Уважаемые читатели!

До конца этого года полнотекстовый англоязычный архив номеров Вестника Концерна ВКО «Алмаз – Антей» будет доступен на сайте журнала. Уверен, что это позволит увидеть исследования авторов мировому научному сообществу.

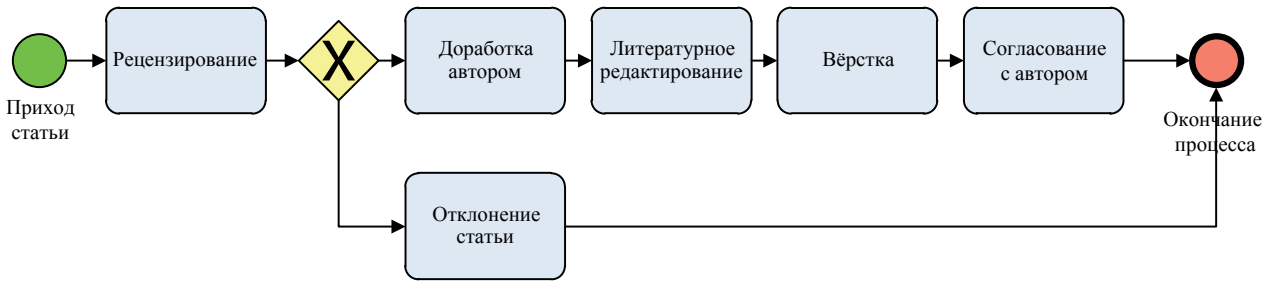
Редакция постоянно работает над улучшением журнала, в том числе оптимизирует внутриредакционные процессы. Именно оптимизация позволила редакции в 2020–2021 годах работать быстрее авторов при отработке их статей в журнале (заметку о проведенной работе читайте на страницах этого выпуска).

Вопросы по поводу публикации задавайте по телефону +7 (495) 276-26-13 или присылайте на электронный адрес **press@almaz-antey.ru**. Напоминаю, что статьи принимаются от организаций России и зарубежья (публикация бесплатная), а на сайте журнала **http://journal.almaz-antey.ru** предоставлена возможность оформить бесплатную подписку на e-mail рассылку электронной версии издания.

Заместитель главного редактора

Денис Большаков

Подписка на рассылку



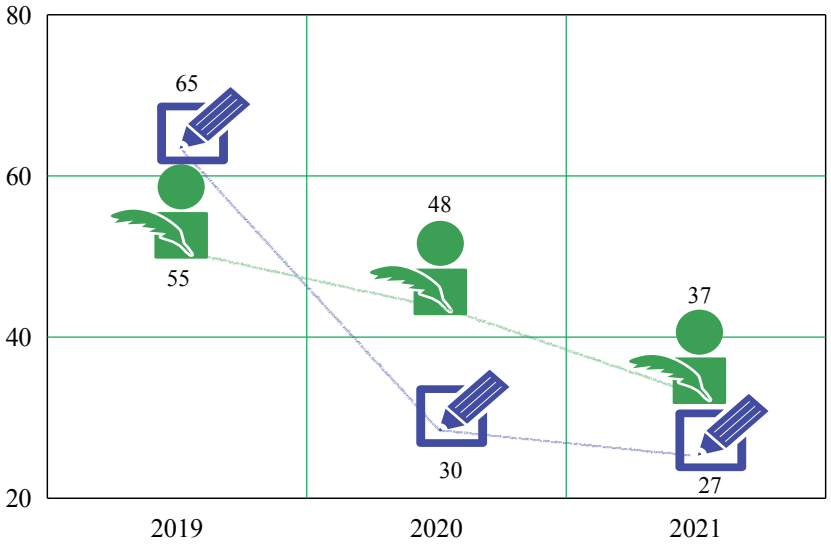
Д. Ю. Большаков

Быстрее авторов

Локдаун апреля – мая 2020 года вывел взаимодействие с авторами и рецензентами из привычной атмосферы: после локдауна поток электронных статей вырос в три раза (до 18 %), а в 2021 году уже четыре из пяти статей поступили в электронном виде. Работа редакции в таких условиях привела к необходимости оптимизации процессов с учетом нашего приоритета – сокращение временных издержек при рассмотрении статей. И редакция уже второй год подряд работает в среднем быстрее авторов (см. рисунок). Суммарное среднее время на рецензирование, редактирование и верстку в 2021 году составляет 27 дней, а время устранения замечаний авторами – 37 дней.

Однако и наши авторы с 2019 года стремятся сокращать среднее время доработки статьи для публикации в Вестнике (ежегодно в среднем на 17 %).

Введение нового формата работы и вынужденное увеличение количества рецензентов



© Большаков Д. Ю., 2021

на статьи не повлияло ни на время отправки авторам рецензий, ни на время до принятия статьи к публикации. Выявленная корреляционная зависимость между количеством рецензентов и временами слабая и очень слабая (0,31 и 0,17 соответственно).

На приведенной в начале этой заметки имитационной модели проанализировано сто пуассоновских потоков статей, и анализ результатов подтвердил гипотезу о скорости работы. На конец года у авторов на доработке пара статей и такое же количество у рецензентов. Однако нагрузка на рецензентов в полтора раза больше, чем на авторов, а количество авторов и рецензентов для каждого выпуска Вестника одинаково.

Редакция журнала открыта для диалога с читателями. Предложения по расширению рассылки журнала, улучшению редакционных процессов, продвижению в интернете, социальных сетях и международных реферативных базах, улучшению качества и наполнению направляйте на электронный почтовый ящик редакции: press@almaz-antey.ru

Большаков Денис Юрьевич – кандидат технических наук, начальник отдела АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей».

К 90-летию Иосифа Григорьевича Акопяна

Основные этапы творческой и конструкторской деятельности

АКОПЯН Иосиф Григорьевич родился 28 августа 1931 года в г. Саратове, куда были направлены на работу его родители после окончания Коммунистического института журналистики в 1929 году. В 1935 году родители вернулись в Москву, Иосиф начал учебу в средней школе № 59. Начало Великой Отечественной войны застало его в пионерском лагере под Москвой. Лагерь закрыли, и до сентября 1941 года мама и сын оставались в Москве, отец в звании старшего полкового комиссара уже вечером 22 июня 1941 года выехал в действующую армию. Начавшиеся 27 июля бомбардировки Москвы, ежевечерние воздушные тревоги и ночи в бомбоубежище, светомаскировка, аэростаты заграждения, звукоуловительные установки, прожекторные установки, огонь зенитных пушек запомнились на всю жизнь. В сентябре 1941 года мать и сын были эвакуированы в Чкаловскую (ныне Оренбургскую) область, в небольшую удаленную деревню, откуда переехали в Орск, а в 1944-м – в Бугуруслан, где мать начинает работать главным редактором газеты «Бугурусланская правда», а сын продолжил учебу в школе им. Калинина, которую окончил с медалью в 1949 году.

Бугуруслан – небольшой провинциальный город, менее 50 тысяч человек, но в нем оказался в эвакуации опытный радиолюбитель-коротковолновик из Москвы, ученик всесоюзно известного радиоспециалиста – папанинца Кренкеля, и он в этом маленьком городе в 1947 году (!) организовал курсы радистов-операторов и радиоклуб коротковолновиков. Иосиф окончил курсы, овладел в совершенстве морзянкой и два года активно участвовал в работах по созданию коротковолновой любительской радиостанции. Он как оператор проводил сеансы радиосвязи с радиолюбителями всех континентов. При этом не забросил учебу и участвовал в заочных московских конкурсах по физике и математике.

После окончания школы решил поступать в МГУ. В то время Физико-технического института еще не было, был физико-технический факультет МГУ. Выбор был сделан в пользу физфака, так как там на отделении радиофизики была кафедра радиолокации. Собеседование при поступлении в МГУ прошло успешно, радиолюбительский опыт высоко ценился.

В 1949 году МГУ теснился в центре Москвы, на Моховой улице, а строительство нового здания на Ленинских горах только проектировалось. Студенты участвовали в начале разметки и строительных работ МГУ, общежитие было на ул. Стромынка, в комнатах жили по 9 человек, на занятия ездили через всю Москву. Но атмосфера была очень

творческой, великолепные преподаватели, интересные темы. Хотя в те годы в МГУ учились более 20 тысяч студентов, оказалось, что в МГУ нет коллективной коротковолновой радиостанции. Иосиф и еще один коротковолновик (участник Великой Отечественной войны Ю. Лобанов) обратились к ректору МГУ академику Петровскому с просьбой выделить помещение и помочь с организацией радиоклуба. Ректор пошел навстречу, и в общежитии на Стромынке выделили помещение, где под руководством инициаторов начала работать коллективная радиостанция. После строительства нового здания МГУ и смены студенческого поколения судьба ее не известна.

Существовавшая при МГУ военная кафедра готовила на базе изучения имевшейся после войны западной техники грамотных инженеров-радиолокационщиков, после II и IV курсов студенты вместо каникул проходили двухмесячную практику в действующих частях ПВО, оснащенных (до появления отечественных армейских радиолокаторов) американской и английской техникой, что очень помогало студентам кафедры радиолокации. Заведующий кафедрой профессор Владимир Васильевич Мигулин, лауреат Сталинских премий, приглашал для чтения лекций ведущих специалистов из НИИ и КБ радиолокационного профиля, однако полноценными специалистами в разработке радиолокационных средств даже при такой подготовке выпускники становились только после приобретения опыта работы в НИИ и КБ.

Дипломная работа студента Акопяна имела прямое отношение к радиолокации. По техническому заданию Главного ракетно-артиллерийского управления Министерства обороны нужно было создать высокоточный кварцованный генератор меток дальности для радиолокаторов, для чего нужно было решить проблему ударного возбуждения и быстрого принудительного гашения колебаний кварца. Акопян был назначен в 1953 году ответственным разработчиком такого устройства. Кварцевый резонатор легко возбудить электрическим импульсом, но очень трудно погасить его колебания, поскольку он имеет огромную добротность. Работа удалась, по проблеме гашения колебаний кварца за 2–3 периода было опубликовано несколько статей в научных журналах, и диплом был защищен с высокой оценкой.

После окончания университета Акопян был распределен в очную аспирантуру кафедры радиолокации. Научным руководителем аспиранта стал профессор В.В. Мигулин. Однако предложенная научным руководителем тема диссертационной работы не была «радиолокационной». В те годы очень бурно развивалась статистическая радиофизика, и ему была предложена тема синхронизации генераторов электрических колебаний внешним сигналом при наличии флуктуационных помех. Требовалось не только создать теорию процесса синхронизации при помехах, но и проверить выводы расчетов экспериментом. Теоретические исследования синхронизации при воздействии помех вели в те годы очень известные физики и математики. Ряд работ опубликовали будущий академик и ректор МГУ Р.В. Хохлов, профессор Академии им. Н.Е. Жуковского В.И. Тихонов и, что самое главное, автор выдающихся теоретических работ по статистической радиофизике Руслан Леонтьевич Стратонович.

О Р.Л. Стратоновиче академик РАРАН И.Г. Акопян вспоминает как о подлинном гении, не уступающем своим талантом даже академику Ландау. Гениальность Стратоновича проявлялась во всем. Он решал математические задачи, которые были неподсильны математическим светилам, «в уме». При таком «окружении» оригинальную теоретическую часть работы было выполнить очень сложно, а поставить эксперимент и подтвердить теоретические результаты даже выдающимся теоретикам – еще сложнее. Акопяну удалось найти пути творческого содружества со Стратоновичем, они опубликовали совместные теоретические работы, в кандидатской диссертации И.Г. Акопяна (1959) приведено решение нелинейного дифференциального уравнения Эйнштейна – Фоккера – Планка, построены таблицы и графики этих функций, а экспериментальная часть диссертации подтвердила правильность расчетов. Оппонентами

на защите диссертации были выдающиеся ученые С.М. Рытов и В.И. Тихонов, Рытов предлагал работу в ФИАНЕ. Казалось бы, молодому ученому с навыками экспериментатора нужно делать карьеру в области статистической радиофизики, но после окончания очной аспирантуры он распределяется на работу в недавно созданное Особое конструкторское бюро № 15 (ныне НИИ приборостроения им. В.В. Тихомирова), которым руководил генеральный конструктор, членкор АН СССР, лауреат Сталинских премий Виктор Васильевич Тихомиров.

В 1958 году ОсКБ-15 совместно с МКБ «Вымпел» (главный конструктор и руководитель И.И. Торопов) поручается разработка войскового зенитного ракетного комплекса с ракетами, управляемыми полуактивными радиолокационными головками самонаведения (РГС) с доплеровской селекцией, обеспечивающими наведение и на низколетящие цели. В первой же встрече с принятым на работу старшим инженером Акопяном В.В. Тихомиров принял решение направить его в лабораторию, которая будет разрабатывать РГС. Дело это было совершенно новое, радиолокационные головки самонаведения с доплеровской селекцией до этого не разрабатывались, транзисторной элементной базы еще не было, цифровая техника только зарождалась. На миниатюрных радиолампах с мягкими выводами и только на отечественных радиоэлементах требовалось создать миниатюрный аналоговый приемник непрерывного радиосигнала с узкополосной доплеровской фильтрацией и пеленгатор.

Группа из 7 человек к августу 1958 года под руководством Акопяна создала неконструктивный макет приемника и пеленгатора РГС, макетный генератор радиосигнала подсвета, для целеуказания приспособили радиолокатор от истребителя, разместили макет РГС и станцию подсвета в двух разнесенных фургонах на летном поле аэродрома в Жуковском и провели серию облетов с положительными результатами, после чего Тихомиров создал отдельную лабораторию по разработке РГС, подчиненную лично ему, а в 1960 году – отдел РГС и назначил кандидата физ.-мат. наук Акопяна начальником отдела и главным конструктором. Следует отметить, что в ОсКБ-15 в этот период работало около 1000 человек и лишь один имел ученую степень кандидата технических наук (!), Акопян стал вторым.

Разработка РГС 1СБ4 шла очень трудно. Работали буквально дни и ночи, оставались ночевать на работе, чтобы не тратить время на дорогу. Виброустойчивость аппаратуры в диапазоне виброчастот до 2000 Гц действующие стандарты требовали при синусоидальном воздействии на всех частотах вибродиапазона, на резонансных частотах элементы ломались, обрывались подводящие тонкие провода. Разработчикам РГС удалось доказать, что испытания нужно проводить шумоподобными вибрациями, не вводящими элементы в резонанс. Была создана соответствующая испытательная аппаратура, и сегодня испытания виброшумом ракетных элементов узаконены.

В ходе разработки РГС 1СБ4 для ракеты 3М9 ЗРК «Куб» пришлось решать множество новых научно-технических вопросов: шумы сканирования, борьба с влиянием «антипода» (сигнала цели, переотраженного земной или водной поверхностью), влияние искажений, вносимых радиопрозрачным обтекателем на точность наведения, перезахват цели на траектории полета ракеты и т.п. Сроки создания ЗРК «Куб» по многим причинам приходилось переносить, и в 1962 году В.В. Тихомиров был освобожден от должности. Главным конструктором «Куба» и руководителем предприятия стал Юрий Николаевич Фигуровский. Заводские и совместные испытания «Куба» успешно завершились в 1965 году, рекордно малая высота полета сбитой цели составила всего 15 м над землей, в процессе испытаний было сделано более 100 управляемых пусков. В 1972 году за разработку и серийное освоение «Куба» были присуждены Ленинская и позднее Государственная премии. В этот период были опубликованы несколько печатных работ в закрытых и открытых научных изданиях, получены авторские свидетельства. ЗРК «Куб» имел три модернизации со значительным наращиванием характеристик и помехозащищенности. РГС 1СБ4 была настолько востребована,

что ее выпускали одновременно три серийных завода в разных городах страны.

Успех «Куба» оценили авторы ЗРК «Круг» В.П. Ефремов и Л.В. Люльев. Они предложили установить РГС 1СБ4 на ракету 3М8 ЗРК «Круг». В 1967–1968 годах эта работа была успешно выполнена и подтверждена 19 управляемыми пусками с направленным подрывом БЧ в направлении цели, однако в процессе дискуссий о судьбе предстоящих разработок ЗРК 300П и 300В Ефремов и Люльев остановили эту работу, так как она могла конкурировать с 300В. Но совместная работа позволила вскоре создать кооперацию при разработке ЗРК «Бук».

Способность РГС перезахватывать цель в случае потери цели на траектории позволила отказаться от принятого в «Кубе» захвата цели на пусковой установке, вынужденно размещаемой на расстоянии более 100 м от РЛС подсвета из-за влияния на РГС прямого сигнала передатчика через боковые лепестки РЛС и РГС. Это позволило в заданном к разработке с 1969 года ЗРК «Бук» совместить РЛС подсвета и ракеты на одном транспортном средстве. Разработчиком ракеты 9М38 было назначено КБ «Новатор», руководимое главным конструктором Л.В. Люльевым. Разработка РГС 9Э50 для этой ракеты шла уже легче, чем 1СБ4. Появилась возможность отказаться от электронных ламп, используя только транзисторы и появившиеся микросхемы. Аналоговые вычислительные системы уступили место цифровым вычислителям с жесткой программой, в РГС ввели прием сигналов радиокоррекции, позволяющий корректировать полетное задание при интенсивном маневре цели и сообщать о включении помех. Но в разгар испытаний «Бука» на полигоне появилась «Эмба» – новая помеховая станция внешнего шумового прикрытия, и гензаказчик сверх согласованного ТЗ требует защиты от этих помех. Испытания «Бука» были остановлены, и возникла необходимость искать способы защиты от новой помехи. Сторонники командного управления (а их было немало) предрекли конец радиолокационному самонаведению. Однако лично Акопяну удалось найти технические решения, позволившие защитить РГС от этих помех и продолжить испытания «Бука». Проблемам защиты от шумовых помех внешнего прикрытия посвящены несколько опубликованных работ в закрытых и открытых изданиях, были получены авторские свидетельства, защищены диссертации. «Бук» был принят на вооружение в 1982 году, отмечен Государственной премией СССР и имел четыре модернизации, две из которых отмечены премиями Правительства Российской Федерации.

Одновременно с разработкой «Бука» в НИИП была начата разработка авиационного ракетного комплекса перехвата (АРПК) МиГ-31 с ракетой «Вымпел» К-33. Особенностью этой РГС была работа в прерывистом режиме, так как МиГ-31 должен был иметь возможность одновременного обстрела четырех целей, захват цели был возможен только на траектории полета ракеты. В РГС предусмотрен прием сигналов радиокоррекции. Разработка и испытания МиГ-31 в Ахтубинске завершились только в 1984 году. Элементная база – только отечественная, транзисторы, цифровой спецвычислитель с жесткой программой. На технические решения, принятые при этой разработке, получены авторские свидетельства, опубликованы статьи. Успехи разработки АРПК (главный конструктор К.К. Васильченко) были отмечены Ленинской и Государственной премиями СССР.

Наряду с разработкой РГС под руководством и по инициативе Акопяна велись работы научного и гражданского направления. В 1970-е годы были разработаны приемные устройства для Большого сибирского солнечного радиотелескопа, отмеченного премией Совета Министров СССР. По заданию ЦАГИ разработаны лазерно-доплеровские измерители скорости газовых и жидкостных потоков (ЛДИСы) и установлены на несколько аэродинамических труб ЦАГИ. В 1990-е годы началась работа над созданием высокотехнологической медицинской аппаратуры. Были разработаны и сертифицированы неинвазивный измеритель билирубина, урофлоуметр для урологических обследований и три варианта цифрового электрокардиографа (с настольным компьютером, ноутбуком и малогабаритный переносной с комбинированным питанием и встроенным принтером).

Все электрокардиографы имели программы расшифровки кардиограмм и предварительного диагноза. На международных выставках в Брюсселе и Дюссельдорфе разработки были отмечены дипломами и медалями, однако в серийное производство не пошли, так как медицинские чиновники не хотели заказывать отечественные приборы, предпочитая импортные поставки (с более высокой ценой и худшими характеристиками). По итогам работ гражданского назначения были опубликованы статьи и получены патенты.

В середине 1970-х годов появилась информация о разработке в США активных РГС, позволяющих реализовать принцип «пустил–забыл». В отделении НИИП, разрабатывающем РГС, руководителем которого был И.Г. Акопян, начались работы по этим направлениям. В 1979 году стартовала совместная с НПО «Исток» (руководитель С.И. Ребров) НИЭР «Союз» по АРГС для ракет «воздух–воздух» средней дальности, а в 1982 году вышло постановление о разработке КБ «Вымпел» ракеты «воздух–воздух» К-77 с АРГС 9Б-1348, головным разработчиком АРГС определили НИИП, соразработчиком – НПО «Исток». После образования в 1986 году московского НИИ «Агат» эта работа была продолжена там. В качестве выходной лампы передатчика АРГС использовался малогабаритный многолучевой клистрон «Истока». По кооперации часть блоков АРГС разрабатывал «Агат», часть – «Исток». Работа шла трудно, было много взаимных претензий, отражавших взаимоотношения МРП и МЭП. В 1994 году работа успешно завершилась, но серийное производство не начиналось: киевский завод «Коммунист», выпускавший опытные образцы АРГС, оказался в другом государстве, и вообще это были «лихие 90-е». На поставки ракет РВВ-АЕ (так назвали ракету для экспорта) претендовали инозаказчики, и «Исток» и «Агат» организовали сами серийное производство АРГС, а «Вымпел» – ракет. Это позволило предприятиям пережить «лихие 90-е». АРГС 9Б-1348 была разработана на современной элементной базе, имела в своем составе перепрограммируемую цифровую машину, разработанную «Агатом», отечественные микросхемы.

Работы этого периода существенно продвинули технологию создания АРГС, позволили в несколько раз уменьшить веса и габариты АРГС, а применение в последующих разработках современной (в том числе импортной) элементной базы позволило предложить АРГС и для ракет малой дальности. Прогресс в полупроводниковой технике позволяет сегодня отказаться от использования в передатчиках АРГС электровакуумных приборов, требующих высоковольтное питание, и разработать передатчики в диапазонах Ku и Ka на полупроводниковой базе, что позволяет сократить до предела время готовности к пуску из холодного состояния.

Разработки последних лет в интересах АО «МКБ «Факел», АО «ГосМКБ «Вымпел», ПАО «ДНПП» и АО «ОКБ «Новатор» используют самые передовые достижения цифровой и аналоговой техники, возможности полунатурного и математического моделирования («Агат» располагает двумя стендами полунатурного моделирования), позволяют существенно сократить объем натурных полигонных испытаний. За все годы разработки РГС и АРГС не было копирования зарубежных разработок, а уровень отечественных разработок не уступает зарубежным аналогам. В рамках ВТС несколько типов АРГС были разработаны для иностранных заказчиков и имеют высокий рейтинг.

В 2007 году, после 21 года работы генеральным директором – генеральным конструктором «Агата», Акопян перешел на должность генерального конструктора – заместителя генерального директора Дмитрия Дмитриевича Евсеева, а в 2016-м – на должность научного руководителя – советника генерального директора «Агата» Михаила Алексеевича Иванчихина.

Публикации работ последних лет И.Г. Акопяна посвящены проблемам защиты особо охраняемых объектов от массированных атак средствами воздушного нападения и проблемам влияния отражений радиолокационного сигнала от земной поверхности при сопровождении АРГС и самолетными радиолокаторами целей «сверху–вниз» над подстилающей поверхностью.

И.Г. Акопян – заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик РАРАН, доктор технических наук, профессор, лауреат Ленинской премии, Государственной премии СССР, дважды лауреат премии Правительства Российской Федерации, лауреат премии и большой золотой медали имени А.А. Расплетина АН СССР, дважды лауреат премии «Золотая идея», лауреат национальной премии им. Петра Великого, премии им. В.Д. Калмыкова, лауреат премии Академии инженерных наук Франции. Награжден 12 орденами, в их числе ордена Ленина, Октябрьской Революции, «Знак почета», «За заслуги перед Отечеством» II, III и IV степеней, Ивана Калиты, «Серебряная звезда общественного признания», китайским орденом Дружбы, бельгийским орденом Почетного офицера, 28 медалями, почетными званиями «Почетный радист СССР», «Почетный машиностроитель Российской Федерации», «Почетный гражданин наукограда Жуковского», автор 270 научных работ и 72 изобретений. Акопян также является академиком Международной академии информатизации и членом-корреспондентом Российской академии электротехнических наук. В настоящее время – научный руководитель – советник генерального директора АО «МНИИ «Агат».

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-12-24
УДК 658.5:005.591.6

Опыт проведения прикладных междисциплинарных исследований территориально распределенным творческим коллективом

Д. К. Щеглов[1,2], И. А. Андреев[3], С. А. Чириков[2], В. И. Тимофеев[4]

[1] *Акционерное общество «Конструкторское бюро специального машиностроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация*

[2] *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация*

[3] *Акционерное общество «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод», Санкт-Петербург, Российская Федерация*

[4] *Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Проведен анализ опыта выполнения научно-исследовательского проекта по изучению стратегии развития производства гражданской продукции на предприятиях оборонно-промышленного комплекса России. Особенностью данных научных изысканий стало применение концепций гибкого проектного подхода и бережливого производства к междисциплинарному исследованию, проведенному территориально распределенным коллективом.

Ключевые слова: управление проектами, междисциплинарное исследование, творческий коллектив, оборонно-промышленный комплекс, конверсия, диверсификация, гражданская продукция, товары народного потребления.

Для цитирования: Щеглов Д. К., Андреев И. А., Чириков С. А., Тимофеев В. И. Опыт проведения прикладных междисциплинарных исследований территориально распределенным творческим коллективом // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 12–24. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-12-24

For citation: Shcheglov D. K., Andreev I. A., Chirikov S. A., Timofeev V. I. Practice of applied interdisciplinary research carried out by a geographically distributed think tank level // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 3. P. 12–24. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-12-24

Поступила 25.04.2021 *Отрецензирована* 01.06.2021 *Одобрена* 14.06.2021 *Опубликована* 20.10.2021

Введение

Обеспечение высокой конкурентоспособности российских организаций (предприятий, компаний) на внутреннем и мировом рынках требует формирования эффективной системы проведения междисциплинарных поисковых исследований, позволяющей в кратчайшие сроки вырабатывать наиболее рациональные стратегические решения по созданию новых видов продукции и услуг, а также совершенствованию процессов операционной деятельности.

Анализ отечественного и мирового опыта проведения научных исследований коллективами специалистов организаций различных отраслей промышленности, в том числе и оборонно-промышленного комплекса (ОПК), позволяет заключить, что одним из определяющих факторов успеха таких исследований является наличие эффективной системы управления научными проектами. При этом практические вопросы управления междисциплинарными

© Щеглов Д. К., Андреев И. А., Чириков С. А., Тимофеев В. И., 2021

исследованиями, проводимыми территориально распределенными коллективами, с применением современных методологий проектного управления (таких, как Scrum, Agile, PMBOK, P2M и других) и возможностей передовых информационно-коммуникационных технологий в научной литературе раскрыты недостаточно полно [1, 2]. Эффективная система управления научными проектами должна базироваться на методах современного проектного менеджмента, теории управления и информационно-управляющих систем, выбираемых с учетом особенностей реализуемого проекта и объективных проектных ограничений [3].

Очевидно, что наиболее сложным этапом в процессе управления научным проектом является организация и проведение междисциплинарных научных исследований территориально распределенным многопрофильным творческим коллективом. Ярким примером такого проекта стало исследование путей развития производства гражданской продукции в вертикально интегрированных структурах ОПК России [4], выполненное творческим коллективом, сформированным из 10 участников Программы выявления лидеров трудовых коллективов АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», состоящим преимущественно из молодых специалистов и руководителей ряда его дочерних обществ. Главным итогом работы этого творческого коллектива стала монография, в которой рассмотрены возможные пути увеличения доли гражданской продукции в интегрированных структурах ОПК. В настоявшее время Президент и Правительство Российской Федерации данной тематике уделяют особое внимание [5, 6].

В процессе работы над монографией участники творческого коллектива приобрели ценный опыт в области организации удаленной командной работы и управления междисциплинарными научными проектами. Наличие в команде проекта 10 специалистов различного профиля, в том числе в области управления проектами, бережливого производства, маркетинга и т. д., позволило достичь синергетического эффекта в процессе синтеза системы управления междисциплинарным научным проектом. Важно отметить, что большинство сформировавшихся в процессе выполнения проекта и апробированных практик являются универсальными и применимы для любых типов проектов. В этой связи чрезвычайно актуальным является обобщение и систематизированное изложение опыта проектного управления, приобретенного творческим коллективом в процессе совместной работы и подготовки монографии.

Особенности формирования многопрофильного творческого коллектива

Научно-исследовательский проект «Развитие производства гражданской продукции на предприятиях оборонно-промышленного комплекса» стал выпускной работой сотрудников ряда предприятий АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей» в рамках обучения в Научно-образовательном центре Концерна (АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей») по направлению подготовки «Управление организацией оборонно-промышленного комплекса», а данное направление подготовки явилось завершением Программы выявления лидеров, стартовавшей в Концерне в 2016 году по инициативе генерального директора Концерна [7, 8].

В творческий коллектив научно-исследовательского проекта вошли преимущественно молодые специалисты и руководители головной компании и дочерних обществ Концерна. Исследование проводилось под научно-техническим руководством 2 опытных наставников из числа работников Концерна.

Для выполнения междисциплинарного научно-исследовательского проекта сформировался творческий коллектив из специалистов различных профилей. Важной особенностью творческого коллектива являлось наличие в его составе специалистов в области управления проектами (владеющих методами *Project Management*, *Business Process Management*, *Scrum*, *Agile* и др.), а также в области бережливого производства (*LEAN*, *Kanban*). Сформированный творческий коллектив по своей сути является аналогом *Scrum Team* – проектной команды в методологии управления проектами *Scrum*, а руководитель творческого коллектива – аналогом *Scrum*-мастера (*Scrum Master*). Основная

задача руководителя творческого коллектива как *Scrum*-мастера или сервант-лидера (*Servant Leader*) заключалась в том, чтобы помочь каждому участнику коллектива развиваться и выполнять индивидуальные исследования с максимальной результативностью, оперативно разрешать возникшие противоречия, «защищать» команду от отвлекающих факторов, способствовать концентрации усилий коллектива на решении первоочередных задач, иными словами – организовать всестороннюю эффективную работу творческого коллектива.

Подход к организации работы творческого коллектива

В результате проведения междисциплинарных исследований участники творческого коллектива должны были достичь главной цели проекта: подготовить к изданию монографию на тему «Развитие производства гражданской продукции на предприятиях оборонно-промышленного комплекса».

Работы по проекту были организованны в непривычном для многих участников дистанционном формате [9], однако правильное целеполагание, заданное руководителями, и целеустремленность участников позволили осуществить задуманное в полном объеме и в установленный срок.

Творческим коллективом был выполнен априорный анализ возможных рисков проекта, в результате чего был определен главный из них – сложность организации слаженной командной работы и поступательного движения в работе над каждым разделом монографии. Результатом проявления этого риска могла стать разбалансировка творческих усилий команды проекта, срыв плановых сроков и недостижение установленных показателей результативности, дублирование функций, неверная расстановка приоритетов и причинно-следственных связей при одновременном решении комплекса задач и т. п. При возникновении такой ситуации велика консолидирующая роль руководителя творческого коллектива и руководителей проектов по отдельным направлениям (разделам монографии).

Поскольку большинство участников команды ранее участвовали в различных проектах, то удалось предупредить и минимизировать подобные риски. Именно синтез лучших практик управления и организации проектов, наиболее результативных методов и инструментов позволил добиться синергетического эффекта в процессе организации научно-исследовательских работ.

В качестве научно-методической основы при организации работ творческого коллектива была принята спиральная модель, предложенная в 1986 г. Барри Боэмом для организации жизненного цикла программного обеспечения [10]. Это позволило руководителям проекта (*Scrum-мастерам)* минимизировать возможные организационные и процессные риски при взаимодействии участников творческого коллектива. Каждый виток спирали (цикл), по сути, соответствовал определенной версии (завершенному варианту) монографии. По аналогии с методологиями *Scrum* и *Agile* циклы (или итерации) были ограничены по времени двумя-четырьмя неделями. Отметим, что в методологии *Scrum* длительность цикла – промежуток времени, который завершается конкретным запланированным результатом – принято называть спринтом. После завершения спринта проводился критический анализ полученных результатов, уточнялись направления и глубина (степень детализации) дальнейших исследований и планировались работы на следующем спринте.

Каждый участник творческого коллектива нес персональную ответственность за результат работы над конкретным разделом монографии. В рамках каждого спринта, как и в *Scrum*-проектах, участникам творческого коллектива предоставлялась свобода принятия решений в части содержания разрабатываемых ими разделов монографии.

Описанная модель организации работы творческого коллектива по проведению междисциплинарного исследования и подготовки монографии по его итогам (получившая условное название *Scrum of Scrums*) представлена на рисунке 1.

Основным преимуществом выбранного подхода являлось значительное сокращение времени работы над монографией, а также возможность в любой момент предъявить

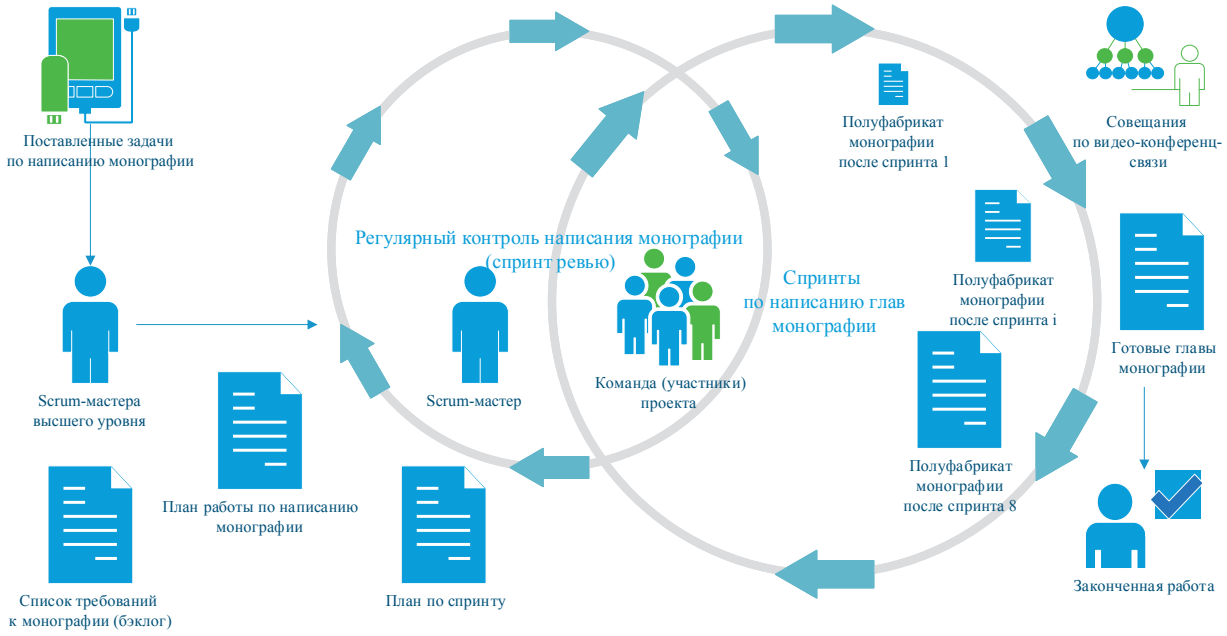


Рис. 1. Модель организации работы творческого коллектива

руководству Программы выявления лидеров трудовых коллективов Концерна логически завершенный результат работы проектной команды.

В рамках каждого спринта (витка спиральной модели) Scrum-мастерами и участниками творческого коллектива реализовывалась серия взаимосвязанных операционных бизнес-процессов. Представляется целесообразным рассмотреть эти бизнес-процессы более подробно.

Анализ исходных данных и постановка задачи исследования. В рамках этого процесса руководителями творческого коллектива было проанализировано задание, сформулированы цель, задачи и направления исследований, подобрана литература по тематике исследования, предложены ориентировочная структура отчета и план-график выполнения работ. В план проекта было включено 8 разделов по различным научным дисциплинам, начиная с исторического опыта проведения диверсификации и конверсии в нашей стране и заканчивая обоснованием, планированием, реализацией и финансированием мероприятий по конверсии и диверсификации.

Одним из наиболее важных факторов успеха проекта, реализованного творческим коллективом, стало системное планирование работ (спринтов) и постоянный мониторинг процесса их реализации. В начале проекта планирование, мониторинг и управление спринтами осуществлялось на основе классической *Scrum*-доски. В процессе реализации проекта классическая доска была заменена специальным программным web-приложением Trello для того, чтобы каждый участник творческого коллектива в on-line режиме имел актуальную информацию о ходе реализации проекта в целом (рис. 2).

Как видно из рисунка 2, электронная *Scrum*-доска отражает хронологию и статус задач спринта, информацию об исполнителе. Задачи спринта могут иметь следующие статусы: «план», «сделать», «в работе», «сделано». Электронная *Scrum*-доска позволяет оперативно планировать работы по каждому участнику проекта и осуществлять контроль исполнительской дисциплины. Красным цветом выделены те задачи, решение которых требует подключения всех участников творческого коллектива для «расшивки узкого места» и завершения спринта «точно в срок». Желтым цветом выделены те задачи, которые находятся в процессе решения и будут решены в срок; помощи команды они не требуют. Зеленым цветом выделены решенные задачи. При раскрытии каждой задачи появляются списки ответственных за ее решение. Красной стрелкой в левом углу выделены те задачи, которые имеют наибольший приоритет в решении.

