



Научно-технический
журнал по вопросам
разработки и
производства
инновационной
продукции

Лицензионный договор
№ 285-1/2021 (НЭБ)

Журнал выходит
2 раза в год

Электронная версия
доступна по адресу
pos.goz.ru/magazine



Адрес редакции:
192012,
г. Санкт-Петербург,
вн.тер.г. муниципальный
округ Рыбацкое,
пр-кт Обуховской
Обороны, д. 120.

Е-mail:
pos.mv@goz.ru
Тлф:
8 (812) 207-56-20

РАДИОНАВИГАЦИЯ
И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА
ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»
№ 15 (23) – 2024

АО «Обуховский завод»

Редакционный совет:

Подвязников Михаил Львович, д.т.н., доц.
Волокитина Ирина Николаевна, к.э.н.
Долбенков Владимир Григорьевич, к.т.н.
Брагин Алексей Юрьевич, к.э.н.
Король Виктор Михайлович, к.т.н.

Главный редактор

Баушев Сергей Валентинович, д.в.н., проф.
Заместитель главного редактора
Сайбель Алексей Геннадиевич, д.т.н., доц.
Технический редактор
Васильева Людмила Николаевна

Редакционная коллегия:

Безлепкин Николай Иванович, д.ф.н., проф.
Гаврилов Роман Сергеевич, к.т.н.
Геворкян Арвид Грайрович, д.т.н., проф.
Завгородний Александр Федорович, д.и.н., проф.
Зозуля Виктор Михайлович, к.т.н.
Калашников Вадим Серафимович, д.т.н., проф.
Королев Андрей Валерьевич, к.т.н.
Криворучко Юрий Тимофеевич, д.т.н.
Марченко Борис Иванович, д.т.н., проф.
Панфилов Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.
Романюк Денис Андреевич, к.ф.-м.н.
Синицын Евгений Александрович, д.т.н., проф.
Фридман Леонид Борисович, д.т.н.
Шатраков Юрий Григорьевич, д.т.н., проф.
Щеглов Дмитрий Константинович, к.т.н., доц.
Яковлев Андрей Вячеславович, д.т.н., доц.

Санкт-Петербург

РАДИОНАВИГАЦИЯ И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ» №15 (23) – 2024: ТРУДЫ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ». – СПб.: Балтийская печать, 2024. – 120 с. – ил.

Научно-технический журнал **РАДИОНАВИГАЦИЯ И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»** публикует результаты научных исследований, разработок и производства инновационной продукции в областях организации производства, вооружения и военной техники, радиофизики, организации воздушного движения, радионавигации, радиолокации.

К участию приглашаются сотрудники предприятий оборонного промышленного комплекса, научных и образовательных учреждений Российской Федерации.

Мнение редакции может не совпадать с точкой зрения авторов. Ответственность за достоверность материалов лежит на авторах публикаций.

Отсутствие в статьях сведений, содержащих государственную тайну, подтверждается наличием соответствующих Заключений о возможности опубликования с предприятий.

Журнал рассчитан на широкий круг специалистов.



Уважаемый читатель!

Пятнадцатый номер журнала открывает статья докторов военных наук *Баушева С.В. и Раскина А.В.* «Массированный ракетно-авиационный удар по Израилю 13-14 апреля 2024 года и его отражение». Заглавное событие всколыхнуло не только политиков, но и профессионалов в военной области и области производства продукции военного назначения. При этом собственно фактографическая информация, которая и представляет основной интерес для специалистов и ученых, оказалась довольно противоречивой и фрагментарной. Авторы взяли на себя труд проанализировать сообщения мировых информационных агентств и околопрофессиональных иностранных открытых источников с целью составить достаточно цельную картину ракетно-авиационного удара как комплексной операции регионального (оперативного) уровня.

Вот уже второе столетие научно-практическая публикация Фредерика Уинслоу Тейлора «Принципы научного менеджмента» продолжает будоражить умы как современных специалистов в области систем менеджмента качества, бережливого производства, научной организации труда и т.д., так и инженерно-технических работников. Ведущий инженер АО «Обуховский завод» *Кривошеев А.В.*, считающий себя коллегой Ф.Тейлора как инженера по обработке металлов, в статье «Принципы научного менеджмента Тейлора с учетом современных научных данных» проводит любопытный критический анализ примеров, использованных Тейлором, с учетом современных нормативных документов и актуальных научных публикаций из таких сфер, как биология, спортивная медицина, кардиология, скалолазание и др.

Статья *Мокринского А.Б. и Зуева К.В.* «Этапы организации внедрения КД в электронном виде при разработке и изготовлении» представляет собой описание и процедуру внедрения на предприятии организационно-технического решения по сквозному цифровому моделированию и распространению конструкторской документации на производственные подразделения с учетом многочисленных ограничений, присущих предприятию оборонно-промышленного комплекса.

Следующие восемь статей представляют собой материалы докладов аспирантов и соискателей пяти предприятий Концерна ВКО «Алмаз – Антей» на постоянно действующем (с 2023 года) ежегодном семинаре, приуроченном к 3-й Конференции «Ра-

дионавигация и время – 2024». Выступления соискателей ученых степеней проходили в двух секциях (рисунки 1 и 2) с широким обсуждением и сознательно организованным принципиально напористым прессингом на докладчика со стороны модераторов секций. Цель такого «учебного прессинга» состояла в тренинге соискателей в умении профессионально и корректно отстаивать свою позицию, отвечать на вопросы – все то, что сейчас часто называют термином *«soft skills»* – как развитие надпрофессиональных компетенций.



Рисунок 1 – На секции Радиолокация и радионавигация



Рисунок 2 – На секции Организация производства

Темы докладов представляли собой широкий спектр актуальных научных задач и не оставили равнодушными слушателей и модераторов, а названия докладов, представленные в Содержании журнала, дают четкое представление о предмете обсуждения из области радиолокации, радиоэлектронной борьбы, искусственного интеллекта и организации производства.

В 15-м номере журнала редакция не стала публиковать в разделе «Дискуссионная трибуна» продолжение размышлений по основам понимания специальной теории относительности. Вообще говоря, мы получили ряд откликов с неоднозначной реакцией на статью доктора технических наук Плясовских А.П. «Специальная теория относительности дает ошибки в 100 раз и более» (№№ 11-14 нашего журнала). К сожалению, не удалось обойтись и без перехода «на личности», что, по нашему мнению, недопустимо, и при подготовке статей к опубликованию редакция была вынуждена сглаживать формулировки выражений, которыми обменивались стороны.

Суть же разногласий, видимо, состоит, во-первых, в разном отношении к авторитетам науки и, во-вторых, в различном уяснении существа постулатов и, самое главное, следствий СТО. Специальная теория относительности, математически примирившая противоречия в физике, накопившиеся к началу 20 века (опыты Майкельсона-Морли, Физо, Доплера и др., преобразования Лоренца и Пуанкаре), обладает следствиями, которые плохо поддаются восприятию человеческим разумом, как для объяснения парадоксов релятивизма, так и при реализации инженерных решений наблюдения и синхронизации часов летательных аппаратов, движущихся со сверхзвуковыми и космическими скоростями.

Здесь же резонно еще раз упомянуть статью доктора технических наук Сайбеля А.Г. «Размышления о волнах, научных кумирах, терминах и физике с математикой», в которой автор предлагает сменить угол зрения в разгоревшейся дискуссии и перейти к анализу содержательной части предмета обсуждения.



Рисунок 3 – Сборник резолюций и решений съездов, конференций и пленумов ЦК ВКП(б), 1936 г.

Поэтому редакция решила обратиться к истории и изучить Постановление ЦК ВКП(б) 1934 года «По дискуссии о релятивизме», отсылки на которое с запретом критик СТО часто встречаются в научно-популярных статьях. Нами была предпринята попытка найти этот документ, и в Президентской библиотеке имени Б.Н.Ельцина был обнаружен соответствующий сборник документов – см. рисунок 3. Однако в нем отсутствует искомое Постановление – может быть потому, что собственно Постановления были опубликованы в других сборниках документов – поиски продолжаются.

21 ноября 2024 года в акционерном обществе «СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз - Антей – Обуховский завод» состоялась третья научно-техническая конференция «РАДИОНАВИГАЦИЯ И ВРЕМЯ 2024» по тематическому направлению «Элементы единой системы координатно-временного обеспечения Российской Федерации.

Региональные и локальные радионавигационные системы» под председательством Генерального конструктора – заместителя генерального директора АО «Концерн ВКО «Алмаз - Антей», доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента РАН Созинова Павла Алексеевича.

На пленарном заседании были заслушаны доклады:

1 *Карутин С.Н.* (АО «ЦНИИмаш») Единая система координатно-временного обеспечения Российской Федерации.

2 *Скобелин А.А.* (АО «Обуховский завод») Состояние и перспективы развития наземных радионавигационных систем и навигационной аппаратуры потребителей, как элементов координатно-временного обеспечения.

3 *Кораблев М.Е.* (АО «ГЛОНАСС») Координатно-временное обеспечение потребителей в современных условиях.

4 *Сорокин А.Ю.* (ФГБУ «ГлавСевморпуть») Вопросы построения навигационной составляющей проекта трансарктического оператора связи (ТАОС) в свете создания единой системы координатно-временного обеспечения.

5 *Плясовских А.П.* (АО «Обуховский завод») Текущие и перспективные требования к системе КВО.

6 *Зарубин С.П.* (АО «Обуховский завод») Развитие технологий длинноволновой импульсно-фазовой радионавигационной системы как необходимого компонента единой системы координатно-временного обеспечения Российской Федерации.

На последующем за пленарным заседанием круглом столе «Элементы единой системы координатно-временного обеспечения Российской Федерации. Региональные и локальные радионавигационные системы» продолжилось обсуждение актуальных вопросов.

Доктор военных наук, профессор
С.В.Баушев

Баушев С.В., Раскин А.В.

Массированный ракетно-авиационный удар по Израилю 13-14 апреля 2024 года и его отражение..... 7

Кривошеев А.В.

Принципы научного менеджмента Тейлора с учетом современных научных данных..... 22

Зуев К.В., Мокринский А.Б.

Этапы организации внедрения КД в электронном виде при разработке и изготовлении..... 34

Тихонов С.И., Витязев С.В.

Использование методов сверхразрешения на основе анализа собственных значений при распознавании радиолокационных целей..... 42

Башкетов А.А.

Разработка приемно-передающего блока антенного для аппаратуры радиотехнической защиты..... 49

Постников Н.А.

Вычисления энтропии выходных состояний нейросетевых преобразователей биометрии-код..... 56

Крюков, А.И. Шарапов Г.А., Силивоник П.В.

Применение элементов радиофотоники в когнитивных системах радиочастотного мониторинга..... 62

Ходунов В.А.

Разработка конструктива малогабаритной буксируемой ложной цели аппаратуры радиотехнической защиты..... 71

Ходунов В.А., Башкетов А.А.

Разработка сверхширокополосной антенной системы для аппаратуры радиотехнической защиты..... 82

Новожилов И.С.

Выявление сбоев работы датчиков на основе результатов измерений тепловых режимов в МПУ при проведении испытаний макета изделия с использованием нейросети..... 89

Просвилов А.В., Калябин Е.В.

Моделирование когнитивной электронной атаки на РЛС в условиях дуэльной ситуации..... 95

Дискуссионная трибуна

Сайбель А.Г.

Исследование влияния модели распространения электромагнитных волн на зрительный образ удаленного движущегося объекта 109

УДК 001.891.34

МАССИРОВАННЫЙ РАКЕТНО-АВИАЦИОННЫЙ УДАР ПО ИЗРАИЛЮ 13-14 АПРЕЛЯ 2024 ГОДА И ЕГО ОТРАЖЕНИЕ

Баушев С.В., Раскин А.В.

В статье рассматривается характер боевых действий в ходе массированного ракетно-авиационного удара Ирана и его союзников 13-14 апреля 2024 года по объектам на территории Израиля, а также во время его отражения. Материал подготовлен на основании анализа публикаций в зарубежных источниках – информационных агентствах Ирана IRNA, Израиля, Великобритании Reuters, международного арабского Al Jazeera, сайтов Министерства обороны Израиля, Великобритании и других государств, а также информационных ресурсов и организаций, специализирующихся на военной тематике: TheWarZone, NCRI, USNI, Military Watch Magazine, WarZone, Forbes, TheAviationist и ряда других.

Ключевые слова: ракетно-авиационный удар; ударные БПЛА; крылатые ракеты; Израиль; Хезболла; противоракетная оборона.

Введение

При рассмотрении существа современных боевых действий в форме воздушно-космических ударов и вариантов их отражения особый интерес представляет массированный ракетно-авиационный удар в ночь с 13 на 14 апреля 2024 года – когда Корпус стражей исламской революции ВС Ирана во взаимодействии с ливанской военизированной группировкой «Хезболла», военной организацией Йемена «Ансар Аллах» (хуситы) и, возможно¹, Исламским сопротивлением в Ираке в рамках операции «возмездия» «Правдивое обещание» нанесли удар² беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), баллистическими и крылатыми ракетами наземного базирования по объектам на территории Израиля. Общая продолжительность удара составила около пяти часов. По Израилю было выпущено свыше 350 ударных средств с территории Ирана, Ливана, Йемена и, возможно, Ирака с общей массой взрывчатого вещества порядка 60 тонн. При этом утверждалось, что среди атакующих средств были и гиперзвуковые.

Основные цели удара находились на севере оккупированных Израилем Голанских высот (разведцентр в горе Хермон недалеко от сирийской и ливанской границ), в центральной части (авиабаза Неватим) и юге (Димона – город возле пустыни Негев, на окраине которого расположен Ядерный исследовательский центр) и на юге (авиабаза Рамон и порт Израиля на Красном море Эйлат).

¹ Несмотря на неоднократные упоминания, конкретные подтверждения участия в источниках отсутствуют.

² В источниках обычно используется термин «атака», однако этот термин тактического уровня не вполне применим к рассматриваемому случаю фактически оперативно-стратегического уровня, что предполагает предпочтительное использование термина «удар».

1 Обобщенная хроника событий

1) 8 апреля Ирак по линии ИКАО³ сообщением NOTAM⁴ закрыл воздушное пространство на три часа в ночь 10 апреля в связи с возможными ракетными пусками (рисунок 1).

2) 10 апреля 2024 г. Министерство иностранных дел Ирана оповестило соседние страны о предстоящей атаке на Израиль за 72 часа до ее начала.

3) Однако, последующие двое суток ничего не происходило.

4) На 13 апреля сообщениями NOTAM было закрыто воздушное пространство:

- Иордании с 23.00 МСК⁵ 13 апреля до 05.00 МСК 14 апреля;

- Ирака с 23.45 МСК 13 апреля до 05.30 МСК 14 апреля;

- Израиля с 00.30 МСК 14 апреля до 07.00 МСК 14 апреля.

5) Примерно в 22.00 в 13 апреля была запущена первая партия ударных БПЛА и крылатых ракет с территории Ирана, а также небольшая часть с территории Йемена.

6) Египет, Ливан, Кувейт и Иордания закрыли свое воздушное пространство и приостановили авиасообщение на время полета ударных средств.

7) В полночь с 13 на 14 апреля Израиль начал сбивать иранские БПЛА над территорией Сирии, Иордании и Ирака.

8) Вскоре после полуночи север Израиля подвергся отвлекающей атаке - Ливанская «Хезболла» во время подлета иранских средств к Израилю начала с территории Ливана синхронный обстрел беспилотными летательными аппаратами и из реактивных систем залпового огня (РСЗО), чтобы попытаться перегрузить израильскую ПВО «Железный купол». БПЛА были запущены в направлении населенных пунктов Кфар-Блум и Ханита на севере страны.

9) В ответ израильские истребители нанесли удары по объектам «Хезболла» в южном Ливане.

10) Позднее информационное агентство Сирии сообщало об успешной работе своей ПВО по нескольким израильским противоракетам, нацеленным на ракеты Ирана.

11) Около 01:30 по московскому времени 14 апреля Иран заявил о завершении «акта возмездия» (видимо, речь шла о завершении запуска всего наряда ударных средств).

OIIX TEHERAN (ACC/FIC/FIR)

Check All OIX UnCheck All OIX

☒ A1033/24 NOTAMN

Q) OIIX/QMMLW/IV/BO/W/000/140/

A) OIIX B) 2404100330 C) 2404121030

D) DLY / 0330-1030

E) ROCKET LAUNCHES WILL TAKE PLACE

WI AREA WITH FLW COORDINATE:

343631N	0511040E
343900N	0511652E
343835N	0542707E
350707N	0542936E
354804N	0560827E
350834N	0565421E
344843N	0570213E
342508N	0565625E
334909N	0560916E
335611N	0545221E
340811N	0543703E
342521N	0541303E
342342N	0511448E

TO THE POINT OF ORIGIN.

ORG ACT MNM SAFE LVL ON AWY:

B411 BTN ITELO AND MUSEG,

G208/L125 BTN RADAL AND ROVAD,

M715 BTN OBRIX AND RERET

R659 BTN VAVIN AND SOLIR

RAISED TO FL160.

F) GND G) 14000 FT AMSL

CREATED: 08 Apr 2024 17:08:00

SOURCE: OIIINYX

Рисунок 1 – Сообщение NOTAM Ирака об ограничении полетов 10 апреля в связи с возможным применением ракет

³ ИКАО – ИКАО, международная организация гражданской авиации.

⁴ Сообщения ИКАО специального формата об изменениях воздушной обстановки.

⁵ МСК – по московскому времени; израильское и иракское время совпадает с московским, иранское время отстает от московского на 0 часов 30 минут.

12) В 2.00 в Израиле заработали системы предупреждения о воздушной угрозе и заработали системы противоракетной обороны (ПРО).

13) К 03.00 14 апреля ВВС и ПВО Израиля сбили более 200 целей, преимущественно еще на подлете к Израилю.

14) Израилю активно помогали подразделения ВС США и Великобритании, а также Франции и Иордании, которые сбивали и перехватывали баллистические ракеты, БПЛА и крылатые ракеты.

15) В 07.30 14 апреля Израиль открыл воздушное пространство над страной.

2 Состав средств массированного ракетно-авиационного удара Ирана и Йемена

2.1 Ударные средства Ирана

По сообщениям Иранского информационного агентства IRNA в ударе по военным объектам на территории Израиля были задействованы:

- беспилотные летательные аппараты Shahed 131/136 (примерное подлетное время с территории Ирана (расстояние свыше тысячи км) – составляет от 5-7 часов);
- крылатые ракеты Paveh (подлетное время 1-2 часа);
- баллистические ракеты «Хейбар Шекан» и «Эмад» (подлетное время около 15 минут).

2.1.1 Беспилотные летательные аппараты типа Shahed

Таблица 1 – ТТХ БПЛА *Shahed-131* и *Shahed-136*

Характеристика	<i>Shahed-131</i>	<i>Shahed-136</i>
Длина, м	2,6	3,5
Размах крыла, м	2,2	2,5
Масса, кг	135	200
Двигатель	ДВС Ванкеля (использует эксцентриковый роторно-поршневой механизм вращения), 38 л.с.	Двухтактный поршневой ДВС, 50 л.с.
Боевая часть, конструкция и масса	Углеродный цилиндр, кумулятивная, 10-15 кг	В металлическом корпусе, осколочно-фугасная, 40-50 кг.
Дальность, км	900	2000
Скорость, км/ч	180	150-170
Особенности	-	Повышенная шумность

Ударные БПЛА («камикадзе», барражирующий боеприпас, самолет-снаряд) *Shahed-131* и *Shahed-136* (рисунок 2) представляют собой относительно небольшие воздушные летательные аппараты, построенные по схеме треугольное летающее крыло и приводимые в движение расположенным в хвостовой части аппарата толкающим винтом. Высота полета – до 4 тыс.м. Корпус БПЛА изготовлен из углеродного композитного материала с внутренними металлическими опорными элементами. Сравнение ТТХ моделей представлено в таблице 1. БПЛА *Shahed-136*, по сути, является развитием *Shahed-131* в масштабе 1,4 с увеличенными боевыми возможностями. БПЛА могут массированно запускаться с транспортно-пусковых платформ – рисунок 3.

Рисунок 2 – Иранский БПЛА *Shahed-136*Рисунок 3 – БПЛА *Shahed-136* на транспортно-пусковой платформеРисунок 4 – *Shahed-238*

Кроме этого, по оценкам ряда экспертов, Иран мог задействовать ударные реактивные БПЛА «Шахед-238» (рисунок 4).

2.1.2 Баллистические ракеты

Типаж баллистических и крылатых ракет Ирана с иллюстрацией дальности действия представлен на рисунке 5.

Следует полагать, что баллистические ракеты запускались с ракетных баз Ирана, которые по их заявлениям еще 2015 года, располагаются во всех провинциях страны, а хранилища и стационарное оборудование находятся в горной местности под землей на глубине до 500 м. В источниках упоминаются две ракетные базы, которые, предположительно, располагаются на западе Ирана в провинции Керманшах (каньон Конешт и полигон Пяндж Пеллех) в провинции Лорестан (Харрамабад).

Твердотопливная баллистическая ракета *Kheibar Shekan* (рисунок 6), представленная Аэрокосмическими силами Корпуса стражей исламской революции в 2022 году, способна поражать цели маневрирующей боеголовкой на дальностях 1450 километров.

Баллистическая ракета *Emad* (рисунок 7) оснащена жидкостным двигателем и управляемой боеголовкой. Может нести боевую часть весом 750 кг на дальность 1700 км.

Также Иран анонсировал успех боевого применения семи гиперзвуковых ракет, видимо речь идет о гиперзвуковой баллистической ракете средней дальности *Fattah*, ни одна из них, по их заявлению, не была перехвачена. *Fattah* (рисунок 8) – управляемая двухступенчатая твердотопливная ракета с дальностью полета 1400 км и максимальной скоростью до 13-15 М. Боеголовка снабжена сферическим двигателем с по-

движным соплом, которое позволяет боеголовке увеличивать собственную скорость и маневрировать.

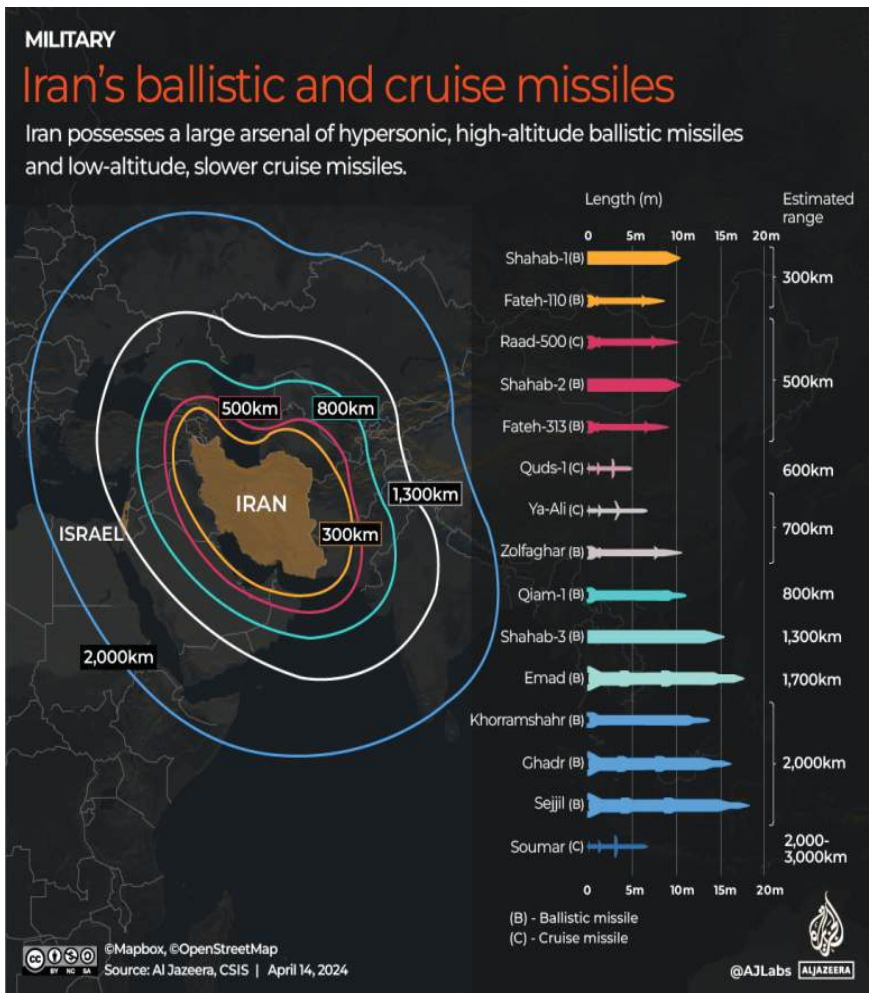


Рисунок 5 – Обобщенные ТТХ баллистических и крылатых ракет ВС Ирана с зонами досягаемости



Рисунок 6 – Баллистическая ракета *Kheibar Shekan*



Рисунок 7 – Баллистические ракеты *Emad*



Рисунок 8 – Гиперзвуковое оружие *Fattah* на презентации 2023 года (достаточно хорошо видны сферический двигатель головной части, головная часть, собственно ракета и фрагмент видеofilьма с логикой боевого применения)

2.1.3 Крылатые ракеты



Рисунок 9 – Руководство Аэрокосмическими силами Корпуса стражей исламской революции представляет крылатую ракету *Paveh* (2023 г.)

Крылатая ракета класса «земля-земля» большой дальности *Paveh* (рисунок 9) является одним из последних достижений (2023 г.) Ирана в области ракетостроения. Радиус действия составляет 1650 км. Представляет собой развитие семейства крылатых ракет *Sumar*. Считается, что эта ракета способна к взаимодействию с другими ракетами в ходе групповой атаки на объект, а также к осуществлению маневра с целью выхода на объект атаки с любого

направления. Использует выдвигающиеся крылья на корпусе, двигатель находится вне корпуса ракеты в верхней задней части.

2.2 Ударные средства Йемена

Арсенал средств удара ВС Йемена и движения «Ансар Аллах» представлен модернизированными баллистическими и крылатыми противокорабельными ракетами, а также ударными БПЛА.

Стоящие на вооружении баллистические ракеты, предположительно, не были применены ввиду, во-первых, их малой дальности действия и, во-вторых, прохождения траектории полета над территорией Саудовской Аравии, обязавшейся сбивать

любые подозрительные цели при пересечении их границ⁶. Здесь же стоит упомянуть о том, что 14 марта 2024 года Йемен объявил о создании гиперзвуковой твердотопливной ракеты со скоростью до 8 М.

Йеменская крылатая ракета наземного базирования Quds-3, представленная в 2022 году, и прототипом которой может являться иранская крылатая ракета «Paveh», видимо, является единственной⁷ крылатой ракетой хуситов, способной достичь территории Израиля.

В отношении применения ударных БПЛА: могли использоваться винтовые беспилотники собственной разработки типа *Samad-3* с дальностью до 1800 км и размахом крыльев 4,5 м при длине 2,8 м.

Полет средств воздушного удара проходил, видимо, над Красным морем и Иорданием с целью поражения объектов на юге Израиля.

3 ОТРАЖЕНИЕ МАССИРОВАННОГО РАКЕТНО-АВИАЦИОННОГО УДАРА

3.1 Действия Израиля

Считается, что израильские системы ПВО приняли наибольшую нагрузку по уничтожению целей и, по заявлениям руководства Армии обороны Израиля (ЦАХАЛ), ракеты и БПЛА были уничтожены:

- противоракетным комплексом дальнего радиуса действия Хец (*Arrow*);
- истребителями на подлете к Израюлю.

Общее управление противовоздушной и противоракетной обороной Израиля возложено на Командование ПВО (дислоцируется на авиабазе Палмахим) – составную часть Военно-космических сил Израиля. Оно отвечает за наземный компонент ПВО и ПРО, дополняя ПВО, реализуемую истребительной авиацией.

3.1.1 Противоракетные системы

Система противоракетной обороны Израиля представляет собой четырех- (в перспективе пяти-) эшелонированное построение средств перехвата воздушных целей и баллистических ракет:

1) эшелон непосредственного прикрытия объектов – лазерная система «Железный луч», предназначенная для уничтожения целей на дальностях до 7 км (перспективная, еще не введена в эксплуатацию);

2) ближний эшелон – около 10 и более батарей системы «Железный купол», предназначенной, прежде всего, для перехвата неуправляемых ракет малой дальности, в том числе снарядов РСЗО, и артиллерийских снарядов, выпущенных с расстояния 4-70 км, траектория которых по оценке командных пунктов нацелена на населенные пункты или военные/гражданские объекты⁸. Одна батарея способна прикрыть

⁶ В декабре 2023 Израиль сообщал о перехвате баллистической ракеты, лишь предположительно называя ее запущенной из Йемена.

⁷ По сообщениям представителя «Ансар Аллах» 2 октября 2024 года движение нанесло удары по территории Израиля крылатыми ракетами типа «Quds-5».

⁸ В противном случае принимается решение не атаковать объект, дав ему возможность упасть в безлюдной местности.

территорию площадью около 150 кв.км. Сообщалось о возможности применения стрельбовых средств системы в качестве перехватчиков БПЛА. Основным боеприпасом системы является ракета-перехватчик Tamir с активной радиолокационной головкой самонаведения, общей массой и длиной около 90 кг и 3 метров соответственно, считается, что она хорошо подходит для уничтожения БПЛА и крылатых ракет;

3) средний эшелон – система «Праща Давида» – совместный проект израильской *Rafael Advanced Defense System* и американского Raytheon, использует кинетические перехватчики *Stunner* и *SkyCeptor* для поражения целей на расстоянии до 250 км.

4) дальний эшелон – транспортируемые комплексы противоракет Хец-2 и Хец-3: три батареи «Хец» (аэробазы Эйв-Шемер, Палмахим и Сдот Миша), вооруженные четырьмя-восемью пусковыми установками на полуприцепах (по 6 ракет в каждой, рисунок 10) ракет-перехватчиков Хец-2 с двойным режимом самонаведения боевой части: ИК- (на больших высотах) и радиолокационными (на малых высотах, при облачности и задымлении) на конечном участке. Боевая часть – осколочно-фугасная с радиусом поражения 50 м. Способна поражать цели на дальностях до 90-100 км и высоте – до 50 км. Стоимость около 3 млн долларов США по состоянию на 2003 г. Стрельбовая РЛС системы «*EL/M-2080 Green Pine*⁹» (рисунок 11) способна отслеживать одновременно порядка 30 целей.



Рисунок 10 – Пусковая установка Хец-2



Рисунок 11 – Транспортируемая антенна EL / M-2080 Green Pine

5) сверхдальний эшелон: комплексы, вооруженные противоракетой «Хец-3¹⁰», предназначенные для перехвата ракет на расстоянии до 3000 км и высоте до 100 км, а также заатмосферного перехвата баллистических целей. Боеголовка кинетического поражения. Некоторые специалисты-израильяне полагают, что может выступать и в роли противоспутникового оружия. Хец-3 вдвое легче Хец-2, по некоторым оценкам

⁹ Транспортируемый с активной ФАР L-диапазона

¹⁰ Совместная разработка Israel Aerospace Industries и американской Boeing. В англоязычной литературе именуется «*Arrow-3*» («Стрела-3»). В ноябре 2023 года сообщалось о первом его боевом применении – перехвате над Красным морем за пределами атмосферы ракеты, предположительно запущенной из Йемена хуситами. Факт боевого заатмосферного перехвата преподносится как первое боевое столкновение, произошедшее в космосе.

может запускаться из пусковых установок Хец-2, однако на демонстрируемых видео для Хец-3 используются пусковые установки вертикального пуска с четырьмя или двумя направляющими. В качестве стрельбовой РЛС применяется *EL/M-2080S Super Green Pine*, работающая в *L*-диапазоне. Предположительно, третья батарея как раз и укомплектовывается Хец-3 на авиабазе Сдот Миша и новой РЛС.

О применении наземного компонента системы ПВО – подвижных автомобильных комплексов ближнего действия *Spyder*, вооруженных ракетами «земля – воздух» *Rynthon-5* и *Derby*, наводимыми радиолокаторами с фазированными антенными решетками *S*-диапазона *EL/V-2084* и *L*-диапазона *EL/V-2106*, не сообщалось.

3.1.2 Действия истребительной авиации Израиля

После отражения иранских ударов Силы обороны Израиля опубликовали кадры, на которых истребители пятого поколения *F-35I Adir* возвращаются на авиабазу Неватим¹¹ с задания по перехвату воздушных целей. Несомненно, что также были применены и истребители ВВС Израиля *F-15* различных модификаций, каковых в боевом составе насчитывается свыше 60 единиц, базирующихся на авиабазах Хацерим и Тель-Ноф.

Самолеты также были задействованы для нанесения ударов по военным объектам на юге Ливана, принадлежащим поддерживаемой Ираном военизированной группировке «Хезболла».

3.2 Действия союзников Израиля

К отражению ракетного удара подключились США, Великобритания, Франция и Иордания. Непосредственная координация действий многонациональных сил осуществлялась США из Объединенного центра воздушных операций на авиабазе Аль-Удейд в Катаре.

3.2.1 Участие ВМС США

3.2.1.1 Действия ВМС США

Американские эсминцы *Carney* и *Arleigh Burke* (рисунок 12) сбили от четырех до шести иранских баллистических ракет. Оба корабля находились в Средиземном море, оснащены средствами противоракетной обороны и перехватчиками баллистических ракет *Standard Missile 3* (SM-3). Предполагается, что корабли использовали противоракету SM-3 для перехвата иранских ракет, что могло стать первым боевым применением этого оружия.

Хотя в некоторых сообщениях встречалось, что была задействована авиация морского базирования, достаточно уверенных подтверждений этому нет. При этом некоторые источники отмечали, что палубная авиация атомного авианосца 6-го флота ВМС США Дуайт Д. Эйзенхауэр (CVN-69), находившегося в тот момент в Красном море в рамках операции *Prosperity Guardian*, целью которой является защита кораблей и коммерческих судов от хуситов, не привлекалась. Ранее – 23 декабря 2023 года

¹¹ На авиабазе Неватим базируются около 40 самолетов F-35I в составе трех эскадрилий. Предполагается, что к концу 2024 году Израиль будет располагать уже 50 самолетами.

– самолеты *F/A-18 Super Hornet* поднимались с авианосца и, как сообщалось, в течение полусуток во взаимодействии с эсминцем *Laboon* типа *Arleigh Burke* уничтожили 12 БПЛА, три противокорабельные баллистические (эсминец *Laboon*) и две крылатые ракеты наземного базирования хуситов в южной части Красного моря.



Рисунок 12 – Эсминец ВМС США *Arleigh Burke*

3.2.1.2 Действия ВВС США

ВВС США заявили, что их истребители *F-15E*¹² *Strike Eagle* 13 апреля сбили более 70 иранских беспилотников, направлявшихся в сторону Израиля. Вероятно, что истребители ВВС США поднимались с авиабазы США на Ближнем востоке Муваф-фак Салти (Иордания). США также предоставляли данные о запусках БПЛА и ракет из Ирана, что помогло своевременно нацелить противовоздушную оборону союзников, особенно с учетом того, что их возможности в регионе были значительно расширены с октября 2023 года в рамках наращивания американского военного присутствия¹³.

Предположительно, для уничтожения БПЛА применялись ракеты класса «воздух – воздух» производства США типа *AIM-9X* (ИК-головка самонаведения, рисунок 13) и *AIM-120* (радиолокационная головка самонаведения, рисунок 14) *ASRAAM*¹⁴ и др., которых могло быть установлено на различные типы истребителей от 4 до 6 единиц.

¹² F-15E – основной истребитель ВВС США; является старейшим классом истребителей в мире, который все еще находится в производстве. Был значительно модернизирован авионикой и вооружением 21 века.

¹³ 494-я и 335-я истребительные эскадрильи ВВС США, которые постоянно базируются в Лейкенхит (Великобритания) на Сеймур Джонсон (Северная Каролина, США) соответственно были переброшены на Ближний Восток во вторую неделю октября 2023 года в рамках увеличения военного присутствия США в регионе. Это было инициировано началом открытых боевых действий между израильскими войсками и группами палестинского движения «Хамас» в секторе Газа. Некоторые задействованные американские формирования были переброшены в регион буквально накануне ракетного удара по Израилю.

¹⁴ ASRRAM- advanced Short Range Air-to-Air Missile.



Рисунок 13 – Ракета класса «воздух – воздух» *AIM-9X ASRAAM*, установленная на крыле самолета (хорошо просматривается объектив ИК-камеры головки самонаведения)



Рисунок 14 – Наземная пусковая установка *NASMAM*, стреляющая ракетой «воздух – воздух» *AIM-120*

Примечание. Наметилась устойчивая тенденция развития ракет класса «воздух – воздух» в сторону боевого применения с наземных пусковых установок. Разработанная в Норвегии совместно с США пусковая установка *NASMAM* (*Norwegian Advanced Surface to Air Missile System*) ориентирована на борьбу с низколетящими целями, в том числе с БПЛА, и может комплектоваться различными типами ракет – *AIM-9X*, *AIM-120* (США) и *AIM-132* (Великобритания, ИК-головка самонаведения). Сообщалось также о полигонном применении системы управления *NASMAM* с поражающим лазерным оружием по БПЛА.

3.2.1.3 Сухопутные войска

Армейская ракетная батарея США *Patriot*, дислоцированная в Эрбиле (Ирак), сбивла баллистическую ракету.

3.2.2 Действия ВВС Великобритании

Премьер-министр Великобритании Риши Сунак заявлял, “что несколько беспилотных летательных аппаратов”, запущенных Ираном, были сбиты британскими многоцелевыми истребителями 4-го поколения *Eurofighter Typhoon*, вооруженными в том числе ракетами «воздух – воздух» *AIM-132* собственного производства. Самолеты базируются на авиабазе ВВС Акротири (Кипр) в составе 903 экспедиционного авиакрыла.

