезного сигнала

Потери в пространстве распространения между антеннами РЭС, ПУ и антенной приемника БПЛА зависят от расстояния между объектами и частоты сигналов, поступающих на вход РПУ БПЛА. Как следует из графиков, приведенных в [8], погонное затухание электромагнитных волн в газах атмосферы в области частот 5..6 ГГц составляет от 0,01 до 0,03 дБ/км и убывает с уменьшением частоты. Учитывая, что в современных гражданских БПЛА используются частоты, не превышающие 6 ГГц, а дальность передачи сигналов распространенных БПЛА общего пользования в открытом пространстве по требованиям Совета Европы составляет 3,5 км, а по требованиям Федеральной комиссии связи (США) она может составлять от 5 до 7 км [9], потерями на трассе, связанными с поглощением электромагнитной энергии в газах атмосферы, можно пренебречь. В качестве модели, определяющей потери на трассе, используется модель свободного пространства, где

$$L(f_{0R}) = 32,4 + 20\lg(f_{0R}) + 20\lg(d_{ПА}) \tag{11}$$

потери на трассе ПУ – БПЛА, дБ, на частоте полезного сигнала f_{0R}, МГц, а $d_{ПА}$ – протяженность трассы ПУ – БПЛА, км (см. рис. 2):

$$d_{ПА} = \sqrt{x_{ЛА}^2 + y_{ЛА}^2 + (h_{ЛА} - h_{ПУ})^2}\ . \tag{12}$$

Потери на трассе РЭС – БПЛА на частоте помехи f_i определяем аналогично:

$$L(f_i) = 32,4 + 20\lg(f_i) + 20\lg(d_{РА}) \tag{13}$$

и

$$d_{РА} = \sqrt{d_Э^2 + (h_{ЛА} - h_{РЭС})^2}\ . \tag{14}$$

В табл. 4 представлены данные о потерях из-за несовпадения поляризационных состояний приемной антенны и поступающих в нее помех [6, 7]. Оценка потерь из-за несовпадения поляризаций антенны приемника и поступающих в нее мешающих сигналов проводится только, если взаимодействие антенн мешающего

передатчика и приемника БПЛА происходит по ГЛ их ДНА. Потери на рассогласование поляризаций в области бокового усиления обычно не рассматривают, поскольку в этой области поляризация может быть совершенно иной, чем по ГЛ ДНА, и обычно она неизвестна.

Таблица 4 / Table 4

Ослабление мешающих сигналов при несовпадении поляризации с приемной антенной

Attenuation of interfering signals when the polarization does not match with the receiving antenna

Поляризация антенны приемника / Receiver antenna polarization		Поляризация антенны источника помехи / Antenna polarization of the interfering source					
		Горизонтальная / Horizontal		Вертикальная / Vertical		Круговая / Circular	
		G_0<10 дБ	G_0<10 дБ	G_0<10 дБ	G_0<10 дБ	левая / left	правая / right
Горизонтальная / Horizontal	G_0<10 дБ	0	0	16	16	3	3
	G_0>10 дБ	0	0	16	20	3	3
Вертикальная / Vertical	G_0<10 дБ	16	16	0	0	3	3
	G_0<10 дБ	16	20	0	0	3	3
Круговая / Circular	Левая / Left	3	3	3	3	0	16
	Правая / Right	3	3	3	3	16	0

Определение коэффициента частотной коррекции $CF(\Delta f_{ij})$ проведем, используя рекомендацию МСЭ [10], представив коэффициент в виде двух слагаемых

$$CF(\Delta f_{ij}) = CF_1 + CF_2(\Delta f_{ij}),$$

где

$$CF_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } B_{Ti} \le B_R; \\ 10\lg(B_{Ti}/B_R), & \text{если } B_{Ti} > B_R \end{cases} \quad (15)$$

и

$$CF_2(\Delta f_{ij}) = D(\Delta f_{ij}).$$

Здесь $D(\Delta f_{ij})$ избирательность приемника, дБ; Δf_{ij} – отстройка i-й частоты помехи от j-й частоты полезного сигнала (1).

В выражении (15) B_{Ti} – ширина полосы частот источника помехи по уровню минус 3 дБ на входе тракта промежуточной частоты (ПЧ) после преобразователя частоты. При использовании БПЛА в линии вверх сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты ширина спектра источника помехи B_{Ti} после смесителя становится равной ширине канала, который занимал полезный сигнал до его сжатия. В этом случае B_R – ширина полосы полезного сигнала после сжатия.

В качестве математической модели избирательности приемника по частоте используется выражение

$$D(\Delta f_{ij}) = \begin{cases} 0, & \left|\Delta f_{ij}\right| \le B_R / 2; \\ \alpha \dfrac{\lg(2\left|\Delta f_{ij}\right| / B_R)}{\lg(\Pi_\alpha)}, & \left|\Delta f_{ij}\right| > B_R / 2, \end{cases} \tag{16}$$

где Π_α – коэффициент прямоугольности характеристики избирательности тракта ПЧ по уровню α, дБ.

Если выражение (16) дает значение больше, чем 100 дБ, то принимаем $D(\Delta f_{ij})$ = 100 дБ.

Как отмечалось ранее, оценка качества принимаемого сигнала проводится с использованием защитного отношения. Если защитное отношение напрямую не задано, но известно минимальное отношение сигнал/помеха, которое требуется на входе демодулятора для получения сигнала заданного качества $(S/I)_{\text{дем}}$, а мощность помехи рассчитана с учетом избирательности тракта, предшествующего демодулятору (уравнение (2)), то это отношение можно рассматривать как защитное отношение.

Используя (2) и (3), найдем значения S и I. Если имеется несколько источников помех, например n, создающих помеху данному элементу сигнала, то, используя (2), найдем значения I_i для каждого i-го источника помех и далее:

$$I = 10\lg\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{I_i/10}\right). \tag{17}$$

Теперь можно найти расчетное значение отношения сигнал/помеха $(S/I)_{\text{расч}}$ ((3)/(17)) и сравнить с защитным отношением $(S/I)_{\text{защ}}$. Если

$$(S/I)_{\text{расч}} = S - I < (S/I)_{\text{защ}}, \tag{18}$$

то помеха недопустимо искажает элемент полезного сигнала, имеющий частоту f_j. Учитывая, что сигнал ППРЧ может на одной частоте передавать один или несколько символов, которые в свою очередь содержат один или несколько бит информации, искажения сигнала могут быть значительными. Несколько помех, разнесенных по частоте, могут привести к поражению нескольких элементов сигнала, имеющих разные частоты, и к недопустимому снижению качества принимаемого сигнала. Информация о допустимом числе пораженных частот полезного ППРЧ сигнала и результатах проведенного анализа может быть использована для принятия решения о возможном применении БПЛА в данной электромагнитной обстановке.

Описанная процедура может быть представлена последовательностью следующих шагов.

1. Выбор местоположения БПЛА на планируемой траектории полета.
2. Определение области на земной поверхности под точкой, где находится БПЛА, в которой рассматриваются РЭС, излучения которых могут представлять помеху для приема сигнала приемником БПЛА.
3. Отбор потенциально опасных РЭС по частотному признаку, используя неравенство (1).

4. Оценка уровня полезного сигнала на входе РПУ БПЛА, используя уравнения (3), (11), (12).

5. Оценка уровня помех, создаваемых РЭС, признанных потенциально опасными по результатам частотного отбора, для чего:

– определяют области взаимодействия ДНА РЭС и РПУ БПЛА (выражения (4)–(10) и табл. 2 и 3);

– оценивают потери на трассах РЭС – БПЛА (уравнения (13), (14));

– определяют коэффициент частотной коррекции, используя (15) и (16);

– рассчитывают уровень мешающего сигнала на входе приемника, используя (2) и табл. 4;

– используя (17), определяют суммарную помеху (при наличии нескольких источников помех).

7. Оценка отношения сигнал/помеха и степени опасности помехи, используя (18).

Последовательно просматривая выбранные точки траектории, определяют качество приема сигналов в канале управления вдоль этой траектории.

Заключение

Предложена процедура, позволяющая оценить работоспособность радиоаппаратуры, размещенной на борту БПЛА, в электромагнитной обстановке, формируемой излучениями стационарных наземных РЭС. В основе лежит допущение, что снижение качества приема полезных сигналов в канале радиоуправления ниже определенного значения (например, роста BER для цифровых сигналов) из-за низкого отношения сигнал/помеха на входе приемника БПЛА в полосе его пропускания, приведет к ошибкам в командах управления полетом БПЛА и запуска бортовой специализированной аппаратуры. Как следствие, к невыполнению поставленной задачи.

Процедура может быть использована при решении более общей задачи анализа электромагнитной совместимости радиосредств БПЛА, пульта управления и наземных РЭС, поскольку, по существу, является составной частью решения этой задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Штаев Д.В.** Анализ технологии управления беспилотными летательными аппаратами // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2019. – Т. 11, № 2. – С. 113–119. – DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2019-2/113-119.
2. **Семенова Л.Л.** Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов // Наука и образование сегодня. – 2018. – № 4 (27). – С. 6–8.
3. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов / В.М. Карташов, В.Н. Олейников, С.А. Шейко, С.И. Бабкин, И.В. Корытцев, О.В. Зубков // Радиотехника. – Харьков, 2018. – № 4 (195). – С. 235–243.
4. Применение коммерческих дронов для выполнения задач МСЭ-R по контролю за использованием спектра. Отчет МСЭ-R SM.2486-0 (06/2021). Серия SM. Управление использованием спектра. – ITU, 2021. – 13 с.
5. **Боев Н.М., Шаршавин П.В., Нигруца И.В.** Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3 (152). – С. 147–158.
6. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып. 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи / сост. Д.Р.Ж. Уайт. – М.: Советское радио, 1977. – 352 с.

7. **Виноградов Е.М.** Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – 301 с.
8. Recommendation ITU-R P.676-13. Attenuation by atmospheric gases and related effects.
9. **Бондарев А.Н., Киричек Р.В.** Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2016. – Т. 4 (4). – С. 13–23.
10. Recommendation ITU-R SM.337-6. Frequency and distance separations.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF UNINTENTIONAL INTERFERENCE ON THE UPLINK OF THE CONTROL CHANNEL OF AN UNMANNED AIRCRAFT

Antipin B.M., Vinogradov E.M., Tumanova E.I.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, Russia

Modern unmanned aerial vehicles (UAVs) are becoming increasingly important in solving many problems, for example, when delivering goods, video recording, conducting aerial monitoring of the condition of remote and hard-to-reach objects, etc. When solving these problems, UAVs may experience unintentional interference from other radio-electronic equipment (RES). Currently, virtually no attention is paid to issues related to the analysis of the quality of operation of civilian UAVs in the presence of unintentional interference from other civil electronic distribution systems. The proposed method is intended to somewhat fill this gap. It is based on the assumption that a decrease in the quality of reception of useful signals in the radio control channel below a certain value due to the low signal-to-noise ratio at the input of the UAV receiver in its bandwidth will lead to errors in the UAV flight control commands and the wrong starting of onboard specialized equipment. The level of the interfering signal delivered to the UAV receiver from a stationary land-based transmitter depends on interaction areas between transmitter and receiver antenna patterns. A method for determining these areas, consisting of main and side lobes of antenna patterns, is proposed. This method can be used to solve the more general problem of analyzing the electromagnetic compatibility of UAV radio stations, control panels and ground-based electronic devices, as it is an integral part of solving this problem.

Keywords: unmanned aerial vehicle, radio control channel, uplink, frequency-hopping spread spectrum, unintentional interference, protection ratio.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-18-33

REFERENCES

1. Shtaev D.V. Analiz tekhnologii upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Analysis of control technology of unmanned aerial vehicles]. *Territoriya novykh vozmozhnostei. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa = The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*, 2019, vol. 11 (2), pp. 113–119. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2019-2/113-119.
2. Semenova L.L. Sovremennye metody navigatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Modern methods of navigation of unmanned aerial vehicles]. *Nauka i obrazovanie segodnya = Science and education today*, 2018, no. 4 (27), pp. 6–8.
3. Kartashov V.M., Oleinikov V.N., Sheiko S.A., Babkin S.I., Korytsev I.V., Zubkov O.V. Osobennosti obnaruzheniya i raspoznavaniya malykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Features of detection and recognition of small unmanned aerial vehicles]. *Radiotekhnika = Radioengineering*, Kharkiv, 2018, no. 4 (195), pp. 235–243. (In Russian).
4. Report ITU-R SM.2486-0 (06/2021). *Use of commercial drones for ITU-R spectrum monitoring tasks*. ITU, 2021.

5. Boev N.M., Sharshavin P.V., Nigruca I.V. Postroenie sistem svyazi bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya peredachi informatsii na bol'shie rasstoyaniya [UAVs communication systems for long-distance information transmittion]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Southem Federal University. Engineering sciences*, 2014, no. 3 (152), pp. 147–158.
6. White D.R.J., comp. *Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv i neprednamerennye pomekhi*. Vyp. 1. *Obshchie voprosy EMS. Mezhsistemnye pomekhi* [Electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment and unintentional interference. Vol. 1]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977. 352 p. (In Russian).
7. Vinogradov E.M. *Analiz elektromagnitnoi sovmestimosti radioelektronnykh sredstv* [Analysis of electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment.]. St. Petersburg, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" Publ., 2010. 301 p.
8. Recommendation ITU-R P.676-13. *Attenuation by atmospheric gases and related effects*.
9. Bondarev A.N., Kirichek R.V. Obzor bespilotnykh letatel'nykh apparatov obshchego pol'zovaniya i regulirovaniya vozdushnogo dvizheniya BPLA v raznykh stranakh [Overview of unmanned aerial apparatus for general use and regulation of air UAV movement in different countries]. *Informa-tsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Telecom IT*, 2016, vol. 4 (4), pp. 13–23.
10. Recommendation ITU-R SM.337-6. *Frequency and distance separations*.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Антипин Борис Маврович – родился в 1955 году, канд. техн. наук, доцент, начальник Научно-исследовательской лаборатории радиоконтроля и электромагнитной совместимости, доцент кафедры телевидения и метрологии, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: обработка сигналов в системах радиосвязи для решения задач обеспечения электромагнитной совместимости и мониторинга использования радиочастотного ресурса. Опубликовано 46 научных работ. (Адрес: 194223, Россия, Санкт-Петербург, ул. Жака Дюкло, 8. E-mail: boris_antipin@mail.ru).

Antipin Boris Mavrovich (b. 1955) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory of Radio Monitoring and Electromagnetic Compatibility, Associate Professor of the Department of Television and Metrology, SUT. His research interests are currently focused on signal processing in radio communication systems to solve problems of ensuring electromagnetic compatibility and monitoring the use of radio frequency resources. He is author of 46 scientific papers. (Address: 8, Jak Duklo Street, Saint-Petersburg, 194223, Russia Federation. E-mail: boris_antipin@mail.ru).

Виноградов Евгений Михайлович – родился в 1936 году, канд. техн. наук, доцент, Научно-исследовательская лаборатория «Радиоконтроль и электромагнитная совместимость», СПбГУТ. Область научных интересов: электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Опубликовано 107 научных работ. (Адрес: 198205, Россия, Санкт-Петербург, ул. Партизана Германа, 18. E-mail: vinog1936@mail.ru).

Vinogradov Evgenii Mihailovich (b. 1936) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Research Laboratory of Radio Monitoring and Electromagnetic Compatibility SPbSUT. His research interests are currently focused on electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment. He is author of 108 scientific papers. (Address: 18, Partizan German Street, Saint-Petersburg, 198205, Russia. E-mail: vinog1936@mail.ru).

Туманова Евгения Ивановна – родилась в 1987 году, канд. техн. наук, доцент, кафедра телевидения и метрологии, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: иммерсивная реальность, ольфакторная модальность, генеративная графика. Опубликовано 35 научных работ. (Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, ул. Пулковская, 6. E-mail: evjeny@gmail.com).

Tumanova Evgeniya Ivanovna (b. 1987) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor of the Department of Television and Metrology, SUT. Her research interests are currently focused on immersive reality, olfactory modality, generative graphics. She is author of 35 scientific papers. (Address: 6, Pulkovskaya Street, Saint-Petersburg, 196158, Russia. E-mail: evjeny@gmail.com).

Статья поступила 26 сентября 2023 г.
Received September 26, 2023

To References:

Antipin B.M., Vinogradov E.M., Tumanova E.I. Otsenka vliyaniya neprednamerennykh pomekh na liniyu vverkh kanala upravle niya bespilotnogo letatel'nogo apparata [Assessment of the impact of unintentional interference on the uplink of the control channel of an unmanned aircraft]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 4 (61), pp. 18–33. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-18-33.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2023 октябрь–декабрь № 4 (61)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.396.96

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ УСТАНОВКИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ В МАТРИЧНЫХ ИМИТАТОРАХ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКИ

А.В. Киселев, А.В. Таюров
Новосибирский государственный технический университет

Рассмотрены оценки погрешности установки углового положения кажущегося центра излучения матричным имитатором, являющиеся, по сути, его систематической ошибкой. Показано, что причиной возникновения ошибки является замещение моделируемого точечного излучателя несколькими точками. Получены аналитические соотношения, позволяющие по характеристикам матричного имитатора и диаграммы направленности приемной антенны, работающей с матричным имитатором радиотехнической системы, рассчитать величину систематической ошибки пеленгации. Показано, что рассматриваемая ошибка полностью определяется нелинейностью пеленгационной характеристики антенны. Установлено, что ошибка наиболее существенна при имитации кажущегося центра излучения за пределами матрицы. Для области внутри матрицы получены зависимости максимальных значений ошибок и их угловых положений от формы диаграммы направленности антенны и задаваемого положения точки излучения. Получены соотношения, позволяющие оценивать ошибки в зависимости от соотношения угловых размеров матрицы, ширины диаграммы направленности антенны и коэффициентов аппроксимации ее диаграммы направленности. Достоверность полученных результатов подтверждена путем сравнения с результатами, полученными путем численного моделирования. Результаты работы могут быть использованы для решения прикладных задач, связанных с разработкой матричных имитаторов и имитационных комплексов на их основе, а также для прогнозирования их точностных характеристик.

Ключевые слова: матричный имитатор, систематическая ошибка, установка углового положения, кажущийся центр излучения, имитационное моделирование, двухточечная модель, радиопеленгация.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-34-44

Введение

Ключевым вопросом при имитационном моделировании радиоэлектронной обстановки является достоверность воспроизведения реальной ситуации. В свою очередь она во многом определяется точностью установки параметров сигналов и помех, создаваемых имитатором. В частности, при имитации объектов, перемещающихся по угловым координатам, точностью установки их текущего углового положения. Это в полной мере относится и к так называемым матричным имитаторам (МИ) [1] – [3], преобразующим моделируемые сигналы и помехи в электромагнитные поля, имеющие заданное направление прихода к антенне испытуемой радиоэлектронной системы.

На рис. 1 схематично показан простейший МИ, состоящий из двух излучателей, где $2L$ – линейное расстояние между излучателями МИ (база МИ); R – расстояние от МИ до фазового центра антенны исследуемой системы; α_0, δ – угловое положение оси ДНА и излучателя МИ соответственно; $X_{\text{КЦИ}}$ – линейное положение КЦИ; $2\alpha_{0.5}$ – ширина диаграммы направленности (ДНА) антенны системы по уровню половинной мощности.

© 2023 Киселев А.В., Таюров А.В.

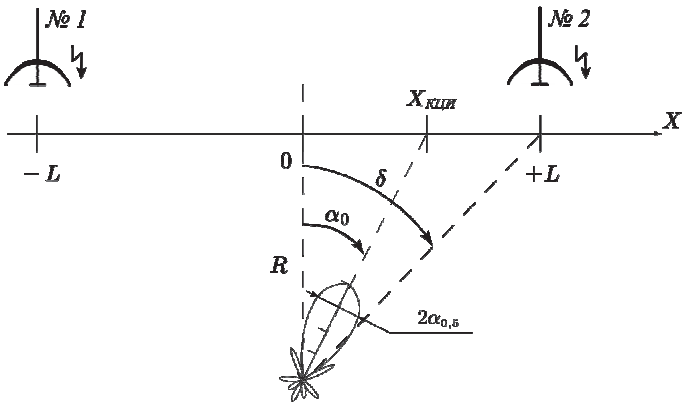


Рис. 1 – Матричный имитатор точечных объектов

Fig. 1 – Matrix simulator of point objects

Излучатели МИ ДНА не разрешаются и воспринимаются как одна излучающая точка, называемая кажущимся центром излучения (далее КЦИ). Его угловое положение (ξ) определяется амплитудами и разностью фаз сигналов, подводимых к излучателям МИ [4].

Согласно [4] относительное (безразмерное, нормированное к половине базы МИ) положение КЦИ определяется выражением

$$\xi = \frac{\mathrm{tg}(\alpha_0)}{\delta} \approx \frac{1 - z_0^2}{1 + 2z_0 \cos\psi + z_0^2}, \qquad (1)$$

где $z_0 = A_1 / A_2$; ψ – отношение нормированных амплитуд и разность начальных фаз сигналов, подводимых к излучателям, пересчитанные в точку расположения фазового центра приемной антенны.

Для установки заданного положения A_1 и A_2 должны удовлетворять условию (для $A_1 + A_2 = 1$ и синфазных сигналов $(\psi = 0)$, при которых имеют место наименьшие искажения диаграммы направленности антенны [5]):

$$A_1 = \frac{1-\xi}{2}, \qquad A_2 = \frac{1+\xi}{2}.$$

Тогда подводимый к МИ сигнал распределяется между излучателями в соответствии с весами:

$$\dot{S}_1 = A_1, \; \dot{S}_2 = A_2 e^{-j\psi}.$$

1. Постановка задачи

По сути, при использовании МИ точечный объект замещается системой, состоящей как минимум из двух излучателей, разнесенных по угловой координате. То есть одна точка излучения заменяется двумя. Логично ожидать, что такая замена вызовет специфические различия между реальной и имитируемой ситуацией – приведет к ошибкам имитации. Обычно [5] их сводят к эквивалентным искажениям диаграммы направленности антенны испытуемой системы. Они проявляются

в виде ее эквивалентного расширения, изменения уровня боковых лепестков, «размывания» нулей. Вместе с тем, с точки зрения имитации радиоэлектронной обстановки системам оценки угловых координат, первостепенное значение имеют не искажения ДНА, а точность установки положения КЦИ. К сожалению, в литературе [5, 6] вопрос, связанный с этими ошибками, освещен весьма поверхностно, сводится к некоторым общим положениям и соотношениям, малопригодным для практического использования. Исключение составляют случайные ошибки, обусловленные неидеальностью фазировки излучателей МИ. Они достаточно полно рассмотрены в литературе [7, 8].

Цель настоящей работы – определить ошибки установки положения КЦИ, обусловленные заменой точечного излучателя системой из двух точек, и их связь с параметрами МИ и ДНА.

2. Решение

Рассмотрим простейший амплитудный метод пеленгации, суть которого заключается в определении угловой координаты КЦИ путем поворота направленной антенны в плоскости расположения излучателей МИ и фиксации ее углового положения, соответствующего максимальному уровню принимаемого сигнала [9].