Рис. 2. Электронная Scrum-доска для мониторинга хода реализации проекта

Использование Scrum-доски позволило руководителям проекта вести непрерывный мониторинг хода выполнения работ и направлять в помощь более опытных участников проекта менее опытным, осуществляя тем самым балансировку ресурсов проекта.

Подготовка материалов по направлениям исследования. Каждый из участников творческого коллектива выбрал в качестве индивидуального задания наиболее интересный с его точки зрения раздел монографии.

Первым спринтом реализуемого проекта стало накопление информации по тематике исследования. В течение нескольких первых недель проекта участники творческого коллектива активно собирали и систематизировали материалы по выбранным направлениям исследования. Все собранные материалы размещались в «облачной» базе данных на корпоративном образовательном портале Научно-образовательного центра Концерна. Для удобства будем называть ее базой данных (БД) проекта. С целью унификации и обеспечения удобства работы вся собранная информация конвертировалась в формат *.docx. Диаграмма, отражающая объем собранной информации по разделам исследования (монографии), представлена на рисунке 3.

Анализ диаграммы, представленной на рисунке 3, позволяет сделать вывод о том, что наименее проработанными в научной литературе являются вопросы планирования, организации и финансирования мероприятий в области диверсификации и конверсии.

После детального анализа БД было выявлено, что в среднем один библиографический источник в формате *.docx занимает около 25 Мб. Таким образом, каждый участник использовал от 10 до 22 учебно-методических материалов при написании монографии. Собранные материалы были использованы в монографии в объеме от 15 до 60 % в зависимости от научной направленности отдельных разделов. Некоторые из направлений исследований (разделов монографии) оказались весьма специфичными, что значительно затруднило систематизацию собранной по ним информации. Например, из-за существенных различий в отечественных и зарубежных подходах таким направлениям стала организация мероприятий в области конверсии и диверсификации.

Каждый раздел был декомпозирован на подразделы, и по ним ставились задачи, которые выполнялись в ходе спринтов длительностью от 1 до 4 недель.

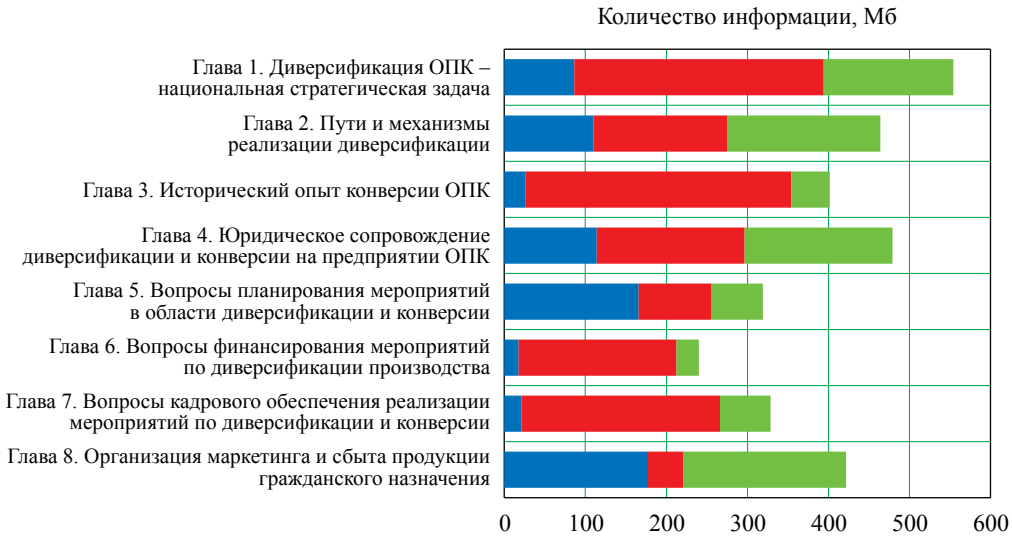


Рис. 3. Объем информации, собранной в базе данных по разделам исследования
– январь; – февраль; – март

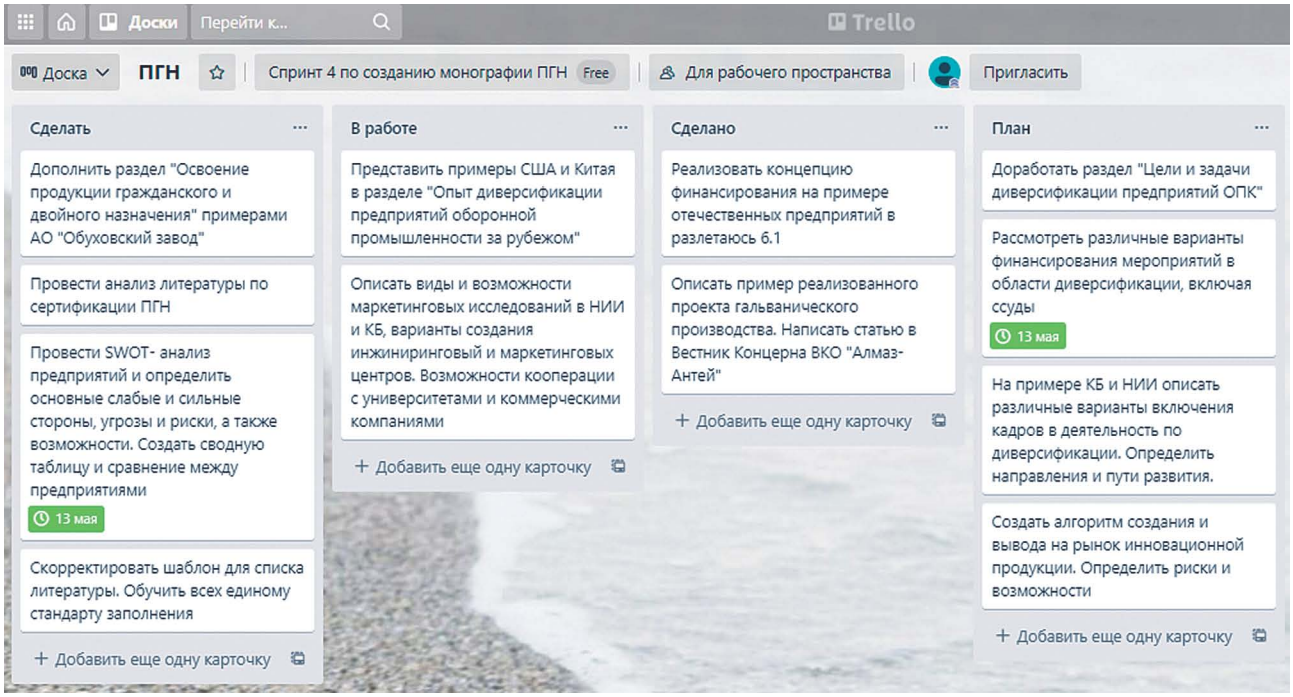


Рис. 4. Электронная Scrum-доска для мониторинга хода реализации спринта проекта

В рамках жизненного цикла проекта каждый из разделов монографии отрабатывался в рамках отдельного спринта. Каждый спринт сопровождался лекциями руководителей по ключевым направлениям проводимых исследований. Лекции общей продолжительностью 15–20 минут проводились посредством корпоративного образовательного портала. Первоначально руководители проводили тематические обучающие семинары для правильного целеполагания и понимания проекта всеми участниками. Со временем продолжительность установочных лекций, проводимых руководителями, постепенно сокращалась и началась серия основных спринтов по подготовке текста монографии (к этому времени от старта проекта прошло около 2 месяцев).

На рисунке 4 представлен ход реализации одного из спринтов.

Основные спринты средней продолжительностью 3 недели каждый проводились с марта по август 2020 г. В рамках каждого

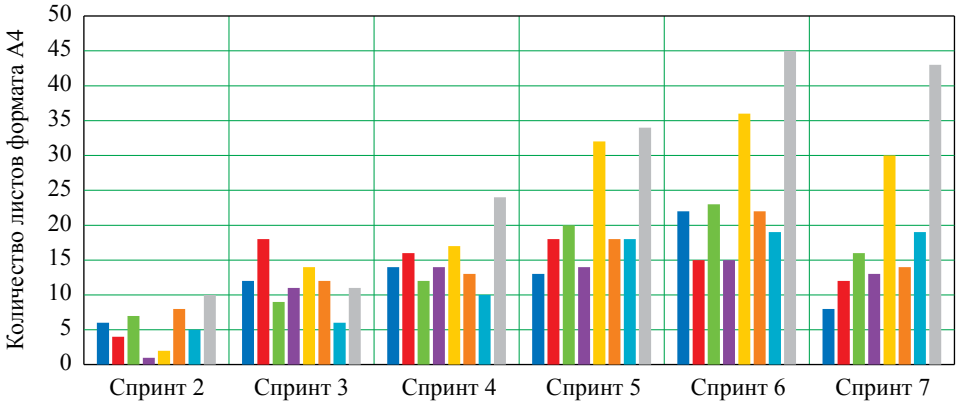


Рис. 5. Число листов формата А4, представленных участниками творческого коллектива по окончании каждого спринта

— диверсификация ОПК – национальная стратегическая задача; — пути и механизмы реализации диверсификации; — опыт диверсификации предприятий ОПК за рубежом и в СССР; — юридическое сопровождение диверсификации и конверсии на предприятии ОПК; — вопросы планирования мероприятий в области диверсификации и конверсии; — вопросы финансирования мероприятий по диверсификации производства; — вопросы кадрового обеспечения реализации мероприятий по диверсификации и конверсии; — организация маркетинга гражданской проддукции на предприятии ОПК

спринта ответственные за разделы готовили материалы исследования и выкладывали их в БД проекта. Как уже отмечалось ранее, авторы разделов самостоятельно определяли, как конкретно они будут выполнять установленные задачи в течение спринта, и, исходя из этого, планировали свою работу.

В каждом разделе средний процент заимствованной информации из источников не превышал 12 %. За этим тщательно следили руководители проекта. По итогам каждого спринта подготовленный участниками творческого коллектива материал проходил проверку на заимствования с использованием ресурса «Антиплагиат». Если процент заимствований превышал допустимый, то автор раздела его перерабатывал. Отсюда можно формально оценить производительность труда участников творческого коллектива, условно измеряемую листами формата А4, выкладываемыми в БД проекта. Финальный результат работы участников проекта по отдельным направлениям (разделам монографии) представлен на рисунке 5 и в таблице 1 в виде интенсивности работы.

Таблица 1

Интенсивность работы участников по спринтам

Название раздела монографии	Средняя интенсивность в форматах А4	Разброс относительно среднего значения в форматах А4
Диверсификация ОПК – национальная стратегическая задача	13	0
Пути и механизмы реализации диверсификации	14	1
Опыт диверсификации предприятий ОПК за рубежом	6	–7
Опыт диверсификации оборонной промышленности в СССР	9	–4
Юридическое сопровождение диверсификации и конверсии на предприятии ОПК	11	–2
Вопросы планирования мероприятий в области диверсификации и конверсии	22	9
Вопросы финансирования мероприятий по диверсификации производства	15	2
Вопросы кадрового обеспечения реализации мероприятий по диверсификации и конверсии	13	0
Организация маркетинга гражданской продукции на предприятии ОПК	17	4
Маркетинговые исследования	11	–2

Как видно из рисунка 5, работа над монографией началась со второго спринта, так как на первом спринте осуществлялся сбор и систематизация информации по направлениям исследования. С целью подготовки окончательной редакции монографии был проведен восьмой спринт. На основании анализа рисунка 5 можно сделать выводы об интенсивности работы каждого участника творческого коллектива.

Из анализа таблицы следует, что важность раздела и его наполнение зависят от конкретной тематики. Например, наполнение раздела актуальными справочными данными отнюдь не тождественно проведению юридического анализа сопровождения диверсификации. Наибольший разброс (–7) виден в разделе «Опыт диверсификации предприятий ОПК за рубежом», что связано с дефицитом информации.

В процессе проведения исследования участники творческого коллектива использовали БД проекта для ознакомления с материалами коллег при подготовке к обсуждению результатов каждого спринта (промежуточных результатов проекта).

Поэтому уже после проведения первого спринта по подготовке текста монографии участники творческого коллектива пришли к необходимости унификации программных средств, применяемых в процессе работы над проектом.

Обсуждение материалов исследования. Обсуждение промежуточных результатов проекта руководителями и участниками творческого коллектива проходило еженедельно в выходные дни посредством видеоконференций на корпоративном образовательном портале Научно-образовательного центра Концерна.

В процессе обсуждений каждому из участников творческого коллектива предоставлялась возможность изложить свое видение путей развития (стратегии) производства гражданской продукции на предприятиях ОПК. При этом основной сложностью организации процесса совместной работы творческого коллектива являлся различный исходный уровень знаний об изучаемых процессах. Это было обусловлено тем, что участники творческого коллектива представляли очень разные предприятия как по организационной структуре, номенклатуре производимой продукции, так и по базовым технологиям и серийности производства. Следует также отметить и отсутствие у участников творческого коллектива практического опыта работы по конверсионному направлению. Поэтому на первом этапе исследования основной задачей руководителей проекта в ходе семинаров было «выставление приборного ноля» – «выравнивание» у участников коллектива представлений и базовых знаний по вопросам организации освоения на предприятиях непрофильной для организаций ОПК гражданской продукции. Однако в ходе общения на семинарах был выработан эффективный алгоритм, позволивший не только ознакомить участников проекта с проблемами диверсификации и конверсии, но и активизировать их творческий потенциал. По существу, каждое семинарское занятие превращалось в своеобразный мозговой штурм, на котором обсуждались актуальные проблемные вопросы развития производства гражданской продукции на предприятиях ОПК. Пример основных проблемных вопросов, предлагаемых в ходе мозгового штурма решений и их отражения в монографии, представлен в таблице 2. При этом важно отметить, что участники обсуждения рассматривали предлагаемые решения с позиции своего предприятия, хорошо представляя особенности его производственной деятельности. Такой подход позволил выработать единые алгоритмы решения проблемных вопросов в области конверсии и диверсификации производства, пригодные для большинства предприятий Концерна.

Выявление проблемных вопросов и поиск оптимальных решений на основе метода мозгового штурма позволили предупредить риски и найти верные решения в кратчайшие сроки. Метод мозгового штурма применялся практически постоянно, особенно перед запуском нового спринта.

Как уже отмечалось ранее, участники творческого коллектива представляли различные структурные подразделения дочерних

Таблица 2

Пример обсуждаемых проблемных вопросов и найденных решений

Проблемный вопрос	Решение, найденное методом мозгового штурма	Найденное решение нашло отражение в монографии
Где искать материалы по диверсификации за рубежом?	1. Google-переводчиком смотреть иностранные книги. 2. Анализировать статьи русскоязычных авторов. 3. Смотреть готовые отчеты по выпуску гражданской продукции по годам и делать выводы о диверсификации по ним. 4. Написать письмо иностранной организации с просьбой дать материал по диверсификации	Нет Нет Да Нет
Как анализировать риски выпуска гражданской продукции?	1. Обычной оценкой рисков, как и для продукции военного назначения. 2. Нужны специфика и учет возможностей предприятий и первоначальный поиск заказчика	Нет Да
Какие виды сертификации продукции гражданского назначения следует рассматривать?	1. Российскую. 2. Европейскую. 3. Американскую	Да Нет Нет
Откуда брать информацию об опыте развития продукции гражданского назначения в ОПК в настоящее время?	1. Интернет. 2. Звонок в отдел внешних связей. 3. Посещение предприятий. 4. Литература	Да Да Да Да
Какой вид продукции следует установить как базовый для выпуска на предприятиях ОПК?	1. Наукоемкую. 2. Простую. 3. ТНП. 4. Сложную	Да Нет Нет Да

обществ Концерна и в ходе семинарских занятий получили достаточно полное представление об особенностях работы других предприятий. Для этого руководители проекта в процессе обсуждения материалов исследования формулировали конкретные задания по сбору, систематизации и представлению информации по изучаемому вопросу в рамках профессиональных интересов и компетенций каждого из участников творческого коллектива.

Доработка материалов и оформление результатов исследования. После завершения верстки рабочей версии каждого из разделов проекта с ней знакомился каждый из участников творческого коллектива с целью формирования предложений и рекомендаций по доработке. Самым сложным на этом этапе работы было выработать консолидированное мнение: авторы раздела весьма неоднозначно относились к неизбежному редактированию их текстов. Основной трудностью являлось сокращение объема материала практически всех разделов проведенного исследования, чтобы уложиться в заданный ограниченный объем будущей монографии без потери ее практической и информационной ценности. Единственным способом решения этой задачи являлось уточнение формулировок и жесткая корректура и редактирование текста. При общей сборке текста монографии также пришлось заниматься выравниванием стилистики изложения. Поскольку сделать это коллективно весьма проблематично, то на финальном этапе эту работу выполнил руководитель творческого коллектива.

Апробация материалов исследования. На этом этапе участники проекта выступали на профильных научно-практических конференциях и семинарах, публиковали статьи по направлениям исследования в ведущих российских рецензируемых научных журналах, презентовали промежуточные результаты исследования на сборах победителей Программы выявления лидеров трудовых коллективов Концерна [11–15].

Важно подчеркнуть, что наряду с теоретическими исследованиями проект содержит практические рекомендации по конверсии и диверсификации высокотехнологичных предприятий ОПК начиная от поиска идей (анализа рынка, конкурса предложений и др.)

и заканчивая организацией проекта по маркетингу и расширению ассортимента выпускаемой продукции. Данные рекомендации прошли апробацию в дочерних обществах Концерна и легли в основу проекта [11–15].

Рекомендации по организации исследований территориально распределенными творческими коллективами

Приобретенный практический опыт реализации территориально распределенным творческим коллективом проекта «Развитие производства гражданской продукции на предприятиях оборонно-промышленного комплекса» позволил сформировать рекомендации по организации подобных работ, в частности, междисциплинарных поисковых научных исследований. Основными из них являются следующие.

1. На стадии планирования проекта должны быть определены временные рамки проекта и, при необходимости, сроки сдачи материала. Лучше сдать «сырой» материал вовремя, чем «идеальный» после окончания реализации проекта.

2. Каждый участник творческого коллектива должен выбрать в качестве индивидуального направления работ (задания) наиболее интересный, с его точки зрения, раздел исследования (монографии).

3. Каждый участник творческого коллектива должен нести персональную ответственность за предоставляемый материал, то есть не допускается несколько ответственных. Так повышается дисциплина участника и его уровень ответственности.

4. Перед началом работ по формированию материалов исследования (текста разделов монографии) целесообразно унифицировать применяемое в рамках проекта программное обеспечение, в том числе и его версии.

5. Одним из эффективных приемов дистанционной работы является организация коллективного обсуждения конкретных проблемных вопросов. При этом подготовка к обсуждению – формулирование повестки, предварительный подбор исходной информации и т. п., а также модерация самого хода обсуждения реализуются руководителем коллектива.

6. Обсуждение текущего хода выполнения исследований целесообразно проводить регулярно раз в неделю в строго определенное время. Каждому участнику творческого коллектива должно предоставляться до 3 минут на доклад о проделанной за неделю работе, до 5 минут обсуждения и переход к следующему докладу. Такая схема подчеркивает значимость выступления и требует готовности участника лаконично изложить полученные результаты.

7. Руководитель проекта должен определять пути развития исследования с учетом полученных от участников материалов, конкретизировать или предложить дополнить исследования новыми материалами.

8. Участникам творческого коллектива должен быть предоставлен свободный доступ к информации и данным, который не предполагает доступ к государственной или коммерческой тайне по тематике проекта.

Заключение

Анализ опыта организации и проведения междисциплинарного научного исследования путей развития производства гражданской продукции на предприятиях ОПК, выполненного территориально распределенным многопрофильным творческим коллективом, позволил сформулировать заключительные выводы.

1. Проведение сложного междисциплинарного исследования может быть успешно реализовано на базе творческого коллектива молодых руководителей и специалистов – представителей различных предприятий вертикально интегрированной производственной структуры, в том числе с использованием дистанционных информационных технологий.

2. Существенным фактором, влияющим на эффективность и результативность выполнения исследования, является рациональная организация управления и координации работы со стороны руководителей творческого коллектива, направленная на обеспечение выполнения индивидуальных заданий каждым участником коллектива в установленные сроки.

3. Подготовка монографии, определенная в качестве конечной цели выполнения междисциплинарного исследования, оказалась

методически вполне оправданной, поскольку позволила не только четко и однозначно установить срок его выполнения, но и структурировать результаты в виде перечня разделов монографии, распределив работу над ними между конкретными членами творческого коллектива.

4. Использование в качестве научно-методической основы работы творческого коллектива спиральной модели Барри Бэма позволило достаточно быстро реализовать проект за относительно небольшое количество циклов – спринтов, которых в итоге оказалось всего восемь.

5. Наличие постоянно пополняемой «облачной» базы данных, размещенной на образовательном портале Научно-образовательного центра Концерна, существенно упростило организацию исследования в целом, обеспечив тем самым эффективную индивидуальную работу участников творческого коллектива в дистанционном режиме. При этом промежуточные результаты индивидуальных исследований были доступны всем членам творческого коллектива.

6. Использование сервиса видеоконференций корпоративного образовательного портала Научно-образовательного центра Концерна для коллективного обсуждения текущих результатов при выполнении исследований позволило каждому участнику творческого коллектива изложить свое собственное мнение, детально обсудить его и выработать консолидированное решение. Фактически каждое такое коллективное общение превращалось в своеобразный мозговой штурм.

7. Обоснованность и достоверность положений, сформулированных в ходе выполнения исследования, подтверждается их апробацией: промежуточные результаты исследования представлялись на профильных научных конференциях и на сборах победителей Программы выявления лидеров трудовых коллективов Концерна. Полученные результаты исследования были опубликованы в ведущих российских рецензируемых научных журналах.

Важно подчеркнуть, что результаты проведенного творческим коллективом исследования стали одной из 10 монографий, изданных в рамках реализации Программы выявления лидеров трудовых коллективов Концерна. Подготовка монографий стала возможной благодаря высокому профессионализму и большой системной работе, проведенной генеральным директором Концерна, канд. эконом. наук *Я.В. Новиковым*, заместителем руководителя аппарата генерального директора – руководителем секретариата Концерна доктором физ.-мат. наук, профессором *Г.В. Козловым*, заместителем директора Научно-образовательного центра Концерна канд. техн. наук *С.Е. Ерошиным,* а также благодаря руководителям и специалистам дочерних обществ Концерна, которые способствовали проведению исследований.

Литература

1. *Щеглов Д.К.*, *Марков Е.П.* Управление инновационными проектами в ракетно-космической промышленности: ученое пособие. Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2019. 206 с.

2. *Большаков Д.Ю.*, *Ерошин С.Е.*, *Козлов Г.В.* Организация проектной работы распределенных коллективов // Инновации. 2019. № 5(247). С. 3–8.

3. *Ерошин С.Е.*, *Козлов Г.В.* Анализ системы управления научными исследованиями // Инновации. 2020. № 6(260). С. 42–45.

4. Щеглов Д.К. и др. Развитие производства гражданской продукции на предприятиях оборонно-промышленного комплекса: монография М.: ООО «Айти Сервис», 2021. 163 с.

5. Совещание по вопросам диверсификации производства продукции гражданского назначения организациями ОПК. URL: http://www.kremlin.ru/events/president/news/56699 (дата обращения: 20.06.2020).

6. Послание Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации от 01.12.2016 г. URL: http://www.kremlin.ru/acts/ bank/41550 (дата обращения: 16.03.2021).

7. Программа выявления лидеров трудовых коллективов Концерна ВКО «Алмаз – Антей» // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2017. № 1. С. 4–47.

8. *Большаков Д.Ю.*, *Козлов Г.В.*, *Ерошин С.Е.* Программа выявления лидеров в холдинговых

структурах // Экономические стратегии. 2018. Т. 20. № 1(151). С. 168–181.
9. *Коньякова А.В.*, *Тимофеев В.И.*, *Щеглов Д.К.* Организационно-техническое обеспечение дистанционной работы сотрудников в условиях диверсификации промышленного производства // Управленческое консультирование. 2020. № 10(142). С. 91–108.
10. *Boehm B.* Spiral Development: Experience, Principles, and Refinements. COTS-Based Systems, 2000. 49 p.
11. *Напольнов М.А.*, *Щеглов Д.К.*, *Тимофеев В.И.*, *Чириков С.А.* Анализ опыта проведения конверсии в советской оборонной промышленности // Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. 2020. № 4. С. 93–103.
12. *Андреев И.А.* Применение инструментов бережливого производства в гальваническом цехе // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 2(33). С. 32–44.
13. *Рябоконь М.С., Щеглов Д.К., Тимофеев В.И., Чириков С.А.* Организация работы отдела маркетинга на предприятиях оборонно-промышленного комплекса в условиях диверсификации промышленного производства // Инновации. 2020. № 3(257). С. 48–53.
14. *Рябоконь М.С.*, *Скуйбин Б.Г.*, *Щеглов Д.К.* Патентные исследования как инструмент анализа рынка технических решений // Управленческое консультирование. 2019. № 11(131). С. 155–162.
15. *Щеглов Д.К.*, *Тимофеев В.И.*, *Андреев И.А.*, *Чириков С.А.* Оценивание уровня кооперации предприятий интегрированных организационно-производственных структур в условиях диверсификации производства // Инновации. 2019. № 8(250). С. 67–70.

Об авторах

Щеглов Дмитрий Константинович – кандидат технических наук, доцент, начальник расчетно-исследовательского отделения акционерного общества «Конструкторское бюро специального машиностроения»; заведующий базовой кафедрой «Средства ВКО и ПВО» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Область научных интересов: инженерные расчеты, методы проектирования сложных технических систем, системный анализ, промышленная автоматизация, управление проектами, методы и средства цифровой трансформации предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности.

Андреев Илья Андреевич – заместитель начальника управления развития – начальник отдела организационного развития акционерного общества «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Область научных интересов: организация производства, бережливое производство, технологическая и конструкторская подготовка производства.

Чириков Сергей Алексеевич – старший преподаватель кафедры «Ракетостроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Область научных интересов: ракетная техника и космонавтика, методы поиска новых технических решений, конверсия и диверсификация промышленных производств.

Тимофеев Вадим Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация и управление аэрокосмическими системами» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Область научных интересов: аэродинамика и динамика полета летательных аппаратов, авиационные и космические системы, организация производства в аэрокосмическом приборостроении, оценка влияния факторов природной среды на эффективность функционирования сложных технических систем.

Practice of applied interdisciplinary research carried out by a geographically distributed think tank

Shcheglov D. K.[1,2], Andreev I. A.[3], Chirikov S. A.[2], Timofeev V. I.[4]

[1] *"Design Bureau of Special Machine-Building", Saint Petersburg, Russian Federation*

[2] *D. F. Ustinov Baltic State Technical University "VOENMEH", Saint Petersburg, Russian Federation*

[3] *Obukhovsky plant of the "Almaz – Antey" Northwestern Regional Centre, Saint Petersburg, Russian Federation*

[4] *Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russian Federation*

The paper covers an analysis of the track record of a research project on studying the development strategy for civilian production at the Russian defence enterprises. A distinguishing feature of the research is use of the flexible project approach and lean manufacturing concepts in terms of the interdisciplinary research by a geographically distributed think tank.

Keywords: project management, interdisciplinary research, think tank, military industrial complex, conversion, diversification, civilian products, consumer goods.

Information about the authors

Shcheglov Dmitry Konstantinovich – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Head of the Calculation and Research Department, "Design Bureau of Special Machine-Building", Head of the Base Department "Aerospace Defence and Air Defence Technologies", D. F. Ustinov Baltic State Technical University "VOENMEH", Saint Petersburg, Russian Federation.
Research interests: engineering calculations, methods for designing complex technical systems, system analysis, industrial automation, project management, methods and means of digital transformation of enterprises in high-tech industries.

Andreev Ilya Andreevich – Deputy Head of the Development Department, Head of the Organizational Development Department, Joint Stock Company Obukhovsky plant of the "Almaz – Antey" Northwestern Regional Centre, Saint Petersburg, Russian Federation.
Research interests: organization of production, lean production, technological and design preparation of production.

Chirikov Sergey Alekseevich – Senior Lecturer of the Rocket and Missile Engineering Department, D. F. Ustinov Baltic State Technical University "VOENMEH", Saint Petersburg, Russian Federation.
Research interests: rocketry and space technology, new technical solutions search methods, conversion and diversification of industrial production.

Timofeev Vadim Ivanovich – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Department of Operation and Control of Aerospace Systems, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russian Federation.
Research interests: aerodynamics and flight dynamics of aircraft, air systems, space systems, aerospace instrumentation production arrangement, assessment of environment effect upon complex technical systems functioning.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-25-30
УДК 621.396.96

Вопросы прогнозирования дальности для устранения скоростной ошибки и результаты натурного эксперимента

С. Е. Фетисов, Ю. П. Волошин

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», Москва, Российская Федерация

В радиолокаторах с линейно-частотной модуляцией зондирующего импульса скоростная ошибка измерения дальности может составлять существенную часть систематической ошибки. Скоростную ошибку можно устранить путем прогнозирования дальности. Применение этого подхода в радиолокаторах с аналоговой обработкой сигналов затруднялось отсутствием развитых вычислительных средств. В радиолокаторах с цифровой обработкой сигналов скоростную ошибку дальности нередко устраняют через оценку частоты Доплера. В статье рассматриваются вопросы устранения скоростной ошибки путем прогнозирования дальности без оценки частоты Доплера и приводится результат натурных испытаний данного метода в обзорном радиолокаторе.

Ключевые слова: измерение дальности, функция неопределенности ЛЧМ-импульса, скоростная ошибка дальности, прогноз дальности, поправка Клаудера и Рихачека

Для цитирования: Фетисов С. Е., Волошин Ю. П. Вопросы прогнозирования дальности для устранения скоростной ошибки и результаты натурного эксперимента // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 25–30. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-25-30

For citation: Fetisov S. E., Voloshin Yu. P. Range prediction issues for doppler related range error elimination, experiment results // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 3. P. 25–30. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-25-30

Поступила 09.06.2021 *Отрецензирована* 25.06.2021 *Одобрена* 07.07.2021 *Опубликована* 20.10.2021

Прогнозирование дальности

При наличии радиальной составляющей скорости движения цели v_r относительно радиолокационной станции (РЛС) наблюдается доплеровское смещение частоты принимаемого эхосигнала $F = -2v_r f_0/c$, где f_0 – несущая частота, c – скорость света. Рассогласование по частоте F между характеристикой согласованного фильтра и принимаемым прямоугольным импульсом с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-импульсом) с длительностью $\tau_и$ и девиацией частоты Δ_f приводит к временному смещению максимума сжатого импульса на $\tau = -F\tau_и/\Delta_f$, что порождает скоростную ошибку измерения дальности [3, 4].

$$\Delta_r = c\tau/2 = v_r\tau_и f_0/\Delta_f. \quad (1)$$

При движении цели с постоянной радиальной скоростью v_r за время Δ_t она пройдет путь $v_r\Delta_t$. Приравнивая путь к скоростной ошибке (1), получим время:

$$\Delta_t = \tau_и f_0/\Delta_f, \quad (2)$$

за которое цель пройдет расстояние, равное скоростной ошибке дальности, чем и скомпенсирует эту ошибку. Время Δ_t не зависит от радиальной скорости цели и определяется только известными параметрами ЛЧМ-импульса.

В работе [1] указывается, что измеренная со скоростной ошибкой (1) дальность до цели будет соответствовать ее истинному местоположению через время Δ_t после момента отражения сигнала $t_{отр}$ в момент времени

$$t_д = t_{отр} + \Delta_t. \quad (3)$$

При равномерном движении цели и $\Delta_t > 0$ измеренное значение дальности будет

© Фетисов С. Е., Волошин Ю. П., 2021

определять местоположение цели в момент времени $t_д$ и является прогнозом [2], а при $\Delta_t < 0$ измеренное значения дальности является ретроспективным и относится к прошедшему моменту времени. Измерив после согласованной фильтрации момент приема импульса $t_{пр}$, который при движении цели смещен на время τ, и зная момент излучения $t_{изл}$, нетрудно показать, что момент измерения дальности без ошибки приходится на время

$$t_д = \frac{(t_{изл.} + t_{пр.})}{2} + \left(1 - \frac{v_r}{c}\right)\Delta_t. \qquad (4)$$

В случае $v_r << c$ исключение из (4) слагаемого $\frac{v_r}{c}\Delta_t$ приводит к весьма незначительной ошибке $t_д$.

Если частота Доплера F много меньше девиации частоты Δ_f, расширением основного лепестка сжатого ЛЧМ-импульса можно пренебречь. В этом случае при равномерном движении цели оптимальная оценка дальности в прогнозный момент времени $t_д$ в статистическом смысле не смещена относительно истинного положения цели и имеет минимально возможную дисперсию [9].

Исследования [1] и [9] показывают возможность устранения скоростной ошибки измерения дальности в РЛС с линейной частотной модуляцией зондирующего импульса без привлечения каких-либо априорных сведений о скорости движения цели и без измерения скорости средствами сигнальной либо траекторной обработки.

Для систем с выдачей потребителю измеренной дальности цели в режиме реального времени прогнозирование дальности сводится к задержке выдачи на время Δ_t. Для систем с упреждающим целеуказанием возможна выдача измеренной дальности без задержки в паре с определяемым РЛС временем упреждения Δ_t.

Вопросы применения прогноза дальности

В статье особое внимание уделяется измерению с прогнозированием дальности, которое имеет место при положительном изменении частоты ЛЧМ-импульса. Несмотря на достаточную теоретическую проработку вопросов устранения скоростной ошибки [1–3, 9], в известных публикациях не встречаются сведения об использовании в существующих отечественных РЛС рассматриваемого метода прогнозирования дальности.

Прогнозирование дальности в РЛС с аналоговой обработкой сигналов затруднялось отсутствием необходимой элементной базы, позволяющей задерживать выдачу целеуказания на длительное время (линия задержки на сотни миллисекунд). Также применение ограничивалось наличием других, более значительных ошибок целеуказания, связанных с временной задержкой передачи донесений и с погрешностью нанесения информации на планшет воздушной обстановки.

Применение прогнозирования дальности стало доступным с развитием цифровой элементной базы. Однако в отечественной литературе последнего времени данному подходу не уделяется достаточного внимания. Современные публикации по теме устранения скоростной ошибки измерения дальности связаны с синтезом новых сигналов, которые менее чувствительны к доплеровскому смещению или с исследованием границ устойчивости алгоритмов траекторной обработки при наличии скоростной ошибки [5, 6].

Важно отметить, что в настоящее время прогнозирование дальности может использоваться как метод упреждения для систем ПВО и по ряду причин приобретает все большее практическое значение:

1. Необходимость наблюдения современными РЛС высокоскоростных гиперзвуковых и баллистических целей при использовании ЛЧМ-импульсов заставляет учитывать скоростную ошибку измерения дальности наиболее эффективным способом. В отличие от оценки дальности после компенсации скоростной ошибки с привлечением неточно измеренной радиальной скорости цели средствами цифровой либо траекторной обработки дисперсия прогнозной оценки дальности минимальна [9].

2. К современным РЛС обнаружения повышаются требования по точности измерения координат цели, которые могут

удовлетворяться за счет снижения систематической ошибки с использованием метода прогнозирования дальности.

3. Прогнозирование дальности способно обеспечить упреждающее целеуказание в момент наблюдения цели, что может быть важным для средств прямого поражения.

Следует отметить два ограничения, возникающие в ряде случаев при использовании прогноза дальности.

Первое ограничение связано с предельно допустимым ускорением при движении цели. Поскольку измеренное значение дальности применяется через фиксированное время Δ_t, при наличии радиального ускорения цели за Δ_t секунд накапливается путевая ошибка $a_r \cdot \Delta_t^2/2$, где a_r – радиальное ускорение. При существенных значениях Δ_t и a_r ошибка измерения дальности может достигать значительных величин. Данная ошибка может компенсироваться средствами траекторной обработки через фильтрацию второй производной дальности [7].

Второе ограничение связано с применяемыми после прогнозирования дальности методами траекторной обработки. Алгоритмы траекторной обработки трехкоординатных РЛС должны учитывать, что угловые координаты и прогноз дальности определяют пространственное местоположение цели в разные моменты времени. Такой учет затрудняется тем, что независимая фильтрация по траекторным признакам часто производится в прямоугольной системе координат, а параметры цели измеряются в сферической. Перевод из одной системы в другую при разномоментных значениях углов и дальности, строго говоря, не корректен. В ряде случаев ошибкой некорректного перевода можно пренебречь, применяя измеренные значения углов к прогнозному моменту времени. Такой подход дает малую угловую погрешность при значительном удалении цели. В этом случае максимальная ошибка измерения угла цели составляет $\approx \arctan\left(\frac{\Delta_t v_ц}{r_ц}\right)$ и наблюдается при ее движении по параметру со скоростью $v_ц$ на дальности $r_ц$.

В работе [5] указывается на возможность возникновения значительной ошибки прогноза дальности в случае наблюдения групповой цели из-за существенного искажения главного лепестка автокорреляционной функции узкополосного ЛЧМ-сигнала. С учетом анализа [1] отражений от группы целей данное заключение стоит, вероятно, относить к другой известной проблеме – к совместному различению и оценке параметров интерферирующих сигналов [8].