Примечание. Вообще говоря, в открытой печати отсутствует прямая информация о тактике воздушного боя с БПЛА и применяемом оружии. Современные БПЛА обладают очень малой ЭПР в радиолокационном диапазоне, ИК-контрастность также не очень велика, хотя будет различной на разных высотах. Борьба с БПЛА велась в темное время суток, что также затрудняет, наверное, их поражение. В качестве некоторой отправной точки для предположений можно использовать информацию о «крупнейших в истории» ракетных учениях Королевских ВВС Великобритании, когда в течение 10 дней в октябре 2022 года по БПЛА-мишеням *Banshee* (могут быть винто-

выми или реактивными) с самолетов *Typhoon* и *F-35B* были отстреляны 53 ракеты *AIM-132*.

3.2.4 Действия ВС Франции

Французские силы¹⁵, находящиеся на Ближнем Востоке, перехватили некоторую часть БПЛА над территорией Иордании и Ирака, где есть базы ВС Франции, «чтобы гарантировать защиту французских баз и способствовать защите Израиля». Видимо, речь идет о применении истребителей *Rafale* с авиабазы Принц Хасан в Иордании.

Акцентировалось внимание, что корабли Франции были ориентированы на создание радиолокационного поля в интересах раннего предупреждения о воздушном нападении.

3.3 Действия ВС Иордании

Определенную роль сыграли ВС Иордании - соседа Израиля и партнера в области безопасности, - которые использовали собственные средства ПВО для уничтожения БПЛА, летевших в Израиль через его воздушное пространство. В этом арабском государстве также размещены системы *Patriot* ПВО армии США.

Заключение

В результате анализа опубликованных данных, модифицировав одну из циркулирующих среди источников информации карту-схему, можно прорисовать следующую картину возможных траекторий полета ударных средств в сторону Израиля, а также базирования сил союзников Израиля при отражении массированного ракетно-авиационного удара (рисунок 15).

По итоговым сведениям, обеих сторон, Иран и его союзники запустили примерно 185 БПЛА, 36 крылатых ракет и 110-120 баллистических ракет класса «земля-земля», среди которых 7 с гиперзвуковой боевой частью. При этом отдельными источниками сообщалось, что, определенная часть средств нападения оказалась или небоеготова, или не смогла выполнить боевую задачу, что вполне вероятно с учетом вероятностного характера показателей надежности технических средств.

По выражению *CNN*, атака Ирана была «спланирована с целью минимизации потерь при максимальной зрелищности».

Главнокомандующий Корпусом стражей исламской революции Хоссейн Салами заявил, что операция Ирана прошла лучше, чем предполагалось. По его словам, ракетам и БПЛА удалось преодолеть системы противовоздушной обороны Израиля: «Мы действительно знаем, что наша операция была успешнее, чем ожидалось. Наша реакция на любую агрессию со стороны Израиля будет более суровой».

В Израиле объявили, что в ходе отражения массированного удара было уничтожено свыше 170 БПЛА, 30 крылатых ракет и большая часть из 120 баллистических ракет.

¹⁵ Французская авиация ВВС и ВМС размещается на авиабазах Эль-Дафра (ОАЭ), Принц Хасан Prince Hassan (Иордания), Джибути (Саудовская Аравия)



Рисунок 15 – Карта ракетно-авиационного удара по Израилю:



– реактивные системы
залпового огня CAP;



– беспилотные летательные
аппараты;



– баллистические ракеты;



– крылатые ракеты;



– зенитно-ракетные
средства CAP;
– корабли союзников
Израиля;



– зенитно-ракетные
средства Израиля;



– авиабазы США, Франции
и Великобритании в
регионе;



– авиабазы Израиля.

Несмотря на все понятные противоречия, присутствующие в заявлениях сторон, можно полагать, что в основе своей союзные силы сумели предотвратить существенный урон Израилю. Хотя в ЦАХАЛ заявили, что смогли перехватить 99 процентов атакующих снарядов, по данным американских СМИ, минимум девять ракет попали по военным базам Израиля: пять по базе военно-воздушных сил «Неватим» и четыре – по авиабазе около пустыни Негев. На базе «Неватим» повреждена взлетно-посадочная полоса, самолет С-130 и склады. Военные Израиля назвали ущерб от удара незначительным, но не сообщили подробностей.

В конечном счете, хотя иранские и израильские источники расходятся в итоговой оценке военной эффективности ударов, обращают на себя внимание оценки экономического характера: затраты на отражение массированного ракетно-авиационного удара составили почти 2,5 миллиарда долларов на фоне стоимости ударных средств, оцениваемых менее чем в 50 миллионов долларов. В качестве комментария к подобным финансовым качелям на фоне стоимости БПЛА типа «Шахед-136» в несколько десятков тысяч долларов можно привести следующие цифры:

- стоимость ракеты-перехватчика системы «Железный купол» составляет около 20-50¹⁶ тысяч долларов, или 100-150 тысяч долларов за боевой перехват;
- стоимость ракет «воздух – воздух» *ASRAAM AIM 120* – около 1 млн, *AIM-9* считается вдвое дешевле.

С другой стороны, если оценивать эффективность мер противодействия удару по показателю предотвращенного ущерба, то соответствующие затраты на ПВО и ПРО окупают себя.

В целом, надо полагать, что система ПВО и ПРО Израиля работала с максимальной напряженностью и, по мнению противников Израиля, вряд ли бы без помощи союзников смогла бы отразить массированный ракетно-авиационный удар самостоятельно.

Баушев Сергей Валентинович – доктор военных наук, профессор, начальник Научно-образовательного центра, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: организация производства, оптимизация производственных процессов.

Email: s.baushev@goz.ru.

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

Раскин Александр Владимирович – доктор военных наук, профессор, начальник отдела, Командование Космических войск, г. Москва.

Область научных интересов: космические технологии; вооружение и военная техника.

Email: NOC.RNV@goz.ru.

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

¹⁶ По некоторым оценкам стоимость удалось существенно снизить до нескольких тысяч долларов, что вызывает ряд вопросов у специалистов.

MASSIVE MISSILE AND AIRCRAFT STRIKE ON ISRAEL ON APRIL 13-14, 2024 AND ITS REFLECTION

The article examines the nature of the military actions during the massive missile and air strike by Iran and its allies on April 13-14, 2024 on targets in Israel, as well as during its repulsion. The material was prepared based on the analysis of publications in foreign sources - the Iranian news agencies IRNA, Israel, Great Britain Reuters, the international Arabic Al Jazeera, the websites of the Ministry of Defense of Israel, Great Britain and other countries, as well as information resources and organizations specializing in military topics: TheWarZone, NCRI, USNI, Military Watch Magazine, WarZone, Forbes, TheAviationist and several others.

Keywords: missile and air strike; attack UAVs; cruise missiles; Israel; Hezbollah; missile defense.

Baushev Sergey Valentinovich – Doctor of Military Sciences, Professor, Head of the Research and Educational Center, JSC «Obukhovsky plant», St.Petersburg city.

Research interests: manufacturing organization, manufacturing processes optimization.

Raskin Alexander Vladimirovich – Doctor of Military Sciences, Professor, Head of Department, Command of the Space Forces, Moscow.

Research interests: space technologies; weapons and military equipment.

ПРИНЦИПЫ НАУЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТА ТЕЙЛОРА С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ НАУЧНЫХ ДАННЫХ

Кривошеев А.В.

Рассмотрена публикация «Принципы научного менеджмента». Сделана попытка критически пересмотреть примеры, приведенные Тейлором более века назад, с учетом современных нормативных документов и данных современных научных публикаций из таких разных сфер, как биология, спортивная медицина, кардиология, скалолазание и даже гинекология.

Ключевые слова: Тейлор; менеджмент; организация производства; бережливое производство.

Введение

С момента появления в начале двадцатого века публикации Тейлора [1] прошло более ста лет. Суммарный оборот трех крупнейших международных консалтинговых компаний в области управления (McKinsey & Company, Bain & Company и BSG) превысил 20 млрд. \$ в год. С каждым годом появляются все новые и новые эксперты в области менеджмента с авторскими методиками повышения эффективности, являющегося одним из частных случаев задач управления.

Цель этой статьи – критическая проверка принципов научного управления Тейлора, первопроходца этой области. Метод исследования – сбор и анализ результатов исследований, представленных в статьях зарубежных и отечественных авторов, касающихся изучаемой темы.

1 Вклад Тейлора и критика его В.И.Лениным

Фредерик Уинслоу Тейлор считается основоположником научного менеджмента. Среди его публикаций отметим следующие: «Принципы научного менеджмента» [1], «Управление фабрикой» [2, С. 271-305], «Искусство резать металлы» [3]. В [1] приведены ключевые, по мнению Тейлора, принципы управления предприятием, в [2, С. 271-305] описана их организационная реализация на металлообрабатывающем предприятии, а в [3] – технические подробности научных основ металлообработки. Тейлор тщательно изучил проведенные до него исследования в области резания металлов и обобщил их. Эксперименты, описанные в [3], заняли у группы ученых (в том числе математика Барта, химика Уайта и инженера Ганта) 26 лет. В результате были произведены существенные изменения в конструкции станков, модернизация и стандартизация резцов, был изобретен способ термообработки быстрорежущей стали (изобретенной ранее Мюшкеттом), значительно повысивший ее характеристики. Были собраны данные многочисленных экспериментов по соотношению режимов резания и стойкости инструмента. В результате были созданы счетные линейки Барта, позволяющие рабочим, не прибегая к сложным расчетам и справочникам, быстро определять

оптимальные режимы резания в токарной обработке. Тейлор был выдающимся изобретателем и за свою жизнь получил более 100 патентов на изобретения. Таким образом, Тейлора можно считать основателем не только научного менеджмента, но и теории резания металлов.

Классик современного менеджмента Питер Друкер считал, что новые методики повышения эффективности производства (TPS, lean manufacturing, TQM и 6 сигм) основаны на принципах Тейлора:

«На протяжении последних ста лет каждый новый метод, позволивший достичь хотя бы минимальных успехов в повышении производительности работников физического труда – а вместе с ним и их реальной зарплаты, – основывался на принципах Тейлора, как рьяно авторы этих методов ни превозносили бы отличия собственных систем от тейлоровой. Укрупнение технологических операций, стремление к разнообразию работы за счет исключения повторяющихся операций, ротация должностей – во всех этих нововведениях методы Тейлора используются для уменьшения усталости работника, а, следовательно, для повышения производительности его труда. Идеи Тейлора об анализе задач и научной организации всего процесса физического труда использованы и в принципе конвейера Генри Форда, разработанном уже после 1914 года, когда сам Тейлор был стар, болен и отошел от дел. Идеи Тейлора использованы и в японских «кружках качества», и в системе непрерывного совершенствования «кайзен», и в организации поставок «точно вовремя». Однако самым лучшим примером следует считать «всеобщий контроль качества» Эдвардса Деминга (1900-1993)» [4, с. 200 - 201].

Система Тейлора с самого начала подвергалась критике со стороны профсоюзов. Вождь мирового пролетариата Владимир Ильич Ленин называл ее системой выжимания пота [5] и порабощением человека машиной [6]. Но при этом он критикует ее с точки зрения классовой борьбы, но не ее техническую часть. Он же призывает внедрить ее в СССР:

«...Отрицательным в системе Тейлора было то, что она осуществлялась в обстановке капиталистического рабства и служила средством выжимания из рабочих двойного и тройного количества труда при прежней оплате, совершенно не считаясь со способностью наемных рабочих дать без вреда для человеческого организма это двойное или тройное количество труда при прежнем числе рабочих часов. Социалистической Советской республике предстоит задача, которую можно кратко формулировать так, что мы должны ввести систему Тейлора и научное американское повышение производительности труда по всей России, соединив эту систему с сокращением рабочего времени, с использованием новых приемов производства и организации труда без всякого вреда для рабочей силы трудящегося населения. Наоборот, правильно руководимое самими трудящимися, если они будут достаточно сознательными, применение системы Тейлора послужит вернейшим средством к дальнейшему и громадному сокращению обязательного рабочего дня для всего трудящегося населения, послужит вернейшим средством к тому, чтобы мы в период времени довольно краткий осуществили задачу, которую можно примерно выразить так: шесть часов физической работы для каждого взрослого гражданина ежедневно и четыре часа работы по управлению государством...» [7, с. 141].

2 Принципы научного менеджмента

Так как в современных публикациях авторы позволяют себе сильно искажать подход Тейлора, следует привести наиболее важные (по мнению автора) его элементы. В новой системе управления менеджмент должен взять на себя выработку научных основ производства, подбор, обучение и тесное и дружественное взаимодействие с персоналом:

«...Так, например, администрация должна взять на себя заботу по собиранию всей совокупности традиционных знаний и навыков, которыми обладают ее рабочие, а затем задачу классификации, табличной обработки и сведения всех этих знаний в правила, законы и формулы, оказывающие рабочим огромную помощь в выполнении их ежедневной работы. В дополнение к развитию этим путём новой специальной науки. Администрация предприятия берет на себя еще три новых рода обязанностей, являющихся дополнительным и тяжким бременем для ее агентов.

Все эти новые обязанности дирекции распадаются, таким образом, на следующие четыре группы:

Во-первых. Администрация берет на себя выработку научного фундамента, заменяющего собой старые традиционные и грубопрактические методы, для каждого отдельного действия во всех различных разновидностях труда, применяемых в предприятии.

Во-вторых. Администрация производит на основе научно установленных признаков тщательный отбор рабочих, а затем тренирует, обучает и развивает каждого отдельного рабочего, в то время как в прошедшем рабочий сам выбирал себе специальность и сам на ней тренировался так хорошо, как умел.

В-третьих. Администрация осуществляет сердечное сотрудничество с рабочими в направлении достижения соответствия всех отдельных отраслей производства научным принципам, которые были ею ранее выработаны.

В-четвертых. Устанавливается почти равномерное распределение труда и ответственности между администрацией предприятия и рабочими. Администрация берет на себя все те отрасли труда, для которых она является лучше приспособленной, чем рабочие, тогда как в прошедшем почти весь труд целиком и большая часть ответственности были возложены на рабочих...» [1, с. 28-29].

Наиболее трудным представляется первый пункт, а именно выработка научного фундамента труда. Алгоритм Тейлора этого (по отношению к труду рабочих профессий) заключается в следующем:

- 1) Выберите 10-15 рабочих наиболее успешных в исследуемой области.
- 2) Проведите точное исследование всего ряда элементарных операций и инструментов.
- 3) Нормируйте точный хронометраж каждой элементарной операции и выберите наиболее быстрый способ производства каждой операции.
- 4) Устраните все неправильные, медленные и излишние движения.
- 5) Соедините все выбранные наилучшие и наиболее быстрые движения вместе с наилучшими типами инструментов.
- 6) Полученный метод работы (вместе с инструментами) встает на место множества худших методов и инструментов, употреблявшихся ранее.

Эффективность этого подхода Тейлор подтверждает практическими примерами, которые рассмотрены далее.

3 Наука о переноске чугунных болванок

Первый пример относится к оптимизации труда артели носильщиков чугуна в Вифлеемской Стальной Компании: «...Железнодорожная ветка была проложена в поле непосредственно вдоль края расположенных там штабелей чугуна. Рядом с подаваемыми вагонами устанавливалась наклонная платформа, и каждый рабочий брал из своего штабеля по чугунной болванке, весом около 92-х фунтов, всходил вверх по наклонной плоскости и клал болванку на дно вагона...» [1, с. 32]

В результате Тейлору удалось поднять производительность с 12,5 тонн на человека в день до 47 тонн на человека в день (в 3,76 раз), не вызвав стачки. При этом уровень заработной платы был поднят с 1 доллара 15 центов до 1 доллара 85 центов, т.е. в 1,6 раз. Себестоимость погрузки упала с 0,092 доллара за тонну до 0,039 доллара за тонну, т.е. в 2,33 раза.

Для правильной оценки этого примера следует привести некоторые сведения о энергетике мышечной деятельности. В самой мышечной клетке превращение энергии обеспечивается аденозин-трифосфорной кислотой (АТФ) и креатинфосфатом (КФ). Накопление и освобождение энергии происходит путем присоединения или отщепления фосфатных групп. После отщепления фосфорной кислоты от молекулы АТФ с помощью фермента аденозинтрифосфатазы образуется аденозидифосфорная кислота (АДФ) и освобождается энергия: $АТФ \rightarrow АДФ + H_3PO_4 + 8 \text{ ккал}$. [8, с.62]. Снижение на 20-40 процентов содержания АТФ компенсируется за счет КФ. При работе с максимальной интенсивностью запасы КФ расходуются в первую минуту. Далее в работу включается процесс гликолиза, который может быть аэробным (цикл Кребса) и анаэробным. Производительность аэробного образования АТФ лимитирована скоростью снабжения клетки кислородом. В цикл Кребса помимо гликогена могут включаться жирные кислоты и даже аминокислоты. Однако в нормальных условиях белки в качестве источника энергии не используются. В результате анаэробного гликолиза выделяется молочная кислота (лактат), повышение концентрации которой лимитирует использование этого процесса синтеза АТФ. При аэробном гликолизе одна грамм-молекула глюкозы образует в 19 раз больше АТФ, чем при анаэробном [8, с.64].

Тейлор утверждает, что работа носильщиков была лимитирована усталостью рук от статической нагрузки. Болванка весит 92 фунта * 0,45кг/фунт = 41,4 кг. Согласно [9] сила сжатия кисти мужчины 35-44 лет в среднем составляет 47 кг. Так как груз распределяется на 2 руки, нагрузка составит приблизительно $(100 \cdot 41,4) / (2 \cdot 47) = 44$ процента от максимальной силы. Согласно [10, р. 101-102] кровеносные сосуды рук в этом случае будут частично перекрыты, метаболизм будет как аэробным, так и анаэробным, максимальное время хвата будет убывающим. Заметим, что АТФ используется не для сокращения мышц, а для их расслабления, без АТФ они останутся законтрактованными. Если уровень молочной кислоты в мышцах рук слишком сильно поднимется, они не смогут использовать креатинфосфатный и лактатный процесс образования АТФ. Мышцы перекроют сосуды и им неоткуда будет взять кислород для переработки лактата и выработки АТФ [10, р. 103 - 104]. В таком случае носильщику потребуется длительный отдых для возвращения к работе. Таким образом, для сохранения работоспособности носильщику требуется использовать для выработки

АТФ в основном КФ, т.к. аэробного гликолиза для столь тяжелой работы недостаточно, а анаэробный гликолиз приведет к быстрому отказу мышц рук. Уточним детали примера. Расстояние от штабеля до вагона в среднем 36 футов * 0,3048 м/фут = 11 м. Среднюю скорость носильщика примем 6000 м/ч. В секунду скорость составит 1,666 м. Таким образом, носильщик идет с болванкой $11/1,666 = 6,6$ с.

Всего грузчики разгружают 1156 болванок за 10 часов, или 1 болванку в 31 секунду. Если пренебречь сравнительно малым временем поднимания и опускания болванки, носильщик фактически затрачивает на погрузку 10 болванок 132 секунды, из которых время под грузом составит 66 секунд. С учетом времени расслабления рук 6,6 с по пути от вагона, запасов КФ должно хватить для того, чтобы мышцы практически не использовали анаэробный гликолиз. После погрузки 10-20 болванок носильщик садится отдыхать. На отдых после погрузки 10 болванок у него останется $310-132=178$ секунд. По данным [11] для восстановления уровня КФ достаточно 60-120 секунд. Необходимым условием для этого является низкий уровень лактата. При его повышенном уровне на восстановление потребуются уже не секунды, а минуты. Исходя из рассчитанных 6,6 секундах под грузом, время под грузом составит 21 процент, в отличие от приведенных Тейлором 42 процентов. Очевидно, Тейлор не отнес путь назад к времени отдыха, а под 58 процентами времени без груза он понимает время отдыха от работы.

Разумеется, ни Тейлор, ни его подчиненный Барт ничего не знали ни о метаболизме мышц, ни о блокировке кровеносных сосудов законтрактованными мышечными тканями. Их представление было весьма далеким от современного состояния науки:

«...Все время, пока рабочий находится под тяжелой нагрузкой, ткани мускулов его рук подвергаются процессу разрушения, и необходимы частые промежутки отдыха для того, чтобы кровь могла вновь восстановить эти ткани до их нормального состояния.

Мы вернемся теперь к нашим носильщикам чугунных болванок на заводе Вифлеемской Стальной Компании. Если бы Шмидту позволили взяться за кучу в 47 тонн чугуна без указаний и руководства со стороны человека, изучившего искусство или науку переноски чугунных болванок, то в своем стремлении заработать повышенную плату он, по всей вероятности, утомил бы себя до полного изнеможения к 11 или 12 часам дня. Он работал бы столь непрерывно, что мускулы его не имели бы достаточного времени отдыха, абсолютно необходимого для их восстановления, и он дошел бы до полного изнеможения еще в первой половине рабочего дня. Напротив, после того, как человек, знакомый с законом, управляющим данным видом труда, день за днем стоял над ним и руководил его работой, пока он не приобрел привычку отдыхать так часто, как это нужно было, он мог затем работать ровным темпом в течение всего дня, не утомляя себя чрезмерно...» [1, с. 43]

Несмотря на отсутствие знаний о метаболизме мышц, эмпирический подход Тейлора поражает результатом, достигнутым лишь за счет регламентации тайминга работы и отдыха.

4 Второй пример приложения научной организации управления: работа лопатой

В данном случае Тейлор оптимизировал работу артелей, работавших лопатами. Численность рабочих удалось сократить с 400-600 человек до 140. Среднее число выработки удалось увеличить с 16 тонн до 59 тонн на человека. Средний заработок рабочих был увеличен с 1,15 доллара до 1,88 доллара. Были введены в употребление несколько стандартных видов лопат в зависимости от перегружаемого материала, дополнительные конторы, склады и персонал для них. С учетом дополнительных расходов себестоимость переработки 1 тонны сырья снизилась с 7,2 центов до 3,3 центов. Введенные в употребление лопаты обеспечивают нагрузку на лопату в 21 фунт = $21 \cdot 0,45 \text{ кг} = 9,45 \text{ кг}$ для получения оптимальной производительности согласно Тейлору в соответствии с материалом. Так как нагрузка от лопаты приходится в основном на одну руку, принимаем максимальную силу одной руки согласно [9] 47 кг. Согласно [10, р.101-102] максимальная нагрузка для неограниченного времени хвата составляет 20 процентов от максимальной силы, что составит $47 \text{ кг} \cdot 0,2 = 9,4 \text{ кг}$. Таким образом, эмпирический результат Тейлора для нагрузки лопаты в 21 фунт с пренебрежительно малой погрешностью 0,05 кг совпадает с научными данными для обеспечения исключительно аэробного метаболизма мышц рук, не вызывающего их быстрого утомления.

5 Третий пример приложения научной организации управления: кладка кирпичей

В этом примере Тейлор приводит данные оптимизации кладки кирпича, которую выполнил Франк Б.Джилльбрет. Джилльберт сократил число элементарных движений каменщиков с 15 до 8, ввел некоторые приспособления, помощь подручного рабочего и научил своих каменщиков делать простые движения обеими руками. С помощью переносной платформы были устранены наклоны каменщика для поднимания кирпича с пола. В результате производительность была поднята со 120 кирпичей в час до 350.

6 Данные Тейлора и современная специальная оценка условий труда

СОУТ проводится по методике, утвержденной министерством труда [12]. Далее приводится оценка тех вредных факторов, которые можно оценить по публикации [1].

Носильщик чугуна перемещает 47000 кг на расстояние 11 м, т.е. 517000 кг м.

Условия труда носильщика по тяжести трудового процесса относим к подклассу 3.2 (Физическая динамическая нагрузка – единицы внешней механической работы за рабочий день (смену), кг м при перемещении работником груза на расстояние более 5 м более 70000 кг м). По массе поднимаемого и перемещаемого груза (41,4 кг) вручную условия труда носильщика относим к подклассу 3.2 (Подъем и перемещение тяжести постоянно в течение рабочего дня (смены) (более 2 раз в час): более 20 кг).

Рабочий с лопатой по данным Тейлора перемещает 59000 кг, т.е. 5900 кг в час. Допустим, что он перемещает с помощью лопаты груз на расстояние 1 м. Тогда суммарно за смену минимальная физическая динамическая нагрузка составит 59000 кг м.

При перемещении работником груза на расстояние от 1 до 5 м нагрузка более 35000 кг м нормируется как подкласс 3.2. По суммарной массе поднимаемых и перемещаемых вручную грузов в час более 1500 кг относим условия труда рабочего с лопатой к подклассу 3.2.

Так как при наличии двух и более показателей тяжести трудового процесса, условия труда по которым отнесены к подклассу 3.1 или 3.2 вредных условий труда, класс (подкласс) условий труда по тяжести трудового процесса повышается на одну степень, т.е. до подкласса 3.3.

Согласно статье 14 ФЗ 426 от 28.12.2013 [13] подкласс 3.3 (вредные условия труда 3 степени) - условия труда, при которых на работника воздействуют вредные и (или) опасные производственные факторы, уровни воздействия которых способны вызвать стойкие функциональные изменения в организме работника, приводящие к появлению и развитию профессиональных заболеваний легкой и средней степени тяжести (с потерей профессиональной трудоспособности) в период трудовой деятельности. Таким образом, как носильщик, так и рабочий с лопатой из примеров Тейлора с высокой долей вероятности приобретут профессиональные заболевания. Справедливости ради отметим тот факт, что введенная для каменщика переносная платформа избавила его от вредного воздействия наклонов корпуса более 30 градусов. При количестве наклонов более 300 условия труда относятся к подклассу 3.2, то есть к вредным условиям труда 2 степени - условиям труда, при которых на работника воздействуют вредные и (или) опасные производственные факторы, уровни воздействия которых способны вызвать стойкие функциональные изменения в организме работника, приводящие к появлению и развитию начальных форм профессиональных заболеваний или профессиональных заболеваний легкой степени тяжести (без потери профессиональной трудоспособности), возникающих после продолжительной экспозиции (пятнадцать и более лет).

7 Четвертый пример приложения научной организации управления: сортировка велосипедных шариков

В этом примере Тейлор оптимизировал работу работниц, контролирующих качество шариков для подшипников велосипедов после их полировки. В ходе этой оптимизации была произведена «сортировка» сортировщиц в соответствии с их «коэффициентом восприимчивости», определяющим производительность их работы. Неподходящие сотрудницы были уволены. Дополнительно было произведено сокращение рабочего дня сортировщиц с 10,5 часов до 8,5 часов, введены 4 десятиминутных перерыва в течение рабочего дня. При этом заработная плата была повышена на 80-100 процентов по сравнению с прежней. Тейлор утверждает, что качество контроля существенно повысилось при значительном снижении расходов. К сожалению, в публикации отсутствуют количественные показатели, поэтому проанализировать этот пример не представляется возможным.

Отметим утверждение Тейлора, что в данном случае всякой молодой женщине следовало бы предоставить по два дня непрерывного отдыха (с сохранением платы) раз в месяц в любой момент, по ее собственному выбору. Почему Тейлор, служащий интересам работодателя, считает нужным подарить работницам два оплачиваемых дня в месяц? Чтобы понять это, необходимо привести некоторую статистику по такой социально значимой проблеме современной медицины, как эндометриоз. Согласно [14 с.3] частота эндометриоза у женщин репродуктивного возраста варьирует от 7 до 12%. По данным [15] болевой синдром при эндометриозе встречается приблизительно в 70%. Исследование [16] говорит о том, что в каждом из трех случаев болевой син-

дром при эндометриозе носит выраженный характер. Таким образом, долю сотрудниц с явно выраженным болевым синдромом при эндометриозе можно грубо оценить, как произведение $0,095 \cdot 0,7 \cdot 0,333 = 0,0219$. То есть с вероятностью в 2 процента, в течение нескольких дней в месяц, сотрудница, контролирующая показатели важного технологического процесса, будет представлять собой невольного саботёра на производстве, так как из-за боли не сможет сконцентрироваться на контролируемом объекте. Следовательно, отсутствие возможности взять такой сотрудницей оплачиваемый выходной день может нанести компании больше издержек, чем предоставление оплачиваемого выходного дня.

8 Ошибочное противопоставление подходов Тейлора и Мейо

Представители гуманитарных наук, по неясной причине решившие, что менеджмент находится в области их компетенций, позволяют себе в своих публикациях [17, 18] противопоставлять школу «человеческих отношений» Э. Мейо школе Тейлора. К примеру, Рязанов В.А. пишет: «...Необходимость такого подхода Э.Мейо подтвердил в ходе испытаний, получивших наименование «хоторнские эксперименты» (1924-1932 г. г.). В ходе испытаний им была апробирована гипотеза, согласно которой норма выработки определяется не физическими способностями работника, а давлением группы, в составе которой этот работник трудится...» [17, с. 22].

Задолго до Мейо, об этом «открытии» писал сам Тейлор: «...Каждый новый рабочий, поступавший на завод, получал точные указания от других рабочих, сколько каждого данного рода работы он должен был производить, и если он не подчинялся этим инструкциям, он мог быть уверен, что в недалеком будущем его заставят уйти с места сами же рабочие.

Как только автор был назначен главным механиком, к нему один за другим стали подходить отдельные рабочие и говорить ему, примерно, следующее:

«Ну вот, Фред, мы очень рады, что Вас назначили главным механиком. Вы хорошо знаете игру, и мы уверены, что Вы неспособны быть свиньей при поштучной оплате. Вы будьте с нами по-хорошему, и все будет прекрасно; но если Вы попытаетесь изменить хоть одну из наших норм, то Вы можете быть вполне уверены, что мы Вас выставим вон» ...» [1, с. 36 - 37].

Причем Тейлор не только описал эту проблему, но и успешно решал ее. Парсонс показал в [19], что «хоторнские эксперименты» были слишком запутанными, чтобы позволить исследователям сделать однозначные выводы. «Эффект Хоторна» в экспериментальных исследованиях является нежелательным эффектом самих экспериментальных операций, своего рода аналогом эффекта плацебо в медицине.

Кандидат социологических наук Добрина Ольга Александровна в своей статье [18] искажила теорию Тейлора, сделав ложное утверждение о том, что его подход является утопией и ограничен лишь техникой и технологией:

«...Основным приоритетом в деятельности организации в технологической утопии Тейлора является техника и технология, на рациональное использование которых направлены все усилия управляющих, вооруженных знаниями и навыками научной организации труда.

В отличие от Тейлора, Мейо ориентирован на внутриличностные и межличностные аспекты трудового процесса...» [18]

Обратившись к первоисточнику, мы увидим, что внутриличностные и межлич-

ностные аспекты трудового процесса (под которыми Тейлор понимает «сердечное сотрудничество администрации с рабочими») являются частью системы Тейлора, а не его антиподом:

«...Метод кладки кирпичей, изобретенный м-ром Джильбретом, представляет простую иллюстрацию подлинного и эффективного сотрудничества. Это не тот тип сотрудничества, при котором рабочая масса совместно, с одной стороны, сотрудничает с администрацией, находящейся на другой стороне; это такое сотрудничество, при котором отдельные агенты администрации (каждый в специальном определенном отношении) оказывают индивидуальную помощь каждому отдельному рабочему, – с одной стороны, путем изучения его нужд и недостатков и обучения его лучшим и более быстрым методам работы, а с другой, путем обеспечения ему надлежащей помощи, в сотрудничестве с ним, от всех остальных рабочих, с которыми он приходит в соприкосновение, – путем обеспечения производства всеми ими соответствующей доли работы надлежащим образом и с надлежащей скоростью. Автор вдался в такие подробности при описании методов м-ра Джильбрета, имея в виду с полной ясностью установить тот факт, что это увеличение выработки и эта гармония производства никоим образом не могли бы быть достигнуты при действии системы «инициативы и поощрения» (т. е. при возложении всей проблемы производства на рабочего и предоставлении ему разрешать ее, как он хочет), которая являлась философией управления прежнего времени.

Автор хотел также показать, что этот успех был обусловлен только приложением всех четырех элементов, составляющих сущность научной организации управления: во-первых, – выяснение (администрацией, а не рабочими) научных основ кладки кирпича, с установлением строгих правил для каждого движения каждого отдельного рабочего, а также с усовершенствованием и стандартизацией всех орудий и условий труда;

во-вторых, – тщательный отбор и последующая тренировка каменщиков, с целью сделать из них первоклассных рабочих, и увольнение всех тех из них, которые отказываются или обнаруживают свою неспособность применять наилучшие методы;

в-третьих, – взаимное сближение первоклассного каменщика и науки о его работе – путем постоянной помощи и внимания, оказываемых ему администрацией предприятия, и путем выплаты каждому рабочему значительной ежедневной прибавки за ускоренную работу и за точное выполнение возложенных на него заданий;

в-четвертых, – почти равномерное распределение работы и ответственности между рабочими и администрацией. В течение всего рабочего дня администрация должна работать рука об руку с рабочими, помогая, поощряя и устраняя препятствия для их работы, – тогда как в прежнее время она стояла совсем в стороне, оказывая рабочим лишь очень небольшую помощь и возлагая на них почти целиком всю ответственность в отношении методов, орудий, скорости работы и обеспечения гармонического сотрудничества.

Из этих четырех элементов первый (развитие науки о кладке кирпича) является наиболее интересным и бросающимся в глаза. Однако, каждый из трех остальных представляется в той же мере необходимым для достижения успеха.

Нельзя забывать также, что позади всего этого и во главе управления должен стоять оптимистический, решительный и трудолюбивый директор, который умеет в

такой же мере терпеливо ждать, как и много работать...» [1, с. 61-62].

Таким образом, теория «человеческих отношений» лишь дополняет теорию Тейлора, а не противостоит последней, т.к. является одной из ее частей. Доказательством этому служит простое сравнение результатов опытов Тейлора и Мейо. При росте производительности у первого в разы, рост производительности в хоторнских экспериментах максимально достигал 30 процентов, а в среднем был еще ниже.

Заключение

Эта работа ни в коем случае не призывает использовать тяжелый физический труд в тех операциях, где его можно механизировать, при этом превышая допустимые уровни тяжести трудового процесса. В работе показано, что оптимизация такой простой на первый взгляд и грубой физической работы, как работа лопатой или переноска чугуна, скрывает под собой огромное наукоемкое основание, состоящее из сплава точного определения и хронометража составляющих элементарных действий, биохимии метаболизма скелетных мышц, теории спорта и различных областей медицины. Несмотря на отсутствие этих необходимых фундаментальных знаний, эмпирический подход Тейлора позволил получить результаты, которые близки к теоретическому максимуму с точки зрения современных научных данных.

Показано, что теория «человеческих отношений» психолога Элтона Мейо должна не противопоставляться, как это принято некоторыми учеными, а дополнять систему Тейлора. Таким образом, принципы научного менеджмента Тейлора остаются актуальными и эффективными.

Выработка администрацией научных основ производства (в частном случае тщательная проработка и регламентация оптимального технологического процесса) является базисом для систем бережливого производства и управления качеством. Эффективное внедрение бережливого производства и системы управления качеством невозможно без тщательно разработанной технологии. Самостоятельная разработка или оптимизация технологии усилиями только рабочего может оказаться неэффективной из-за высокого уровня наукоемкости теоретических основ производства.

Литература

- 1 Тейлор Ф. Принципы научного менеджмента. М.: «Журнал «Контроллинг»», 1991. 104 с.
- 2 Управление – это наука и искусство / А. Файоль, Г. Эмерсон, Ф. Тейлор, Г. Форд. М.: Республика, 1992. 351 с.
- 3 Тейлор Ф. Искусство резать металлы. Берлин: Бюро иностранной науки и техники, 1922. 336 с.
- 4 Друкер П. Задачи менеджмента в XXI веке. М.: Вильямс, 2007. 288 с.
- 5 Ленин В.И. Полное собрание сочинений. М.: Издательство политической литературы, 1973. – Т. 23: «Научная» система выжимания пота. С. 18-19.
- 6 Ленин В.И. Полное собрание сочинений. М.: Издательство политической литературы, 1973. Т. 24: Система Тейлора – порабощение человека машиной. С. 369-371.
- 7 Ленин В.И. Полное собрание сочинений. М.: Издательство политической литературы, 1969. – Т. 36: Первоначальный вариант статьи «Очередные задачи совет-

ской власти». С. 127-164.

8 Дубровский В.И. Спортивная медицина: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2002. 512 с.: ил.

9 Шальнова С. А. и др. Оценка мышечной силы с помощью кистевой динамометрии в российской популяции среднего и пожилого возраста и ее ассоциации с показателями здоровья // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2023; 22(8S):3792 С. 121-131.

10 Performance Rock Climbing / D. Goddard, U. Neumann. Mechanicsburg: Stackpole books, 1993. 194 p.

11 Hargreaves M. Skeletal muscle energy metabolism during exercise / M.Hargreaves, L.L.Spriet // Nat Metab. 2020. № 2(9). P.817-828.

12 Методика проведения специальной оценки условий труда (с изменениями на 27 апреля 2020 года). Приказ министерства труда и соц. Защиты РФ от 24 января 2014 года N 33н (приложение 1).

13 Федеральный закон о специальной оценке условий труда (с изменениями на 24 июля 2023 года) (редакция, действующая с 1 сентября 2023 года).

14 Качалина Т.С. и др. Генитальный эндометриоз: клиника, диагностика, лечение: Учебно-методическое пособие. Н.Новгород: Изд-во Нижегородской государственной медицинской академии, 2004. 34 с.

15 Ищенко А.И., Кудрина Е.А. Эндометриоз: диагностика и лечение. М.: ГЭОТАР-МЕД, 2002. 104 с.

16 Оразов М.Р. Оценка болевого синдрома пациенток с эндометриоз-ассоциированной тазовой болью, обусловленной наружным генитальным эндометриозом / Оразов М.Р., Носенко Е.Н., Хамошина М.Б., Барсегян Л.К., Токаева Э.С., Закирова Я.Р. // Акушерство, гинекология и репродукция. 2017. №11(2). С.18-22.

17 Рязанов В.А. Теория управления социально-экономическими системами. М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. 240 с.