Абсолютная ошибка определения положения КЦИ равна разности между измеренным $\xi_{\text{изм}}$ и устанавливаемым (требуемым) $\xi_{\text{треб}}$ положением КЦИ:

$$\chi(\xi) = \xi_{\text{изм}} - \xi_{\text{треб}} = \frac{\alpha_{\text{изм}}}{\delta} - \xi_{\text{треб}}. \tag{2}$$

В идеальном случае измеренное таким образом значение угла $(\xi_{\text{изм}})$ должно равняться требуемому $(\xi_{\text{треб}})$, т. е. ошибка установки углового положения должна отсутствовать:

$$\chi(\xi) = \xi_{\text{изм}} - \xi_{\text{треб}} = 0.$$

Рассмотрим, что будет иметь место при использовании МИ, схематично представленного на рис 1.

Амплитуда сигнала на выходе приемной антенны:

$$U_{\Sigma}(\alpha_0, \xi, \delta) \sqcup \left| F(\alpha_0 - \delta)\dot{S}_1(\xi) + F(\alpha_0 + \delta)\dot{S}_2(\xi) \right|, \tag{3}$$

где $\sqcup$ – знак пропорциональности; $F(\alpha)$ – ДН антенны радиоэлектронной системы.

Для получения общих соотношений, инвариантных к форме ДНА, аппроксимируем $F(\alpha)$ степенным полиномом:

$$F_2(\alpha) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{F^{(n)}(\alpha_a)}{n!}(\alpha - \alpha_a)^n.$$

При ограничении первыми четырьмя членами ряда аппроксимирующий полином имеет вид

$$F_2(\alpha) = a_0 + a_1(\alpha - \alpha_a) + a_2(\alpha - \alpha_a)^2 + a_3(\alpha - \alpha_a)^3 + a_4(\alpha - \alpha_a)^4,$$

где

$$a_0 = F(\alpha_a)\,; \quad a_1 = \left.\frac{dF(\alpha)}{d\alpha}\right|_{\alpha=\alpha_a}; \quad a_2 = \frac{1}{2}\left.\frac{dF^2(\alpha)}{d\alpha^2}\right|_{\alpha=\alpha_a};$$

$$a_3 = \frac{1}{6}\left.\frac{dF^3(\alpha)}{d\alpha^3}\right|_{\alpha=\alpha_a}; \quad a_4 = \frac{1}{24}\left.\frac{dF^4(\alpha)}{d\alpha^4}\right|_{\alpha=\alpha_a};$$

$\alpha_a = 0$ – точка, в окрестности которой производится аппроксимация ДНА.

Рассмотрим симметричные ДНА, описываемые четными функциями. Тогда $a_1 = a_3 = 0$ и аппроксимирующий полином принимает вид

$$F_2(\alpha) = a_0 + a_2(\alpha - \alpha_a)^2 + a_4(\alpha - \alpha_a)^4\,. \tag{4}$$

При этом

$$U_\Sigma(\alpha_0, \xi, \delta) \sqcup \Big|\left(a_0 + a_2(\alpha_0 - \delta)^2 + a_4(\alpha_0 - \delta)^4\right)\dot{S}_1(\xi) +$$

$$+\left(a_0 + a_2(\alpha_0 + \delta)^2 + a_4(\alpha_0 + \delta)^4\right)\dot{S}_2(\xi)\Big|. \tag{5}$$

Исследуем полученное выражение на наличие экстремумов, точнее, максимума в точке $\alpha_0 = \alpha_{0\,\max}$:

$$\left.\frac{d}{d\alpha_0}U_\Sigma(\alpha_0,\, \xi,\, \delta) = 0\right|_{\alpha_0\, =\, \alpha_{0\max}}. \tag{6}$$

После взятия производной получим уравнение

$$\alpha_{0\max}^3(-2a_4) + \alpha_{0\max}^2(6a_4\xi\delta) +$$

$$+\alpha_{0\max}\left(-6a_4\delta^2 - a_2\right) + \left(2a_4\xi\delta^3 + a_2\xi\delta\right) = 0\,.$$

Решим его относительно $\alpha_{0\,\max}$ при помощи формулы Кардано [10].

Для этого введем замену переменных:

$$a\alpha_{0\max}^3 + b\alpha_{0\max}^2 + c\alpha_{0\max} + d = 0\,,$$

где $a = -2a_4$; $b = 6a_4\xi\delta$; $c = -6a_4\delta^2 - a_2$; $d = 2a_4\xi\delta^3 + a_2\xi\delta$.

Введем дополнительные переменные:

$$p = \frac{3\cdot a\cdot c - b^2}{3\cdot a^2}, \quad q = \frac{2\cdot b^3 - 9\cdot a\cdot b\cdot c + 27\cdot a^2\cdot d}{27\cdot a^3}, \quad c_{1,2} = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} \pm \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}\,.$$

Решаемое уравнение имеет три корня:

$$\alpha_{0\,\max\,1} = c_1 + c_2 - \frac{b}{3\cdot a}, \quad \alpha_{0\,\max\,2,3} = -\frac{c_1 + c_2}{2} - \frac{b}{3a} \pm \frac{c_1 - c_2}{2}\sqrt{3}\cdot j\,,$$

где j – мнимая единица.

При этом функция (5) имеет два минимума и один максимум (рис. 2, на рисунке экстремумы отмечены кружками).

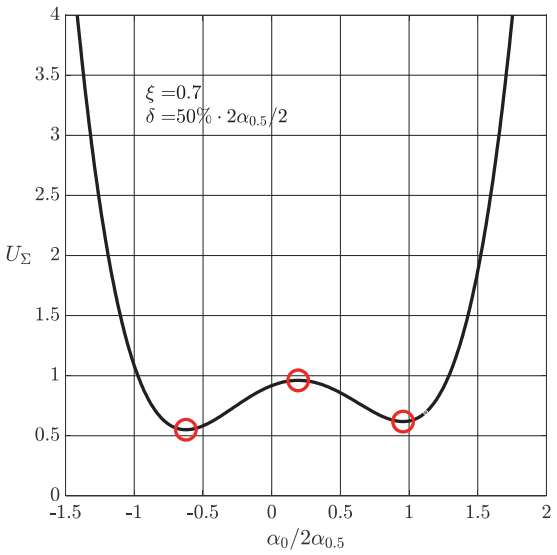


Рис. 2 – Зависимость нормированной амплитуды сигнала на выходе приемной антенны от угла поворота антенны

Fig. 2 – Dependence of the normalized signal amplitude at the output of the receiving antenna on the angle of rotation of the antenna

Максимум достигается при

$$\alpha_0 = \alpha_{0\,\max} = -\frac{c_1 + c_2}{2} - \frac{b}{3a} - \frac{c_1 - c_2}{2}\sqrt{3} \cdot j\ .$$

Выполнив обратную замену переменных, получим итоговое соотношение для нахождения углового положения КЦИ:

$$\alpha_{\text{изм}}(\xi,\,\delta) = \delta\xi + \frac{1}{2}\left(-T(\xi,\,\delta) + \frac{\delta^2 - \delta^2\xi^2 + \dfrac{a2}{6a_4}}{T(\xi,\,\delta)}\right) -$$

$$-\frac{j\sqrt{3}}{2}\left(T(\xi,\,\delta) + \frac{\delta^2 - \delta^2\xi^2 + \dfrac{a2}{6a_4}}{T(\xi,\delta)}\right), \qquad (7)$$

где

$$T(\xi,\,\delta) = \sqrt[3]{\sqrt{\left(\delta^2 - \delta^2\xi^2 + \frac{a_2}{6a_4}\right)^3 + \delta^6\xi^2(\xi^2 - 1)^2} + \delta^3(\xi^3 - \xi)}\ .$$

Первое слагаемое подкоренного выражения отрицательно:

$$\left(\delta^2 - \delta^2\xi^2 + \frac{a_2}{6a_4}\right) < 0,$$

что приводит к комплексным результатам при вычислении $T(\xi, \delta)$. Поэтому в (7) слагаемые, кроме первого, являются комплексно-сопряженными парами, сложение которых обращает в нуль мнимую часть. В результате исходное выражение может быть переписано:

$$\alpha_{\text{изм}}(\xi, \delta) = \delta\xi -$$

$$- \operatorname{Re}\left[\sqrt[3]{\sqrt{\left(\delta^2 - \delta^2\xi^2 + \frac{a_2}{6a_4}\right)^3 + \delta^6\xi^2(\xi^2-1)^2} + \delta^3(\xi^3 - \xi)} \cdot \left(1 + j\sqrt{3}\right)\right]. \qquad (8)$$

Подставив (8) в (2) и упростив полученное выражение, получим

$$\chi_2(\xi) = -\operatorname{Re}\left[\sqrt[3]{\sqrt{P^3 - 3\xi^2P^2 + 3\xi^4P + \xi^4} + (\xi^3 - \xi)} \cdot \left(1 + j\sqrt{3}\right)\right], \qquad (9)$$

где

$$P = \frac{1}{\delta^2}\frac{a_2}{6a_4}.$$

Для сокращения записи в (9) принято обозначение $\xi_{\text{треб}} = \xi$.

Ошибка установки зависит от требуемого положения КЦИ $(\xi_{\text{треб}} = \xi)$, разноса излучателей МИ (δ) и формы ДН (коэффициентов аппроксимации a_2 и a_4).

Ключевым моментом является зависимость ошибки от параметра *P*, определяемого относительным вкладом в ДНА четвертой степени углового отклонения от оси антенны. При этом, если $a_4 = 0$, то P стремится к минус бесконечности и ошибка установки углового положения стремится к нулю. Из этого следует, что причиной возникновения ошибки является нелинейность пеленгационной характеристики антенны.

3. Результаты моделирования и расчетов

Проанализируем полученные результаты.

На рис. 3 представлены результаты расчетов по полученной формуле (χ_2), а также значения ошибки, найденные численными методами непосредственно для исходной ДНА (χ_0) и аппроксимированной ДНА (χ_1). В последних двух случаях угловое положение КЦИ определялось методом золотого сечения, с помощью которого находилось значение угла, при котором максимален уровень сигнала на выходе антенны. Нетрудно заметить хорошее соответсвие между оценками ошибок.

Кроме того, видно, что ошибка имеет место при установке положения КЦИ как в пределах базы МИ, так и за ее пределами. Причем в последнем случае ошибка быстро нарастает с увеличением отклонения положения КЦИ от центра матрицы.

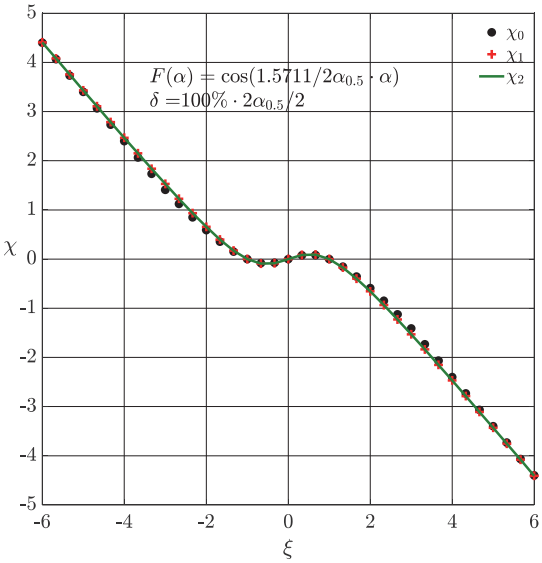


Рис. 3 – Зависимость систематической ошибки установки углового положения КЦИ от требуемого положения КЦИ

Fig. 3 – The dependence of the systematic error of the installation of the angular position of the apparent radiation center (ARC) on the required position of the ARC

Как правило [11], диапазон устанавливаемых положений КЦИ ограничивают пределами МИ. Поэтому безусловный интерес представляют максимальные значения, которых достигает ошибка, и положения КЦИ, при которых эти ошибки достигаются (рис. 4).

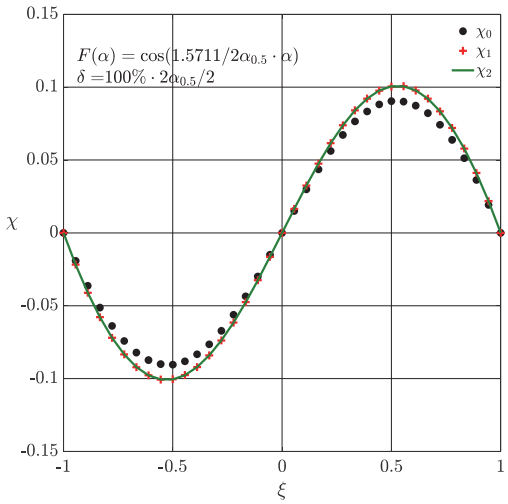


Рис. 4 – Зависимость ошибки пеленга от углового положения КЦИ в пределах матрицы

Fig. 4 – The dependence of the bearing error on the angular position of ARC within the matrix

Оценим эти величины.

Согласно полученным соотношениям, ошибка пеленга и ее угловое положение зависят от формы ДНА. Так как функция ошибки обладает симметрией, рассмотрим область нормированных положений КЦИ: $0 \le \xi \le 1$, т. е. половину базы матрицы. Значения параметра P возьмем равным $-4,8615/6\delta^2$ и $-1,4413/6\delta^2$, что соответствует ДНА вида косинус

$$F(\alpha) = \cos(1,5711/2\alpha_{0.5}\alpha)$$

и гауссовой кривой

$$F(\alpha) = \exp\left(-(1,178/2\alpha_{0.5}\alpha)^2\right)$$

соответственно.

Аргументы функций выбраны таким образом, чтобы обеспечить равенство ширин ДНА. Выбранные значения соответствуют крайним случаям из широко используемых аппроксимаций ДНА (для первой значение P максимально, для второй минимально).

Результаты численных расчетов максимального значения ошибок, имеющих место при задании положения КЦИ в пределах МИ, и их положения приведены на рис. 5. На эти же графики (знаками «*» и «•») нанесены значения максимального уровня ошибки и угловые положения максимальной ошибки соответственно, полученные без применения аппроксимации и (9).

Из рисунков следует, что применение аппроксимации ДН полиномом четвертой степени приводит к завышенным показателям максимальной ошибки пеленга. Это гарантирует, что значения максимальной ошибки пеленга всегда будут не больше вычисленных по полученным соотношениям (рис. 4).

4. Заключение

1. Замещение точечного объекта системой из нескольких излучателей, имеющее место в матричных имитаторах, приводит к появлению специфических ошибок установки углового положения кажущегося центра излучения. Эти ошибки могут рассматриваться как систематические ошибки установки углового положения.

2. Ошибки имеют место во всей области возможных угловых положений КЦИ как в пределах матрицы, так и за ее пределами. Причем в последнем случае они быстро нарастают с ростом отклонения положения КЦИ от краев МИ. Ошибки имеют нулевые значения только для трех положений КЦИ. В центре матрицы и на ее краях (в точках, совпадающих с положениями излучателей).

3. Величина ошибки зависит от разноса излучателей МИ, углового положения КЦИ и формы ДНА испытываемой радиоэлектронной системы. Точнее, от нелинейности пеленгационной характеристики антенны, определяемой отношением коэффициентов a_4 и a_2, полинома, аппроксимирующего ДНА.

4. В целом в данной работе рассмотрены оценки систематической ошибки установки углового положения КЦИ, возникающей в матричном имитаторе из-за замещения излучающей точки несколькими (двумя) неразрешаемыми излучателями.

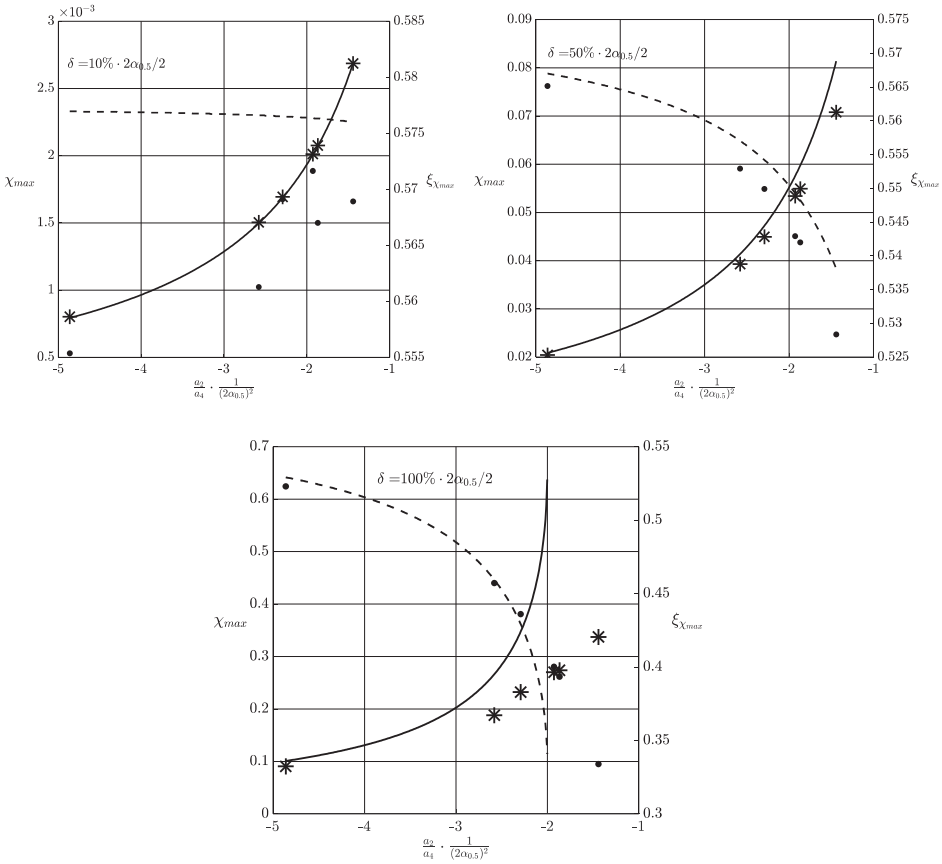


Рис. 5 – Зависимость: максимального уровня ошибки пеленга (сплошная линия); нормированного углового положения максимума ошибки пеленга в пределах матрицы от коэффициентов аппроксимации ДНА (штриховая линия) для трех значений базы матрицы

Fig. 5 – The dependence of: the maximum level of the bearing error (solid line), the normalized angular position of the maximum of the bearing error within the matrix on the approximation coefficients of the antenna radiation pattern (ARP) (dashed line) for the three values of the matrix base

ЛИТЕРАТУРА

1. Patent № 4660041 US. Radar scene simulator**:** publ. date 21.04.1987 / Maples V.H., Eastman G.A.
2. Patent № 3114910 US. Moving target simulators: publ. date 17.12.1963 / Rymes W.H.
3. Патент № 2094915 Российская Федерация. Имитатор источников радиосигналов: опубл. 27.10.1994 / Еремин Е.И., Половинкин Л.П., Торгованов В.А.
4. **Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.** Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
5. **Тырыкин С.В.**, **Сабитов Т.И., Киселев А.В.** Специальные вопросы построения когерентных матричных имитаторов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – 232 с.
6. Работа радиолокационной угломерной системы в условиях сигнала, создаваемого когерентными источниками излучения из двух точек пространства / А.А. Дятко, С.М. Костромицкий, П.Н. Шумский, И.Н. Давыденко // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7–8 (126). – С. 22–29. – DOI: 10.35596/1729-7648-2019-126-8-22-29.
7. **Никулин А.В.** Имитация отражений радиосигналов на основе использования дискретных излучателей статистически независимых сигналов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.12.04. – Новосибирск, 2015. – 22 с.

8. **Степанов М.А., Сабитов Т.И., Киселев А.В.** Ошибки фазировки матричного имитатора эхосигналов многоантенной радиоэлектронной системы // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 10. – С. 1–15. – DOI: 10.30898/1684-1719.2021.10.14.
9. **Кацнельсон В.З., Тимченко Н.И., Волков В.В.** Основы радиолокации и импульсной техники. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 334 с.
10. **Корн Г.**, **Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
11. Патент № 2287168 Российская Федерация. Способ защиты радиолокационной станции от противорадиолокационной ракеты на основе использования дополнительного источника излучения подъемного типа: опубл. 06.04.2005 / Успенский С.А.

SYSTEMATIC ERRORS IN SETTING THE ANGULAR POSITION IN MATRIX SIMULATORS OF THE RADIO-ELECTRONIC ENVIRONMENT

Kiselev A.V., Tayurov A.V.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Estimates of the error in setting the angular position of the apparent center of radiation by a matrix simulator, which are, in fact, its systematic error, are considered. It is shown that the cause of the error is the replacement of the simulated point emitter by several points. Analytical relations have been obtained that allow calculating the magnitude of the systematic direction finding error based on the characteristics of the matrix simulator and the radiation pattern of the receiving antenna operating with the matrix simulator of the radio engineering system. It is shown that the considered error is completely determined by the nonlinearity of the direction finding characteristic of the antenna. It is established that the error is most significant when simulating the apparent center of radiation outside the matrix. For the area inside the matrix, the dependences of the maximum error values and their angular positions on the shape of the antenna pattern and the specified position of the radiation point are obtained. The relations allowing to estimate errors depending on the ratio of the angular dimensions of the matrix, the width of the antenna radiation pattern and the coefficients of approximation of its radiation pattern are obtained. The reliability of the obtained results is confirmed by comparison with the results obtained by numerical simulation. The results of the work can be used to solve applied problems related to the development of matrix simulators and simulation complexes based on them, as well as to predict their accuracy characteristics.

Keywords: matrix simulator, systematic error, angular position setting, apparent radiation center, simulation modeling, two-point model, radio direction finding.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-34-44

REFERENCES

1. Maples V.H., Eastman G.A. *Radar scene simulator*. Patent US, no. 4660041, 1987.
2. Rymes W.H. *Moving target simulators*. Patent US, no. 3114910, 1963.
3. Eremin E.I., Polovinkin L.P., Torgovanov V.A. *Imitator istochnikov radiosignalov* [Simulator of radio signal sources]. Patent RF, no. 2094915, 1994.
4. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhennykh tselei* [Statistical theory of extended objectives radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 232 p.
5. Tyrykin S.V., Sabitov T.I., Kiselev A.V. *Spetsial'nye voprosy postroeniya kogerentnykh matrichnykh imitatorov* [Special issues of constructing coherent matrix simulators]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2021. 232 p.
6. Dyatko A.A., Kostromitski S.M., Shumski P.N., Davydenko I.N. Rabota radiolokatsionnoi uglomernoi sistemy v usloviyakh signala, sozdavaemogo ko-gerentnymi istochnikami izlucheniya iz dvukh tochek prostranstva [Operation of the radiolocation angular system in the conditions of the signal created by coherent sources of radiation from two spots]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, 2019, no. 7–8 (126), pp. 22–29. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-126-8-22-29.