Проведение исследований вызвано важностью изучения методов повышения точности существующих и перспективных РЛС путем устранения скоростной ошибки измерения дальности. Эффект от использования метода прогнозирования дальности для устранения скоростной ошибки исследовался при проведении натурных испытаний на образце РЛС кругового обзора.

Результаты натурных испытаний

В ходе натурных испытаний измерялись координаты самолета и регистрировались эталонные координаты с помощью бортового GPS-приемника. Преобразование эталонных координат точечной цели из геодезической системы в прямоугольную проводилось согласно ГОСТу Р 51794-2008 [4], после чего прямоугольные координаты использовались для расчета эталонной дальности с учетом точки стояния РЛС. Среднеквадратическое отклонение эталонных координат в прямоугольной системе при работе встроенного в бортовой GPS-приемник модуля калмановской фильтрации не превышало 10 м, что считалось достаточным для эталона.

Согласно эксперименту, на основном участке трассы самолет совершал полет с постоянной скоростью в направлении от РЛС, а после разворота – на РЛС. Радиальная скорость движения определялась как проекция вектора курсовой скорости на нормированный радиус-вектор траекторной точки в топоцентрической системе координат с началом в точке стояния РЛС. На рисунке 1 приводится график зависимости радиальной скорости движения самолета от времени.

Расчет разности между измеренной дальностью самолета и эталонной дальностью позволил сформировать графики мгновенных

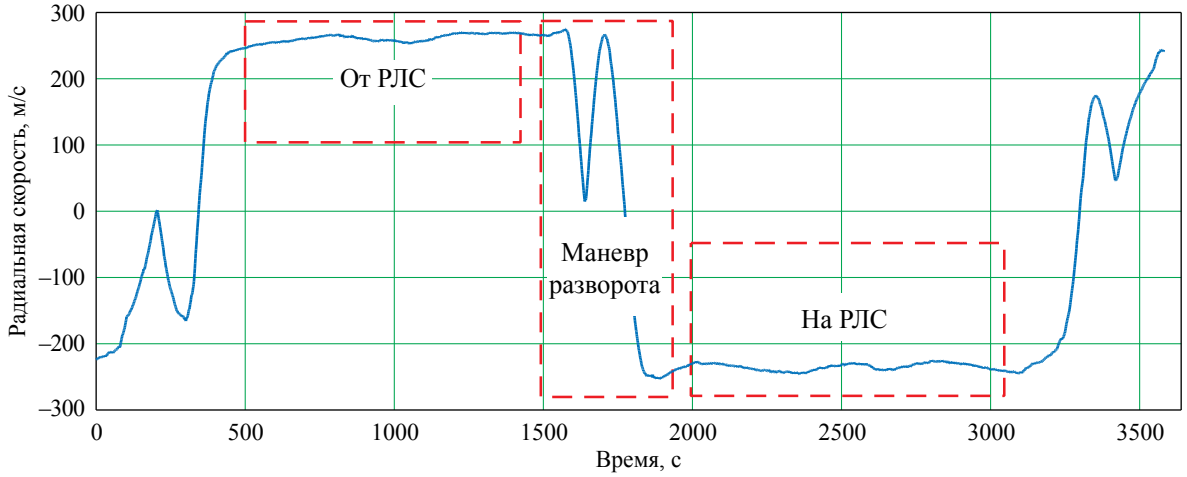


Рис. 1. График радиальной скорости движения самолета

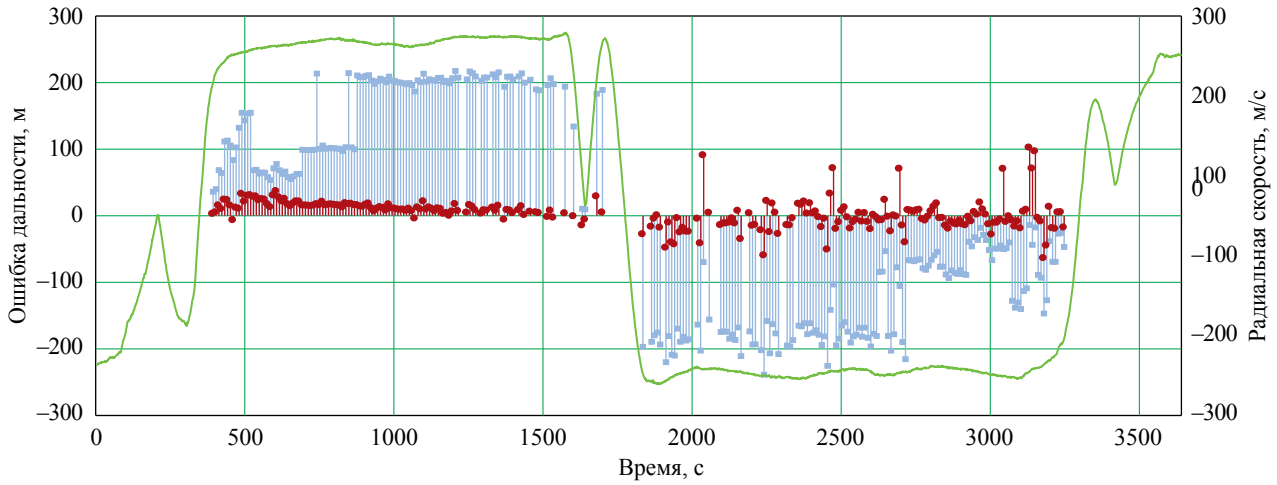


Рис. 2. Мгновенные ошибки измерения дальности без компенсации скоростной ошибки и с компенсацией через прогноз дальности при радиальной скорости движения цели от минус 250 до 280 м/с

– ошибки без компенсации ск. ошибки; – ошибки с компенсацией ск. ошибки; – радиальная скорость

ошибок для двух типов измерения: без компенсации скоростной ошибки измерения дальности и с компенсацией скоростной ошибки через поправку времени приема сигнала на Δ_t. Графики этих мгновенных ошибок представлены на рисунке 2. Дальность цели оценивалась методом максимального правдоподобия с использованием априорно известной формы сжатого ЛЧМ-сигнала исходя из предположения, что $F << \Delta_f$.

Как видно из графиков на рисунке 2, величины мгновенных ошибок измерения дальности без компенсации (светлые отметки на рисунке) в значительной степени зависят от скорости движения цели. В случае когда радиальная скорость движения самолета мало отличалась от нуля (1600 секунд на временной шкале), ошибки измерения дальности были минимальны и незначительно отличались от ошибок прогноза дальности (темные отметки на рисунке).

Ступенчатый характер скоростных ошибок измеренной дальности на временном интервале 500–1000 и 2600–3300 секунд обусловлен изменением параметров зондирования для обеспечения необходимой зоны обзора (на разных углах места в процессе параллельно-последовательного обзора использовались сигналы разной длительности). Для компенсации скоростной ошибки дальности использовалась разная поправка Δ_t, которая в зависимости от параметров зондирующего импульса варьировалась в диапазоне от ≈0,1 до ≈0,8 секунды. Априорная информация о скорости движения

цели или результаты измерения скорости при этом не использовались. Отсутствие ступенек на графике мгновенных ошибок прогноза дальности говорит о правильности выбора временной поправки Δ_t согласно (2). На графике мгновенных ошибок прогноза дальности также не прослеживается зависимости от радиальной скорости движения самолета.

Возросшее СКО измерения дальности в правой части графика на рисунке 2 было вызвано снижением ОСШ после смены ракурса цели в средней точке временной шкалы.

Выводы

Проанализированы вопросы применимости прогнозирования дальности для устранения скоростной ошибки и возникающие при этом ограничения. Натурный эксперимент подтвердил возможность использования метода прогнозирования дальности для устранения скоростной ошибки, что согласуется с выводами теоретических исследований [1–3, 9]. Характер мгновенных ошибок измерения дальности, полученных в процессе проведения натурных испытаний, показывает практическое отсутствие зависимости между систематической ошибкой прогноза дальности и радиальной скоростью движения цели.

Список литературы

1. Klauder J. R., Price A. C., Darlington S., Albersheim W. J. The Theory and Design of Chirp Radars // Bell System Technical Journal. 1960. Vol. 39, no. 4.

2. Кук М. Б. Радиолокационные сигналы. М.: Советское радио, 1971. 568 с.

3. Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов. Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Советское радио, 1970. 560 с.

4. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек.

5. Иванников А. П. Способ уменьшения влияния доплеровского смещения частоты в РЛС высокой мощности с частотной модуляцией // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 4. С. 20–28.

6. Трофименко М. А., Фарбер В. Е. Оценка влияния наличия скоростной ошибки при измерениях дальности в РЛС с ЛЧМ-сигналом на границы устойчивости алгоритмов оценки дальности и радиальной скорости // Радиотехника. 2015. № 10. С. 7–16.

7. Fitzgerald R. J. Effects of Range-Doppler Coupling on Chirp Radar Tracking Accuracy // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 1974. Vol. AES-10, № 4. P. 528–532.

8. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.

9. Rihaczek A. W. Range Accuracy of Chirp Signals // Proceedings of the IEEE. 1965. Vol. 53, issue 4. P. 412-413.

Об авторах

Фетисов Сергей Евгеньевич – ведущий инженер-программист отдела 025 акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», Москва, Российская Федерация
Область научных интересов: радиолокация, цифровая обработка сигналов.

Волошин Юрий Петрович – начальник сектора 444 отдела акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», Москва, Российская Федерация
Область научных интересов: радиолокация, цифровая обработка сигналов.

Range prediction issues for doppler related range error elimination, experiment results

Fetisov S. E., Voloshin Yu. P.

JSC All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering, Moscow, Russian Federation

Doppler related range measurement error (velocity error) can make a major contribution to the systematic error in radars with linear-frequency modulation of a probing pulse. The velocity error can be eliminated by range prediction. It was difficult to apply this approach to radars with analogue signal processing due to lack of advanced computer aids. In radars with digital signal processing, the velocity error in range measurements is often eliminated by estimating Doppler frequency. This paper covers issues related to the elimination of the velocity error by range prediction without Doppler frequency estimation and presents the experiment results at surveillance radar.

Keywords: Range measurement, LFM pulse ambiguity function, velocity error in range measurements, range prediction, Klauder – Rihaczek correction

Information about the authors

Fetisov Sergey Evgenievich – Lead Engineer, Department 025, JSC All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering, Moscow, Russian Federation
Science research interests: radio detection and ranging, digital signal processing.

Voloshin Yuriy Petrovich – Head of Department Section 444, JSC All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering, Moscow, Russian Federation
Science research interests: radio detection and ranging, digital signal processing.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-31-39
УДК 621.396.677

Электродинамика проводных двухдиапазонных излучателей дипольного вида с концевым типом возбуждения

С. А. Алексейцев[1,2], Ю. Н. Паршин[1,2]

[1] *Акционерное общество НПО «НИИИП-НЗиК», Новосибирск, Российская Федерация*

[2] *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Российская Федерация*

В работе в достаточно краткой форме приводится анализ основных электродинамических характеристик, необходимых при проектировании возбудителей двухдиапазонных директорных антенн (ДДА) дипольного вида, состоящих из двух электрически тонких проводников. Исследование концевого типа возбуждения упомянутой системы проводников позволяет создать предпосылки к проектированию принципиально новых схем классических дипольных излучателей, когда исключается необходимость располагать питающие полоски, возбуждающие непосредственно плечи диполя, в непосредственной близости, и тем самым ослабляется их электромагнитная паразитная связь. Последнее препятствует возникновению асимметрии в распределении амплитуды поверхностных токов на плечах диполя, позволяя увеличить его направленность и согласование с питающим фидером.

Ключевые слова: излучатель дипольного вида, направленность, согласование, двухдиапазонные антенны.

Для цитирования: Алексейцев С. А., Паршин Ю. Н. Электродинамика проводных двухдиапазонных излучателей дипольного вида с концевым типом возбуждения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 31–39. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-31-39

For citation: Alekseytsev S. A., Parshin Yu. N. Electrodynamics of dual-band end-fed wire dipole radiators // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 3. P. 31–39. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-31-39

Поступила 20.06.2021 *Отрецензирована* 15.07.2021 *Одобрена* 28.07.2021 *Опубликована* 20.10.2021

Введение

Печатные излучатели дипольного вида и более сложные приемо-передающие устройства на их основе представляют собой класс устройств, широко востребованных в настоящее время. Потенциальное использование таких антенн в двух/многодиапазонных радиолокационных станциях (РЛС) кругового и секторного обзоров позволят комплексно решать задачу параллакса за счет совмещения фазовых центров разнодиапазонных частотных каналов. Такие излучатели обладают близкой к линейной поляризацией, ярко выраженными направленными свойствами, относительной простотой конструкции (пара плеч излучателей дипольного вида), потенциальной пригодностью к интегрально-групповой компоновке. Явный недостаток таких излучателей заключается в относительно узкой полосе частот, в пределах которой достигается согласование с питающим фидером и приемлемые диаграммы направленности (ДН). Данный недостаток присущ практически всем резонансным антеннам. В ряде практических задач для расширения полосы рабочих частот используют паразитные элементы или резистивные покрытия [1–4]. Например, в [3, 4] плечи диполя выполняются из резистивного материала с малой проводимостью. Это существенно увеличивает коэффициент затухания волны, и поэтому в плече не формируется

© Алексейцев С. А., Паршин Ю. Н., 2021

стоячая волна. Однако использование резистивного материала увеличивает омические потери в плечах излучателя. Также внимания заслуживает метод использования рамки с корректирующей емкостью [2], позволяющий существенно уменьшить искажения принятого широкополосного сигнала. Эти методы достаточно хорошо себя зарекомендовали в задачах, когда требуется принять или излучить сверхширокополосный импульс.

Отдельной научно-технической задачей является проектирование двух/многодиапазонных директорных антенн с интегрированным печатным согласующе-симметрирующим устройством. Это позволит добиться снижения массогабаритных показателей и будет способствовать интегрально-групповой компоновке таких антенн в более сложных модулях. При этом такие излучатели актуальны и в промышленном сегменте, поскольку увеличение информационного трафика требует разработки соответствующей элементной базы, способной работать либо в широкой полосе частот, либо в нескольких непересекающихся частотных диапазонах.

Цель работы – выявить основные параметры и ключевые характеристики при реализации двухдиапазонных антенн дипольного вида при концевом типе возбуждения, обосновать с позиции алгоритмического подхода к проектированию таких излучателей эскизную модель проектирования их стартового облика. В частности, получить выражение в замкнутой форме для расчета целевой функции направленности возбудителя ДДА, связать параметры этой функции с характеристиками входного импеданса возбудителя, что позволит оценить аналитически поведение глобального минимума целевой функции проводной модели данного возбудителя и затем сформировать последовательность шагов алгоритма синтеза двухдиапазонных излучателей дипольного вида с концевым типом возбуждения. Такая последовательность, далее формализованная с помощью известных математических положений, позволит сформировать конечный, отточенный алгоритм синтеза двухдиапазонных антенн с концевым типом возбуждения.

Проводная модель излучателя

В основе проектирования печатных двухдиапазонных антенн типа [5, 6] лежит эскизная модель возбудителя, показанная на рисунке 1. С этой точки зрения для всех их последующих модификаций она в равной степени пригодна и адекватна.

Угол θ отсчитывается от полуоси $+z$, φ – от полуоси $+x$. Считая, что токи проводимости на обоих диполях l_1 и l_2 возбуждаются одним источником сигнала, обладающим неизменной амплитудой в широкой полосе частот, перекрывающей оба первых резонансных участка обоих диполей, условимся, что при возбуждении того или иного диполя токи проводимости на другом могут возникнуть только посредством наведенного поля (индуктивный ток) возбуждаемого диполя. При этом для решения внутренней задачи, согласно рекомендациям

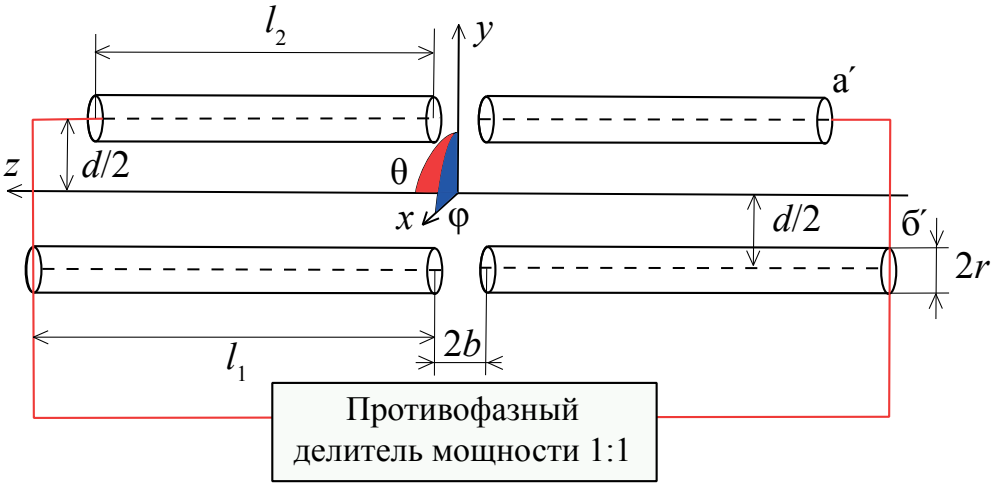


Рис. 1. Проводная модель возбудителя двухдиапазонной антенны

[1], целесообразно устремить радиус плеч диполя r к нулю. Входной импеданс пары излучателей дипольного вида с концевым питанием (ИДВКП), возбуждаемых одновременно, определим с помощью метода наведенных электродвижущих сил в теории проволочных антенн [1]:

$$Z_{in} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k} I_i} = \frac{\det\begin{pmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N1} & \cdots & z_{NN} \end{pmatrix}}{\sum_{i=1}^{k} \det(\mathrm{ZU}_i)}, \quad (1 \le k \le N), \quad (1)$$

где ZU_i – матрица с i-м столбцом в виде столбца свободных членов. Здесь Z_{ij} в операторе взятия детерминанта матрицы обозначает элемент матрицы импедансов эквивалентного многополюсника, N – число ИДВКП. Выделив из (1) реальную и мнимую составляющие для $N = 2$, получим:

$$\mathrm{Re}(Z_{in}) = \frac{1}{B}\Big[ab^2 + a^2b + ab_1^2 + a_1^2b - ac^2 + ac_1^2 - bc^2 + bc_1^2 + 4c^2c_1 - 2ab_1c + 2a_1b_1c - 2a_1cc_1 - 2b_1cc_1 - 2cc_1^2 - 2a_1bc - 2bcc_1 - 2abc + 2c^3\Big], \quad (2)$$

$$\mathrm{Im}(Z_{in}) = \frac{1}{B}\Big[a^2b_1 + a_1^2b_1 - a_1c_1^2 - b_1c_1^2 + 4cc_1^2 - 2ab_1c - 2a_1b_1c + a_1b^2 + a_1c^2 + 2cc_1^2 - 2a_1bc - 2bcc_1 + a_1b_1^2 + 2abc - 2acc_1 + b_1c^2 - 2c^3\Big], \quad (3)$$

где $B = (a - 2c + b)^2 + (a_1 - 2c_1 + b_1)^2$, $a = \mathrm{Re}(Z_{11})$, $a_1 = \mathrm{Im}(Z_{11})$, $b = \mathrm{Re}(Z_{22})$, $b_1 = \mathrm{Im}(Z_{22})$, $c = \mathrm{Re}(Z_{21})$, $c_1 = \mathrm{Im}(Z_{21})$.

Из данных выражений следует, что реактивная и активная составляющие входного импеданса ИДВКП существенно зависят от реактивных и активных составляющих собственных и взаимного импедансов излучателей, входящих в систему, что частично исследовано в [7]. Для полного описания такого излучателя в терминах накладываемых на него ограничений необходимо определить его характеристики направленности и увязать их с режимом работы по согласованию. Для этого найдем суперпозицию полей обоих линейных проводников системы на рисунке 1 в направлении оси y. Она может быть выражена аддитивной функцией:

$$F_E = (d, \theta = \frac{\pi}{2}, \varphi = \frac{\pi}{2}) = \left(\left[\frac{1-\cos(kl_1)}{k\sin(kl_1)} + m\frac{1-\cos(kl_2)}{k\sin(kl_2)}\cos(kd)\right]^2 + \left[m\frac{1-\cos(kl_2)}{k\sin(kl_2)}\cos(kd)\right]^2\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Данная функция получена в замкнутой форме на основе принципа суперпозиции векторного потенциала A для его z-компоненты в произвольной точке пространства дальней зоны и представляет собой зависимость модуля вектора E суммарного поля ($\vec{E} = E_x\vec{x} + E_y\vec{y} + E_z\vec{z}$). Важно отметить, что в параметры данной целевой функции входят все геометрические размеры системы излучателей, что позволяет рассматривать ее как исчерпывающую характеристику направленности при решении задачи оптимизации модели возбудителя. Варьируя параметр m, можно изменять амплитуду индуцированного тока на поверхности излучателей. При $m = 0$ формула для итогового поля вырождается в формулу поля уединенного ИДВКП.

При формировании стратегии синтеза ДДА необходимо включить функцию (4) как аддитивную составляющую в глобальную целевую функцию возбудителя, где вторым компонентом выступит целевая функция согласования системы с фидерной линией заданного номинала волнового сопротивления. Для этого далее конкретизируем (4) для работы в условиях резонанса.

Введем коэффициент отношения длин $k_f = f_{p1}/f_{p2} = l_2/l_1$. Для $k_f = 4/3$, например, относительное значение разноса рабочих диапазонов будет равно $(f_{p1} - f_{p2}) / f_ц = \sqrt{3}/6 \approx 28{,}87\%$, где $f_ц = \sqrt{f_{p1}f_{p2}}$. С учетом этого выражение (4) запишется как:

$$F_E = (k_f, d, \theta = \frac{\pi}{2}, \varphi = \frac{\pi}{2}) = \left(\left[\frac{1-\cos(0{,}45\pi)}{0{,}45\pi\sin(0{,}45\pi)}l_1 + m\frac{1-\cos(0{,}45\pi k_f)}{0{,}45\pi\sin(0{,}45\pi k_f)}l_1\cos(kd)\right]^2 + \left[m\frac{1-\cos(0{,}45\pi)}{0{,}45\pi\sin(0{,}45\pi k_f)}l_1\cos(kd)\right]^2\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Таким образом, функция F_E является не чем иным, как обобщенной целевой функцией направленности системы из двух ИДВКП. Ее нормированное значение для разных амплитуд наводимых токов при вариации межэлементного расстояния d и $k_f = 1$ показано на рисунке 2а. На рисунке 2б приведена та же функция для $k_f = 4/3$.

На рисунке 2б параметр d изменяется от нуля до λ/2, так как радиус плеч r в математической модели устремлен к нулю. С точки зрения двухдиапазонной работы важно оценить взаимное выполнение критериев согласования и направленности системы. Их можно оценить, сопоставив коэффициент k_f на графиках КНД и комплексного импеданса как функций этого коэффициента. Это дает понимание, как данные характеристики конкурируют при изменении геометрии системы.

Соотношения между направленностью и согласованием двухдиапазонного возбудителя и k_f поясняются рисунками 3, 4, на которых также учитывается значение межэлементного расстояния d.

Как видно из графиков, имеет место существование оптимума по k_f в зависимости от требований (либо направленность, либо согласование), о чем свидетельствуют графики о предельно достижимых соотношениях между направленностью, согласованием и частотным разносом.

Для сопоставления полученных теоретических предпосылок с моделированием электродинамических характеристик моделей ДДА

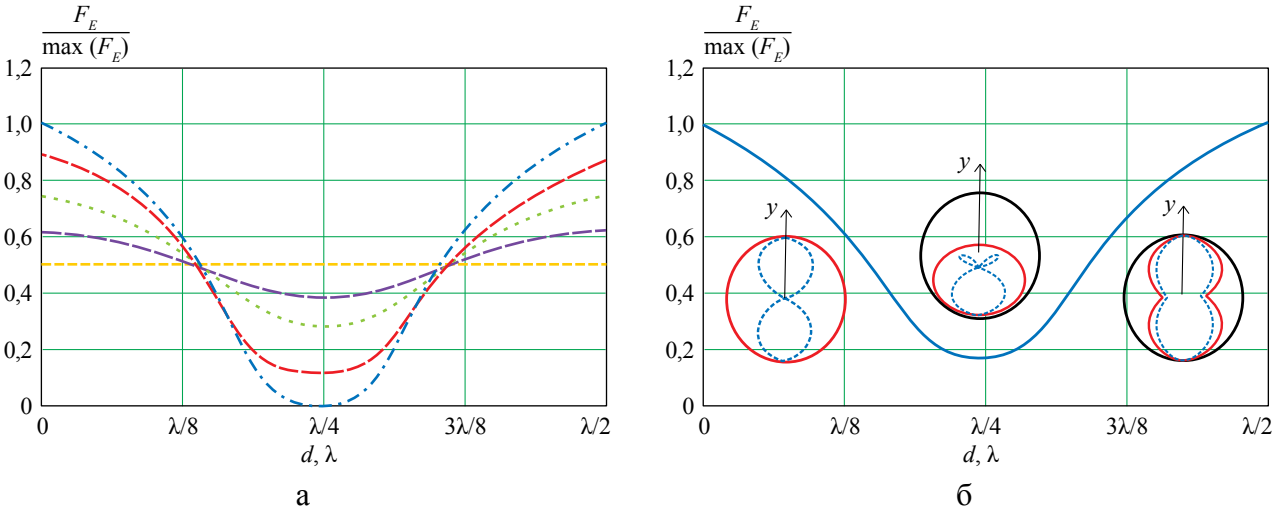


Рис. 2. Семейство нормированных зависимостей значений F_E от параметра d при вариации m и $k_f = 1$ (а) и зависимость нормированного значения F_E от параметра межэлементного расстояния d при $m=1$ и $k_f = 4/3$ (б)

— $m = 1$, — $m = 0{,}75$, — $m = 0{,}5$, — $m = 0{,}25$, — $m = 0$

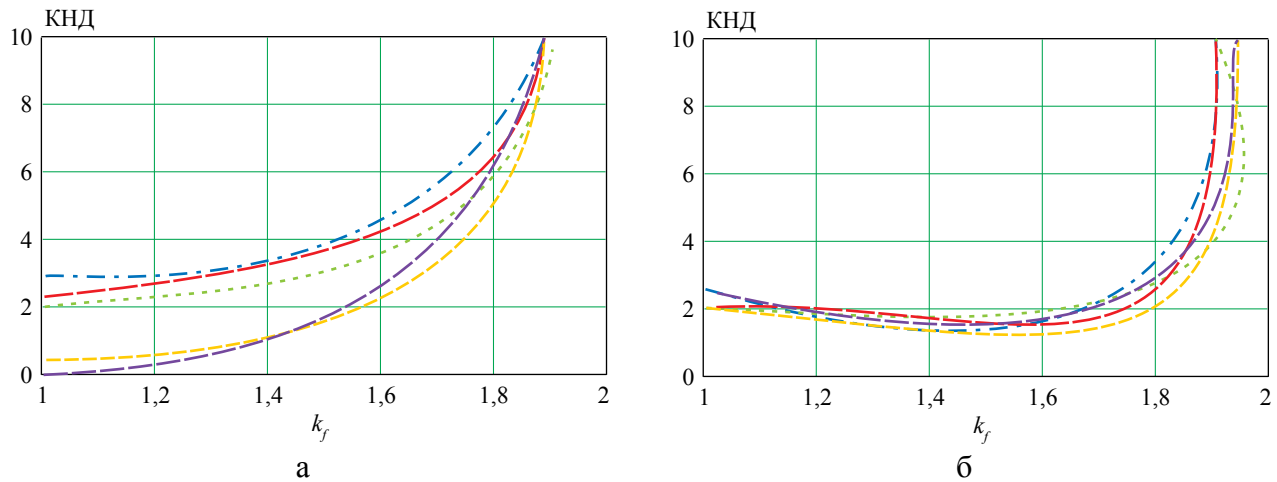


Рис. 3. КНД (безразм. ед.) в зависимости от k_f при $m = 1$ (а) и $m = 0{,}1$ (б)

— $d = \lambda_0/20$, — $d = \lambda_0/15$, — $d = \lambda_0/10$, — $d = \lambda_0/5$, — $d = \lambda_0/4$

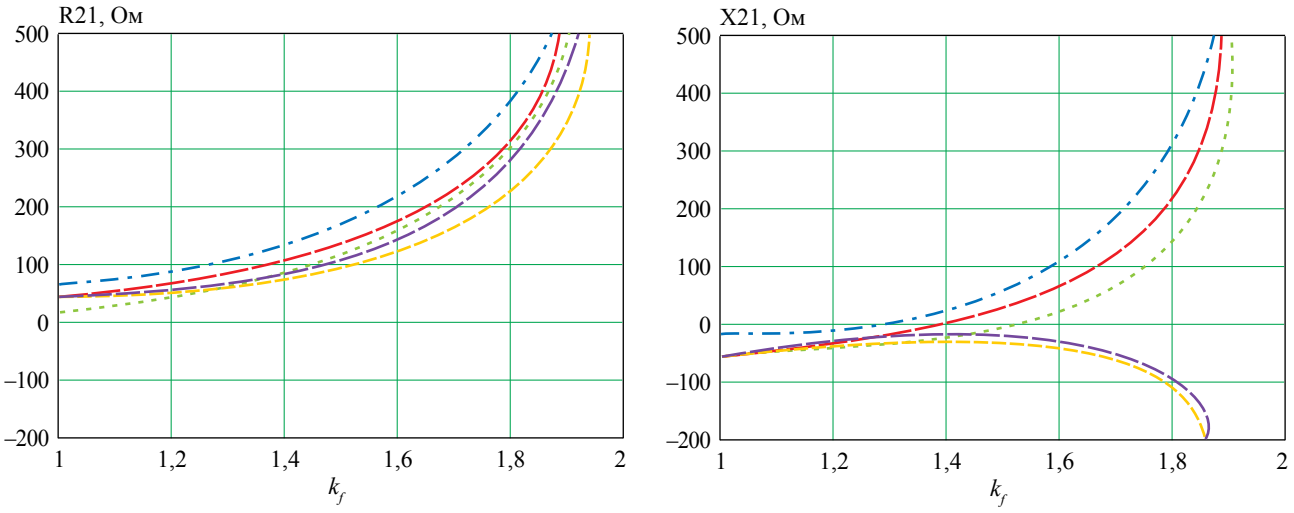


Рис. 4. Активная (а) и реактивная (б) составляющие взаимного импеданса как функции k_f
– $d = \lambda_0/20$, – $d = \lambda_0/15$, – $d = \lambda_0/10$, – $d = \lambda_0/5$, – $d = \lambda_0/4$

была использована запатентованная [8] и ранее опубликованная в [5] двухдиапазонная антенна с микрополосково-щелевым симметрирующим устройством. Результаты моделирования ДН показаны на рисунках 5, 6.

Здесь теоретические ДН посчитаны для проводного возбудителя (рис. 1). Как можно видеть, результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с теоретическими кривыми по основной поляризации в нижних поддиапазонах. При переходе в верхний поддиапазон начинают сказываться паразитные эффекты печатного симметрирующего устройства, которое в идеальном случае не должно излучать электромагнитные волны, однако этого добиться весьма проблематично. На рисунке 7 показаны результаты измерений диаграмм направленности (дБ) в безэховой камере по основной и кросс-поляризации, которые сравнены с результатом моделирования.

Как можно видеть, имеет место достаточно высокая степень совпадения характеристики моделирования и эксперимента.

На рисунке 8 показаны номограммы КНД разных диапазонов при вариации длин низкочастотного и высокочастотного директоров ДДА.

Ортогональные между собой градиентные поверхности уровней говорят о возможности раздельной настройки резонансных частот поддиапазонов, что возможно при малых амплитудах наводимых токов на излучатели.

При учете конечной толщины проводной модели излучателей изменится выражение для входного импеданса системы, однако данное изменение носит непринципиальный характер, так как определяется именно эскизный облик возбудителя, размеры которого уточнятся при проведении процедуры финальной оптимизации печатной модели в специализированном пакете электродинамического моделирования методом конечных элементов или доверительных областей.

Стратегия синтеза двухдиапазонных директорных антенн с концевым питанием возбудителя

Системное построение стратегии синтеза заявленных антенн, если брать во внимание теоретические предпосылки, основанные на электродинамических характеристиках излучателей с нестандартным типом возбуждения, должно быть основано на последовательном усложнении рассматриваемых параметризованных моделей, операции с которыми направленны на поиск глобального решения в пространстве геометрических размеров предлагаемых структур. При этом ключевым требованием является учет специфики электродинамического режима работы излучателя при концевом типе возбуждения, поскольку решения внутренней и внешней задач электродинамики последнего не совпадают с таковыми для классического центрально-питаемого

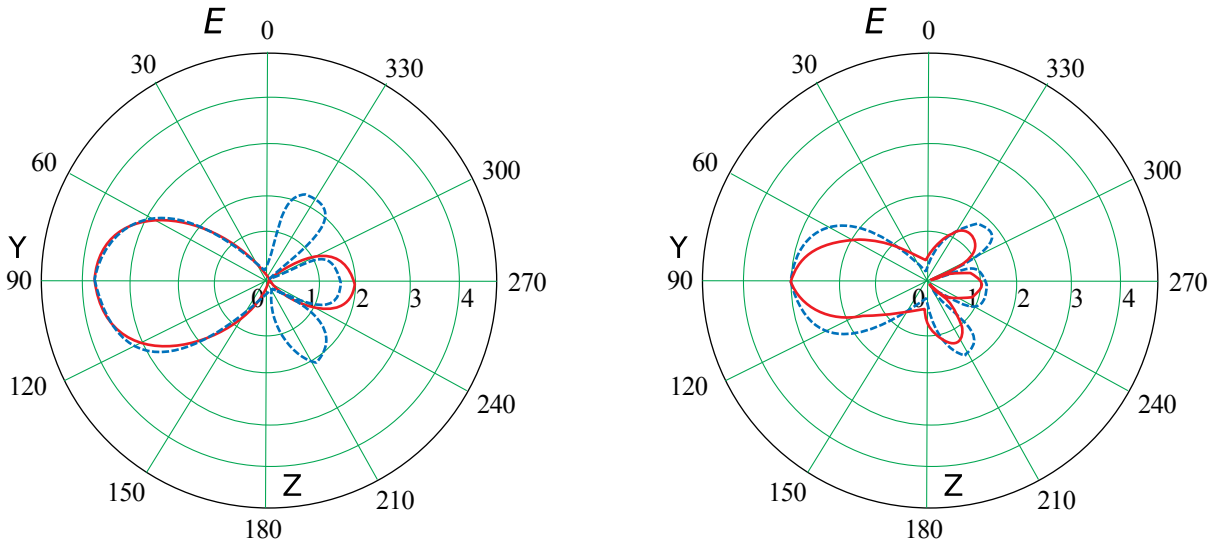


Рис. 5. Сравнение теоретической и полученной при моделировании ДН (КНД) антенны с концевым типом возбуждения плоскости вектора напряженности электрического поля для нижнего (а) и верхнего (б) поддиапазонов
– теория, – модель

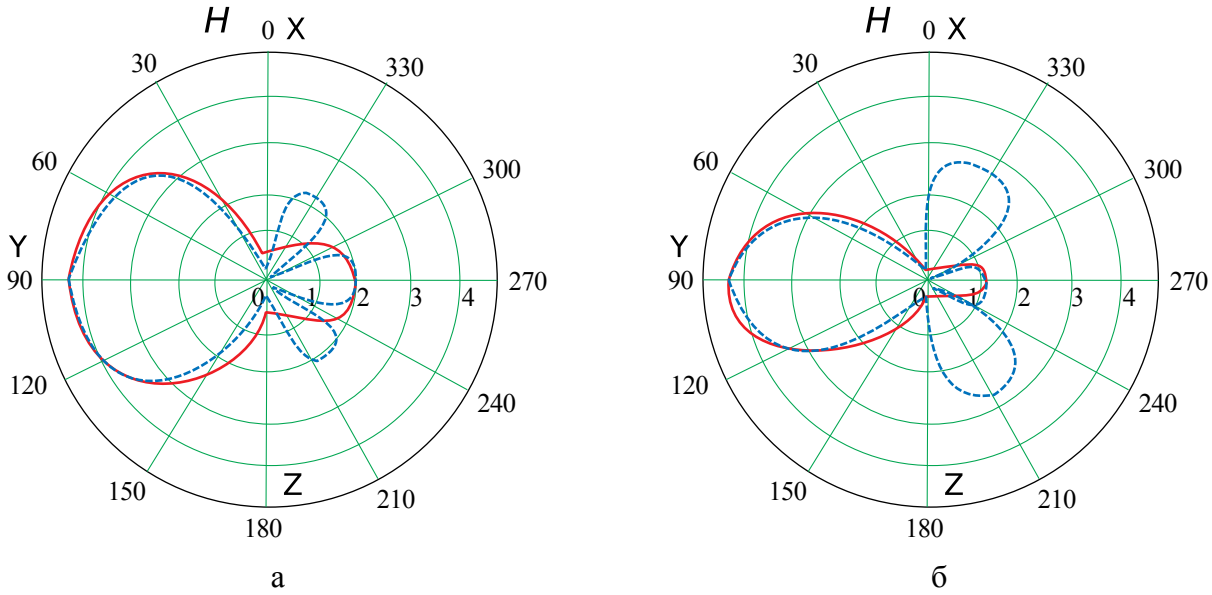


Рис. 6. Сравнение теоретической и полученной при моделировании ДН (КНД) антенны с концевым типом возбуждения плоскости вектора напряженности магнитного поля для нижнего (а) и верхнего (б) поддиапазонов
– теория, – модель

диполя. А это означает, что для построения алгоритмических процедур формирования топологий антенн с таким возбуждением нельзя просто «скопировать» описанные процедуры для центрально питаемого аналога.