18 Добрина О.А. Представления о человеке труда в классической социологии управления организацией: Фредерик Тэйлор и Элтон Мейо // Вестник Пермского университета. Философия. Психология. Социология. 2019. Вып. 3. С.412-420.

19 Parsons H.M. What Happened at Hawthorne? // Science 1974; 183 (4128): p. 922-932.

Кривошеев Андрей Викторович – ведущий инженер-программист станков с ПУ, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: металлообработка.

Email: pro_milling@mail.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

THE PRINCIPLES OF SCIENTIFIC MANAGEMENT OF TAYLOR TAKING INTO ACCOUNT MODERN SCIENTIFIC DATA

Considered the publication The Principles of Scientific Management. An attempt was made to critically reconsider the examples given by Taylor more than a century ago, taking into

account modern regulatory documents and data from modern scientific publications from such different fields as biology, sport medicine, cardiology, rock climbing and even gynecology.

Keywords: Taylor, management, organization of manufacturing, lean manufacturing.

Krivosheev Andrei Viktorovich – leading engineer CNC programmer, JSC «Obukhovsky plant», St. Petersburg.

Research interests: metalworking.

ЭТАПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВНЕДРЕНИЯ КД В ЭЛЕКТРОННОМ ВИДЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ИЗГОТОВЛЕНИИ

Зуев К.В., Мокринский А.Б.

Рассматривается необходимость разработки конструкторской документации (КД) в электронном виде и процессы организации предоставления данных от конструкторов в электронном формате. Обсуждаются текущие проблемы и предлагаются решения, направленные на повышение эффективности разработки и внедрения КД в цифровом формате.

Ключевые слова: электронный формат разработки конструкторской документации; квалифицированная электронная цифровая подпись.

Введение

В условиях современной цифровизации производственные предприятия все активнее внедряют передовые технологии. Станки с числовым программным управлением (ЧПУ), 3D-принтеры и промышленные роботы требуют для своей работы 3D-модели, а не чертежи, представляющие собой аналоговую форму конструкторской документации. При составлении технического задания на разработку указывается требование к виду (в электронном или бумажном формате), в котором конструкторская документация должна быть представлена и сдана заказчику.

В настоящее время практически вся документация на изделия, разрабатываемые по заказу Министерства обороны, сдается в бумажном виде. Это связано со следующими проблемами:

- согласование разрабатываемой конструкторской документации и отсутствие квалифицированной цифровой подписи у исполнителя и заказчика;
- расчет стоимости разработки, выполняемый исходя из количества листов, приравненных к формату А1, комплекта конструкторской документации;
- недостаток компетенций в использовании систем автоматизированного проектирования (САПР);
- отсутствие нормативно-технической документации, определяющей порядок разработки конструкторской документации в электронном виде на предприятии;

Эти проблемы затрудняют переход на разработку КД в электронном виде и требуют комплексного подхода для их решения.

1 Внедрение САПР и PLM систем

Согласно [1], подлинник – это оформленный установленным образом электронный или бумажный конструкторский документ, предназначенный для получения с него дубликатов и копий. Подлинник должен быть подписан установленными подписями (собственноручными или электронными). Согласно [2], электронный документ включает в себя содержательную и реквизитную части. Формирование содержатель-

ной части электронного конструкторского документа осуществляется в специализированном программном обеспечении.

Для минимизации трудозатрат на настройку PLM системы, разнообразие САПР должно быть сведено к минимуму. Реквизитная часть может формироваться в PLM системе в результате завершения бизнес-процесса согласования. Если электронная документация не передается в сторонние организации, достаточно применения упрощенной электронной цифровой подписи.

В случае отсутствия возможности использования квалифицированной электронной цифровой подписи допускается выпуск удостоверяющего листа по ГОСТ Р 2.051-2023 [2]. PLM система может частично сократить трудозатраты отдела технической документации на предприятии и при разработке и согласовании конструкторской документации в электронном виде выполнять следующие функции:

- присвоение инвентарного номера;
- учет применяемости в изделиях;
- присвоение обозначения извещениям об изменениях;
- учет и хранение конструкторской документации и извещений об изменениях и причин их выпуска.

Необходимость формирования содержательной части электронного конструкторского документа обусловлена применением современного оборудования, которое не способно работать с аналоговым представлением конструкторского документа. Системы автоматизированного проектирования позволяют формировать в конструкторском документе параметры и атрибуты, которые впоследствии автоматизируют обработку данных.

2 Проблемы и их решения

2.1 Согласование документации и цифровая подпись

Одной из главных проблем при переходе на электронный формат КД является процесс согласования документации. В отсутствие квалифицированной электронной цифровой подписи, процесс утверждения и согласования документации затрудняется. Решение этой проблемы требует комплексного подхода:

- внедрение системы управления электронными документами. Эта система позволит отслеживать статус документов, управлять процессами согласования и обеспечивать их безопасность;
- обучение сотрудников и заказчиков использованию цифровой подписи. Необходимо организовать тренинги и семинары, чтобы повысить квалификацию сотрудников и заказчиков в области использования цифровой подписи;
- разработка и утверждение внутренних нормативных актов. Это обеспечит единообразие подходов к использованию цифровой подписи на предприятии.

2.2 Расчет стоимости разработки

Традиционный расчет стоимости разработки КД на основе количества листов, приравненных к формату А1, не соответствует реалиям электронного документооборота. Необходимо пересмотреть подходы к оценке трудозатрат и стоимости разработки:

- разработка новых методик оценки стоимости. Это могут быть методики, учи-

тывающие сложность проекта, количество элементов модели, временные затраты на создание 3D-модели и другие факторы;

- использование автоматизированных систем оценки. Такие системы могут автоматически рассчитывать стоимость разработки на основе заданных критериев и параметров.

2.3 Недостаток компетенций в использовании САПР

Многие предприятия сталкиваются с недостатком квалифицированных специалистов, способных работать с современными САПР. Решение этой проблемы требует долгосрочных усилий:

- организация курсов повышения квалификации и тренингов. Регулярное обучение сотрудников поможет им освоить новые технологии и повысить свою квалификацию;

- сотрудничество с образовательными учреждениями. Предприятия могут сотрудничать с университетами и колледжами для подготовки специалистов, отвечающих требованиям современной промышленности;

- внедрение систем наставничества. Опытные сотрудники могут выступать в роли наставников для новичков, помогая им быстрее освоить новые инструменты и технологии.

2.4 Отсутствие нормативно-технической документации

Отсутствие четких нормативно-технических требований затрудняет процесс перехода на электронный формат КД. Необходимо разработать и утвердить соответствующие стандарты и руководства:

- разработка внутренних стандартов и регламентов. Эти документы должны учитывать специфические особенности предприятия и обеспечивать единые подходы к разработке и согласованию КД в электронном виде;

- согласование стандартов с внешними организациями. Если предприятие взаимодействует с внешними контрагентами, необходимо согласовать внутренние стандарты с требованиями этих организаций;

- регулярное обновление нормативной базы. Технологии быстро развиваются, и нормативная база должна соответствовать современным требованиям.

3 Преимущества перехода на электронный формат КД

Переход на электронный формат разработки конструкторской документации имеет ряд значительных преимуществ:

- повышение точности и качества документации. Электронные документы позволяют более точно отображать геометрию изделий и их параметры, что снижает вероятность ошибок;

- ускорение процесса разработки и согласования. Использование электронных систем автоматизирует многие процессы, что позволяет существенно сократить время на разработку и согласование документации;

- снижение затрат на производство. Автоматизация процессов разработки и использования современных технологий позволяет снизить производственные затраты и повысить конкурентоспособность предприятия;

- улучшение взаимодействия между отделами и подразделениями. Электронный документооборот позволяет более эффективно обмениваться информацией между различными отделами предприятия;

- обеспечение безопасности и сохранности данных. Электронные документы могут быть защищены от несанкционированного доступа, а также легко восстанавливаются в случае утраты.

4 Процесс реализации перехода к разработке КД в электронном виде

В 2024 году АО «Обуховский завод» в рамках реализации концепции перехода на КД в электронном виде приступил к реализации дорожной карты проектов (рисунок 1) в рамках бережливого производства.



Рисунок 1 – Дорожная карта проектов использования КД в электронном виде

В рамках проекта «Согласование конструкторской документации в электронном виде в АО «Обуховский завод»» были разработаны в САПР Компас 3D, согласованы и поставлены на учет в информационной системе Лоцман:PLM (рисунок 2) комплекты ЭКД на 3 изделия. Проект позволил произвести упреждающую закупку и приступить к изготовлению до утверждения полного комплекта КД. Одновременно с этим решался вопрос по предварительному согласованию КД с технологическими службами предприятия, проблематика которого изложена в научной статье Кривошеева А.В. [3] и ярко проявлялась на предприятии.

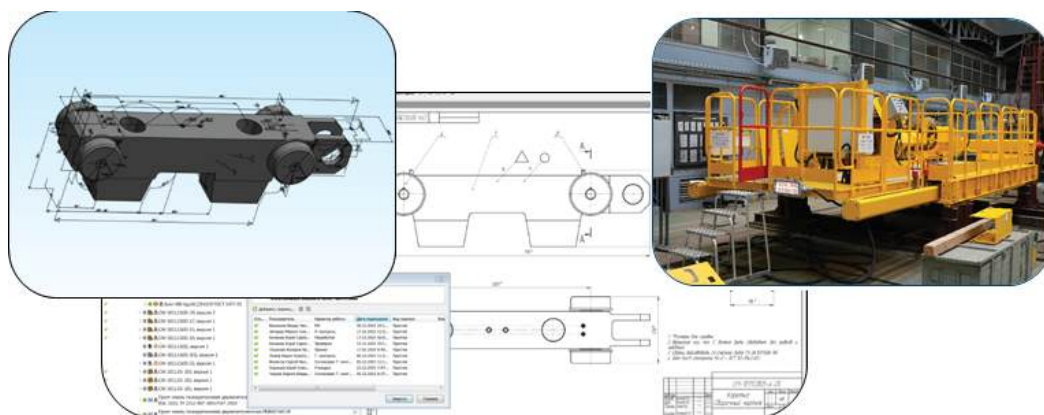


Рисунок 2 – Разработка ЭКД, согласование, изготовление

В рамках проекта была проведена работа по наполнению баз данных нормативно-справочной информации на базе Полином:MDM (рисунок 3), а также был разработан оптимальный бизнес-процесс согласования КД в информационной системе Лоцман:PLM (рисунок 4).

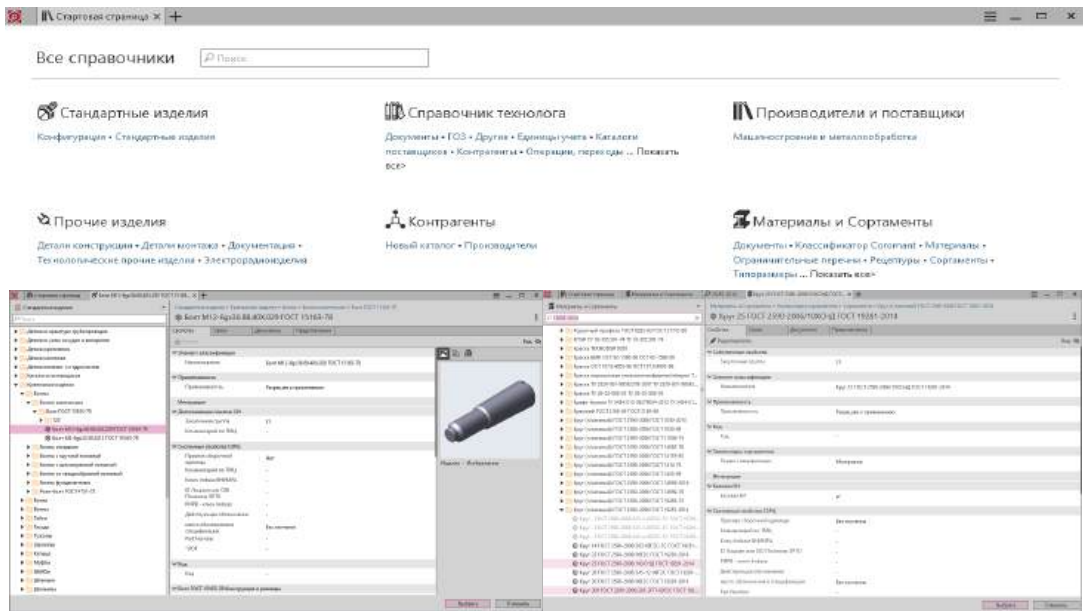


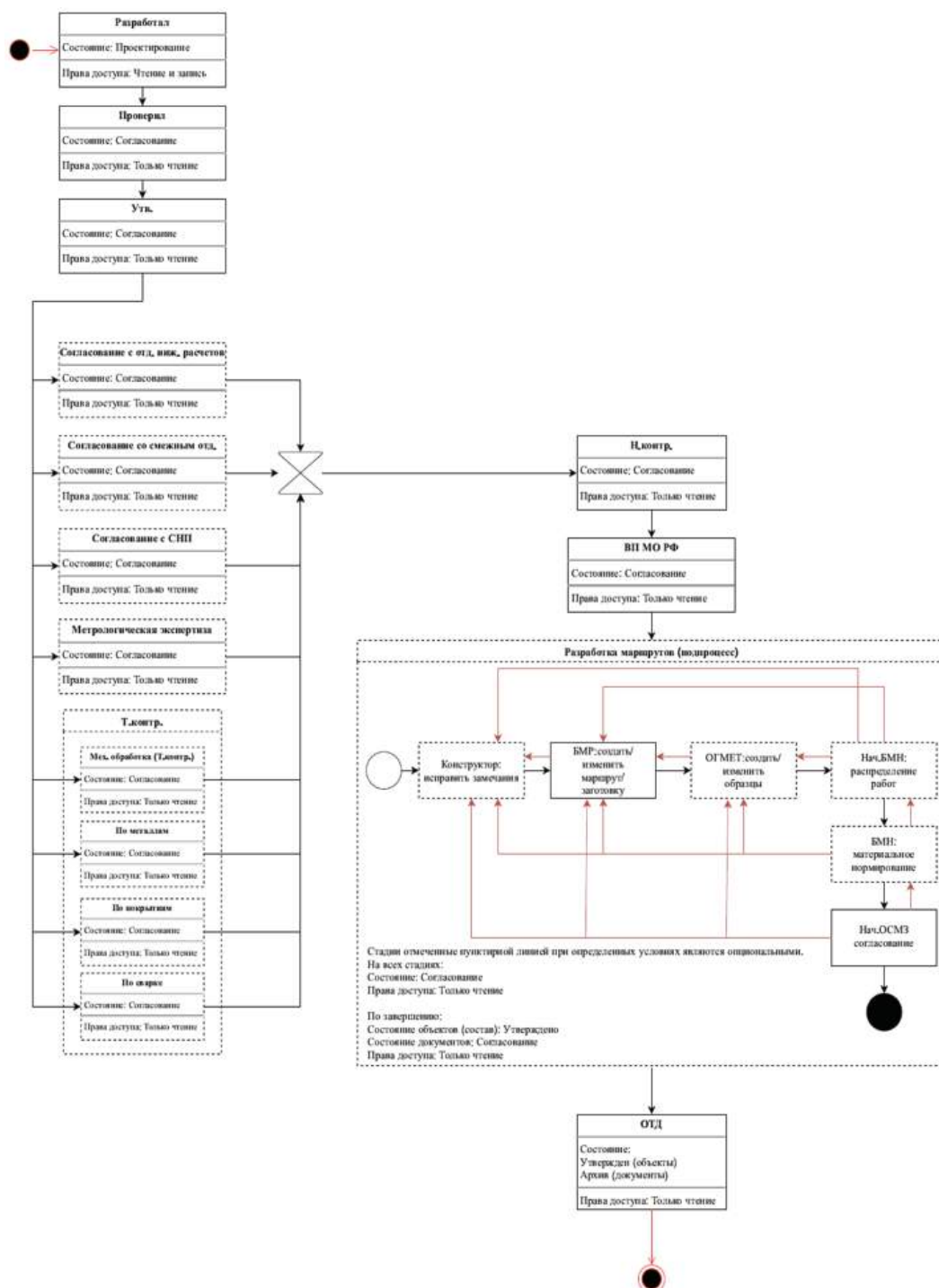
Рисунок 3 – База данных НСИ Полином:MDM

Благодаря реализации мероприятий в области БП удалось сократить среднее время цикла согласования КД на 14,5 часов или 81%, удалось исключить использование бумаги при согласовании КД на 100%.

Результаты проекта «Согласование конструкторской документации в электронном виде в АО «Обуховский завод»» отражены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Исходные данные

Наименование затрат	ДО реализации проекта	ПОСЛЕ реализации проекта	Изменение %
Количество изделий, ед.	3,0	3,0	0,00%
Минимальное время цикла согласования КД, часов	9,9	3,3	-67,23%
Максимальное время цикла согласования КД, часов	25,9	3,6	-86,17%
Среднее значение времени цикла согласования КД, часов	17,9	3,4	-80,93%
Объем выпущенной КД, листов А1:	935,0	0,0	-100,00%
Изделие 1 – 510А1	510,0	0,0	-100,00%
Изделие 2 – 340А1	340,0	0,0	-100,00%
Изделие 3 – 85А1	85,0	0,0	-100,00%



Примечание:

1. Этапы, отмеченные пунктиром являются опциональными (выбираются пользователем при запуске бизнес-процесса).
2. Если не оговорено особо, то возврат с любого этапа осуществляется на этап "Разработал".
3. С этапа "ОТД" возврат не предусмотрен. Исправление данных только через выпуск изменения/извещения.
4. Документы на этапах "Разработал", "Проверил", "Утв.", "Н.контр.", "ВП МО РФ", "ОТД" подписываются электронной подписью. Остальные этапы - ставится отметка о согласовании, электронная подпись не используется.
5. На этапе "ОТД" автоматически дополняется вторичное представление документов реквизитами (ФИО подписантов, инв.№ и т.п.)

Рисунок 4 – Схема бизнес-процесса согласования, утверждения и постановки на учет ЭКД

Т а б л и ц а 2 – Оценка финансово-экономического эффекта

Финансово-экономический эффект	Значение за расчетный год
Реальный ожидаемый финансово-экономический результат:	
Дополнительная выручка АО «Обуховский завод»	13 421 389,4 руб.
Сокращение административно-управленческих затрат	1 722 192,5 руб.
Итого финансово-экономический эффект	15 143 581,9 руб.

Заключение

Переход на электронный формат разработки конструкторской документации является важным этапом цифровизации производственных предприятий. Внедрение САПР и PLM систем позволяет не только оптимизировать процесс создания и согласования КД, но и повысить эффективность использования современных производственных технологий. Решение текущих проблем и реализация предложенных мер помогут предприятиям успешно адаптироваться к новым требованиям и улучшить свою конкурентоспособность на рынке.

Для успешной реализации перехода на электронный формат КД необходимо:

- разработать и внедрить систему управления электронными документами;
- обучить сотрудников и заказчиков использованию цифровой подписи;
- пересмотреть методики оценки стоимости разработки КД;
- организовать курсы повышения квалификации и тренинги для сотрудников;
- сотрудничать с образовательными учреждениями для подготовки специалистов;
- разработать и утвердить внутренние стандарты и регламенты;
- согласовать внутренние стандарты с внешними организациями;
- регулярно обновлять нормативную базу в соответствии с современными требованиями.

Преимущества перехода на электронный формат КД включают повышение точности и качества документации, ускорение процессов разработки и согласования, снижение затрат на производство, улучшение взаимодействия между отделами и обеспечение безопасности данных. Эти преимущества способствуют повышению общей эффективности и конкурентоспособности производственных предприятий в условиях современной цифровой экономики.

Таким образом предложено и реализовано организационно-техническое решение, которое позволяет снизить на 81% временные затраты при согласовании и на 100% исключить использование бумаги при разработке КД.

Литература

1 ГОСТ Р 2.005-2023 Единая система конструкторской документации. Термины и определения.

2 ГОСТ Р 2.051-2023 Единая система конструкторской документации. Электронная конструкторская документация.

3 Кривошеев А.В. Обоснование необходимости применения электронных моделей деталей в документообороте // Радионавигация и время. 2023. №13(21). 72 с.

Зув Константин Викторович – начальник отдела 3D-моделирования и информационного сопровождения производства, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: информационные системы, САПР, 3D-моделирование.
E-mail: constantin29rus@yandex.ru

Мокринский Андрей Богданович – начальник конструкторского комплекса по сопровождению производства – главный конструктор, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: информационные технологии, сопровождение производства, оптимизация процессов.
E-mail: okspgoz@goz.ru

STAGES OF ORGANIZATION OF THE IMPLEMENTATION OF CONSTRUCTION DOCUMENTATION IN ELECTRONIC FORM DURING DEVELOPMENT AND MANUFACTURING

The necessity of developing construction documentation in electronic form and the processes of organizing the provision of data form designers in electronic format are considered. The current problems are discussed and solutions are proposed aimed at improving the efficiency of development and implementation of construction documentation in digital format.

Keywords: electronic form of the development of construction documentation, qualified electronic digital signature.

Zuev Konstantin Viktorovich – head of the department of 3D-modeling and information support of production.
Research interests: information systems, CAD, 3D-modeling.

Mokrinskiy Andrey Bogdanovich – head of the construction complex for product support - chief constructor.
Research interests: information technologies, product support, streamlining processes.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

Тихонов С.И., Витязев С.В.

В работе рассматривается применение методов сверхразрешения для анализа спектра вторичной модуляции в задаче распознавания воздушных радиолокационных целей с турбореактивным двигателем. Предлагается использование декомпозиционных методов сверхразрешения для обнаружения и измерения частот гармонических компонент в сигнале турбинной модуляции. Описывается способ распознавания воздушных радиолокационных целей на основе методов сверхразрешения, приводятся результаты компьютерного моделирования предложенного метода.

Ключевые слова: радиолокация; распознавание целей; вторичная модуляция; турбинный эффект; сверхразрешение; декомпозиционные методы; алгоритм *MUSIC*; метод собственных векторов; алгоритм *rootmusic*

Введение

В современных условиях на бортовые радиолокационные станции (БРЛС) возлагается широкий спектр задач. Одной из них является распознавание класса и типа наблюдаемой воздушной цели. Информация о принадлежности цели к конкретному типу может быть использована на всех этапах обработки радиолокационного сигнала: начиная от выявления ложных целей, заканчивая выбором оптимальных параметров слежения за целью [1].

Системы радиолокационного распознавания могут строиться на основе различных измеряемых признаков целей. Часто в литературе встречается разделение признаков целей на траекторные и сигнальные. Траекторные признаки характеризуют движение цели: скорость и высоту полета, ускорение, траекторию и т.п. Признаки из этой категории формируются на этапе вторичной обработки радиолокационной информации. Сигнальные признаки, напротив, могут формироваться при первичной обработке. К сигнальным признакам радиолокационных целей относят: поляризационные портреты целей, дальностные портреты целей, спектр турбинной модуляции и другие [1]. Далее в работе будет рассматриваться распознавание целей по спектру турбинной модуляции.

1 Турбинная модуляция

Турбинная модуляция является частным случаем вторичной модуляции радиолокационного сигнала. Под вторичной модуляцией понимается дополнительная модуляция зондирующего сигнала, возникающая в процессе его взаимодействия с целью. Одной из причин возникновения вторичной модуляции является наличие у цели подвижных частей [2]. Например, за счет вращения радиальная скорость сближения с

лопастью вертолета значительно превосходит скорость сближения с его корпусом, за счет чего в спектре сигнала появляются дополнительные компоненты, разнесенные по частоте.

Под турбинной модуляцией понимают появление дополнительных компонент в спектре сигнала, возникающих при отражении зондирующего сигнала от лопаток турбореактивного двигателя самолета. Основные компоненты спектра при турбинной модуляции возникают из-за отражения сигнала от первых двух ступеней компрессора низкого давления турбореактивного двигателя. Каждая такая ступень представляет собой ротор с установленными на нем N_k лопатками, где k – номер ступени компрессора. В связи с тем, что у большинства турбореактивных двигателей установлен один общий ротор, обе ступени вращаются с одной частотой вращения Ω . В случае облучения цели гармоническим сигналом в отраженном сигнале появятся дополнительные компоненты, положение которых определяется в соответствии с выражением [3]

$$F_m = \pm p_{1,m} N_1 \Omega \pm p_{2,m} N_2 \Omega, \quad (1)$$

где $p_{k,m}$ – число переотражений от k -ой ступени компрессора низкого давления;
 m – номер компоненты спектра.

Так как частоты в спектре принятого сигнала зависят от параметров двигателя цели, на основе полученного спектрального портрета возможно строить систему распознавания целей. Чем больше количество учитываемых переотражений, тем детальнее становится спектральный портрет цели. С ростом числа переотражений значительно падает мощность принимаемых гармоник, из-за чего на практике при распознавании турбореактивных самолетов достаточно учитывать не более трех переотражений от первой ступени и двух от второй ступени.

Для обеспечения заданного качества распознавания по спектру турбинной модуляции необходимо обеспечивать обнаружение и измерение положения частот в спектре сигнала с высокой точностью. Для решения данных задач на практике широко используются методы на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). При использовании БПФ, как для повышения характеристик обнаружения, так и для повышения разрешения по частоте требуется увеличение длительности накопления сигнала. Однако большое время накопления может не только ограничивать возможности применения системы радиолокационного распознавания при многоцелевой обстановке, но также может негативно влиять на точность распознавания из-за нестационарного характера цели. Для решения данной проблемы предлагается использовать декомпозиционные методы сверхразрешения.

2 Декомпозиционные методы сверхразрешения

Методами сверхразрешения называют алгоритмы спектрального оценивания, которые обеспечивают лучшее частотное разрешение, по сравнению с преобразованием Фурье, при фиксированной длительности сигнала. Это становится возможным благодаря использованию в процессе анализа априорной информации о структуре анализируемого сигнала.

В рассматриваемой задаче распознавания цели по спектру турбинной модуляции ожидается что при зондировании цели пачкой когерентных радиоимпульсов спектр сигнала будет содержать K гармонических составляющих. Ожидаемое число гармоник в сигнале можно использовать на этапе оценки спектра сигнала.

Известно достаточно много методов сверхразрешения, основанных на предположении, что анализируемый сигнал является суммой нескольких гармоник на фоне шума, в том числе декомпозиционные методы сверхразрешения, о которых речь пойдет далее. Декомпозиционные методы сверхразрешения основываются на разложении ковариационной матрицы сигнала на набор собственных векторов и собственных значений сигнала с последующим их анализом. В частности, к данной группе методов относятся алгоритмы *MUSIC* (*Multiple Signal Classification*), *rootmusic* и метод собственных векторов. Рассмотрим данные алгоритмы подробнее.

2.1 Алгоритм *MUSIC*

Алгоритм *MUSIC* основан на представлении сигнала в виде известного числа гармонических компонент и аддитивного белого гауссовского шума. Алгоритм выполняется в четыре этапа [4].

Этап 1. Оценка ковариационной матрицы накопленного сигнала

$$\mathbf{R}_x = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)], \quad (2)$$

где $\mathbf{x}(t)$ – вектор, составленный из M последовательных отчетов сигнала;

$(\bullet)^H$ – операция эрмитова сопряжения;

$E[\bullet]$ – оператор усреднения по времени.

Размер полученной оценки ковариационной матрицы равен параметру M и должен быть выбран больше ожидаемого числа гармонических компонент в сигнале K .

Этап 2. Разложение полученной оценки ковариационной матрицы на наборы собственных векторов $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_M$ и собственных значений $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$. Собственные векторы образуют базис, т.е. на данном этапе выполняется разложение принятого сигнала на M ортогональных компонент.

Этап 3. Разделение собственных векторов на два подпространства. К сигнальному подпространству относятся K собственных векторов, соответствующих наибольшим собственным значениям. К шумовому подпространству относятся оставшиеся $M - K$ векторов, соответствующие белому шуму.

Этап 4. Оценка псевдоспектра сигнала

$$PS_{MUSIC}(f) = \frac{1}{\mathbf{e}^H(f)(\sum_{k=N+1}^M \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H) \mathbf{e}(f)}, \quad (3)$$

где $\mathbf{e}(f) = [1 \quad e^{i2\pi f} \quad e^{i4\pi f} \quad \dots \quad e^{i(M-1)2\pi f}]^T$ – анализирующий вектор;

f – частота, на которой оценивается значение псевдоспектра.

Название «псевдоспектр» объясняется тем, что результат выражения (3) не сохраняет информацию об амплитудах гармонических составляющих. Пики псевдоспектра соответствуют нулям в спектре шума, которые в свою очередь соответствуют частотам на сигнальных компонент. При этом оценка положения нулей в спектре может быть выполнена с точностью лучшей, чем при оценке положения частот при БПФ. За счет этого достигается и эффект сверхразрешения.

2.2 Метод собственных векторов

Метод собственных векторов реализуется аналогично *MUSIC*, за исключением способа оценки псевдоспектра, при которой, помимо собственных векторов, используются также собственные значения ковариационной матрицы

$$PS_{EV}(f) = \frac{1}{e^H(f) \left(\sum_{k=N+1}^M \frac{1}{\lambda_k} v_k v_k^H \right) e(f)}. \quad (4)$$

2.3 Алгоритм *rootmusic*

Алгоритм *rootmusic* применяется для более точного поиска нулей знаменателя выражения (3). Для этого после расчета псевдоспектра по алгоритму *MUSIC* выполняются три дополнительных шага:

- генерация полинома из соответствующего псевдоспектра

$$PS(z)^{-1} = 0; \quad (5)$$

- вычисление нулей полинома (5) внутри единичной окружности комплексной плоскости;

- выбор K нулей полинома (5), расположенных ближе всего к единичной окружности и пересчет их значений в частоты.

Алгоритм *rootmusic* обеспечивает большую точность оценки частоты гармонических составляющих в сигнале по сравнению с исходным алгоритмом *MUSIC* [5]. При этом результатом работы алгоритма являются только значения частот, информация об амплитудах гармоник отсутствует.

3 Алгоритм распознавания

Существуют различные способы распознавания воздушных радиолокационных целей по спектру турбинной модуляции. В данной работе используется алгоритм распознавания, основанный на методе, описанном в [3]. Основные этапы процедуры распознавания:

- оценка частоты вращения ротора турбореактивного двигателя Ω' . Для этого используется разность частот между двумя гармоническими компонентами с наибольшими амплитудами;

- на основе полученной оценки Ω' по выражению (1) рассчитывается ожидаемый портрет цели F ;

- привязка результатов оценки частотного состава спектра Y сигнала к ожидаемому портрету цели F и отбрасывание непривязанных компонент из обоих векторов

- расчет матрицы дисперсий ошибок D , с учетом того какие частоты были привязаны к портрету на шаге 3.

- расчет отношения правдоподобия для выдвинутой гипотезы о типе цели

$$W(Y, F) = (2\pi)^{I/2} |D|^{I/2} e^{-0.5(Y-F)^T D^{-1}(Y-F)}; \quad (6)$$

- повтор пунктов предыдущих этапов для различных гипотез о типе цели;

- выбор гипотезы, для которой значение выражения (6) оказалось наибольшим.

4 Описание эксперимента

Исследование эффективности предлагаемой процедуры распознавания проводилось путем компьютерного моделирования.

На первом этапе моделирования выполнялась генерация сигнала фиксированной длительности, соответствующего турбинной модуляции когерентной пачки радиоимпульсов. Затем к полученному сигналу добавлялась реализация белого гауссовского шума с фиксированным отношением сигнал/шум.

На втором этапе выполнялась предварительная обработка сигнала. Предварительная обработка заключалась в переносе сигнала на нулевую частоту, ограничении полосы частот в соответствии с ожидаемой шириной спектра турбинной модуляции и приведении частоты дискретизации сигнала к ширине анализируемой полосы.

На третьем этапе выполнялась оценка частот гармоник, присутствующих в сигнале. Для этого использовались БПФ, MUSIC и метод собственных векторов с пороговым обнаружителем, а также алгоритм *rootmusic*.

Так как для алгоритма распознавания нужны значения не только частот сигнала, но и амплитуды, для алгоритмов сверхразрешения на этом этапе дополнительно выполнялась оценка амплитуд гармоник с помощью дискретного преобразования Фурье на частотах, соответствующих обнаруженным.

На четвертом этапе выполнялась процедура распознавания типа цели, описанная в разделе 3.

Данная процедура моделирования выполнялась для трех различных типов целей с турбореактивным двигателем. Для каждой длительности сигнала и отношения сигнал/шум моделирование проводилось с использованием 500 реализаций белого гауссовского шума.

5 Результаты моделирования и выводы

Результаты имитационного моделирования приведены на рисунках 1 и 2. На рисунке 1 приведены зависимости вероятности правильного распознавания типа цели от длительности накопления сигнала при ОСШ 15 дБ (слева) и 20 дБ (справа). На рисунке 2 приведены зависимости вероятности правильного распознавания типа цели от ОСШ при количестве накопленных отсчетов сигнала 2000 (слева) и 3000 (справа).

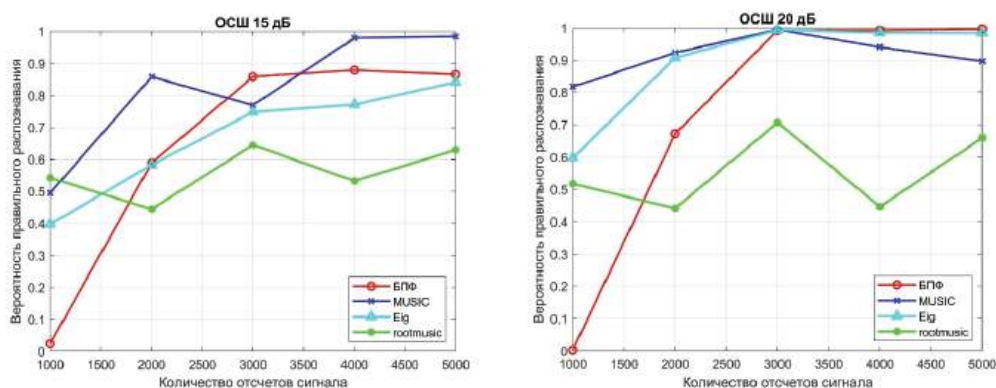


Рисунок 1 – Зависимости правильного распознавания типа цели от количества накопленных отсчетов сигнала

Как видно из приведенных зависимостей, применение декомпозиционных методов сверхразрешения при оценке параметров спектра вторичной модуляции может повысить вероятность распознавания воздушных радиолокационных целей с турбореактивным двигателем. Данный выигрыш позволяет применять систему распознавания в условиях, когда отсутствует возможность накопления сигналов большой длительности.

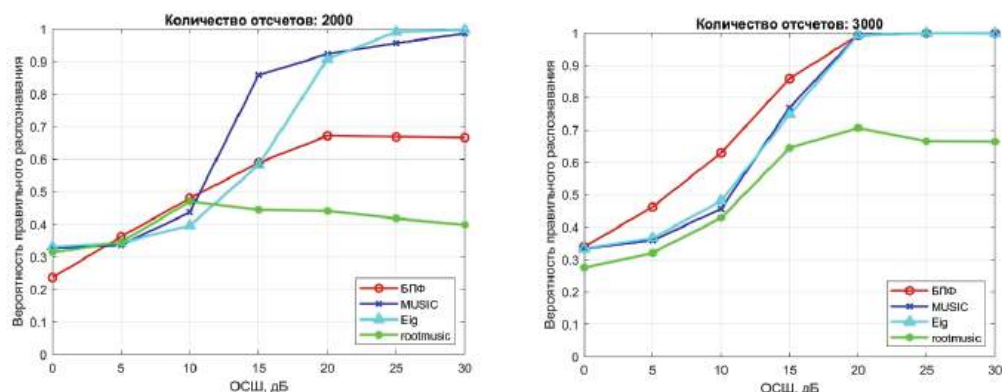


Рисунок 2 – Зависимости правильного распознавания типа цели от ОСШ

При увеличении длительности накопления сигнала лучшую точность показывает метод на основе БПФ. Так как процедура расчета БПФ требует гораздо меньших вычислительных затрат, по сравнению с рассмотренными методами сверхразрешения, использование методов сверхразрешения целесообразно только при малом числе накапливаемых отсчетов сигнала.

Также следует отметить, что процедуры распознавания целей на основе MUSIC и метода собственных векторов более чувствительна к изменению ОСШ, по сравнению с процедурой на основе БПФ.

Литература

- 1 Бердышев В. П. и др. Распознавание классов и типов воздушных объектов по двумерным радиолокационным изображениям в обзорной РЛС // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2019. № 1. С. 18-29.
- 2 Слюсарь Н. М. Вторичная модуляция радиолокационных сигналов динамическими объектами. Смоленск: ВА ВПВОВС РФ. 2006.
- 3 Надточий В.Н. и др. Алгоритм распознавания типа воздушной цели с турбореактивным двигателем на основе модуляционных признаков // Радиотехника. 2018. №3. С. 101-106.
- 4 Marple Jr S. L. Digital Spectral Analysis. Нью-Йорк: Courier Dover Publications. 2019.
- 5 Foutz J., Spanias A., Banavar M. K. Narrowband direction of arrival estimation for antenna arrays // Synthesis Lectures on Antennas. 2008. Т. 3. №. 1. С. 1-76.

Тихонов Станислав Игоревич – аспирант, АО «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В.Тихомирова».

Область научных интересов: сверхразрешение, распознавание радиолокационных целей, спектральный анализ, цифровая обработка сигналов.

Email: stas366778@yandex.ru

Витязев Сергей Владимирович – к.т.н., доцент, АО «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В.Тихомирова».

Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, сигнальные процессоры, радиовидение.

Email: vityazev.s.v@tor.rsreu.ru

Почтовый адрес: 140180, г. Жуковский, ул. Гагарина, 5 «Б».

USING SUPER-RESOLUTION METHODS BASED ON THE ANALYSIS OF NATURAL MEASUREMENTS IN DETECTING RADAR TARGETS

The work uses a method for applying super-resolution methods to analyze cyclic modulations in the problem of searching for airborne radar targets with a turbojet engine. The use of super-resolution decomposition methods is proposed to detect and measure frequency harmonic components in a turbine modulation signal. On the conclusion of the method of occurrence of airborne radar targets based on super-resolution methods, with certain computer results of the proposed method.