7. Nikulin A.V. *Imitatsiya otrazhenii radiosignalov na osnove ispol'zovaniya diskretnykh izluchatelei statisticheski nezavisimykh signalov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Simulation of radio signal reflections based on the use of discrete emitters of statistically independent signals. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosivirsk, NSTU, Publ., 2015, 23 p.
8. Stepanov M.A., Sabitov T.I., Kiselev A.V. Oshibki fazirovki matrichnogo imitatora ekhosignalov mnogoantennoi radioelektronnoi sistemy [Phasing errors of the matrix simulator of the echo signals of the multi-antenna radar system]. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*, 2021, no. 10, pp. 1–15. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.10.14.
9. Katsnel'son V.Z., Timchenko N.I., Volkov V.V. *Osnovy radiolokatsii i impul'snoi tekhniki* [Fundamentals of radar and pulse technology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 334 p.
10. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook: for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p. (In Russian).
11. Uspenskii S.A. *Sposob zashchity radiolokatsionnoi stantsii ot protivoradiolokatsionnoi rakety na osnove ispol'zovaniya dopolnitel'nogo istochnika izlucheniya pod"emnogo tipa* [A method for protecting a radar station from an anti-radar missile based on the use of an additional lifting-type radiation source]. Patent RF, no. 2287168, 2005.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Киселев Алексей Васильевич – родился в 1958 году, д-р техн. наук, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: имитационное моделирование сложной радиоэлектронной обстановки, радиолокация, радиосвязь. Имеет более 160 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

Kiselev Alexey Vasilevich (b. 1958) – Doctor of Sciences (Eng.), a professor at the Department of Radio receiving and Radio transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on simulation of complex electronic environment, radar detecting and ranging, and radio communication. He is author more 150 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

Таюров Антон Викторович – родился в 1997 году, аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: математическое моделирование радиолокационных отражений, радиолокация, радиосвязь. Опубликовано 7 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: ya.antoha.rt@gmail.com).

Tayurov Anton Viktorovich (b. 1997) – Postgraduate student at the Department of Radio receivers and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical modeling of radar reflections, radar, radio communication. He is author 7 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

Статья поступила 06 октября 2023 г.
Received October 06, 2023

To Reference:

Kiselev A.V., Tayurov A.V. Sistematicheskie oshibki ustanovki uglovogo polozheniya v matrichnykh imitatorakh radioelektronnoi obstanovki [Systematic errors in setting the angular position in matrix simulators of the radio-electronic environment]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 4 (61), pp. 34–44. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-34-44.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2023 октябрь–декабрь № 4 (61)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 62-643;536.463

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ПРИ ЕГО РАСПЫЛЕНИИ ПЕРЕГРЕТЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ, УГЛЕКИСЛЫМ ГАЗОМ И ИХ СМЕСЬЮ

Е.П. Копьев [1], Е.Ю. Шадрин [1], М.А. Мухина [1], И.С. Садкин [1,2]
[1]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*
[2]*Новосибирский государственный технический университет*

Снижение антропогенного воздействия на окружающую среду является одной из приоритетных задач современности. Одним из источников загрязнения являются захоронение большого количества некондиционных горючих отходов, в том числе углеводородных, не востребованных в настоящее время, а также твердые и токсичные вещества, образующиеся при сжигании. Решение обозначенных задач возможно за счет подхода Waste-to-Energy, направленного на вовлечение горючих отходов в топливный баланс, с организацией низкотемпературного сгорания за счет добавления различных газов-разбавителей – углекислого газа или водяного пара. В настоящей работе на примере дизельного топлива экспериментально получены и сравнены характеристики сгорания жидких углеводородов в присутствии смеси перегретого пара с углекислым газом в распылительной горелке, для выявления особенностей и преимуществ при их использовании в Waste-to-Energy подходах. Показано, что для всех исследованных режимов наблюдается высокая полнота сгорания топлива. Анализ состава продуктов сгорания показывает, что при замене перегретого пара диоксидом углерода содержание CO и NO_x в продуктах сгорания увеличивается на 25 %. При этом все исследованные режимы соответствуют стандарту EN:267. Полученные результаты показывают, что возможно реализовать подходы добавления углекислого газа, водяного пара и их смеси для преобразования отходов в энергию.

Ключевые слова: горелочное устройство, горение жидких углеводородов, распыление топлива, снижение вредных выбросов, разбавление.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-45-57

Введение

Энергетика является важнейшей отраслью, определяющей эффективность экономики и технический уровень промышленности. Однако энергетический комплекс – один из основных источников антропогенного воздействия и выбросов загрязняющих веществ [1]. Несмотря на активное развитие альтернативных и рост доли возобновляемых источников энергии [2], потребление ископаемого топлива в абсолютном выражении не снижается, а его доля в мировом энергобалансе превышает 3/4 [2, 3]. При этом одной из актуальных проблем при сжигании ископаемого топлива является то, что помимо углекислого газа могут образовываться опасные для здоровья человека и окружающей среды вещества, такие как окислы азота и серы, сажа, монооксид углерода и другие соединения [4]. На сегодняшний день природоохранные технологии на тепловых электростанциях могут составлять до половины общей стоимости станции [5, 6]. Другой значимой проблемой является накопление большого количество некондиционных горючих отходов, в том числе углеводородных отходов, образующихся в процессе добычи, транспортировки и переработки ископаемого топлива.

В настоящее время получил развитие тренд Waste-to-Energy [7–9], направленный на вовлечение горючих отходов в топливный баланс, что, с одной стороны,

© 2023 Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю., Мухина М.А., Садкин И.С.

позволяет снизить расходы за счет использования такого дешевого типа топлива, одновременно решая задачу его утилизации, с другой стороны, предопределяет особую заботу по охране окружающей среды и предотвращению избыточных выбросов при использовании низкосортного топлива. Таким образом, для успешного развития данного направления и обеспечения его устойчивого развития необходимо создание и разработка высокоэффективных и экологически безопасных технологий и оборудования [10].

Одним из возможных путей снижения вредных выбросов при сжигании низкокачественных топлив является организация низкотемпературного сгорания – Low-Temperature Combustion (LTC). Основная идея этого подхода заключается в использовании systems of exhaust gas recirculation (EGR), flue gas recirculation (FGR) или добавлении газов-разбавителей для уменьшения концентрации окислителя и, как следствие, снижения температуры пламени [11]. В совокупности это позволяет снизить выбросы сажи, NO_x, CO и других вредных веществ [12, 13]. Перспективность использования метода низкотемпературного сжигания для снижения вредных выбросов, в том числе и в рамках направления Waste-to-Energy, обусловливается тем, что он возможен без внедрения и применения дорогостоящих систем.

Использование системы низкоэмиссионного сжигания на основе добавления газов-разбавителей, таких как CO_2 и H_2O, может быть потенциально использовано в области Waste-to-Energy. Однако, несмотря на достаточно большое количество предлагаемых подходов применения газов-разбавителей, степень и механизмы воздействия чистых по составу веществ (особенно CO_2 и водяной пар) на характеристики пламени и протекание химических реакций еще имеют некоторые пробелы, нет однозначных выводов о преимуществе того или иного вещества при утилизации горючих отходов.

Ранее в ИТ СО РАН был предложен способ сжигания жидких углеводородных топлив и горючих отходов в высокоскоростной струе перегретого водяного пара [14–16]. В работах отмечается, что присутствие пара ускоряет расщепление сложных органических соединений. Происходит реакция паровой газификации углеродосодержащих продуктов термического разложения и неполного сгорания топлива с образованием водяного газа ($H_2O + C = CO + H_2$) [17]. В том числе за счет воздействия высокоскоростной струи на каплю топлива происходит первичная атомизация и создание однородного топливного спрея [18]. В совокупности это сокращает время выгорания топлива и повышает полноту сгорания. Кроме этого, при впрыске пара в зону горения увеличивается количество активных радикалов OH, что снижает сажеобразование [17]. За счет разбавления горючей смеси паром происходит снижение температуры пламени, что сокращает образование термических оксидов азота [19].

Для развития предыдущих исследований и выявления преимуществ использования перегретого водяного пара, углекислого газа и их смеси в рамках настоящей работы проведено изучение характеристик сжигании жидких углеводородов в присутствии смеси перегретого водяного пара с углекислым газом в горелочном устройстве распылительного типа. А именно, учитывая высокие качественные показатели сжигания жидких топлив в струе перегретого водяного пара и перспективность данного метода для утилизации низкокачественных углеводородов, целью настоящей работы является экспериментальное сравнение показателей при использовании в качестве разбавляющего агента как водяного пара, так и смеси пар–углекислый газ, а также чистого CO_2.

1. Экспериментальный стенд и методика измерений

Экспериментальное исследование экологических и теплотехнических показателей сжигания дизельного топлива при его распылении водяным паром, углекислым газом и их смесью проводилось с использованием атмосферного горелочного устройства мощностью до 20 кВт, схема которого показана на рис. 1.

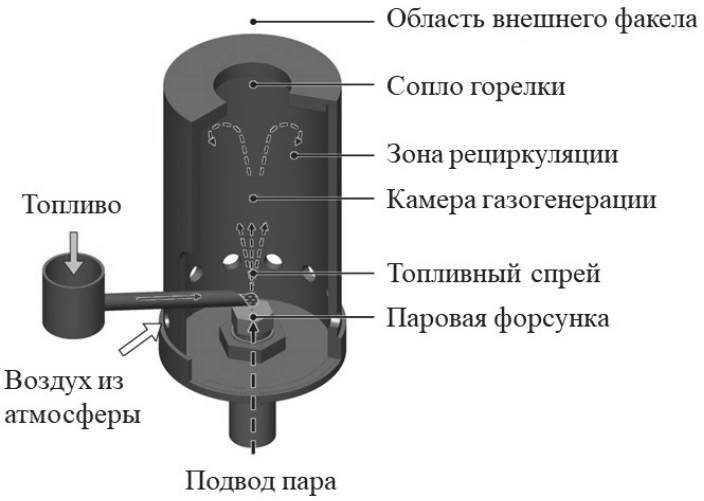


Рис. 1 – Распылительное горелочное устройство

Fig. 1 – Spray-type burner device

Основными элементами конструкции лабораторного образца горелки являются: основание, корпус (общая высота 140 мм, внешний диаметр 60 мм), выходное сопло (диаметр отверстия 25 мм), вмонтированная в центр основания паровая форсунка (диаметр отверстия 0,6 мм, угол раскрытия струи 17°), топливоподающая трубка (свободный конец трубки имеет скос и устанавливается в непосредственной близости к отверстию паровой форсунки). В нижней части корпуса горелочного устройства выполнены отверстия для естественного притока атмосферного воздуха из окружающей среды. Все элементы горелочного устройства выполнены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Основной особенностью устройства является то, что в нем предусмотрен распыл топлива струей перегретого водяного пара. Присутствие паров воды в зоне горения позволяет несколько снизить температуру, что приводит к уменьшению концентрации оксидов азота в продуктах сгорания, образующихся по термическому механизму. Также паровая газификация продуктов неполного сгорания и термического разложения топлива позволяет повысить степень выгорания углерода.

Исследование проводилось на экспериментальном стенде для исследования сажепарового режима горения жидких углеводородов, который входит в состав уникальной научной установки УСУ «Крупномасштабный термогидродинамический стенд для исследования тепловых и газодинамических характеристик энергоустановок» [20]. Установка состоит (рис. 2) из горелочного устройства, системы подачи воды, системы подачи углекислого газа, электрического парогенератора для перегрева водяного пара и нагрева углекислого газа до заданной температуры, системы подачи жидкого топлива.

Для измерения полноты сгорания топлива и конечных продуктов сгорания используется проточный калориметр, в котором в противотоке движутся дымовые

газы и теплоноситель. При проведении калориметрических измерений горелочное устройство помещается соосно секции калориметра так, чтобы факел горелки располагался во внутреннем канале калориметра. После установления стационарного теплового режима, при котором достигается постоянство температуры теплоносителя на входе и выходе из калориметра, осуществляется измерение тепловыделения в течение 15 минут. Для этого с помощью регулирующего крана предварительно задается постоянный расход воды и проводится измерение температуры воды на входе и на выходе калориметра с помощью хромель-алюмелевых термопар. Количество тепла, полученного от продуктов сгорания в калориметре за время проведения опыта, определялось как разность тепловой энергии воды на выходе и на входе калориметра.

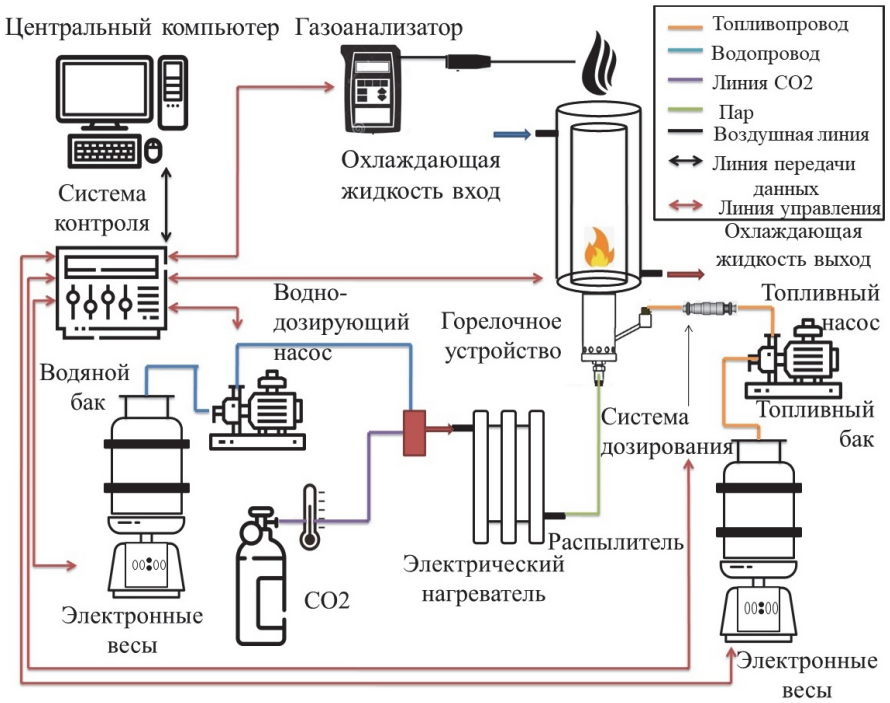


Рис. 2 – Схема экспериментального стенда

Fig. 2 – Scheme of the experimental stand

Измерение промежуточных компонентов горения в пламени и конечных продуктов сгорания на выходе из калориметра осуществлялось при помощи газоанализаторов Тест-1 и Testo 350. Характеристики газоанализатора Тест-1: электрохимический сенсор O_2 (диапазон измерений 0…25 %), полярографический сенсор H_2 (0…40 %), оптический сенсор CO_2 (0…30 %), оптический сенсор C_nH_m (0…5 %), электрохимический сенсор CO (0…2000 ppm). Пределы погрешности O_2: ±0,2 % об. (абсолютной), H_2, CO_2, C_nH_m: ±5 % (относительной), CO: ±2 ppm (абсолютной, при показаниях до 40 ppm) и ±5 % (относительной, при показаниях свыше 40 ppm). Характеристики газоанализатора Testo-350: электрохимические сенсоры NO (диапазон измерений 0…300 ppm) и NO_2 (0…500 ppm). Пределы погрешности NO: ±2 ppm (абсолютной, при показаниях до 40 ppm) и ±5 % (относительной, при показаниях свыше 40 ppm), NO_2: ±5 ppm (абсолютной, при показаниях до 100 ppm) и ±5 % (относительной, при показаниях свыше 100 ppm).

Газовый состав конечных продуктов сгорания проводился на выходе из калориметра, где дымовой газ имеет температуру, близкую к комнатной. Анализ состава промежуточных компонентов горения в пламени осуществлялся вдоль вертикальной оси горелочного устройства от сопла на расстоянии 200 мм с шагом 20 мм. Забор пробы из пламени происходил через водоохлаждаемый зонд для «заморозки» протекающих процессов. Продукты горения двигались по внутреннему каналу зонда, движение воды для охлаждения пробы происходило в противоположную сторону по внешнему каналу. Время отбора проб в точке 90 с, частота 1 Гц. Для проведения газового анализа зонд для забора пробы закреплялся на координатно-перемещающем устройстве, с помощью которого конец зонда помещался в различные точки пламени.

При анализе конечных продуктов сгорания и оценке величины вредных выбросов осуществлялся пересчет объемных концентраций (ppm) на удельные величины (мг/кВтч) с использованием методических подходов норматива DIN EN 267, с корректировкой на присутствие распылителя-разбавителя, для возможности сопоставления данных с мировыми аналогами.

Следует отметить, что объем вводимого углекислого газа в предельном случае (режим 5, табл. 1) не превышает 6 % от теоретического объема продуктов сгорания. При этом использование указанных формул позволяет избежать занижения показателей выбросов при использовании газа-разбавителя и проводить корректное сравнение с нормативом DIN EN 267.

Таблица 1 / Table 1

Описание исследуемых режимов

Description of the modes under study

Номер режима / Regime No.	1	2	3	4	5
Расход топлива, кг/ч / Fuel consumption, kg/h	1,2				
Расход пара, кг/ч / Steam consumption, kg/h	0,8	0,6	0,4	0,2	0
Расход CO_2, кг/ч / CO_2 consumption, kg/h	0	0,34	0,64	0,95	1,3
Импульс струи [22], Н / Jet impulse, N	0,203	0,207	0,206	0,205	0,207
Температура пара/ CO_2/ смеси, °C / Steam / CO_2 / mixture temperature, °C	250				

Определение средней по времени температуры в факеле проводилось с использованием Pt-Rh/Pt-Rh термопары типа B (диаметр 0,3 мм; относительная погрешность прибора 0,5 %). Для расположения в нужной точке пламени термопара закреплялась на координатно-перемещающем устройстве. Измерения проводились на оси горелочного устройства вдоль факела с шагом 10 мм на расстоянии 200 мм от выходного сопла. В каждой точке эксперимента измерение длилось 30 с: время задержки в точке 10 с, далее сбор данных с частотой 10 Гц в течение 20 с. При измерениях температуры с помощью термопар существенными оказываются радиационные потери (до 100 °C), которые учитывались согласно [21].

В ходе экспериментального исследования дизельное топливо распылялось водяным паром, углекислым газом или их смесью. Для соответствия режимов друг другу расход топлива брался одинаковым, а расход CO_2 (отдельно или в смеси с паром) подбирался исходя из равенства сил реакции струи распылителя на каплю топлива. Подробно задача расчета импульса струи распылителя рассмотрена в работе [22]. При одинаковой интенсивности динамического воздействия пара, углекислого газа или их смеси в подобранных режимах подсасывается одинаковое количество окислителя (воздуха) из атмосферы через отверстия в нижней части

корпуса горелочного устройства. Равный приток внешнего воздуха обеспечивает схожие значения интегрального коэффициента избытка воздуха, что делает правомерным сравнение режимов, параметры которых представлены в табл. 1.

2. Результаты измерений и их анализ

Для подобранных параметров подачи пара, CO_2 и их смеси (см. табл. 1) были получены профили средней по времени температуры вдоль оси симметрии пламени (рис. 3).

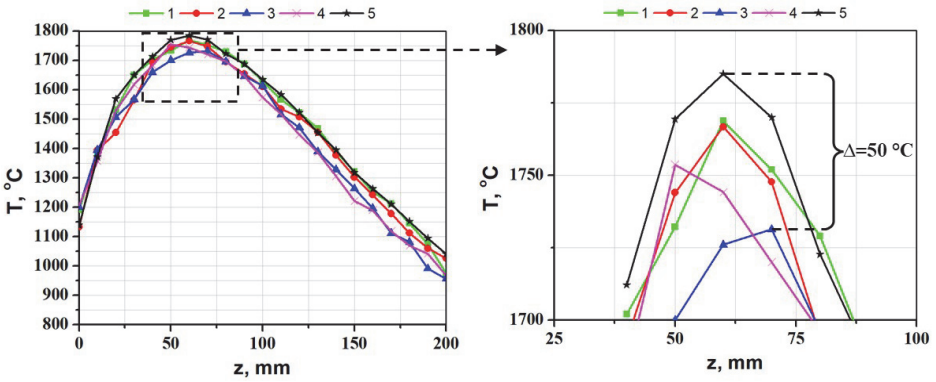


Рис. 3 – Измерение температуры вдоль оси симметрии пламени (по центру выходного сопла горелки)

Fig. 3 – Temperature measurement along the flame symmetry axis (at the center of the burner outlet nozzle)

Измерение температур вдоль оси симметрии пламени показывает близость значений по всей длине пламени для всех рассматриваемых режимов. При этом максимум температур достигается на некотором удалении от сопла горелки, что говорит о догорании топлива во внешнем факеле и соответствует характеру горения диффузионного пламени.

На правой части рис. 3 можно видеть, что разброс максимума температур (обозначенный на рисунке как Δ) для всех режимов не превышает 50° и лежит в районе 1750 °С. Это можно объяснить схожим эффектом повышения теплоемкости смеси при добавлении в нее струи водяного пара или углекислого газа. Хотя CO_2 имеет меньшую теплоемкость (~1,9 раза), чем водяной пар, он подается в большем количестве (~1,63 раза, если сравнивать режимы 1 и 5), в результате чего получается близкий эффект разбавления горючей смеси.

В табл. 2 представлены результаты газового анализа конечных продуктов сгорания дизельного топлива, охлажденных до комнатной температуры, на выходе из калориметра.

Можно отметить, что при последовательном замещении водяного пара углекислым газом (по мере движения от режима 1 к режиму 5) снижается концентрация кислорода в продуктах сгорания и возрастает доля углекислого газа. Так как расход топлива постоянен, а присос атмосферного воздуха в горелочное устройство, обусловленный эжекционным эффектом струи-распылителя, одинаков во всех режимах ввиду равенства импульсов, то это объясняется вводом дополнительного объема CO_2 по мере замещения им водяного пара. При этом концентрация CO и NO_x в уходящих газах медленно возрастает по мере замещения водяного

пара углекислым газом. Однако изменяется и объем уходящих газов. Поэтому целесообразно выполнить пересчет объемных концентраций оксидов азота и монооксида углерода, определяемых газоанализатором [ppm], в удельные величины выбросов [мг/кВт · ч] для возможности сопоставления полученных параметров с нормативными документами и мировыми аналогами. Результаты сопоставления представлены графически на рис. 4.

Таблица 2 / Table 2

Характеристики продуктов сгорания дизеля на выходе из калориметра в зависимости от исследуемого режима

Characteristics of diesel combustion products at the outlet of the calorimeter depending on the mode under study

Номер режима / Regime No.	1	2	3	4	5
O_2, %	4,06	3,85	3,65	3,40	3,19
CO_2, %	13,29	14,32	15,30	16,36	17,48
CO, ppm	27	29	30	35	37
NO_x, ppm	35	38	40	43	45
Q, MJ/kg	45,14	46,00	45,87	45,39	45,61

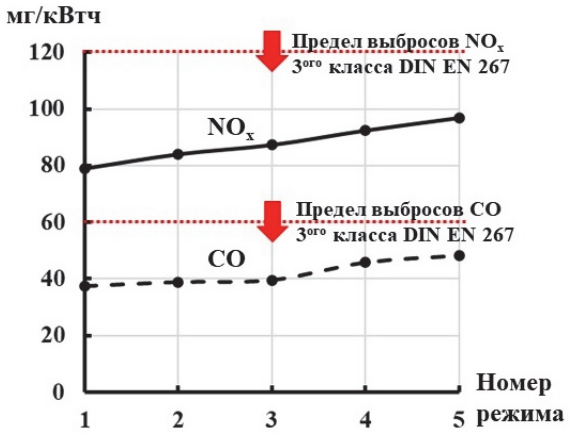


Рис. 4 – Зависимость выбросов CO и NOx от режима работы горелочного устройства

Рис. 4 – Dependence of CO and NOx emissions on the operating mode of the burner device

Пересчитанные в удельные величины показатели выбросов загрязняющих веществ демонстрируют рост по мере перехода с распыления водяным паром на углекислый газ. Рост составляет примерно 25 % по каждому из изучаемых компонентов. Можно предположить, что это связано с химическим эффектом присутствия водяного пара, влияющим на протекание химических реакций, так как физический эффект разбавления горючей смеси схож для всех вариантов смесей, что было отмечено при анализе профиля температур. Тем не менее все исследуемые режимы работы горелочного устройства с запасом соответствуют самому строгому классу норматива DIN EN 267.