Первый этап включает в себя процедуру расчета основных электродинамических характеристик двухдиапазонного возбудителя и раздельную нелинейную оптимизацию длин и межэлементных расстояний в неспециализированном математическом пакете.

На втором этапе рассматривается математическая модель, конкретизирующая конкурирующую природу характеристик согласования и направленности, в которой определяется подпространство размеров системы, в котором аддитивная функция направленности имеет свой минимум.

Это позволяет перейти к третьему этапу, где осуществляется пересчет цилиндрической геометрии проводной модели в печатный эквивалент, где заложены условия

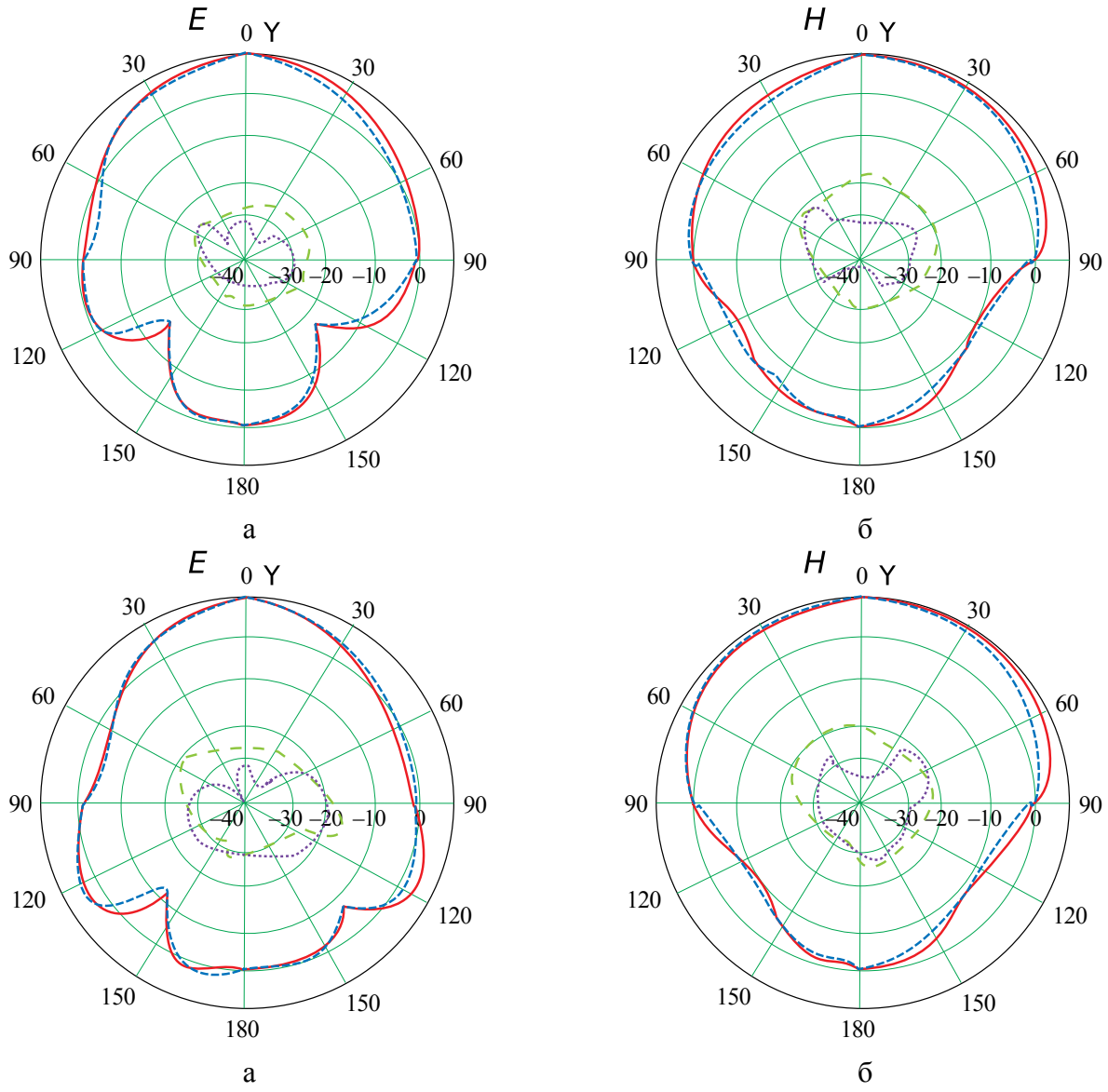


Рис. 7. Измеренные ДН (дБ) основной и кросс-поляризации на нижней частоте (1,953 ГГц) (а, б) и верхней (3,3 ГГц) (в, г)

– осн. модель, – осн. измер., – кросс. модель, – кросс. измер.

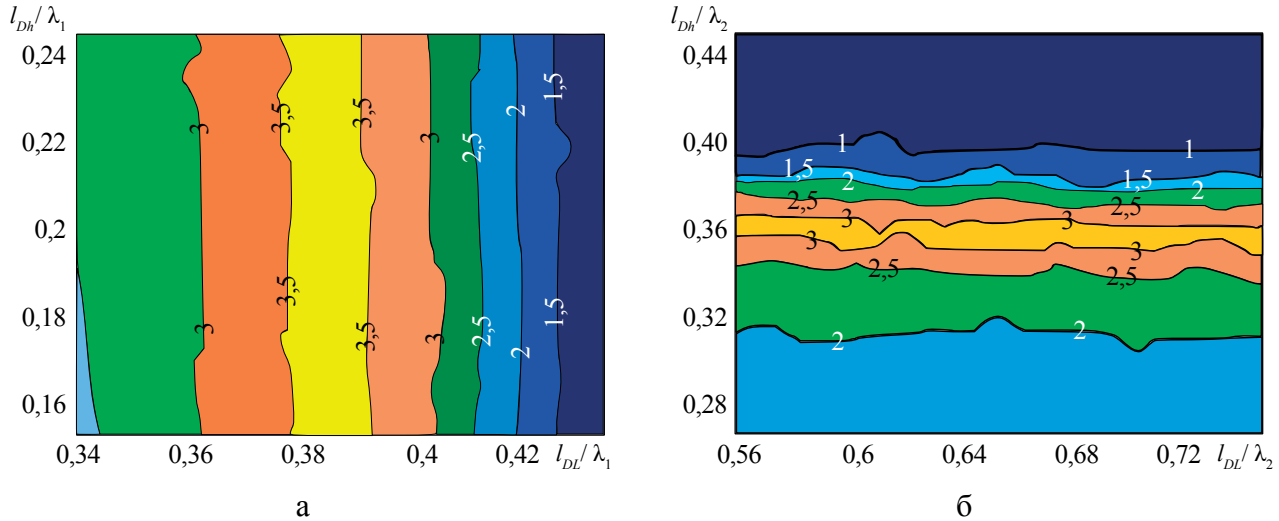


Рис. 8. Номограммы КНД антенны на нижней частоте (а) и верхней (б) при вариации длины l_{Dl} низкочастотного и l_{Dh} – высокочастотного директоров

конструкторско-технологических требований отечественной радиопромышленности.

По завершении третьего этапа осуществляется финишная верификация размеров топологии ДДА в специализированном пакете электродинамического моделирования, позволяющая с высокой точностью учесть особенности топологии СУ (скачки ширин ПЛ, изгибы, повороты, микрополосково-щелевые переходы), одной из задач которой является достижение режима, когда цепи питания практически не излучают, т.е. вся энергия «перекачивается» в ИДВКП – тогда не происходит деградации характеристик.

Заключение

Полученные результаты, с одной стороны, свидетельствуют об адекватности математической модели возбудителя двухдиапазонной антенны с концевым типом возбуждения, использующей классический подход решения внутренней и внешней задач электродинамики тонкого электрического вибратора, а с другой, подтверждают адекватность системно-конструкторского подхода к проектированию антенн с нестандартным типом возбуждения. Такие антенны, являясь линейно поляризованными, могут найти применение в двух/многодиапазонных РЛС. Кроме того, полученные характеристики предельно достижимых показателей ДДА проводного типа позволят на системном уровне анализировать предельно достижимые показатели излучающего модуля и его режимы работы с целью повышения потенциала РЛС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации программы развития новосибирского государственного технического университета, научный проект №С21-16.

Список литературы

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. Под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2012, 744 с.: ил.

2. Беличенко В. П., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. Под общ. ред. В. И. Кошелева. Новосибирск: Наука, 2015. 483 с.

3. Wu T. T., King R. W. P. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading // IEEE Trans. Antennas Propogat. 1965. Vol. 13, No. 5. P. 369–373.

4. Esselle K. P., Stuchly S. S. Pulse-receiving characteristics of resistively loaded dipole antennas // IEEE Trans. Antennas Propogat. 1998. Vol. 38, No. 10. P. 1677–1683.

5. Alekseytsev S. A., Gorbachev A. P. The novel printed dual-band quasi-Yagi antenna with end-fed dipole-like driver // *IEEE Trans. on Antennas and Propagation.* 2020. Vol. 68, no. 5. P. 4088–4090.

6. Алексейцев С. А., Горбачев А. П. Двухдиапазонный излучатель дипольного вида с концевым питанием // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2019. № 1 (42). С. 18–30.

7. Алексейцев С. А., Горбачев А. П. Анализ согласования двухдиапазонного излучателя дипольного вида с концевым питанием и коаксиального кабеля // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 4. С. 27–31.

8. Патент RU № 2712798 C1. Алексейцев Сергей Александрович (RU), Горбачев Анатолий Петрович (RU). Двухдиапазонная антенна. Дата публикации 31.01.2020. Бюл. № 4.

Об авторах

Алексейцев Сергей Александрович – инженер 2-й категории акционерного общества «НПО НИИИП-НЗиК»; аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств факультета радиотехники и электроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Российская Федерация.
Область научных интересов: антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.

Паршин Юрий Николаевич – инженер 2-й категории акционерного общества «НПО НИИИП-НЗиК», Новосибирск Российская Федерация; аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств факультета

радиотехники и электроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Российская Федерация. Область научных интересов: антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.

Electrodynamics of dual-band end-fed wire dipole radiators

Alekseytsev S. A.[1,2], Parshin Yu. N.[1,2]

[1] *Institute of Measuring Instruments – Comintern Novosibirsk Plant, Joint Stock Company; Postgraduate, Novosibirsk, Russian Federation*

[2] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

This paper briefly describes an analysis of main electrodynamic characteristics required in design of dual-band Yagi antenna exciters consisting of two electrically thick conductors. The study of end-fed excitation of the said system of conductors allows to predetermine the design of conceptually new circuits of classic dipole radiators, avoiding closely-spaced arrangement of feeding strips that ensure direct excitation of dipole arms and, therefore, reducing their electromagnetic spurious coupling. The latter prevents asymmetry in surface current amplitude distribution on dipole arms and allows to improve its directivity and matching with a power feeder.

Keywords: dipole radiator, directivity, matching, dual-band antennas

Information about the authors

Alekseytsev Sergey Aleksandrovich – Second category Design Engineer, Research Institute of Measuring Instruments – Comintern Novosibirsk Plant, Joint Stock Company; Postgraduate, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.

Parshin Yuriy Nikolaevich – Second category Design Engineer, Research Institute of Measuring Instruments – Comintern Novosibirsk Plant, Joint Stock Company; Postgraduate, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-40-46
УДК 681.78

Разработка многоспектральной оптико-электронной системы 19ТВА-001 для системы 3М47-01

К. Н. Стешенко, Д. Д. Никеев, В. М. Тимофеев, Е. В. Гаврилов

Акционерное общество «Научно-производственный комплекс Пеленгатор», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Разработанная оптико-электронная система позволяет использовать ее для обнаружения широкого класса летательных аппаратов. В основе ее работы лежат как классические методы оптического обнаружения, так и нестандартные решения. Для определения возможностей изделия и соответствия требованиям заказчика на этапе разработки было произведено имитационное моделирование возможности использования предлагаемых решений. Результаты полевых и ходовых испытаний изделия при этом позволяют говорить о достаточно точном прогнозировании результатов работы системы.

Ключевые слова: оптико-электронные системы, моделирование, симуляция, обнаружение летательных аппаратов, сверхконтрастный режим

Для цитирования: Стешенко К. Н., Никеев Д. Д., Тимофеев В. М., Гаврилов Е. В. Разработка многоспектральной оптико-электронной системы 19ТВА-001 для системы 3М47-01 // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 40–46. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-40-46

For citation: Steshenko K. N., Nikeev D. D., Timofeev V. M., Gavrilov E. V. Development of multispectral optoelectronic system 19TVA-001 for system 3M47-01 // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 3. P. 40–46. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-40-46

Поступила 04.06.2021 *Отрецензирована* 07.06.2021 *Одобрена* 01.07.2021 *Опубликована* 20.10.2021

Введение

Одной из основных задач при разработке оптико-электронной системы является определение и подбор подходящих оптических элементов: объективов и матричных фотоприемных устройств, позволяющих системе выполнять поставленные задачи. Данный выбор зачастую не может быть проверен до момента полевых испытаний изделия, а оценка может быть проведена исключительно исходя из свойств матричного ФПУ. При создании изделия 19ТВА-001 было использовано физико-математическое моделирование, позволяющее произвести оценку до начала сборки данного прибора.

Изделие 19ТВА-001 предназначено для формирования и передачи в изделие 3М-47 телевизионных сигналов, обеспечивающих в дневное и ночное время визуальное наблюдение и автоматическое сопровождение воздушных объектов.

В состав оптико-электронной системы входят три оптико-электронных канала: узкопольный телевизионный канал (УК); широкопольный телевизионный канал (ШК) и тепловизионный канал (ТПВ). Данные каналы, согласно техническому заданию, должны обеспечивать обнаружение самолета типа МиГ-29 при метеорологической дальности видимости не менее 20 км в дневное время суток и высоте полета 1 км на дистанциях 20, 12 и 12 км соответственно. Для цели типа ПКР «Гарпун» эти дистанции соответственно равны 7, 2 и 6 км.

© Стешенко К. Н., Никеев Д. Д., Тимофеев В. М., Гаврилов Е. В., 2021

Имитационное моделирование обнаружительной способности системы

Для проверки возможности использования болометрической камеры ЕАНГ.463165.001 в тепловизионном канале было проведено имитационное моделирование по регистрации сигнала, приходящего от самолета МиГ-29 и ПКР «Гарпун». Метод, по которому производилась симуляция, описан в [1, 2]. Матричное ФПУ тепловизионного излучения имеет разрешение 640×512 пикселей и работает в спектральном диапазоне 8–14 мкм. Угол обзора тепловизионного канала оптико-электронной системы при моделировании составляет 3°×4°. Траектория цели построена следующим образом: при движении летательного аппарата к оптико-электронной системе он наблюдается в фас из передней полусферы, пролетает над приемником и при удалении наблюдается в фас из задней полусферы. При расчете использовалось излучение летательного аппарата, факела его двигательной установки, отражение излучения от водной поверхности и собственное свечение атмосферы. Поглощение и рассеяние атмосферным воздухом соответствует стандартной атмосфере, состав и количество аэрозольных частиц соответствуют выбранной местности (70° с. ш., 33° в. д.) в летнее время года. Суммарное снижение интенсивности излучения отвечает требованию метеорологической дальности видимости не менее 20 км.

По результатам моделирования были вычислены зависимости вероятности обнаружения, представленные на рисунке 1.

Аналогичное моделирование было произведено для проверки возможности использования камеры ЕАНГ.463163.001 в узкопольном телевизионном канале (рис. 2). Угол обзора узкопольного телевизионного канала оптико-электронной системы при моделировании составляет 1,5°×2,5°, матричное ФПУ имеет разрешение 1920×1080.

По результатам моделирования выбранные приемники излучения удовлетворяют требованиям, выдвинутым в техническом задании.

Использование и особенности сверхконтрастного режима

Выделение движущихся объектов в кадре эффективно реализуется при помощи метода попиксельного изменения кадров. Движение в данном методе выделяется при помощи разности текущего и предыдущего кадров. На основе этой разницы создается бинарная матрица, в которой за единицу принимается значение разности между пикселями двух последовательных кадров больше определенного порога и нуль при значении разности между пикселями меньше порога [3]. Данный метод применим для сцен с низкой интенсивностью движения, имеет малые вычислительные затраты, невосприимчив к маскировке

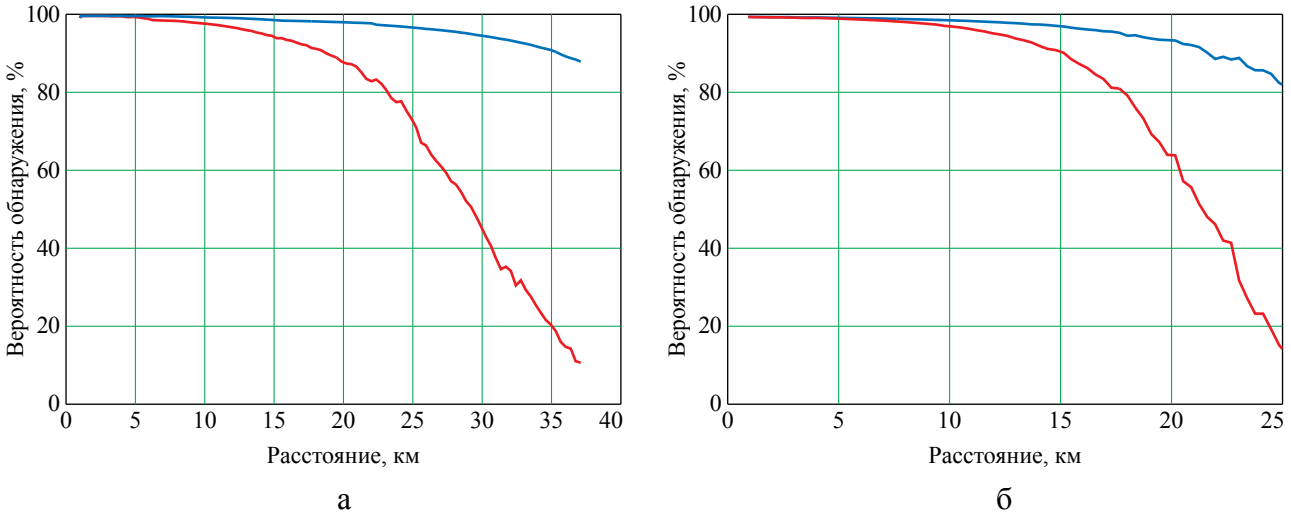
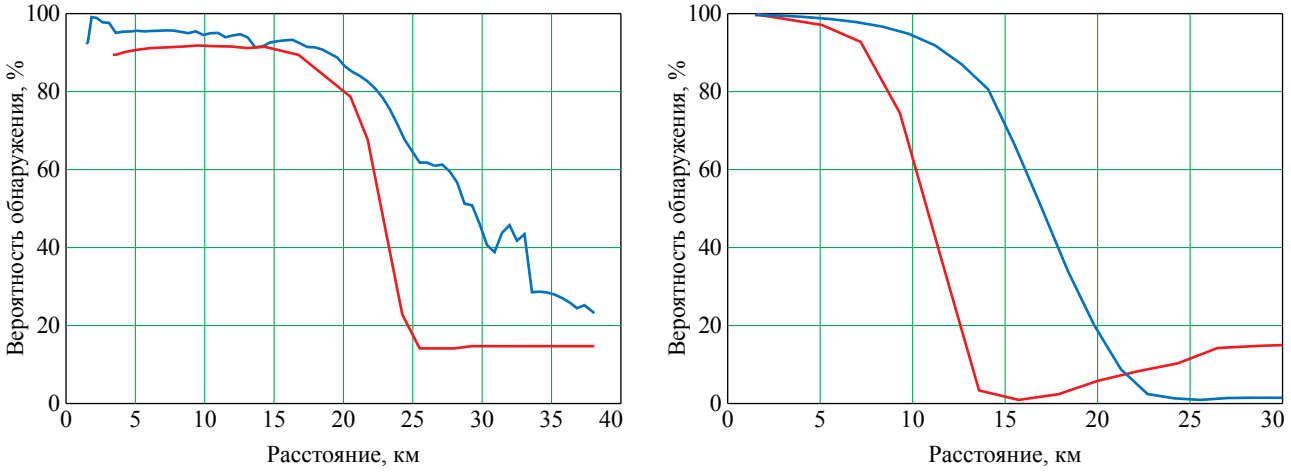


Рис. 1. Зависимость вероятности обнаружения цели типа МиГ-29 (а) и ПКР «Гарпун» (б) от расстояния при использовании камеры ЕАНГ.463165.001

– В фас, передняя полусфера, – В фас, задняя полусфера



а б

Рис. 2. Зависимость вероятности обнаружения цели типа МиГ-29 (а) и ПКР «Гарпун» (б) от расстояния при использовании камеры ЕАНГ.463163.001
– В фас, передняя полусфера, – В фас, задняя полусфера

а б

Рис. 3. Сравнение изображения БПЛА в видимом (слева) и сверхконтрастном режимах (справа)

движущихся объектов и не имеет ограничений на количество движущихся в кадре объектов. Для ШК канала была выбрана камера с увеличенным размером пикселя, которая работает в описанном выше режиме, имеющем название «Сверхконтрастный». На рисунке 3 представлено сравнение обычного и сверхконтрастного режимов работы камеры.

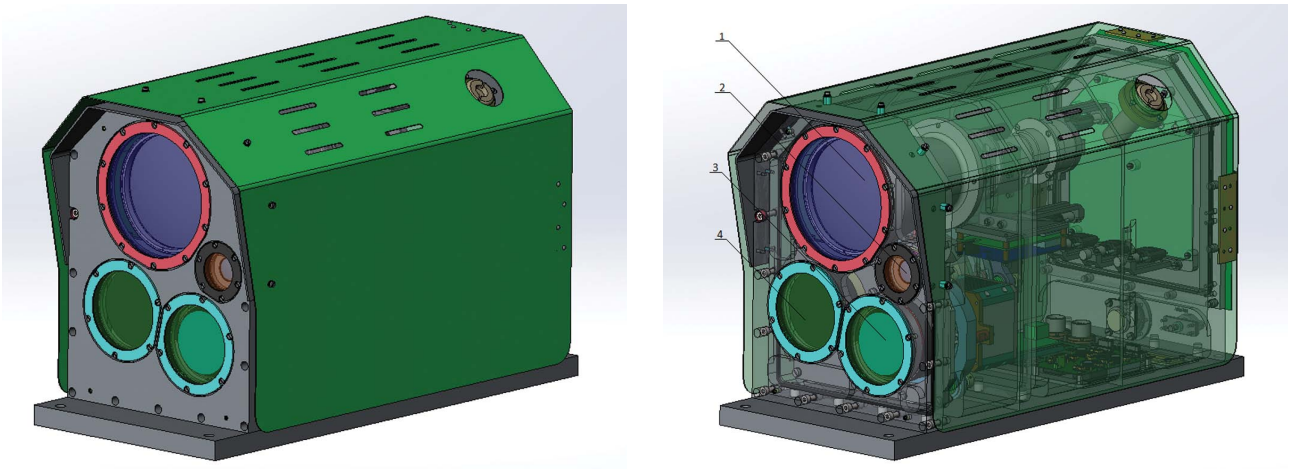
Конструктивное исполнение

На рисунке 4 представлено конструктивное исполнение изделия 19ТВА-001.

Особенностью конструкции изделия является трегерная система крепления оптических каналов, позволяющая производить точную регулировку их соосности при окончательной сборке. Все оптические каналы изделия являются цифровыми, однако выходные видеоданные по требованию заказчика передаются в аналоговом формате PAL по ГОСТ Р 55947-2014 [4]. Изделие является герметичным, однако для дополнительной защиты от воздействия погодных условий предусмотрена установка защитной пластины вокруг изделия. Габаритные размеры изделия без защитной пластины соответствуют габаритным размерам изделия 410ТВА, аппаратной заменой которого является изделие 19ТВА-001. Вместе с защитной пластиной изделие устанавливается на посадочное место системы 3М47-01.

Результаты полевых испытаний

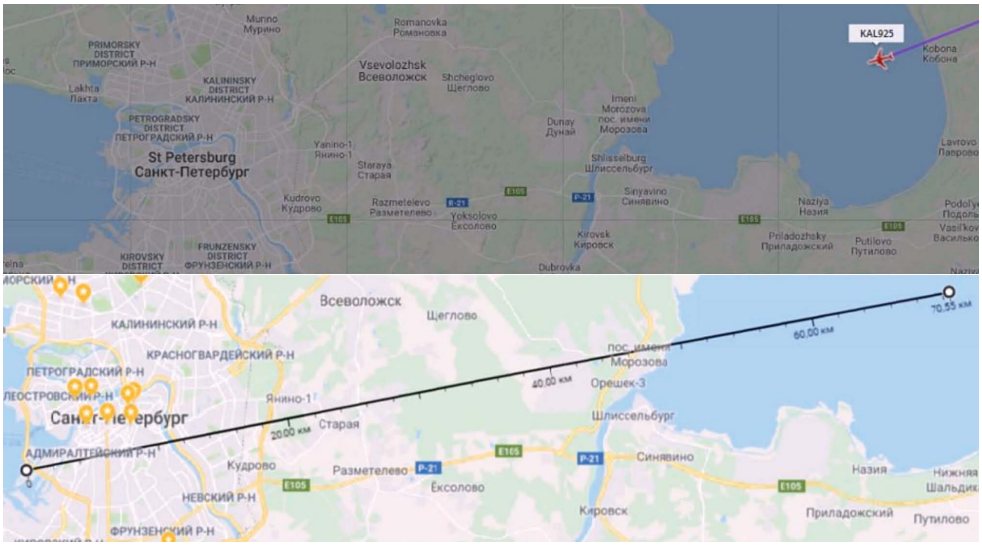
Опытный образец изделия прошел полевые испытания на Канонерском острове г. Санкт-Петербурга в августе 2019 года в дневное время



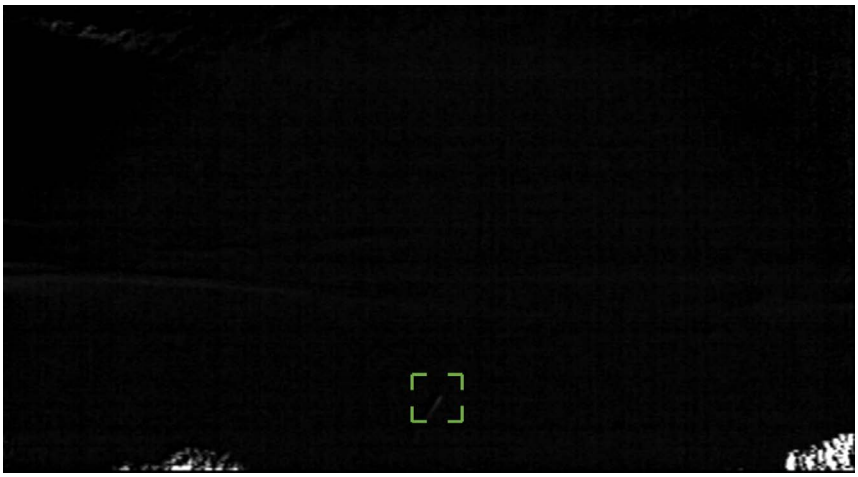
а б

Рис. 4. Конструктивное исполнение изделия 19ТВА-001: а – внешний вид изделия, б – внутреннее пространство, 1 – ТПВ, 2 – датчик освещенности, 3 – ШК, 4 – УК

а



б



в

Рис. 5. Обозначение летательного аппарата типа Boeing-777 на ресурсе flightradar [5] (а) и его местоположение на карте (б). Изображение самолета, полученное сверхконтрастной камерой, летательный аппарат выделен зеленым (в)

при ясной погоде. Проверка оптических каналов изделия производилась по гражданским воздушным судам. На рисунке 5 представлено изображение самолета Boeing-777, полученное на дистанции 70 км при использовании сверхконтрастного режима (рис. 5в).

На рисунке 6 представлено изображение самолета Boeing-777, полученное на дистанции 47 км при использовании узкопольного телевизионного канала (рис. 6в).

На рисунке 7 представлено изображение самолета Boeing-777, полученное на дистанции 38 км при использовании узкопольного телевизионного канала (рис.7 в).

Результаты приемо-сдаточных испытаний

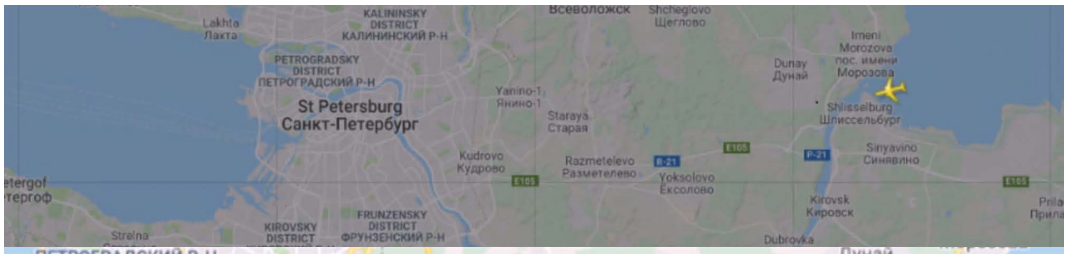
По результатам приемо-сдаточных испытаний было произведено обнаружение вертолета типа Ми-8 на дистанции более 25 км, самолета типа Boeing-737 на дистанции более 45 км. Обнаружение произведено для всех каналов изделия, что подтверждено присутствующими членами комиссии.

Заключение

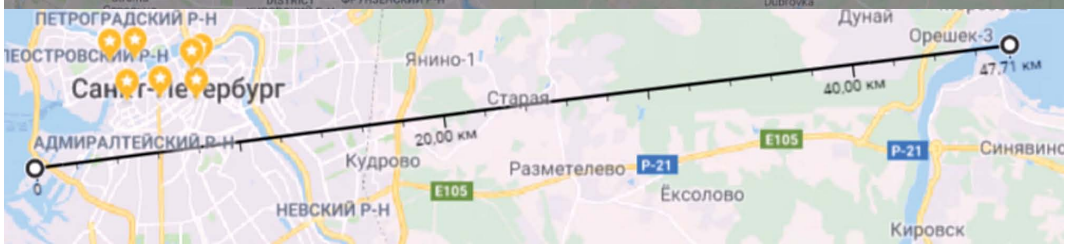
Изделие 19ТВА-001 из состава комплекса 3М47-01 после предварительного моделирования разработано и представлено к испытаниям. По итогу проведенного моделирования выбранные ФПУ удовлетворяли требованиям ТЗ. По результатам полевых испытаний была продемонстрирована обнаружительная способность изделия 19ТВА-001 для ряда гражданских целей. На приемо-сдаточных испытаниях в составе системы 3М47-01 данная способность была подтверждена, изделие успешно прошло испытания, что позволяет говорить о достаточно точном прогнозировании результатов работы системы.

По результатам работ изделию присвоена литера «О1».

а



б



в

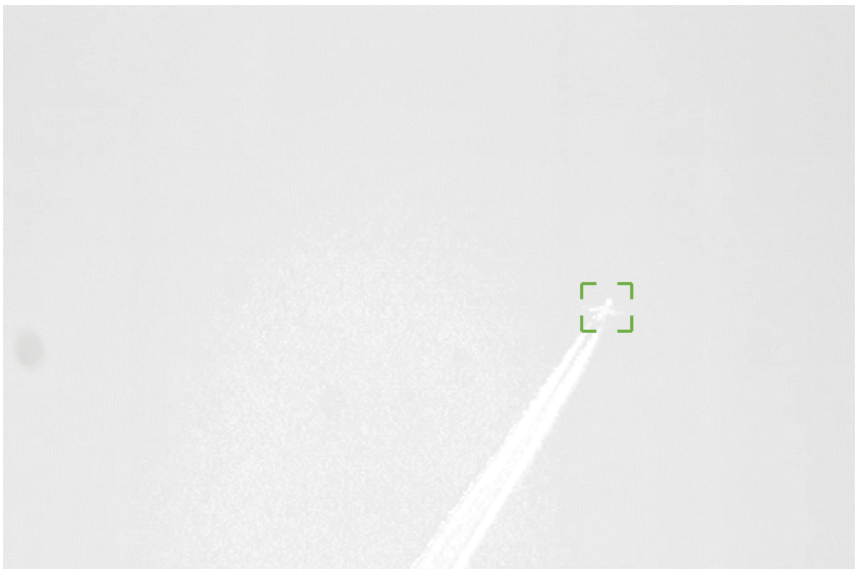
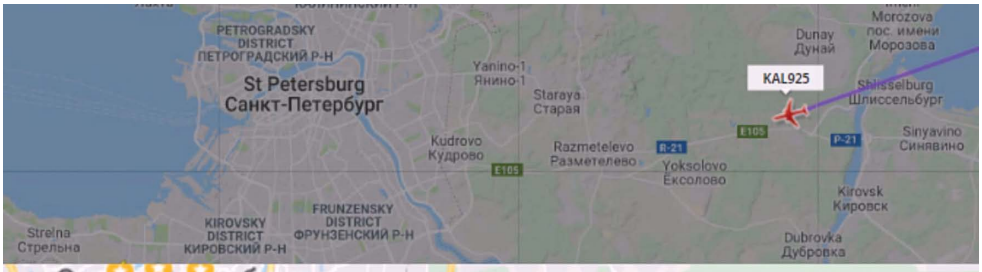
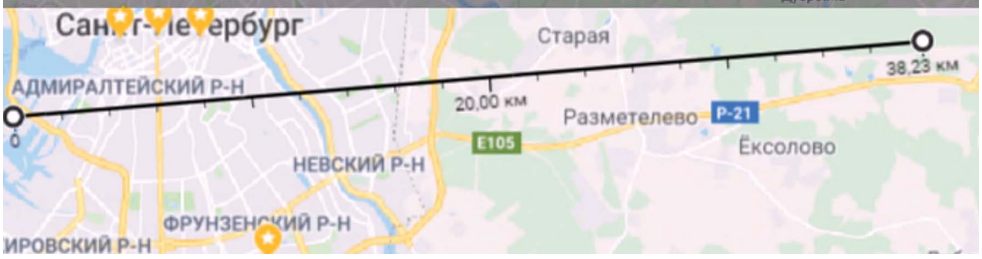


Рис. 6. Обозначение летательного аппарата типа Boeing-777 на ресурсе flightradar (а) и его местоположение на карте (б). Изображение самолета, полученное при использовании узкопольного телевизионного канала, летательный аппарат выделен зеленым (в)

а



б



в

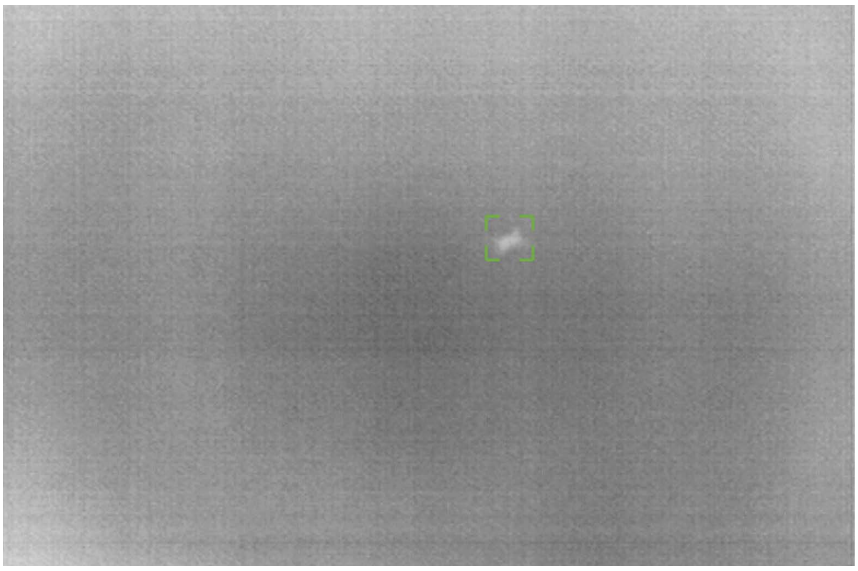


Рис. 7. Обозначение летательного аппарата типа Boeing-777 на ресурсе flightradar (а) и его местоположение на карте (б). Изображение самолета, полученное при использовании узкопольного телевизионного канала, летательный аппарат выделен зеленым (в)

Список литературы

1. Стешенко К. Н. и др. Математическое моделирование зависимости мощности излучения летательных аппаратов от угла наблюдения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2018. №. 3 (26). С. 98–104. DOI: 10.38013/2542-0542-2018-3-98-104

2. Рязанцева В. А., Стешенко К. Н., Никеев Д. Д., Гаврилов Е. В. Математическое моделирование фоно-целевой обстановки летательного аппарата над уровнем моря // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 2. С. 76–84. DOI: 10.38013/2542-0542-2021-3-76-84

3. Волков К. А. Метод выделения движущихся объектов на видеоизображении // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2012. № 1 (63). С. 92–98.

4. ГОСТ Р 55947-2014. Телевидение вещательное цифровое. Приемники для эфирного цифрового телевизионного вещания DVB-T2. Основные параметры. Технические требования. Методы измерений и испытаний. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 56 с.