Key words: radar; target recognition; secondary modulation; turbine effect; super resolution; decomposition methods; MUSIC algorithm; eigenvector method; rootmusic algorithm.

Tikhonov Stanislav Igorevich – graduate student, JSC «Research Institute of Instrument Engineering named after V.V.Tikhomirov», Zhukovsky.

Research interests: super-resolution, radar target recognition, spectral analysis, digital signal processing

Vityazev Sergey Vladimirovich - Ph.D., Associate Professor, JSC «Research Institute of Instrument Engineering named after V.V.Tikhomirov», Zhukovsky.

Research interests: digital signal processing, signal processors, radiovision.

УДК 621.396.67(621.37)

РАЗРАБОТКА ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО БЛОКА АНТЕННОГО ДЛЯ АППАРАТУРЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Башкетов А.А.

Представлены материалы по разработке приёмо-передающего блока антенного, применяемого в аппаратуре постановки помех. Приведены результаты моделирования с помощью САПР. Изобретение призвано решить проблему, состоящую в том, что известные технические решения при конструктивном исполнении в пределах геометрических размеров защищаемого объекта, не позволяют фокусировать излучаемую энергию в направлении полета высокоскоростного летательного аппарата (ЛА), а конструктивное исполнение антенных систем, выходящих за геометрические размеры ЛА, отрицательно влияют на аэродинамические характеристики.

Ключевые слова: антенна вытекающей волны; антенна поверхностных волн; широкополосная антенна; линейная и круговая поляризация; диэлектрическая проницаемость; коэффициент усиления.

Введение

Современная бортовая аппаратура радиотехнической защиты, устанавливаемая на борт высокоскоростных ЛА, должна учитывать тактико-технические характеристики систем противовоздушной обороны противника. Радиотехническая защита высокоскоростных летательных аппаратов осуществляется путем постановки помех средствам обнаружения, сопровождения и поражения противника. Основные параметры, которые необходимо учитывать при разработке аппаратуры радиотехнической защиты – это частотный диапазон вышеуказанных средств, модель их воздействия, а также величину энергопотенциала, требуемого для получения заданного коэффициента подавления.

В настоящей работе рассматриваются

- основные требования, накладываемые на разработку блоков антенных;
- моделирование блоков антенных с помощью САПР;
- сравнение характеристик разработанных блоков антенных с ранее применяемыми в аппаратуре радиотехнической защиты.

1 Приемо-передающий блок антенный для аппаратуры постановки помех

Стоит отметить, что ранее применяемые в аппаратуре радиотехнической защиты высокоскоростных летательных аппаратов антенные блоки имеют требуемые электродинамические характеристики только в рабочем диапазоне частот зональной ПВО вероятного противника и не обеспечивает требуемые характеристики в рабочем диапазоне частот объектовой ПВО [1]. Также в различных конструктивах антенных блоков присутствует проблема, когда отдельные элементы возвышаются над поверхностью ЛА и при высокой скорости движения ЛА на крайне высокой частоте переда-

ча и прием командных сигналов для формирования сигналов помех имеют низкие параметры приема и излучения.

С учетом этих замечаний согласно техническому заданию на разработку к разрабатываемому антенному блоку, предъявляются следующие требования:

- диапазоны рабочих длин волн: сантиметровый;
- КСВН – не более 1.8 в двух рабочих поддиапазонах частот;
- сектора работы – согласно заданной модели работы систем обнаружения и сопровождения противника;
- коэффициент усиления – не менее 4 дБ в двух рабочих поддиапазонах частот;
- направление излучения – вдоль объекта носителя;
- блок должен быть герметичен;
- формирование максимума ДН совпадает с направлением оси излучателя.

Размещение, предполагающие отсутствие выступающих частей блока антенного за поверхность объекта носителя, наложило на конструктив разработанного антенного блока некоторые ограничения, с учетом которых разработанный блок антенный состоит из антенного устройства и обтекателя.

Антенное устройство включает в себя несколько фрагментов классических видов антенн таких как:

- щелевая антенна;
- линзовая антенна;
- антенна поверхностной волны.

Такой конструктив при проектировании антенных устройств ранее не использовался. Широкополосность блока антенного обеспечивается использованием особенной структуры несимметричного штыревого вибратора, полученной в результате решения задачи оптимизации характеристик разрабатываемого устройства [2].

Для формирования ДН в требуемых секторах в конструкцию блока антенного на выходе резонатора введена диэлектрическая вставка особой формы из АБС-пластика, размеры и форма которой получены в результате решения задачи оптимизации (максимизации целевого параметра - коэффициента усиления в требуемом рабочем секторе)

На рисунке 1 представлена имитационная модель разработанного приемопередающего блока антенного.

На рисунке 2 показан блок антенный в разрезе.

На рисунке 3 показан общий вид приемопередающего блока, размещенный на объекте-носителе.

На рисунках 1-3 введены обозначения:

1. Металлический лоток.
2. Обтекатель антенны.
3. Волновод.
4. Верхняя часть волновода.
5. Возбуждающий элемент.
6. Разъем
7. Диэлектрическая вставка.

Блок антенный содержит металлический лоток 1 с обтекателем 2 (рисунок 1), на основании металлического лотка 1 расположен волновод 3, верхняя часть которого 4 соединена с диэлектрической вставкой 7 из АБС-пластика.

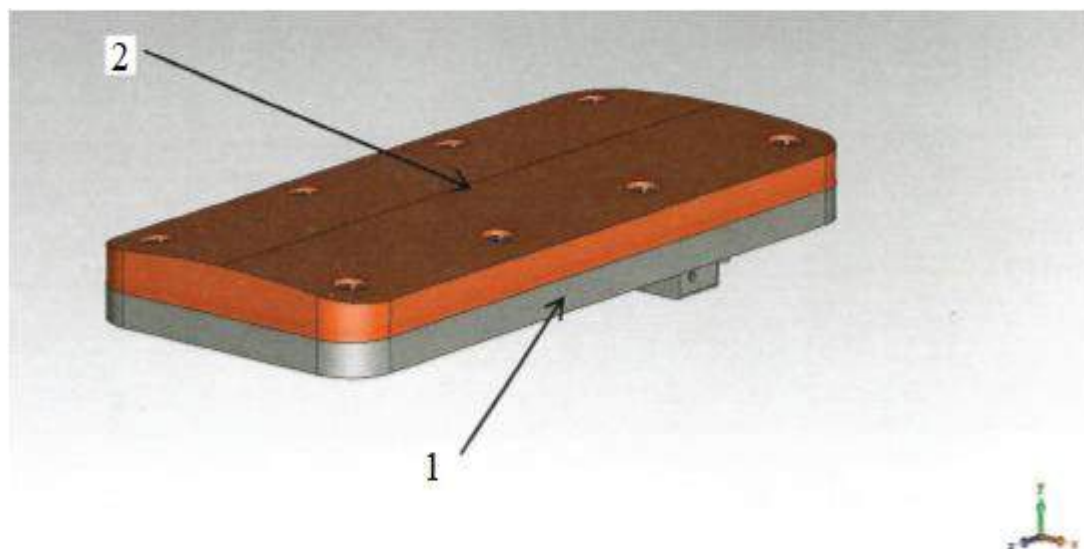


Рисунок 1 – Имитационная модель разработанного приемо-передающего блока антенного

В волновод 3 введено устройство возбуждения с возбуждающим элементом 5, припаянным к электрическому соединителю – разъему 6, обеспечивающему коммутацию с фидерным трактом (рисунок 2).

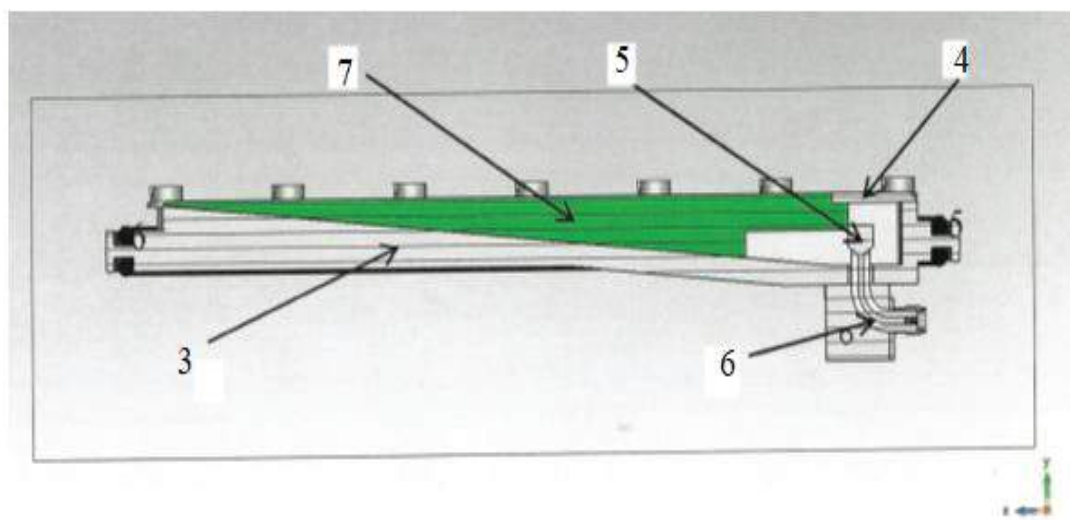


Рисунок 2 – Схема разработанного приемо-передающего блока антенного в разрезе

Блок антенный расположен на высокоскоростном ЛА таким образом, что крышка металлического лотка 2 является обтекателем антенного блока и не выступает над поверхностью корпуса высокоскоростного ЛА (рисунок 3).

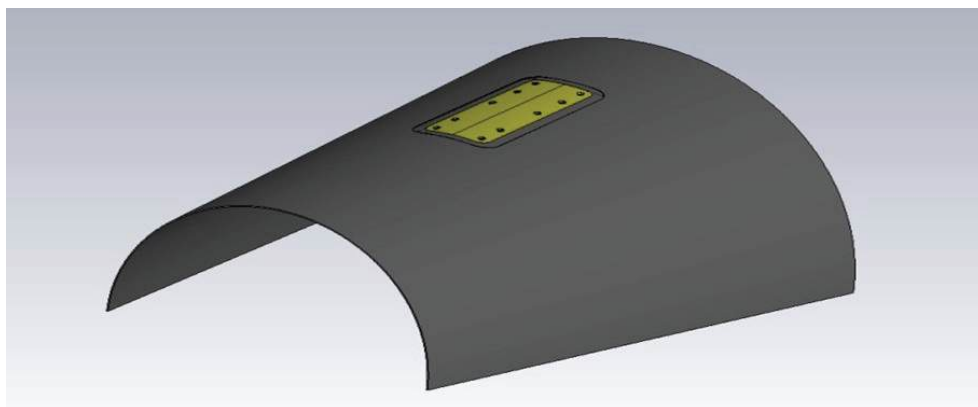


Рисунок 3 – Расположение блока антенного на объекте носителе

Разработанный антенный блок не выступает за поверхность объекта носителя, тем самым не оказывает влияния на аэродинамические характеристики. По сравнению с ранее применяемыми блоками антенными можно выделить следующие улучшения:

- обеспечена герметичность разработанного блока антенного;
- увеличен коэффициент усиления в требуемых поддиапазонах рабочих частот;
- снижен КСВН;
- уменьшены массогабаритные показатели антенных блоков

2 Сравнение основных электродинамические характеристики ранее применяемых и разработанного блока антенного в сравнении по основным параметрам, заданным в ТЗ

В связи с тем, что некоторые параметры разрабатываемого блока антенного содержат сведения, содержащие государственную тайну, введем следующие условные обозначения.

- 1 рабочий поддиапазон: $x+0.6 \div y-6.2$ ГГц;
- 2 рабочий поддиапазон: $x+4.4 \div y-1.2$ ГГц.

На рисунке 4 представлен график зависимости КСВН от частоты.

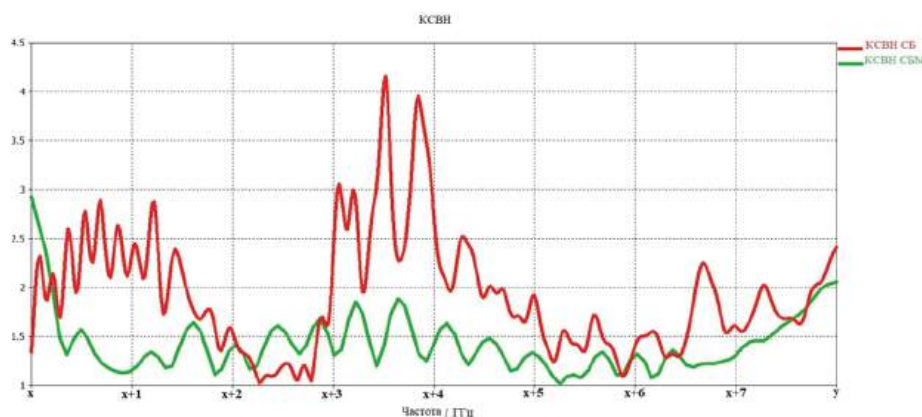


Рисунок 4 – График зависимости КСВН от рабочей частоты

Диаграмма направленности для ранее применяемого и разработанного блоков антенных на средней частоте в каждом поддиапазоне рабочих частот представлены на рисунках 5 – 6.

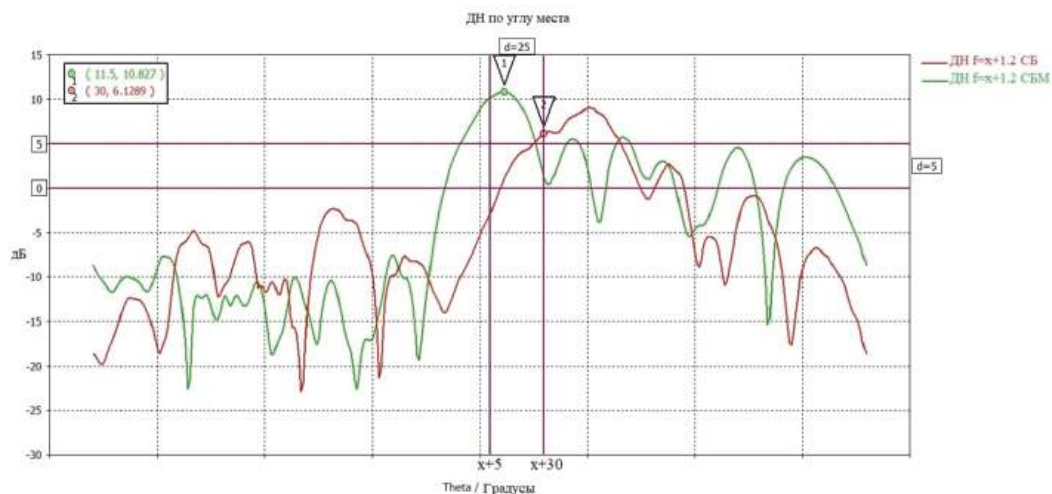


Рисунок 4 – Диаграмма направленности в требуемом секторе на средней частоте первого поддиапазона

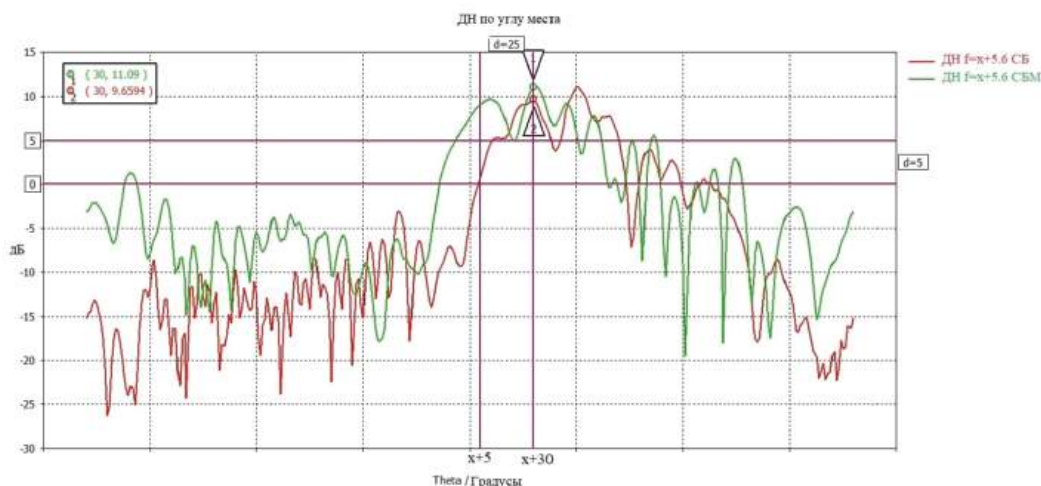


Рисунок 5 – Диаграмма направленности в требуемом секторе на средней частоте второго поддиапазона

Заключение

В результате проделанной работы разработан блок антенный, характеристики которого (таблица 1) на 128 % превосходят применяющийся.

Он обладает повышенным коэффициентом усиления, меньшим значением КСВН в двух рабочих поддиапазонах частот. Также разработанный блок отмечается меньшими массогабаритными характеристиками и обладает герметичностью.

Правильность конструктивного решения подтверждена натурными измерениями.

Т а б л и ц а 1 – Данные сравнения основных характеристик ранее применяемых и модернизированных блоков антенных

Характеристики блоков антенных	Тип блока антенного	Разработанный блок антенный	Блок антенный ранее применяемый	Эффективность разработанного блока антенного относительно ранее применяемого, %
КСВН в 1 поддиапазоне		не более 1,72	Не более 2,82	66
КСВН во 2 поддиапазоне		не более 1,55	Не более 2,32	52
КУ в максимуме ДН на частоте $f_{н1}$, дБ		10,3	3,1	410
КУ в максимуме ДН на частоте $f_{с1}$, дБ		10,9	6,1	195
КУ в максимуме ДН на частоте $f_{в1}$, дБ		9,4	6,2	109
КУ в максимуме ДН на частоте $f_{н2}$, дБ		11,7	8,3	91
КУ в максимуме ДН на частоте $f_{с2}$, дБ		11,1	9,65	40
КУ в максимуме ДН на частоте $f_{в2}$, дБ		11,4	8,05	116
Герметичность		Есть	Нет	+

Литература

1 Ненартович Н.Е., Горевич Б.Н. BMDS – система противоракетной обороны США. Анализ и моделирование. М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2020. 352 с.

2 Ротхамель К. Антенны. М.: Данвель, 2005. 414 с.

Башкетов Александр Александрович – аспирант, начальник сектора, АО «ЦНИРТИ

им. академика А.И.Берга», г. Москва.

Область научных интересов: радиоэлектронная борьба, радиоэлектронные системы.

Email: Alexandr00006@yandex.ru

Почтовый индекс: 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, 20/9.

DEVELOPMENT OF AN ANTENNA RECEIVING AND TRANSMITTING UNIT FOR RADIO PROTECTION EQUIPMENT.

The report presents materials on the development of an antenna receiving and transmitting unit used in jamming equipment. The results of CAD modeling are presented. The invention is intended to solve the problem that known technical solutions, when designed within the geometric dimensions of the protected object, do not allow the radiated energy to be focused in the direction of flight of a high-speed aircraft (LA), and the design of antenna systems

that go beyond the geometric dimensions of the aircraft negatively affect the aerodynamic characteristics.

Keywords: outflow wave antenna; surface wave antenna; broadband antenna; linear and circular polarization; dielectric constant, gain factor.

Bashketov Alexandr Alexandrovich – postgraduate student, the head of the sector, JSC «Central Scientific Research Radio Engineering Institute named after Academician A.I.Berg».

Research interests: electronic warfare, electronic warfare systems.

ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭНТРОПИИ ВЫХОДНЫХ СОСТОЯНИЙ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ БИОМЕТРИИ-КОД

Постников Н.А.

Рассматриваются методы вычисления энтропии выходных состояний нейросетевых преобразователей биометрии-код и приведено их сравнение. В работе продемонстрировано снижение вычислительной сложности оценки энтропии Шеннона выходных данных нейросетевых преобразователей биометрии-код. Актуальность задачи обусловлена необходимостью повышения уровня быстродействия и безопасности систем идентификации и аутентификации в вооружении и военной технике.

Ключевые слова: оценка энтропии; корреляционные связи; разряды длинного кода; биометрия.

Введение

В связи с информатизацией современного общества, привычными стали электронные услуги, осуществляемые через личные кабинеты сервиса. Согласно отчету компании *Last Pass* 65% опрошенных пользователей используют один и тот же пароль для нескольких сервисов [1]. Также следует отметить, что только 29% пользователей меняют пароли по соображениям безопасности, в то время как другие меняют пароль, потому что забыли старый. Одним из путей защиты личных данных пользователей является использование биометрических данных.

В современных системах безопасности, особенно в области военного применения, важную роль играют биометрические методы аутентификации. Биометрические данные, такие как отпечатки пальцев, радужка глаза или голосовые данные, являются уникальными для каждого человека и используются для идентификации личности [2]. Для обработки и анализа этих данных часто применяют нейросетевые преобразователи, которые могут преобразовывать входные биометрические данные в код доступа [3]. В вооружении и военной технике биометрические системы идентификации находят применение для контроля доступа и обеспечения безопасности.

Нейросетевые преобразователи биометрии-код – метод обработки биометрических данных с помощью искусственных нейронных сетей. Энтропия выходных состояний нейросетевых преобразователей биометрии-код – показатель оценки случайности значений, однако вычисление энтропии выходных состояний этих преобразователей – непростая задача, которая требует ресурсоёмких вычислительных мощностей [4].

1 Обзор методов вычисления энтропии выходных состояний нейросетевых преобразователей биометрии-код

Нейросетевой преобразователь в системе биометрия-код обрабатывает входные

биометрические данные и генерирует уникальный код, который затем используется для сравнения с хранимыми данными и принятия решения об идентификации. Надежность системы биометрия-код во многом зависит от качества преобразования биометрической информации. Одним из ключевых аспектов надежности является уровень энтропии выходных состояний этих моделей, поскольку позволяет оценить степень неопределенности выходных данных.

Существует несколько методов расчета энтропии выходных состояний нейросетевых преобразователей биометрии-код. Наиболее распространенным являются метод вычисления энтропии по Шеннону, однако сделать это технически крайне сложно для большого объема данных, так как задача имеет экспоненциальную вычислительную сложность [4]. Формула для расчета энтропии дискретной случайной величины состоит из отрицательной суммы вероятностей каждого значения, помноженной на логарифм вероятности значения

$$H(x) = - \sum (p(x) * \log(p(x))). \quad (1)$$

При оценке 256-мерной энтропии по Шеннону собрать достаточный объем данных, разместив их на сотнях дисков по 100 Гбайт каждый, технически невозможно. Невозможно также обработать на вычислительной машине поток данных без предварительной записи данных на магнитные диски. При использовании процессора вычислительной машины на выполнение подобных вычислений потребуются сотни лет машинного времени.

Согласно международному стандарту по тестированию биометрии [5], объем тестовых данных в таких задачах должен расти быстрее примерно на три порядка в двоичной системе. Например, для оценки двухмерной энтропии требуется обработать 32 состояния, для трехмерной энтропии – уже 64, а в случае же с 256-мерной энтропией оценить необходимый объем данных на вычислительной машине практически невозможно, тем более на микроконтроллерах низкой разрядности. То есть, вычисление энтропии длинных кодов по Шеннону является задачей экспоненциальной вычислительной сложности и пока число бит, принимаемых во внимание мало, вычисление энтропии Шеннона вполне возможно.

Изменения произошли в 2011 г., когда Россия ввела в действие национальный стандарт ГОСТ Р 52633.3 [6] по тестированию нейросетевых преобразователей биометрии в код на малых выборках. Использование рекомендаций стандарта ГОСТ Р 52633.3 к анализу статистик расстояний Хэмминга между кодами позволит добиться экономии памяти и сокращения времени при тестировании обученной нейросети

$$"h" = \sum_{i=1}^{256} ((c_i) \oplus (x_i)), \quad (2)$$

где $"c_i"$ – состояние i -го разряда кода «Свой»;

$"x_i"$ – состояние i -го разряда кода «Чужой»;

$\oplus$ – операция сложения по модулю два.

Если тестировать стойкость обученного нейросетевого преобразователя к атакам подбора образцами «Чужой-1», «Чужой-2», «Чужой-3», то необходимо получать нормальные распределения данных в пространстве расстояний Хэмминга. Эта ситуация отображена на рисунке 1.

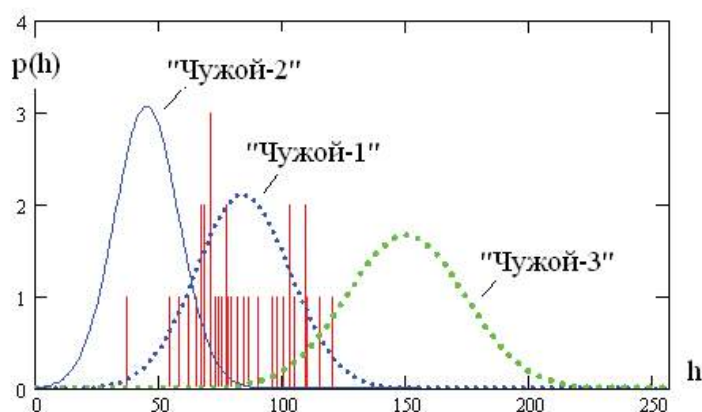


Рисунок 1 – Эффект взаимной сортировки биометрических образов в пространстве расстояний Хэмминга

При использовании достаточно большого числа случайных данных получается дискретное распределение расстояний Хэмминга с практически нормальным распределением. Распределение расстояний Хэмминга стремится к нормальному из-за того, что 256-кратное суммирование случайных состояний является допустимым нормализатором по «центральной предельной теореме статистики» [7].

Также при оценке энтропии может быть полезно еще рассматривать корреляционные связи между разрядами. При оценке коэффициента корреляции используется классическая формула Пирсона-Эджуорта-Эдлтона конца XIX века

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

где x_i, y_i – элементы выборки;

n – размер выборки;

$\bar{x}$ и $\bar{y}$ – выборочное среднее значение параметра.

На рисунке 2 представлены примеры кодов-откликов длиной 256 бит нейронной сети среды моделирования «БиоНейроАвтограф» и результат вычисления корреляции на языке *Python* с использованием библиотеки *NumPy*, предназначенной для научных вычислений и работы с многомерными массивами данных [8].

Сравнивая метод оценки корреляционных связей с методами Хэмминга и Шеннона для оценки энтропии, можно выделить следующие преимущества при оценке корреляционных связей:

Учет нелинейных зависимостей: Метод оценки корреляционных связей учитывает не только бинарные связи, как в методе Хэмминга, но и сложные взаимосвязи и нелинейные зависимости между разрядами. Метод Шеннона не учитывает структуру связей между разрядами.

Учет многомерных связей: Корреляционные методы обнаруживают многомерные связи между группами разрядов, что делает связи гибкими и подходящими для анализа сложных данных. Метод Шеннона часто рассматривает только одномерные распределения.

Интерпретируемость результатов: Корреляционные методы обеспечивают прямое понимание взаимосвязей между разрядами, что упрощает интерпретацию результатов. В случае метода Шеннона, иногда может быть сложно понять, какие разряды влияют на энтропию и в каком направлении.

Учет направленных связей и силы влияния: Корреляционные методы могут выявлять направленные связи между разрядами и оценивать силу их взаимодействия. Методы Хэмминга и Шеннона, как правило, не предоставляют этой информации.

```
import numpy as np

#111111000001010011110101000000111101011001000001101010100010001010101001
11101011001111000101010110110011100110101110110100010010101011110101101
100111000110100101110111001110001010101110111110100111110111111100100111
1011111110011001110111011001011001011101110110010101100101011001
0110111111100111010110111011010010110110011010011011011110010110010
random_bits1 = np.random.randint(0, 2, 256)

#100010110110111001001000011101000111011011011101100010101011001110111000
1010010110110011101000110100010111000100110101111010000110110010110110100
10000101000010011000011111101100010011011110001011110100101001111010010
101110111000101010100001111100111000100101111110010001011011110001000101
111110111001101001100001101110011100001101011111000
random_bits2 = np.random.randint(0, 2, 256)

#Вычисление корреляции
correlation = np.corrcoef(random_bits1, random_bits2)[0, 1]

#-0.05994742752708846
print(correlation)
```

Рисунок 2 – Пример двух откликов нейросетевого преобразователя биометрии в код длиной 256 бит на 2 разных примерах одного образа «Чужой»

То есть, при вычислении энтропии по Шеннону и Хэммингу получение точек каждой следующей шкалы большей размерности будет связано с более сложными расчетами или отсутствием ряда зависимостей. Прямой синтез таблиц точек номограммы связей шкалы Шеннона с показателем корреляционной сцепленности данных (рисунок 3) обладает экспоненциальной вычислительной сложностью, а использование таблиц позволит вычислять достаточно точный прогноз энтропии при квадратичной вычислительной сложности [4].

Таким образом, метод оценки корреляционных связей при оценке энтропии может быть более гибким, информативным и применимым к разнообразным данным по сравнению с методами Хэмминга и Шеннона.

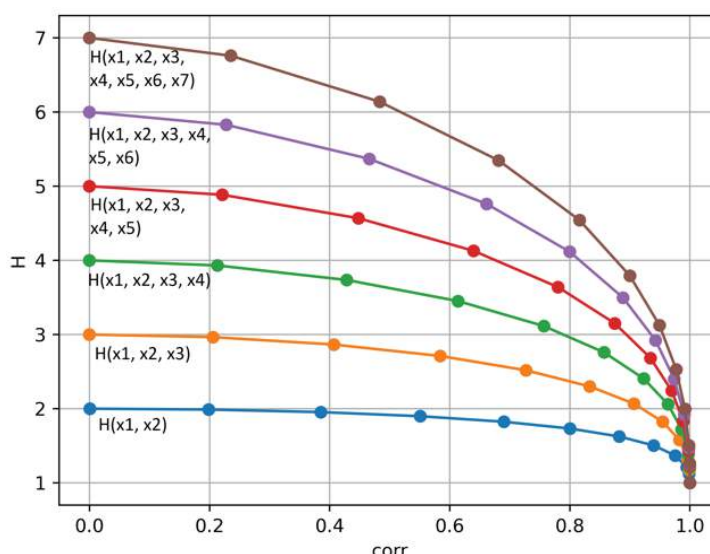


Рисунок 3 – Численный эксперимент связывания шкалы энтропии Шеннона со значениями корреляционной энтропии Хэмминга-Пирсона

Заключение

Высокая энтропия – ключевой показатель оценки случайности значений. Например, оценкой энтропии можно предсказать качество получаемых выходных состояний, отбросить неслучайные последовательности и, тем самым, увеличить стойкость системы биометрия-код. Соответственно, разработка эффективных методов вычисления энтропии – необходимая задача для обеспечения безопасности и конфиденциальности биометрических систем. Таким образом, проблема вычисления энтропии выходных состояний нейросетевых преобразователей биометрии-код имеет огромное значение в системах вооружения и военной технике.

Литература

1 Psychology of Passwords. Текст: электронный // LastPass: [сайт]. URL: <https://www.lastpass.com/~/media/9fe0bf5dc473413b8ab4df3bd8688295.pdf> (дата обращения: 17.04.2024).

2 Постников Н.А. Анализ методов и технологий биометрической идентификации // Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2022): Сборник научных статей по материалам XIX Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию кафедры «Вычислительная техника» ПГУ, Пенза, 17-18 ноября 2022 года. Пенза: Пензенский государственный университет, 2022. С.140-143.

3 Иванов А.И. Многомерная нейросетевая обработка биометрических данных с программным воспроизведением эффектов квантовой суперпозиции Текст: электронный // АО "ПНИЭИ": [сайт]. — URL: <http://пниэи.рф/activity/science/BOOK16.pdf> (дата обращения: 26.02.2024).

4 Постников Н.А. Численный эксперимент по вычислению энтропии выходных состояний нейросетевого преобразователя биометрия-код // Информационные техно-

логии в науке и образовании. проблемы и перспективы (ВНПК-2024). Пенза: ПГУ, 2024.

5 ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-1-2007 «Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 1. Принципы и структура».

6 ГОСТ Р 52633.3-2011 Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора».

7 Иванов А.И. Нейросетевое преобразование биометрии в код аутентификации: дополнение энтропии Хэмминга энтропией корреляционных связей между разрядами / А. И. Иванов, А. П. Иванов, К. А. Горбунов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1(41). С. 91-98.

8 Иванов А.И. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф». Текст: электронный. URL: <http://пнии.рф/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip> (дата обращения: 18.04.2024).

Постников Николай Андреевич – инженер I категории, АО «ПНИЭИ», г. Пенза.

Область научных интересов: защита информации, нейронные сети.

Email: postnikov.nikolai@gmail.com

Почтовый адрес: 440000, г. Пенза, ул. Советская, 9.

CALCULATIONS OF ENTROPY OF OUTPUT STATES OF NEURAL NETWORK CONVERTERS BIOMETRICS-CODE

Methods for calculating the entropy of output processes of neural network biometric code converters are considered and their comparison is provided. The work shows a reduction in the computational complexity of estimating the Shannon entropy of the output data of neural network biometric-code converters.

Key words: Shannon entropy assessment, entropy assessment by taking into account correlations between the bits of a long code, biometrics.

Postnikov Nikolay – engineer of the 1st category, JSC “PNIEI”, Penza.

Research interests: information security, neural networks.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОФОТОНИКИ В КОГНИТИВНЫХ СИСТЕМАХ РАДИОЧАСТОТНОГО МОНИТОРИНГА

Крюков А.И., Шарапов Г.А., Силивоник П.В.

В современных когнитивных системах радиочастотного мониторинга возможны случаи, когда входной сигнал содержит в своем спектре комбинационные и интермодуляционные составляющие. Для решения таких задач используются оптические методы обработки сигналов. Так акустооптические устройства характеризуются широкой полосой рабочих частот, высокой разрешающей способностью по частоте и возможностью обработки большого числа одновременно принятых сигналов.

Ключевые слова: акустооптика; радиофотоника; акустооптоэлектронный спектроанализатор; акустооптический модулятор; радиочастотный мониторинг.

Введение

Когнитивный радиочастотный мониторинг – это передовая технология, применяемая для управления радиочастотным спектром, особенно в условиях, ограниченных или перегруженных частотных диапазонах, использующая принципы машинного обучения и искусственного интеллекта для адаптивного и динамического управления распределением частотного ресурса.

Принцип работы когнитивной системы, общая схема которых показана на рисунке 1, заключается в следующем: устройство радиочастотного мониторинга посредством встроенной навигации определяет собственные координаты и передает их ближайшей точке доступа или базовой станции связи.

Далее запрос транслируется по действующей транспортной сети в вычислительный центр, где мгновенно обрабатывается, определяется радиоэлектронная обстановка района, вычисляются допустимые технические характеристики для работы радиоэлектронных средств (РЭС) подвижной связи в полосе частот и передаются обратно в ответ на запрос базовой станции. Само устройство радиочастотного мониторинга на месте корректирует собственные технические характеристики. Вся работа системы выполняется в автоматическом режиме с применением так называемой геолокационной базы данных (GLDB).

Для работы когнитивных РЭС, которые предполагают осуществлять свою работу посредством базы данных, необходимы такие данные, как: координаты расположения когнитивных РЭС (а также точность определения координат), тип системы (включая параметры, определяющие тип и класс излучения), диапазон рабочих полос частот, требуемая ширина канала, режим работы, излучаемая мощность, высота подвеса передающей антенны [1].



Рисунок 1 – Когнитивная система обработки сигналов

1 Разработка схемы спектроанализатора на основе радиофотонных принципов

Среди множества типов радиолокационных станций (РЛС) особую группу составляют РЛС, особенностью которых является необходимость одновременного приема и распознавания нескольких случайных неоднородных сигналов в широкой полосе частот за короткий промежуток времени для постановки активных помех в системах радиочастотного мониторинга (РЧМ). При разработке данных систем должен быть предусмотрен комплекс технических решений, обеспечивающих стабильную работу, например, активный и пассивный прием сигналов различной природы, а также их обработку в реальном масштабе времени.

Для систем РЧМ важнейшими параметрами являются: диапазон рабочих частот, мгновенная полоса частот, динамический диапазон.

Подобные системы, несмотря на многочисленные модификации, обладали существенными недостатками, основным из которых являлась узкая ширина полосы пропускания, что не позволяло увидеть сигналы в более высоком диапазоне частот. Кроме того, устройства были громоздкими и тяжелыми, а также требовали существенных энергозатрат.

В современных системах связи и радиолокации широко применяются сложные сигналы, в том числе, шумоподобные. Среди них достаточно распространены фазоманипулированные сигналы, в которых несущая частота промодулирована по фазе в соответствии с двоичной псевдослучайной последовательностью. Одной из задач, возникающих при анализе таких сигналов, является создание устройств, способных выявлять скачки фазы исследуемого сигнала в реальном масштабе времени [2]. К устройствам, позволяющим решить такой вид задач, можно отнести акустооптоэлектронные спектроанализаторы (АОС), являющимися неотъемлемой частью радиофотоники. Данный вид устройств позволил качественно расширить возможности компенсации помех, в частности при реализации сложных алгоритмов обработки сигналов [3]. При этом становится возможным эффективное подавление большого числа помех при отсутствии о них априорной информации.

Однако при современном уровне развития вычислительных средств реализация

задач сканирования широкого диапазона частот в блоке обработки сигналов РЛС для систем РЧМ оказывается затруднительно решить только средствами цифровой электроники, особенно в масштабах реального времени. Также недостаточно проработан процесс акустооптического взаимодействия, для решения которого требуются новые методы оптимизации и синтеза. Поэтому возникают задачи расширения полосы пропускания, уменьшения времени мгновенного съема и дальнейшей обработки сигналом, а также уменьшение массы и габаритов аппаратуры. Практически единственным способом выполнения поставленных задач является создание системы АОС, работающей на акустооптических принципах в сочетании с цифровой обработкой сигналов.