При анализе полноты сгорания топлива было получено, что во всех случаях ее значение превышает 98 % и лежит в узком диапазоне 45,14…46 МДж/кг, что близко

к высшей теплоте сгорания дизельного топлива (46 МДж/кг). При этом какой-либо явной зависимости полноты сгорания топлива от состава распылителя отмечено не было.

Результаты газового анализа промежуточных компонентов горения в пламени показаны на рис. 5.

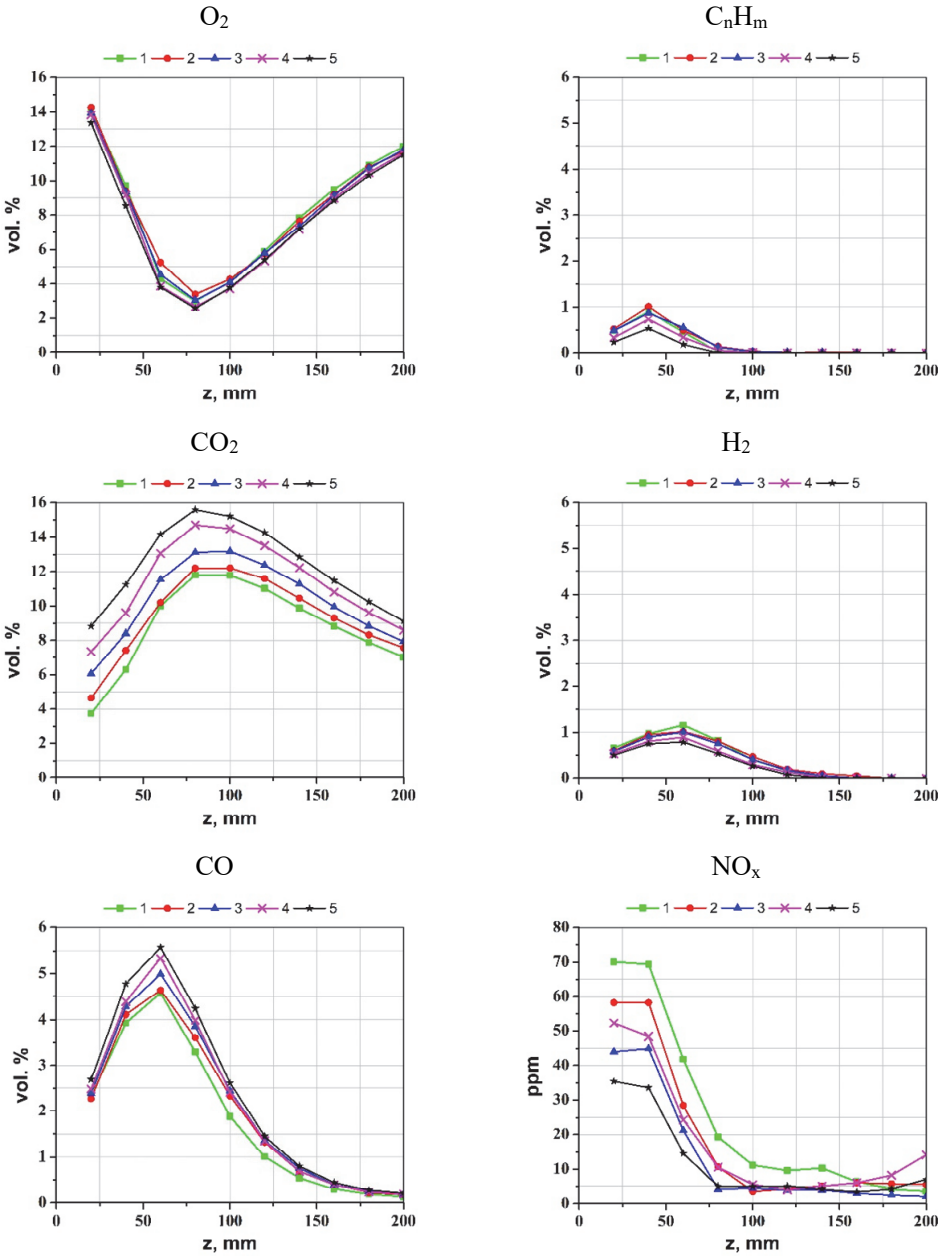


Рис. 5 – Профили промежуточных компонентов горения в пламени вдоль вертикальной оси сопла горелочного устройства (подписи режимов соответствуют табл. 1)

Fig. 5 – Profiles of intermediate combustion components in a flame along the vertical axis of the nozzle of the burner device (mode signatures correspond to Table 1)

Для исследуемых режимов профили соответствующих промежуточных компонент имеют схожий вид. Содержание O_2 в пламени имеет минимум (~3 vol. %) в области максимальных температур. Далее вверх по потоку концентрация кислорода повышается, а концентрации остальных компонентов снижаются вследствие разбавления пламени воздухом, поступающим из окружающей среды.

Максимальное значение содержания CO_2 в пламени растет при замещении пара углекислым газом. Разница значений для крайних режимов (11,8 vol. % – режим 1 и 15,6 vol. % – режим 5) соответствует дополнительному количеству углекислого газа, вводимому с распылителем. Концентрация CO имеет максимум на расстоянии ~60 мм от сопла горелочного устройства и уменьшается при увеличении доли пара в распылителе (5,6 vol. % – режим 5, 4,6 vol. % – режим 1), что может быть связано с присутствием радикалов OH в зоне горения и более интенсивным окислением CO до CO_2. Также такое уменьшение концентрации CO наблюдается и для конечных продуктов сгорания, что было отмечено ранее. Помимо этого, для режимов с большим впрыском пара наблюдается небольшое повышение концентрации H_2 в пламени (до 0,4 vol. %), что объясняется паровой газификацией углеродосодержащих продуктов термического разложения и неполного сгорания топлива с образованием водяного газа ($H_2O + C \rightarrow CO + H_2$). Содержание оксидов азота в пламени снижается по мере увеличения расстояния от сопла горелки в связи с разбавлением факела воздухом из окружающей среды и уменьшением температуры факела (дальше 60 мм), на расстоянии 200 мм концентрация NO_x ниже для режимов, где доля пара в распылителе больше, что также наблюдается для конечных продуктов сгорания.

Заключение

В работе на примере дизельного топлива проведено изучение характеристик сжигания жидких углеводородов в присутствии смеси перегретого водяного пара с газом-разбавителем в распылительном горелочном устройстве, а также сравнение полученных показателей. В качестве газа-разбавителя использовался углекислый газ. Подбор параметров подаваемой газовой смеси осуществлялся исходя из равенства интенсивности динамического воздействия струи распылителя на каплю топлива.

В ходе экспериментального исследования определены следующие показатели процесса сжигания: профили температуры пламени, количество выделяемой теплоты, состав промежуточных и конечных продуктов сгорания топлива. Выявлено, что температура пламени вдоль вертикальной оси сопла горелочного устройства не изменяется при переходе с распыления водяным паром на углекислый газ. Для всех исследуемых режимов наблюдается высокая полнота сгорания топлива.

По полученным зависимостям концентраций газовых компонентов в пламени видно, что минимумы O_2 и максимумы CO, CO_2, CnHm, H_2 для исследуемых режимов наблюдаются на одинаковом расстоянии от сопла горелки, профили соответствующих компонентов имеют схожий вид. При этом значения H_2 и CnHm в пламени оказываются выше, а CO и CO_2 ниже, когда доля пара в струе распылителя больше, что указывает на различия протекающих в пламени реакций. Анализ состава конечных продуктов сгорания показывает, что при замещении пара углекислым газом концентрации токсичных продуктов сгорания CO и NO_x возрастают на 25 %. Однако все исследуемые режимы работы горелочного устройства соответствуют самому строгому классу норматива EN 267.

Полученные результаты показывают, что возможно реализовать подходы добавления углекислого газа, водяного пара и их смеси с целью сжигания жидких горючих отходов. При этом использование чистого углекислого газа влечет

за собой некоторое увеличение содержания вредных веществ в продуктах сгорания пропорционально замещению, но при этом показатели не превышают значений, указанных в нормативных документах, что позволяет варьировать тип распылителя для различных исключительных случаев. Полученные экспериментальные данные будут использованы для верификации численных моделей, направленных на проектирование опытно-промышленных образцов горелочных устройств такого типа, которые в дальнейшем могут быть использованы для Waste-to-Energy.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEA. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021. – Paris, 2022. – URL: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2 (accessed: 07.12.2023).
2. IEA. World Energy Balances: Overview, 2021. – URL: https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview (accessed: 07.12.2023).
3. Enerdata. Global Energy Statistical Yearbook 2020. – URL: https://yearbook.enerdata.ru/co2-fuel-combustion/CO2-emissions-data-from-fuel-combustion.html (accessed: 21.09.2022).
4. **Miller B.** Fossil fuel emissions control technologies: stationary heat and power systems. – Butterworth-Heinemann, 2015. – 514 p. – DOI: 10.1016/C2014-0-00392-9.
5. **Black J.** Cost and performance baseline for fossil energy plants. Vol. 1. Bituminous coal and natural gas to electricity. Report DOE/NETL-2010/1397. – Pittsburgh, PA: National Energy Technology Laboratory, 2010. – 626 p.
6. Integrated gasification combined cycle (IGCC) technologies / ed. by T. Wang, G. Stiegel. – UK, 2017. – 890 p.
7. **Rogoff M., Screve F.** Waste-to-energy: technologies and project implementation. – 3rd ed. – Elsevier, 2019. – 228 p. – DOI: 10.1016/C2017-0-03296-2.
8. **Breeze P.** Energy from Waste. – Elsevier, 2018. – 100 p. – DOI: 10.1016/C2015-0-05948-2.
9. The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review / A. Bosmans, I. Vanderreydt, D. Geysen, L. Helsen // Journal of Cleaner Production. – 2013. – Vol. 55. – P. 10–23. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.05.032.
10. Advanced bibliometric analysis on the development of natural gas combined cycle power plant with CO_2 capture and storage technology / M. Malekli, A. Aslani, Z. Zolfaghari, R. Zahed, A. Moshari // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2022. – Vol. 52 (D). – Art. 102339. – DOI: 10.1016/j.seta.2022.102339.
11. **Lu X., Han D., Huang Z.** Fuel design and management for the control of advanced compression-ignition combustion modes // Progress in Energy and Combustion Science. – 2011. – Vol. 6 (37). – P. 741–783. – DOI: 10.1016/J.PECS.2011.03.003.
12. The influence of charge dilution and injection timing on low-temperature diesel combustion and emissions / S. Kook, C. Bae, P.C. Miles, D. Choi, L.M. Pickett // SAE Technical Papers. – 2005. – DOI: 10.4271/2005-01-3837.
13. **Yao M., Zheng Z., Liu H.** Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines // Progress in Energy and Combustion Science. – 2009. – Vol. 5 (35). – P. 398–437. – DOI: 10.1016/J.PECS.2009.05.001.
14. NOx reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, I.S. Sadkin, M.A. Mukhina // Process Safety and Environmental Protection. – 2021. – Vol. 152. – P. 240–248. – DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.016.
15. Experimental study of the characteristics of heptane combustion in a high-speed steam jet / I.S. Sadkin, E.P. Kopyev, M.A. Mukhina, I.S. Anufriev // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2233. – Art. 012001. – DOI: 10.1088/1742-6596/2233/1/012001.
16. Burning of heavy fuel oil in a steam jet in a new burner / S.V. Alekseenko, I.S. Anufriev, M.S. Vigriyanov, E.P. Kopyev, I.S. Sadkin, O.V. Sharypov // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2020. – Vol. 61 (3). – P. 324–330. – DOI: 10.1134/S0021894420030025.
17. Influence of steam dilution on the ignition of hydrogen, syngas and natural gas blends at elevated pressures / N. Donohoe, K.A. Heufer, C.J. Aul, E.L. Petersen, G. Bourque, R. Gordon, H.J. Curran // Combustion and Flame. – 2015. – Vol. 162 (4). – P. 1126–1135. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.10.005.

18. Cleaner crude oil combustion during superheated steam atomization / I. Anufriev, E. Kopyev, S. Alekseenko, O. Sharypov, E. Butakov, M. Vigriyanov, I. Sadkin // Thermal Science. – 2021. – Vol. 25 (1, pt. A). – P. 331–345. – DOI: 10.2298/tsci200509209a.
19. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet / I.S. Anufriev, E.Yu. Shadrin, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 163. – Art. 114400. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400.
20. УСУ «Крупномасштабный термогидродинамический стенд для исследования тепловых и газодинамических характеристик энергоустановок». – URL: http://ckp-rf.ru/usu/73570/ (дата обращения: 07.12.2023).
21. **Kaskan W.E.** The dependence of flame temperature on mass burning velocity // Symposium (International) on Combustion. – 1957. – Vol. 6 (1). – P.134–143.
22. Experimental study of liquid hydrocarbon combustion under conditions of steam gasification in the presence of diluent gas / E.P. Kopyev, I.S. Sadkin, M.A. Mukhina, E.Yu. Shadrin, D.V. Krasinsky, S.Yu. Shimchenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2233. – Art. 012015. – DOI: 10.1088/1742-6596/2233/1/012015.

STUDY OF COMBUSTION OF LIQUID HYDROCARBON FUEL WHEN SPRAYED WITH SUPERHEATED WATER VAPOR, CARBON DIOXIDE AND THEIR MIXTURE

Kopyev E.P.[1], Shadrin E.Yu.[1], Mukhina M.A.[1], Sadkin I.S.[1,2]
[1] *Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia*
[2] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Reducing the anthropogenic impact on the environment is one of the priority tasks of our time. One of the sources of pollution is the burial of a large amount of substandard combustible waste, including hydrocarbon waste, which is not currently in demand, as well as solid and toxic substances generated during combustion. The solution to the identified problems is possible through the Waste-to-Energy approach, aimed at involving combustible waste in the fuel balance, with the organization of low-temperature combustion by adding various diluent gases - carbon dioxide or water vapor. In this work, using diesel fuel as an example, the combustion characteristics of liquid hydrocarbons in the presence of a mixture of superheated steam and carbon dioxide in a spray burner were experimentally obtained and compared to identify the features and advantages of their use in Waste-to-Energy approaches. It is shown that for all studied modes a high completeness of fuel combustion is observed. Analysis of the composition of combustion products shows that when replacing superheated steam with carbon dioxide, the content of CO and NOx in combustion products increases by 25%. At the same time, all studied modes comply with the EN:267 standard. The results show that it is possible to implement approaches of adding carbon dioxide, water vapor and a mixture of both to convert waste into energy.

Keywords: burner device, combustion of liquid hydrocarbons, fuel atomization, reduction of harmful emissions, dilution.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-45-57

REFERENCES

1. IEA. *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021*. Paris, 2022. Available at: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2 (accessed 07.12.2023).
2. IEA. *World Energy Balances: Overview*, 2021. Available at: https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview (accessed 07.12.2023).
3. Enerdata. *Global Energy Statistical Yearbook 2020*. Available at: https://yearbook.enerdata.ru/co2-fuel-combustion/CO2-emissions-data-from-fuel-combustion.html (accessed 21.09.2022).

4. Miller B. *Fossil fuel emissions control technologies: stationary heat and power systems*. Butterworth-Heinemann, 2015. 514 p. DOI: 10.1016/C2014-0-00392-9.
5. Black J. *Cost and performance baseline for fossil energy plants*. Vol. 1. *Bituminous coal and natural gas to electricity*. Report DOE/NETL-2010/1397. Pittsburgh, PA, National Energy Technology Laboratory, 2010. 626 p.
6. Wang T. Stiegel G., eds. *Integrated gasification combined cycle (IGCC) technologies*. UK, 2017. 890 p.
7. Rogoff M., Screve F. *Waste-to-energy: technologies and project implementation*. 3rd ed. Elsevier, 2019. 228 p. DOI: 10.1016/C2017-0-03296-2.
8. Breeze P. *Energy from Waste*. Elsevier, 2018. 100 p. DOI: 10.1016/C2015-0-05948-2.
9. Bosmans A., Vanderreydt I., Geysen D., Helsen L. The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review. *Journal of Cleaner Production*, 2013, vol. 55, pp. 10–23. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.05.032.
10. Malekli M., Aslani A., Zolfaghari Z., Zahed R., Moshari A. Advanced bibliometric analysis on the development of natural gas combined cycle power plant with CO_2 capture and storage technology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 52 (D), art. 102339. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102339.
11. Lu X., Han D., Huang Z. Fuel design and management for the control of advanced compression-ignition combustion modes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, vol. 6 (37), pp. 741–783. DOI: 10.1016/J.PECS.2011.03.003.
12. Kook S., Bae C., Miles P.C., Choi D., Pickett L.M. The influence of charge dilution and injection timing on low-temperature diesel combustion and emissions. *SAE Technical Papers*, 2005. DOI: 10.4271/2005-01-3837.
13. Yao M., Zheng Z., Liu H. Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, vol. 5 (35), pp. 398–437. DOI: 10.1016/J.PECS.2009.05.001.
14. Anufriev I.S.,Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. NOx reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 152, pp. 240–248. DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.016.
15. Sadkin I.S., Kopyev E.P., Mukhina M.A., Anufriev I.S. Experimental study of the characteristics of heptane combustion in a high-speed steam jet. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2233, art. 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/2233/1/012001.
16. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Sharypov O.V. Burning of heavy fuel oil in a steam jet in a new burner. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2020, vol. 61 (3), pp. 324–330. DOI: 10.1134/S0021894420030025.
17. Donohoe N., Heufer K.A., Aul C.J., Petersen E.L., Bourque G., Gordon R., Curran H.J. Influence of steam dilution on the ignition of hydrogen, syngas and natural gas blends at elevated pressures. *Combustion and Flame*, 2015, vol. 162 (4), pp. 1126–1135. DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.10.005.
18. Anufriev I., Kopyev E., Alekseenko S., Sharypov O., Butakov E., Vigriyanov M., Sadkin I. Cleaner crude oil combustion during superheated steam atomization. *Thermal Science*, 2021, vol. 25 (1, pt. A), pp. 331–345. DOI: 10.2298/tsci200509209a.
19. Anufriev I.S., Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 163, art. 114400. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400.
20. Unique scientific installation “Large-scale thermohydrodynamic stand for the study of thermal and gas-dynamic characteristics of power plants”. (In Russian). Available at: http://ckp-rf.ru/usu/73570/ (accessed 07.12.2023).
21. Kaskan W.E. The dependence of flame temperature on mass burning velocity. *Symposium (International) on Combustion*, 1957, vol. 6 (1), pp. 134–143.
22. Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A., Shadrin E.Yu., Krasinsky D.V., Shimchenko S.Yu. Experimental study of liquid hydrocarbon combustion under conditions of steam gasification in the presence of diluent gas. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2233, art. 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/2233/1/012015.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Копьев Евгений Павлович – родился в 1991 г., канд. техн. наук, заведующий лабораторией экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 100 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1. E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru).

Kopyev Evgeny Pavlovich – (b. 1991), Candidate of Sciences (Eng.), Head of Laboratory of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is author of about 100 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru).

Шадрин Евгений Юрьевич – родился в 1992 г., канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник лаборатории экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 100 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1. E-mail: evgen_zavita@mail.ru).

Shadrin Evgeny Yurievich – (b. 1992), Candidate of Sciences (Phys. & Math.), Junior Researcher of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is author of about 100 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: evgen_zavita@mail.ru).

Мухина Мария Андреевна – родилась в 1998 г., аспирант ИТ СО РАН, инженер-исследователь лаборатории экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 33 научные работы (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1. E-mail: mary-andr@yandex.ru).

Mukhina Mariia Andreevna – (b. 1998) student of IT SB RAS, engineer researcher of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. Her research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. She is author of about 33 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: mary-andr@yandex.ru

Садкин Иван Сергеевич – родился в 1998 г., аспирант НГТУ, инженер-исследователь лаборатории экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 58 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1. E-mail: sadkinvanya@mail.ru).

Sadkin Ivan Sergeevich – (b. 1998) student of NSTU, engineer researcher of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is author of about 58 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: sadkinvanya@mail.ru).

Статья поступила 26 сентября 2023 г.
Received September 26, 2023

To References:

Kopyev E.P., Shadrin E.Yu., Mukhina M.A., Sadkin I.S. Issledovanie parametrov goreniya zhidkogo uglevodorodnogo topliva pri ego raspylenii peregretym vodyanym parom, uglekislym gazom i ikh smes'yu [Study of combustion of liquid hydrocarbon fuel when sprayed with superheated water vapor, carbon dioxide and their mixture]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 4 (61), pp. 45–57. DOI: .10.17212/1727-2769-2023-4-45-57.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2023 октябрь–декабрь № 4 (61)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 330.341:621.383

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПАТЕНТНЫХ ДОКУМЕНТОВ*

С.Г. Филатова[1,2], А.Г. Вострецов[2,3], И.В. Бузук[1]
[1]*Федеральный институт промышленной собственности*
[2]*Новосибирский государственный технический университет*
[3]*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН*

Активная поддержка импортозамещения продуктов и технологий в различных областях производства в Российской Федерации началась в 2014 году. Не вызывает сомнений тот факт, что основу технологического развития и безопасности государства в первую очередь составляют электронные технологии. Компьютерная техника, системы управления и навигации, мобильная связь, интеллектуальная энергетика, телемедицина, электромобили и беспилотный транспорт, электронные банковские транзакции – это лишь малый перечень отраслей, в которых используются электронные компоненты. При этом в настоящее время большая часть производства электронной компонентной базы сосредоточена за рубежом, в таких странах как Китай, Индия, Тайвань. В том числе зарубежные компании, расположенные в Китае, США, Индии, Великобритании, Израиле и др., владеют большей частью патентов на устройства и технологии, связанные с электронной компонентной базой. Введение санкционных ограничений в 2022 году выявило существенную зависимость доступности электронной компонентной базы от политических факторов, что обострило актуальность создания и развития собственного производства различных элементов электронной компонентной базы. Результаты процесса импортозамещения могут быть объективно оценены по количеству опубликованных патентов. В данной статье с использованием инструментов современных патентных баз данных проведен анализ опубликованных патентных документов по самым востребованным пассивным элементам электронной компонентной базы – резисторам, конденсаторам, индуктивностям. Показана динамика патентования по пассивным электронным компонентам в РФ за 30 лет. Установлено, что мероприятия по импортозамещению практически не повлияли на патентование в сфере производства пассивных электронных компонентов. Проведено сравнение количества запатентованных разработок на территории РФ у отечественных правообладателей и зарубежных компаний. Определены области, обладающие высоким потенциалом развития технологий в данной сфере. Установлено, что российские производители пассивных электронных компонентов имеют значительный потенциал по патентованию своих разработок.

Ключевые слова: импортозамещение, резистор, конденсатор, индуктивность, технологии.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-58-76

Введение

Одним из важнейших направлений укрепления суверенитета Российской Федерации является импортозамещение изделий и технологий, играющих ключевую роль в производстве высокотехнологичной продукции. При этом основой технологического суверенитета и необходимым условием для импортозамещения является интеллектуальный суверенитет страны [1], выражающийся в совокупности

* Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSUN 2023-0007.