5. https://www.flightradar24.com

Об авторах

Стешенко Кирилл Николаевич – начальник сектора общего программного обеспечения дирекции оптико-электронных систем акционерного общества «Научно-производственный комплекс Пеленгатор», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Область научных интересов: дистанционные оптические методы исследования, газодинамические расчеты летательных аппаратов, пространственное моделирование физических процессов.

Никеев Дмитрий Дмитриевич – начальник отдела программного обеспечения дирекции оптико-электронных систем акционерного общества «Научно-производственный комплекс Пеленгатор», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Область научных интересов: математическое моделирование физических процессов, генерация и распространение инфракрасного излучения.

Тимофеев Вячеслав Михайлович – руководитель дирекции оптико-электронных систем акционерного общества «Научно-производственный комплекс Пеленгатор», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Область научных интересов: проектирование и конструирование оптико-электронных систем.

Гаврилов Егор Валерьевич – заместитель генерального директора – заместитель генерального конструктора акционерного общества «Научно-производственный комплекс Пеленгатор», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Область научных интересов: разработка оптико-электронных систем.

Development of multispectral optoelectronic system 19TVA-001 for system 3M47-01

Steshenko K. N., Nikeev D. D., Timofeev V. M., Gavrilov E. V.

Joint Stock Company Research and Production Complex “Pelengator”, Saint Petersburg, Russian Federation

The developed optoelectronic system can be used for detecting a wide range of aircraft. Its performance is based on classical methods of optical detection as well as on non-standard solutions. To determine the product capabilities and meet the customer’s requirements, we conducted simulation modelling of the feasibility of proposed solutions at the development stage. The results of field tests and sea trials promise quite accurate prediction of the system’s performance outcome.

Keywords: optoelectronic systems, modelling, simulation, aircraft detection, high-contrast mode

Information about the authors

Steshenko Kirill Nikolaevich – Head of General Software Sector, Directorate for Optoelectronic Systems, Joint Stock Company Research and Production Complex “Pelengator”, Saint Petersburg, Russian Federation.
Science research interests: remote optical research methods, gas-dynamic calculations of aircraft, spatial modelling of physical processes.

Nikeev Dmitriy Dmitrievich – Head of Software Department, Directorate for Optoelectronic Systems, Joint Stock Company Research and Production Complex “Pelengator”, Saint Petersburg, Russian Federation.
Science research interests: mathematical modelling of physical processes, generation and distribution of infrared radiation.

Timofeev Vyacheslav Milkhailovich – Head of Directorate for Optoelectronic Systems, Joint Stock Company Research and Production Complex “Pelengator”, Saint Petersburg, Russian Federation.
Science research interests: optoelectronic systems design and engineering

Gavrilov Egor Valerievich – Deputy General Director – Deputy General Designer, Joint Stock Company Research and Production Complex “Pelengator”, Saint Petersburg, Russian Federation.
Science research interests: development of optoelectronic systems.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-47-58
УДК 62-526

Оптимальное и комбинированное управление безредукторным приводом с моментным двигателем

А. В. Цапцов, А. В. Степовой

Акционерное общество «Конструкторское бюро точного машиностроения им. А. Э. Нудельмана», Москва, Российская Федерация

В статье рассматривается задача обеспечения максимального быстродействия безредукторного привода, построенного на базе моментного двигателя. Поставленную задачу предлагается решить за счет реализации оптимального управления с упреждением в соответствии с принципом максимума Понтрягина и теоремы Фельдбаума о конечном числе переключений. При комбинированном управлении обеспечивается переход от оптимального управления к автоматическому регулированию в зоне стабилизации конечного состояния. Результаты математического моделирования подтверждают эффективность выбранных технических решений.

Ключевые слова: оптимальное управление, максимальное быстродействие, упреждение, безредукторный привод, моментный двигатель, математическое моделирование

Для цитирования: Цапцов А. В., Степовой А. В. Оптимальное и комбинированное управление безредукторным приводом с моментным двигателем // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 47–58. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-47-58

For citation: Tsaptsov A. V., Stepovoy A. V. Optimal and combined control of the direct drive with the torque motor // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 3. P. 47–58. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-47-58

Поступила 08.07.2021 *Отрецензирована* 18.07.2021 *Одобрена* 23.07.2021 *Опубликована* 20.10.2021

Безредукторные приводы на базе моментных двигателей (МД) нашли широкое применение в различных областях народного хозяйства: приводы станков, опорно-поворотные устройства радиолокационных станций (РЛС), оптико-электронные станции (ОЭС) обзора и наблюдения, компрессорное оборудование, следящие координаторы, сервоприводы роботов и манипуляторов, гиростабилизированные платформы и др. [1–4]. Безредукторный привод отличается плавностью работы, отсутствием люфтов и упругих деформаций, повышенной надежностью и увеличенным сроком эксплуатации.

В отдельных случаях к безредукторному приводу могут быть предъявлены жесткие требования по быстродействию в режимах отработки входного воздействия. Задача обеспечения максимального быстродействия изучается в теории оптимальных процессов. Синтез оптимального управления безредукторным приводом как динамической системой n-го порядка может быть выполнен в фазовом пространстве системы применением принципа максимума Понтрягина [5–7].

Согласно принципу максимума [5] оптимальное управление для динамической системы представляет собой кусочно-постоянную функцию времени с разрывами первого рода. В силу теоремы Фельдбаума [6] для линейной динамической системы n-го порядка, имеющей неположительные вещественные корни, оптимальное по быстродействию управление имеет на интервале управления не более $(n-1)$ переключений с одной границы допустимой области на другую.

© Цапцов А. В., Степовой А. В., 2021

Синтез оптимального управления сводится к исследованию динамической системы в фазовом пространстве и построению линии переключения [7].

В качестве примера рассмотрим привод с малым углом поворота на базе двухфазной синхронной электрической машины типа ДБМ70 с постоянными магнитами на роторе. Динамическая модель привода с учетом известных допущений и соотношений [1, 2, 7, 8] приведена на рисунке 1. Динамическая модель реализована в среде Simulink (Matlab).

Привод представляет собой систему подчиненного регулирования с тремя вложенными контурами:

- токовый (моментный) контур. Обратная связь реализуется через датчик тока с передаточным коэффициентом *Kdt*;

- скоростной контур с обратной связью по датчику угловой скорости (ДУС);

- позиционный контур с обратной связью по датчику угла (ДУ).

Модель ДУС представлена фильтром Баттерворта 3-го порядка с рабочей полосой частот 400 Гц (по уровню –3 дБ), звеном квантования по уровню, по времени, запаздыванием и генератором измерительного шума со среднеквадратичным отклонением (СКО) 2,6 мкрад/с/√Гц. Модель ДУ представлена безинерционным звеном, звеном запаздывания, звеном квантования по времени и звеном квантования по уровню с ценой младшего разряда 5”.

Параметры динамической модели: P = 8; Kum = 1; Kdt = 0,25 А/В; L = 0,3 мГн; R = 0,75 Ом; Cm = 0,09 Нм/А; Ce = 0,09 В/рад/с; Kmt = 0,2 Нм/рад; Mtr = 0,005 Н; Jn = 0,07 кг×м^2.

Номинальный момент двигателя ДБМ70 составляет 0,16 Нм, а номинальная скорость вращения – 3000 об/мин.

Выбор значений коэффициентов П-регулятора (Kus = 40) и ПИ-регулятора (Ksk = 80; Kiz = 1) выполнен по методу динамического синтеза [8, 9]. Интегральная составляющая ПИ-регулятора ограничена в диапазоне от –0,01 до 0,01.

В модели привода сигнал управления U ограничен значением $|U_{MAX}|$ = 24 В, что соответствует предельно допустимой амплитуде тока 24 А для статорной обмотки двигателя ДБМ70 при выбранных настройках токового контура.

Перед синтезом оптимального управления динамическая модель привода (рис. 1) должна быть приведена к каноническому описанию [5]:

$$\frac{dx^i}{dt} = f^i(x^1,...,x^n,u^i,...,u^r), \qquad (1)$$

где x^1, …, x^n – фазовые координаты динамической системы, определяющие ее состояние в каждый момент времени t;
u^1, …, u^r – параметры управления;
t – время;
i = 1, …, n.

Для этого упрощенно представим неизменяемую часть привода (токового контура с МД) в качестве бесколлекторного аналога двигателя постоянного тока [1, 2, 8, 10, 11] с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{\varphi}{U} = \frac{Kum / Ce}{p(T_E p + 1)(T_M p + 1)}, \qquad (2)$$

где φ – угол поворота привода, рад;
U – сигнал управления, В;
T_E – электромагнитная постоянная времени, с;
T_M – электромеханическая постоянная времени, с;
p – оператор Лапласа.

Расчетные соотношения для определения значений T_E и T_M:

$$Ktk = \frac{1}{R / Kum + Kdt},$$

$$Ttk = \frac{L / R}{1 + Kum \cdot Kdt / R},$$

$$K` = \frac{Ktk \cdot Cm \cdot Ce}{Jn \cdot Kum},$$

$$T_1^2 = Ttk / K`,$$

$$T_2 = 1 / K`,$$

$$T_E = \frac{T_2}{2} - \sqrt{\frac{T_2^2}{4} - T_1^2},$$

$$T_M = \frac{T_2}{2} + \sqrt{\frac{T_2^2}{4} - T_1^2},$$

где Ktk, Ttk, $K`$, T_1, T_2 – промежуточные переменные.

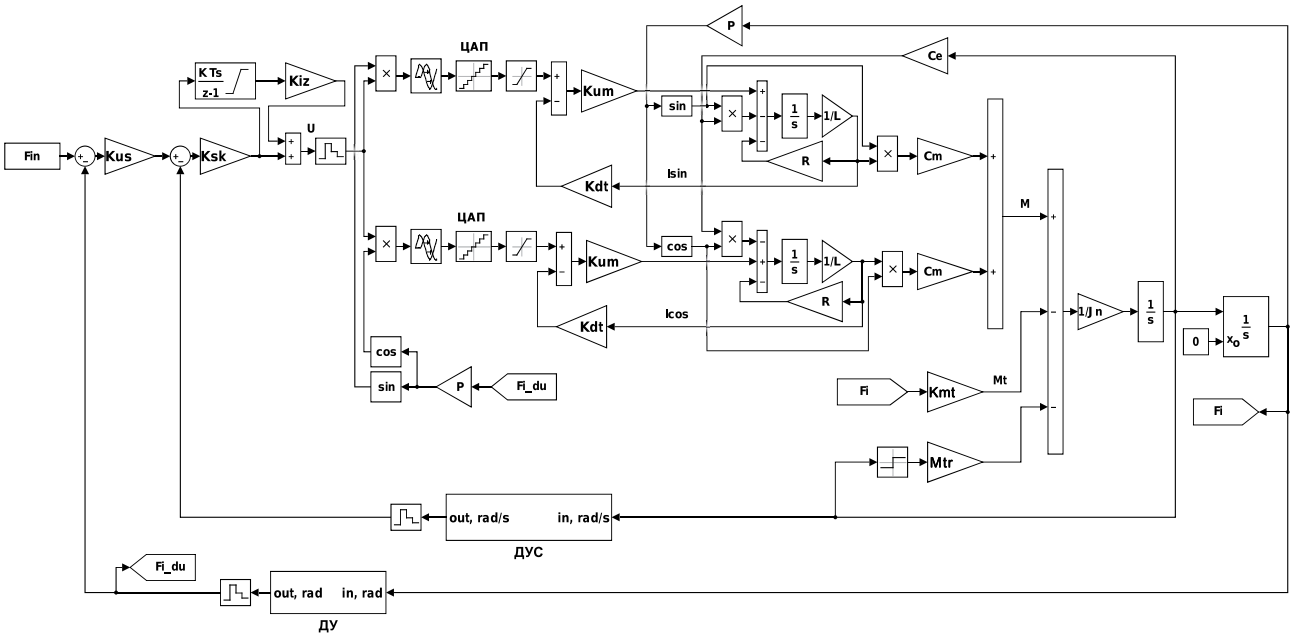


Рис. 1. Динамическая модель безредукторного привода: *Fin* – входной сигнал по углу, рад; *Fi* – угол поворота привода, рад; *Fi_du* – выходной сигнал датчика угла, рад; *Kus* – коэффициент усиления П-регулятора позиционного контура; *Ksk* – коэффициент усиления ПИ-регулятора скоростного контура; *Kiz* – коэффициент изодрома ПИ-регулятора скоростного контура; *U* – сигнал управления, В; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; *P* – число пар полюсов МД; *Kum* – коэффициент усилителя мощности; *Kdt* – передаточный коэффициент датчика тока, В/А; *Isin*, *Icos* – токи в статорных обмотках МД, А; *L* – индуктивность статорной обмотки МД, Гн; *R* – сопротивление статорной обмотки МД, Ом; *Cm* – моментный коэффициент МД, Нм/А; *Ce* – коэффициент противоЭДС, В/рад/с; *M* – момент МД, Нм; *Mt* – момент тяжения токопроводников, Нм; *Kmt* – удельный коэффициент момента тяжения, Нм/рад; *Mtr* – момент «сухого» трения, Нм; *Jn* – момент инерции нагрузки привода, кг×м^2; ДУС – датчик угловой скорости; ДУ – датчик угла

Понижение порядка динамического звена (2) достигается при выполнении условия [8]:

$$T_M \geq 10 \times T_E,$$
$$8{,}6427 \geq 0{,}003.$$

Тогда передаточная функция (2) приводится к еще более упрощенному виду:

$$W(p) = \frac{Kum / Ce}{p(T_M p + 1)},$$

с соответствующим дифференциальным уравнением 2-го порядка:

$$T\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} - KU = 0,$$

где $K = Kum/Ce$ – коэффициент усиления;
$T = T_M$ – постоянная времени.

Окончательно приведем динамическую модель привода к канонической записи (1):

$$\begin{cases} \dfrac{d\varphi}{dt} = \omega \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{K \cdot U - \omega}{T} \end{cases}, \qquad (3)$$

где φ,ω – угол поворота привода и его угловая скорость соответственно.

Задача синтеза оптимального по быстродействию управления безредукторным приводом формализуется следующим образом:

- для динамической системы (3) с областью допустимого управления $|U| \leq U_{MAX}$ требуется синтезировать такое оптимальное управление $U_{ОПТ}(\varphi,\omega)$, которое переводит систему (3) из начального состояния:

$$(\varphi_0, \omega_0): \varphi(t_0) = \varphi_0; \omega(t_0) = \omega_0 \qquad (4)$$

в конечное:

$$(\varphi_K, \omega_K): \varphi(t_K) = \varphi_K; \omega(t_K) = 0 \qquad (4)$$

за минимально возможное время: $t_K \rightarrow min$.

Поскольку программное оптимальное управление $U_{ОПТ}(t)$ в силу теоремы Фельдбаума для системы 2-го порядка имеет структуру:

$$U_{ОПТ}(t) = \begin{cases} z \cdot U_{MAX}, t_0 \leq t \leq t_* \\ -z \cdot U_{MAX}, t_* \leq t \leq t_K \\ z = \pm 1 \end{cases}, \qquad (6)$$

где t^* – момент переключения,

то для синтеза оптимального управления (в форме зависимости от текущего состояния системы $U_{ОПТ}(\varphi,\omega)$) достаточно определить знак начального управления z и линию переключения знака управления в фазовом пространстве.

Выполнив подстановку переменных

$$\frac{d\omega}{dt}=\frac{d\omega}{d\varphi}\cdot\frac{d\varphi}{dt}=\omega\cdot\frac{d\omega}{d\varphi},$$

из системы (3), получим уравнение, задающее траекторию системы в фазовом пространстве:

$$T\omega\frac{d\omega}{d\varphi}+\omega=KU. \qquad (7)$$

Решение уравнения (7) несложно получить в аналитическом виде $\varphi=\varphi(\omega)$:

$$\varphi=\varphi_0+T\cdot(\omega_0-\omega)+KUT\cdot\ln\left(\frac{KU-\omega_0}{KU-\omega}\right). \qquad (8)$$

Перейдем к координатам:

$$\Delta\varphi=\varphi_K-\varphi,$$

где $\Delta\varphi$ – угловое рассогласование, рад.

В таком случае движение динамической системы (3) с оптимальным управлением $U_{ОПТ}(\Delta\varphi,\omega)$ всегда будет завершаться в начале координат ($\Delta\varphi=0;\omega=0$).

Примем очевидное допущение $\varphi_0=0$ и $\omega_0=0$ и перепишем уравнение (8) в следующем виде:

$$\Delta\varphi=\varphi_K+T\omega-KUT\cdot\ln\left(\frac{KU}{KU-\omega}\right). \qquad (9)$$

В соответствии с (9) все фазовые траектории $\Delta\varphi=\Delta\varphi(\omega)$ делятся на два семейства: при $U=U_{MAX}$ и при $U=-U_{MAX}$ (рис. 2а).

Из анализа графиков следует, что перемещение в начало координат ($\Delta\varphi=0;\ \omega=0$) происходит по двум траекториям:

- при $\omega>0$ и $U=-U_{MAX}$;
- при $\omega<0$ и $U=U_{MAX}$.

Соответственно, уравнение линии переключения (ЛП) примет следующий вид (рис. 2б):

$$\Delta\varphi=\begin{cases}T\cdot\omega-KU_{\text{MAX}}T\cdot\ln\left(\dfrac{KU_{\text{MAX}}}{KU_{\text{MAX}}-\omega}\right), & \text{при } \omega<0\\ T\cdot\omega+KU_{\text{MAX}}T\cdot\ln\left(\dfrac{KU_{\text{MAX}}}{KU_{\text{MAX}}+\omega}\right), & \text{при } \omega>0\end{cases} \qquad (10)$$

Формально ЛП можно записать следующим образом: $F_{ЛП}(\Delta\varphi,\omega)=0$,

где $F_{ЛП}(\Delta\varphi,\omega)=\begin{cases}-\Delta\varphi+T\omega-KU_{\text{MAX}}T\cdot\ln\left(\dfrac{KU_{\text{MAX}}}{KU_{\text{MAX}}-\omega}\right), & \text{при } \omega<0\\ -\Delta\varphi+T\omega+KU_{\text{MAX}}T\cdot\ln\left(\dfrac{KU_{\text{MAX}}}{KU_{\text{MAX}}+\omega}\right), & \text{при } \omega>0\end{cases}$ (11)

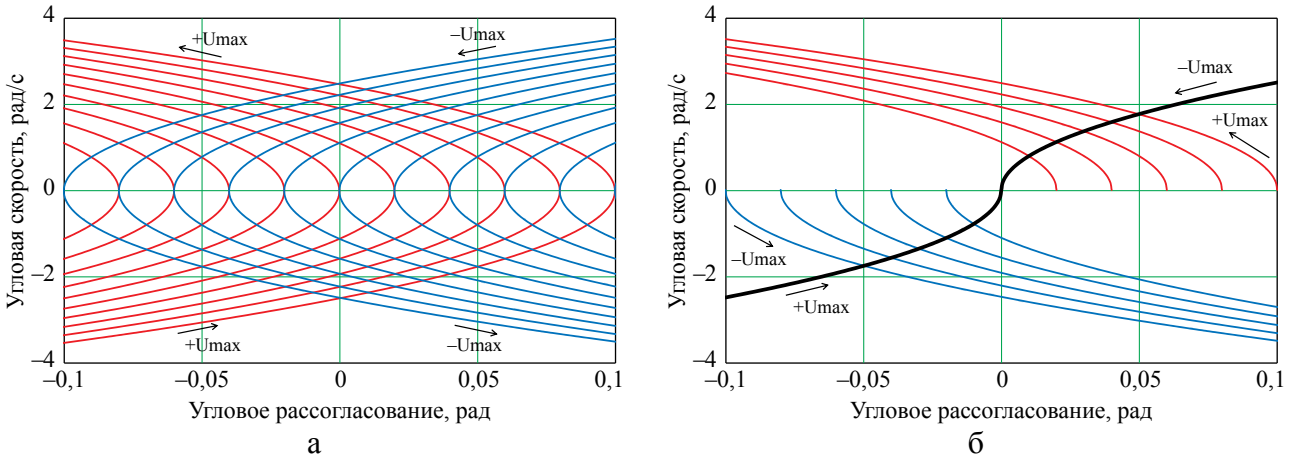


Рис. 2. Фазовые траектории и ЛП: а – семейство фазовых траекторий; б – фазовые траектории и ЛП
– ЛП; – *+Umax;* – *–Umax*

Линия переключения (11) разделяет фазовую плоскость (Δφ,ω) на две области. Знак переключения *z* оптимального управления (6) определяется в соответствии с правилом:

$$U_{ОПТ}(\Delta\varphi,\omega) = -sign(F_{ЛП}(\Delta\varphi,\omega))\cdot U_{MAX}. \quad (12)$$

Полученные расчетные соотношения не представляют сложности для современных вычислительных средств. Оптимальное управление (11)–(12) может быть реализовано практически в любом безредукторном приводе с цифровым управлением.

Результаты моделирования привода (рис. 1) с оптимальным управлением (11)–(12) при наличии запаздывания τ в реализации управления представлены на рисунках 3 и 7.

Вследствие наличия запаздываний в динамической системе смена знака управления происходит выше линии переключения. По окончании переходного процесса устанавливаются незатухающие колебания, которым на фазовой плоскости соответствует предельный цикл. Как видно из графиков, параметры колебаний не зависят от величины входного воздействия.

Согласно [7, 8] все малые постоянные времени в системе можно учесть в виде постоянного запаздывания τ.

Запаздывание τ приводит к смещению точки переключения *N* в точку 1 (см. рис. 4а) на величину $\Delta\omega_\tau$ по оси ординат и на величину $\Delta\varphi_\tau$ по оси абсцисс. Приращения $\Delta\omega_\tau$ и $\Delta\varphi_\tau$

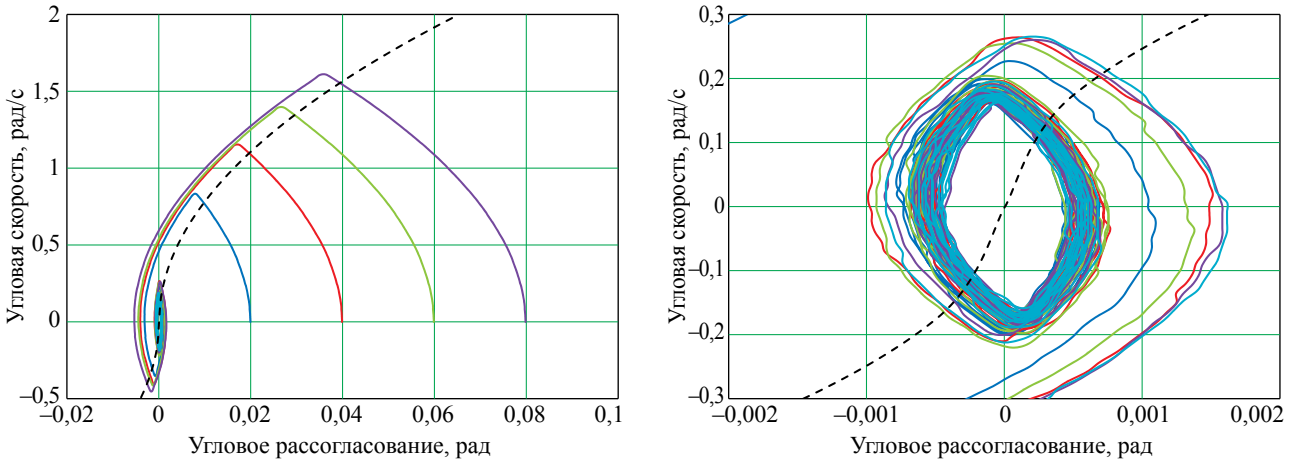


Рис. 3. Фазовый портрет динамической системы с оптимальным управлением:
а – общий вид; б – расширенный вид в области начала координат
– 0,02; – 0,04; – 0,06; – 0,08; – 0,1; – ЛП

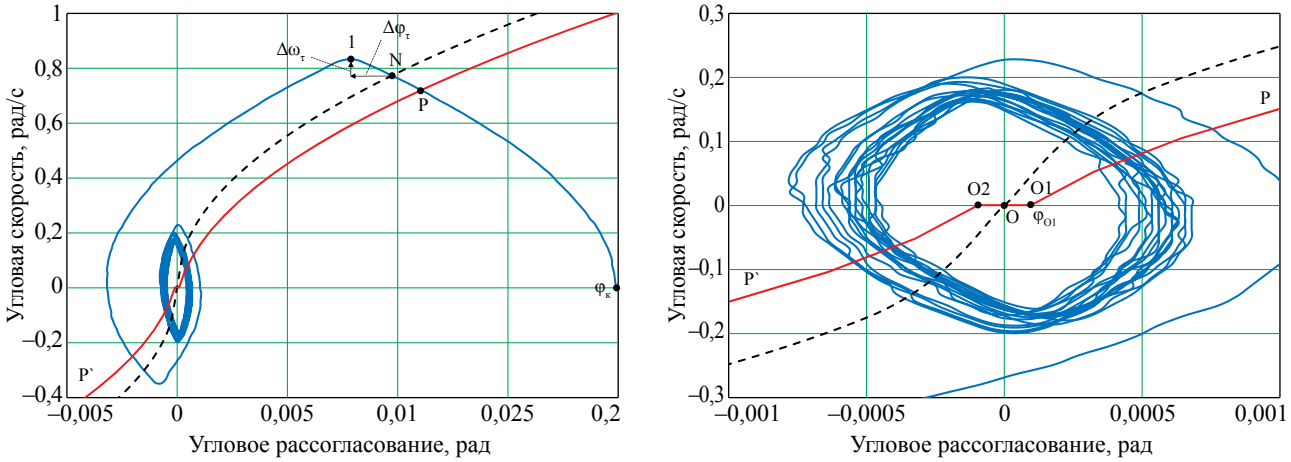


Рис. 4. К синтезу ЛП с упреждением: а – общий вид; б – расширенный вид в области начала координат;
0,02 – фазовая траектория системы с оптимальным управлением и входным воздействием 0,02 рад;
ЛП – линия переключения; ЛПу – линия переключения с упреждением
– 0,02; – ЛПу; – ЛП

за время τ определяются через систему дифференциальных уравнений (3):

$$\begin{cases} \Delta\varphi_\tau = \int_0^\tau \omega dt \\ \Delta\omega_\tau = \int_0^\tau \frac{K\cdot U-\omega}{T} dt \end{cases}. \quad (13)$$

Или, в силу малости τ:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_\tau = \omega\tau \\ \Delta\omega_\tau = \frac{K\cdot U-\omega}{T}\tau \end{cases}, \quad (14)$$

где τ – обобщенное запаздывание, с;
$\Delta\varphi_\tau$ – приращение по углу за время τ, рад;
$\Delta\omega_\tau$ – приращение по угловой скорости за время τ, рад/с.

Компенсация запаздывания τ достигается путем синтеза новой ЛП с упреждением таким образом, чтобы управляющее воздействие системы с запаздыванием и той же системы без запаздывания совпадали.

Синтез новой ЛП с упреждением проведем путем сдвига ЛП строго оптимального управления (11) на величины $\Delta\omega_\tau$ и $\Delta\varphi_\tau$ против направления движения – с точки *N* в точку *P* (рис. 4а). Произведем замену измеренных координат (Δφ, ω) на упрежденные ($\Delta\varphi_y$, ω_y) и запишем уравнение ЛП с упреждением в соответствии с выражением (11):

$$F_{ЛП}(\Delta\varphi_y, \omega_y) = 0.$$

где

$$F_{ЛП}(\Delta\varphi_y,\omega) = \begin{cases} -\Delta\varphi_y + T\omega_y - KU_{MAX}T\cdot\ln\left(\frac{KU_{MAX}}{KU_{MAX}-\omega_y}\right), \text{ при } \omega<0 \\ -\Delta\varphi_y + T\omega_y + KU_{MAX}T\cdot\ln\left(\frac{KU_{MAX}}{KU_{MAX}+\omega_y}\right), \text{ при } \omega>0 \end{cases}, \quad (15)$$

$$\begin{cases} \Delta\varphi_y = \Delta\varphi - \Delta\varphi_\tau \\ \omega_y = \omega + \Delta\omega_\tau \end{cases}$$

Δφ,ω – измеренные координаты фазовой траектории динамической системы;
$\Delta\varphi_y$,ω_y – упрежденные координаты фазовой траектории динамической системы.

Упрежденные координаты $\Delta\varphi_y$, ω_y определяются по выражениям (13)–(14).

Линия переключения (15) визуализируется кривой *PO*1*O*2*P*' на рисунке 4.

В общем случае численное значение τ неизвестно, но может быть определено через параметры предельного цикла [7]:

1) Уравнение фазовой траектории (9) для точки *N* имеет следующий вид:

- для левой полуоси

$$\Delta\varphi = T\cdot\omega_N + KU_{MAX}T\cdot\ln\left(\frac{KU_{MAX}}{KU_{MAX}+\omega_N}\right), \quad (16)$$

- для правой полуоси

$$\Delta\varphi = \varphi_K + T\cdot\omega_N - KU_{MAX}T\cdot\ln\left(\frac{KU_{MAX}}{KU_{MAX}-\omega_N}\right). \quad (17)$$

Приравнивая правые части уравнений (16) и (17) и опуская промежуточные вычисления, получим выражение для φ_K:

$$\varphi_K = KU_{MAX}T\cdot\ln\left(\frac{K^2U_{MAX}^2}{K^2U_{MAX}^2-\omega_N^2}\right). \quad (18)$$

Из (18) получим обратное выражение для ω_N:

$$\omega_N = KU_{MAX}\sqrt{1-\frac{1}{e^A}}, \quad (19)$$

где $A = \frac{\varphi_K}{KU_{MAX}T}$. (20)

2) Уравнение фазовой траектории (9) для точки 1 имеет следующий вид:

- для левой полуоси

$$\Delta\varphi = \varphi_Л + T\cdot\omega_1 + KU_{MAX}T\cdot\ln\left(\frac{KU_{MAX}}{KU_{MAX}+\omega_1}\right), \quad (21)$$

- для правой полуоси

$$\Delta\varphi = \varphi_П + T\cdot\omega_1 - KU_{MAX}T\cdot\ln\left(\frac{KU_{MAX}}{KU_{MAX}-\omega_1}\right), \quad (22)$$

где $\omega_1 = \omega_N + \Delta\omega_\tau$,

$\varphi_Л$, $\varphi_П$ – координаты левой и правой полуосей фазовой траектории соответственно при $\omega = 0$.

Приравнивая правые части уравнений (21) и (22) и опуская промежуточные вычисления и индексы, получим выражение для точечного преобразования правой полуоси в левую:

$$\varphi_Л = \varphi_П - KU_{MAX}T \cdot \ln\left(\frac{K^2U_{MAX}^2}{K^2U_{MAX}^2 - (\omega+\Delta\omega_\tau)^2}\right), \quad (23)$$

Построим диаграмму точечного преобразования (рис. 5) по функции соответствия (23).

Точка пересечения кривых $\varphi_П$ и $\varphi_Л(\varphi_П)$ характеризует наличие в системе единственного устойчивого предельного цикла.

Условие существования предельного цикла:

$$\varphi_C = -\varphi_Л = \varphi_П,$$

где φ_C – амплитуда колебаний по углу в предельном цикле, рад.

3) Для определения τ подставим φ_C в выражение (23):

$$-\varphi_C = \varphi_C - KU_{MAX}T \cdot \ln\left(\frac{K^2U_{MAX}^2}{K^2U_{MAX}^2 - (\omega_C+\Delta\omega_{\tau C})^2}\right), \quad (24)$$

где ω_C – амплитуда колебаний по угловой скорости в предельном цикле, определяемая по (19)–(20), рад/с;

$\Delta\omega_{\tau C}$ – приращение по угловой скорости, определяемое по (13)–(14), рад/с.

Из (24), опуская промежуточные вычисления, получим выражение для оценки обобщенного запаздывания τ:

$$\tau = \frac{T}{KU_{MAX}\omega_C}\left[KU_{MAX}\sqrt{(e^{Ac})^2 - 1} - \omega_C\right], \quad (25)$$

где

$$\begin{cases} Ac = \dfrac{\varphi_C}{KU_{MAX}T}, \\ \omega_C = KU_{MAX}\sqrt{1 - \dfrac{1}{e^{Ac}}}. \end{cases}$$

В соответствии с выражением (25) по измеренным значениям φ_C и ω_C выполняется расчет τ. Для исследуемого безредукторного привода (рис. 1) с колебаниями в предельном цикле (рис. 3б или 4б) оценка запаздывания составит $\tau \approx 0{,}001947$ с.

Результаты моделирования привода с оптимальным управлением (12) и упреждением (15) представлены на рисунках 6 и 7.

Стоит особо отметить, что вследствие имеющихся измерительных шумов и нелинейностей отдельные фазовые траектории все же «просачиваются» сквозь линию переключения (см. рис. 6б). Фактически перевод динамической системы 2-го порядка из начального состояния в конечное выполняется более чем за 1 одно переключение. Таким образом, для безредукторного привода с оптимальным управлением реализуется квазиоптимальный переходной процесс.

По завершении переходного процесса динамическая система переходит в так называемый «скользящий режим» [12], который вызван остаточным некомпенсированным запаздыванием τ и который также характеризуется незатухающими колебаниями. Амплитуда колебаний минимальна благодаря введению упреждения и для идеальной системы фактически определяется величиной τ согласно (24) и (13)–(14):

$$\begin{cases} \varphi_C = 0.5KU_{MAX}T \cdot \ln\left(\dfrac{K^2U_{MAX}^2}{K^2U_{MAX}^2 - (\Delta\omega_{\tau C})^2}\right) \\ \omega_C = \Delta\omega_{\tau C} \\ \Delta\omega_{\tau C} = \dfrac{K \cdot U_{MAX}}{T}\tau \end{cases}.$$

Функционирование безредукторного привода в скользящем режиме может быть неприемлемо по двум причинам:

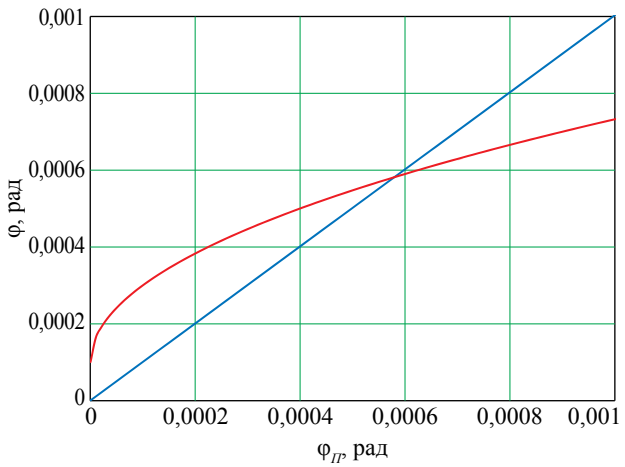


Рис. 5. Диаграмма точечного преобразования

– $\varphi_П$; – $\varphi_Л$

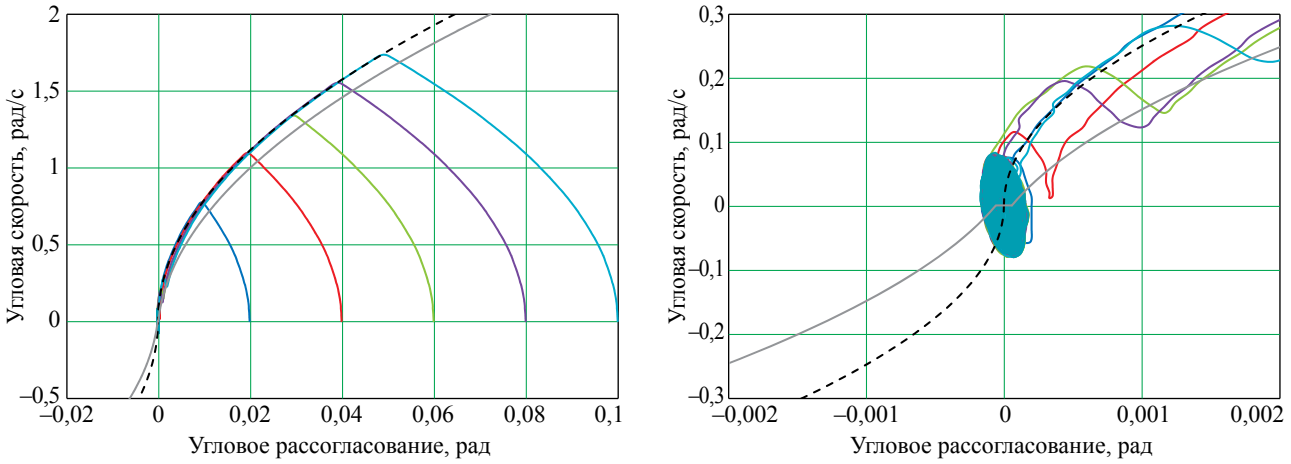


Рис. 6. Фазовый портрет динамической системы с оптимальным управлением с упреждением: а – общий вид; б – расширенный вид в области начала координат

– 0,02; – 0,04; – 0,06; – 0,08; – 0,1; – ЛП; – ЛПу

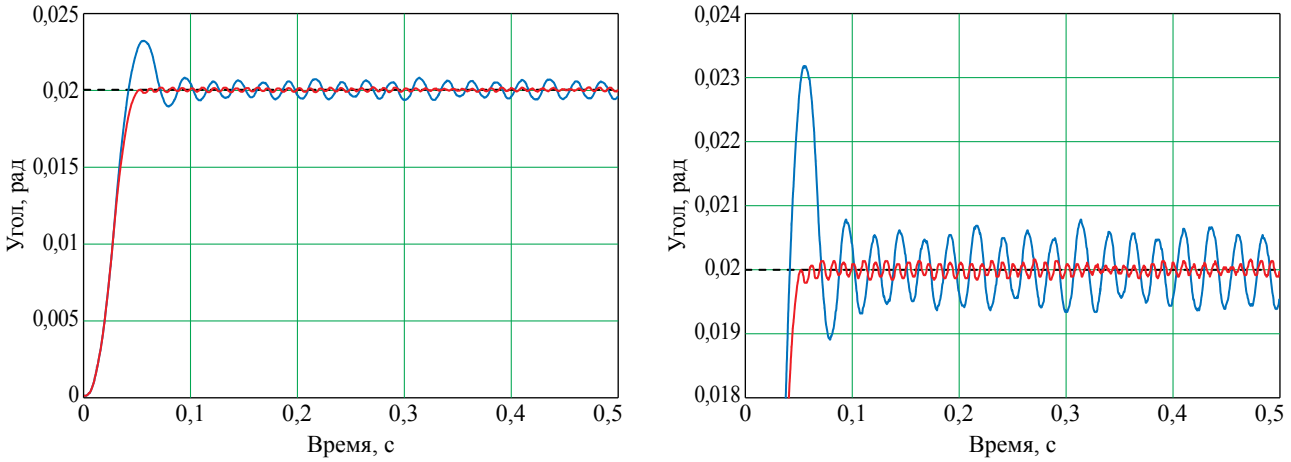


Рис. 7. Графики переходных процессов: а – общий вид; б – расширенный вид в области установившегося процесса; *F*вх – входное воздействие; *F*оу – переходной процесс при строго оптимальном управлении; *F*оуу – переходной процесс при оптимальном управлении с упреждением

– *F*вх; – *F*оу; – *F*оуу

1) постоянное энергопотребление (рис. 8), что критично для аппаратуры с ограниченным по емкости источником питания (например, ОЭС обзора беспилотного летательного аппарата);

2) «дрожание» привода (рис. 7б), что приведет к «смазу» пеленгуемого сигнала, что критично для высокоточных РЛС и ОЭС.