На рисунке 2 показана структурная схема АОС. Линзы ЛЗ и Л4 используются для фокусировки светового распределения на фотоприемнике, что приводит к увеличению отношения сигнала к шуму на фотоприемнике. Рост отношения сигнал/шум при увеличении выноса наблюдается до тех пор, пока световой пучок, освещающий акустооптический модулятор (АОМ), не становится шире ультразвукового.

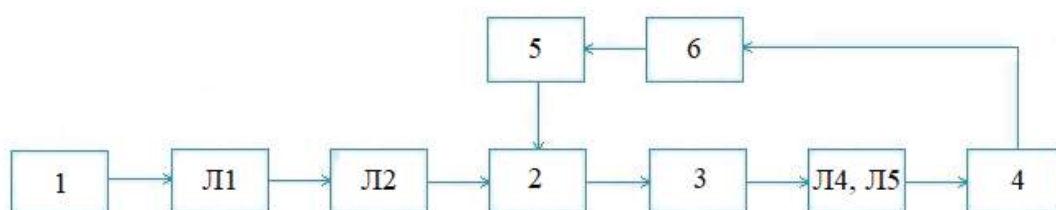


Рисунок 2 – Структурная схема АОС для радиолокационных систем (РЛС) КБ
 1 – Лазер; 2 – Акустооптический модулятор; 3 – Вейвлет-фильтр; 4 – Фотоприемная линейка; 5 – Источник сигнала; 6 – Персональный компьютер; Л1 – Формирователь оптического пучка; Л2 – Фокусирующая линза; ЛЗ – Сферическая линза; Л4, Л5 – Система линз, выполняющая преобразование Фурье вдоль горизонтальной оси и отображение вдоль вертикальной

Из возможных вариантов построения системы АОС, реализующих решение задачи расширения ширины полосы пропускания и уменьшения времени анализа, были рассмотрены следующие основные варианты конструкций:

- АОМ на основе кристаллов ниобата лития (LiNbO_3);
- АОМ на основе кристаллов синтетического алмаза;
- АОМ в интегральном исполнении.

Первый вариант АОМ построен на преобразовании электромагнитного сигнала в акустический и последующем распространении акустических волн в кристалле модулятора. В настоящее время широко распространены кристаллы на основе LiNbO_3 . Данный материал отличается высокими коэффициентом акустооптического качества и скоростью распространения акустических волн в кристалле, но используется в диапазоне частот до 2 ГГц и имеет большие габариты. Второй вариант АОМ отличается от первого использованием вместо кристаллов LiNbO_3 кристаллов алмаза, что позволяет значительно расширить ширину полосы пропускания при высокой скорости обработки информации, но вместе с тем увеличиваются энергозатраты на рас-

качку кристаллической структуры алмаза и, в зависимости от размеров кристалла, возрастают затраты на его создание. Третий вариант АОМ имеет все преимущества двух предыдущих вариантов АОМ, при этом за счет схемы в интегральном исполнении уменьшаются массогабаритные размеры (уменьшается размер самого кристалла). Это приводит к уменьшению энергопотребления на его раскачку и стоимости создания, но усложняет процесс создания и настройки данного АОМ.

При распространении лазерного пучка в пространстве на расстояние d от плоскости x, y до плоскости ξ, η для входной функции с разделяющимися переменными

$$U(x, y) = U_1(x)U_2(y),$$

выходной сигнал из оптической среды может быть представлен в виде

$$V(\xi, \eta) = V_1(\xi)V_2(\eta). \quad (1)$$

На рисунке 3 показано прохождение сигнала через оптическую систему, состоящую из сферической и цилиндрической линз, которые плотно прилегают друг к другу.

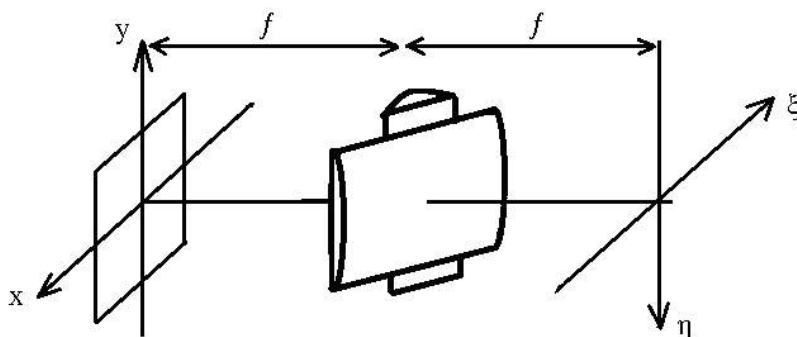


Рисунок 3 – Оптическая схема с расположенными рядом сферической и цилиндрической линзами

В системах оптической обработки основные соотношения при распространении когерентного светового пучка света были изначально получены для сферической оптики. Однако эти результаты также могут быть применены в оптических схемах с цилиндрическими линзами, при условии, что оптический сигнал на входе системы является функцией с разделяющимися переменными. На основе предложенного подхода проводится расчет отношения сигнал/шум в АОС [4].

2 Теоретическое исследование влияния радиофотонных технологий на пространственное разрешение акустооптических спектроанализаторов

Важным аспектом при разработке АОС является выбор режима работы (режим дифракции Брэгга или Рэyli) акустооптического модулятора (АОМ), что является основополагающим при оценке разработанных и готовых устройств. В режиме дифракции Брэгга, когда акустическая волна и световой луч распространяются под определенным углом друг к другу, может быть достигнута высокая эффективность

модуляции с лучшим отношением сигнал/шум за счет точной настройки параметров волны и условий дифракции. В целом улучшение отношения сигнал/шум.

Отношение сигнал/шум определяет способность радиоэлектронных систем различать полезный сигнал на фоне шумов, которые могут возникать из-за внешних и внутренних факторов. В отношении АОС под «шумом» подразумевается нежелательные изменения интенсивности световых потоков по причинам, связанных с переотражением, поглощением рассеиванием, флуктуации мощности акустического сигнала, электронного шума в системе управления и другими источниками [5].

Увеличение значения отношения сигнал/шум в АОС играет важную при создании и модернизации большого числа аппаратуры радиочастотного мониторинга и влияет на такие задачи, как модуляция света в оптических коммуникациях, лазерное сканирование и обработка оптических сигналов. Для улучшения отношения сигнал/шум используются различные методы: оптимизация параметров акустической волны, улучшение качества используемых оптических материалов, минимизация световых потерь и использование электронных компонентов высокого качества (одобренных ОТК) для генерации и контроля акустических сигналов.

Отсюда получаем интенсивность сигнала в максимуме дифракционного порядка ($I_{c\ max}$)

$$I_{c\ max} = \frac{\vartheta}{\lambda f} |E_0|^2 X^2, \quad (2)$$

где $|E_0|$ – максимально значение амплитуды светового пучка, освещающего модулятор;
 X – ширина окна функции пропускания апертуры по оси x .

Получаемые результаты отношения сигнал/шум в АОС удобно нормировать по распределению энергетического спектра в его максимуме.

Для вычисления шума в точке максимального сигнала (при значении $\xi = \xi_0, \eta = 0$, получаем следующее выражение

$$I_\phi(\xi, \eta) = \sigma^2(\xi, \eta) = |E_0|^2 \frac{X}{\lambda f} W_{nx} \left(\frac{2\pi\xi}{\lambda f} \right) U_{2\ \text{норм}}^2(\eta), \quad (3)$$

где $\sigma^2(\xi, \eta)$ – дисперсия выходного шума;

$W_{nx} \left(\frac{2\pi\xi}{\lambda f} \right) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\Delta x, 0) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda f}\xi\Delta x} d(\Delta x)$ – одномерное распределение энергетического спектра входного шума по оси ξ ,

$K(\Delta x, \Delta y)$ – корреляционная функция входного шума.

Из выражений (2) и (3) получаем отношение сигнал/шум на выходе для схемы АОС

$$\frac{I_{c\ max}}{I_\phi} = \frac{\vartheta X}{\sigma_n^2 \Delta_k W_{nx\ \text{норм}} \left(\frac{2\pi\xi_0}{\lambda f} \right)}. \quad (4)$$

Отношение сигнал/шум на выходе для схемы АОС получилось равным

$$\frac{I_{c\ max}}{I_\phi} \leq 10.$$

Для упрощения расчетов шум в области первого порядка считается преимущественно аддитивным от светового пучка нулевого порядка. Этот шум считается стационарным с нулевым средним значением.

Ниже приводится оценка отношения сигнал/шум на выходе спектроанализатора, построенного по данной схеме АОС (рисунок 4).

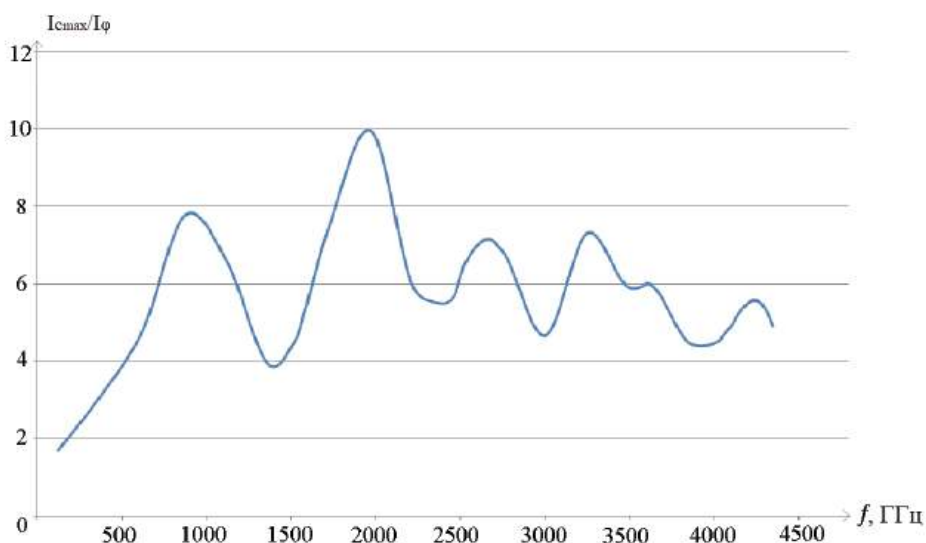


Рисунок 4 – График отношения сигнал/шум на выходе акустооптоэлектронного спектроанализатора

Также при определении параметров оптического сигнала радиотехнической аппаратурой с применением акустооптических технологий немаловажную роль играет разрешающая способность. Данный параметр описывает минимальное изменение величины, которое может почувствовать датчик. При непрерывном изменении внешнего воздействия в пределах диапазона измеряемых значений выходные сигналы модулятора не будут всегда абсолютно гладкими, даже при отсутствии шумов.

Разрешающая способность АОП зависит от количества диодов фотоприемной линейки. Следовательно, при вычислении разрешения по частоте необходимо поделить ширину полосы пропускания на количество диодов в фотоприемной линейке. Поскольку разрешающую способность можно вычислить, как отношение полосы пропускания АОМ, равной 1,1 ГГц, к количеству диодов фотодиодной линейке – 272, разрешающая способность АОМ по частоте равна 4,04 МГц [6].

Значительное внимание уделяется технической реализации и совершенствованию электрических параметров акустооптических модуляторов с целью увеличения разрешающей способности спектроанализаторов, эффективности преобразования энергии электромагнитных колебаний в акустические за счет согласования. Совершенствование технического облика приемных устройств на основе акустооптических модуляторов осуществляется за счет интегрального исполнения. Кроме приемных устройств широко распространены устройства, использующие принцип акустических волн, такие как ПАВ фильтры и дисперсионные линии задержки.

Быстродействие устройств ввода или быстродействие АОП τ определяется наименьшим временем поступления аналогового сигнала в блок обработки.

Данный параметр можно описать обратной пропорциональностью апертуры входного светового луча D от скорости распространения акустической волны в кристалле v : $\tau = \frac{D}{v}$.

Касательно акустооптоэлектронных приборов скорость распространения принимается равной скорости звука, приблизительно равной 18350 м/с. При значении апертуры входного светового пучка, равного 1,5 мм, параметр быстродействия АОП будет равен порядка 85 нс. Данный параметр значительно превосходит значения устройств, созданных на основе только электронной компонентной базы.

Для определения быстродействия АОМ была использована схема, изображенная на рисунке 5. Все приборы, использованные для измерения быстродействия приемника, являются поверенными и полностью исправными. При планировании эксперимента для поиска оптимальных условий будет использован метод Бокса-Уилсона.

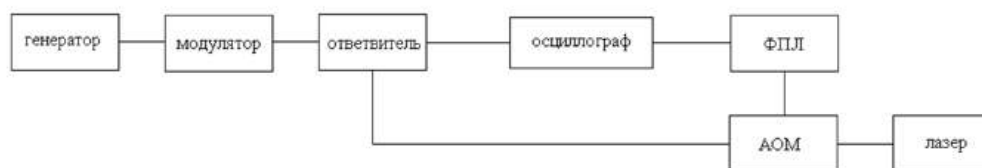


Рисунок 5 – Система для измерения быстродействия акустооптического приемника в лабораторных условиях для имитации условий подавления

В результате эксперимента за счет переработки схемы АОМ было получено значение быстродействия, равное 82,3 нс. Данный показатель превосходит результат предыдущего эксперимента на 10% [6].

Из полученных результатов можно сделать вывод о перспективности применения в системах РЧМ приемных устройств с использованием акустооптоэлектронных спектроанализаторов в блоке обработки информации.

Заключение

Рассмотрена структурная схема акустооптоэлектронного спектроанализатора на алмазной кристаллической структуре и рассчитано отношение сигнал/шум на выходе для схемы анализатора спектра в составе когнитивной системы радиочастотного мониторинга. В ходе исследований были сформулированы основные результаты:

1. проведена оценка преимуществ и недостатков каждого из вариантов схем построения акустооптоэлектронного спектроанализатора и выбрана наиболее эффективная конструкция. Выявлено, что наиболее предпочтительным вариантом является АОМ в интегральном исполнении с использованием алмазных структур для перспективных средств РЧМ.

2. проведены математические расчеты, на основании которых были получены следующие результаты:

- быстродействие АОМ – 82 нс;
- разрешающая способность АОМ по частоте – 4,04 МГц.

Благодаря выполненным расчетам и построенному графику отношения сигнал/шум, быстродействию и разрешающей способности АОМ можно сделать вывод о перспективности применения акустооптоэлектронного спектроанализатора в составе

когнитивных системах радиочастотного мониторинга для анализа сложных сигналов с использованием частотно-временного спектра. В реальных антенных системах положение излучателей в пространстве и токи в них отличаются от расчетных из-за наличия производственных допусков и влияния внешних условий. Если принять, что положение элементов решетки, амплитуда и фаза токов в них является случайными величинами, то форма диафрагмы направленности, уровень боковых лепестков и другие параметры решетки становятся такими же случайными величинами, распределение которых характеризуется величиной указанных отклонений. Благодаря внедрению АОС возможна минимизация влияния перечисленных дестабилизирующих факторов. Необходимо провести сравнительный анализ полученных данных и характеристик действующих радиолокационных комплексов для более детального понимания преимуществ акустооптоэлектронного спектроанализатора на основе алмазной кристаллической структуры.

Литература

- 1 Артемов М.Л., Борисов В.И., Маковий В.А., Сличенко М.П. Автоматизированные системы управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Основы теории и принципы построения. М.: Радиотехника, 2021. С. 556;
- 2 Медведский Ю.Н., Шарапов Г.А. Методы обработки сложных сигналов РЛС СВЧ-диапазона на основе оптического вейвлет-процессора // Материалы II Всероссийской Микроволновая конференции 26-28 ноября 2014 года. Москва, 2014. С. 326;
- 3 Бочаров А.Г., Кашуркин К.С., Шарапов Г.А. Разработка акустооптоэлектронного приемника СВЧ-диапазона для систем РЧМ. М.: Вестник РАЕН, 2019. Т. 19, № 3. С. 47;
- 4 Рогов С.А. Увеличение отношения сигнал/шум в акустооптическом анализаторе спектра с использованием астигматической оптики // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2012. № 3 (150). С. 7-12;
- 5 Тарасов Л.В., Ежов В.А. Когерентнооптическая обработка радиосигналов // Зарубежная электроника, 1980. № 2. С. 3-36;
- 6 Шарапов Г.А., Бочаров А.Г., Калябин Е.В., Якубовский С.В. Метод повышения эффективности систем и комплексов РЭБ авиационного и наземного базирования при использовании акустооптоэлектронного приемника // М.: Радиотехника, 2020. Т. 84, № 10 (20). С. 39-43.

Крюков Артём Игоревич – инженер 2 категории, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», г. Москва.

Область научных интересов: акустооптика, радиофотоника, радиочастотный мониторинг, радиолокация, радионавигация, системы и комплексы авиационного и космического базирования.

E-mail: akrukov1997@mail.ru

Почтовый адрес: 107078, Москва, ул. Новая Басманная, 20.

Шарапов Григорий Андреевич – инженер лаборатории «СВЧ техника и радиопоглощающие покрытия», МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва. Область научных интересов: акустооптика, радиофотоника, радиочастотный мониторинг, радиолокация, радионавигация, системы и комплексы авиационного и космического базирования.

Почтовый адрес: 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

Силивоник Павел Васильевич – инженер лаборатории «СВЧ техника и радиопоглощающие покрытия», МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва. Область научных интересов: акустооптика, радиофотоника, радиочастотный мониторинг, радиолокация, радионавигация, системы и комплексы авиационного и космического базирования.

Почтовый адрес: 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

APPLICATION OF RADIOPHOTONICS ELEMENTS IN COGNITIVE RADIO FREQUENCY MONITORING SYSTEMS

In modern cognitive systems of radio frequency monitoring, there may be cases when the input signal contains combinational and intermodulation components in its spectrum. Optical signal processing methods are used to solve such problems. Thus, acousto-optic devices are characterized by a wide operating frequency band, high frequency resolution and the ability to process a large number of simultaneously received signals.

Keywords: acousto-optics, radiophotonics, acousto-optoelectronic spectroanalyzer, acousto-optic modulator, radio frequency monitoring.

Kryukov Artyom Igorevich – 2nd category engineer, JSC “Central radio-research institute named after academician A.I. Berg”, Moscow city.

Research interests: acousto-optics, radio-photonics, radio frequency monitoring, radio location, radio navigation, systems and complexes of aviation and space basing.

Sharapov Grigoriy Andreevich – engineer of the laboratory “Microwave Engineering and Radio Absorbent Coatings”, MIREA – Russian Technological University, Moscow city.

Research interests: acousto-optics, radio-photonics, radio frequency monitoring, radio location, radio navigation, systems and complexes of aviation and space basing.

Silivonik Pavel Vasilevich – engineer of the laboratory “Microwave Engineering and Radio Absorbent Coatings”, MIREA – Russian Technological University, Moscow city.

Research interests: acousto-optics, radio-photonics, radio frequency monitoring, radio location, radio navigation, systems and complexes of aviation and space basing.

УДК 621.396.67

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВА МАЛОГАБАРИТНОЙ БУКСИРУЕМОЙ ЛОЖНОЙ ЦЕЛИ АППАРАТУРЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Ходунов В.А.

Для уменьшения взаимовлияния антенн с малыми исходными размерами объекта-носителя их размещения – малогабаритная буксируемая ложная цель (МБЛЦ) с радиотехническим оборудованием, которое работает на приём и передачу одновременно на одной частоте в одном направлении в пространстве, необходимо применение определенного конструктива МБЛЦ. Разработан конструктив МБЛЦ – конструкция антенн, их размещение и гибридная замедляющая структура (ЗС) в виде гребенчатой конструкции поверхности корпуса с применением диэлектрических материалов в её составе, уменьшающая продольные геометрические размеры корпуса МБЛЦ. Конструктив МБЛЦ обеспечивает требования по электродинамической развязке (ЭР) и коэффициенту усиления (КУ) антенн.

Ключевые слова: электродинамическая развязка; малогабаритная буксируемая ложная цель; замедляющая структура; ослабление связи; коэффициент усиления.

Введение

Как показывает опыт применения летательных аппаратов (ЛА), живучесть ЛА напрямую зависит от наличия средств радиотехнической защиты на их борту.

Как средство радиотехнической защиты ЛА – применение МБЛЦ является одним из важных и эффективных способов повышения живучести ЛА при преодолении средств защиты объектов противника.

ЛА, следуя к назначенной цели при заходе в зону прикрытия поражаемого объекта средствами защиты противника, выпускает на шлейфе за собой МБЛЦ – устройство, имитирующее при своей работе ЛА, тем самым оттягивая на себя средства поражения противника и успешно преодолевая рубежи прикрытия поражаемого объекта. Обеспечение, требуемые ЭР и КУ антенн радиотехнического оборудования, позволяет эффективно применять МБЛЦ для радиотехнической защиты ЛА [1].

В результате разработан конструктив МБЛЦ, обеспечивающий требуемую ЭР и КУ антенн радиотехнического оборудования, для радиотехнической защиты ЛА в целях эффективной постановки имитационного сигнала средствам перехвата противника.

В настоящей работе рассматривается:

- конструкция и принцип действия линий передачи поверхностной волны в виде диэлектрической пластины на металлическом основании и в виде гребенчатой плоской металлической структуры, расположенных в воздухе;
- теоретический расчет конструктивных и электрических параметров линий передачи поверхностных волн;

- разработка конструктивов МБЛЦ в системе автоматизированного проектирования и оценка расчетных значений ЭР и КУ антенн, и определение эффективности конструктивов МБЛЦ по результатам электродинамического моделирования;
- выбор конструктива МБЛЦ аппаратуры радиотехнической защиты высокоскоростного ЛА в целях эффективной постановки имитационного сигнала средствами перехвата противника;
- описание измерительной установки и методов экспериментального расчета электрических параметров линий передачи поверхностных волн;
- рекомендации по применению конструктива МБЛЦ с гибридной ЗС.

1 Конструкция и принцип действия линий передачи поверхностной волны в виде диэлектрической пластины на металлическом основании и в виде гребенчатой плоской металлической структуры, расположенных в воздухе

Если диэлектрическую пластину, размещенную на металлическом основании, вести в раскрыв излучающего рупора, то возбуждаемые рупором внутри пластины электромагнитные волны будут падать на границу раздела диэлектрик-воздух под разными углами, в том числе и под углами, превышающими критический. Эти волны, отразившись, первый раз упадут на металлическое основание также под углами, превышающими критический, и отразятся от него. Процесс отражений будет повторяться (рисунок 1). Образовалась при этом ЗС [2].



Рисунок 1 – Линия передачи поверхностных волн в виде диэлектрической пластины на металлическом основании с траекторией движения плоских волн

Для определения замедления радиоволны при обеспечении ЭР в ЗС, выразим коэффициент поперечного затухания α и коэффициент продольного затухания χ через коэффициент замедления поверхностной волны ξ :

$$\alpha = \sqrt{(\beta^2 - k^2)} = k_0 \cdot \sqrt{(\beta/k_0)^2 - 1} = k_0 \cdot \sqrt{\xi^2 - 1}; \quad (1)$$

$$\chi = \sqrt{k^2 - \beta^2} = \sqrt{\varepsilon \cdot k_0^2 - \beta^2} = k_0 \cdot \sqrt{\varepsilon - (\beta/k_0)^2} = k_0 \cdot \sqrt{\varepsilon - \xi^2}. \quad (2)$$

Тогда, трансцендентное уравнение, с помощью которого можно провести теоретическое определение коэффициента замедления ξ

$$\operatorname{tg}(2 \cdot \pi \cdot (h/\lambda_0) \cdot \sqrt{\varepsilon - \xi^2}) = \varepsilon \cdot \sqrt{\xi^2 - 1} / \sqrt{\varepsilon - \xi^2}. \quad (3)$$

Линия передачи поверхностной волны, распространяющейся вдоль металлической гребенчатой структуры (рисунок 2).

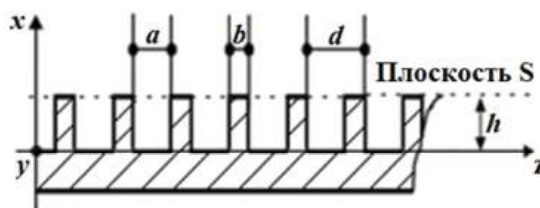


Рисунок 2 – Линия передачи поверхностных волн в виде гребенчатой металлической структуры: a – ширина канавки, b – ширина гребня, h – высота гребня (глубина канавки), $d = a + b$ – период гребенчатой структуры

Условие, при котором влиянием всех гармоник, кроме первой, можно пренебречь, выглядит следующим образом

$$d < 0,1 \cdot \lambda / \xi. \quad (4)$$

Так как рассматриваемая структура заполнена воздухом, то настоящее условие можно записать в виде

$$h < \lambda_0 / 4. \quad (5)$$

Формула для теоретического определения поперечного коэффициента затухания поверхностной волны, распространяющейся вдоль гребенчатой структуры

$$\alpha = (2\pi / \lambda_0) \cdot (a / (a + b)) \cdot \operatorname{tg}(2\pi \cdot h / \lambda_0). \quad (6)$$

Формула для теоретического определения коэффициента замедления ξ

$$\xi = \sqrt{1 + ((a / (a + b)) \cdot \operatorname{tg}(2\pi \cdot h / \lambda_0))^2}. \quad (7)$$

На основании определённых формулами выше коэффициента поперечного затухания α и коэффициента замедления поверхностной волны ξ , проведем теоретический расчет конструктивных и электрических параметров линий передачи поверхностных волн;

2 Теоретический расчет конструктивных и электрических параметров линий передачи поверхностных волн

Конструктивные параметры линии передачи в виде диэлектрической пластины на металлическом основании и теоретическое определение электрических параметров ξ и α этой линии [3]:

- для диэлектрической структуры корпуса МБЛЦ на основании теории поверхностных волн, рассмотренной в пункте 1, и применяемой толщины корпуса МБЛЦ глубина канавки h ЗС равной $\frac{\lambda}{8}$, соответственно $h = 1,05$ мм, а диэлектрическая проницаемость выбранного диэлектрического материала с учетом возможности применения его на МБЛЦ составляет $\epsilon = 6$;

- для расчета коэффициента замедления ξ поверхностной волны, распространяющейся в диэлектрической ЗС, можно воспользоваться уравнением (3): $\xi \approx 1,2$;

- для расчета поперечного коэффициента затухания α поверхностной волны, распространяющейся в диэлектрической ЗС, можно воспользоваться формулой (1), в которую следует подставить теоретически определенное значение ξ : $\alpha \approx 0,45$.

Конструктивные параметры линии передачи в виде металлической гребенчатой и гибридной структуры и теоретическое определение электрических параметров ξ и α этой линии [3]:

- для гребенчатой или гибридной (гребенчатой, заполненной диэлектрическим материалом) структуры корпуса МБЛЦ на основании теории поверхностных волн, рассмотренной в пункте 1, и применяемой толщины корпуса МБЛЦ глубина канавки h ЗС равной $\frac{\lambda}{8}$, ширину канавки a ЗС равной $\frac{\lambda}{4}$, ширину гребня b ЗС примерно равной $0.1 \cdot \lambda$, соответственно $h = 1,05$, $a = 2,1$ мм, $b = 0,9$ мм, а диэлектрическая проницаемость выбранного диэлектрического материала с учетом возможности применения его на МБЛЦ составляет $\epsilon = 6$;

- для расчета коэффициента замедления ξ поверхностной волны, распространяющейся в гребенчатой ЗС, можно воспользоваться уравнением (7): $\xi \approx 1,28$;

- для расчета поперечного коэффициента затухания α поверхностной волны, распространяющейся в гребенчатой ЗС, можно воспользоваться формулой (6): $\alpha \approx 0,58$;

- для расчета коэффициента замедления ξ поверхностной волны, распространяющейся в гибридной ЗС, можно воспользоваться уравнением (7) и коэффициент распространения в канавках с учетом их диэлектрического заполнения $k_d = \frac{2\pi}{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$: $\xi \approx 1,295$;

- для расчета поперечного коэффициента затухания α поверхностной волны, распространяющейся в гребенчатой ЗС, можно воспользоваться формулой (6) и коэффициент распространения в канавках с учетом их диэлектрического заполнения $k_d = \frac{2\pi}{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$: $\alpha \approx 0,62$.

Наилучшие теоретические значения коэффициента замедления и поперечного коэффициента затухания получены для гибридной ЗС на поверхности корпуса МБЛЦ, что в дальнейшем будет подтверждаться оценкой расчётных значений ЭР и КУ для данных структур электродинамическим моделированием в САПР и определением эффективности конструктивов МБЛЦ по результатам электродинамического моделирования путем сравнения отношений значений ЭР (ослабления связи) и КУ антенн МБЛЦ с ЗС на поверхности корпуса МБЛЦ к значениям ЭР (ослабления связи) и КУ антенн МБЛЦ без ЗС на поверхности корпуса МБЛЦ.

3 Разработка конструктивов МБЛЦ в системе автоматизированного проектирования и оценка расчетных значений ЭР и КУ антенн, и определение эффективности конструктивов МБЛЦ по результатам электродинамического моделирования

По результатам расчета теоретических конструктивных и электрических параметров в системе автоматизированного проектирования разработаны конструктивы для МБЛЦ.

Чтобы получить наилучшие значения ЭР и КУ антенн МБЛЦ методом электродинамического моделирования в среде системы автоматизированного проектирования прорабатывалась различная конструкция и расположение антенн, а также различные длина, количество и расположение [4]:

- диэлектрика относительно длины волны для линии передачи поверхностной волны в виде диэлектрической пластины на металлическом основании (рисунок 4(а));

- гребней относительно длины волны для линии передачи поверхностной волны

в виде гребенчатой плоской металлической структуры (рисунок 5(а));

- диэлектрика и гребней относительно длины волны для линии передачи в виде гибридной замедляющей структуры – гребенчатой плоской металлической диэлектрической структуры (рисунок 6(а)).

Полученные результаты значений ЭР (ослабления связи) и КУ антенн МБЛЦ с ЗС сравниваются с результатом значений ЭР (ослабления связи) и КУ антенн МБЛЦ без ЗС (рисунок 3(а)).

После электродинамического моделирования в системе автоматизированного проектирования получаем результаты значений ЭР (ослабления связи) и КУ антенн для МБЛЦ без ЗС (рисунок 3(б, в, г)), с ЗС в виде диэлектрической пластины на плоском металлическом основании (рисунок 4(б, в, г)), с ЗС в виде гребенчатой металлической структуры (рисунок 5(б, в, г)) и с ЗС в виде гибридной структуры - гребенчатой металлической диэлектрической структуры (рисунок 6(б, в, г)).

Проводим оценку КУ и ослабления связи Q антенн МБЛЦ [5]. Выразим значение ослабления связи Q через значение электродинамической развязки S

$$Q = 10^{-(S/20)}. \quad (8)$$

Наихудшее значение ослабления связи $Q = 1$, когда сигналы антенн максимально влияют друг на друга и связь максимально ослабевает. Наилучшее значение ослабления связи, если $Q = 0$

Графики и текст ниже, приведены с условным обозначением применяемых радиочастот.

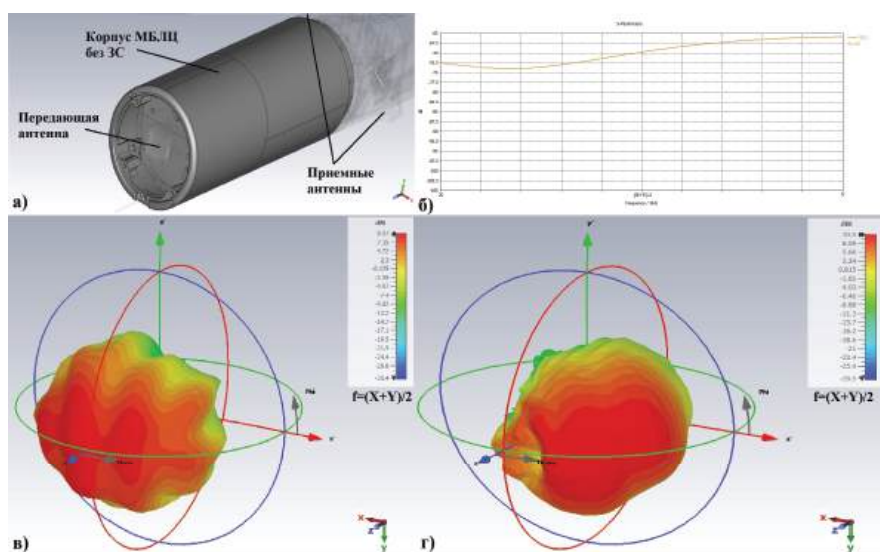


Рисунок 3 – МБЛЦ без ЗС: конструктив МБЛЦ без ЗС (а), ЭР в рабочем диапазоне частот (б), 3D ДН КУ передающей антенны на центральной частоте (в), 3D ДН КУ одной из приемных антенн на центральной частоте (г)

Среднее значение ЭР антенн МБЛЦ без ЗС составило $S = -70$ дБ,э соответственно применив выражение (8) ослабление связи составляет $Q \approx 0,00032$. КУ в максимуме ДН передающей антенны составило $G_{\text{пер}} = 9,57$ дБ. КУ в максимуме ДН приемной антенны составило $G_{\text{пр}} = 10,5$ дБ.

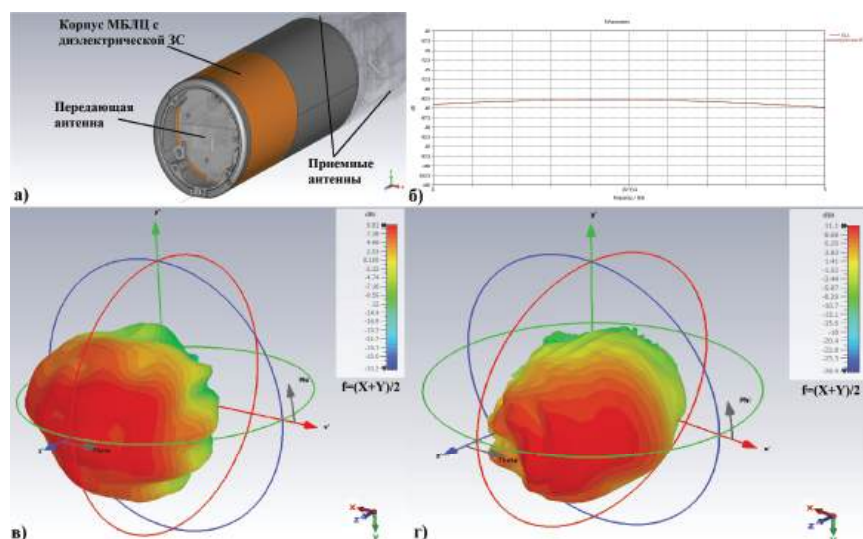


Рисунок 4 – МБЛЦ с диэлектрической ЗС: конструктив МБЛЦ с диэлектрической ЗС (а), ЭР в рабочем диапазоне частот (б), 3D ДН КУ передающей антенны на центральной частоте (в), 3D ДН КУ одной из приемных антенн на центральной частоте (г)

Среднее значение ЭР антенн МБЛЦ с диэлектрической ЗС составило $S = -84$ дБ, соответственно применив выражение (8) ослабление связи составляет $Q \approx 0,000063$, в 5,1 раз лучше, чем ЭР антенн МБЛЦ без ЗС, эффективность составляет 410%. КУ в максимуме ДН передающей антенны составило $G_{\text{пер}} = 9,81$ дБ, эффективнее на 0,24 дБ. КУ в максимуме ДН приемной антенны составило $G_{\text{пр}} = 11,1$ дБ, эффективнее на 0,6 дБ.

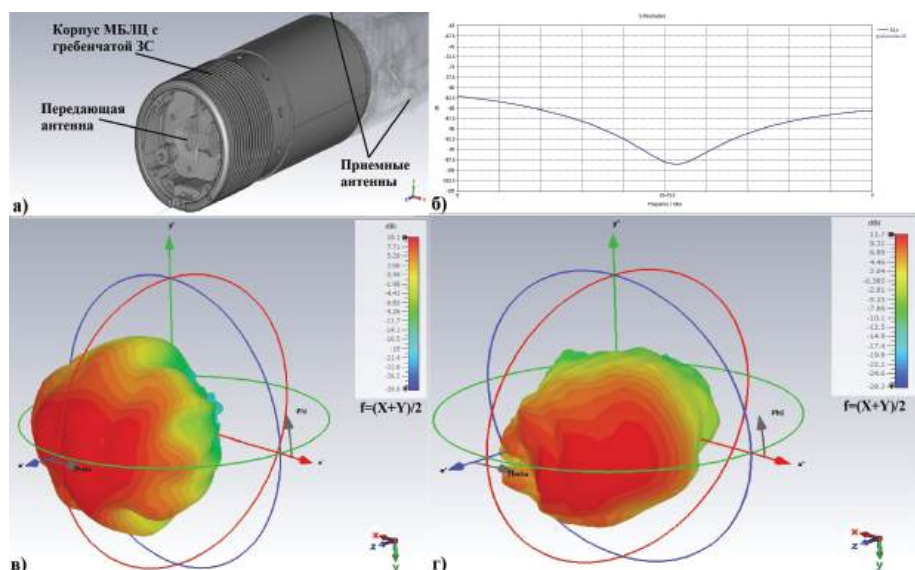


Рисунок 5 – МБЛЦ с гребенчатой ЗС: конструктив МБЛЦ с гребенчатой ЗС (а), ЭР в рабочем диапазоне частот (б), 3D ДН КУ передающей антенны на центральной частоте (в), 3D ДН КУ одной из приемных антенн на центральной частоте (г)

Среднее значение ЭР антенн МБЛЦ с гребенчатой ЗС составило $S = -90$ дБ, соответственно применив выражение (8) ослабление связи составляет $Q \approx 0,000032$, в 10 раз лучше, чем ЭР антенн МБЛЦ без ЗС, эффективность составляет 900%. КУ в максимуме ДН передающей антенны составило $G_{\text{пер}} = 10,1$ дБ, эффективнее на 0,53 дБ. КУ в максимуме ДН приемной антенны составило $G_{\text{пр}} = 11,7$ дБ, эффективнее на 1,2 дБ.