© 2023 Филатова С.Г., Вострецов А.Г., Бузук И.В.

правовых, управленческих, финансовых, кадровых, научных и технологических инструментов поддержки и развития института интеллектуальной собственности в нашей стране. В связи с этим актуальной является задача оценки совокупности охраняемых результатов интеллектуальной деятельности, необходимых для создания и развития отечественных высокотехнологических производств по критически важным отраслям экономики.

Официальные документы, определяющие приоритеты развития экономики РФ [2], очерчивают технологические отрасли, в которых импортозамещение имеет первоочередное значение. Одной из таких отраслей является производство электронных компонентов, используемых при создании продукции в приоритетных сферах развития – космические технологии, военная и гражданская связь, радиолокация и радионавигация, технологии радиоэлектронной борьбы. Появление новых сфер, таких как интеллектуальная энергетика, телемедицина, производство электромобилей, беспилотного транспорта, рост электронных транзакций и расширение номенклатуры цифровых документов, внедрение в промышленность устройств виртуальной и дополненной реальности также обусловливают расширение зависимости от электронных технологий. И особенно важной задача развития электронной промышленности становится в связи с появлением беспрецедентных внешних ограничений, связанных с запретом импорта как высокотехнологичных изделий в целом, так и отдельных электронных компонентов и технологий для их производства.

Результативность реализации планов по импортозамещению может быть оценена по доле российских патентов, выданных отечественным заявителям, по сравнению с российскими патентами, выданными иностранным заявителям. Охраняемые результаты интеллектуальной деятельности обеспечивают монопольное положение правообладателя на территории действия охранных документов, позволяют максимизировать объемы продаж и прибыль, повышают деловую репутацию и стоимость компании, открывают возможности использования новых форм предпринимательской деятельности, таких как франчайзинг, инжиниринг и т. п. [3].

Данная работа посвящена оценке потенциала импортозамещения основных пассивных элементов электронной компонентной базы. Под потенциалом импортозамещения в контексте данной статьи понимается возможность заменить импортируемые товары за счет производства внутри страны. Для этого рассмотрена динамика патентования по основным электронным компонентам в РФ в целом, объем патентных документов отечественных производителей и разработчиков электронных компонентов и их соотношение с документами, патентообладателями которых на территории РФ являются зарубежные компании. Кроме того, проведен анализ и сравнение ключевых областей применения электронных компонентов в мире и в России с целью выявления наиболее перспективных направлений для развития технологий и их патентования.

1. Постановка задачи

Определение понятия «электронная компонентная база» (ЭКБ) установлено ГОСТ Р 58857–2020. ЭКБ включает в себя электрорадиоизделия и электронные модули нулевого уровня. К электрорадиоизделиям относятся электротехнические изделия, изделия электронной техники и квантовой электроники, обладающие конструктивной целостностью и выполняющие функции генерирования, преобразования, переключения, задержки, распределения, запоминания, передачи и филь-

трации радиочастотных и электрических сигналов. Их принцип действия основан на электрофизических, электрохимических, электромеханических, фотоэлектронных и/или электронно-оптических процессах и явлениях, не подвергаемых изменениям в процессе применения при создании образцов электронной аппаратуры, в которых они применяются. Электрорадиоизделия изготавливаются по самостоятельным комплектам конструкторской и технологической документации. Электронные модули нулевого уровня представляют собой совокупность электрически соединенных электрорадиоизделий, образующих функционально и конструктивно законченные сборочные единицы, и предназначены для реализации функций приема, обработки, преобразования, хранения и/или передачи информации или формирования (преобразования) энергии.

Состав и классификация изделий, относящихся к ЭКБ, также устанавливаются ГОСТ Р 58857–2020. В настоящей работе используется классификация ЭКБ по функциональному назначению (табл. 1). Для целей патентного анализа было установлено соответствие кодов международной патентной классификации (МПК) некоторым классам изделий. Следует отметить, что МПК имеет более подробную классификацию, учитывающую как различные виды изделий, так и различные технологии их изготовления.

Таблица 1 / Table 1

Соответствие кодов МПК классам изделий
Compliance of IPC Codes with Product Classes

Класс (группа) изделий	Соответствие кодов МПК
Изделия электронной техники	
Изделия СВЧ (приборы электровакуумные СВЧ, изделия СВЧ комплексированные, приборы квантовые СВЧ, модули СВЧ, приборы ферритовые СВЧ)	H01J, H01J 21/20, 23/00-23/36, 25/00-25/78, H10N 60/00, 69/00, H01S 1/00, 3/00, 5/00
Микросхемы интегральные (цифровые, аналоговые, аналого-цифровые и цифроаналоговые, микросхемы преобразователей физических величин и компонентов датчиков)	H03H 9/00, 11/00, 17/00, H01L 27/00, H05K 13/00
Приборы полупроводниковые (диоды полупроводниковые, транзисторы, тиристоры, модули полупроводниковые)	H01L 21/238, 21/331, 21/332, 21/334-21/338, 21/77. 23/50, 25/00, 27/00, 29/70-29/739, 29/76, 29/772, 29/861, 29/87, 29/88, 29/93
Модули электронные (модули многокристальные, микросборки)	B81B, B81C, H01L 25/00, 27/00
Изделия квантовой электроники	
Приборы оптоэлектронные (излучатели полупроводниковые, оптопары, схемы интегральные оптоэлектронные)	H10K 50/00, 59/00, 65/00, H01L 27/14, 27/15, 33/00
Лазеры (излучатели лазеров, элементы лазерные, устройства управления лазерным излучением, гироскопы лазерные)	H01S 3/00, 3/10, 5/00, 5/06, G01C 19/58, 19/66
Приборы фоточувствительные (твердотельные, электровакуумные, устройства и модули тепловизионных приборов и средств ночного видения)	H01J 40/00, 47/00, H01L 31/00, G01J 5/00, G02B 23/12, H04N 23/20
Компоненты волоконно-оптических систем (модули оптоэлектронные, кабели оптические, соединители оптические, разветвители оптические, устройства волоконно-оптических систем связи и передачи информации, переключатели оптические, преобразователи измерительные волоконно-оптических датчиков)	G06B 6/00, 6/125, G02B, G02B 6/26, 6/35, G01H 9/00

Окончание табл. 1 / The End Table 1

Класс (группа) изделий	Соответствие кодов МПК
Электротехнические изделия	
Функциональные устройства (изделия микросистемной техники, источники вторичного электропитания, усилители электрические, преобразователи угла цифровые, аналого-цифровые преобразователи сигналов вращающихся трансформаторов, электроприводы, антенные модули, модули обработки сигналов)	H01Q, H04B 10/299, H04J 1/04-1/14
Приборы пьезоэлектрические и фильтры электромеханические (приборы пьезоэлектрические, фильтры электромеханические, приборы керамические)	H01L 41/00, H01G 4/12
Резисторы и конденсаторы	**H01C, H01L 29/8605, 29/92, 29/94, H01G, H01G 17/00**
Трансформаторы, дроссели, линии задержки, индуктивности	**H01F 5/00, 17/00, 19/00, 21/00, 27/00, 29/00, 30/00, 36/00, 37/00, 38/00, 41/00, H01P 9/00**
Источники тока (вторичные химические источники тока)	H01M 10/00

Как видно из табл. 1, область исследования патентных документов, касающихся электронной компонентной базы, весьма обширна и неоднородна.

Данная работа сфокусирована на исследовании перспектив импортозамещения основных пассивных элементов электронной компонентной базы – резисторов, конденсаторов и индуктивностей, а также технологий их производства и применения. Данные элементы находят широкое применение в различных областях электроники: в радиотехнической и телевизионной аппаратуре, в радиолокационной технике, в телефонии и телеграфии, энергетике, автоматике и телемеханике, в электроизмерительной и квантовой технике и пр., в том числе при криогенных температурах.

При проведении информационного поиска объем патентных документов оценивался в целом по предметным группам «резисторы», «конденсаторы», «индуктивности», без разделения на классы.

2. Анализ динамики патентования пассивных элементов электронной компонентной базы

Для выполнения патентного анализа были использованы данные Электронного архива заявок ФИПС, патентных поисковых систем PatSearch, Espacenet, Orbit Questel. Глубина поиска составила 30 лет. Были включены как изобретения (в том числе опубликованные заявки на изобретения), так и полезные модели. Данные и графики приведены по состоянию на 01.09.2023.

Область поиска по резисторам была ограничена при помощи МПК H01C, H01L 29/8605, по конденсаторам H01G, H01L 29/92, 29/94, по индуктивностям H01F 5/00, 17/00, 21/00, 27/00, 29/00, 37/00, 38/00, 41/00 (табл. 1).

За исследуемый период выявлено 697 российских патентов по резисторам (табл. 2), из них 471 (67,6 %) принадлежит российским разработчикам, 226 (32,4 %) – зарубежным. Количество российских патентов составляет менее 2 % от общего числа патентов по резисторам в мире.

По конденсаторам, начиная с 1993 года, в РФ зарегистрировано 1034 охранных документа (табл. 2), что составляет менее одного процента от общего количества патентов по конденсаторам в мире. При этом отечественными и зарубежными компаниями получено примерно одинаковое количество патентов.

Таблица 2 / Table 2

Сравнительный анализ количества патентов по резисторам, конденсаторам, индуктивностям в России и в мире

Comparative analysis of the number of patents on resistors, capacitors, inductors in Russia and in the world

Группа изделий	Количество документов (всего)				Кол-во патентов в мире, тыс. документов
	Отечественные правообладатели		Зарубежные правообладатели		
	ИЗ*	ПМ**	ИЗ*	ПМ**	
Резисторы	**697**				39,414
	471		226		
	330	141	222	4	
Конденсаторы	**1034**				129,640
	528		506		
	436	92	504	2	
Индуктивности	**2733**				222,857
	1624		1109		
	1078	546	1102	7	

* ИЗ – патенты на изобретения.
** ПМ – патенты на полезные модели.

В области производства индуктивностей имеется 2733 патента (табл. 2), это составляет 1,2 % от числа патентов по данной тематике в мире. При этом 1624 (59,4 %) патента принадлежит российским правообладателям, а 1109 (40,6 %) – зарубежным.

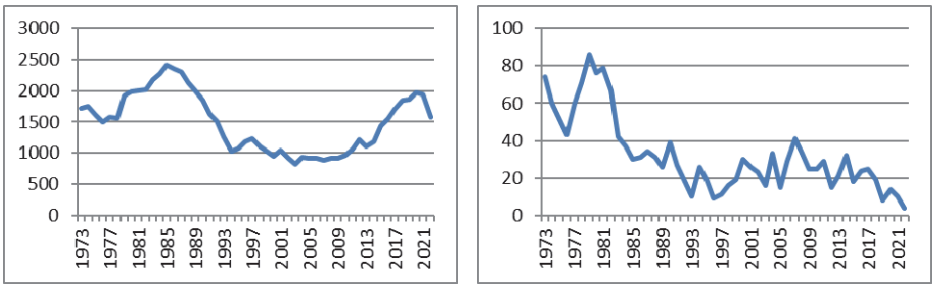
Следует отметить, что иностранные заявители предпочитают защищать свои разработки в качестве изобретений. Так, в совокупности по резисторам, конденсаторам и индуктивностям ими получено всего 13 патентов на полезные модели, что составляет менее 1 % от общего количества патентов, полученных иностранными заявителями в Российской Федерации. При этом у российских правообладателей количество патентов на полезные модели составляет около 30 % для резисторов и индуктивностей и около 20 % для конденсаторов от общего количества патентов.

Также анализ патентных портфелей показал, что российские правообладатели, как правило, не стремятся защитить свои разработки на зарубежных рынках, их патентные портфели в области резисторов, конденсаторов и индуктивностей включают только патенты Российской Федерации. Связано это с тем, что отечественные компании организуют производство пассивных электронных компонентов внутри страны преимущественно на собственных производственных площадях и не рассматривают возможность организации производства в других странах. При этом для зарубежных правообладателей российский рынок является одним из нескольких, на которых они осуществляют патентование. В основном иностранные компании стремятся защитить свои разработки в странах Европейского Союза (Германия, Франция, Великобритания и др.), а также в США, Китае, Индии, Японии, Корее и др.

3. Анализ динамики патентования устройств и технологий, связанных с резисторами

Динамика патентования технологий и продуктов, связанных с резисторами, за последние 50 лет отражена на рис. 1. Видно, что наибольшее количество новых решений как в мире, так и в России, запатентовано в период с 1976 по 1994 г.

В мире также наблюдается рост количества патентных документов по данной тематике с 2014 года (рис. 1), что связано с усилением интереса к высоковольтным резисторам и разработкам технологий для силовой электроники, электроэнергетики и транспорта, однако в России данное направление практически не развивается. Кроме того, многие производители не формируют патентные портфели на свою продукцию. Например, у предприятий, которые упомянуты в монографии [4] в качестве крупнейших производителей резисторов различного номинала, таких как ООО РЭЗ «РИКОН» [5] (Воронеж), ООО «Резистор КЭМ» [6] (Екатеринбург), ГК «АБСОЛЮТ» [7] (Воронеж), не выявлена патентная защита производимых резисторов.



а *б*

Рис. 1 – Динамика патентования технологий и продуктов, связанных с резисторами: *а* – в мире; *б* – в России

Fig. 1 – Dynamics of patenting technologies and products related to resistors: *a* – all over the World; *б* – in Russia

Уменьшение количества российских патентов после 2014 года также может быть обусловлено отказом иностранных разработчиков от патентования технологий, связанных с резисторами, в нашей стране.

В табл. 3 приведен анализ патентных портфелей пяти российских и зарубежных компаний, имеющих наибольшее количество российских патентов по резисторам. Также представлена динамика патентования решений, начиная с 1993 года. Видно, что мероприятия, связанные с импортозамещением, инициированные в 2014 году, не повлияли на количество патентов, связанных с резисторами, у данных компаний. Установлено, что наибольшее количество патентов в области резисторов имеется у таких российских компаний, как ОАО «НПО «ЭРКОН» [8] – 21 патент, АО «Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов» [9] (НИИЭМП) – 20, Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова – 9.

Компания АО «НПО «ЭРКОН» (Нижний Новгород) является преемником завода «Орбита», основанного в 1950 г., специализируется на разработке и производстве резисторов (прецизионных, мощных, высоко- и низкоомных, высокочастотных и др.). Компания активно патентовала свои разработки, связанные с резисторами, в 2008–2016 гг. (табл. 3), при этом большая часть патентов остается в силе и в настоящее время.

Ее патентный портфель включает патенты в области материалов для изготовления резисторов, способов изготовления резисторов, а также их конструкции (табл. 4).

АО «НПО «ЭРКОН» имеет систему менеджмента качества, сертифицированную на соответствие требованиям ГОСТ Р ИСО 9001–2015 и дополнительным требованиям ГОСТ РВ 15.002–2012, ЭС РД 009–2014 в Системе сертификации «Военный регистр» и «Электронсерт». Это дает ей право на разработку новых

видов и производство серийной продукции в интересах Министерства обороны РФ [4]. Таким образом, по совокупности факторов АО «НПО «ЭРКОН» обладает достаточно большим потенциалом импортозамещения в сфере резисторов.

Таблица 3 / Table 3

Анализ патентных портфелей российских и зарубежных правообладателей, имеющих наибольшее количество патентов по резисторам, конденсаторам, индуктивностям
Analysis of patent portfolios of Russian and foreign patent holders with the largest number of patents on resistors, capacitors, inductors

Название компании	Возраст портфеля, лет	Всего патентов	Год приоритетной публикации, количество патентов																															
1	2	3																																
ТОП-5 компаний по количеству российских патентов по резисторам																																		
1	2	3	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ABB	16	26	1	2		1		1		1	2	1	2	2		1	1	2	1	1	1			3		2		1					
Siemens	15	22		1			1		1	1	1		1		1		1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1					
ЭРКОН	10	21																7	3		1		1	1	6	2							
НИИЭМП	20	16				2		1	2		1			2	1	1		2	1		1												
Dehn and Soehne	15	13												1		4	2	2	1		2						1						
ТОП-5 компаний по количеству российских патентов по конденсаторам																																		
1	2	3	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
TANIOBIS	19	40						2	1	2	2	4	5	10	6	1	2	3			1		1										
Элеконд	10	22		1												2	3		1	1		2	2	1	1	1	2	1		3			1
ГИРИКОНД	21	20	1		10		1												1	2	1	1	1		1	1							
CABOT	22	19	1		1	2	2	2	4	1	3	1																					
Nissan	11	15																1	1	2	5	2	1	1	1	1							
ТОП-9 компаний по количеству российских патентов по индуктивностям																																		
1	2	3	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Reinhausen	14	92	1		3		3	2	1	2	2		1	1	5	1	2	6	5	8	10	14	4	8	3	2			7				
ABB	15	92		1	1	3	6		1	2				4	4	9	8	6	7	15	10	1	2	4	2	1	4	1					
Siemens	12	70		1		1	1							1	7	5	1	3	3	3	6	3	5	7	5	7	2	8	1				
Philips	12	58										1	1			3	4	3	9	11	3	3	3	5	4	2	2	2	2				
JFE STEEL	9	50															1			2	2	8	12	4	5	3	3	1	6	3			
АО СЗТТ	24	42				7	10	12	2	1	3	3	2											1	1							1	
Nippon	10	33	1									1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	1	2				3	2	3	5	3		
Toyota	9	25															2	3	1	1	1	1	1	1	1	3	4	5		1			
Nissan	9	23																		3	4		1	3	4	4	4						

Таблица 4 / Table 4

Патентный портфель НПО «ЭРКОН» по резисторам (поддерживаемые патенты)
The patent portfolio of SPA ERKON on resistors (supported patents)

Номер патента	Дата выдачи	Название
RU 2363496 C1	27.04.2008	Резистивный материал и мишень из резистивного материала
RU 2323497 C1	27.04.2008	Материал для изготовления тонкопленочных резисторов и способ получения резистивной пленки на его базе
RU 2330342 C1	27.07.2008	Резистивный материал
RU 2338283 C1	10.11.2008	Материал для изготовления тонкопленочных резисторов
RU 2340024 C1	27.11.2008	Материал для изготовления тонкопленочных резисторов
RU 2340971 C1	10.12.2008	Материал для изготовления тонкопленочных резисторов
RU 2369933 C1	10.10.2009	Материал для изготовления тонкопленочных резисторов
RU 2369934 C1	10.10.2009	Резистивный материал для изготовления тонкопленочных резисторов
RU 2421491 C1	20.06.2011	Эмаль для цветовой кодовой маркировки изделий электронной техники
RU 2551905 C1	10.06.2015	Способ изготовления чип-резисторов
RU 2552631 C1	10.06.2015	Способ изготовления толстопленочных резисторов
RU 2552626 C1	10.06.2015	Способ изготовления толстопленочных резисторов
RU 2552630 C1	10.06.2015	Способ изготовления чип-резисторов
RU 2583952 C1	10.05.2016	Способ изготовления тонкопленочного резистора
RU 2584032 C1	20.05.2016	Пленочный резистор

АО НИИЭМП (Пенза) является многопрофильным предприятием, специализирующимся на разработке и производстве электронных компонентов, в том числе резисторов, конденсаторов, микросхем. Патентами защищены конструкции и способы изготовления тонкопленочных резисторов (табл. 5), однако большая часть из них не поддерживается. Основное количество патентов по резисторам получено до 2011 г. (табл. 3).

Таблица 5 / Table 5

Патентный портфель НИИЭМП по резисторам (поддерживаемые патенты)
The patent portfolio of RI EMP on resistors (supported patents)

Номер патента	Дата выдачи	Название
RU 2276419 C1	10.05.2006	Способ лазерной подгонки пленочных элементов интегральных схем
RU 2330343 C1	27.07.2008	Тонкопленочный резистор
RU 2319246 C1	10.03.2008	Тонкопленочный резистор
RU 2374710 C1	27.11.2009	Способ изготовления тонкопленочного резистора
RU 2421837 C1	29.03.2010	Прецизионный тонкопленочный резистор

Среди международных компаний лидерами патентования в области резисторов (табл. 3) на российском рынке являются компании ABB [10] (группа компаний) – 26 патентов, Siemens [11] – 22, Dehn and Soehne [12] – 15.

Международная технологическая компания ABB (Швейцария) разрабатывает новые решения и производит продукты в сфере электрооборудования, робототехники, электротехники, автоматизации и электроприводов. Патентный портфель включает 26 российских патентов на изобретения по резисторам, основные касаются силовой электротехники – ограничителей перенапряжений и разрядников

для защиты от перенапряжений в электрических сетях. Международная компания Siemens (Германия) специализируется на разработке решений в сфере электротехники, электроники, энергетического оборудования, транспорта, медицинского оборудования и светотехники. Ее российские патенты также раскрывают решения, связанные с защитой от перенапряжений в электрических сетях. С 1993 г. компании ABB и Siemens регулярно патентовали свои разработки по резисторам на территории РФ (см. табл. 3).

Немецкая компания Dehn and Soehne (Германия) специализируется на технологиях и оборудовании для молниезащиты. Её российские патенты также касаются решений, связанных с защитой от перенапряжений. Большая часть патентов получена до 2014 года.

База данных Orbit Questel проводит классификацию патентов по 35 технологическим областям. Анализ этой классификации показал, что применение технических решений по резисторам, запатентованные в РФ, в основном касается следующих сфер: электрические машины, аппараты, энергетика – 687 патентов; полупроводники – 27 патентов; аудиовизуальные технологии – 27; измерения – 26; поверхностные технологии, покрытия – 21; материалы, металлургия – 22 (рис. 2). Данные отрасли в целом соответствуют сферам применения решений, связанных с резисторами, в мире (рис. 2).

Рис. 2 – Технологические области применения патентов, связанных с резисторами в России и в мире

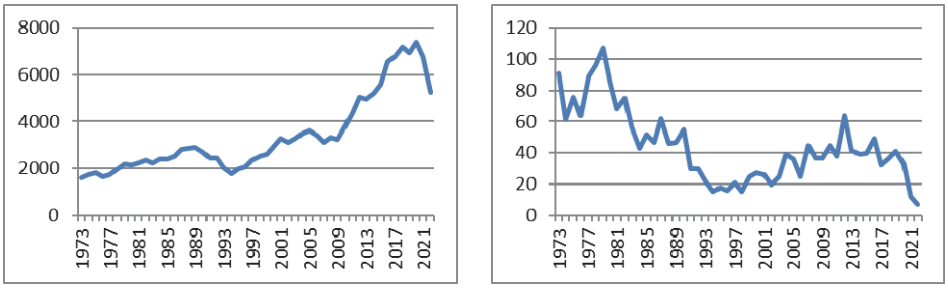
Fig. 2 – Technology domains of application of patents related to resistors in Russia and all over the World

3.1. Анализ динамики патентования устройств и технологий, связанных с конденсаторами

Динамика патентования технологий и продуктов, связанных с конденсаторами, за последние 50 лет отражена на рис. 3. Видно, что взрывной рост числа патентов по конденсаторам в мире наблюдается с 2009 года. Очевидно, это обусловлено развитием индустрии накопителей энергии, которые построены с использованием конденсаторов большой емкости и предназначены, например, для мобильных транспортных средств, использующих альтернативные источники энергии, а также для систем распределенной энергетики. При этом динамика патентования в России существенно отстает от мировой. До 2013 года наблюдался незначительный рост количества российских патентов по конденсаторам.