В связи с этим предлагается применить комбинированное управление, состоящее из двух режимов:

1) режим оптимального управления (12) с упреждением (15) в зоне «приведения» системы с начальными условиями:

$$\Delta\varphi(t_0) = \varphi_K;\ \omega(t_0) = 0 \qquad (26)$$

и конечными:

$$|\Delta\varphi(t_K)| \le \delta_{\Delta\varphi};\ |\omega(t_K)| \le \delta_{\omega}, \qquad (27)$$

где $\delta_{\Delta\varphi}$, δ_{ω} – границы зоны «стабилизации» по угловому рассогласованию и угловой скорости соответственно,

и критерием быстродействия: $t_K \to min$;

2) режим автоматического регулирования в зоне «стабилизации» (27) с П-регулятором в позиционном контуре и ПИ-регулятором в скоростном.

Для рассматриваемого привода границы зоны точности $\delta_{\Delta\varphi} = 0{,}15$ мрад и $\delta_{\omega} = 0{,}08$ рад/с определены следующим образом:

$$\delta_{\Delta\varphi} = \Delta\varphi_{CP} \pm \theta, \qquad (28)$$

$$\delta_\omega = \omega_{CP} \pm \upsilon, \qquad (29)$$

где $\Delta\varphi_{CP}$ – амплитуда колебаний по угловому рассогласованию в скользящем режиме (рис. 6б),

ω_{CP} – амплитуда колебаний по угловой скорости в скользящем режиме (рис. 6б),

θ, υ – параметры, задающие размер зоны «стабилизации».

Методика (28)–(29) носит эмпирический характер, а выбор значений $\delta_{\Delta\varphi}$ и δ_ω является предметом отдельных исследований.

Сравнительные результаты моделирования безредукторного привода представлены на рисунках 9, 10 и в таблице 1.

Результаты приведены для постоянного входного воздействия и для режима сканирования. Режим сканирования характерен для высокоточных РЛС и ОЭС, оснащенных

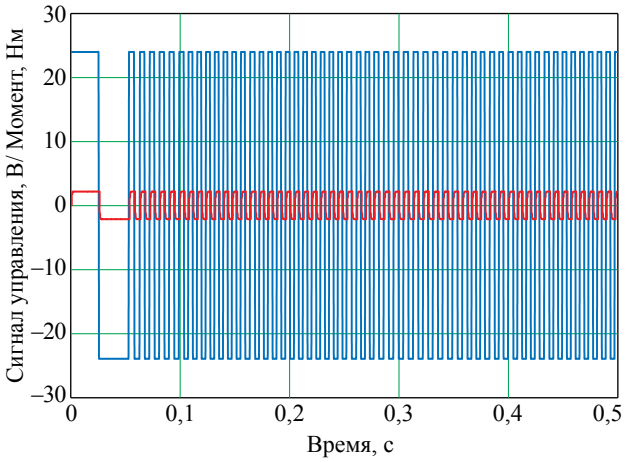


Рис. 8. Графики сигнала управления и момента привода на переходном процессе и в скользящем режиме

двухканальным приводом горизонтального (ГН) и вертикального наведения (ВН). Режим

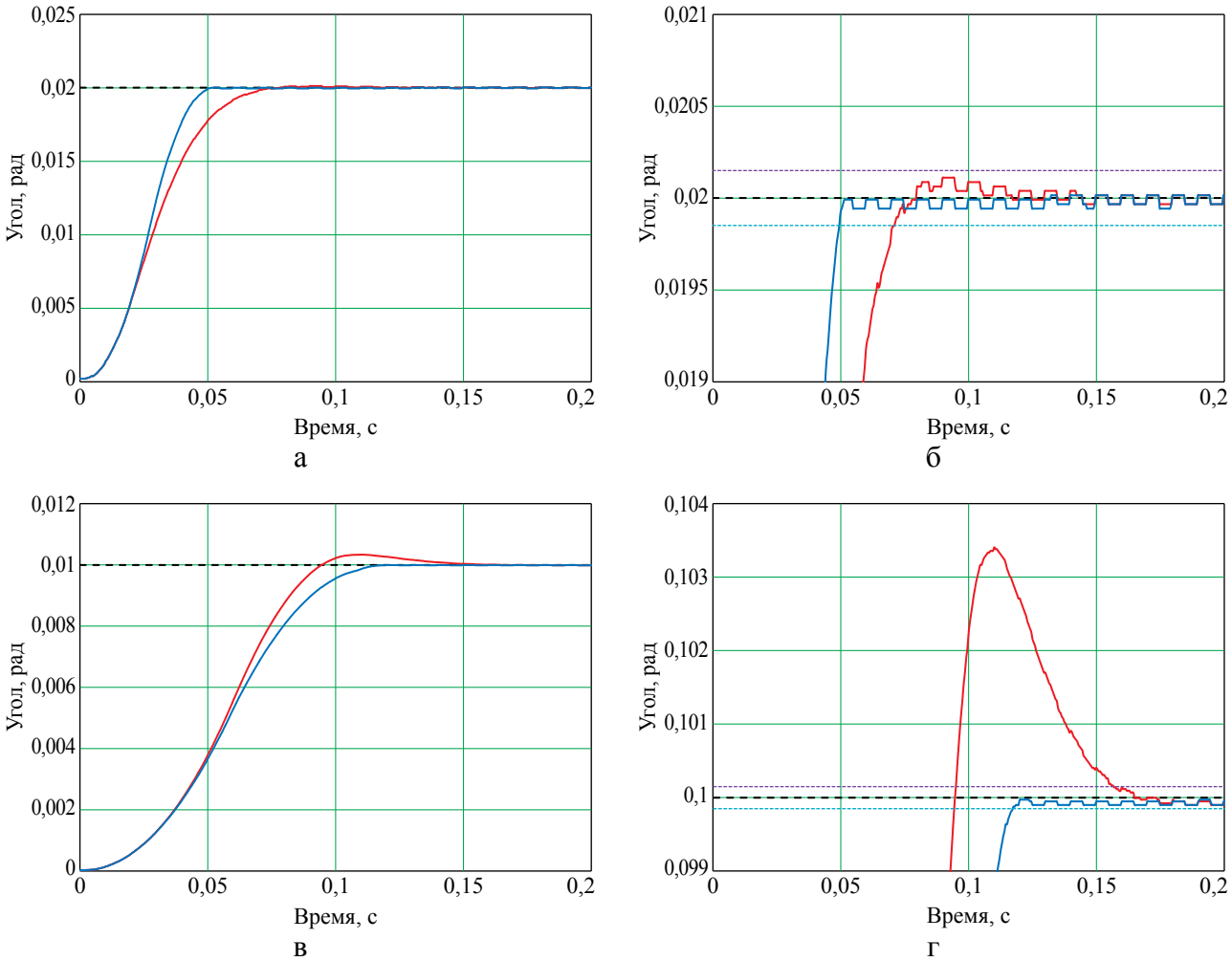


Рис. 9. Типовые переходные процессы: а, б – входное воздействие 0,02 рад; в, г – входное воздействие 0,1 рад; *F*вх – входное воздействие; *F*ар – сигнал ДУ при автоматическом регулировании; *F*ку – сигнал ДУ при комбинированном управлении; +*dF*, –*dF* – границы зоны по ошибке (0,15 мрад)

– *F*вх; – *F*ар; – *F*ку

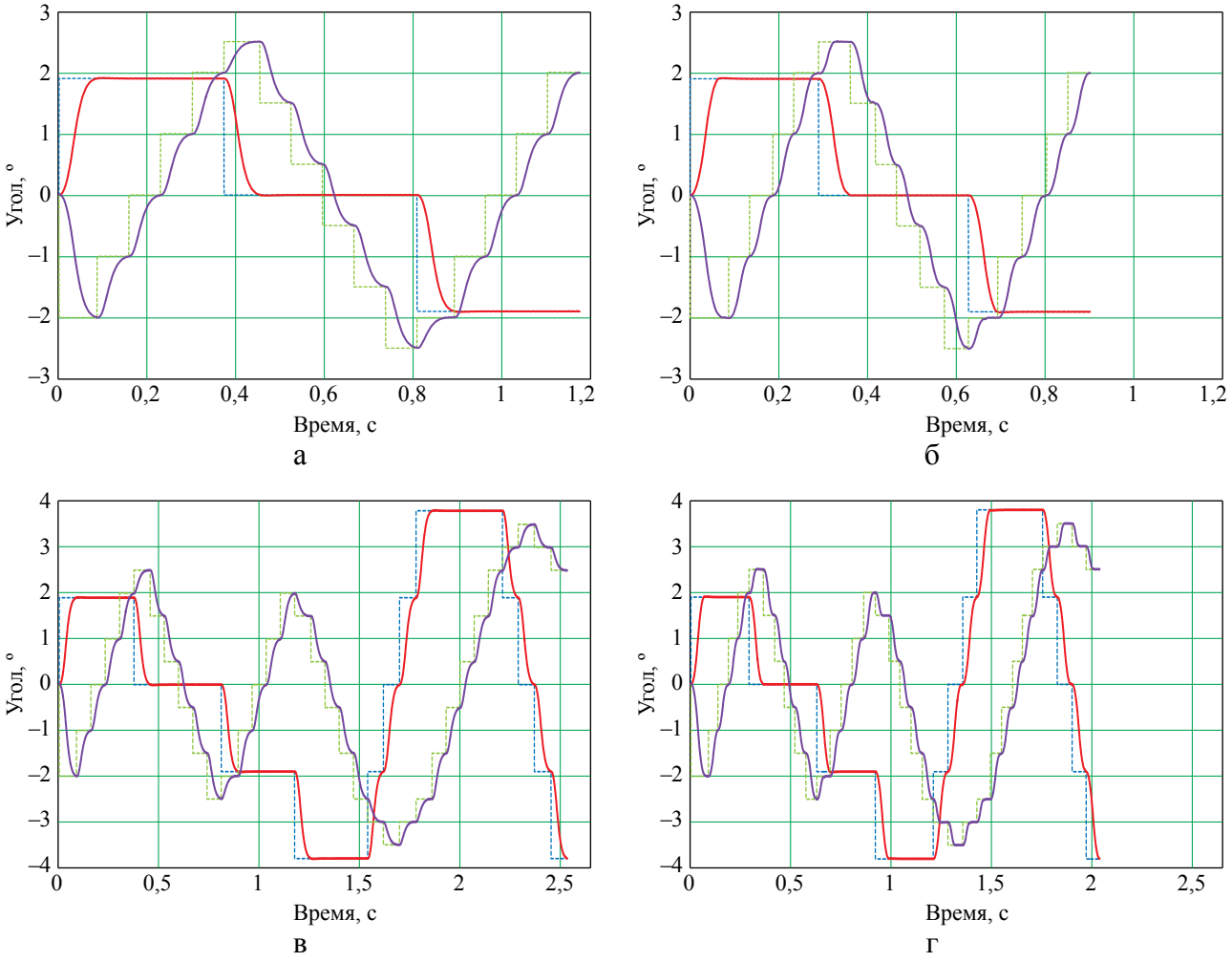


Рис. 10. Типовые переходные процессы при сканировании: а – 16 сканов при автоматическом регулировании; б – 16 сканов при комбинированном управлении; в – 34 скана при автоматическом регулировании; г – 34 скана при комбинированном управлении; *F*вх1, *F*вх2 – входные воздействие приводов ГН и ВН соответственно; *F*ду1, *F*ду2 – сигналы ДУ приводов ГН и ВН соответственно

– *F*вх1; – *F*ду1; – *F*вх2; – *F*ду2

Таблица 1

Сравнительные результаты моделирования

Входное воздействие, рад	Быстродействие переходного процесса, сек		Выигрыш по быстродействию, сек	Выигрыш по быстродействию, %
	автоматическое регулирование	комбинированное управление		
0,02	0,072	0,050	0,022	31
0,04	0,105	0,078	0,027	26
0,06	0,133	0,091	0,042	32
0,08	0,145	0,106	0,039	27
0,1	0,157	0,118	0,039	25
Сканирование (16 сканов)	1,178	0,906	0,272	23
Сканирование (34 скана)	2,538	2,038	0,500	20

сканирования позволяет существенно расширить поле обзора путем механического перемещения строительной оси антенны в заданные по циклограмме области пространства.

Результаты моделирования показали эффективность применения предлагаемого комбинированного управления в сканирующих и следящих системах в части:

- обеспечения повышенного быстродействие для всех типов и величины входного воздействия;

- снижения времени переходного процесса на 25–32 % при постоянном входном воздействии;

- увеличения быстродействия на 20–23 % в режиме сканирования.

Таким образом, для безредукторного привода с малым углом поворота на базе моментного двигателя типа ДБМ70 выполнен синтез оптимального управления с упреждением. Оптимальное управление с упреждением обеспечивает минимальное время переходного процесса и минимальные амплитуды незатухающих колебаний в установившемся скользящем режиме. При этом для отдельных фазовых траекторий реализуется квазиоптимальный переходной процесс – число переключений больше, чем $n - 1$.

Для исключения скользящего режима и, соответственно, незатухающих колебаний в безредукторном приводе предложено комбинированное управление. Комбинированное управление включает в себя режим оптимального управления с упреждением на участке «приведения» и режим автоматического регулирования в зоне «стабилизации».

Динамическое моделирование подтвердило правильность выбранных технических решений и корректность синтезированного управления. По сравнению с П- и ПИ-регуляторами комбинированное управление в безредукторном приводе обеспечивает повышение быстродействия на 20–30 %. При этом статическая ошибка не ухудшается.

Расчетные соотношения не представляют сложности для современных вычислительных средств и могут быть реализованы в приводе с цифровым управлением (при проектировании или модернизации).

Список литературы

1. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): курс лекций. СПб.: Корона-Век, 2007. 336 с.

2. Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржаков Б.Н. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями: монография. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 240 с.

3. Горячев О.В., Шигин И.А., Кузьмин М.А. Синтез алгоритма управления приводом наведения и стабилизации секторным моментным электрическим двигателем встраиваемого исполнения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 3. 2020. С. 17–28.

4. Кузьмин М.А., Шигин И.А., Ерофеев А.Г. Синтез алгоритмов управления безредукторного привода на базе бесконтактного моментного двигателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 5. 2019. С. 381–392.

5. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969. 384 с.

6. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Физматгиз, 1963. 552 с.

7. Павлов А.А. Синтез релейных систем, оптимальных по быстродействию (метод фазового пространства). М.: «Наука». Главная редакция физ.-мат. литературы, 1966. 392 с.

8. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования, издание третье, исправленное. М.: «Наука». Главная редакция физ.-мат. литературы, 1975. 768 с.

9. Бессекерский В.А., Фабрикант Е.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. М.: «Судостроение», 1968. 351 с.

10. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений. 2-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 272 с.

11. Микеров А.Г. Электромеханические датчики и электронные компоненты управляемых вентильных двигателей: учеб. пособие. СПб.: СПбГЭТУ, 1999. 60 с.

12. Сурков В.В., Сухинин Б.В., Ловчаков В.И., Соловьев А.Э. Аналитическое конструирование регуляторов, оптимальных по точности и быстродействию. Тула: Тул. гос. ун-т, 2005. 300 с.

Об авторах

Цапцов Артем Вячеславович – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела акционерного общества «Конструкторское бюро точного машиностроения им. А. Э. Нудельмана», Москва, Российская Федерация.
Область научных интересов: системы управления движением, оптико-электронные системы.

Степовой Андрей Васильевич – кандидат технических наук, начальник направления – заместитель главного конструктора акционерного общества «Конструкторское бюро точного машиностроения им. А. Э. Нудельмана», Москва, Российская Федерация.
Область научных интересов: системы управления движением, оптико-электронные системы.

Optimal and combined control of the direct drive with the torque motor

Tsaptsov A. V., Stepovoy A. V.

Nudelman Precision Engineering Design Bureau, Moscow, Russian Federation

The paper covers the problem of reaching the maximum speed performance of a direct drive based on the torque motor. The authors propose the solution to the problem by implementing optimal feed-forward control in accordance with Pontryagin's maximum principle and Feldbaum's theorem on the finite number of switching times. Combined control allows a transition from optimal to automatic control in the finite state stabilization zone. Results of mathematical modelling prove the efficiency of selected engineering solutions.

Keywords: optimal control, maximum speed performance, feed forward, direct drive, torque motor, mathematical modeling

Information about the authors

Tsaptsov Artem Vyacheslavovich – Candidate of Engineering Sciences, Deputy Head of Department, Joint Stock Company "Nudelman Precision Engineering Design Bureau", Moscow, Russian Federation.
Science research interests: traffic control systems, optoelectronic systems.

Stepovoy Andrey Vasilievich – Candidate of Engineering Sciences, Chief of Branch – Deputy Chief Designer, Joint Stock Company "Nudelman Precision Engineering Design Bureau", Moscow, Russian Federation.
Science research interests: traffic control systems, optoelectronic systems.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-59-68
УДК 621.391.96

Эффективность компенсации миграции сигналов целей на выходе фильтра сжатия

К. А. Елагина

Акционерное общество «НИИ измерительных приборов — Новосибирский завод имени Коминтерна», Новосибирск, Российская Федерация

В статье для случая цели, движущейся с неизвестной радиальной скоростью, на примере сигнала с линейной частотной модуляцией проведен анализ особенностей объединения каналов вынесенного за пределы фильтра сжатия компенсатора миграции сигналов целей по дальности в периодах пачки импульсов, позволяющего уменьшить потери при длительном накоплении сигналов, оценена его эффективность, предложен способ объединения каналов такого компенсатора, обеспечивающий защиту от нежелательного расширения сигнала.

Ключевые слова: миграция целей, компенсатор миграции, линейная частотная модуляция, объединение каналов, расширение сигнала

Для цитирования: Елагина К. А. Эффективность компенсации миграции сигналов целей на выходе фильтра сжатия // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 59–68. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-59-68

For citation: Elagina K. A. Effectiveness of target signal migration compensation at compression filter output // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 3. P. 59–68. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-59-68

Поступила 11.08.2021 *Отрецензирована* 01.09.2021 *Одобрена* 24.09.2021 *Опубликована* 20.10.2021

Введение

Настоящая статья посвящена эффективности объединения каналов вынесенного за пределы фильтра сжатия компенсатора миграции сигналов целей (КМЦ) по дальности. Применение такого компенсатора миграции, позволяющего устранить или существенно уменьшить потери при длительном накоплении радиолокационных сигналов, отраженных от целей, движущихся преимущественно с большими радиальными скоростями, хоть и известно [1, 2], однако в литературе не анализируется его эффективность для практически интересного случая неизвестной радиальной скорости движения цели, а также не освещен актуальный вопрос объединения его каналов.

Целью работы является анализ эффективности вынесенного за пределы фильтра сжатия компенсатора миграции сигналов целей для случая априорно неизвестной радиальной скорости движения цели и разработка эффективного способа объединения его каналов.

Основная часть

Суммарное число элементов разрешения по дальности, на которое переместится цель, движущаяся с радиальной скоростью V_r, за время, равное длительности пачки из N равноотстоящих импульсов (эквидистантная пачка), без учета округления составляет N_{nTp} дискрет [2]:

$$N_{nTp} = (V_r \cdot (N-1) \cdot T_p) / \Delta R = \\ = (V_r \cdot (N-1) \cdot 2 \cdot W) / c,$$

где V_r – радиальная скорость цели; T_p – длительность одного периода повторения импульсов

© Елагина К. А., 2021

(без учета вобуляции в общем случае); $\Delta R = c / (2 \cdot W)$ – размер элемента разрешения по дальности, c – скорость света; W – ширина спектра сигнала.

Такое перемещение цели в литературе называют «миграцией» цели [1–3]. Для количественной оценки смещений (миграции) сигналов целей, движущихся с разными радиальными скоростями, проведем следующие несложные расчеты.

Пусть максимальная радиальная скорость V_r для целей с большими радиальными скоростями (БРЦ) – 8000 м/с; для целей со средними радиальными скоростями (СРЦ) – 1000 м/с; для целей с малыми радиальными скоростями (МРЦ) – 100 м/с. Тогда путь ($R_{V_r} = V_r \cdot T_p$, который пройдет цель, движущаяся с максимальной радиальной скоростью, за время T_p, равное длительности периода повторения импульсов, в случае низкой частоты повторения импульсов при T_p = 1–4 мс для МРЦ – 0,1–0,4 м; СРЦ – 1–4 м; БРЦ – 8–32 м. Для случая высокой частоты повторения (например, для T_p = 50 мкс) эта величина для МРЦ – 0,005 м; СРЦ – 0,05 м; БРЦ – 0,4 м.

Как видно из полученных результатов, при величине интервала разрешения по дальности для широкополосных сигналов (ШПС) $\Delta R \approx$ 1–3 м для уменьшения потерь в пороговом сигнале (за счет накопления в разных периодах пачки не выровненных во времени сигналов) корректировку миграции целей по дальности особенно важно вводить при обнаружении высокоскоростных целей в режимах зондирующих импульсов с низкой частотой повторения.

Важно отметить, что вынесенный за пределы фильтра сжатия КМЦ позволяет компенсировать только временные сдвиги, обусловленные перемещением цели за время длительности пачки. Временные смещения сигналов из-за неоптимальной внутриимпульсной обработки при наличии смещения входного сигнала по частоте Доплера при каскадном включении одноканального фильтра сжатия и КМЦ не компенсируются. Ошибка в определении времени прихода сигнала в этом случае зависит от закона внутриимпульсной модуляции и параметров сигнала. Для компенсации второго типа временных смещений сигналов необходимо многоканальное по доплеровской частоте построение согласованного фильтра.

Перед проведением межпериодной обработки сигналы разных периодов выравнивают (задерживают и/или запоминают) во времени (или, например, формируют дальностно-временной портрет [1]). Временная расстановка импульсов пачки априорно известна, поэтому проведение такой процедуры не составляет труда и, как правило, при описании алгоритмов и на структурной схеме не приводится. Основной практический интерес представляет компенсация миграции сигналов целей, движущихся с неизвестными радиальными скоростями.

На рисунке 1 для иллюстрации миграции сигналов по дальности приведены огибающие сигналов на выходе одноканального фильтра сжатия. В качестве примера зондирующего сигнала рассмотрена пачка из 8 широкополосных импульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) (длительность T – 80 мкс, ширина спектра W – 50 МГц, частота дискретизации fd – 100 МГц), длительность периода повторения импульсов – 4 мс, частота Доплера соответствовала предельному случаю для высокоскоростных целей и равнялась 160 кГц (радиальная скорость – 8000 м/с, несущая частота РЛС – 3 ГГц). Также показана огибающая сигнала в первом периоде пачки на выходе фильтра при отсутствии смещения по частоте Доплера. Для большей наглядности и компактности рисунка сигналы в разных периодах пачки импульсов были предварительно совмещены во времени. Кроме того, сигналы движущейся цели в разных периодах имеют дополнительные временные смещения (миграцию), в общем случае априорно неизвестные, много меньшие длительности периода повторения импульсов.

Как видно из рисунка 1, для дальнейшего корректного накопления и устранения потерь в пороговом сигнале необходимо вводить корректировку миграции сигналов целей по дальности в разных периодах пачки импульсов. Компенсация миграции фактически должна заключаться в совмещении сигнальных отсчетов одинаковых дискрет дальности разных

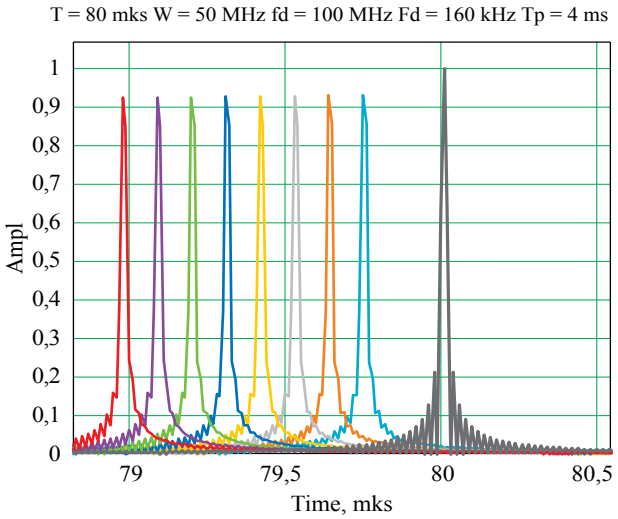


Рис. 1. Огибающие сигналов
– 1per; – 2per; – 3per; – 4per;
– 5per; – 6per; – 7per; – 8per;
– Fd = 0 Hz

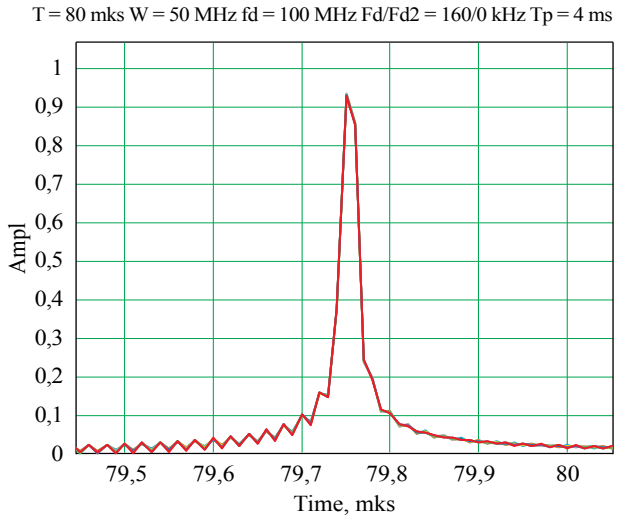


Рис. 2. Огибающие сигналов
– 1per; – 2per; – 3per; – 4per;
– 5per; – 6per; – 7per; – 8per

периодов, в результате потери при накоплении значительно уменьшаются или полностью устраняются.

На рисунке 2 показан результат совмещения сигнальных отсчетов в оптимальном канале рассмотренного ниже вынесенного за пределы фильтра сжатия компенсатора миграции целей.

Рассматриваемый далее способ компенсации сигналов в периодах пачки актуален как для узкополосных (УПС), так и ШПС, однако наиболее наглядно эффект перемещения сигналов цели в соседние элементы дальности проявляется именно в случае ШПС.

Компенсация миграции целей на выходе согласованного фильтра

Алгоритм компенсации миграции целей на выходе согласованного фильтра (СФ) можно реализовать на основе свойства преобразования Фурье (теорема сдвига).

В соответствии с теоремой сдвига сигналу $x(t)$, смещенному во времени на $t_з$, в частотной области соответствует его спектр $X(f)$, умноженный на комплексную экспоненту $e^{-j\cdot 2\cdot\pi\cdot f\cdot t_з}$:

$$x(t - t_з) <=> X(f) \cdot e^{-j\cdot 2\cdot\pi\cdot f\cdot t_з}.$$

Поскольку задержка сигнала за время длительности периода повторения априорно неизвестна (неизвестна радиальная скорость движения), любой компенсатор миграции (встроенный или вынесенный за пределы фильтра сжатия) является многоканальным по данному параметру. Рассмотрим пример для эквидистантной пачки.

Каналы вынесенного за пределы СФ компенсатора равномерно располагают в диапазоне возможных значений задержек цели с учетом обоих знаков частоты Доплера:
$t_з^{\text{chan}} = -t_з^{MAX} \ldots t_з^{MAX}$ – вектор задержек сигнала в каналах КМЦ,
$t_з^{MAX} = [F_d^{MAX} \cdot T_p \cdot W / f_0] / f_d$ – максимальная задержка (для максимального значения частоты Доплера F_d^{MAX}) сигнала с учетом его дискретизации по времени за время одного периода повторения импульсов T_p, квадратными скобками [•] здесь и далее обозначена операция округления,
f_d – частота дискретизации, f_0 – несущая частота,
$M = 2 \cdot [F_d^{MAX} \cdot T_p \cdot W / f_0] + 1$ – число каналов КМЦ (с шагом смещений 1 дискрета дальности), вынесенного за пределы фильтра сжатия.

Согласно данному способу с учетом теоремы сдвига в k-м канале компенсатора миграции спектр $X(f)$ сигнала, отраженного от движущейся цели, на выходе фильтра сжатия в i-м периоде пачки умножается на вектор коэффициентов $X_k(f)$:

$$X_k(f) = e^{-j\cdot 2\cdot\pi\cdot(i-1)\cdot f\cdot t_{зk}^{\text{chan}}},$$

$t_{зк}^{chan}$ – задержка сигнала k-м канале компенсатора, $i = 1...N$, $k = 1...M$,

$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt$ – спектр сигнала $x(t)$.

Далее для вычисления сигнала со скомпенсированной канальной задержкой применяется обратное преобразование Фурье:

$$x_{ik}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(X(f) \cdot X_k(f) \right) \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} df = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(X(f) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot (i-1) \cdot f \cdot t_{зк}^{chan}} \right) \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} df. \quad (1)$$

Объединение каналов компенсатора миграции осуществляется после проведения межпериодной обработки.

Реализовать компенсацию миграции целей на выходе фильтра сжатия также можно менее трудоемким в вычислительном плане способом без применения пары преобразований Фурье, например при применении регистров сдвига. В этом случае по заранее рассчитанному числу возможных смещений сжатых сигналов (корреляционных пиков) организуется линия задержки (ЛЗ) из регистров сдвига с соответствующим числом отводов. Далее на выходе каждого отвода ЛЗ (канала компенсатора) осуществляется межпериодная обработка (например, накопление), после которой каналы объединяют. В общем случае для компенсации миграции на выход подключается тот отвод ЛЗ, амплитуда сигнала в котором после межпериодной обработки максимальна.

Объединение каналов компенсатора миграции

При применении многоканальных систем в определенный момент возникает необходимость объединения их каналов. Проблема объединения (в каждой дискрете дальности) каналов многоканального (по числу возможных задержек сигналов в периодах пачки импульсов) компенсатора миграции аналогична проблеме объединения каналов многоканального по доплеровской частоте согласованного фильтра (МСФ), для которого во избежание нежелательного расширения сигнала с возможным образованием аномальных боковых лепестков автором также предлагается применять специальный алгоритм защиты.

Для определенности рассмотрим объединение доплеровских каналов компенсатора миграции на примере некогерентного накопления (НН) пачки из N-импульсов. Далее для практически интересного случая ШПС и простоты расчетов считалось, что обрабатывается эхосигнал, отраженный от одной блестящей точки цели. В этом случае аналитическая запись алгоритма объединения каналов КМЦ после межпериодного накопления упрощается, поскольку НН отсчетов сигнала по дальности (в общем случае от неизвестного числа блестящих точек цели) опускается.

При объединении каналов многоканальной системы (в данном случае КМЦ) традиционно применяется алгоритм на основе схемы выбора максимума, в соответствии с которым выбирается тот канал, в котором амплитуда сигнала (после межпериодной обработки) в текущей z-й дискрете дальности максимальна:

$$y_z = \max_k \left\{ \sum_{i=1}^{N} |x_{ikz}| \right\}, \; i = 1...N, \; k = 1...M, \quad (2)$$

где $|x_{ikz}|$ – амплитуда сигнала i-го периода пачки на выходе k-го канала КМЦ (в частотной области (1) или на основе ЛЗ) в z-й дискрете дальности, M – число каналов КМЦ.

Предлагаемый алгоритм объединения доплеровских каналов КМЦ после межпериодного накопления с защитой от расширения сигнала имеет вид:

$$y_z = \sum_{i=1}^{N} |x_{iKz}|,$$
$$K = k, \quad \max_k \left\{ \max_l \left\{ \sum_{i=1}^{N} |x_{ikl}| \right\} \right\} = \max_l \left\{ \sum_{i=1}^{N} |x_{ikl}| \right\}, \quad (3)$$
$$i = 1...N, \; k = 1...M, \; l = z - N_{okna}...z + N_{okna}.$$

Согласно (3) при объединении M-каналов КМЦ на выход в z-й дискрете дальности выдается амплитуда максимального с каналов КМЦ сигнала, который при этом

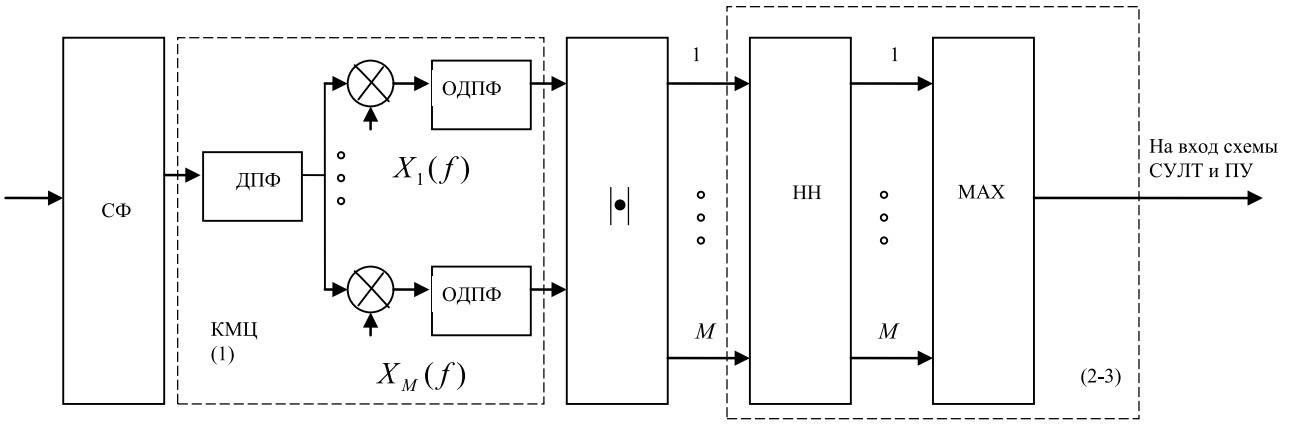


Рис. 3. Структурная схема КМЦ в составе обнаружителя пачки импульсов: СФ – одноканальный согласованный фильтр; ДПФ, ОДПФ – прямое и обратное преобразование Фурье; НН – некогерентный накопитель; MAX – устройство выбора максимума без защиты / с защитой от расширения сигнала согласно (2)–(3)

является и максимальным сигналом в скользящем по дальности окне $z - N_{okna}...z + N_{okna}$. Размер окна соответствует максимальному смещению корреляционного пика по дальности с учетом обоих знаков частоты Доплера за время длительности всей пачки из N-импульсов $N_{okna} = (N-1) \cdot [F_d^{MAX} \cdot T_p \cdot W / f_0]$.

Структурная схема части тракта обнаружителя сигнала с вынесенным за пределы фильтра сжатия КМЦ на примере НН приведена на рисунке 3. Задержки сигналов разных периодов, а также схема стабилизации вероятности ложной тревоги (СУЛТ) по шумам и пороговое устройство (ПУ) для простоты на рисунке не представлены.

Результаты моделирования

Далее приведен пример объединения каналов компенсатора миграции целей (1) на выходе одноканального СФ ЛЧМ сигнала. Для наглядности в каналах КМЦ вместо ранее рассмотренного ШПС использовался УПС в виде эквидистантной пачки из 8 импульсов, основной период повторения импульсов T_p – 4 мс. Параметры одиночного ЛЧМ импульса: длительность T – 20 мкс, ширина спектра W – 2,5 МГц, частота дискретизации fd – 3 МГц, максимальная частота Доплера Fd –160 кГц (радиальная скорость – 8000 м/с). Для такого сигнала общее число каналов вынесенного за пределы СФ КМЦ M – 3.