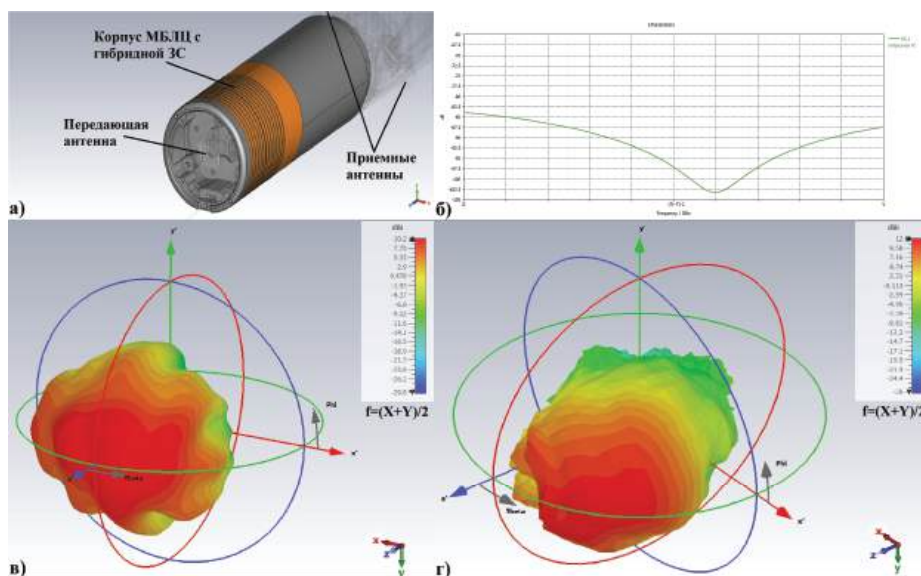


Рисунок 6 – МБЛЦ с гибридной ЗС: конструктив МБЛЦ с гибридной ЗС (а), ЭР в рабочем диапазоне частот (б), 3D ДН КУ передающей антенны на центральной частоте (в), 3D ДН КУ одной из приемных антенн на центральной частоте (г)

Среднее значение ЭР антенн МБЛЦ с гибридной ЗС составило $S = -93$ дБ, соответственно применив выражение (8) ослабление связи составляет $Q \approx 0,0000224$, в 14,3 раз лучше, чем ЭР антенн МБЛЦ без ЗС, эффективность составляет 1330%. КУ в максимуме ДН передающей антенны составило $G_{\text{пер}} = 10,2$ дБ, эффективнее на 0,63 дБ. КУ в максимуме ДН приемной антенны составило $G_{\text{пр}} = 12$ дБ, эффективнее на 1,5 дБ.

Оценив расчетные значения ЭР и КУ антенн, и определив эффективность конструктивов МБЛЦ по результатам электродинамического моделирования, выбирается конструктив МБЛЦ аппаратуры радиотехнической защиты высокоскоростного ЛА в целях эффективной постановки имитационного сигнала средствам перехвата противника.

4 Выбор конструктива МБЛЦ аппаратуры радиотехнической защиты высокоскоростного ЛА в целях эффективной постановки имитационного сигнала средствам перехвата противника

На основании теоретических расчетов и расчетов электродинамического моделирования определяется, что наиболее эффективный конструктив для использования в МБЛЦ для эффективной постановки имитационного сигнала средствам перехвата

противника является конструктив с ЗС в виде гибридной структуры - гребенчатой металлической диэлектрической структуры:

- наименьшее среднее значение ЭР антенн $S = -93$ дБ;
- наименьшее значение ослабления связи $Q \approx 0,0000224$;
- наибольшее значение КУ передающей антенны на центральной частоте $G_{\text{пер}} = 10,2$ дБ;
- наибольшее значение КУ приемной антенны на центральной частоте $G_{\text{пр}} = 12$ дБ.

МБЛЦ, имеющая конструктив с ЗС в виде гибридной структуры – гребенчатой металлической диэлектрической структуры, обеспечивает наиболее эффективную постановку имитационной помехи и наиболее эффективный прием сигнала в требуемом секторе зондирующего сигнала средств перехвата противника и по среднему значению ЭР и значению ослабления связи эффективней на 1330%, по КУ передающей антенны эффективнее на 0,63 дБ, по КУ передающей антенны эффективнее на 1,5 дБ чем МБЛЦ, имеющая конструктив без ЗС.

Далее описываются измерительная установка и методы экспериментального расчета электрических параметров линий передачи поверхностных волн.

5 Описание измерительной установки и методов экспериментального расчета электрических параметров линий передачи поверхностных волн

Функциональная схема измерительной установки приведена на рисунке 7.

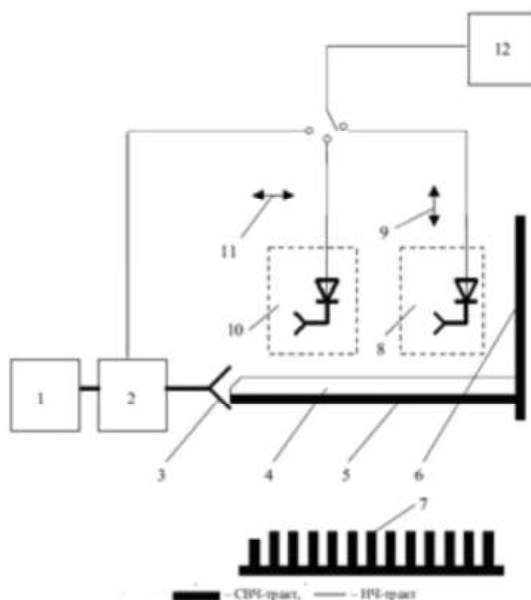


Рисунок 7 – Функциональная схема измерительной установки

Поверхностные волны возбуждаются рупором 3. Для обеспечения согласования возбуждающего устройства входящие в полость рупора части линии передачи выполнены в виде клина длиной $(2-3) \cdot \lambda$.

Индикаторное устройство 8, предназначенное для измерения поперечного (в направлении нормали к поверхности линии передачи) распределения напряженности

электрического поля, представляет собой отрезок прямоугольного волновода, нагруженный на детекторную секцию, открытый конец которого играет роль приемной антенны.

Индикаторное устройство 10, предназначенное для измерения продольного распределения напряженности электрического поля, представляет собой несимметричный вибратор, нагруженный на детекторную секцию.

Измерительный усилитель 12 может по очереди подключаться к обеим индикаторным секциям 8 и 10 или к низкочастотному выходу волноводной измерительной линии 2.

Функциональная схема состоит из следующих элементов:

- 1 генератор СВЧ;
- 2 измерительная линия;
- 3 возбуждающий рупор;
- 4 диэлектрическая пластина;
- 5 металлическое основание;
- 6 металлический экран;
- 7 гребенчатая структура;
- 8 индикаторное устройство;
- 9 механизм вертикального перемещения;
- 10 индикаторное устройство;
- 11 механизм горизонтального перемещения;
- 12 измерительный усилитель.

6 Метод экспериментального определения ξ

Экспериментальное определение ξ основано на его связи с длинами волн λ_0 и Λ_{π}

$$\xi = \lambda_0 / \Lambda_{\pi}, \quad (9)$$

где Λ_{π} – длина волны поверхностной волны.

Для определения Λ_{π} необходимо создать в исследуемой линии передачи режим стоячей волны, измерить расстояние между соседними минимумами напряженности поля в линии и рассчитать Λ_{π} , которая будет равна измеренному расстоянию, умноженному на два.

Для определения λ_0 следует воспользоваться волноводной измерительной линией, в которой также должен быть создан режим стоячей волны. Измерив длину волны $\Lambda_{\text{в}}$ в волноводной измерительной линии, которая будет равна удвоенному расстоянию между соседними минимумами напряженности поля в ней, можно рассчитать λ_0 по формуле

$$\lambda_0 = \Lambda_{\text{в}} \cdot \sqrt{1 + (\Lambda_{\text{в}} / \lambda_{\text{кр}})^2} \quad (10)$$

где $\lambda_{\text{кр}}$ – критическая длина волны для волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе.

7 Метод экспериментального определения α

Для экспериментального определения α необходимо измерить напряженность электрического поля в двух точках над исследуемой импедансной поверхностью, рас-

положенных на одинаковом расстоянии от входа исследуемой линии передачи и смещенных друг от друга на расстояние Δx в направлении нормали к поверхности пластины (вдоль оси X). Если обозначить измеренные значения напряженности поля $E(x)$ и $E(x + \Delta x)$, то искомое значение α , можно найти следующим образом

$$\alpha = (1/\Delta x) \cdot 20 \cdot \lg(E(x)/E(x + \Delta x)). \quad (11)$$

Размерность α , рассчитанного по формуле (11), будет дБ/ед. длины.

Далее приведены рекомендации по применению конструктива МБЛЦ с гибридной ЗС.

8 Рекомендации по применению конструктива МБЛЦ с гибридной ЗС

Габаритные размеры МБЛЦ, на которых есть необходимость применить конструктив МБЛЦ с гибридной ЗС приблизительно равны $\emptyset 55 \times 300$ мм и менее. Применение конструктива МБЛЦ с гибридной ЗС возможно на любых МБЛЦ аппаратуры радиотехнической защиты высокоскоростных ЛА, требующих повышения их живучести. Разработанный конструктив МБЛЦ с гибридной ЗС может быть применен в тематических ОКР по разработке средств радиотехнической защиты ЛА.

Заключение

В представленной работе решены проблема и задача – обеспечены требуемые ЭР и КУ антенн МБЛЦ, за счет конструктива с ЗС в виде гибридной структуры – гребенчатой металлической диэлектрической структуры, не решённые ранее для габаритов $\emptyset 55 \times 300$ мм и менее МБЛЦ аппаратуры радиотехнической защиты высокоскоростного ЛА в целях эффективной постановки имитационного сигнала средствами перехвата противника.

МБЛЦ, имеющая конструктив с ЗС в виде гибридной структуры – гребенчатой металлической диэлектрической структуры, обеспечивает наиболее эффективную постановку имитационной помехи и наиболее эффективный прием сигнала в требуемом секторе зондирующего сигнала средств перехвата противника и по среднему значению ЭР и значению ослабления связи эффективней на 1330%, по КУ передающей антенны эффективнее на 0,63 дБ, по КУ передающей антенны эффективнее на 1,5 дБ чем МБЛЦ, имеющая конструктив без ЗС.

Литература

1 Павлушенко М., Евстафьев Г, Макаренко И. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития. Москва: Издательство «Права человека», 2005. 612 с.

2 Елизаров А.А., Кухаренко А.С. Микроволновые частотно-селективные устройства на резонансных отрезках электродинамических замедляющих систем и структурах с метаматериалами. Москва: Издательский дом ВШЭ, 2019. 328 с.

3 Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. Под ред. Воскресенского Д.И. Москва: Радиотехника, 2006. 376 с.

4 Ефремов М.В., Иванов И.М., Курушин А.А. Моделирование СВЧ приборов с помощью программы CST Particle Studio. Москва: СОЛОН-Пресс, 2019. 332 с.

5 Неганов В.А., Нефёдов Е.И., Яровой Г.П. Электродинамические методы про-

ектирования устройств СВЧ и антенн. Учебное пособие для вузов. / Под ред. В.А.Неганова Москва: Радио и связь, 2002. 416 с.

Ходунов Валентин Алексеевич – заместитель начальника научно-тематического отдела антенно-фидерных устройств, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», г. Москва.

Область научных интересов: радиоэлектронная борьба, радиоэлектронные системы.

E-mail: hodunov_valentin@mail.ru.

Почтовый индекс: 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, 20/9.

DEVELOPMENT OF A DESIGN FOR A SMALL-SIZED TOWED FALSE TARGET RADIO PROTECTION EQUIPMENT

To reduce the interference of antennas with small initial dimensions of the carrier object of their placement - a small-sized towed false target (STFT) with radio equipment that simultaneously receives and transmits at the same frequency in the same direction in space, it is necessary to use a certain STFT design. The STFT design has been developed – the design of antennas, their placement and a hybrid decelerating structure in the form of a comb structure of the housing surface using dielectric materials in its composition, reducing the longitudinal geometric dimensions of the STFT housing. The STFT design provides requirements for electrodynamic decoupling (ED) and gain factor (GF) of antennas.

Keywords: electrodynamic decoupling; small-sized towed false target; decelerating structure; coupling attenuation; gain factor.

Khodunov Valentin Alekseevich – postgraduate student, Deputy head of the scientific and thematic department of antenna-feeder devices, JSC "CSRREI named after Academician A.I.Berg".

Research interests: electronic warfare, electronic warfare systems.

УДК 621.396.67(621.37)

РАЗРАБОТКА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АППАРАТУРЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Ходунов В.А., Башкетов А.А.

В статье представлен материал по разработке антенной системы, применяемые в аппаратуре радиотехнической защиты техники РЭБ. Представлены основные требования к конструкции и характеристикам антенны аппаратуры радиотехнической защиты. Рассмотрены аспекты основ разработки сверхширокополосной антенной системы и приведены результаты моделирования разработанной сверхширокополосной антенной системы.

Ключевые слова: антенна вытекающей волны; антенна рупорная; сверхширокополосная антенная система; уровень развязки диаграммы направленности; диэлектрическая проницаемость.

Введение

Современная бортовая аппаратура противодействия высокоскоростных летательных аппаратов должна обеспечивать преодоление рубежей обнаружения. Эффективность бортовой аппаратуры РЭБ заключается в учёте тактико-технических характеристик (ТТХ) средств обнаружения, а также модели действий этих средств по перехвату летательных аппаратов. Основными из таких требований по модели являются заданные сектора атаки противоракетами и величины энергопотенциала для антенн подавления аппаратуры наведения с угрожаемых направлений, а из ТТХ – радиочастоты средств поражения.

Разработанная антенна сверхширокополосной антенной системы для высокоскоростных летательных аппаратов из состава аппаратуры постановки помех, информация о которой приведена в статье, учитывает все эти основные требования. В статье представлено описание основных параметров разработанной уникальной антенны сверхширокополосной антенной системы, названы достоинства разработанной антенны.

1 Антенна сверхширокополосной антенной системы на основе широкополосного Н-секториального рупора, продольного излучающего через открытый волновод и диэлектрическую линзу

Практика показывает, что разрабатываемые антенные системы должны обладать следующими параметрами:

- коэффициент перекрытия равен 2,25;
- КСВН – не более 2,2;
- K_u – не менее 6 дБ в максимуме ДН;
- развязка ДН в необходимом секторе по углу места, не более –25 дБ;
- формирование максимума ДН совпадает с направлением оси излучателя.

Для разработки антенн сверхширокополосной антенной системы, группой разработчиков рассматривались и прорабатывались в среде электродинамического моделирования, конструкции нескольких классических видов антенн (антенны вытекающей волны, антенны линзовой, антенны щелевой и антенны рупорной) и основных типов антенны поверхностных волн: плоских, линейных, стержневых и дисковых, как наиболее подходящих для реализации требований по направлению излучения, распространяющегося вдоль объекта-носителя. При расчетах антенн поверхностных волн применялась представленная ниже теория определения поля излучения диэлектрической антенны и электромагнитного поля внутри и вне диэлектрической вставки конечной длины [1]

При возбуждении диэлектрической антенны вибратором или волноводом с волной H_{11} во вставке при правильном выборе его размеров возбуждается основная волна HE_{11} . Линии вектора напряженности электрического поля E в поперечном сечении вставки имеют одно преимущественное направление, перпендикулярное оси антенны.

Возникающие в стержне волны вызывают поляризацию диэлектрика вдоль силовых линий электрической составляющей поля в поперечных плоскостях диэлектрической вставки, т.е. возбуждаются электрические токи поляризации, которые в основном являются поперечными. Эти токи смещения могут рассматриваться как излучатели с равномерным распределением амплитуд в направлении оси антенны и линейным распределением фаз. Таким образом, антенну с диэлектрической вставкой можно рассматривать как антенну бегущей волны осевого излучения с замедленной фазовой скоростью [2]. Следовательно, диаграмма направленности (ДН) диэлектрической антенны E и H плоскостях рассчитывается по формулам:

в плоскости E

$$F_E(\theta) = F_1(\theta)F_2(\theta)F_3(\theta); \quad (1)$$

в плоскости H :

$$F_H(\theta) = F_1(\theta)F_2(\theta); \quad (2)$$

Множитель $F_1(\theta)$ является функцией направленности линейки бегущей волны и определяется по формуле

$$F_1(\theta) = \frac{sh\left|\frac{\alpha L}{2} + j\xi\right| \left|\frac{\alpha L}{2} + j\xi_0\right|}{\left|\frac{\alpha L}{2} + j\xi\right| sh\left(\frac{\alpha L}{2} + j\xi_0\right)}, \quad (3)$$

где $\xi = \frac{kL}{2} \left(\frac{c}{V_\phi} - \cos(\theta) \right);$

$$\xi_0 = \frac{kL}{2} \left(\frac{c}{V_\phi} - 1 \right);$$

α – коэффициент затухания, который определяется экспериментально.

При расчете ДН антенны из полистирола, люсита и других диэлектриков с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,5 \dots 2,6$ можно принять, что: $\alpha L/2 = 0,5$. $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число, θ - угол между осью антенны и направлением на точку наблюдения, c/V_ϕ - коэффициент замедления волны в диэлектрическом волноводе. Следует отметить, что чем больше $\alpha L/2$ (чем быстрее убывает амплитуда поля от начала антенны к ее концу), тем шире главный лепесток ДН и больше боковые лепестки. Основная особенность ДН при $\alpha > 0$ заключается в отсутствии нулевых значений поля, т.е. в слиянии главного и боковых лепестков в кривую со слабо выраженными экстремумами. Чем больше α , тем слабее выражены экстремальные точки.

Полагая, что затухания в диэлектрической вставке пренебрежимо малы, $F_1(\theta)$ получается для $F_1(\theta)$ выражение

$$F_1(\theta) = \frac{\sin\left|\frac{kl}{2}(c\sqrt{V_\phi - \cos(\theta)})\right|}{\frac{kl}{2}(c\sqrt{V_\phi - \cos(\theta)})}. \quad (4)$$

Множитель $F_2(\theta)$ характеризует влияние на ДН поперечного размера диэлектрической вставки, т.е. определяет направленность элементарного объемного участка, имеющего форму плоского поперечного слоя определённого сечения [4]. Например, ДН элемента длины стержня круглого сечения определяется по формуле

$$F(\theta) = \Lambda_1\left(\frac{kd}{2}\sin(\theta)\right), \quad (5)$$

где Λ_1 – лямбда-функция первого порядка;

d – средний диаметр диэлектрического стержня.

Наличие множителя $F_2(\theta)$ приводит к тому, что ДН стержневых антенн более направлены, чем плоскостных.

Однако множитель $F_2(\theta)$ заметно влияет на ДН антенны лишь при коротких стержнях большого диаметра (порядка $\alpha \lambda$ и более).

Множитель $F_3(\theta) = \cos(\theta)$ характеризует влияние на ДН одиночного элемента тока, относится только к плоскости Е и в пределах $\theta = 0 \dots 45^\circ$ слабо изменяется.

Более быстрое убывание функции $F_3(\theta)$ с увеличением угла θ начинается при углах $\theta = 0 \dots 45^\circ$.

Таким образом, наличие множителя $F_3(\theta)$ мало сказывается на форме основного лепестка ДН антенны. Основное отличие ДН в Е и Н плоскостях у диэлектрических антенн заключается в том, что в Н-плоскости боковые лепестки ДН заметно больше [3].

Ширина основного лепестка в обеих плоскостях почти одинакова.

ДН диэлектрических антенн малого диаметра определяется в основном функцией $F_1(\theta)$, а большого диаметра – произведением функций $F_1(\theta)$ и $F_2(\theta)$.

Применяя теорию расчёта антенн поверхностных волн, в САПР была разработана сверхширокополосная антенная система для радиотехнического комплекса, обеспечивающая улучшенные характеристики.

Имитационная модель антенны сверхширокополосной антенной системы представлена на рисунке 1.

Антенна сверхширокополосной антенной системы состоит из элементов:

- Н-секториальный рупор Вивальди, изображенный на рисунке 2 и состоящий из разъема, диэлектрическая вставки разъема, возбuditеля с центральной жилой разъема (стержень), двух ножей Вивальди, резонатора (волновода) и раскрыва рупора);

- металлический лоток;
- металлический зажим для фиксации рупора;
- диэлектрическая линза;
- поглотитель ХВ-2;
- обтекатель.

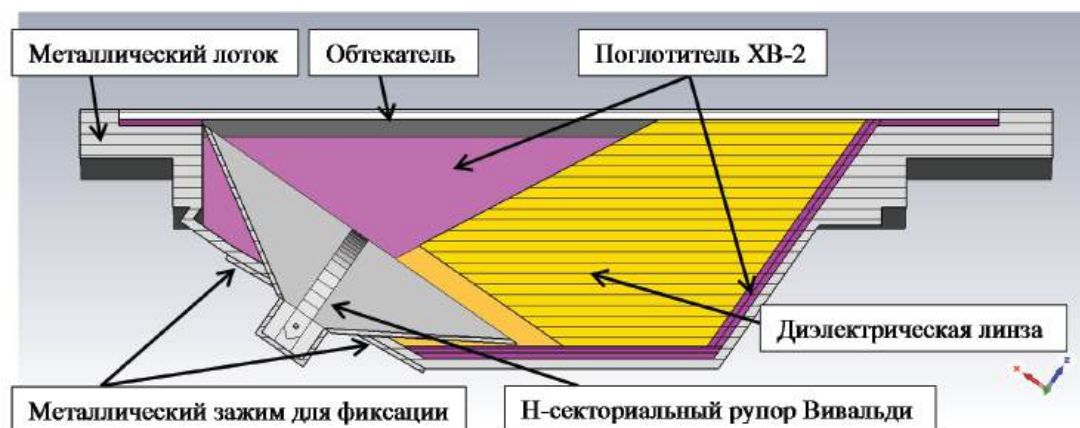


Рисунок 1 – Иммитационная модель сверхширокополосной антенной системы

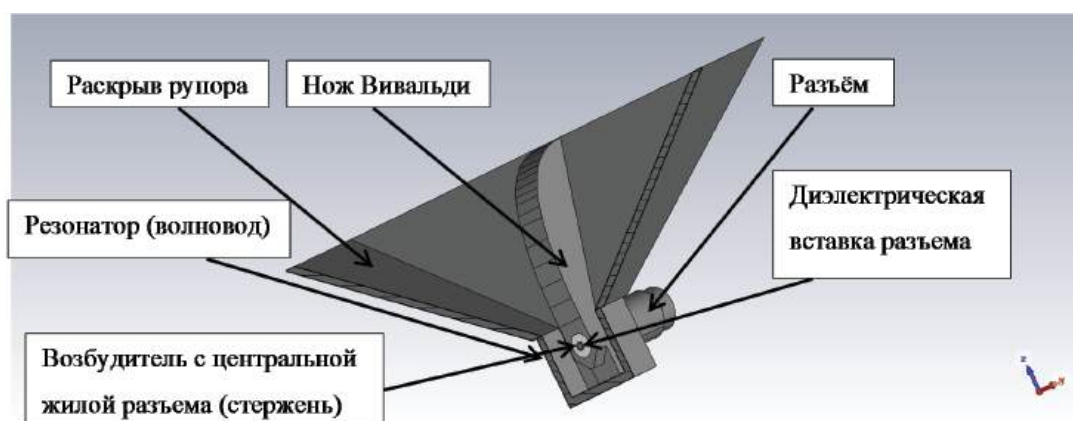


Рисунок 2 – Состав Н-секториального рупора Вивальди антенны сверхширокополосной антенной системы в разрезе

Так, блок антенный не выступающего за поверхность размещения, на отечественных материалах, на основе широкополосного Н-секториального рупора, продольного излучающего через открытый волновод и диэлектрическую линзу формирует требуемую диаграмму направленности вдоль объекта-носителя в широком диапазоне частот.

С учётом введенных обозначений, график коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) для антенн сверхширокополосной антенной системы имеет вид, представленный на рисунке 3.

Диаграмма направленности для антенн сверхширокополосной антенной системы на фрагменте объекта-носителя представлена на рисунке 4.

Развязка диаграммы направленности для антенн сверхширокополосной антенной системы на фрагменте объекта-носителя в диапазоне частот представлена на рисунке 5.

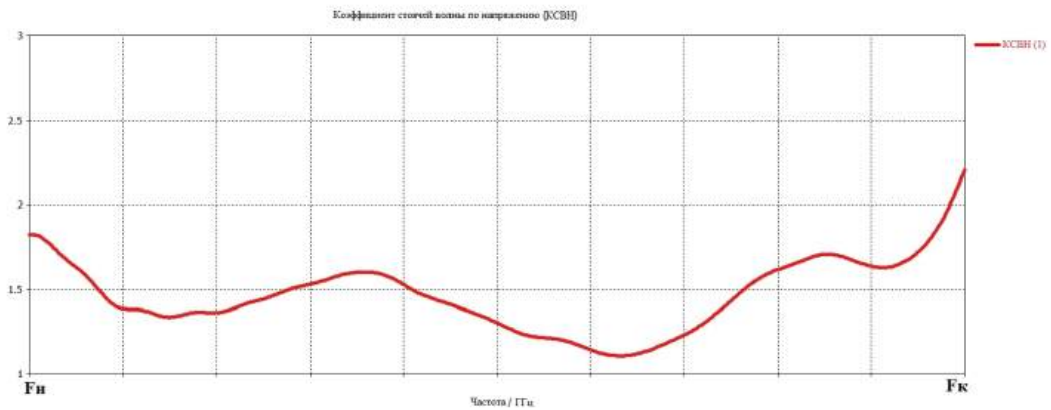


Рисунок 3 – График КСВН антенн сверхширокополосной антенной системы

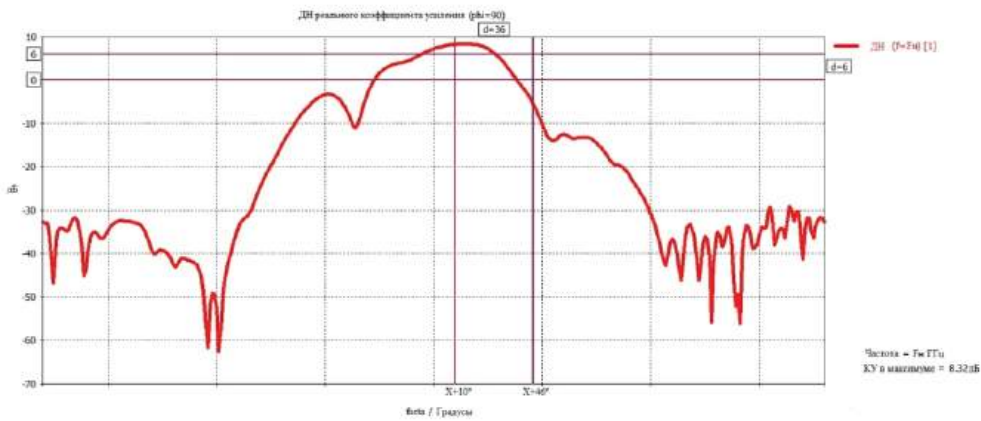


Рисунок 4 – ДН антенн сверхширокополосной антенной системы в заданном секторе по углу места



Рисунок 5 – Развязка ДН для антенн сверхширокополосной антенной системы на начальной частоте в заданном секторе по углу места

Заключение

В результате проведенной работы разработана антенна сверхширокополосной антенной системы с необходимыми основными характеристиками, с большим коэффициентом усиления в заданном секторе направлений, необходимой развязкой в заданном секторе направлений и меньшим значением КСВН в рабочем диапазоне частот, имеющая меньший вес и внутренние габариты, выполненная на отечественных материалах и лёгким доступом к разъёму подключения антенны.

Литература

- 1 Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Воскресенского Д.И. Москва: Радиотехника, 2006. 376 с.
- 2 Duhamel R.H. Dual Polarized Sinuous Antennas. U.S. Patent 4,658,262, April 14, 1987.
- 3 Begaud X. Analyse d'Antennes et de Réseaux d'Antennes Large Bande et Bipolarisation par une Méthode d'Eléments Finis de Surface. Thesis. University of Rennes 1, December 19, 1996.

Ходунов Валентин Алексеевич – заместитель начальника отдела, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И.Берга», г. Москва.

Область научных интересов: радиоэлектронная борьба, радиоэлектронные системы.
E-mail: hodunov_valentin@mail.ru.

Почтовый индекс: 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, 20/9.

Башкетов Александр Александрович – начальник сектора, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И.Берга». 107078, г. Москва.

Область научных интересов: радиоэлектронная борьба, радиоэлектронные системы.
e-mail: Alexandr00006@yandex.ru

Почтовый индекс: 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, 20/9.

DEVELOPMENT OF AN ULTRA-WIDEBAND ANTENNA SYSTEM FOR RADIO PROTECTION EQUIPMENT

The article presents material on the development of an antenna system used in electronic warfare equipment. The basic requirements for the design and characteristics of the antenna of radio protection equipment are presented. Aspects of the fundamentals of the development of an ultra-wide-band antenna system are considered and the results of modeling the developed ultra-wide-band antenna system are presented.

Keywords: outflow wave antenna; horn antenna; ultra-wideband antenna system; radiation pattern decoupling level; dielectric constant.

Khodunov Valentin Alekseevich – postgraduate student, Deputy head of the scientific and thematic department of antenna-feeder devices, JSC "CSRREI named after Academician A.I.Berg".

Research interests: electronic warfare, electronic warfare systems.

Basketov Alexandr Alexandrovich - postgraduate student, the head of the sector, JSC «Central Scientific Research Radio Engineering Institute named after Academician A.I.Berg».

Research interests: electronic warfare, electronic warfare systems.

ВЫЯВЛЕНИЕ СБОЕВ РАБОТЫ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ В МПУ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА ИЗДЕЛИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТИ

Новожилов И.С.

В статье рассматривается возможность применения нейронных сетей в задачах прогнозирования выхода погрешности датчиков температуры за границы доверительного интервала под влиянием внешних воздействующих факторов. На наборах данных, составленных из данных, полученных в процессе проведения испытаний на макете пусковой установки, проведены обучение и верификация разработанной сети. Показана эффективность прогнозирования для различного количества эпох обучения. Положительные результаты данного исследования позволяют сделать вывод о перспективности применения нейронных сетей для решения задач прогноза выхода погрешности датчиков температуры за границы доверительного интервала под влиянием внешних воздействующих факторов.

Ключевые слова: нейронная сеть, датчик, температура потока газа, погрешность, канал измерения, доверительный интервал.

Введение

Проведение испытаний макета изделия сопровождается выходом из строя датчиков, измеряющих тепловые режимы (температуры потока газа) в макете пусковой установки (МПУ), по тем или иным причинам, при этом их показания не всегда соответствуют действительности. На испытательной станции был проведен эксперимент по снятию основных параметров тепловых режимов в МПУ. Полученные в ходе эксперимента статистические данные легли в основу обучающей выборки для нейронной сети (НС). Для решения проблемы с предсказанием одного из параметров было принято решение по созданию НС. В качестве предсказываемого параметра приняли погрешность датчиков измеряющих температуру потоков газа. НС представляет собой сеть простой архитектуры типа перцептрон в виду небольшого числа необходимых параметров (3 базовые характеристики) с одним скрытым слоем, разработанная на современном языке программирования *Python*. После полного обучения НС был проведен тест на правильность предсказания на основе тестовых данных. При достаточном количестве циклов обучения эффективность составляет более 80 % верных предсказаний, что свидетельствует о высокой точности, разработанной НС. Данное предсказанное значение погрешности датчика сравнивается с доверительным интервалом и на основе этого делается вывод о необходимости замены или калибровки датчика. Данная функция позволяет усовершенствовать существующие системы поддержки принятия решений (СППР), снизив процент ложных предсказаний [1].

1 Постановка задачи

Полученные в ходе эксперимента статистические данные могут лечь в основу обучающей выборки для НС. Такая программа может помочь решить ряд задач. Пример решения одной из задач описан ниже. На практике соответствующие метрологические службы регулярно проводят калибровку и ремонт приборов и датчиков, установленных в МПУ. Однако с момента обнаружения неисправного датчика до момента восстановления его работоспособности проходит некоторое время. Длительность этого времени (времени восстановления) есть случайная величина, которая зависит от множества факторов. В связи с этим актуальным выглядит вопрос быстрого обнаружения неисправного датчика. Сложность проблемы заключается в том, что параметры неисправного датчика могут не выходить за пределы погрешности измерения, а также наоборот, при определенных режимах выйти за пределы погрешности измерений при работоспособном состоянии датчика. Если предсказанное значение погрешности выходит за границы доверительного интервала, датчик будет считаться неисправным. Математически это условие выглядит так: если

$$\left| \frac{y_{\text{изм}} - y_{\text{предс}}}{y_{\text{изм}}} \right| \cdot 100\% > \sigma, \quad (1)$$

где $y_{\text{изм}}$ – измеренное значение температуры потока газа с датчика;

$y_{\text{предс}}$ – предсказанное значение температуры потока газа с датчика;

σ – относительная погрешность канала измерения температуры потока газа, рассчитанная на основе технической документации на средство измерения, то датчик неисправен.

2 Выбор параметров нейронной сети

Для рассматриваемой задачи будем использовать НС прямого распространения типа перцептрон с наличием скрытых слоев, подобную тем, что описаны в работах [2-4]. Особенности данной НС, находящие применение в практических задачах, заключаются в возможности классификации объектов и аппроксимации границ классов и функций, основным достоинством сети такого типа является относительная простота реализации, которая и обусловила выбор для решения поставленной задачи. Однако у перцептронов имеются и свои недостатки, например, неспособность анализировать сложные ситуации, что для рассматриваемого случая не имеет большого значения.

Для решения проблемы с предсказанием погрешности измерения температуры потока газа датчиком было принято решение о создании НС. Языком написания НС был выбран *Python* в среде *Anaconda 3* с использованием библиотек *pandas* и *numpy* для удобного взаимодействия с данными, записанными в файлах формата *.xls*, структурная схема данной НС приведена на рисунке 1. В этой НС используется слой входных нейронов, на которые подаются численные значения погрешности измерения температуры потока газа, один скрытый слой и выходной слой, состоящий из нейрона, в котором производится вычисление результата.

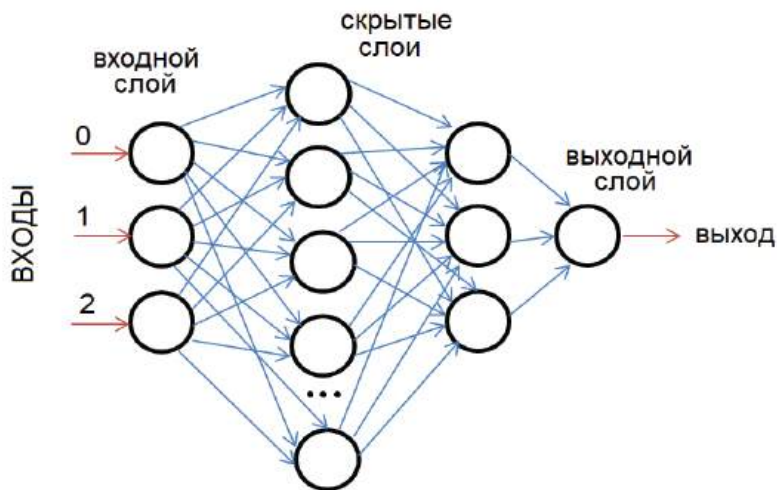


Рисунок 1 – Структурная схема разработанной НС

При использовании небольшого количества скрытых слоев эффективно использовать в качестве функции активации нейронов сигмоиду [5], в математическом виде, которая определяется как

$$f(x) = \frac{L}{1 + e^{-kx}}.$$

При расчете обратного распространения ошибки используется производная функции активации, для данного случая при наличии уже рассчитанного значения логистической функции равная

$$f'(x) = f(x)(1 - f(x)).$$

3 Обучение и верификация нейронной сети

Для обучения разработанной НС использованы данные нормированных значения погрешности измерения температуры потока газа трёх датчиков $\sigma_1 \dots \sigma_3$. Данные, пример которых представлен в таблице 1, оформлены в программе Excel.

Т а б л и ц а 1 – Пример обучающих наборов данных.

$\sigma_1, \%$	$\sigma_2, \%$	$\sigma_3, \%$	output
0	0	0	0
0	0	0,1	0
0	0	0,2	0
0	0	0,3	0
0	0	0,4	0
0	0	0,5	1
0	0	0,6	1
0	0	0,7	1
...			
1	1	1	1

Начальные значения весов связей в разработанной НС посредством функции *random* библиотеки *numpy* задаются набором случайных чисел, который корректируется в процессе обучения методом обратного распространения ошибки. Обучение нейронной сети производилось на 1320 наборах данных, проверка – также на 100 наборах. Для более точного обучения было принято решение выбрать количество эпох, равное 34 [6].

График эффективности прогнозирования НС, полученной в такой тестовой конфигурации, в зависимости от количества проведенных эпох обучения, показан на рисунке 2.