В табл. 3 приведен анализ патентных портфелей пяти российских и зарубежных компаний, имеющих наибольшее количество российских патентов по конден-

саторам. Также представлена динамика патентования решений, начиная с 1993 года. Видно, что мероприятия по импортозамещению электронной компонентной базы не привели к интенсификации патентования решений, связанных с конденсаторами, в крупных компаниях.



а *б*

Рис. 3 – Динамика патентования технологий и продуктов, связанных с резисторами: *а* – в мире; *б* – в России

Fig. 3 – Dynamics of patenting technologies and products related to capacitors: *а* – all over the World; *б* – in Russia

Установлено, что крупнейшими отечественными патентообладателями в сфере конденсаторов являются АО «Элеконд» [13] – 22 патента, АО НИИ «ГИРИКОНД» [14] – 20, АО «Энергия» [15] – 11 (табл. 3). Среди международных компаний наибольшее количество патентов по конденсаторам у таких международных компаний как TANIOBIS [16] (ранее – HC Starck Tantalum & Niobium) – 40 патентов, CABOT CORPORATION [17] – 19, Nissan [18] – 15, причем бóльшая часть этих патентов получена до 2014 года. Таким образом, спад количества российских патентов по конденсаторам может быть обусловлен отказом зарубежных разработчиков патентовать решения, связанные с передовыми технологиями накопления энергии, в нашей стране в связи с введением санкций в 2014 году.

Компания АО «Элеконд» (Сарапул) основана в 1968 году и в настоящее время является ведущим российским производителем алюминиевых, ниобиевых и танталовых конденсаторов, широко использующихся в средствах связи, машиностроении, радиоэлектронной, приборостроительной, авиационной промышленности и многих других отраслях. В настоящее время предприятием серийно выпускается 34 типа оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов, 17 типов объемно-пористых танталовых конденсаторов, 16 типов оксидно-полупроводниковых танталовых конденсаторов, один тип оксидно-полупроводниковых ниобиевых конденсаторов [19].

Технологии производства конденсаторов защищены патентами (табл. 6), в которых раскрыты способы изготовления анодов, катодов для полупроводниковых конденсаторов, способы приготовления электролита, а также конструкции конденсаторов с применением вышеуказанных элементов. Всего АО «Элеконд» имеет 22 патента по конденсаторам, средний возраст патентного портфеля – 10 лет. Компания активно патентует свои разработки с 2006 года (табл. 3). Большая часть патентов действует (табл. 6).

Система менеджмента качества предприятия АО «Элеконд» применительно к разработке, производству продукции в соответствии с классами ЕК 001-2020: 5910, 6135 соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 9001–2015 и дополнитель-

ным требованиям ГОСТ РВ 0015-002–2012, ЭС РД 009–2014 в Системе сертификации «Электронсерт», система менеджмента качества применительно к разработке и производству конденсаторов постоянной емкости оксидно-электролитических алюминиевых, оксидно-полупроводниковых, объемно-пористых танталовых, конденсаторов с двойным электрическим слоем, фольги алюминиевой травленой и формованной, изделий из пластмассы и резины соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 9001–2015 (ISO 9001:2015). Таким образом, по совокупности факторов АО «Элеконд» имеет высокий потенциал импортозамещения в области конденсаторов.

Таблица 6 / Table 6

Патентный портфель АО «Элеконд» по конденсаторам (поддерживаемые патенты)

The patent portfolio of Elecond on capacitors (supported patents)

Номер патента	Дата выдачи	Название
RU 2290709 C2	27.12.2006	Способ получения переходного катодного слоя в оксидно-полупроводниковом конденсаторе
RU 2300155 C1	27.05.2007	Способ получения стеклотанталового изолятора для объемно-пористого конденсатора
RU 2307417 C1	27.09.2007	Рабочий электролит для конденсатора, способ его приготовления и алюминиевый электролитический конденсатор с таким электролитом
RU 2362229 C1	20.07.2009	Рабочий электролит для конденсатора, способ его приготовления и алюминиевый электролитический конденсатор с таким электролитом
RU 2393569 C1	27.06.2010	Рабочий электролит для конденсатора, способ его приготовления и алюминиевый электролитический конденсатор с таким электролитом
RU 2446499 C1	27.03.2012	Способ изготовления анодов объемно-пористых электролитических конденсаторов
RU 2463679 C1	10.10.2012	Способ получения катодной обкладки конденсатора и оксидно-полупроводниковый конденсатор
RU 2516525 C1	20.05.2014	Способ получения катодной обкладки оксидно-полупроводникового конденсатора
RU 2612192 C1	03.03.2017	Рабочий электролит для конденсатора с двойным электрическим слоем, способ его приготовления и конденсатор с этим электролитом
RU 2623969 C1	29.06.2017	Способ изготовления катодных обкладок объемно-пористых танталовых электролитических конденсаторов
RU 2713639 C1	05.02.2020	Рабочий электролит для конденсатора, способ его приготовления и алюминиевый электролитический конденсатор с таким электролитом
RU 2715998 C1	05.03.2020	Рабочий электролит для конденсатора, способ его приготовления и алюминиевый электролитический конденсатор с таким электролитом
RU 2716491 C1	12.03.2020	Рабочий электролит для конденсатора, способ его приготовления и алюминиевый электролитический конденсатор с таким электролитом
RU 2790858 C1	28.02.2023	Способ изготовления катодного покрытия на основе электропроводящего полимера и твердотельный электролитический конденсатор с улучшенными емкостными характеристиками

Компания АО «НИИ «ГИРИКОНД» (Санкт-Петербург) основана в 1939 году. В настоящее время её основной задачей является разработка и производство конкурентоспособных изделий, соответствующих мировому уровню. Институт входит в состав холдинга «Российская электроника» и является базовым предприятием радиоэлектронного комплекса РФ в области конденсаторов и нелинейных полупроводниковых резисторов.

АО «НИИ «ГИРИКОНД» имеет 20 патентов по конденсаторам, средний возраст патентного портфеля 21 год, бóльшая часть патентов получена до 2014 года (табл. 3) и не действует (табл. 7). Патенты касаются способов изготовления конденсаторов и их конструкций, а также раскрывают состав материалов, используемых для производства конденсаторов.

Таблица 7 / Table 7

Патентный портфель «НИИ “ГИРИКОНД”» по конденсаторам (поддерживаемые патенты)

The patent portfolio of RI GIRICOND on capacitors (supported patents)

Номер патента	Дата выдачи	Название
Изобретения		
RU 2398302 C1	27.08.2010	Дисковый проходной керамический конденсатор постоянной емкости
RU 2413325 C1	27.02.2011	Сегнетокерамический конденсаторный диэлектрик для изготовления керамических конденсаторов температурно-стабильной группы
RU 2550090 C2	10.05.2015	Тонкопленочный вариконд
Полезные модели		
RU 158534 U8	10.01.2016	Керамический опорный помехоподавляющий конденсатор

Международная компания TANIOBIS (Германия) является ведущим мировым разработчиком и производителем высококачественных металлических порошков тантала и ниобия, их оксидов, соединений и хлоридов высокой чистоты для производства конденсаторов, фильтров поверхностных акустических волн и полупроводников, которые применяются в области современной электроники, а также в аэрокосмической и медицинской технике, в химической и автомобильной промышленности. Обладая одним из самых полных портфелей продуктов для порошков тантала и ниобия, компания вносит значительный вклад в миниатюризацию электроники, развитие технологий аддитивного производства и Интернета вещей. Российские патенты компании посвящены технологиям производства и конструкциям конденсаторов на основе ниобия и тантала.

CABOT CORPORATION (США) – международная компания по производству специальных химикатов и эксплуатационных материалов. Российские патенты компании раскрывают технологии производства порошков из ниобия, способы изготовления ниобиевых конденсаторов и их конструкцию.

Международная компания Nissan специализируется на разработке технологий автомобилестроения. В области конденсаторов у данной компании имеются патенты, в основном касающиеся устройств накопления энергии для электромобилей.

Анализ технологических областей показал, что применение технических решений по конденсаторам, запатентованных в РФ, в основном касается следующих сфер: электрические машины, аппараты, энергетика – 978 патентов; материалы, металлургия – 151 патент; поверхностные технологии, покрытия – 110; полупро-

водники – 107 и др. (рис. 4). Данные отрасли в целом соответствуют сферам применения решений, связанных с конденсаторами, в мире (рис. 4). Следует отметить, что на втором месте по количеству патентов в России находится сфера новых материалов для конденсаторов, а в мире – полупроводниковые технологии применительно к конструкциям конденсаторов. Таким образом, данное направление является перспективным для развития.

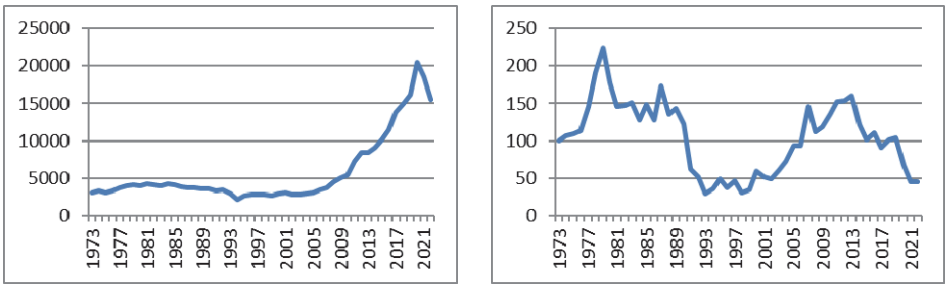
Рис. 4 – Технологические области применения патентов, связанных с конденсаторами в России и в мире

Fig. 4 – Technology domains of application of patents related to capacitors in Russia and all over the World

3.2. Анализ динамики патентования устройств и технологий, связанных с индуктивностями

Динамика патентования технологий и продуктов, связанных с индуктивностями, за последние 50 лет отражена на рис. 5. Видно, что взрывной рост новых решений начался в 2007 году. Связано это с разработкой новых решений для электротранспорта, в частности зарядных устройств, в том числе беспроводных.

При этом в России пик патентования приходился на 1973–1989 гг., затем наблюдается некоторый спад, а с 2002 по 2013 г. – опять рост. Спад количества патентов по индуктивностям после 2014 года, вероятнее всего, связан с отказом зарубежных разработчиков патентовать решения в этой сфере в нашей стране в связи с введением санкций.



а *б*

Рис. 5 – Динамика патентования технологий и продуктов, связанных с индуктивностями: *а* – в мире; *б* – в России

Fig. 5 – Dynamics of patenting technologies and products related to inductors: *а* – all over the World; *б* – in Russia

В табл. 3 приведен анализ патентных портфелей восьми зарубежных и одной российской компании, имеющих наибольшее количество российских патентов по индуктивностям. В целом анализ российских патентов по индуктивностям инструментами поисковых систем PatSearch, Espacenet и Orbit Questel показал, что наибольшее количество патентов, касающихся индуктивностей, имеется у таких российских компаний как Свердловский завод трансформаторов тока (ОАО СЗТТ) [20] – 42 патента, Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ) [21] – 15 патентов, АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» (ОНИИП) [22] – 15, Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ) [23] – 11.

Свердловский завод трансформаторов тока (Екатеринбург) специализируется на производстве измерительных трансформаторов тока и напряжения, силовых трансформаторов и распределительных устройств, изоляторов проходных и катушек электромагнитов. Завод имеет в своем портфеле 42 патента, основная часть которых была получена до 2014 года (табл. 3). В портфеле имеется только один поддерживаемый патент на изобретение RU 2566469 C2 «Литой трансформатор тока», опубликованный 20.05.2015.

Также в табл. 3 представлена динамика патентования решений, начиная с 1993 года. Видно, что российский рынок весьма интересен зарубежным правообладателям – они регулярно патентуют на российском рынке новые решения, связанные с индуктивностями. Количество российских патентов по индуктивностям у иностранных компаний значительно превосходит количество патентов отечественных производителей. Наибольшее количество патентов по индуктивностям в РФ имеется у таких крупных международных компаний как Reinhausen [24], Siemens, ABB и др.

Немецкая электроэнергетическая компания Reinhausen специализируется на разработке и изготовлении управляемых трансформаторов, преобразователей напряжений, испытательной и измерительной техники. Российские патенты данной компании посвящены в основном силовым коммутационным устройствам и накопителям энергии.

Патентный портфель компании ABB включает 92 российских патента по индуктивностям. Основные направления патентования для этой компании в России – это тяговые трансформаторы, трансформаторы тока, изоляторы и коммутационные устройства.

Патенты компании Siemens по индуктивностям касаются конструкций трансформаторов и катушек индуктивностей различного назначения, устройств для намотки катушек, систем охлаждения трансформаторов.

Также следует отметить патентный портфель компании Nissan. Ей принадлежит 23 российских патента по индуктивностям. Данные патенты имеют практическую направленность в сфере автомобилестроения, в частности они посвящены применению катушек индуктивностей для систем беспроводного электропитания транспортных средств.

Анализ технологических областей показал, что применение технических решений по индуктивностям, запатентованных в РФ, в основном касается следующих сфер: электрические машины, аппараты, энергетика – 2671 патент; материалы, металлургия – 209; измерения – 180; поверхностные технологии, покрытия – 157; транспорт – 120 и др. (рис. 6). Данные отрасли в целом соответствуют сферам применения решений, связанных с индуктивностями, в мире (рис. 6).

Рис. 6 – Технологические области применения патентов, связанных с индуктивностями в России и в мире

Fig. 6 – Technology domains of application of patents related to inductors in Russia and all over the World

Заключение

В статье проведен анализ динамики патентования технических решений, связанных с такими основными пассивными элементами электронной компонентной базы как резисторы, конденсаторы и индуктивности, в России и в мире, который показал существенное технологическое отставание российских производителей в этой области. Причем мероприятия, направленные на импортозамещение электронных компонентов, не повлияли на количество патентов в данных областях у крупных российских компаний, особенно на количество российских патентов у иностранных компаний. Напротив, наблюдается снижение интенсивности патентования иностранными компаниями новых технологий на российском рынке с 2014 года.

Согласно данным [4] в России в настоящее время имеется 11 крупных производителей пассивных электронных компонентов. Из них только у компании АО «НПО «ЭРКОН» выявлен портфель поддерживаемых патентов, защищающих производимые компоненты.

Проведенный анализ показал, что темпы патентования новых разработок в России значительно отстают от мировых, что адекватно отражает технологическое отставание производства. Пока отечественная электронная промышленность осваивает производство одного компонента, в мире появляются десятки новых с более высокими параметрами. Кроме того, многие предприятия в силу различных причин не патентуют новые технологии, конструкции и материалы, связанные с резисторами, конденсаторами и индуктивностями, тем самым ставя под угрозу патентную чистоту своих разработок в случае возникновения патентных споров.

Тем не менее некоторые отечественные производители резисторов, конденсаторов и индуктивностей обладают достаточно хорошим потенциалом импортозамещения электронной компонентной базы. Отечественные разработчики электронных изделий были вынуждены приспособиться к изменившимся условиям и разработать методики проведения работ по импортозамещению ЭКБ. При этом существенной остается проблема того, что отечественные аналоги выпускаются в более крупных корпусах, поэтому, как правило, их невозможно использовать без переработки конструкторской документации на устройство [25].

Также следует отметить, что необходимым условием для организации производства конкурентоспособных изделий ЭКБ является наличие специализирован-

ного высокотехнологичного оборудования, а также комплектующих и расходных материалов для возможности его обслуживания и ремонта [26], т. е. импортозамещение даже таких простейших компонентов ЭКБ, как резисторы, конденсаторы, индуктивности, невозможно без существенной модернизации производственных площадок.

Таким образом, важным является стимулирование развития высокотехнологических производств на основе отечественных инновационных разработок с обеспечением их своевременной патентной защиты.

Наиболее перспективными направлениями развития технологий являются новые применения резисторов, конденсаторов, индуктивностей в области энергетики, электрических машин и транспорта, а также их адаптация к применению в криогенных условиях. Актуальной является также задача миниатюризации основных пассивных электронных компонентов, совершенствование технологий производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Неретин О.П.** Интеллектуальный суверенитет экономики России. – М.: ФИПС, 2022. – 166 с.
2. Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.01.2020 № 20-р.
3. **Эриванцева Т.Н.** Оценка перспектив преодоления импортозависимости в условиях реализации национального проекта «Наука» по данным патентного анализа // Экономика науки. – 2018. – Т. 4, № 4. – С. 261–271. – DOI: 10.22394/2410-132X-2018-4-4-261-271.
4. Анализ возможностей импортозамещения электронной компонентной базы / под ред. А.Н. Игнатова. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 332 с.
5. Рамонский электрозавод РИКОН: сайт. – URL: https://vkzr.ru (дата обращения: 07.12.2023).
6. Резистор КЭМ. Производство резисторов, блоков и ящиков сопротивлений: сайт. – URL: https://resistor1.ru (дата обращения: 07.12.2023).
7. ООО ГК «АБСОЛЮТ»: сайт. – URL: https://gk-absolut1.ru (дата обращения: 07.12.2023).
8. АО «НПО «ЭРКОН»: сайт. – URL: https://www.erkon-nn.ru (дата обращения: 07.12.2023).
9. АО «НИИЭМП»: сайт. – URL: https://niiemp.ru (дата обращения: 07.12.2023).
10. ABB Group. Leading digital technologies for industry: website. – URL: https://new.abb.com (accessed: 07.12.2023).
11. Siemens: website. – URL: https://www.siemens.com (accessed: 08.12.2023).
12. DEHN + SOHNE (Ден) – Молниезащита (грозозащита) зданий и сооружений: сайт. – URL: http://www.dehn-sohne.ru (дата обращения: 08.12.2023).
13. АО «Элеконд»: сайт. – URL: https://elecond.ru (дата обращения: 08.12.2023).
14. АО «НИИ «Гириконд»: сайт. – URL: https://giricond.ru (дата обращения: 08.12.2023).
15. ПАО «Энергия»: сайт. – URL: https://jsc-energiya.com (дата обращения: 08.12.2023).
16. TANIOBIS: website. – URL: https://taniobis.com (accessed: 08.12.2023).
17. Cabot Corporation. Specialty Chemical and Performance Materials: website. – URL: https://cabotcorp.com (accessed: 08.12.2023).
18. Nissan Motor Corporation Global Website. – URL: https://nissan-global.com (accessed: 08.12.2023).
19. АО «Элеконд». – URL: http://madeinur.ru/2018/01/01/оао-элеконд/ (дата обращения: 08.12.2023).
20. Свердловский завод трансформаторов тока (СЗТТ): сайт. – URL: https://www.cztt.ru (дата обращения: 08.12.2023).
21. РФЯЦ-ВНИИЭФ: сайт. – URL: https://www.vniief.ru/ (дата обращения: 08.12.2023).
22. АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»: сайт. – URL: http://www.oniip.ru/ (дата обращения: 08.12.2023).
23. Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ): сайт. – URL: https://ulstu.ru (дата обращения: 08.12.2023).

24. MR. The power behind power. Energy technology for the future: Reinhausen: website. – URL: https://www.reinhausen.com (accessed: 08.12.2023).
25. **Алямов А.Э., Баласов И.Ю., Бажанов В.А.** Импортозамещение электронной компонентной базы в оборонном производстве // ЭКО. – 2015. – № 11. – С. 17–27.
26. **Ивлев Г.П., Эриванцева Т.Н.** Патентная информация – источник ценных знаний для реинжиниринга // Право и цифровая экономика. – 2022. – № 3 (17). – С. 5–11. – DOI: 10.17803/2618-8198.2022.17.3.005-011.

ESTIMATION OF THE IMPORT SUBSTITUTION POTENTIAL OF THE ELECTRONIC COMPONENTS IN THE RUSSIAN FEDERATION BASED ON THE PATENT DOCUMENTS ANALYSIS

Filatova S.G.[1,2], Vostretsov A.G.[2,3], Buzuk I.V.[1]
[1]*Federal institute of industrial property, Moscow, Russia*
[2]*Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia*
[3]*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

Since 2014, the Russian Federation has been actively supporting import substitution of products and technologies in various areas of production. There is no doubt that the technological development and the state security base on electronic technologies primarily. This is due to the fact that they have penetrated into all spheres of our life. For example, computer equipment, control and navigation systems, mobile communications, intelligent energy, telemedicine, electric vehicles and unmanned vehicles, electronic banking transactions are just a short list of industries where electronic components are used. At the same time, the main part of the electronic component base production is currently located abroad, in China, India, Taiwan, etc. Also foreign companies located in China, the USA, India, the UK, Israel, its., own the most of the patents for devices and technologies related to the electronic component base. A significant dependence of the availability of the electronic component base on political factors were revealed by the sanctions restrictions in 2022. And this highlight the urgency of creating and developing national production of various elements of the electronic component base. The number of patents is the objective indicator of the import substitution results. In this paper, the analysis of published patent documents on the most popular passive elements of the electronic component base (resistors, capacitors, inductors) is carried out using the tools of modern patent databases. The dynamics of patenting for passive electronic components in the Russian Federation over 30 years is shown. It was found that import substitution measures had practically no effect on patenting in the production of passive electronic components. The comparison of the number of Russian patent owned by domestic patent holders and by foreign companies is carried out. High potential technology domains for development have been identified. It is established that Russian manufacturers of passive electronic components have a significant potential for patenting their developments.

Keywords: import substitution, resistor, capacitor, inductance, technology.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-58-76

REFERENCES

1. Neretin O.P. *Intellektual'nyi suverenitet ekonomiki Rossii* [Intellectual sovereignty of the Russian economy]. Moscow, Federal institute of industrial property Publ., 2022. 166 p.
2. Development Strategy of the electronic industry of the Russian Federation for the period until 2030. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation of 17.01.2020 No. 20-p. (In Russian).
3. Erivantseva T.N. Otsenka perspektiv preodoleniya importozavisimosti v usloviyakh realizatsii natsional'nogo proekta «Nauka» po dannym patentnogo analiza [Syringes and catheters – prospects for overcoming import dependence in the context of the implementation of the national project “Science”]. *Ekonomika nauki = Economics of Science*, 2018, vol. 4 (4), pp. 261–271. DOI: 10.22394/2410-132X-2018-4-4-261-271.
4. Ignatov A.N., ed. *Analiz vozmozhnostei importozameshcheniya elektronnoi komponentnoi bazy* [Analysis of import substitution possibilities of electronic component base]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2023. 332 p.