На рисунках 4 и 5 приведены огибающие сигналов после НН в каналах КМЦ и результат их объединения согласно (2) и (3) соответственно. Номера формул указаны в легенде графика на рисунке 5. На рисунке 4 для наглядности и оценки пропорций также приведена огибающая сигнала без смещения по частоте Доплера после НН (пунктирная линия).

На рисунке 6 приведен результат объединения каналов КМЦ (23 канала) для ШПС из примера на рисунке 1.

Из рисунков 5 и 6 видно, что алгоритм (3) позволяет избежать нежелательного расширения сигнала после объединения каналов КМЦ.

По результатам проведенных экспериментов для большей эффективности (3) N_{okna} лучше выбирать несколько больше, например равным $N_{okna} = 2 \cdot (N-1) \cdot [F_d^{MAX} \cdot T_p \cdot W / f_0]$,

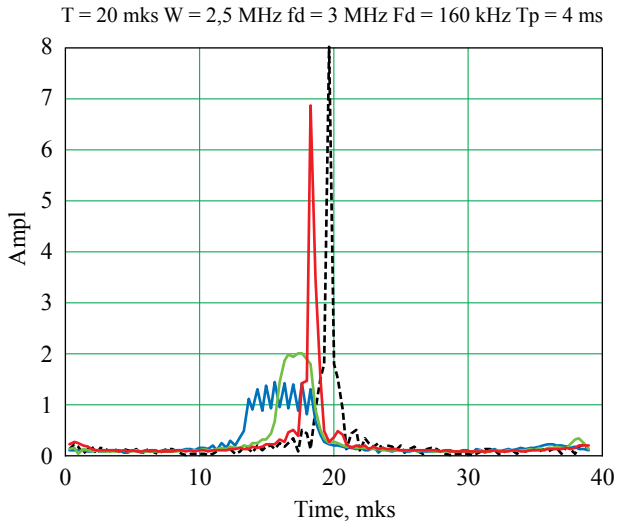


Рис. 4. Огибающие сигналов в каналах КМЦ

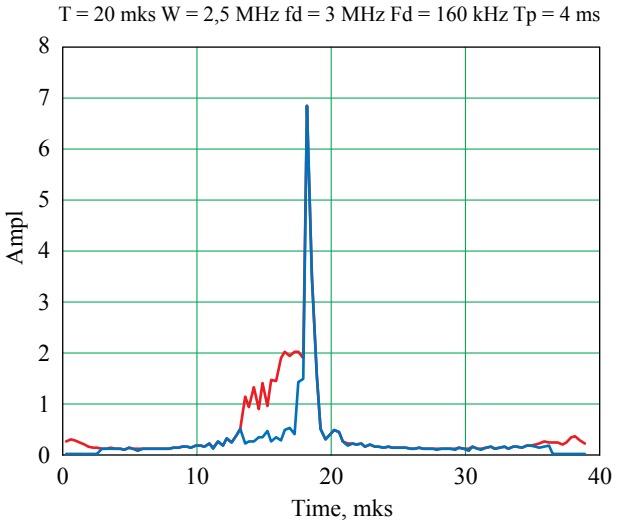


Рис. 5. Огибающая сигнала после объединения каналов КМЦ
– (2); – (3)

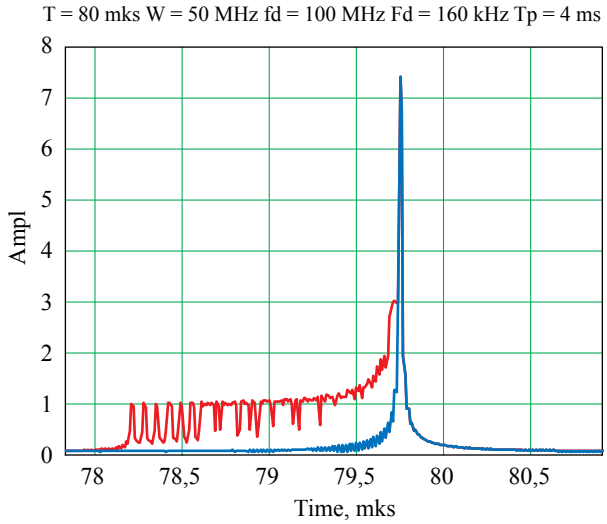


Рис. 6. Огибающая сигнала после объединения каналов КМЦ
– (2); – (3)

при этом бесконтрольное увеличение N_{okna} не допускается, поскольку от величины N_{okna} зависят характеристики разрешения сигналов близкорасположенных по дальности целей в случае многоцелевой радиолокационной обстановки.

Нужно отметить, что у способа (3) имеется ограничение, связанное с некорректностью объединения каналов КМЦ при наличии перекрывающихся сигналов близкорасположенных по дальности целей, движущихся с существенно разными радиальными скоростями (что приводит к потерям в обнаружении сигнала от одной из целей). В действительности наложение сигналов таких целей маловероятно. Способ (3) не теряет своей эффективности, если сигналы разнесены на $z12$ дискрет, $|z12| > N_{okna}$. Для сигналов с одинаковыми или близкими доплеровскими смещениями такой недостаток отсутствует.

Проблема наличия амплитудных потерь при объединении каналов многоканальной системы в случае наличия нескольких сигналов близкорасположенных по дальности целей возникает как в случае приведенного выше КМЦ, так и при простом объединении каналов многоканального по доплеровской частоте фильтра сжатия. Отличия заключаются в разном физическом смысле объединяемых каналов и в величине N_{okna}.

Иллюстрация влияния временного разнесения сигналов двух близкорасположенных по дальности целей на их разрешение приведена на рисунках 7 и 8. Параметры зондирующих сигналов идентичны примеру на рисунках 4 и 5. Рассмотрены варианты разного разнесения сигналов на z12 дискрет (10 и 15 дискрет соответственно), N_{okna} – 14 дискреты. Для простоты расчеты приведены для двух сигналов равной мощности.

Из рисунков 7 и 8 видно, что при разнесении сигналов на $|z12| < N_{okna}$ имеют место амплитудные потери для одной из целей, при $|z12| > N_{okna}$ данный эффект устраняется.

Для более полной проверки эффективности компенсации миграции сигналов целей по дальности и подтверждения ее работоспособности по сравнению с полным отсутствием такой компенсации для каскадного соединения СФ + КМЦ была оценена нормированная амплитуда сигнала и ширина главного лепестка (ГЛ, в дискретах, по уровню –15 дБ) после межпериодного НН и объединения каналов КМЦ в соответствии с (2) и (3). Применение низкого порогового уровня (–15 дБ) позволяет оценить вклад всех сигналов с каналов КМЦ в ширину ГЛ результирующего сигнала. Для порогового уровня –3дБ ширина сигнала после объединения каналов будет определяться в основном шириной ГЛ оптимального канала КМЦ вне зависимости от отсутствия/наличия схемы защиты от расширения. В качестве зондирующего сигнала применялась пачка из 8 широкополосных ЛЧМ

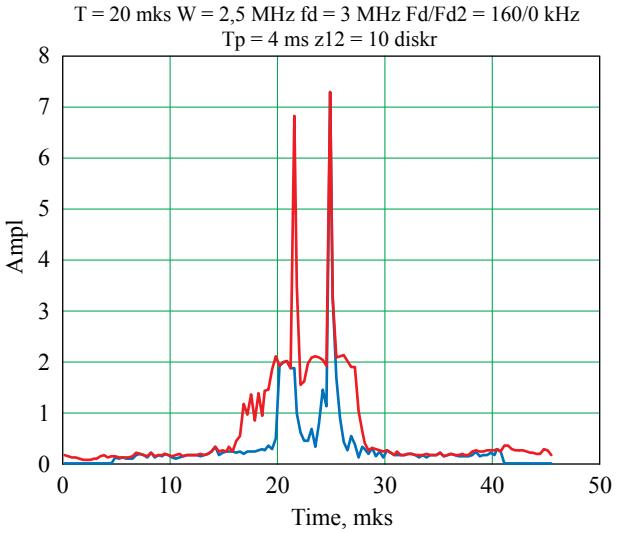


Рис. 7. Огибающая сигнала после объединения каналов КМЦ
– (2); – (3)

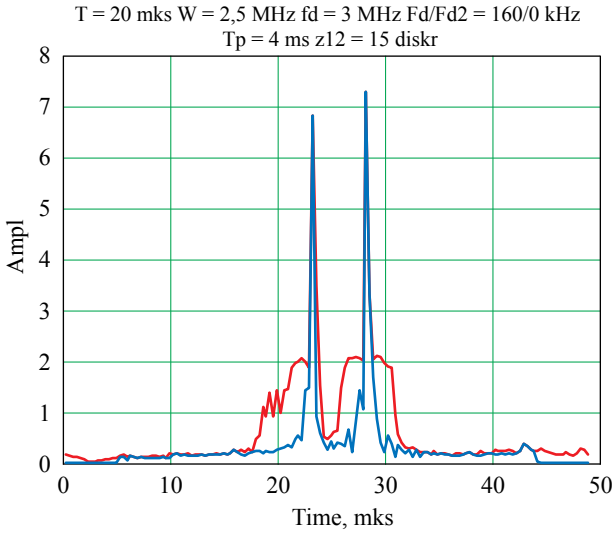


Рис. 8. Огибающая сигнала после объединения каналов КМЦ
– (2); – (3)

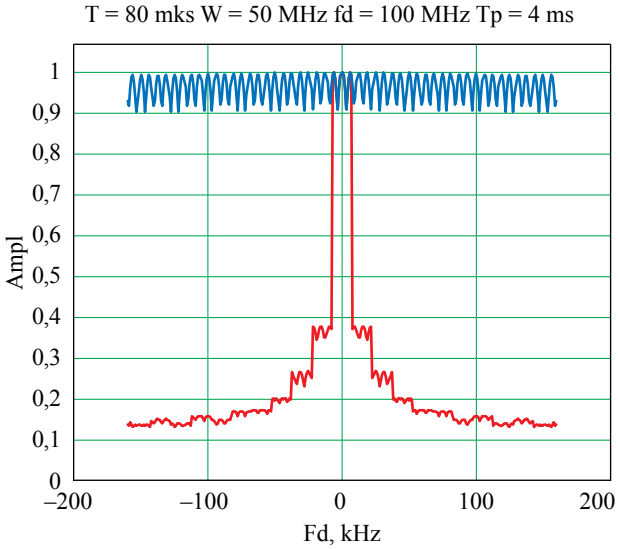


Рис. 9. Амплитуда сигнала
– SF1; – SF1+КМС+(2),(3)

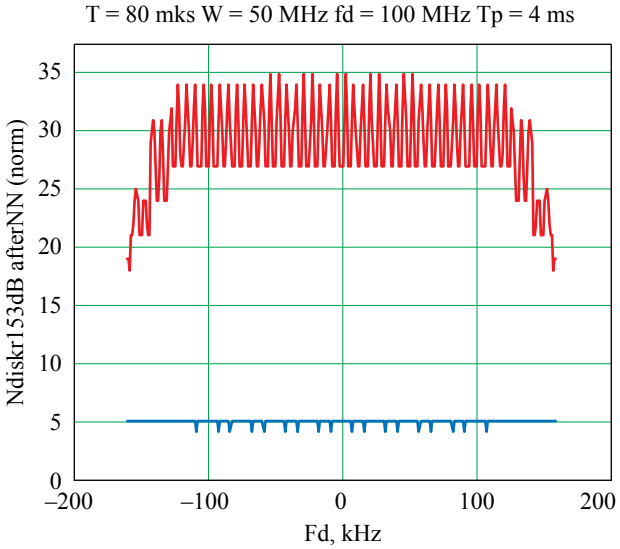


Рис. 10. Ширина главного лепестка (в дискретах)
– SF1+КМС+(2); – SF1+КМС+(3)

импульсов с ранее рассмотренными в примере для рисунка 6 параметрами. Полученные зависимости амплитуды и ширины ГЛ от доплеровского смещения входного сигнала в диапазоне –160…160 кГц (с шагом 1 кГц (50 м/с)) приведены на рисунках 9 и 10.

Из рисунков 9 и 10 видно, что для предложенного способа (3) во всем диапазоне частот Доплера при устранении (уменьшении) амплитудных потерь (за счет накопления выровненных во времени сигнальных отсчетов) обеспечивается практически постоянная ширина ГЛ сжатого сигнала, эффект его расширения после объединения каналов компенсатора устраняется, ширина ГЛ сигнала после объединения каналов со схемой защиты от расширения (3) определяется шириной сигнала в оптимальном канале КМЦ (4–5 дискрет для (3) против 17–35 дискрет для (2)). Максимальный выигрыш в уменьшении амплитудных потерь от применения КМЦ по сравнению с его отсутствием составил ~ 16 дБ.

Для дополнительной оценки и иллюстрации эффективности КМЦ в составе обнаружителя с НН пачки импульсов (без схемы СУЛТ) на рисунках 11 и 12 приведены зависимости пороговых отношений «сигнал/шум» (пороговых сигналов, в дБ) от радиальной скорости

цели в диапазоне 0–8000 м/с (с неравномерным шагом) при значении вероятности правильного обнаружения, равной 0,5. Для отрицательных значений радиальных скоростей целей приведенные графики имеют зеркальное отражение относительно нулевой скорости. В качестве зондирующего сигнала применялась пачка из 8 широкополосных ЛЧМ импульсов с прежними параметрами. Рассмотрены случаи нефлуктуирующего (модель Сверлинг 0) и флуктуирующего по Сверлингу сигнала (модели Сверлинг 1 – Сверлинг 4). В легенде графиков на рисунках 11 и 12 цифрами в скобках указаны номера моделей флуктуаций. Вероятность ложной тревоги по шумам – 10^{-6} и 10^{-4}, число повторений эксперимента для построения характеристик обнаружения, с которых потом считывались пороговые отношения «сигнал/шум», – 10^3. Для сравнительного анализа приведены результаты не только для НН 8 импульсов при отсутствии (NN8) и наличии КМЦ (NN8+KMC), но и для одноимпульсного зондирования (NN1).

Из рисунков 11 и 12 видно, что применение предварительной КМЦ для НН пачки импульсов позволяет обеспечить практически постоянное значение порогового отношения «сигнал/шум» в широком диапазоне радиальных скоростей обнаруживаемых целей. Применение НН при отсутствии КМЦ эффективно только в относительно узком диапазоне радиальных скоростей целей (до 300–400 м/с).

Наилучшие пороговые сигналы для одноимпульсного зондирования и НН с КМЦ соответствуют случаю нефлуктуирующего сигнала, далее в порядке увеличения потерь ~ 0,5–1,3 дБ следуют модели сигналов, флуктуирующих по Сверлингу 4 – Сверлингу 1.

Для НН без предварительной КМЦ порядок эффективности обнаружителей флуктуирующих сигналов целей, движущихся с радиальными скоростями менее 300–400 м/с, совпадает с результатами для одного импульса и НН с КМЦ. Для целей, движущихся с большими радиальными скоростями, ранг эффективности моделей флуктуаций сигналов имеет обратный порядок, при этом существенное ухудшение эффективности НН без КМЦ по-прежнему сохраняется (возрастающий с ростом радиальной скорости характер зависимости пороговых сигналов). Выигрыш в величине порогового сигнала за счет накопления, полученный на модели, для НН без КМЦ при нулевой частоте Доплера относительно

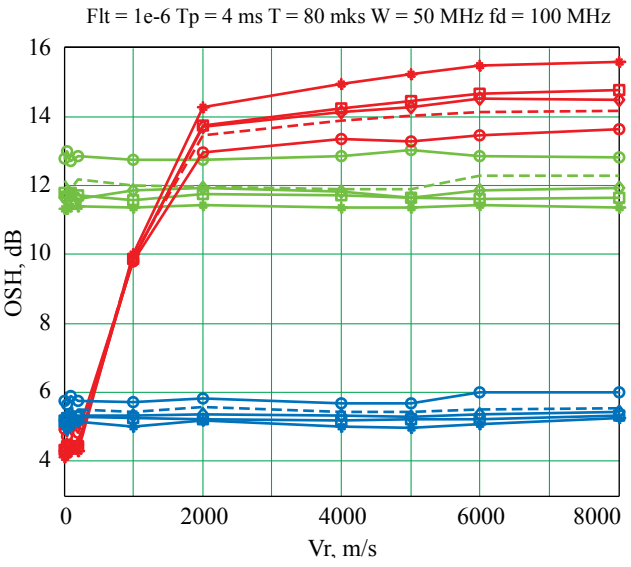


Рис. 11. Пороговые отношения «сигнал/шум»
– NN1(0); – NN1(1); – NN1(2);
– NN1(3); – NN1(4); – NN8(0);
– NN8(1); – NN8(2); – NN8(3);
– NN8(4); – NN8+KMC(0);
– NN8+KMC(1); – NN8+KMC(2);
– NN8+KMC(3); – NN8+KMC(4)

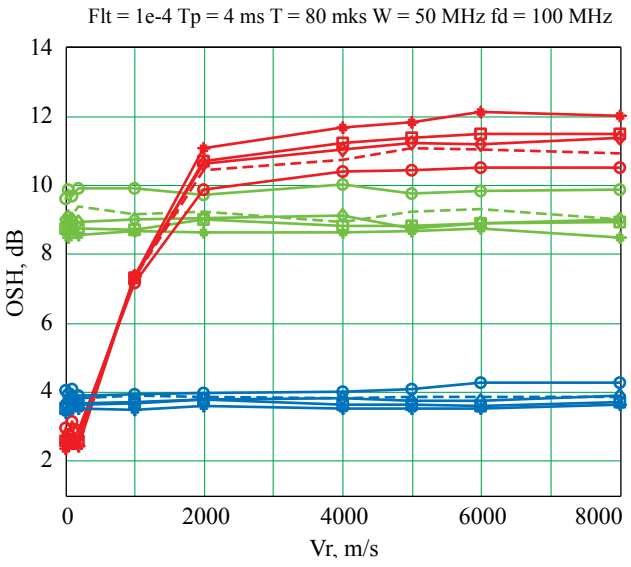


Рис. 12. Пороговые отношения «сигнал/шум»
– NN1(0); – NN1(1); – NN1(2);
– NN1(3); – NN1(4); – NN8(0);
– NN8(1); – NN8(2); – NN8(3);
– NN8(4); – NN8+KMC(0);
– NN8+KMC(1); – NN8+KMC(2);
– NN8+KMC(3); – NN8+KMC(4)

одноимпульсного зондирования отличается от теоретического значения ($\sim 20 \cdot \log_{10}(\sqrt{N})$).

В целом абсолютные значения пороговых сигналов (при заданном пороговом уровне) для конкретного построения обнаружителя сигнала зависят от вероятности ложной тревоги по шумам, модели флуктуаций сигналов и их параметров. Ранг эффективности алгоритмов обнаружения и характер графиков с ростом радиальной скорости цели при изменении параметров имитационной модели существенно не изменится.

Важно отметить, что при малых и некоторых средних значениях радиальных скоростей целей (на рисунках 11 и 12 – до 300–400 м/с) НН с КМЦ проигрывает НН без КМЦ в величине пороговых сигналов. Величина этого проигрыша обусловлена потерями на объединение каналов КМЦ (23 канала) и в рассмотренном примере ШПС составляет ~ 1 дБ (против значительных потерь при обнаружении целей, движущихся с большими радиальными скоростями, в случае НН без КМЦ), что является приемлемой «платой» за возможность обнаружения целей в широком диапазоне их радиальных скоростей.

Выводы

Для практически интересного случая неизвестной радиальной скорости движения цели на основе результатов имитационного моделирования оценена эффективность и рассмотрены особенности объединения каналов компенсатора миграции сигналов целей (построение которого предполагает применении пары преобразований Фурье или регистров сдвига) в периодах пачки импульсов, вынесенного за пределы одноканального по доплеровской частоте согласованного фильтра, традиционно применяемого для сжатия ЛЧМ сигналов, обладающих слабой чувствительностью к доплеровскому смещению частоты. Обычно несущественными потерями в обнаружении пренебрегают, многоканальное построение фильтра сжатия ЛЧМ сигналов для дополнительного уменьшения потерь ввиду увеличения аппаратурных затрат не используется. Для сигналов с высокой чувствительностью к смещению по частоте Доплера (например, с нелинейной частотной модуляцией (НЧМ) или с псевдошумовой модуляцией (ПШМ) фазы) для одновременного устранения значительных амплитудных потерь и компенсации миграции требуется применение либо МСФ, в каждый канал которого ставится КМЦ, либо МСФ со встроенным КМЦ. Первое построение МСФ с КМЦ является аппаратурно затратным, поэтому для таких сигналов можно рекомендовать МСФ со встроенным КМЦ, детальное рассмотрение эффективности которого является темой отдельной статьи.

Основные выводы проведенного исследования заключаются в следующем.

1. Во избежание расширения сигнала после объединения каналов КМЦ последние вместо применения схемы выбора максимума (2) следует объединять согласно способу (3). Для рассмотренного примера ШПС и порогового уровня –15 дБ выигрыш в ширине ГЛ результирующего сигнала после объединения каналов КМЦ может достигать 4–7 раз. Максимальный выигрыш в уменьшении амплитудных потерь от применения КМЦ по сравнению с его отсутствием составил ~ 16 дБ.

2. Для эффективного разрешения сигналов близкорасположенных по дальности целей, движущихся с существенно разными радиальными скоростями, необходимо, чтобы последние были разнесены на $z12$ дискрет, $|z12| > N_{okna}$.

Список литературы

1. Маркович И. И., Завтур Е. Е. Устройство цифровой обработки сигналов в импульсно-доплеровской РЛС с компенсацией миграции целей по дальности. Патент РФ 2673679, опубл. 29.11.2018. Бюл. № 34.

2. Николаев А. П., Собкина Н. Ю., Кривоножко И. С. Компенсация перемещения цели при длительном накоплении радиолокационных сигналов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2018. № 3. С. 12–19.

3. Порсев В. И., Николаев А. П., Кривоножко И. С. Многоканальное накопление радиолокационных сигналов, отраженных от высокоскоростных целей, движущихся с ускорением // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2018. № 1. С. 23–33.

Об авторе

Елагина Ксения Александровна – кандидат технических наук, научный сотрудник акционерного общества «НИИ измерительных приборов — Новосибирский завод имени Коминтерна», Новосибирск, Российская Федерация
Область научных интересов: обнаружение сигналов в радиолокационных системах, цифровая обработка сигналов, имитационное моделирование.

Effectiveness of target signal migration compensation at compression filter output

Elagina K. A.

JSC "Scientific and Research Institute of Measurement Instrumentation – Novosibirsk Plant named after Komintern" (JSC "NPO NIIIP-NZiK"), Novosibisk, Russian Federation

The paper describes a case study with the target moving at unknown radial velocity. Exemplified by the frequency modulation signal, the study presents the analysis of specific features of channel multiplexing for the target range migration compensator at the compression filter output within pulse burst periods. Channel multiplexing allows to reduces losses in case of long-term signal integration. The solution effectiveness is estimated and a method is proposed for compensator channel multiplexing ensuring protection against unwanted signal expansion.

Keywords: target migration, migration compensation, linear frequency modulation, channel multiplexing, signal expansion

Information about the author

Elagina Kseniya Aleksandrovna – Candidate of Engineering Sciences, Research Scientist, JSC "Scientific and Research Institute of Measurement Instrumentation – Novosibirsk Plant named after Komintern" (JSC "NPO NIIIP-NZiK"), Novosibisk, Russian Federation.
Science research interests: signal detection in radar systems, digital signal processing, simulation modelling.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-69-78
УДК 621.391.96

Компенсация миграции сигналов целей в многоканальном согласованном фильтре

К. А. Елагина

Акционерное общество «НИИ измерительных приборов — Новосибирский завод имени Коминтерна», Новосибирск, Российская Федерация

Предложен способ компенсации миграции сигналов целей по дальности в разных периодах пачки импульсов при осуществлении внутрипериодной согласованной фильтрации, позволяющий уменьшить потери при длительном накоплении сигналов, особенно актуальный для сигналов с высокой чувствительностью к смещению по частоте Доплера, для которых предполагается многоканальное по данному параметру построение фильтра сжатия. По результатам имитационного моделирования на примере сигнала с нелинейной частотной модуляцией проведен анализ эффективности компенсации миграции, даны рекомендации по объединению каналов фильтра сжатия со встроенным компенсатором миграции.

Ключевые слова: миграция целей, многоканальный согласованный фильтр, компенсатор миграции, нелинейная частотная модуляция, объединение каналов, расширение сигнала

Для цитирования: Елагина К. А. Компенсация миграции сигналов целей в многоканальном согласованном фильтре // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 69–78. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-69-78

For citation: Elagina K. A. Compensation of target signal migration in the multichannel matched filter // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 3. P. 69–78. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-69-78

Поступила 11.08.2021 *Отрецензирована* 05.09.2021 *Одобрена* 25.09.2021 *Опубликована* 20.10.2021

Введение

Для целей, движущихся с большими радиальными скоростями, отраженный сигнал в периодах пачки импульсов наблюдается в разных каналах дальности [1, 2]. Причем такой эффект имеет место для сигналов с внутриимпульсной модуляцией. Для сигналов без внутриимпульсной модуляции компенсация миграции целей (КМЦ), как правило, не требуется [3]. Для уменьшения потерь при накоплении пачки импульсов, отраженной от высокоскоростной цели, необходимо компенсировать перемещение цели, осуществив совмещение во времени сигнальных отсчетов [1–3].

В [2–3] описаны алгоритмы компенсации смещения сигналов, проводится оценка эффективности алгоритмов для случая известной скорости движения.

При этом в настоящее время не решена актуальная задача синтеза компенсаторов миграции, позволяющих компенсировать временной сдвиг при одновременном осуществлении внутриимпульсной согласованной фильтрации для случая неизвестной скорости движения цели.

Цель работы заключается в разработке алгоритма компенсации миграции сигналов целей, движущихся с неизвестной радиальной скоростью, при одновременном осуществлении согласованной фильтрации и в проведении анализа его эффективности.

Основная часть

В пачке импульсов, отраженных от движущихся целей, изменяется не только несущая частота, но и период повторения импульсов, что эквивалентно изменению задержки эхосигналов цели относительно зондирующих импульсов

© Елагина К. А., 2021

[2]. В результате в зависимости от радиальной скорости движения за время длительности периода цель может переместиться в соседние элементы разрешения по дальности. Такое перемещение цели в литературе называют «миграцией» цели [1–3].

Для дальнейшего корректного межпериодного накопления и устранения потерь в пороговом сигнале, возникающих за счет накопления не выровненных во времени сигналов, необходимо вводить корректировку миграции целей по дальности.

Компенсация миграции фактически заключается в совмещении сигнальных отсчетов одинаковых дискрет дальности разных периодов, в результате потери при накоплении значительно уменьшаются или полностью устраняются. Компенсация миграции осуществляется автоматически для целей с любыми радиальными скоростями, при этом основной выигрыш при такой обработке будет наблюдаться именно для высокоскоростных целей.

Рассмотрим общий случай пачки с произвольными длительностями периодов повторения импульсов на наглядном примере для сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Фаза ЛЧМ сигнала, отраженного от движущейся цели, в i-м периоде пачки на входе фильтра сжатия имеет вид:

$$\varphi_i(t) = \frac{\pi \cdot W}{T} \cdot \left(t + t_{зi}\right)^2 \pm 2 \cdot \pi \cdot F_d \cdot \left(t + t_{зi}\right),$$

$$i = 1...N,\ 0 \le t \le T,$$

где T – длительность сигнала, W – ширина спектра, F_d – частота Доплера, $t_{зi}$ – задержка сигнала в i-м периоде пачки (начиная со 2-го периода, в 1-м периоде задержка отсутствует).

Аналогичная добавка $t_{зi}$ к переменной времени t фазы сигнала за счет движения цели имеет место и для других законов внутриимпульсной модуляции сигнала. В общем случае смещение сигнала по дальности эквивалентно введению задержки $t_{зi}$ во все переменные времени, входящие в фазу принятого эхо-сигнала, отраженного от движущейся цели.

Компенсацию миграции целей по дальности (многоканальную по задержкам) можно осуществить как во временной, так и в частотной областях [1–2], а также после и во время внутрипериодной согласованной фильтрации. В первом случае компенсация миграции может быть реализована на выходе как одноканального, так и многоканального по доплеровской частоте согласованного фильтра (МСФ). Во втором случае согласованная фильтрация с одновременной компенсацией миграции сама по себе предполагает многоканальное построение фильтра с числом каналов, позволяющих компенсировать как амплитудные потери в провалах амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) МСФ, так и смещение сигналов по дальности.

В общем случае число каналов для компенсации миграции в МСФ и на выходе МСФ различно. При применении МСФ для компенсации миграции целей более предпочтительно осуществлять коррекцию миграции одновременно с согласованной фильтрацией, поскольку в этом случае требуемое число каналов меньше, чем при осуществлении компенсации миграции после МСФ, а качество компенсации близкое. В последнем случае многоканальный КМЦ ставится в каждый доплеровский канал фильтра.

Разработка алгоритма компенсации на базе МСФ на примере ЛЧМ сигнала менее актуальна и применима на практике ввиду слабой чувствительности такого зондирующего сигнала к смещению по частоте Доплера. Поэтому далее основное внимание будет уделено именно сигналам, чувствительным к смещению по частоте Доплера, внутрипериодная обработка которых для уменьшения потерь предполагает многоканальное по данному параметру построение (например, сигналы с нелинейной частотной модуляцией (НЧМ), сигналы с псевдошумовой модуляцией фазы). Для сигнала с ЛЧМ, обладающего слабой чувствительностью к доплеровскому смещению, для уменьшения аппаратурных затрат можно рекомендовать каскадное соединение одноканального фильтра сжатия и многоканального компенсатора миграции.

Далее в расчетах в качестве зондирующего сигнала использовался чувствительный к доплеровскому смещению сигнал с НЧМ [4, 5], при оптимизации коэффициентов нелинейности ЧМ которого обеспечивается

низкий и практически постоянный уровень боковых лепестков для разных баз сигналов. Для большей наглядности рисунков и простоты считалось, что сигналы в разных периодах пачки импульсов были предварительно совмещены во времени на априорно известные задержки, пропорциональные длительности периода повторения импульсов. Также за счет движения цели сигналы разных периодов имеют дополнительные априорно неизвестные смещения, которые и требуется скомпенсировать в КМЦ.

На рисунке 1 для иллюстрации миграции сигналов по дальности приведены огибающие сигналов на выходе одноканального фильтра сжатия. В качестве примера зондирующего сигнала рассмотрена пачка из 8 широкополосных НЧМ импульсов (длительность T – 80 мкс, ширина спектра W – 50 МГц, частота дискретизации fd – 100 МГц), длительность периода повторения импульсов T_p – 4 мс, частота Доплера соответствовала предельному случаю для высокоскоростных целей и равнялась 160 кГц (радиальная скорость – 8000 м/с, несущая частота РЛС – 3 ГГц). Также показана огибающая сигнала в первом периоде пачки на выходе фильтра при отсутствии смещения по частоте Доплера.

В общем случае задержка сигнала в i-м периоде пачки (начиная со 2-го периода)

$$t_{зi} = \sum_{k=2}^{i} \frac{R_{Tpk} \cdot 2}{c} = \sum_{k=2}^{i} \left(\left(\frac{F_d \cdot c}{2 \cdot f_0} \cdot T_{pk} \right) \cdot \frac{2}{c} \right) = \sum_{k=2}^{i} \left(\frac{F_d}{f_0} \cdot T_{pk} \right),$$

$R_{Tpk} = V_r \cdot T_{pk} = \frac{F_d \cdot c}{2 \cdot f_0} \cdot T_{pk}$ – смещение (миграция) цели за время k-го периода повторения импульсов T_{pk}, V_r – радиальная скорость цели, F_d – частота Доплера, c – скорость света, f_0 – несущая частота.

В системах цифровой обработки сигналов аналоговые сигналы переводятся в цифровую форму, подвергаясь дискретизации по времени и квантованию по уровню. При дальнейшем изложении материала учитывалась только дискретизация сигнала.

Приближенно задержку сигнала с учетом его дискретизации по времени можно вычислить через число дискрет дальности $\sum_{k=2}^{i} \left[\frac{R_{Tpk}}{\Delta R} \right]$, на которое переместится цель за время длительности пачки, отнесенное к длительности периода дискретизации:

$$t^*_{зi} = \sum_{k=2}^{i} \left[\frac{R_{Tpk}}{\Delta R} \right] \Big/ f_d = \sum_{k=2}^{i} \left[\left(\frac{F_d \cdot c}{2 \cdot f_0} \cdot T_{pk} \right) \cdot \frac{2 \cdot W}{c} \right] \Big/ f_d \approx$$

$$\approx \sum_{k=2}^{i} \left(\frac{F_d}{f_0} \cdot T_{pk} \right) \cdot \frac{W}{f_d},$$

$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot W}$ – размер элемента разрешения по дальности, квадратными скобками [•] обозначена операция округления, f_d – частота дискретизации.

Задержка $t_{зi}$ в общем случае не совпадает с $t^*_{зi}$. Равенство имеет место при $f_d = W$. Для рассмотренного примера данные задержки отличаются ~ в 2 раза. Однако, несмотря на данное противоречие для компенсации миграции, которая, как было отмечено выше, заключается в совмещении сигнальных отсчетов одинаковых дискрет дальности разных периодов, достаточно устранить только временные смещения $t^*_{зi}$, поскольку при дискретизации сигнала во времени непосредственный эффект обработки будет наблюдаться при устранении временных смещений, соответствующих целочисленным дискретам дальности.

Как видно из рисунка 1, в случае сигнала, чувствительного к доплеровскому смещению, для уменьшения амплитудных потерь

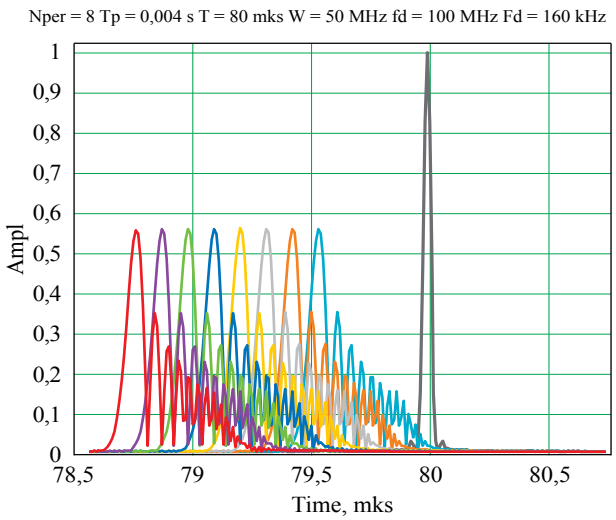


Рис. 1. Огибающие сигналов
– Fd = 0 Hz; – 1per; – 2per; – 3per; – 4per; – 5per; – 6per; – 7per; – 8per

и поддержания низкого уровня боковых лепестков (УБЛ) сжатого сигнала необходимо применение МСФ, кроме того, для дальнейшего корректного накопления и устранения потерь в пороговом сигнале при межпериодной обработке необходимо вводить корректировку миграции сигналов целей по дальности в разных периодах пачки импульсов.

Компенсация миграции целей при одновременном осуществлении внутрипериодной согласованной фильтрации

Поскольку скорость движения цели априорно неизвестна (соответственно, неизвестно и смещение по дальности), то необходимо многоканальное по данному параметру построение СФ (в общем случае может быть учтена и компенсация миграции по ускорению [3]). Далее рассмотрим случай обнаружения сигнала, движущегося без ускорения, компенсацию смещения будем осуществлять одновременно со сжатием сигналов во временной области путем умножения коэффициентов импульсной характеристики МСФ с равномерным расположением доплеровских каналов в широком диапазоне частот Доплера –160...160 кГц (или радиальных скоростей целей –8000...8000 м/с) в каждом периоде повторения на свой фазовый множитель, фактически зависящий от номера периода и частоты Доплера канала МСФ.

Для реализации встроенной в МСФ компенсации миграции частотные каналы равномерно располагают в заданном диапазоне частот – F_d^{MAX} … F_d^{MAX}:

$F_{d\text{MSF}} = -F_d^{MAX} : \frac{2 \cdot F_d^{MAX}}{M-1} : F_d^{MAX}$ – вектор частот Доплера в каналах МСФ, F_d^{MAX} – максимальное значение частоты Доплера, $F_{dj} = F_{d\text{MSF}\,j}$, $j = 1...M$.

Наиболее очевидным представляется выбор такого оптимального числа M каналов МСФ с КМЦ, для которого при допустимых амплитудных потерях (например, не более 0,5 дБ) в провалах результирующей АЧХ МСФ во всем диапазоне частот Доплера обеспечивается низкий и равномерный УБЛ сжатого (одиночного) сигнала по дальности и компенсируются все смещения импульсов пачки с шагом 1 дискрета дальности. При этом нужно отметить, что применение обнаружителя НЧМ сигнала с МСФ при наличии перекрывающихся сигналов близкорасположенных по дальности целей, движущихся с существенно разными радиальными скоростями (редкая, но вероятная ситуация), малоэффективно. При большем разнесении сигналов данный эффект устраняется.

В общем случае оптимальное число каналов МСФ со встроенным компенсатором миграции целей должно уточняться по результатам предварительного моделирования для заданных параметров зондирующего сигнала и диапазона радиальных скоростей обнаруживаемых целей.