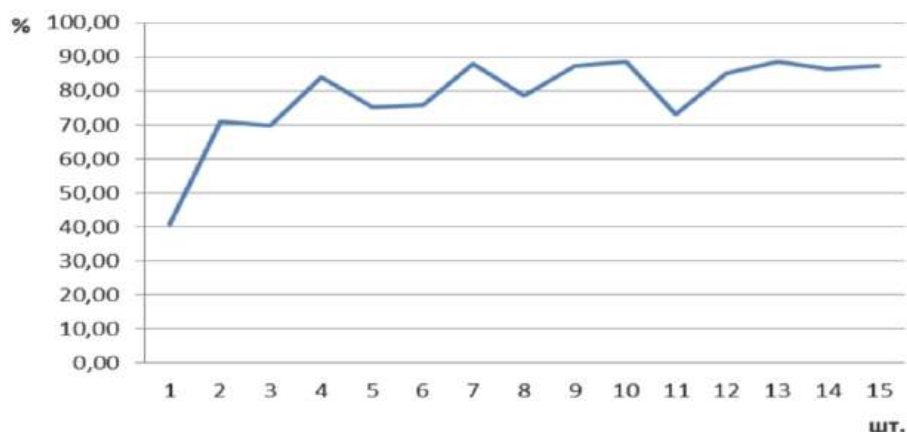


Рисунок 2 – Результативность разработанной НС

Если на любом из каналов измерений температуры газа приведённое значение погрешности становится равным или превышает 0,5 %, то принимаем, что тот или иной датчик температуры потока газа находится не в норме.

Как видно из рисунка 2, графики эффективности прогнозирования НС при обучении и валидации совпадают и увеличиваются с увеличением количества эпох обучения, а выбранное количество эпох слишком велико, можно было обойтись и меньшим количеством (например, 4-15). После полного обучения был проведен тест на правильность предсказания на основе тестовых данных (рисунок 3).

При достаточном числе циклов обучения эффективность составляет более 80% верных предсказаний (рисунок 3), что свидетельствует о высокой точности, разработанной НС. Предсказанное значение погрешности датчика сравнивается с расчётным значением погрешности канала измерения температуры потока газа и на основе этого делается вывод о необходимости замены или калибровки датчика. Данная функция позволяет усовершенствовать существующие СППР, снизив процент ложных предсказаний.

Name	Type	Size	Value
correct_classification_count	int	1	95
epoch	int	1	34
epoch_count	int	1	35
FE	float64	1	0.1308071695166134
gradient_HtoO	float64	1	0.007851934960665942
gradient_ItoH	float64	1	-0.0004036149240099507
H_dim	int	1	100
H_node	int	1	99
I_dim	int	1	3
I_node	int	1	2
input_value	float64	1	0.15999999999999998
LR	int	1	1
node	int	1	99
output	int	1	0
postActivation_H	Array of float64 (100,)		[0.4558415 0.44329956 0.4977861 ... 0.48351458 0.5210969 0.52112052 ...]
postActivation_O	float64	1	0.15346375146194743
preActivation_H	Array of float64 (100,)		[-0.17709539 -0.22778153 -0.00885564 ... -0.06596559 0.08443774 0.0 ...]
preActivation_O	float64	1	-1.7076806300072551
S_error	float64	1	0.014872337482741391
sample	int	1	98
target_output	Series	(99,)	Series object of pandas.core.series module
training_count	int	1	99
training_data	Array of float64 (99, 3)		[[0.4 0.0 0.] [0.75 0.1 0.15]
validation_count	int	1	99
validation_data	Array of float64 (99, 3)		[[0.2 0.18 0.124] [0.375 0.03 0.119]
validation_output	Series	(99,)	Series object of pandas.core.series module
weights_HtoO	Array of float64 (100,)		[0.02463093 -0.68899757 -1.25831273 ... -2.94368699 0.70651512 -0.0 ...]
weights_ItoH	Array of float64 (3, 100)		[[-0.44216208 -1.11958218 -0.87438577 ... -2.37011579 0.36033343 -0.0 ...]

Рисунок 3 – Результат обучения

Заключение

Существующие методики оценки тепловых режимов в МПУ имеют ряд недостатков, среди которых генерация ложных сообщений СППР, связанная с неисправностью датчика. Неисправность датчика зачастую сложно диагностируемая ситуация. Датчик может быть физически неразрушенным, но при этом выдавать неверную информацию. Чтобы избежать подобных ситуаций, с точки зрения теории надежности, необходимо использовать избыточные (дублирующие элементы). Однако избыточный элемент, находясь в тех же условиях эксплуатации, из-за одних и тех же явлений окружающей среды может выдавать искаженную информацию. Чтобы избежать эксплуатации нескольких элементов (основного и избыточного) в одних и тех же ненормированных условиях, целесообразно применять дублирующий элемент в виде виртуального прибора, который выдает сигнал о состоянии объекта измерения на основе вычислений.

Статья посвящена разработке метода повышения точности работы СППР за счет применения НС, оперативно отслеживающей состояние датчиков СППР. Данный метод в конечном итоге, несмотря на относительную простоту устройства созданной НС, показал хорошую эффективность даже на небольших наборах, обучающих данных.

Перспективным направлением исследований в данной области является использование для обучения и верификации больших по объему наборов данных для большего количества датчиков для измерения температуры газа. Более сложные задачи, имеющие непосредственное практическое значение, потребуют и более детальной разработки структурно более сложных НС различных типов.

Литература

1 Филинков Л.И., Лихтер А.М. Анализ подходов к созданию системы поддержки принятия решений по снижению выбросов в воздух от котельных // Прикасп. журн.: управление и высокие технологии. 2019. № 3. С.10-17.

2 Ширшова Д.В. и др. Разработка нейросетевой системы для аппроксимации функций многослойным перцептроном // Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития: Сборник. С.94

3 Епихин А.И. Применение нейронных сетей на базе многослойного перцептрона с использованием нечеткой логики для технической диагностики судовых технических средств / А.И. Епихин, С.И. Кондратьев, Е.В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 3(96). С. 111-119.

4 Глухов Ю.А. Разработка устройства для экспертной диагностики систем на основе нечеткой логики нейронных сетей / Ю.А. Глухов, А.П. Частиков, В.Г. Корниенко, С.П. Глушко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 98. С. 320-331.

5 Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М., 2008.

6 Столяров И.И. Прогнозирование изменений характеристик электрорадиоизделий под влиянием внешних воздействующих факторов с использованием нейронной сети // Радионавигация и время: труды СЗРЦ концерна ВКО «Алмаз-Антей». СПб.: Балтийская печать, 2021. С. 90-95.

Новожилов Илья Сергеевич – аспирант, ведущий инженер-конструктор, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: управление качеством продукции, стандартизация, организация производства.

E-mail: nowozhilow_ilja@mail.ru.

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

DETECTION OF SENSOR FAILURES BASED ON MEASUREMENT RESULTS OF THERMAL CONDITIONS IN THE MPU DURING TESTING OF THE PRODUCT LAYOUT USING A NEURAL NETWORK

The article considers the possibility of using neural networks in predicting the error of temperature sensors beyond the boundaries of the confidence interval under the influence of external influencing factors. Training and verification of the developed network were carried out on data sets compiled from data obtained during testing on a mock-up of the launcher. The effectiveness of forecasting for a different number of learning epochs is shown. The positive results of this study allow us to conclude that the prospects of using neural networks to solve problems of predicting the error of temperature sensors beyond the boundaries of the confidence interval under the influence of external influencing factors.

Keywords: neural network, sensor, gas flow temperature, error rate, measurement channel, confidence interval.

Ilya Sergeevich Novozhilov – postgraduate student, leading design engineer, JSC «Obukhov Plant», St. Petersburg.

Research interests: product quality management, standardization, production organization.

УДК 621.396.67(621.37)

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОГНИТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АТАКИ НА РЛС В УСЛОВИЯХ ДУЭЛЬНОЙ СИТУАЦИИ

Просви́ров А.В., Каля́бин Е.В.

С точки зрения дуэльной ситуации летательный аппарат – радиолокационная станция проанализированы возможности когнитивной радиоэлектронной борьбы, описаны её основные этапы и процессы. Представлена функция оценки эффективности помех при проведении когнитивной электронной атаки, в которой изменение степени угрозы для ЛА использовалось в качестве показателя эффективности помех. Затем на основе алгоритма Q-обучения разрабатывалась модель генерации интеллектуальной стратегии противодействия и формализовались основные шаги этой модели. Наконец, совместное использование моделей ОЭП и ИСПД в имитационном моделировании операций КЭА показало, что применение этих двух моделей представляет основной процесс функционирования КРЭБ.

Ключевые слова: когнитивная радиоэлектронная борьба; обучение с подкреплением; электромагнитный спектр; искусственный интеллект.

Введение

С развитием и внедрением таких технологий, как искусственный интеллект, когнитивное радио, нейронные сети и машинное обучение значительно улучшились функциональные характеристики системы радиоэлектронной борьбы (РЭБ), что позволило говорить о новом этапе в её развитии – когнитивной радиоэлектронной борьбе (КРЭБ). Применение КРЭБ в дуэльной ситуации значительно сокращает время на пеленгацию и обработку зондирующих сигналов РЛС, принятия решений о постановке помех и оценке их эффективности.

Преимущества системы КРЭБ неоспоримы в сравнении с современными системами РЭБ, где необходимо присутствие оператора. Нейронные сети по точности распознавания изображений превосходят человеческие способности, вычислительный комплекс КРЭБ может выполнять одну и ту же задачу непрерывно и безошибочно 24 часа в сутки, любой алгоритм машинного обучения может быть продублирован в необходимое количество копий для параллельного применения, оперативность выполнения поставленной задачи искусственным интеллектом значительно выше, чем у оператора [1]. Таким образом, развитие и внедрение в практику РЭБ когнитивных методов является вопросом времени.

Дуэльная ситуация является базовой моделью для исследования применения системы КРЭБ в будущем и строится на рассмотрении цикла наблюдения или оценки ситуации, обучении, принятия решений и действий (петля НОРД). Исследование моделирования и симуляции КРЭБ как целостной оперативной концепции с точки зрения дуэльной ситуации является очень важным, что может способствовать пониманию оперативного и технического механизма операций КРЭБ, осознанию их огромной боеспособности и выявлению оперативных эффектов.

В настоящее время мало опубликовано результатов теоретических исследований КРЭБ в стране и за рубежом, а тем более, практически отсутствуют данные о реализации КРЭБ в конструктивном исполнении [1]. Несмотря на то, что системы КРЭБ в состоянии самостоятельно (без участия человека – оператора) определять цели, планировать и вести активные действия, их возможности пока исследуются исключительно теоретически.

1 Оперативный анализ КРЭБ на основе цикла НОРД

Основным ресурсом, за который борются обе стороны радиоэлектронной борьбы, является электромагнитный спектр. Все операции РЭБ проводятся в сложной электромагнитной сигнальной обстановке, и тот, кто сможет занять и использовать более широкое электромагнитное пространство, сможет перехватить инициативу в РЭБ.

Когнитивная система РЭБ способна в режиме реального времени корректировать стратегии атаки и защиты на основе данных, полученных из окружающей среды, используя оперативные оценки эффективности, а также результаты обучения и накопления знаний. Через замкнутый цикл операционного процесса будет внедрена интеллектуальная и эффективная РЭБ. Операции КРЭБ в соответствии с моделью петли НОРД позволяют эффективно реагировать на сложную электромагнитную обстановку. Анализ КРЭБ с точки зрения НОРД помогает понять весь процесс и ключевые звенья КРЭБ, а затем построить цепочку операций, которые в дуэльной ситуации представляют собой замкнутый цикл и состоят в основном из четырех процессов, а именно: «когнитивный перехват – когнитивная обработка данных – когнитивное принятие решений – когнитивная постановка помех».

Когнитивный перехват фиксирует сигналы окружающей среды о целях посредством динамического восприятия электромагнитной обстановки, а также определяет параметры сигналов и хранит их. При поддержке базы знаний о сигнальных признаках (БЗСП) когнитивная обработка данных использует интеллектуальный анализ сигналов и другие методы для извлечения, определения местоположения и идентификации сигнальных признаков, а также для оценки угроз от этих сигналов. Благодаря унифицированной, стандартизированной структуре базы знаний генерируются новые знания о новых характеристиках сигналов и угроз, которые позволяют обновлять базу знаний. Когнитивное принятие решений с помощью базы знаний о производительности помех и стратегиях постановки помех анализирует текущие характеристики целевого сигнала, оценивает предыдущую эффективность постановки помех, динамически генерирует новую и более подходящую стратегию противодействия и обновляет базы знаний об эффективности помех (БЗЭП) и о стратегиях постановки помех (СПП). Модуль когнитивного подавления с помощью базы знаний по управлению питанием (БЗУП) рационально распределяет энергию каждого импульса помех, выполняет контроль и управление мощностью передатчика.

В операциях КРЭБ когнитивный перехват и когнитивная обработка представляют собой операции когнитивной электронной разведки (КЭР), а когнитивное принятие решений и когнитивная постановка помех представляют собой операции когнитивной атаки. Поскольку КЭР фиксирует и обрабатывает радиоэлектронные сигналы, она акцентируется на моделировании и вычислениях параметров сигналов, что явля-

ется довольно сложной задачей в рамках рассмотрения дуэльной ситуации. В то же время, основная деятельность КЭА заключается в создании и использовании баз данных, что может быть достаточно полно исследовано в модели дуэльной ситуации [2]. Результатом выполнения КЭР является предоставление данных, информации и разведывательной поддержки для осуществления операций КЭА. Поэтому, при исследовании дуэльной ситуации основным объектом моделирования является КЭА.

2 Метод моделирования КЭА с применением модели обучения с подкреплением

Появление технологий и оборудования КРЭБ изменило форму традиционной радиоэлектронной борьбы, так что, когда система КРЭБ выполняет функции когнитивной атаки, она может менять тактику своих действий в соответствии с изменениями характеристик зондирующих сигналов и рабочего состояния РЛС противника. Это позволяет оценить эффект от действий КЭА в режиме онлайн [3]. Такой подход имеет сильное сходство с моделью машинного обучения (МО) с подкреплением. По сути, МО – это высокий уровень обобщения когнитивной атаки, использующий машинное обучение. Методы машинного обучения успешно применяются в КРЭБ. Это свидетельствует о том, что процесс обучения системы КРЭБ в значительной степени согласуется с моделью МО, а система КРЭБ использует учебную среду через применение МО.

Ввиду сходства между моделью МО и функциями КЭА, модель МО может служить прототипом и справочным материалом для моделирования КЭА. Классическая модель МО представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Классическая модель МО

В сущности, модель включают в себя две категории: агента и окружающую среду. Агент может выполнять действия, в то время как окружающая среда является интерактивным объектом, поведение которого не поддается контролю. Основные

функции агента заключается в следующем: во-первых, агент наблюдает за окружающей средой для получения информации о её состоянии; во-вторых, агент генерирует выполнение действий в соответствии с данными, полученными от КЭР, и оценивает степень угрозы после постановки помех. Агент повторяет вышеуказанные шаги непрерывно. Рабочий поток среды выглядит следующим образом: во-первых, выработка действий агента и реакция на эти действия; во-вторых, передача состояния окружающей среды после постановки помех и оценка степени угрозы в режиме онлайн. Конечная цель модели МО – минимизировать степень угрозы.

В соответствии с моделью МО может быть построена операционная модель КЭА, схема которой представлена на рисунке 2.

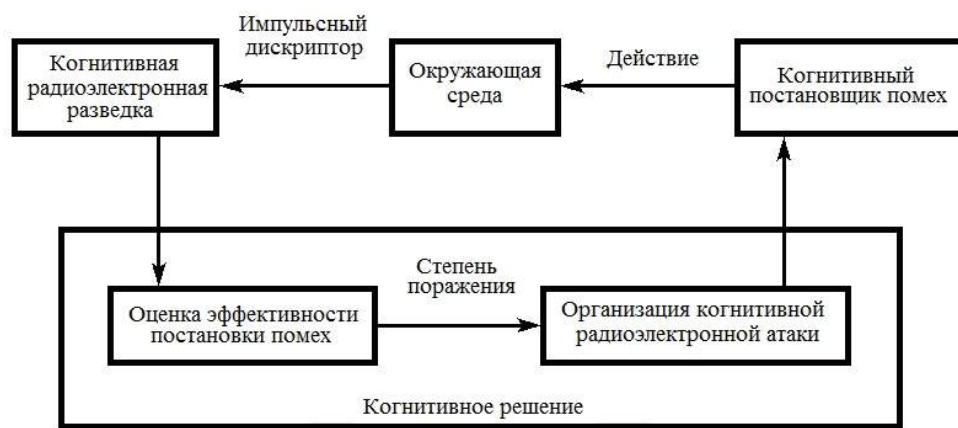


Рисунок 2 – Схема операционной модели КЭА

Рабочий процесс операционной модели КЭА выглядит следующим образом:

Шаг 1: Модуль КЭА получает дескриптор приёмника (ДП), сгенерированный операциями КЭР, который аналогичен состоянию S_i , полученному от агента из окружающей среды в модели МО. Затем перейти к шагу 2.

ДП используется для описания основных параметров, характеризующих зондирующий сигнал, полученный в процессе сортировки, идентификации, определения местоположения и угрозы от действий РЛС. Форма BNF ДП выглядит следующим образом

$$\text{ДП} = \langle \text{ПРЛС} \rangle \langle \text{ДИ} \rangle \langle \text{ЧПИ} \rangle \langle \text{РС} \rangle \langle \text{ПТИ} \rangle \langle \text{ТИ} \rangle \langle \text{РСИ} \rangle \langle \text{УРУ} \rangle \quad (1)$$

где $\langle \text{ПРЛС} \rangle$ – положение РЛС;

$\langle \text{ДИ} \rangle$ – длительность импульса;

$\langle \text{ЧПИ} \rangle$ – частоту повторения импульсов;

$\langle \text{РС} \rangle$ – радиационную систему;

$\langle \text{ПТИ} \rangle$ – применение типа излучения;

$\langle \text{ТИ} \rangle$ – тип излучения;

$\langle \text{РСИ} \rangle$ – рабочее состояние излучения;

$\langle \text{УРУ} \rangle$ – уровень радиационной угрозы.

Шаг 2: В соответствии с изменением ДП до и после постановки помех используется модель ОЭП, основанная на фиксации сбоев в работе РЛС. Полученная таким образом информация, аналогично той, которую получает агент об изменении угрозы

после постановки помех. Затем перейти к шагу 3.

Для оценки эффективности действия помех используют методы, основанные на измерении уровня мощности или формы зондирующего импульса. Критерии оценки включают в себя информационные данные, уровень питания, условия эффективности и т.д. Определяющими параметрами являются мощность, расстояние, частота, время, стиль и т.д.

Шаг 3: Изучается ситуация с помехами и использованием модели генерации стратегии ИСПД для выбора лучшей схемы постановки помех. Принимается решение о постановке помех (РПП), аналогично действиям в модели МО. Затем перейти к шагу 4.

Сигнал ПП необходим для оптимизации и управления диаграммами направленности помех, формой помехового сигнала и ресурсами помех. С учетом требований конфронтационного и численного моделирования дуэльной ситуации, данная работа рассматривает решение интерференционной стратегии (РИС), как наиболее важное, и может быть выражено в виде РПП, которое формально описывается в виде

$$\text{РПП} = \langle \text{РИС} \rangle. \quad (2)$$

Доступные методы обучения с подкреплением в основном представляют собой различные типы безмодельных алгоритмов обучения с подкреплением, включая алгоритм Монте-Карло и алгоритм временных различий.

Шаг 4: Генерируется интерференционный сигнал в соответствии с решением о постановке помех, оптимизируются ресурсы помех и снова глушится зондирующий сигнал по аналогии с агентом, выполняющим действие в модели МО.

3 Модель оценки эффективности постановки помех

Оценка эффективности постановки помех необходима для реализации замкнутого цикла КРЭБ, в результате работы которого преобразуется информация, полученная в ходе операций КЭР в данные, необходимые для когнитивного принятия решений, и обеспечения оптимального направления КЭА [4]. Только точная и достоверная оценка параметров помех может обеспечить эффективную обратную связь для коррекции действий КЭА при машинном обучении. Такой подход, принципиально отличающийся от традиционной РЭБ, является одной из важных особенностей КРЭБ. Его применение позволяет сделать саму систему РЭБ автономной и способной работать непрерывно, без участия оператора. Обнаруживая информацию окружающей среды и анализируя изменения характеристик зондирующего сигнала, учитывая особенности поведения и изменение рабочего состояния РЛС из-за применения постановщика помех, модуль КЭА может оценить эффективность помех и определить количественно управляющие сигналы для корректировки алгоритма постановки помех. Исследуя дуэльную ситуацию, в качестве примера, рассмотрим постановку помех РЛС на многофазную антенную решетку.

3.1 Качественный анализ характеристик помех и состояния РЛС

Известно, что существует определенная корреляционная связь между характеристиками помех и состоянием РЛС. Это является основой для моделирования оценки эффективности постановки помех в режиме реального времени. Если РЛС находится

в разных рабочих режимах, характеристики помех различных методов постановки помех при выполнении КЭА будут отличаться, даже характеристики помех одного и того же метода постановки помех могут быть разными. Изменения рабочих режимов РЛС после КЭА могут быть использованы для оценки эффективности постановки помех.

Когда РЛС находится в режиме пеленгации, постановка эффективных помех нарушает обработку радиолокационного сигнала и делает невозможным захват цели. В этом случае РЛС работает только в режиме пеленгации. Если же постановка помех будет недостаточно эффективна, то РЛС перейдёт в режим сопровождения [5]. Когда РЛС находится в состоянии сопровождения, постановка эффективных помех приведёт к тому, что РЛС не сможет стабильно отслеживать цель или даже потеряет её и снова перейдёт в режим пеленгации или сохранит режим сопровождения ложной цели. В противном случае, малоэффективные помехи не повлияют на работоспособность РЛС и последует идентификация цели и режим наведения.

Взаимосвязь между характеристиками помех и рабочими режимами РЛС может быть представлена диаграммой перехода состояний, как показано на рисунке 3.

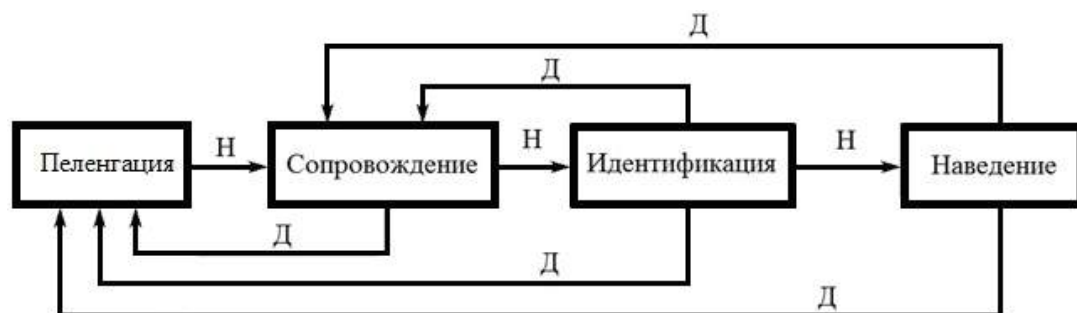


Рисунок 3 – Диаграммой перехода состояний

Рабочие режимы РЛС, а именно, S_1 = Пеленгация, S_2 = Сопровождение, S_3 = Идентификация, S_4 = Наведение составляют набор состояний $S = \{S_i\}$ ($1 \leq i \leq 4$). Модели помех, действующих на РЛС, обозначаются следующим образом: J_1 =Прицельная помеха, J_2 =Заградительная помеха, J_3 =Перестраиваемая по частоте помеха, J_4 =Увод строга дальности, J_5 =Увод строга скорости, J_6 =Кросс-поляризационная помеха, J_7 =Помеха «антипод» и входят в базу данных для имитационного моделирования. Индекс «Д» – соответствует возможности постановки помех, индекс «Н» – отрицает постановку помех. Матрицу переходов рабочих режимов РЛС ST можно представить в следующем виде:

$$ST = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

где ST – матрица переходов рабочих режимов, строки и столбцы отображают все рабочие состояния.

Значение "1" указывает на то, что состояние S_p ($1 \leq p \leq 4$) строки может быть

напрямую преобразовано в состояние S_q ($1 \leq q \leq 4$) столбца, в то время как "-1" указывает, что состояние S_p не может быть напрямую преобразовано в состояние S_q . Например, $ST(2,3) = 1$ указывает, что S_2 может быть напрямую преобразовано в состояние S_3 .

3.2 Функция оценки эффективности помех на основе анализа угроз

В момент t операции КЭА используются модели помех $J_1 \in J$ для глушения РЛС, которая находится в рабочем состоянии $S_1 \in S$. После применения помех КЭР ЛА обнаруживает РЛС и получает данные наблюдения O_{t+1} , а рабочее состояние РЛС изменяется на $S_{t+1} \in S$. Когда применение помехи снижает потенциальную угрозу РЛС для ЛА (за исключением режима поиска), глушение считается эффективным. В противном случае, пока угроза от действий РЛС постоянно возрастает или не изменяется, постановка помех считается неэффективной. Таким образом, изменение степени угрозы РЛС из-за постановки помех может быть использовано в качестве меры эффективности постановки помех.

В данной работе определена функция ОЭП, которая обозначается как Eff и используется для расчета характеристик помех J_t и выглядит следующим образом:

$$Eff(J_t|S_t, S_{t+1}) = P(S_{t+1}|J_t, S_t) \times R(S_t, S_{t+1}) = P(S_{t+1}|J_t, S_t) \times W(W(S_{t+1}) - W(S_t)) \quad (3)$$

где $W(\cdot)$ – функцией степени угрозы РЛС для ЛА,

$P(S_{t+1}|J_t, S_t)$ – вероятность эффективной постановки помех, которая указывает на то, что при рабочем режиме РЛС S_t и применении помех J_t , рабочий режим изменится на S_{t+1} , которая может быть получено с помощью имитационного теста,

$R(S_t, S_{t+1})$ – функция оценки степени угрозы для ЛА из-за изменения рабочего режима РЛС и $R(S_t, S_{t+1}) = W(W(S_{t+1}) - W(S_t))$.

В общем случае, чем больше отличаются режимы S_t и S_{t+1} , тем меньше вероятность постановки эффективной помехи. Рабочее состояние S_t может быть получено системой КРЭБ после обработки данных наблюдения O_t и включённых в дескриптор РЛС.

Если функция ОЭП $Eff(J_t|S_t, S_{t+1}) > 0$, то уровень угрозы снижается, и модель помех J_t является эффективной. В противном случае, если $Eff(J_t|S_t, S_{t+1}) \leq 0$ и $S_t \neq S_{t+1}$, то уровень угрозы увеличивается или остаётся неизменным, а модель помех J_t становится неэффективной. Значение функции ОЭП идентично функции оценки степени угрозы в модели МО и может служить основой для оптимизации действия помех.

4 Модель ИСПД на основе алгоритма Q-обучения

Рассматривается алгоритм применения модели ИСПД, с помощью которой можно управлять сценариями КЭА автоматически и автономно при анализе возможностей РЛС и ЛА в дуэльной ситуации. Модель ИСПД является ключевым и самым сложным элементом в моделировании когнитивной атаки. Основу модели составляет алгоритм Q-обучения, предложенный Уоткинсом и известный, как усовершенствованный алгоритм временных различий. Благодаря простоте алгоритма, быстрой сходимости и удобству использования, он широко применяется в теории машинного

обучения [6]. Принимая во внимание небольшой объем исходных данных и высокие требования к моделированию в реальном времени с применением алгоритма Q-обучения, в качестве примера рассматривается только интуитивно понятная стратегия противодействия для РЛС.

4.1 Описание задачи

Предположим, что набор рабочих режимов РЛС известен – S , а действие $a(a \in J)$ представляет собой некоторую интерференционную картину. Все варианты постановки помех могут быть использованы для любого состояния s , то есть $\forall s \in S, A(s) = J$. Выполнение алгоритма основано на исследовании поведения функции «состояние - действие» $Q(s, a)$. $Q(s, a)$ – это функция Q , которая указывает, что при состоянии s , ожидается максимальное уменьшение угрозы со стороны РЛС при следующей оценке степени угрозы при условии выполнения действия a , и представляет собой качественный показатель конкретного действия в данном состоянии, как показано в уравнении

$$Q^\pi(s, a) = E_\pi\{R_t | S_t = s, A_t = a\} = E_\pi\{\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} | S_t = s, A_t = a\}, \quad (4)$$

где π – это стратегия, которая указывает на правило выбора действия в каждом состоянии,

$\gamma (0 \leq \gamma \leq 1)$ – это коэффициент уменьшения угрозы, который указывает на относительную долю уменьшения будущих угроз,

R_t – это функция оценки степени угрозы, когда состояние $S_t = s$, а действие $A_t = a$, которое может быть представлено функцией оценки степени угрозы $R(s, a)$.

Зная степень угрозы $W(s)$ каждого состояния s и функцию оценки эффективности помехи $Eff(J_t | S_t, S_{t+1})$, с помощью модели ИСПД можно найти оптимальную стратегию π^* такую, чтобы РЛС, в конечном счёте, оказалась в целевом состоянии $S_E = S_1$ с наибольшим ожидаемым уменьшением степени угрозы для ЛА независимо от исходного состояния.

Задача модели ИСПД состоит в том, чтобы обучить Q -функцию выбирать наилучшее действие, соответствующее каждому состоянию, а затем, сформировать оптимальную стратегию π^* . Когда обучение завершено, любое начальное состояние $s_s \in S$ является заданным и оптимальная стратегия когнитивной атаки и постановки помех может быть сгенерирована автономно [7].

4.2 Алгоритм построения модели ИСПД

Схема построения модели ИСПД на основе алгоритма Q-обучения показана на рисунке 4.

Основные этапы разработки данной модели заключаются в следующем:

Шаг 1. Инициализировать функцию Q и перейти к шагу 2.

В связи с тем, что количество элементов рабочего состояния РЛС равно $S=4$, а количество элементов набора моделей помех равно $J=7$, поэтому функция Q представлена нулевой матрицей размерностью 4×7 , в которой строка матрицы представляет состояние радара, а столбец представляет действие, которое может быть совершено.

Шаг 2: Если правило завершения обучения выполнено, то надо перейти к шагу 8. В противном случае перейти к шагу 3.

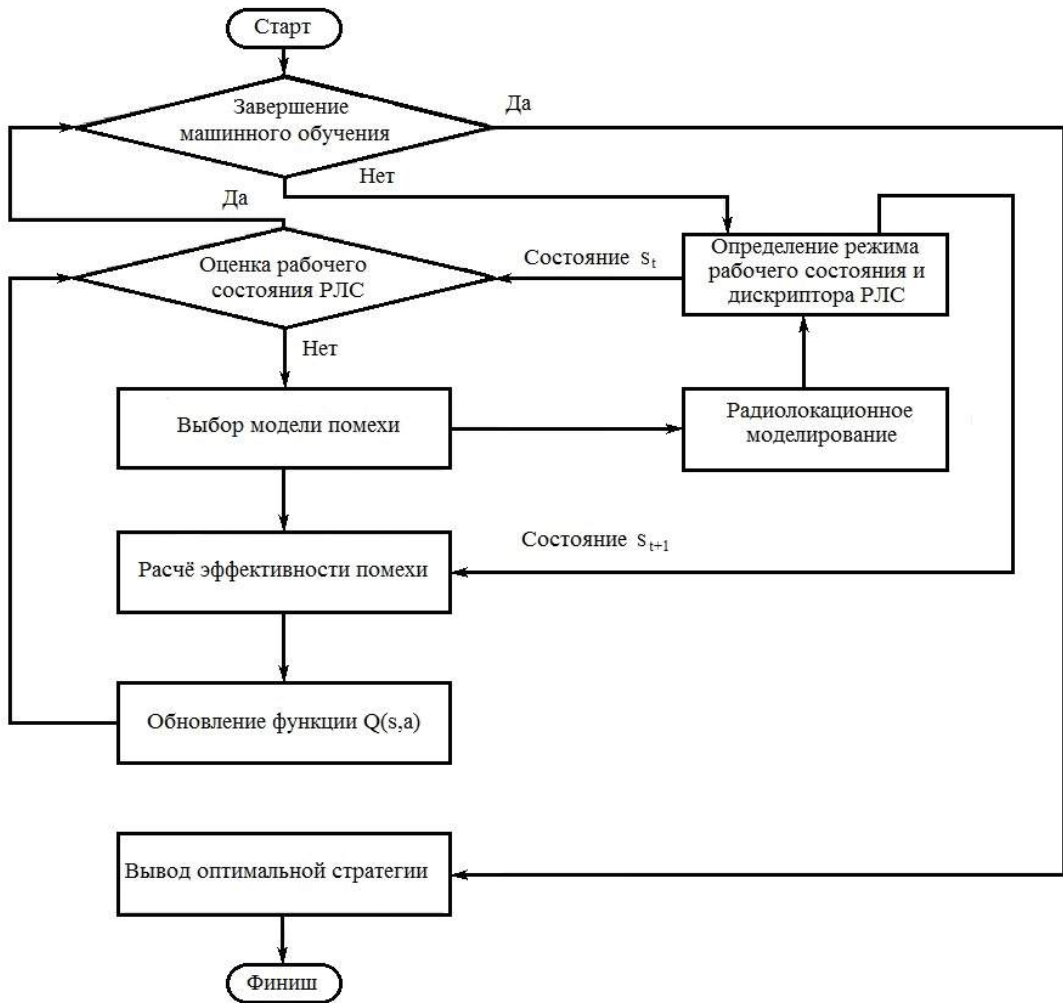


Рисунок 4 – Схема построения модели ИСПД

Условие завершения обучения включает в себя два правила, одно из которых – правило сходимости значений Q или $\Re(QStop)$, другое – правило итерации времени $\Re(QNum)$. $\Re(QStop)$ – означает, что процесс обучения прекращается, когда разница между значением $Q(s,a)$ двух последних экспериментов меньше или равна порогу сходимости ρ^Q . $\Re(QNum)$ – означает, что, когда время эксперимента превышает пороговое значение N^Q , умноженное на максимально возможное количество итераций, процесс обучения прекращается.

Шаг 3: По результатам работы ИСПД определить текущее состояние РЛС и перейти к шагу 4.

Шаг 4: Если целевое состояние $S_E = S_t$ не достигнуто, перейти к шагу 5. В противном случае перейти к шагу 2.

Шаг 5: В соответствии с правилом $\Re(\varepsilon Max)$ выбрать наиболее подходящую модель помех J_t в рамках действия a_t в наборе моделей помех J и перейдите к Шагу 6.

$\Re(\varepsilon Max)$ отражает процесс МО с подкреплением, где используются неизвест-

ные знания, полученного в результате расчётов Q-функции, (случайные величины) и известные ранее знания (базы данных), так что в процессе МО формируются наиболее эффективные известные и вновь выбранные действия.

Шаг 6: После выполнения действия a_t , когда модель помех J_t воздействует на РЛС, т.е. произвести когнитивную атаку, рабочее состояние РЛС s_t становится $S_{t+1} \in S$, которое получено средой моделирования дуэльной ситуации. Итеративно обновить функцию $Q(s,a)$ в соответствии с уравнением Беллмана (5), которое представлено ниже, и перейти к шагу 7.

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \times [R(s_t, a_t) + \gamma^{\max_a} Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)], \quad (5)$$

где α – коэффициент эффективности обучения;

$R(s_t, a_t) = \text{Eff}(J_t | S_t, S_{t+1})$ – оценка функции угрозы, основана на модели эффективности помехи Eff .

Шаг 7: Состояние s_{t+1} приравнять к текущему состоянию s_t . Затем перейти к шагу 4.

Шаг 8: Вывести оптимальную стратегию π^* согласно уравнению (6) и завершить процесс построения модели ИСПД.

$$\pi^* = \arg \max_a (Q^*(s, a)). \quad (6)$$

5 Имитационное моделирование КЭА

Представлены результаты имитационного моделирования КЭА в среде Matlab с применением ИСПД, которые показали, что автономный процесс принятия решений позволяет выбрать оптимальную стратегию в когнитивной РЭБ в условиях дуэльной ситуации.

5.1 Настройка среды имитационного моделирования

В результате операций КЭР формируется дескриптор описания особенностей излучения РЛС, а режим работы обозначается как s_t . Предполагается, что интервал времени между t и $t+1$ достаточно мал. Величина степени угрозы РЛС для ЛА $W(\bullet)$ количественно определяется методом экспертного анализа, таким как $W(S_1) = 0$, $W(S_2) = 30$, $W(S_3) = 40$, $W(S_4) = 100$. Таким образом, можно получить матрицу степени угрозы WR , как показано в уравнении (7). Каждый элемент $WR(x,y)$ ($1 \leq x,y \leq 4$) в этом уравнении представляет значение изменения угрозы при переходе из состояния S_x в состояние S_y .

$$WR = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 100 & -30 & -\text{inf} & -\text{inf} \\ 30 & 0 & -40 & -\text{inf} \\ 70 & 40 & 0 & -30 \\ 100 & 70 & -\text{inf} & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}. \quad (7)$$

Предполагается, что влияние всех семи моделей помех на изменение рабочего режима РЛС не зависит от начального состояния, и коэффициенты этих методов помех на изменение режима равны $JamFac(i) = (|J| - i + 1) / |J|$.