5. Ramon Electric Plant RICON. Website. (In Russian). Available at: https://vkzr.ru (accessed 07.12.2023).
6. KEM resistor (Manufacture of resistors, blocks and boxes of resistors). Website. (In Russian). Available at: https://resistor1.ru (accessed 07.12.2023).
7. OOO GK "ABSOLUT". Website. (In Russian). Available at: https://gk-absolut1.ru (accessed 07.12.2023).
8. JSC "NPO "ERKON". Website. (In Russian). Available at: https://www.erkon-nn.ru (accessed 07.12.2023).
9. JSC "NIIEMP". Website. (In Russian). Available at: https://niiemp.ru (accessed 07.12.2023).
10. ABB Group. *Leading digital technologies for industry*. Website. Available at: https://new.abb.com (accessed 07.12.2023).
11. Siemens. Website. Available at: https://www.siemens.com (accessed 08.12.2023).
12. DEHN + SOHNE. Website. Available at: http://www.dehn-sohne.ru (accessed 08.12.2023).
13. JSC "Elekond". Website. (In Russian). Available at: https://elecond.ru (accessed 08.12.2023).
14. JSC "Research Institute "Girikond". Website. (In Russian). Available at: https://giricond.ru (accessed 08.12.2023).
15. JSC "Energy". Website. Available at: https://jsc-energiya.com (accessed 08.12.2023).
16. TANIOBIS. Website. Available at: https://taniobis.com (accessed 08.12.2023).
17. Cabot Corporation. Specialty Chemical and Performance Materials. Website. Available at: https://cabotcorp.com (accessed 08.12.2023).
18. Nissan Motor Corporation Global Website. Available at: https://nissan-global.com (accessed 08.12.2023).
19. JSC "Elekond". (In Russian). Available at: http://madeinur.ru/2018/01/01/оао-элеконд/ (accessed 08.12.2023).
20. Sverdlovsk Current Transformer Plant (NWTT). Website. (In Russian). Available at: https://www.cztt.ru (accessed 08.12.2023).
21. Russian federal nuclear center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics. Website. Available at: https://www.vniief.ru/ (accessed 08.12.2023).
22. Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (JSC ONIIP). Website. (In Russian). Available at: http://www.oniip.ru/ (accessed 08.12.2023).
23. Ulyanovsk State Technical University (UlSTU). Website. (In Russian). Available at: https://ulstu.ru (accessed 08.12.2023).
24. MR. The power behind power. Energy technology for the future: Reinhausen. Website. Available at: https://www.reinhausen.com (accessed 08.12.2023).
25. Alamov A.E., Balasov A.E., Bazhanov V.A. Importozameshchenie elektronnoi komponentnoi bazy v oboronnom proizvodstve [Import substitution of electronic components in the production of defense]. *EKO = ECO*, 2015, no. 11, pp. 17–27.
26. Ivlev G.P., Erivantseva T.N. Patentnaya informatsiya – istochnik tsennykh znanii dlya reinzhiniringa [Patent information as a source of valuable knowledge for reengineering]. *Pravo i tsifrovaya ekonomika = Law and Digital Economy*, 2022, no. 3 (17), pp. 5–11. DOI: 10.17803/2618-8198.2022.17.3.005-011.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Филатова Светлана Геннадьевна – канд. техн. наук, доцент, государственный эксперт по интеллектуальной собственности отдела полезных моделей Сибирского центра ФИПС. Область научных интересов: цифровая статистическая обработка сигналов, патентная аналитика. Опубликовано более 35 научных работ. (Адрес: 630015, Россия, Новосибирск, ул. Планетная, 30, к. 2а. E-mail: s.filatova@corp.nstu.ru).

Filatova Svetlana Gennadjevna – Candidate of Sciences (Eng.), assoc. prof., state expert on industrial property at the department of utility models of the Siberian Center of the Federal Institute of Industrial Property. Her research interest is currently focused on digital statistical signal processing, patent analitics. She is author of more than 35 scientific papers. (Adress: 30, Planetnaya Streeet, bldg 2a, Novosibirsk, 630015, Russia. E-mail: s.filatova@corp.nstu.ru).

Вострецов Алексей Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, засл. деятель науки РФ, советник при ректорате НГТУ, заведующий лабораторией квантовой криогенной электроники. Область научных интересов: помехоустойчивые алгоритмы оценивания в аналого-цифровых системах обработки сигналов. Опубликовано более 150 научных работ. (Address: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vostreczov@corp.nstu.ru).

Vostretsov Alexey Gennadjevich – Doctor of Sciences (Eng.), professor, Honored Scientist of the Russian Federation, NSTU Rector's Advisor, Head of the Laboratory of Quantum Cryogenic Electronics. His research interest is currently focused on noise-resistant estimation algorithms in analog-to-digital signal processing systems. He is author of more than 150 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vostreczov@corp.nstu.ru).

Бузук Игорь Валерьевич – ведущий государственный эксперт по интеллектуальной собственности отдела полезных моделей Сибирского центра ФИПС. Область научных интересов: патентная экспертиза, измерительная техника. (Адрес: 630015, Россия, Новосибирск, ул. Планетная, 30, к. 2а. E-mail: novosib09@rupto.ru).

Buzuk Igor Valeryevitch – a leading state expert on industrial property at the department of utility models of the Siberian Center of the Federal Institute of Industrial Property. His research interest is currently focused on patent examination and measuring technology. (Adress: 30, Planetnaya Streeet, bldg 2a, Novosibirsk, 630015, Russia. E-mail: novosib09@rupto.ru).

Статья поступила 1 ноября 2023 г.
Received November 1, 2023

To Reference:

Filatova S.G., Vostretsov A.G., Buzuk I.V. Otsenka potentsiala importozameshcheniya elektronnoi komponentnoi bazy v Rossiiskoi Federatsii na osnove analiza patentnykh dokumentov [Estimation of the import substitution potential of the electronic components in the Russian Federation based on the patent documents analysis]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 4 (61), pp. 58–76. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-58-76.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2023 октябрь–декабрь № 4 (61)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.396.96

АЛГОРИТМ ТРАЕКТОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ ПАССИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ НАБЛЮДЕНИЕМ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА

А.А. Чугунов, А.Д. Евсеев, С.В. Черных, И.Б. Галуев
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Данная работа посвящена разработке алгоритма траекторной фильтрации в многопозиционных пассивных радиолокационных системах. Такие системы используются для скрытого траекторного сопровождения за счет приема собственного радиоизлучения источников на пассивные приемные пункты. В данной работе представлен алгоритм траекторной фильтрации, использующий в качестве дополнительного наблюдения высоту полета источника радиоизлучения в геодезической системе координат. На практике эта информация может быть известна, если источник радиоизлучения использует бортовой ответчик радиолокационного опознавания. В этом случае высота полета может быть декодирована и использована в качестве дополнительного наблюдения. В работе было проведено моделирование для сравнения эффективности предложенного алгоритма со стандартным алгоритмом на основе расширенного фильтра Калмана без использования дополнительных наблюдений. Сравнение алгоритмов проводилось также на экспериментальных данных. Показано, что использование априорной информации о геодезической высоте полета в качестве дополнительных наблюдений алгоритма позволяет не только повысить точность оценки двумерных координат (до 2,5 раз), но и увеличить устойчивость отслеживания траектории по сравнению с алгоритмом, не учитывающим эту информацию.

Ключевые слова: многопозиционная пассивная радиолокация, радиолокация, сглаживание траектории, расширенный фильтр Калмана, разностно-дальномерный метод.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-77-90

Введение

Многопозиционные радиолокационные системы (МП РЛС) для мониторинга воздушной обстановки имеют дело с определенным классом объектов: с траекториями движения источников радиоизлучения (ИРИ). С точки зрения задачи радиолокации параметры траекторий (координаты, вектор скорости, вектор ускорений) являются случайными процессами. МП РЛС решают задачу траекторного сопровождения ИРИ в режиме реального времени. Задача получения оценок непостоянных во времени параметров траектории ИРИ в моменты поступления соответствующих им наблюдений является задачей фильтрации. [1–5].

В радиолокации распространен подход к траекторной фильтрации, основанный на сглаживании одномоментных оценок координат ИРИ, полученных с помощью одношаговых алгоритмов [4–8]. Преимуществом такого подхода является линейность модели наблюдения, благодаря чему решением может выступать линейный фильтр Калмана или α, α-β, α-β-γ-фильтры. Однако в такой постановке необходимо учитывать нестационарность шума наблюдения, а также взаимную корреляцию элементов вектора состояния. Нестационарность шума наблюдения обусловлена тем, что в процессе движения ИРИ находится в областях с различными значениями геометрического фактора (ГФ), и если дисперсия шумов наблюдения первичных данных постоянна, то матрица дисперсий вторичных

наблюдений (координат) непостоянна. Кроме того, в МП РЛС не для всех поступающих на вход вторичной обработки отметок возможен одномоментный расчет координат (неполные отметки), что ограничивает использование данного подхода, поскольку его использование приводит к потере части входных наблюдений [2].

Таким образом, в МП РЛС целесообразно применять алгоритмы траекторной фильтрации, для которых входными наблюдениями выступают первичные радиолокационные параметры (значения времен приема, разностей времен приема радиосигналов ИРИ на ПП), а выходными данными – параметры траекторий (координаты, векторы скорости и ускорений) в ТЦСК. Поскольку первичные радиолокационные параметры связаны с вектором состояния нелинейно, постановка задачи траекторной фильтрации в МП РЛС является принципиально нелинейной.

Известно, что априорная информация о высоте полета ИРИ самолетного типа позволяет повысить точность определения двумерных координат ИРИ при использовании ее в алгоритмах вторичной обработки. На практике высота полета ИРИ может быть априори известна с определенной точностью. Одним из основных наблюдаемых источников для МП РЛС являются бортовые ответчики системы радиолокационного опознавания (РЛО) [9–10]. При работе по сигналам в режиме А/С высота полета может быть получена путем декодирования соответствующих сигналов бортового ответчика. При работе с другими ИРИ априорная высота полета может быть определена из перечня характерных высот полета, соответствующих конкретному ИРИ, распознанному по соответствующим радиосигналам.

Большую часть времени полета ИРИ самолетного типа (за исключением взлета, посадки, смены эшелона) совершают полет на постоянной высоте над уровнем моря h. При определении параметров траектории ИРИ в ТЦСК координата z в данном случае не является постоянной за счет влияния кривизны земной поверхности (рис. 1).

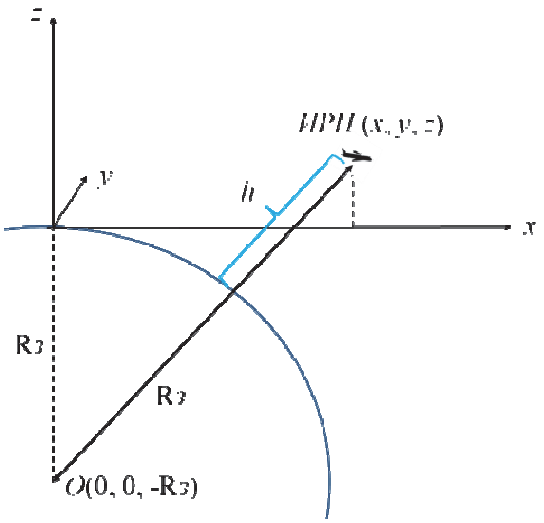


Рис. 1 – Связь высоты полета ИРИ *h* в геодезической системе координат и высоты ИРИ в топоцентрической системе координат *z*

Fig. 1 – Relationship between the flight height RRS *h* in the geodetic coordinate system and the height RRS in the topocentric coordinate system *z*

Пусть $\mathbf{x} = (x \quad y \quad z)^{\mathrm{T}}$ – координаты ИРИ, $\boldsymbol{O} = (0 \quad 0 \quad -R_{\text{з}})^{\mathrm{T}}$ – координаты центра Земли в топоцентрической системе координат, $R_{\text{з}}$ – радиус Земли. Очевидно, что

$$x^2 + y^2 + (z + R_{\text{з}})^2 = (R_{\text{з}} + h)^2; \tag{1}$$

$$z(x,\ y,\ h) = -R_{\text{з}} + \sqrt{(R_{\text{з}} + h)^2 - (x^2 + y^2)}; \tag{2}$$

$$h(x,\ y,\ z) = -R_{\text{з}} + \sqrt{(R_{\text{з}} + z)^2 + (x^2 + y^2)}. \tag{3}$$

Выражения (2)–(3) описывают связь h и z. Для описания модели земной поверхности применяется понятие референц-эллипсоида, и в этом случае радиус Земли не является постоянной величиной со средним значением 6371 км, экваториальным значением 6378 км и полярным значением 6356,8 км. Дальность действия МП РЛС составляет несколько сотен километров, поэтому принимается сделанное выше допущение (1) о сферической модели Земли в зоне действия МП РСЛ с известным радиусом $R_{\text{з}}$.

Целью данной работы является разработка алгоритма фильтрации траектории ИРИ на основе алгоритма расширенного фильтра Калмана с дополнительным наблюдением высоты полета в геодезической системе координат.

1. Постановка задачи

Известны координаты четырех приемных пунктов (ПП) в топоцентрической декартовой системе координат $\mathbf{x}_i^{\text{ПП}} = \left\{x_i^{\text{ПП}} \quad y_i^{\text{ПП}} \quad z_i^{\text{ПП}}\right\}^{\mathrm{T}}$, $i = 1...4$. Вектор состояния ИРИ включает в себя трехмерные координаты, вектор скорости и вектор ускорения

$$\boldsymbol{\alpha} = [x \quad v_x \quad a_x \quad y \quad v_y \quad a_y \quad z \quad v_z \quad a_z]^{\mathrm{T}}. \tag{4}$$

Модель динамики вектора состояния полагается линейной

$$\boldsymbol{\alpha}_k = \mathbf{F}_k \boldsymbol{\alpha}_{k-1} + \mathbf{G}_k \boldsymbol{\xi}_{k-1}, \quad k = 1...M-1, \quad \boldsymbol{\alpha}\left(T_0^{\text{изл}}\right) = \boldsymbol{\alpha}_0; \tag{5}$$

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} 1 & T_k & T_k^2/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T_k & T_k^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_k & T_k^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ T_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_k \end{bmatrix}, \tag{6}$$

где $\boldsymbol{\xi}_{k-1}$ – вектор дискретных белых гауссовских формирующих шумов (ДБГШ) с матрицей дисперсий $\mathbf{D}_{\boldsymbol{\xi}}$; $T_k = t_k - t_{k-1}$ – разница между двумя соседними моментами наблюдений.

Наблюдениями являются отметки, которые представляют собой совокупность времен приема радиосигнала ИРИ всеми ПП. Для k-й отметки

$$\boldsymbol{\theta}_k = \mathbf{s}_k(\boldsymbol{\alpha}_k) + \mathbf{n}_k \tag{7}$$

известно время частотно-пространственного строба $t_k^{\text{строб}}$, в который попала данная отметка. Это абсолютное время в шкале времени МП РЛС. В (7) $\mathbf{n}_k$ – вектор ДБГШ наблюдений. Функция связи вектора состояния с наблюдениями записывается следующим образом:

$$S_k^i = \frac{1}{c}\left\| q\boldsymbol{\alpha}_k - \mathbf{x}_i^{\text{ПП}} \right\| + T_k^{\text{изл}}, \tag{8}$$

где

$$q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \tag{9}$$

c – скорость света; $T_k^{\text{изл}}$ – время излучения k-го радиоимпульса в шкале времени МП РЛС, соответствующего k-й отметке; $\boldsymbol{\alpha}_k$ – вектор состояния ИРИ в момент $T_k^{\text{изл}}$.

Особенностью синтеза алгоритма траекторной фильтрации в МП РЛС является непостоянный период поступления отметок. Пассивный характер работы системы приводит к зависимости темпа обновления вектора состояния от режима излучения бортовой аппаратуры ИРИ. Для сигналов типа РЛО темп определяется периодом обзора и количеством наземных запросчиков.

Непостоянство периода поступления отметок накладывает определенные ограничения и на использование модели наблюдения (8). Параметр $T_k^{\text{изл}}$, входящий в модель, неизвестен и также подлежит оценке и включению в вектор состояния. Однако фильтрация этого параметра в текущей постановке нереализуема из-за невозможности экстраполяции следующего момента излучения. В связи с этим используется разностно-дальномерный метод (РДМ) определения координат с формированием косвенных наблюдений $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ – разностей времен приема и исключением неизвестного параметра $T_k^{\text{изл}}$ из вектора состояния:

$$\tilde{\boldsymbol{\theta}}_k = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta}_k, \tag{10}$$

где матрица $\mathbf{H}$ задает правило формирования косвенных наблюдений. Данная матрица имеет вид

$$\mathbf{H}_4 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_3 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_2 = (-1 \quad 1) \tag{11}$$

для отметок, содержащих соответственно четыре, три и два принятых радиоимпульса. Отметки, для которых прием радиоимпульсов ИРИ произошел не на всех ПП, будем называть неполными отметками, в противном случае – полными.

Кроме того, в модели наблюдения (8) значения времен приема на ПП рассчитываются исходя из положения источника в точке с координатами $q\boldsymbol{\alpha}_k$ в момент $T_k^{\text{изл}}$, на шкале времени МП РЛС. Поскольку этот момент предполагается неизвестным, принимается допущение о том, что координаты ИРИ $q\boldsymbol{\alpha}_k$ соответствуют моменту $t_k^{\text{строб}}$, который известен. Это допущение основано на том, что длительность сканирования частотного пространства $T_{\text{строб}}$ настолько мала, что изменение вектора состояния на данном интервале времени незначительно. На практике длительность одного частотно-пространственного строба составляет 10…50 мс. Для ИРИ, двигающегося со скоростью 200 м/с, координаты за время строба изменятся не более чем на 10 м. При среднеквадратичной погрешности первичных наблюдений 10 нс (3 м) и типичном значении ГФ в дальней зоне (десятки-сотни) погрешность координат, обусловленная предложенным допущением, значительно меньше погрешности оценки координат.

В таком случае модель динамики вектора состояния (5)–(6) целесообразно описывать во временной шкале МП РЛС в привязке к временам частотно-пространственных стробов, тогда $T_k = t_k^{\text{строб}} - t_{k-1}^{\text{строб}}$.

В модель наблюдений помимо времен приема (8) включается также высота полета ИРИ в геодезической системе координат. Тогда векторная функция наблюдений примет следующий вид:

$$\mathbf{S}_k(\boldsymbol{\alpha}_k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{c}\left\| q\boldsymbol{\alpha}_k - \mathbf{x}_1^{\text{ПП}} \right\| + T_k^{\text{изл}} \\ \vdots \\ \frac{1}{c}\left\| q\boldsymbol{\alpha}_k - \mathbf{x}_N^{\text{ПП}} \right\| + T_k^{\text{изл}} \\ -R_з + \sqrt{(R_з + z)^2 + (x^2 + y^2)} \end{bmatrix}, \tag{12}$$

где N – число принятых радиоимпульсов в отметке. Матрица дисперсий шумов наблюдений $\mathbf{n}_k$

$$\mathbf{D}_n = \begin{bmatrix} \sigma_n^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_n^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_n^2 \end{bmatrix}, \tag{13}$$

где σ_n^2 – дисперсия наблюдений времен приема ИРИ на ПП; σ_h^2 – дисперсия наблюдений высоты.

По аналогии с (11) выражения для матриц формирования косвенных наблюдений будут иметь вид:

$$\mathbf{H}_4 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_3 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_2 = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{14}$$

Требуется разработать алгоритм фильтрации вектора состояния $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_k$ с учетом модели наблюдения (7), (10), (12)–(14) и модели динамики вектора состояния (5)–(6).

2. Разработка алгоритма

Выражения для алгоритма расширенного фильтра Калмана в данной постановке задачи имеют следующий вид.

1. Экстраполяция вектора состояния и матрицы дисперсий ошибок фильтрации:

$$\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k = \mathbf{F}_k \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{k-1}; \tag{15}$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_{\boldsymbol{\alpha},k} = \mathbf{F}_k \mathbf{D}_{\boldsymbol{\alpha},k-1} \mathbf{F}_k^{\mathrm{T}} + \mathbf{G}_k \mathbf{D}_{\boldsymbol{\xi},k-1} \mathbf{G}_k^{\mathrm{T}}, \tag{16}$$

2. Расчет коэффициентов фильтрации:

$$\mathbf{K}_k = \tilde{\mathbf{D}}_{\boldsymbol{\alpha},k} \left(\frac{d\mathbf{S}_k(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k)}{d\boldsymbol{\alpha}} \right)^{\mathrm{T}} \times$$

$$\times \mathbf{H}_k^T \left(\mathbf{H}_k \left(\frac{d\mathbf{S}_k(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k)}{d\boldsymbol{\alpha}} \right) \tilde{\mathbf{D}}_{\boldsymbol{\alpha},k} \left(\frac{d\mathbf{S}_k(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k)}{d\boldsymbol{\alpha}} \right)^{\mathrm{T}} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{H}_k \mathbf{D}_n \mathbf{H}_k^T \right)^{-1}. \tag{17}$$

3. Коррекция вектора состояния и матрицы дисперсий ошибок фильтрации:

$$\mathbf{D}_{\boldsymbol{\alpha},k} = \tilde{\mathbf{D}}_{\boldsymbol{\alpha},k} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \left(\frac{d\mathbf{S}_k(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k)}{d\boldsymbol{\alpha}} \right) \tilde{\mathbf{D}}_{\boldsymbol{\alpha},k}; \tag{18}$$

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_k = \tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k - \mathbf{K}_k \left(\mathbf{H}_k \boldsymbol{\theta}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{S}_k(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k) \right). \tag{19}$$

При этом

$$\frac{d\mathbf{S}_i(\boldsymbol{\alpha})}{d\boldsymbol{\alpha}} = \begin{bmatrix} s_{i,1}(\boldsymbol{\alpha}) & 0 & 0 & s_{i,4}(\boldsymbol{\alpha}) & 0 & 0 & s_{i,7}(\boldsymbol{\alpha}) & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1...N, \tag{20}$$

где для $i = 1...N$ выражения для $s_{i,1}(\boldsymbol{\alpha})$, $s_{i,4}(\boldsymbol{\alpha})$, $s_{i,7}(\boldsymbol{\alpha})$

$$s_{i,1}(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{1}{c} \frac{x - x_i}{\sqrt{\left(x - x_i^{\text{ПП}}\right)^2 + \left(y - y_i^{\text{ПП}}\right)^2 + \left(z - z_i^{\text{ПП}}\right)^2}}; \tag{21}$$

$$s_{i,4}(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{1}{c} \frac{y - y_i}{\sqrt{\left(x - x_i^{\text{ПП}}\right)^2 + \left(y - y_i^{\text{ПП}}\right)^2 + \left(z - z_i^{\text{ПП}}\right)^2}}; \tag{22}$$

$$s_{i,7}(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{1}{c} \frac{z - z_i}{\sqrt{\left(x - x_i^{\text{ПП}}\right)^2 + \left(y - y_i^{\text{ПП}}\right)^2 + \left(z - z_i^{\text{ПП}}\right)^2}} \tag{23}$$

для $i = 1...N$

$$s_{N+1,1}^h(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{x}{\sqrt{(R_з + z)^2 + (x^2 + y^2)}}; \tag{24}$$

$$s_{N+1,4}^{h}(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{y}{\sqrt{(R_з + z)^2 + (x^2 + y^2)}}; \tag{25}$$

$$s_{N+1,7}^{h}(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{z}{\sqrt{(R_з + z)^2 + (x^2 + y^2)}}. \tag{26}$$

Выражения (15)–(26) описывают алгоритм фильтрации траектории в МП РЛС с учетом дополнительного наблюдения – высоты полета ИРИ в геодезической системе координат.

3. Моделирование и эксперимент

Для проверки работоспособности и оценки эффективности алгоритма с использованием априорной информации о геодезической высоте ИРИ разработанные алгоритмы были реализованы в Matlab. Алгоритмы позволяют оценить вектор состояния ИРИ $\boldsymbol{\alpha}$ на основе наблюдений времен приема $\boldsymbol{\theta}$. Далее алгоритм траекторной фильтрации с разностно-дальномерной моделью наблюдений без дополнительного наблюдения геодезической высоты обозначим как РДФ, а алгоритм фильтрации с дополнительным наблюдением геодезической высоты –РДФВ.