Используя матрицу степени угрозы WR и коэффициенты влияния помех

JamFac, можно получить матрицу производительности помех третьего порядка $|S| \times |S| \times |J|$, которая построена в виде матрицы $R = WR \times \text{JamFac}$, как показано в уравнении (8)

$$R(x, y, i) = WR(x, y) \otimes \text{JamFac}(i). \quad (8)$$

В условиях дуэльной ситуации необходимо моделировать изменение рабочего режима РЛС после постановки помех. А до постановки помех матрица вероятности перехода режимов работы РЛС РТ вычисляется в соответствии с уравнением (9), на основе предварительной базы данных, которая была ранее сформирована и находится в распоряжении ЛА

$$PT = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0,3 & 0,7 & 0 & 0 \\ 0,2 & 0,3 & 0,5 & 0,0 \\ 0,1 & 0,2 & 0,2 & 0,5 \\ 0,05 & 0,25 & 0 & 0,7 \end{pmatrix} \end{matrix}. \quad (9)$$

5.2 Анализ имитационного эксперимента

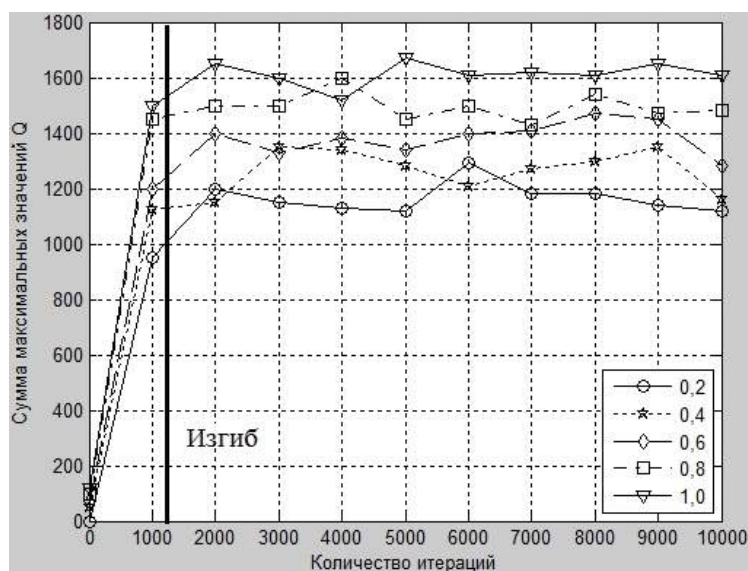
При моделировании приняты следующие исходные данные коэффициент оптимальности $\varepsilon=0,1$, коэффициент эффективности обучения $\alpha = 0,3$, коэффициент уменьшения угрозы $\gamma = 0,8$, порог числа итераций $N^Q = 10000$ и порог сходимости $\rho^Q = 1$, результирующая матрица Q-функции выглядит так, как показано в таблице 1.

Т а б л и ц а 1 – Результирующая матрица Q-функции

Q – функция	J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅	J ₆	J ₇
S ₁	482.67	466.90	447.86	431.98	414.59	404.00	391.18
S ₂	411.51	408.21	404.23	402.47	397.10	393.62	386.60
S ₃	366.42	359.25	349.20	343.10	339.91	331.84	324.98
S ₄	395.71	383.11	376.11	364.33	358.67	344.08	331.98

В соответствии с Q-функцией генерируется окончательная стратегия помех, соответствующая текущему режиму работы РЛС. Например, когда состояние РЛС равно S₁, что получено в результате машинного обучения, стратегия помех J₁ должна быть выбрана как оптимальная $\pi^*(S_1) = J_1$ на данный момент времени. Можно видеть, что стратегией постановки помех, соответствующей режиму работы РЛС в данный момент, является стратегия J₁, которая хорошо согласуется с эффективностью постановки помех.

Для исследования влияния α - коэффициента эффективности обучения на модель ИСПД были приняты следующие исходные данные: коэффициент оптимальности $\varepsilon = 0,1$, коэффициент уменьшения угрозы $\gamma = 0,8$, порог числа итераций $N^Q = 10000$ и порог сходимости $\rho^Q = 1$. Коэффициент эффективности обучения α последовательно принимает значения [0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0]. Графики зависимости между суммой максимальных значений Q-функции и количеством итераций представлен на рисунке 5.



Рисунке 5 – Графики зависимости между суммой максимальных значений Q -функции и количеством итераций

Исходя из общего тренда каждой кривой видно, что чем больше коэффициент эффективности обучения, тем больше сумма максимальных значений Q и тем лучше общий эффект интерференции процесса «проб и ошибок». При этом время нахождения точек изгиба каждой кривой мало чем отличается. Моделирование показывает, что фактор эффективности обучения может влиять на значения модели ИСПД, определяя наилучший эффект обучения, в то время как на скорость обучения он оказывает незначительное влияние.

Подводя итог, можно сделать вывод, что модель ИСПД, основанная на алгоритме Q -обучения, позволяет исследовать основной процесс работы КЭА, а также влияние коэффициента эффективности обучения.

Заключение

КРЭБ с применением технологии искусственного интеллекта значительно повышает оперативную эффективность и меняет «правила игры» радиоэлектронной борьбы [8]. В данной работе, исходя из требований моделирования дуэльной ситуации, анализируются основные процессы функционирования КЭА с точки зрения цикла НОРД. Создана модель ОЭП, основанная на интерференционном виде, и модель ИСПД, основанная на машинном обучении с помощью Q -функции, что позволило реализовать моделирование сценария КЭА. Общее время эксперимента по моделированию составляет около 5,2 сек и немного медленно для генерации постановки помех в режиме реального времени. Это происходит потому, что матрица рабочих режимов РЛС большая и непрерывно обрабатывается, в соответствии с последовательностью смены режимов. В будущем, технология Q -обучения может быть использована для работы с более сложными моделями.

Литература

- 1 Андреев Г.И., Тихомиров В.А., Замарин М.Е. Проблемы искусственного интеллекта в практической области радиоэлектронной борьбы // Радиотехника. 2024. Т.88. № 5. С.5-14.
- 2 Park, Nam, Noh Modeling and Simulation for the Investigation of Radar Responses to Electronic Attacks in Electronic Warfare Environments. Security and Communication Networks, Volume 2018, pp. 1-13.
- 3 Zhao, Xu A method of real-time electronic attack effectiveness evaluation based on state transition of radar. Elec. Inf. War. Tech., 2016, 31(3), pp. 42-46.
- 4 Андреев Г.И., Созинов П.А., Тихомиров В.А. Принципы принятия решений – основа критического исследования теории эффективности сложных технических систем / Под ред. П.А. Созинова. Радиотехника. 2021.
- 5 Nicholas, Warren Threat evaluation and jamming allocation. IET Radar. Son. Navi., 2017, 11(3), pp. 459-465.
- 6 Li, He, Zhan, Zhang Cognitive Electronic Jamming Decision-Making Method Based on Improved Q-Learning Algorithm. International Journal of Aerospace Engineering. Volume 2021, pp. 1-12.
- 7 Bansal, Mahajan Building Cognitive Radio System Using Matlab, International Journal of Electronics and Computer Science Engineering (IJECS), Vol. 1, Num. 3, pp.1555-1560.
- 8 Сидорин А.Н., Безродный А.Н. Перспективы применения технологий искусственного интеллекта в радиоэлектронной борьбе // Военная мысль. 2021, №12, С.108-118.

Просви́ров Андрей Викторович – аспирант, инженер 3 категории, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», г. Москва.

Область научных интересов: радионавигационные системы и комплексы, устройства РЭБ.

E-mail: prokofiev-a@mail.ru

Почтовый адрес: 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, 20/9.

Каля́бин Евгений Владимирович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», г. Москва.

Область научных интересов: радионавигационные системы и комплексы, устройства РЭБ.

E-mail: post@cnirti.ru.

Почтовый адрес: 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, 20/9.

SIMULATION OF A COGNITIVE ELECTRONIC ATTACK ON RADAR IN A DUELING SITUATION

From the point of view of the dueling situation, the aircraft (LA) – radar station (radar) analyzed the possibilities of cognitive electronic warfare (CRAB), described its main stages and processes. A function for evaluating the effectiveness of interference (OEP) during a cognitive electronic attack (CEA) is presented, in which a change in the degree of threat to aircraft was used as an indicator of the effectiveness of interference. Then, based on the Q-learning algorithm, a model for generating an intelligent counteraction strategy (ISPD) was developed and the main steps of this model were formalized. Finally, the joint use of the OEP and ISPD models in the simulation of CEA operations has shown that the application of these two models represents the main process of the functioning of the CRAB.

Keywords: cognitive electronic warfare; reinforcement learning; electromagnetic spectrum; artificial intelligence.

Prosvirov Andrey Viktorovich – postgraduate student, engineer of the 3rd category, JSC "TSNIRTI named after Academician A.I. Berg", Moscow city.

Research interests: radio navigation systems and complexes, electronic warfare equipment.

Kalyabin Evgeny Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, leading researcher, JSC "TSNIRTI named after Academician A.I. Berg", Moscow city.

Research interests: radio navigation systems and complexes, electronic warfare equipment.

УДК 530.12; 629.7.05

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ЗРИТЕЛЬНЫЙ ОБРАЗ УДАЛЕННОГО ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА

Сайбель А.Г.

Рассмотрено влияние на зрительный образ циклического движения объекта в плоскости наблюдения. Описаны три модели процесса распространения излучения. Представлены результаты моделирования для трех моделей процесса распространения излучения.

Ключевые слова: излучение; зрительный образ; наблюдение; скорость распространения; относительность.

Введение

В статье [1] рассмотрен один из аспектов формирования зрительного образа удаленного масштабного объекта в условиях наблюдения, характеризующихся наличием взаимного вращательного движения в паре объект-наблюдатель. Описанный эффект является частным случаем трансформаций зрительного образа объекта, имеющих место при нестационарном взаимном положении элементов исследуемой системы.

В рамках теории аберрации [2] сформулированы общие принципы формирования зрительных образов, в основе которых лежит тезис о наблюдении в фиксированной точке пространства в каждый момент времени совокупности одновременно сформированных элементов изображений, носителем которых являются электромагнитные волны, имеющие конечную скорость распространения. В зависимости от трактовки понятия скорости теория аберрации позволяет получить различные результаты, что актуализирует необходимость исследования влияния моделей относительного движения на результаты наблюдений.

Целью статьи является рассмотрение влияния на зрительный образ циклического движения объекта в плоскости наблюдения.

1 Модели системы объект-наблюдатель и распространения излучения

Предлагается исследовать следующую ситуацию. По круговой траектории движется излучающий объект A ; имеется неподвижная точка наблюдения B . Параметры траектории (рисунок 1): $O_{(2)} = \langle x_O, y_O \rangle = \langle 0, 0 \rangle$, $r = |OA| = 100$, $v_A = 10$, $B_{(2)} = \langle x_B, y_B \rangle = \langle 800, 0 \rangle$.

Для описания процесса прохождения излучением трассы AB можно выдвинуть три гипотезы о способе его распространения.

1) излучение распространяется как звук в воздухе: возникшее локальное возмущение среды в некоторой точке приводит к распространению данного воздействия сферическим фронтом с постоянной скоростью относительно точки излучения (предполагает наличие эфира);

2) скорость излучения от подвижного объекта складывается с составляющей вектора его движения в направлении точки наблюдения;

3) излучение распространяется как осколки гранаты при ее взрыве: в точке подрыва сосредоточенная масса, имеющая вектор скорости, начинает равномерно разлетаться сферическим фронтом, при этом центр масс сохраняет вектор скорости.

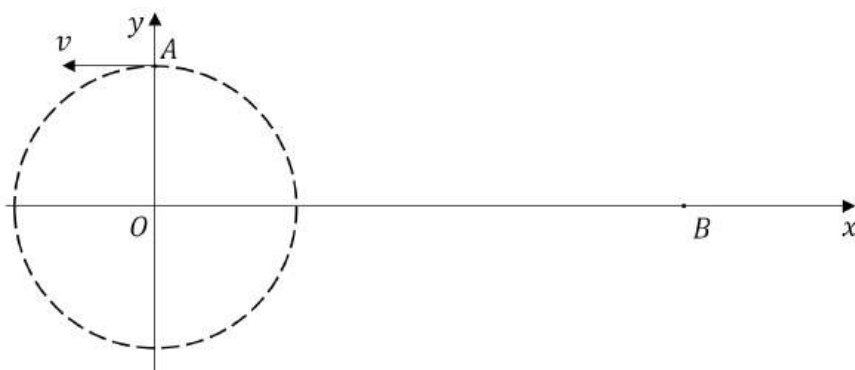


Рисунок 1 – Геометрическая модель исследуемой системы

2 Моделирование эфирного варианта

В первом случае время распространения пропорционально длине трассы $D = |AB|$.

Для рассматриваемого случая можем записать

$$D(t) = \sqrt{(x_A(t) - x_B)^2 + (y_A(t) - y_B)^2} = \sqrt{(r \cdot \cos(\alpha(t)) - x_B)^2 + (r \cdot \sin(\alpha(t)) - y_B)^2},$$

где $\alpha(t) = tv/r$.

Если окружность представить совокупностью равномерно распределенных точек, то процесс распространения можно иллюстрировать совокупностью мгновенных фронтов излучения в направлении точки B .

Поскольку точка A подвижна, длина трассы AB изменяется во времени. Двигаясь, объект из каждой точки A_i осуществляет эмиссию условного фотона, который движется к точке B со скоростью c .

Для наглядности иллюстрации расположив трассы A_iB параллельно друг другу, можно видеть, что совокупность равномерно излученных фрагментов, движущихся в направлении точки B , будет достигать ее с нарушением равномерности. Если принять, что излучение представлено последовательно излученными в равноотстоящие дискретные моменты времени короткими посылками (импульсами), то данное явление будет проявляться на приемной стороне (для наблюдателя) в том, что интервалы между принимаемыми импульсами будут иметь переменное значение. Если принять, что излучение представлено гармоническим сигналом, то будет наблюдаться фазовая модуляция принимаемого сигнала, приводящая к изменению длины волны, которую в свою очередь можно интерпретировать как частотную модуляцию.

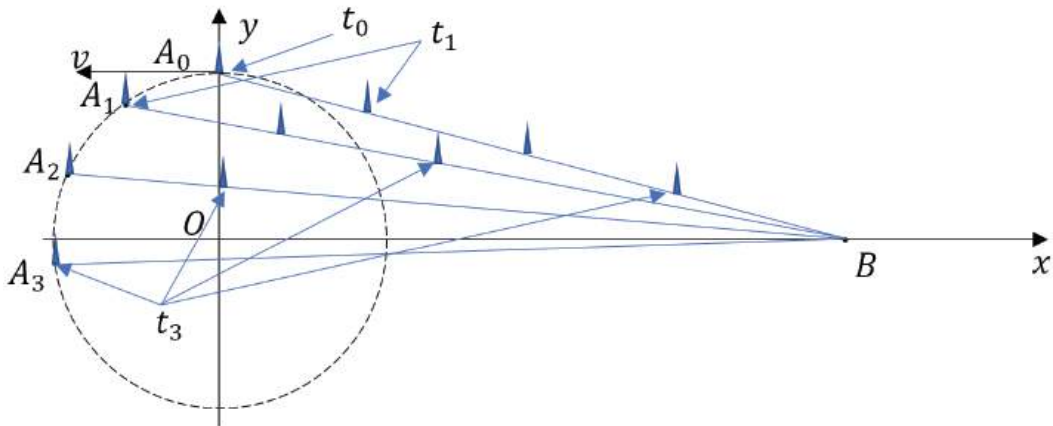


Рисунок 2 – Иллюстрация процесса распространения дискретных излучений

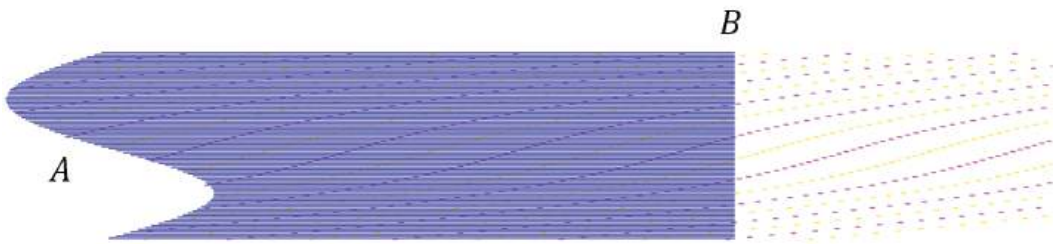


Рисунок 3 – Результаты моделирования

3 Моделирование варианта лучевой скорости

Рассматривая второй вариант, необходимо для каждого момента времени излучения вычислить составляющую скорости точки A в направлении точки B .

На рисунке 4 проиллюстрированы два момента времени, в которых составляющая вектора скорости точки A в направлении точки B имеет разный знак. Коррекция скорости распространения излучения от неподвижной точки на величину v_B приводит к изменению итоговой картины.

На рисунке 5 видно, что на значительном расстоянии от точки A , различие в скорости движения разных фрагментов излучения приводит к эффекту нарушения последовательного приема фрагментов в точке B . Т.е., излученный позже фрагмент принят до момента прихода в точку приема более раннего фрагмента (точки 2 и 1 на рисунке). На представленной иллюстрации искусственно трассы сделаны параллельными, но каждая из них м.б. интерпретирована как направление прихода. Следовательно, для наблюдателя в рассматриваемом случае будет видаться движение точки A не в ту сторону, в какую она движется в реальности.

Кроме того, имеет место возможность одновременного приема сигнала, излученного в разнесенные по времени моменты (точки 2 и 3 на рисунке). Что эквивалентно наблюдению двух объектов при наличии всего одного источника излучения.

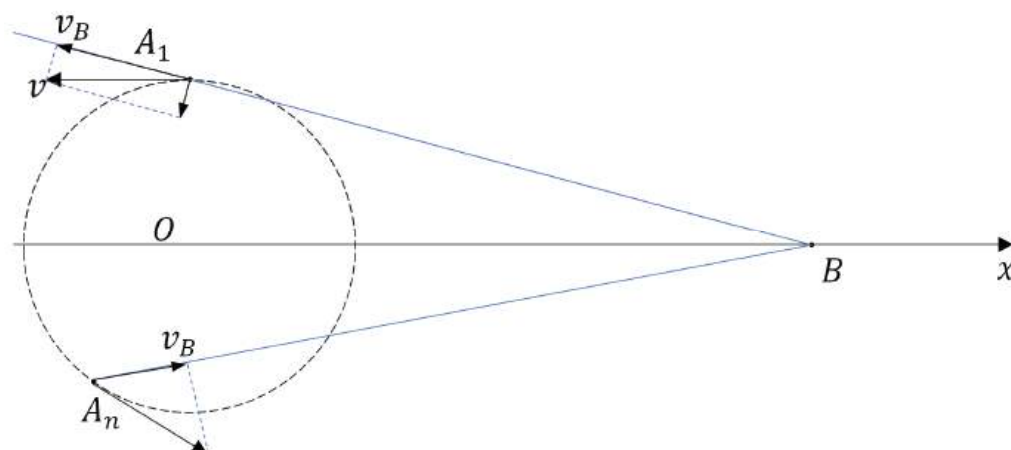


Рисунок 4 – Иллюстрация процесса формирования лучевой скорости

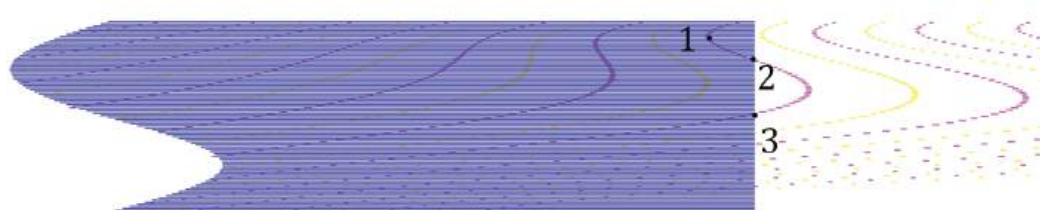


Рисунок 5 – Результаты моделирования

4 Моделирование варианта СТО

Наконец, в третьем варианте, исходим из того, что излучающий объект в каждый момент времени испускает равномерно во все направления множество фотонов, которые разлетаются от движущейся точки излучения с постоянной скоростью. Необходимо уточнить, что, поскольку скорость есть величина относительная, то относительно различных отсчетных точек скорость может иметь различные значения (как в скалярном, там и векторном смысле). Следовательно, необходимо очень четко определить, относительно чего постоянна скорость фрагмента излучения. В некоторый момент времени материальная точка A (поскольку под A в рамках данного рассмотрения принимаем излучающий объект, то обозначать его точкой можно только условно, понимая под точкой центр масс, геометрический центр или фазовый центр передающей антенны) занимает некоторое место в пространстве. Изменение места в пространстве называем движением. Но как можно определить, что место в пространстве изменилось? Для этого используют положение точки относительно других точек. Но если положение точки изменилось относительно других точек, то нет гарантии, что это не результат движения других точек. Датчиков скорости относительно пустоты нет (датчики изменения скорости, т.е. ускорения, есть). Поэтому можно считать, что точка покоится в центре пустоты. Если точка движется относительно других предметов, то движется вместе со «своей» пустотой. В момент излучения происходит разделение материальной точки-излучателя и материальной точки-носителя излучения, каждая из которых далее движется по своей траектории. Поскольку точки не совпадают, можно сказать, что пустота, связанная с материальной точкой-излучателем, и

пустота, связанная с точкой-носителем излучения, перестают совпадать. Умышленно используя такое понятие, как пустота, автор пытается акцентировать внимание на важном аспекте, что после разделения в момент эмиссии излучателя и излучения последнее движется относительно излучателя с заданной скоростью только при выполнении условия, что векторы их движений сонаправлены, для чего излучатель должен двигаться равномерно и прямолинейно. Если излучатель после эмиссии испытал ускорение, что приведет к изменению модуля или/и направления вектора движения, то скорость излучения относительно излучателя становится некорректным понятием.

Если совместить с точкой-носителем излучения центр пространственной системы координат $\xi_{\{3\}}$, ось абсцисс которой совпадает с вектором движения излучателя в момент эмиссии, то скорость распространения излучения относительно некоторой опорной точки можно характеризовать скоростью изменения положения этой точки в системе координат $\xi_{\{3\}}$.

Рассмотрим пример (рисунок 7). Пусть в момент времени t_n осуществлено излучение. Особенностью данного процесса является непривычная логика рассуждения. Если считать, что из точки 1 в направлении точки B отправился фотон со скоростью c , но его движение будет иметь инерционный снос по вектору v движения источника A , то фотон окажется в точке B' . Интуитивно кажется, что для компенсации сноса для попадания в точку B необходимо внести коррекцию направления фотона на угол $-\alpha$, направив его в точку B'' . Однако, процесс движения в этом направлении будет складываться из двух составляющих: фотон движется со скоростью c по отрезку A_1B'' , который в свою очередь движется с векторной скоростью v . Фотон пройдет путь $|A_1B''|$ за время $t_{\text{пр}} = |A_1B''|/c$. За это время отрезок A_1B'' сместится по направлению $\vec{v}$ на расстояние $|A_1B''|/c \cdot v > |A_1B|/c \cdot v \equiv |BB'|$, и фотон попадет в точку B_2'' .

Т.е. добавка $|DB''|$ к длине трассы $|AB|$ приведет к смещению финальной точки на $|BB_2''|$. Следовательно, фотон, направленный в точку B'' , в точку B не попадет. Значит, в нее попадет фотон, направленный в точку, смещенную от B на большую величину, значение которой можно вычислять итеративно или найти аналитическое решение задачи, например, в системе координат Oxy .

С учетом того, что точка A движется в системе координат Oxy , условие достижения фронта излучения с точкой B можно записать в виде

$$((x_A + v_x t) - x_B)^2 + ((y_A + v_y t) - y_B)^2 = c^2 t^2,$$

откуда можно составить квадратное уравнение относительно t .

$$t^2(v_x^2 + v_y^2 - c^2) + t \cdot 2((x_A - x_B)v_x + (y_A - y_B)v_y) + R_{AB}^2 = 0,$$

где $R_{AB} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$.

Результаты моделирования показывают, что при рассматриваемом варианте №3 распространения ЭМВ проявляются те же эффекты, что при втором варианте, но с несколько другими значениями параметров.

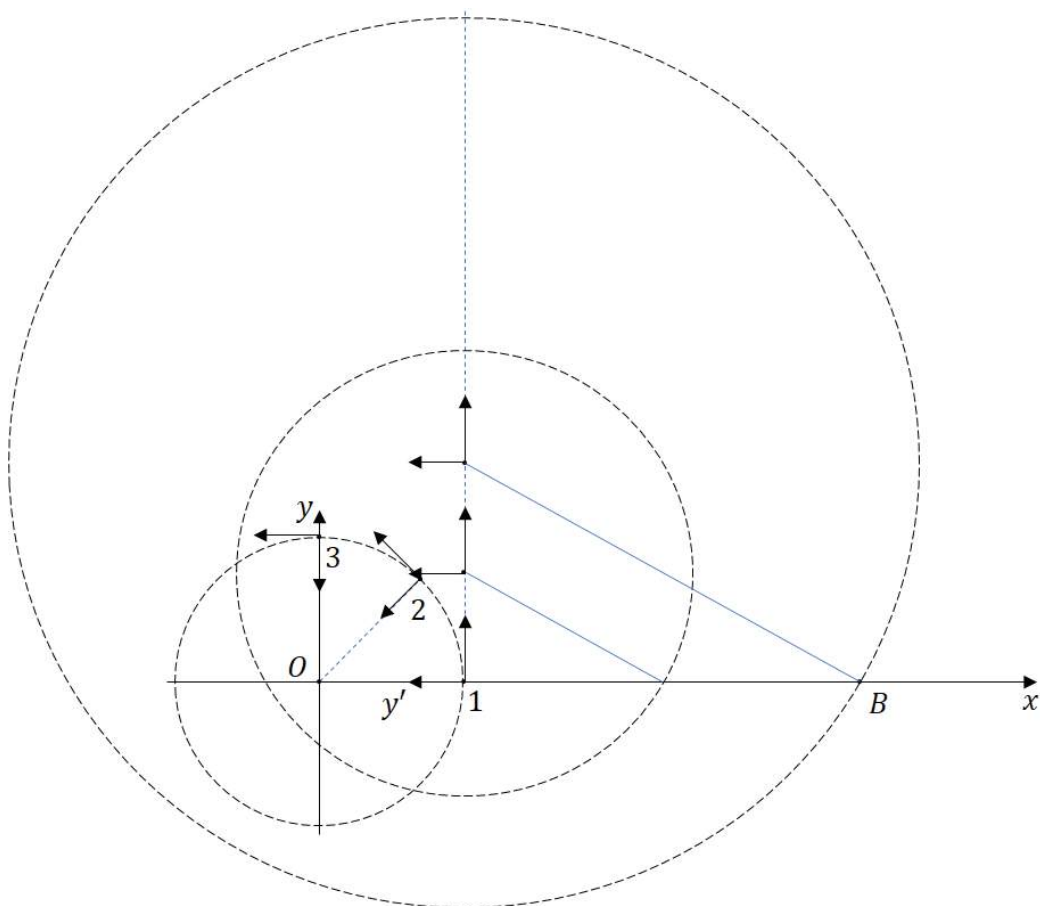


Рисунок 6 – Иллюстрация распространения фронта излучения

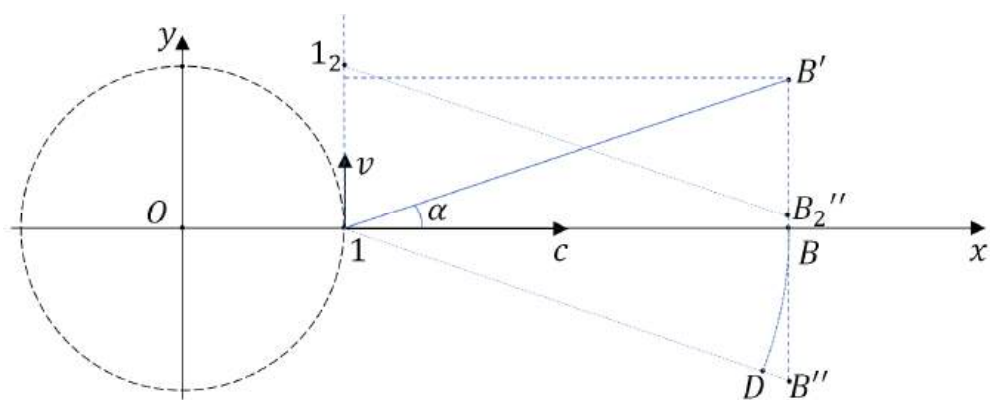


Рисунок 7 – Иллюстрация распространения излучения

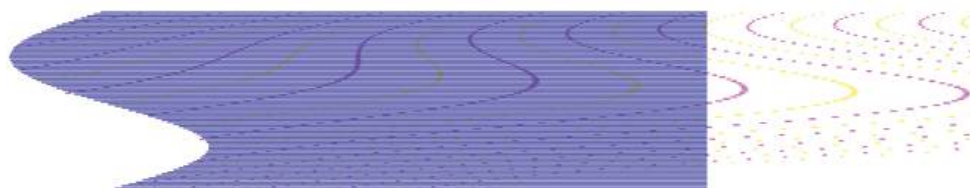


Рисунок 8 – Результаты моделирования

Заключение

В качестве заключения можно сделать обобщающий вывод, что допущение об отсутствии всезаполняющего неподвижного эфира, как среды, в которой распространяются оптические и радиосигналы, позволяет объяснить наблюдаемые двойные звезды как в реальности одиночные, осуществляющие круговое движение, например, вокруг черной дыры, в плоскости, инцидентной пеленгу наблюдателя, или имеющей с ним небольшой угол.

Литература

1 Сайбель А.Г. Моделирование эффектов трансформаций зрительных образов при наблюдении масштабных процессов // Радионавигация и время: труды СЗРЦ концерна ВКО «Алмаз – Антей», 2018, №4(13). С. 130-136.

2 Плясовских А.П. Теория аберрации. Первая теория, альтернативная специальной теории относительности. М.: Знание-М, 2023. 503 с.

Сайбель Алексей Геннадиевич – доктор технических наук, доцент, профессор, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: радиофизика, радиокоординатометрия, моделирование и оптимизация сложных системы, анализ временных рядов.

Email: saybel_ag@mail.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE MODEL OF ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION ON THE VISUAL IMAGE OF A REMOTE MOVING OBJECT

The influence of the cyclic movement of an object in the observation plane on the visual image is considered. Three models of the radiation propagation process are described. The results of modeling for three models of the radiation propagation process are presented.

Keywords: radiation; visual image; observation; propagation speed; relativity.

Saybel Aleksey Gennadievich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Scientific and Educational Center, St. Petersburg.

Research interests: radiophysics, radio coordinatometry, modeling and optimization of complex systems, time series analysis.

Правила приема и оформления рукописей, направляемых для публикации в журнале «Радионавигация и время: Труды СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей»»

1 Журнал принимает научно-технические рукописи, не предназначенные для публикации в других изданиях.

Тематика присылаемых рукописей должна соответствовать одной или нескольким специальностям следующей группы:

- 1.3.4. Радиофизика;
- 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства;
- 2.2.16. Радиолокация и радионавигация;
- 6.2.1. Вооружение и военная техника.

2 Рукопись должна быть направлена с сопроводительным письмом на бланке организации за подписью ее руководителя или заместителя руководителя.

К рукописи должен быть приложен акт экспертизы о возможности опубликования в открытой печати. Рукопись должна состоять из основного текста, подписанного всеми авторами, и рисунков, напечатанных на отдельных листах. При наличии в организации члена редакционной коллегии журнала может прилагаться его рецензия. К рукописи должны быть приложены сведения об авторах (на отдельном листе).

3 Представляется один экземпляр рукописи на бумаге формата А4 (по ГОСТ 9327-60), плотностью не менее 80 г/м² (по ГОСТ 27015-86), с белизной более 75% (по ГОСТ 30113-94), а также ее электронная версия.

Расстояния от краев листа до границ текста (поля) задаются по требованиям редакции. Размеры полей: верхнее – 38 мм, нижнее – 37 мм, левое – 33 мм, правое – 33 мм.

Электронная версия готовится в редакторе Word (версия не ниже Word 2000), шрифт Times New Roman без стилового оформления при использовании редактора формул Equation версии 3.0 или выше.

Выравнивание текста – по ширине страницы. Каждый абзац начинается с красной строки. Отступ 10 мм. Шрифт – Times 11. Абзац – множитель 1,1. Заголовок – Times Bold 13. Интервал между абзацами равен межстрочному.

4 Порядок расположения материалов в основном тексте (по ГОСТ Р 7.0.7-2009): индекс универсальной десятичной классификации (УДК), название рукописи с числом слов не более 10, инициалы и фамилии автора(ов), аннотация рукописи с числом строк не более 10, текст рукописи, список литературы. Объем рукописи от 3 до 10 страниц основного текста, без учета рисунков. Нумерация страниц – сквозная (располагается снизу, выравнивание по центру).

5 Аннотация оформляется одним абзацем с объемом не более 500 символов и должна отражать постановку задачи, новизну описываемой работы, не дублировать

название, введение и выводы к рукописи, а в определенной мере дополнять их. В аннотацию не следует вставлять аббревиатуры, формулы и ссылки на литературу.

6 Текст рукописи может делиться на составные части. При ссылке на части текста используются термины:

- части первого уровня (части текстового документа) – разделы,
- части второго уровня (части разделов) – подразделы,
- части третьего уровня (части подразделов) – пункты,
- части четвертого уровня (части пунктов) – подпункты.

Нумерация частей имеет вид:

1 Название раздела

1.1 Название подраздела

1.1.1 Название пункта

1.1.1.1 Название подпункта

Части ниже четвертого уровня не нумеруются.

7 В текстовом редакторе Word имеются возможности для применения несуществующих в русском языке графических знаков («•», «►», «☺», «♦» и др.). Эти знаки рекомендуется использовать в неофициальной и личной переписке. При составлении текстового документа на русском языке необходимо использовать только стандартные знаки препинания.

Для перечислений используется знак «дефис» («-»). Например:

Цвета:

- синий,
- зеленый,
- красный.

Дефис также используется в сложных словах для разделения их частей.

Знак «тире» («—») используется в предложениях.

В редакторе Word также имеется знак «длинное тире» («—»). Его наличие в тексте чаще всего свидетельствует о том, что фрагмент скопирован из формата html.

В редакторе Word в одной гарнитуре имеется до трех видов кавычек (« », " ", “ ”). Необходимо использовать в тексте единый вид.

8 При подготовке рукописи необходимо обращать внимание на написание букв и слов – русские (а, б, в, ю) и греческие буквы (α, β, ξ, Ξ, Σ, ερηκα) набираются прямо, а латинские (*a, w, j, W, Q, left, interrupt*) – курсивом (кроме химических формул CuSO₄, Ra(OH)₂ и т. д.). Те же требования необходимо соблюдать при написании букв, индексов и степеней в формулах.

Обозначения матриц и векторов с использованием букв любых алфавитов набираются жирным шрифтом прямо (**Ω, Э, W, Q, q**).

Для чисел, функций и операторов (1, 252, cos(x), sin(y), rot F, exp(x) и т. д.) используется только прямой шрифт. Римские цифры не допускаются. Дробная часть десятичного числа отделяется запятой.

9 Вывод математических зависимостей должен быть кратким, без промежуточных преобразований. Все обозначения величин в формулах следует расшифровать (кроме общепринятых типа j , π). Формулы, на которые в тексте есть ссылки, нумеруются в круглых скобках. Нумерованная формула должна быть написана отдельной строкой, выравнивание ее номера осуществляется по правому краю. Для нумерованной формулы допускается расположение ее в тексте рукописи. Формулы, включенные в текст, следует набирать без увеличения интервала между строками, например, b/d , $\exp(x/2)$. Прописные и строчные буквы, надстрочные и подстрочные индексы в формулах должны обозначаться четко.

Индекс у индекса не допускается.

Пример оформления формул:

При моделировании исследуемого процесса использована формула

$$(x + a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k}, \quad (1)$$

где x – переменная, описывающая процесс;

a – еще одна переменная;

n – число итераций.

В формуле (1) используется знак суммирования.

При моделировании не использованы формулы:

$$x = 1, \quad (2)$$

$$a = 2, \quad (3)$$

где x – первая переменная,

a – вторая переменная.

10 Название таблицы должно быть точным и кратким. Содержание таблиц должно быть лаконичным и иметь только необходимые для иллюстрации текста данные, таблица не должна дублировать рисунки.

Оформление таблиц должно соответствовать ГОСТ 1.5-2001. Таблицы печатаются в общем тексте после первой ссылки и нумеруются, если их количество больше одной.

Пример названия таблицы: «Т а б л и ц а 1 – Результаты вычислений».

Положение начала слова Таблица должно совпадать с положением левой границы таблицы.

Строки в таблице не нумеруются.

11 Наименования, обозначения и единицы физических величин приводятся только в системе СИ (ГОСТ 8.417-2002). Обозначение единицы физической величины указывается после последнего числового значения диапазона, например, от 1 до 5 мм, от +10 до минус 40°C.

12 Литературные ссылки нумеруются в прямых скобках, например [1]. Список литературы составляется в соответствии с порядком ссылок по тексту.

Оформление литературных ссылок в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. Для каждой литературной ссылки следует указывать автора(ов), если такие имеются, полное название работы, издательство, год издания, общее количество страниц в издании

или номера страниц при ссылках на журналы или разделы в книгах.

13 Рисунки и фотографии должны быть четкими, контрастными, желательно в альбомной ориентации и располагаться на отдельных листах.

Рисунки предоставлять в формате *.jpg с разрешением не менее 300 dpi без интерполяции.

Числовые обозначения на рисунке ставятся по часовой стрелке. Подрисуночные подписи имеют вид «Рисунок 3 – Спектр сигнала». При наличии на рисунке обозначений после подрисуночной подписи ставится двоеточие и с новой строки приводится их расшифровка.

Подрисуночную подпись разрешается размещать в тексте статьи.

14 Количество рисунков и таблиц, как и число наименований в списке литературы, должно быть не более 6 (для обзорных рукописей список литературы может быть увеличен).

15 Сведения об авторах включают фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, место работы и должность, область научных интересов, а также контактные телефоны и электронные адреса каждого автора. Также должен быть представлен корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов). Сведения приводятся на русском и английском языках.

16 Название статьи и аннотация приводятся на русском и английском языках.

17 Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой. Ключевые слова приводятся на русском и английском языках.

18 Редакционная коллегия оставляет за собой право возвращения рукописи на доработку при невыполнении указанных выше требований по ее оформлению.

**РАДИОНАВИГАЦИЯ
И ВРЕМЯ**

№15 (23) – 2024

Подписано в печать 14.12.2024 Формат 84×108 1/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Объем 12,6 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 267-2024

АО «Обуховский завод»
191124, Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, дом 120, литера Е.

Отпечатано в ООО «Издательство «Балтийская печать».
191119, Санкт-Петербург, ул. Звенигородская, д. 9-11, лит. К, пом. 17Н, ком. 130.