Рассмотрим конфигурацию МП РЛС, состоящей из четырех ПП. Расстояние между боковыми ПП и центральным ПП составляет $R = 10$ км. Высота всех ПП – $h = 15$ м. Азимутальные направления на ПП 1, 2, 3 равны 30, 150 и 270° соответственно.

Траектория движения ИРИ, показанная на рис. 2, и соответствующие ей наблюдения МП РЛС моделировались в соответствии с моделью наблюдений, определенной в разделе 2. Для алгоритма РДФВ дополнительно моделируются наблюдения высоты. Траектория ИРИ включает несколько маневров, а также два участка прямолинейного равномерного движения: полет к МП РЛС с азимутального направления, для которого характерно низкое значение ГФ, и полет от МП РЛС в азимутальном направлении, для которого характерно высокое значение ГФ. Параметры моделирования: интервал наблюдения – 1900 с, постоянный период излучения ИРИ – 1 с, длительность частотно-пространственного строба – 12 мс, среднеквадратическое отклонение шума наблюдения – 10 нс.

Для обоих алгоритмов параметр σ_ξ принят равным 0,1 м/с³. Для алгоритма РДФВ параметр σ_h варьируется.

Для сравнения алгоритмов РДФ и РДФВ в качестве критерия эффективности используется радиальная квадратичная погрешность DRMS (Distance root mean square) – общая характеристика, применяемая при оценке точности двумерных навигационных определений [11], называемая также погрешностью в плане. С точки зрения физического смысла она представляет собой радиус круга, за пределы которого мгновенная погрешность не выходит с вероятностью 68,3% [12]. Эта характеристика вычисляется как $\mathrm{DRMS} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$, где σ_x^2, σ_y^2 – дисперсии погрешностей по осям x и y соответственно.

Алгоритм расширенного фильтра Калмана на каждом шаге формирует оценку матрицы дисперсий ошибок фильтрации $\mathbf{D}_{\boldsymbol{\alpha}}$. Определим оценку DRMS, формируемую фильтром как

$$\mathrm{DRMS}_k = \sqrt{\mathbf{D}_{\boldsymbol{\alpha},k}^{1,1} + \mathbf{D}_{\boldsymbol{\alpha},k}^{4,4}}\ . \tag{27}$$

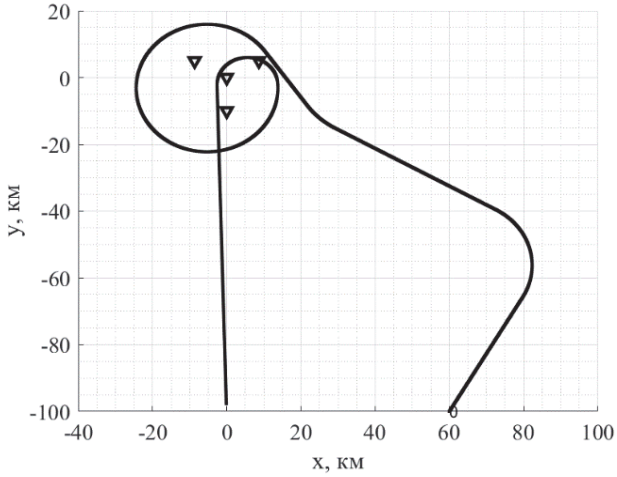


Рис. 2 – Моделируемая траектория движения ИРИ и положение ПП

Fig. 2 – Simulated RRS trajectory and RS positions

На рис. 3 показаны реализации DRMS и выигрыш для алгоритма РДФВ при различных значениях σ_h по сравнению с РДФ. Выигрыш для такта k вычисляется как $\mathrm{DRMS}_{\text{РДФ}} / \mathrm{DRMS}_{\text{РДФВ}}$.

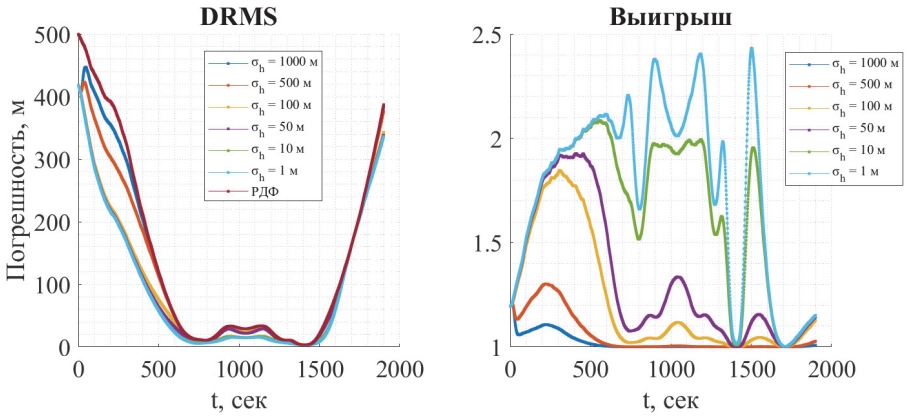


Рис. 3 – Реализации DRMS для алгоритма РДФВ с различными значениями σ_h и алгоритма РДФ

Fig. 3 – DRMS implementations for the RDFV algorithm with different values of σ_h and the RDF algorithm

Видно, что использование дополнительных наблюдений геодезической высоты полета ИРИ приводит к повышению точности определения двумерных координат, особенно в районе с низким значением ГФ.

Анализ рис. 3 показывает, что использование дополнительной информации о высоте полета ИРИ обеспечивает выигрыш в точности определения двумерных координат ИРИ в 1,5–2,5 раза. Дополнительные наблюдения высоты полета ИРИ в геодезической системе координат со среднеквадратичным значением порядка

сотен-тысяч метров не дают существенного выигрыша. Низкое отличие в показателях на начальном интервале фильтрации обусловлено переходом фильтров в установившийся режим работы.

Проведен анализ эффективности используемого подхода на реальных данных натурного эксперимента, проведенного на действующей МП РЛС. При проведении эксперимента ИРИ имел на борту ГНСС приемник, координаты с которого приняты за опорную траекторию, используемую для оценки точности определения координат. Изучаемый ИРИ работал с бортовым ответчиком РЛО, что позволяло извлекать из сигнальных данных информацию о геодезической высоте полета.

На рис. 4 показана реализация геодезической высоты полета, взятой из данных ГНСС приемника, и высоты, декодированной из сигналов РЛО. Видно, что они совпадают с определенной точностью.

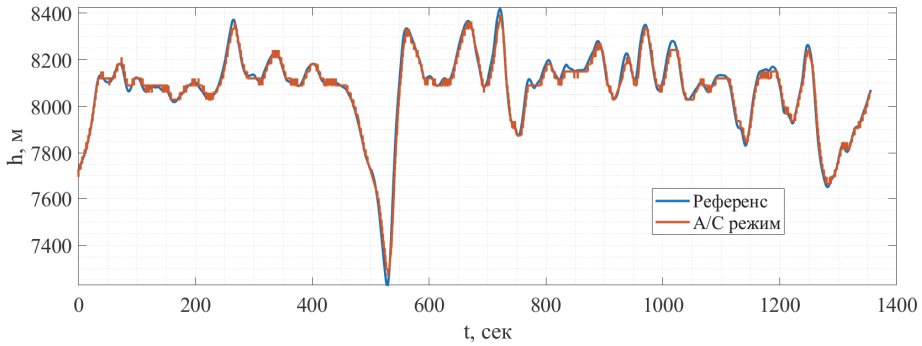


Рис. 4 – Сравнение высот полета ИРИ по опорным данным и декодированных из режима A/C сигналов

Fig. 4 – Comparison of RRS flight altitudes from reference track and decoded from A/C mode signals

На рис. 5 показана доля полных меток на определенном временном интервале. За весь интервал наблюдения процент полных отметок не превышал 40 %, а начиная с 400-й секунды полных отметок практически не было.

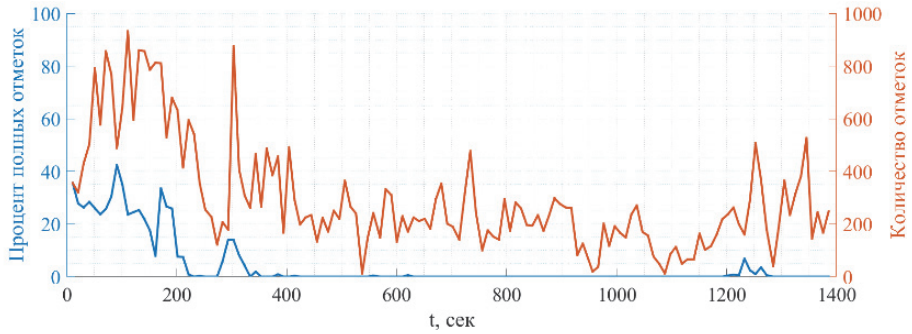


Рис. 5 – Процентное соотношение полных отметок

Fig. 5 – Complete marks percentage

На рис. 6 показана опорная траектория ИРИ в плане относительно ПП (черная линия). Расположение ПП показано черными треугольниками. На левом рисунке показан результат оценки траектории, полученный с помощью алгоритма РДФ (красная линия). На правом рисунке показан результат оценки траектории, полу-

ченный с помощью алгоритма РДФВ с параметром $\sigma_h = 100$ (синяя линия). Для обоих алгоритмов параметр σ_ξ установлен равным 0,1 м/с³

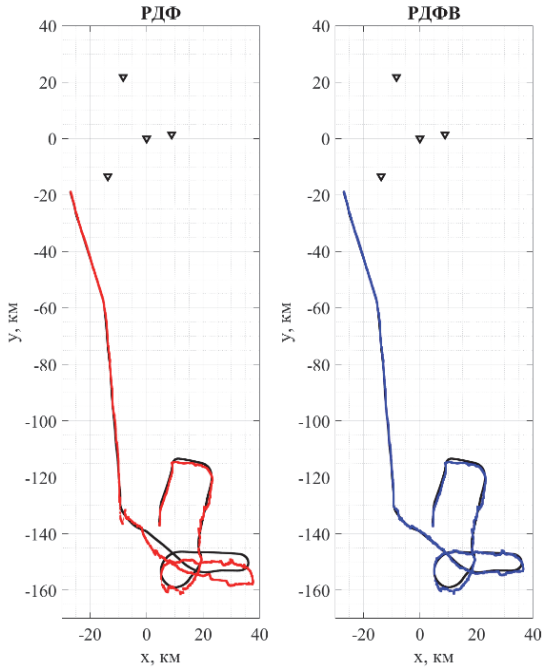


Рис. 6 – Сравнение оценок реальной траектории

Fig. 6 – Real trajectory estimation comparison

На рис. 7 представлены реализации радиальных погрешностей для оценок, полученных по алгоритмам РДФ и РДФВ. Радиальные погрешности рассчитываются по формуле

$$d_k = \sqrt{\left(x_k - x_k^{\text{ист}}\right)^2 + \left(y_k - y_k^{\text{ист}}\right)^2}. \tag{28}$$

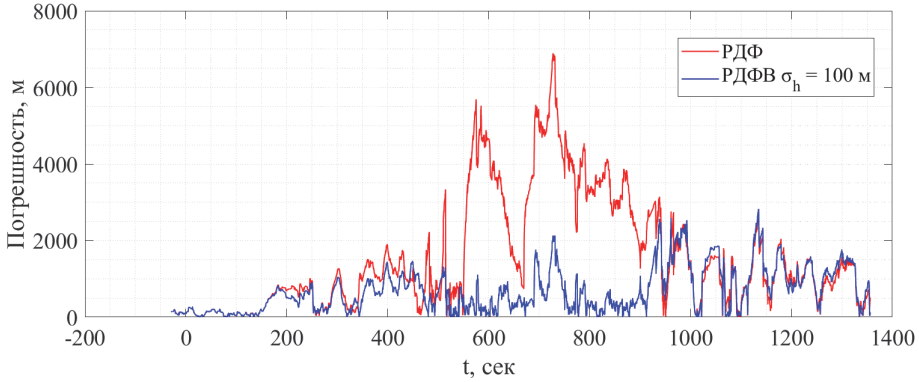


Рис. 7 – Радиальная погрешность оценки координат ИРИ для алгоритмов РДФ и РДФВ

Fig. 7 – Radial error of RRS coordinate estimation for algorithms RDF and RDFV

Видно, что при использовании алгоритма РДФВ наблюдается значительный выигрыш в точности определения координат ИРИ, особенно при отсутствии полных отметок.

Анализ данных, полученных в результате моделирования и эксперимента, позволяет сделать вывод о том, что использование априорной информации о геодезической высоте полета в качестве дополнительных наблюдений алгоритма позволяет не только повысить точность оценки двумерных координат ИРИ в МП РЛС, но и увеличить устойчивость отслеживания траектории в условиях наличия неполных отметок по сравнению с алгоритмом, не учитывающим эту информацию.

Заключение

Данная работа посвящена разработке алгоритма траекторной фильтрации в многопозиционных пассивных радиолокационных системах. Особенностью таких систем является нахождение источников радиоизлучения в областях с высоким значением ГФ, что приводит к резкому ухудшению точности оценки координат. Другим негативным фактором является наличие в наблюдениях неполных отметок, что может привести к сбою слежения и резкому ухудшению точности определения координат источников радиоизлучения. В данной работе представлен алгоритм, использующий в качестве дополнительного наблюдения высоту полета в геодезической системе координат. На практике эта информация может быть известна, если источник радиоизлучения использует бортовой ответчик системы радиолокационного опознавания. В этом случае высота полета может быть декодирована и использована в качестве дополнительного наблюдения. В данной работе было проведено моделирование для сравнения эффективности предложенного алгоритма со стандартным алгоритмом на основе расширенного фильтра Калмана без использования дополнительных наблюдений. Сравнение алгоритмов проводилось также на экспериментальных данных. Показано, что использование априорной информации о геодезической высоте полета в качестве дополнительных наблюдений алгоритма позволяет не только повысить точность оценки двумерных координат (до 2,5 раз), но и увеличить устойчивость отслеживания траектории по сравнению с алгоритмом, не учитывающим эту информацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Черняк В.С.** Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 415 с.
2. Estimation of the parameters of the trajectories of radio sources in multi-position complexes by the MLE method / A.A. Chugunov, S.A. Serov, R.S. Kulikov, V.B. Pudlovskiy, N.I. Petukhov // 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2022. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731473.
3. Nonlinear approximation algorithm for object trajectory estimation in MLAT systems / A.A. Chugunov, N.I. Petukhov, R.S. Kulikov, T.A. Brovko, A.P. Malyshev, O.V. Glukhov // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2022. – P. 172–176.
4. Измерение координат источников радиоизлучения многопозиционной пассивной разностно-дальномерной системой произвольной конфигурации / Б.В. Матвеев, В.П. Дубыкин, Д.Ю. Крюков, Ю.С. Курьян, А.А. Саликов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10 (5). – С. 114–119.
5. **Панасюк Ю.Н., Пудовкин А.П.** Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2016. – 84 с.
6. **Солонар А.С., Хмарский П.А., Михалковский А.А.** Особенности фильтрации координат и параметров движения объекта на этапе совершения установившегося разворота // Доклады БГУИР. – 2013. – № 4 (74). – С. 67–73.

7. **Горшков С.А., Завиженец В.Н.** Фильтрация полиномиальных траекторий маневрирующих целей с использованием конечной выборки оценок дальности и радиальной скорости // Доклады БГУИР. – 2016. – № 6 (100). – С. 47–54.
8. **Васильев К.К., Лучков Н.В.** Траекторная обработка на основе нелинейной фильтрации // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 1 (47). – С. 4–9.
9. STANAG 4193 Ed 3 P1. Technical Characteristics of the IFF Mk XIIA System. Part I: System Destription and General Characteristics.
10. Annex 10. Aeronautical Telecommunications. Vol. 4. Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems. – 5th ed. – ICAO, 2014.
11. GPS Position Accuracy Measures. APN-029 Rev. 1. – NovAtel Customer Service, 2003. – P. 1–6.
12. **Гарматенко И.С.** Международные стандарты оценки точности навигационной информации // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2013. – Т. 6 (8). – С. 863–866.

TRAJECTORY FILTERING ALGORITHM IN MULTI-POSITION PASSIVE RADARS WITH ADDITIONAL FLIGHT ALTITUDE OBSERVATION

Chugunov A.A., Evseev A.D., Chernyh S.V., Galuev I.B.
National Research University MPEI, Moscow, Russia

This work is devoted to developing an algorithm for trajectory filtering in multi-position passive radar systems. This paper presents an algorithm that uses the flight altitude in the geodetic coordinate system as an additional observation. In practice, this information can be known if the radio radiation source uses an onboard IFF responder in A/C mode. In this case, the flight altitude can be decoded and used as an additional observation. In this paper, a simulation was performed to compare the effectiveness of the proposed algorithm with the standard one based on the Extended Kalman filter without using additional observation. Comparison of the algorithms was also carried out on experimental data. It is shown that the use of a priori information about the geodetic altitude of the flight as additional observations of the algorithm allows not only to increase the accuracy of two-dimensional coordinate estimation (up to 2.5 times), but also to increase the stability of trajectory tracking in comparison with the algorithm that does not take this information into account.

Keywords: multiposition passive radar, radiolocation, trajectory smoothing, Extended Kalman Filter, time difference of arrival.

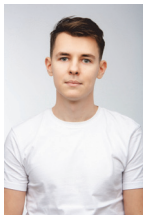
DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-77-90

REFERENCES

1. Chernyak V.S. *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya* [Multiposition radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 416 p.
2. Chugunov A.A., Serov S.A., Kulikov R.S., Pudlovskiy V.B., Petukhov N.I. Estimation of the parameters of the trajectories of radio sources in multi-position complexes by the MLE method. *2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. IEEE, 2022, pp. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731473.
3. Chugunov A.A., Petukhov N.I., Kulikov R.S., Brovko T.A., Malyshev A.P., Glukhov O.V. Nonlinear approximation algorithm for object trajectory estimation in MLAT systems. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. IEEE, 2022, pp. 172–176.
4. Matveev B.V., Dubykin V.P., Kryukov D.Yu., Kuryan Yu.S., Salikov A.A. Izmerenie koordinat istochnikov radioizlucheniya mnogopozitsionnoi passivnoi raznostno-dal'nomernoi sistemoi proizvol'noi konfiguratsii [Measurement of coordinates of the radio source multiposition passive difference-range system of any configuration]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2014, vol. 10 (5), pp. 114–119.

5. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P. *Obrabotka radiolokatsionnoi informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Radar information processing in radio engineering systems]. Tambov, TSTU Publ., 2016. 84 p.
6. Solonar A.S., Khmarski P.A., Mikhalkovski A.A. Osobennosti fil'tratsii koordinat i parametrov dvizheniya ob"ekta na etape soversheniya ustanovivshegosya razvorota [Features of filtering using coordinated turn models]. *Doklady BGUIR*, 2013, no. 4 (74), pp. 67–73. (In Russian).
7. Gorshkov S.A., Zavizhenets V.N. Fil'tratsiya polinomial'nykh traektorii manevriruyushchikh tselei s ispol'zovaniem konechnoi vyborki otsenok dal'nosti i radial'noi skorosti [Polynomial trajectories filtering of maneuvering targets with final estimation usage of range and range rate]. *Doklady BGUIR*, 2016, no. 6 (100), pp. 47–54. (In Russian).
8. Vasiliev K.K., Luchkov N.V. Traektornaya obrabotka na osnove nelineinoi fil'tratsii [Trajectory processing on the basis of nonlinear filtering]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of Control Processes*, 2017, no. 1 (47), pp. 4–9.
9. STANAG 4193 Ed 3 P1. Technical Characteristics of the IFF Mk XIIA System. Part I: System Destription and General Characteristics.
10. Annex 10. *Aeronautical Telecommunications*. Vol. 4. *Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems*. 5th ed. ICAO, 2014.
11. *GPS Position Accuracy Measures*. APN-029 Rev. 1. NovAtel Customer Service, 2003, pp. 1–6.
12. Garmatenko I.S. Mezhdunarodnye standarty otsenki tochnosti navigatsionnoi informatsii [International standards of the assessment of accuracy of navigation information]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2013, vol. 6 (8), pp. 863–866.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Чугунов Александр Андреевич – родился в 1995 году, инженер I категории, кафедра радиотехнических систем, ФГБОУ ВО НИУ МЭИ. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация. Опубликовано 59 научных работ. (Адрес: 143903, Россия, г. Балашиха, ул. Комсомольская, д. 8. E-mail: san4es_95@mail.ru).

Chugunov Alexander Andreevich (b. 1995) – engineer, Radiosystems Department, NRU MPEI. His research interests are currently focused on radiolocation and radionavigation. He is author of 59 scientific papers. (Address: 8, Komsomolskaya Street, Balashikha, 143903, Russia. E-mail: san4es_95@mail.ru).

Евсеев Артем Денисович – родился в 2002 году, лаборант, кафедра радиотехнических систем, ФГБОУ ВО НИУ МЭИ. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 142507, Россия, г. Павловский Посад, ул. Кузьмина, д. 32а. Email: yevseevad@mpei.ru).

Evseev Artyom Denisovich (b. 2002) – laboratory assistant, Radiosystems Department, NRU MPEI. His research interests are currently focused on radiolocation and radionavigation. He is author of 6 scientific papers. (Address: 32A, Kuzmina Street, Pavlovskiy Posad, 142507, Russia. E-mail: yevseevad@mpei.ru).

Черных Сергей Владимирович – родился в 2001 году, лаборант, кафедра радиотехнических систем, ФГБОУ ВО НИУ МЭИ. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация. Опубликовано 9 научных работ. (Адрес: 109428, Россия, г. Москва, ул. Михайлова, д. 41. E-mail: ChernykhSVl@mpei.ru).

Chernyh Sergey Vladimirovich (b. 2001) – laboratory assistant, Radiosystems Department, NRU MPEI. His research interests are currently focused on radiolocation and radionavigation. He is author of 9 scientific papers. (Address: 41, Mikhailova Street, Moscow, 109428, Russi. E-mail: ChernykhSVl@mpei.ru).

Галуев Игорь Борисович – родился в 2001 году, лаборант, кафедра радиотехнических систем, ФГБОУ ВО НИУ МЭИ. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация. (Адрес: 143912, Россия, г. Балашиха, ул. Первомайская, д. 6. E-mail: GaluyevIB@mpei.ru).

Galuev Igor Borisovich (b. 2001) – laboratory assistant, Radiosystems Department, NRU MPEI. His research interests are currently focused on radiolocation and radionavigation. (Address: 6, Pervomayskaya Street, Balashikha, 143912, Russia. E-mail: GaluyevIB@mpei.ru).

Статья поступила 28 августа 2023 г.
Received August 28, 2023

To Reference:

Chugunov A.A., Evseev A.D., Chernyh S.V., Galuev I.B. Algoritm traektornoi fil'tratsii istochnikov radioizlucheniya v mnogopozitsionnykh passivnykh radiolokatsionnykh sistemakh s dopolnitel'nym nablyudeniem vysoty poleta [Trajectory filtering algorithm in multi-position passive radars with additional flight altitude observation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 4 (61), pp. 77–90. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-77-90.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Выпуск 4 (61) октябрь–декабрь 2023

Выпускающий редактор *И.П. Бровановa*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 20.12.2023. Выход в свет 25.12.2023. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 8,05. Печ. л. 5,75. Изд. № 256. Заказ № 328. Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

16+

Индекс журнала в Роспечати
82961