Затем для каждого значения частоты Доплера в соответствующем канале F_{dj} рассчитывается задержка $t_{зij}^{Tp}$, которая далее подставляется в выражение фаз коэффициентов МСФ со встроенной компенсацией миграции целей (1)–(2). При отключении компенсации миграции второе слагаемое в переменной времени $(t + t_{зij}^{Tp})$ в (1)–(2) обнуляется.

Фазы коэффициентов импульсной характеристики МСФ в j-м канале, обеспечивающие и восстановление амплитуды, и компенсацию смещения корреляционных пиков по дальности, для ЛЧМ сигнала в i-м периоде пачки имеют вид:

$$\varphi_{ij}(t) = \frac{\pi \cdot W}{T} \cdot \left(t + t_{зij}^{Tp}\right)^2 \pm 2 \cdot \pi \cdot F_{dj} \cdot \left(t + t_{зij}^{Tp}\right), \quad i = 1...N, j = 1...M, \tag{1}$$

$\sum_{k=2}^{i} \left[\frac{\text{R}_{\text{Tpk}}}{\Delta\text{R}} \right]$ – число дискрет дальности, на которое переместится цель за время длительности пачки [2], этому числу дискрет с учетом дискретизации сигнала по времени соответствует задержка $t_{зij}^{Tp}$, которую необходимо компенсировать,

$$t_{зij}^{Tp} = \sum_{k=2}^{i} \left[\frac{\text{R}_{\text{Tpk}}}{\Delta\text{R}} \right] \Big/ f_d = \sum_{k=2}^{i} \left[\frac{\frac{F_{dj} \cdot c}{2 \cdot f_0} \cdot T_{pk}}{\Delta\text{R}} \right] \Big/ f_d = \sum_{k=2}^{i} \left[\frac{F_{dj} \cdot T_{pk} \cdot W}{f_0} \right] \Big/ f_d$$

– задержка сигнала в i-м периоде пачки (начиная со 2-го периода, в 1-м

периоде задержка отсутствует) j-го канала МСФ, F_{dj} – частота Доплера в j-м канале МСФ, M – число каналов МСФ со встроенным компенсатором миграции, $\Delta R = \frac{c}{2 \cdot W}$ – размер элемента разрешения по дальности, c – скорость света, f_d – частота дискретизации, квадратными скобками [•] обозначена операция округления.

Фазы коэффициентов импульсной характеристики МСФ в j-м канале для НЧМ сигнала [4, 5] в i-м периоде пачки импульсов имеют вид:

$$\varphi_{ij}(t) = \frac{W}{T \cdot k2} \cdot \left(\frac{\left(t + t_{зij}^{Tp}\right)^2 \cdot k \cdot 2 \cdot \pi - \left(t + t_{зij}^{Tp}\right) \cdot T \cdot k \cdot 2 \cdot \pi}{1 + 2 \cdot k1 \cdot tg\left(0{,}5 \cdot k2 \cdot \pi\right)} \right) + \\ + \frac{W}{T \cdot k2} \cdot \left(\frac{k1 \cdot T^2 \cdot \ln\left(1 + tg\left(0{,}5 \cdot k \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{\left(-2 \cdot \left(t + t_{зij}^{Tp}\right) + T\right)^2}{T} \right) \right)}{1 + 2 \cdot k1 \cdot tg\left(0{,}5 \cdot k2 \cdot \pi\right)} \right) \pm \\ \pm 2 \cdot \pi \cdot F_{dj} \cdot \left(t + t_{зij}^{Tp}\right), \quad (2)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты нелинейности ЧМ.

Аналогичные рассуждения о расчете коэффициентов МСФ со встроенной компенсацией миграции справедливы также для любых других законов внутриимпульсной модуляции сигналов. В общем случае смещения сигналов, отраженных от движущейся цели, корректируются путем добавления во все переменные времени, входящие в фазы коэффициентов импульсной характеристики МСФ в j-м канале i-го периода пачки, соответствующей канальной задержки $t_{зij}^{Tp}$.

Объединение каналов многоканального согласованного фильтра со встроенным компенсатором миграции целей

Далее объединение доплеровских каналов многоканального согласованного фильтра со встроенным компенсатором миграции целей рассмотрим на примере некогерентного накопления (НН) пачки из N-импульсов. При оценке эффективности алгоритмов компенсации миграции для практически интересного случая широкополосного сигнала (ШПС) и для простоты расчетов считалось, что обрабатывается эхо-сигнал, отраженный от одной блестящей точки цели. В этом случае аналитическая запись алгоритма объединения каналов после межпериодного накопления упрощается, поскольку НН отсчетов сигнала по дальности (в общем случае от неизвестного числа блестящих точек цели) опускается.

При объединении каналов многоканальной системы после межпериодной обработки традиционно применяется алгоритм на основе схемы выбора максимума:

$$y_z = \max_j \left\{ \sum_{i=1}^{N} \left| x_{ijz} \right| \right\}, \; i = 1 \ldots N, \; j = 1 \ldots M, \quad (3)$$

где $|x_{ijz}|$ – амплитуда сигнала i-го периода пачки на выходе j-го канала МСФ со встроенным компенсатором миграции в z-й дискрете дальности, M – результирующее число каналов МСФ со встроенным компенсатором миграции.

Вместо (3) по результатам расчетов автора для защиты от расширения сигнала после объединения каналов лучше применить алгоритм:

$$y_z = \sum_{i=1}^{N} \left| x_{iJz} \right|, \\ J = j, \; \max_j \left\{ \max_l \left\{ \sum_{i=1}^{N} \left| x_{ijl} \right| \right\} \right\} = \max_l \left\{ \sum_{i=1}^{N} \left| x_{ijl} \right| \right\}, \quad (4) \\ i = 1 \ldots N, \; k = 1 \ldots M, \; l = z - N_{okna} \ldots z + N_{okna}.$$

Согласно (4) при объединении каналов МСФ с КМЦ на выход в z-й дискрете дальности выдается амплитуда максимального с каналов МСФ сигнала (после межпериодной обработки), который при этом является и максимальным сигналом в скользящем по дальности окне $z - N_{okna} \ldots z + N_{okna}$.

В целом алгоритм (4) эффективен как для объединения каналов компенсатора миграции целей, встроенного в МСФ, так и компенсатора миграции на выходе фильтра сжатия. Отличия заключаются в физическом смысле каналов и их числе, а также в величине N_{okna}. В случае компенсатора миграции, встроенного в МСФ, размер окна соответствует максимальному смещению корреляционного пика по дальности с учетом обоих знаков частоты Доплера, число отсчетов N_{okna} должно

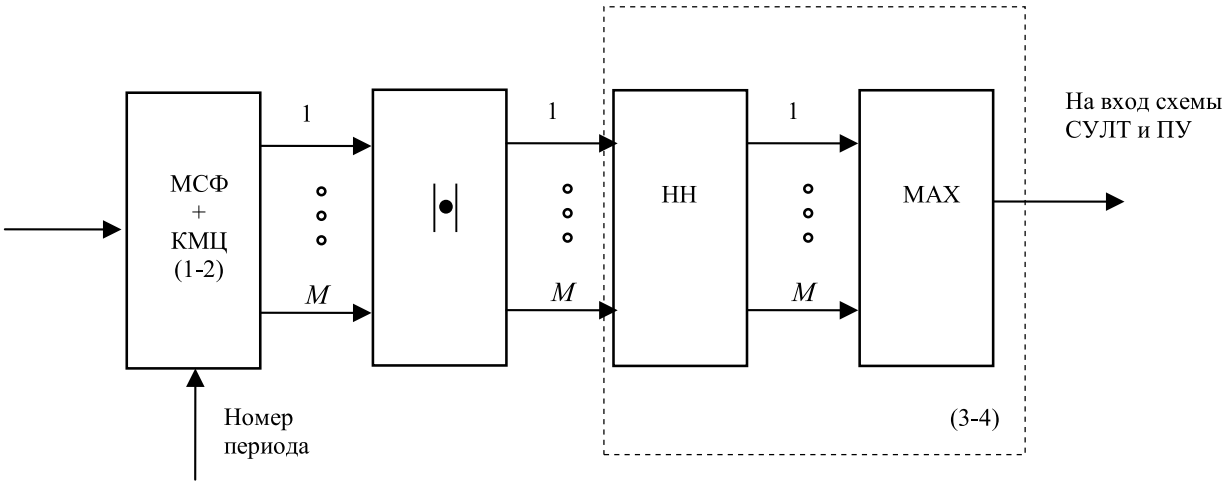


Рис. 2. Структурная схема КМЦ, встроенного в МСФ, в составе обнаружителя пачки импульсов: МСФ + КМЦ – многоканальный согласованный фильтр со встроенным КМЦ, НН – некогерентный накопитель, MAX – устройство выбора максимума без защиты / с защитой от расширения сигнала согласно (3)–(4).

перекрывать диапазон смещений корреляционных пиков по дальности во всех каналах МСФ.

По результатам проведенных расчетов смещение корреляционного пика (в дискретах дальности с учетом округления) для НЧМ сигнала [4, 5] с частотой Доплера F_d превышает соответствующую величину для ЛЧМ ([$f_d \cdot T \cdot F_d / W$], [6]) почти в 2 раза, поэтому далее для определенности максимальное смещение корреляционного пика по дальности N_{okna} примем равным 2 · [$f_d \cdot T \cdot F_d^{MAX} / W$]. Эксперименты на имитационной модели показали, что для большей эффективности (4) N_{okna} лучше выбирать несколько больше, при этом бесконтрольное увеличение N_{okna} не допускается, поскольку от величины N_{okna} зависят характеристики разрешения сигналов близкорасположенных по дальности целей.

Структурная схема части тракта обнаружителя сигнала со встроенным в МСФ КМЦ на примере НН приведена на рисунке 2. Задержки сигналов разных периодов для простоты опущены. Схема стабилизации вероятности ложной тревоги (СУЛТ) по шумам и пороговое устройство (ПУ) также не представлены на рисунке 2.

Результаты моделирования

Эффективность предложенных алгоритмов оценена на основе результатов имитационного моделирования. Далее приведен пример объединения каналов КМЦ, встроенного в МСФ НЧМ сигнала. Для наглядности использовался ШПС в виде эквидистантной пачки из 8 импульсов, основной период повторения импульсов T_p – 4 мс. Параметры одиночного НЧМ импульса: длительность T – 80 мкс, ширина спектра W – 50 МГц, частота дискретизации fd – 100 МГц, максимальная частота Доплера Fd – 160 кГц (радиальная скорость – 8000 м/с). Для данного сигнала число каналов МСФ, равномерно распределенных в диапазоне частот Доплера –160...160 кГц, позволяющее обеспечить потери не более 0,5 дБ в провалах результирующей АЧХ МСФ, может быть равным 33 и более. Далее в расчетах использовалось увеличенное число каналов, позволяющее обеспечить более равномерный и низкий УБЛ в заданном частотном диапазоне (M = 105).

На рисунке 3 приведены огибающие сигналов после НН и объединения каналов МСФ со встроенным КМЦ согласно (3) и (4) соответственно. Номера формул указаны в легенде графика.

Из рисунка 3 видно, что алгоритм (4) позволяет избежать нежелательного расширения сигнала после объединения доплеровских каналов МСФ с КМЦ.

При видимой эффективности у способа объединения каналов МСФ (4) (как с компенсатором, так и без него) имеется недостаток, заключающийся в возможных потерях при обнаружении слабого сигнала от одной

из нескольких близкорасположенных по дальности целей, движущихся с сильно различающимися радиальными скоростями. Данная ситуация имеет место для всех сигналов, обладающих сильной чувствительностью к доплеровскому смещению, что ограничивает применение НЧМ сигналов в широком диапазоне радиальных скоростей целей. При разнесении сигналов на $|z12| < N_{okna}$ имеют место амплитудные потери для одной из целей, при $|z12| > N_{okna}$ данный эффект устраняется.

Для сопоставительного анализа ниже приведены зависимости нормированных к максимальному значению амплитуд сигналов на выходе СФ и МСФ от частоты Доплера для случая одноимпульсного зондирования НЧМ сигналом (рис. 4), а также результаты для амплитуды после НН пачки из 8 НЧМ импульсов для СФ и МСФ при отсутствии и наличии встроенной компенсации миграции (рис. 5). Число каналов МСФ – 33, для МСФ со встроенной компенсацией – 105. Номера формул алгоритмов указаны в легендах графиков, в которых также отмечены результаты для СФ (SF) и МСФ (MSF) без КМЦ и с КМЦ (КМС).

Из рисунка 4 видно, что применение МСФ позволяет устранить амплитудные потери (не превышают 0,5 дБ), при этом уже при накоплении пачки импульсов одного МСФ недостаточно, необходимо введение компенсации миграции сигналов в периодах пачки импульсов (рис. 5, потери также не превышают 0,5 дБ). Максимальный выигрыш (для максимальной частоты Доплера) в уменьшении амплитудных потерь от применения КМЦ, встроенного в МСФ, по сравнению с его отсутствием составил ~ 14 дБ.

Для более полной проверки эффективности компенсации миграции и подтверждения ее работоспособности по сравнению с отсутствием такой компенсации для МСФ со встроенным КМЦ также была оценена ширина главного лепестка (ГЛ, в дискретах, по уровню –15 дБ) после межпериодного НН для пачки из 8 широкополосных ЛЧМ

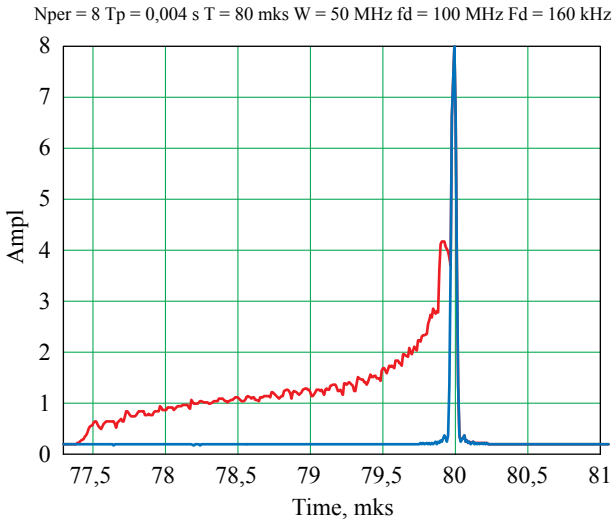


Рис. 3. Огибающая сигнала после объединения каналов МСФ с КМЦ
— – (3); — – (4)

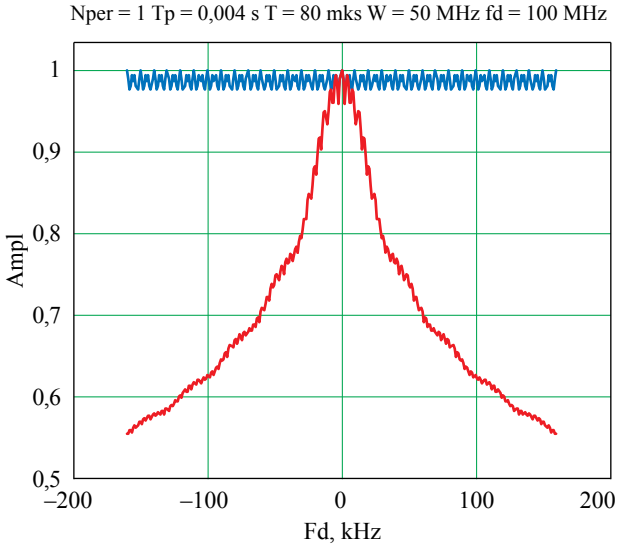


Рис. 4. Амплитуда сигнала (одноимпульсное зондирование)
— – SF; — – MSF

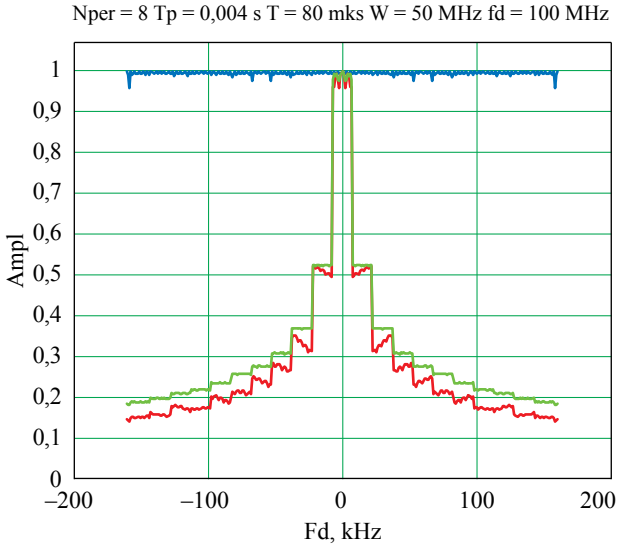


Рис. 5. Амплитуда сигнала (результаты для (3) и (4) совпадают)
— – SF; — – MSF; — – MSF+KMC+ (3),(4)

импульсов с ранее рассмотренными параметрами после объединения каналов МСФ с КМЦ в соответствии с (3) и (4). Результаты оценки ширины ГЛ сигнала после объединения каналов по уровню –3 дБ менее наглядны, поскольку ширина ГЛ результирующего сигнала по данному уровню практически полностью соответствует ширине ГЛ сигнала в оптимальном канале МСФ с КМЦ. Оценка ширины сигнала по существенно меньшему уровню (–15 дБ) позволяет более корректно оценить ширину сигнала, поскольку в этом случае при отсутствии защиты от расширения ширину результирующего сигнала будут определять практически все ГЛ сигналов со всех каналов МСФ с КМЦ. Полученные зависимости ширины ГЛ от доплеровского смещения входного сигнала в диапазоне –160...160 кГц (с шагом 1 кГц (50 м/с)) приведены на рисунке 6.

Из рисунков 5 и 6 видно, что для предложенного способа (4) во всем диапазоне частот Доплера при устранении (уменьшении) амплитудных потерь (за счет накопления выровненных во времени сигнальных отсчетов) обеспечивается практически постоянная ширина ГЛ сжатого сигнала, эффект его расширения после объединения каналов МСФ со встроенным компенсатором устраняется (5–6 дискрет для (4) против 53–107 дискрет для (3)). Фактически это означает, что ширина ГЛ сигнала после объединения каналов при применении (4) при любом пороговом уровне определяется только шириной сигнала в оптимальном канале МСФ с КМЦ.

На рисунке 7 приведена зависимость ошибки в определении времени прихода сигнала от частоты Доплера входного сигнала (как разность между номером дискреты дальности с максимальным сигналом после НН пачки НЧМ импульсов с учетом компенсации миграции в МСФ (105 каналов) и номером дискреты дальности после НН пачки НЧМ импульсов без смещения по Доплеру). Для сравнения приведена та же зависимость для одноканального СФ и МСФ без компенсации миграции, выходные сигналы которых после накопления без компенсации миграции существенно ослаблены и искажены.

Из рисунка 7 видно, что при введении компенсации миграции сигналов в периодах пачки смещение корреляционного пика после НН практически полностью устраняется. По результатам расчетов абсолютное значение ошибки в рассмотренном примере не превышает 1 дискрету дальности. Для числа каналов МСФ со встроенным компенсатором, равного 33, абсолютная ошибка не превышала 2 дискреты дальности. Для СФ и МСФ без компенсации миграции максимальное смещение корреляционного пика после НН составляет около 60 и 90 дискрет соответственно.

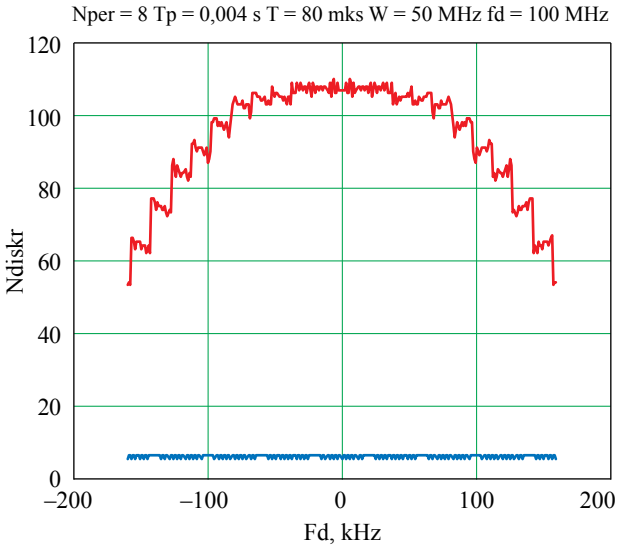


Рис. 6. Ширина главного лепестка (в дискретах)
— – MSF+KMC+(3); — – MSF+KMC+(4)

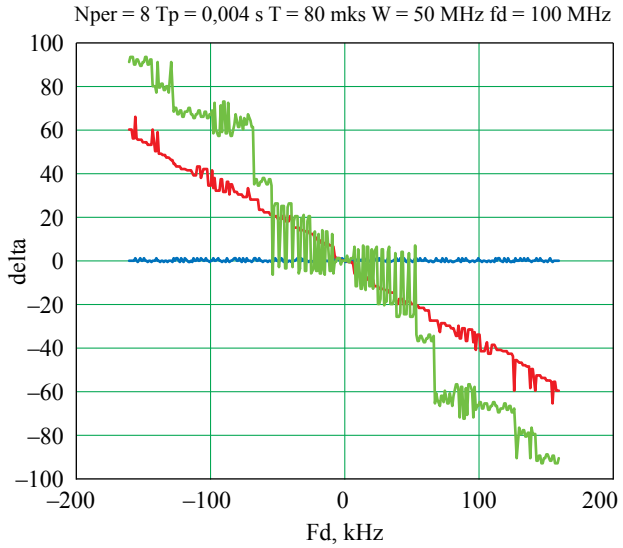


Рис. 7. Ошибка в определении времени прихода сигнала (в дискретах, результаты для (3) и (4) совпадают)
— – SF; — – MSF; — – MSF+KMC+ (3),(4)

Таким образом, на основе результатов имитационного моделирования при контроле параметров сигнала (уровень амплитуды, число отсчетов ГЛ, координата корреляционного пика) после межпериодной обработки (на примере НН) для практически интересного случая межпериодной обработки в широком диапазоне радиальных скоростей обнаруживаемых целей можно сделать вывод об эффективности компенсатора миграции в составе МСФ с защитой от расширения сигнала после объединения каналов (4).

Выводы

1. Предложено построение компенсатора миграции сигналов целей по дальности, движущихся с неизвестной радиальной скоростью, позволяющего одновременно с внутриимпульсным сжатием сигнала без дополнительного увеличения аппаратурных затрат компенсировать временные смещения сигналов (абсолютное значение ошибки в рассмотренном примере не превышает 1 дискрету дальности) и, соответственно, устранить потери в пороговом сигнале после межпериодной обработки (амплитудные потери после НН не превышают 0,5 дБ) в широком диапазоне радиальных скоростей обнаруживаемых целей. Необходимые изменения для встроенного в МСФ компенсатора миграции учитываются в коэффициентах фильтра сжатия каждого доплеровского канала в текущем периоде пачки в общем случае для любого закона внутриимпульсной модуляции. В целом способ наиболее актуален для сигналов с высокой чувствительностью к смещению по частоте Доплера.

Для рассмотренного примера ШПС с НЧМ максимальный выигрыш в уменьшении амплитудных потерь от применения КМЦ, встроенного в МСФ, по сравнению с его отсутствием составил ~ 14 дБ.

2. Для устранения дополнительного расширения сигнала после объединения доплеровских каналов фильтра сжатия для НЧМ сигнала, чувствительного к доплеровскому смещению, рекомендуется алгоритм (4). Для рассмотренного примера и порогового уровня –15 дБ выигрыш в ширине ГЛ результирующего сигнала после объединения каналов МСФ с КМЦ может достигать 10 и более раз.

Список литературы

1. Маркович И. И., Завтур Е. Е. Устройство цифровой обработки сигналов в импульсно-доплеровской РЛС с компенсацией миграции целей по дальности. Патент РФ 2673679, опубл.29.11.2018. Бюл. № 34.

2. Николаев А. П., Собкина Н. Ю., Кривоножко И. С. Компенсация перемещения цели при длительном накоплении радиолокационных сигналов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2018. № 3. С. 12–19.

3. Порсев В. И., Николаев А. П., Кривоножко И. С. Многоканальное накопление радиолокационных сигналов, отраженных от высокоскоростных целей, движущихся с ускорением // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2018. № 1. С. 23–33.

4. Аксельрод Г. З., Елагина К. А. Применение сигнала с нелинейной частотной модуляцией для уменьшения потерь обнаружения // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2015. № 2. С. 40–43.

5. Елагина К. А. Способы обнаружения сигналов с линейной и нелинейной частотной модуляцией со стабилизацией вероятности ложной тревоги // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 2. С. 20–25.

6. Кук Ч. Радиолокационные сигналы. Пер. с англ. под ред. В. С. Кельзона. М.: Советское радио, 1971.

Об авторе

Елагина Ксения Александровна – кандидат технических наук, научный сотрудник акционерного общества «НПО НИИИП-НЗиК».

Область научных интересов: обнаружение сигналов в радиолокационных системах, цифровая обработка сигналов, имитационное моделирование.

Compensation of target signal migration in the multichannel matched filter

Elagina K. A.

JSC "Scientific and Research Institute of Measurement Instrumentation – Novosibirsk Plant named after Komintern" (JSC "NPO NIIIP-NZiK"), Novosibirsk, Russian Federation

The study proposes a method of target range signal compensation within different pulse burst periods during in-period matched filtering. The proposed method allows to reduce losses in case of long-term signal integration. This is especially important for signals highly sensitive to Doppler frequency shift. In terms of this parameter, a multichannel configuration of the compression filter is a probable solution for such signals. Based on the example of a signal with non-linear frequency modulation and the results of simulation modelling, we analyse the effectiveness of migration compensation and give recommendations on channel multiplexing for the compression filter with an integrated migration compensator.

Keywords: target migration, multichannel matched filter, migration compensator, non-linear frequency modulation, channel multiplexing, signal expansion

Information about the author

Elagina Kseniya Aleksandrovna – Candidate of Engineering Sciences, Research Scientist, JSC "Scientific and Research Institute of Measurement Instrumentation – Novosibirsk Plant named after Komintern" (JSC "NPO NIIIP-NZiK"), Novosibirsk, Russian Federation.

Science research interests: signal detection in radar systems, digital signal processing, simulation modelling.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-79-89
УДК 621.396.96

Моделирование поля рассеяния противотанковой управляемой ракеты и оценка возможностей по ее радиолокационному обнаружению

К. Ю. Заводских[1], И. Ф. Купряшкин[2]

[1] *Акционерное общество «НПО Корпорация «РИФ», Воронеж, Российская Федерация*

[2] *Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация*

Приведены результаты расчета зависимости изменения уровня эхосигнала противотанковой ракеты FGM-148 Javelin на входе приемника РЛС комплекса активной защиты с учетом профиля полета ракеты при атаке цели. При этом использованы результаты моделирования поля рассеяния ракеты в САПР Altair FEKO на частотах 1, 3, 6 и 10 ГГц. Из полученных оценок следует, что РЛС с непрерывным частотно-модулированным сигналом со средней мощностью излучения до 1 Вт способна ее обнаружить на дальности не менее 1000 м. Показано, что сочетание низкой мощности с непрерывным характером широкополосного сигнала (100–150 МГц) и когерентным накоплением до единиц секунд обеспечивает высокую скрытность работы РЛС комплекса активной защиты (оценка дальности обнаружения ее излучения средством радиотехнической разведки не превышает 10 км).

Ключевые слова: противотанковая управляемая ракета, радиолокационная станция, комплекс активной защиты, длина волны, эффективная поверхность рассеяния

Для цитирования: Заводских К. Ю., Купряшкин И. Ф. Моделирование поля рассеяния противотанковой управляемой ракеты и оценка возможностей по ее радиолокационному обнаружению // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 79–89. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-79-89

For citation: Zavodskikh K. Yu., Kupryashkin I. F. Modelling of the anti-tank guided missile scattering field and radar performance evaluation in terms of missile detection // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 3. P. 79–89. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-79-89

Поступила 08.08.2021 *Отрецензирована* 05.09.2021 *Одобрена* 21.09.2021 *Опубликована* 20.10.2021

Противотанковые управляемые ракеты (ПТУР) являются одними из наиболее эффективных средств поражения авто- и бронетехники, и только их своевременное обнаружение способно обеспечить принятие эффективных мер защиты. Эта задача решается с помощью радиолокационных станций (РЛС), в том числе входящих в состав современных многоцелевых комплексов активной защиты (КАЗ) объектов [1].

Основным фактором, ограничивающим непрерывную работу РЛС КАЗ на излучение, является демаскирование защищаемых объектов [1]. В то же время известно, что широкополосные РЛС с непрерывными частотно-модулированными сигналами характеризуются высокой скрытностью функционирования, достигаемой за счет низкой пиковой мощности и возможности когерентного накопления эхосигналов даже скоростных целей на временных интервалах до единиц секунд [2–4]. Помимо снижения спектральной плотности мощности сигнала расширение полосы его частот до Δf_c = 100–150 МГц обеспечит разрешение по дальности, сопоставимое с длиной ракеты, что позволит максимально увеличить отношение мощности эхосигнала к мощности эхосигнала разрешаемого элемента подстилающей поверхности и тем самым улучшить качество обнаружения.

© Заводских К. Ю., Купряшкин И. Ф., 2021

Известно, что увеличение длины волны позволяет увеличить дальность действия РЛС. И в связи с этим, хотя в РЛС КАЗ часто используется миллиметровый диапазон длин волн, значительный интерес представляет оценка их возможностей по обнаружению ПТУР в более длинноволновых – дециметровом и сантиметровом – диапазонах.

Однако оценка возможности реализации преимуществ таких РЛС требует детального анализа радиолокационных характеристик ПТУР с учетом условий ее радиолокационного наблюдения на всех этапах полета.

В связи с этим целью работы является оценка характера изменения уровня эхосигнала ПТУР с учетом профиля ее полета к цели в интересах обоснования характеристик РЛС КАЗ с непрерывным излучением дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн.

Условием обнаружения ПТУР в РЛС является превышение энергии ее эхосигнала, когерентно накапливаемого в течение интервала $T_{\text{Н}}$, над спектральной плотностью мощности собственных шумов приемного устройства N_0 в количество раз $q_{\text{тр}}^2$, определяемое требованиями к качеству обнаружения [5].

$$\frac{P_{\text{с}}T_{\text{н}}}{N_0} \Rightarrow \frac{\mu P_{\text{ср}}T_{\text{н}}G_{\text{л}}^2\lambda^2\sigma_{\text{об}}}{(4\pi)^3R^4N_0} \geq$$
$$\geq q_{\text{тр}}^2 \Rightarrow E_{\text{л}} \geq q_{\text{тр}}^2 \Big/ \left(\frac{\sigma_{\text{об}}}{R^4}\right) C_{\text{л}}, \qquad (1)$$

где $P_{\text{с}} = \dfrac{\mu P_{\text{ср}}G_{\text{л}}^2\lambda^2\sigma_{\text{об}}}{(4\pi)^3R^4}$ – средняя мощность эхосигнала объекта с ЭПР $\sigma_{\text{об}}$ на входе приемного устройства РЛС; $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность передающего устройства РЛС; $G_{\text{л}}$ – коэффициент усиления приемопередающей антенны РЛС; λ – длина волны зондирующего излучения РЛС; μ – потери при приеме и обработке сигнала; R – расстояние между РЛС и ПТУР; $C_{\text{л}} = \dfrac{\mu G_{\text{л}}^2\lambda^2}{(4\pi)^3N_0}$; $E_{\text{л}} = P_{\text{ср}}\,T_{\text{н}}$ – полная энергия зондирующего сигнала со средней мощностью $P_{\text{ср}}$, излучаемого в течение интервала наблюдения $T_{\text{н}}$.

Выражение (1) позволяет определить требуемую энергию сигнала и перейти к обоснованию рационального сочетания средней излучаемой мощности и времени накопления эхосигнала ПТУР, при котором обеспечивается ее обнаружение на расстоянии R с заданным качеством.

Одной из наиболее совершенных на сегодняшний день является ПТУР FGM-148 Javelin (рис. 1), и именно она представляет наибольший интерес с точки зрения радиолокационного обнаружения в интересах защиты своих объектов авто- и бронетехники. Комплекс FGM-148 Javelin, предназначенный для замены комплекса M47 Dragon, разработан предприятием Javelin Joint Venture (США) и принят на вооружение в 1996 г.

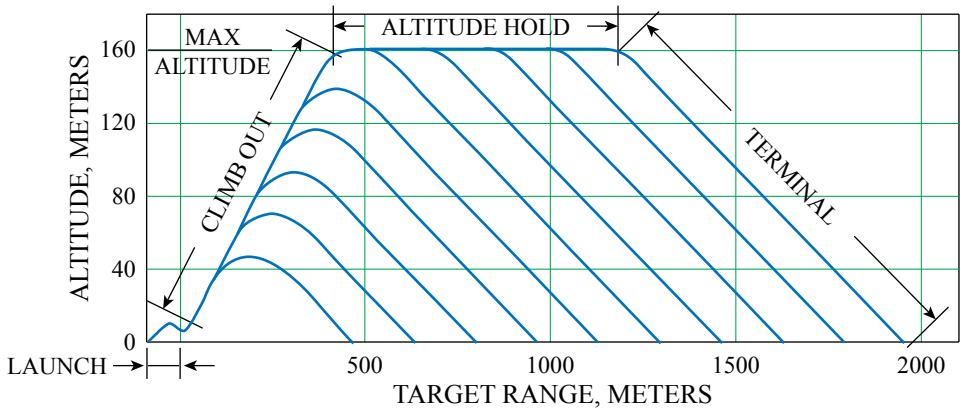
ПТУР Javelin имеет два режима атаки цели: режим пикирования (угол пикирования 45°) и прямой атаки в горизонтальной плоскости [6]. Первый режим применяется при действии против танков и позволяет поразить цель сверху в наименее защищенную область, второй – против защищенных объектов

Рис. 1. Внешний вид ракеты комплекса FGM-148 Javelin

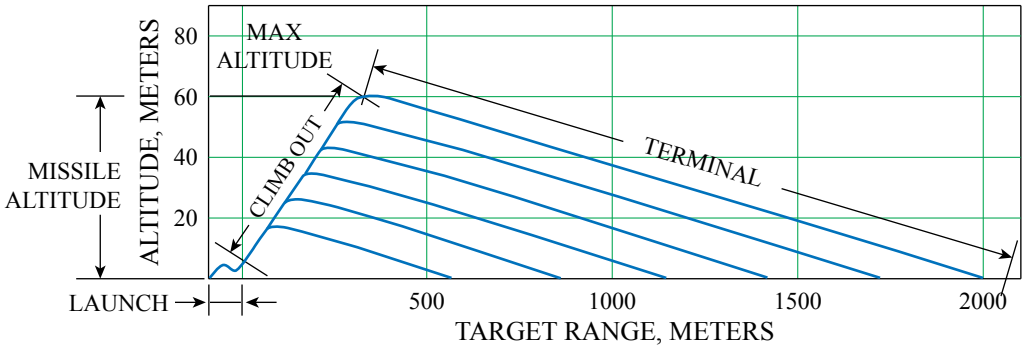
(бункеров и долговременных огневых точек) и вертолетов. Пуск осуществляется под углом 18° к горизонту, и далее происходит набор высоты до 150–160 м для режима пикирования, до 50 м – для режима прямой атаки цели. Скорость полета достигает 300 м/с. Длина ракеты составляет 1081,2 мм, диаметр фюзеляжа – 126,9 мм. Типовые профили полета в режиме пикирования и прямой атаки приведены на рисунках 2*а* и 2*б* соответственно [6].

Как следует из рисунка 2, при размещении РЛС на объекте удара условия наблюдения ПТУР могут существенно отличаться. В первую очередь это относится к дальности, изменяющейся от 2000 до 0 м по мере ее подлета. Кроме того, в процессе всего полета ракурс ПТУР относительно РЛС непрерывно изменяется, что приводит к изменению ЭПР. То есть, оценив характер изменения ЭПР и наклонной дальности, можно уточнить условие (2) и обосновать требования к энергетическим характеристикам РЛС, обеспечивающей качество обнаружения не ниже заданного на требуемом участке полета ПТУР.

Сведения о результатах натурных измерений диаграммы обратного рассеяния (ДОР) ПТУР Javelin в открытых источниках отсутствуют, поэтому единственным источником данных о ее радиолокационных характеристиках являются результаты моделирования поля рассеяния. Эта задача может решаться с помощью специализированных САПР СВЧ-устройств, среди которых наиболее удобной авторам настоящей работы представляется САПР Altair FEKO [7, 8]. Это связано с возможностью выбора методов решения дифракционной задачи, предполагающих представление проводящей поверхности объекта в виде совокупности плоских треугольных фацет, а не только как объемных элементов (тетраэдров в случае Ansys HFSS), что, в свою очередь, позволяет существенно ускорить процесс расчета. Кроме того, сравнительная оценка результатов натурных измерений и моделирования поля рассеяния хвостовой части авиационной ракеты показала высокую точность данных, получаемых с ее помощью [9].



а



б

Рис. 2. Профили полета при различной дальности до цели в режиме: а – пикирования; б – прямой атаки

Для исследования радиолокационных характеристик ПТУР Javelin была разработана ее 3D-модель, показанная на рисунке 3*а*. Расчет осуществлялся с использованием метода моментов (MoM) [3]. Поверхность модели разбивалась на 12 914 треугольных элементов (фацет) со средней длиной стороны 0,9 см (рис. 3*а*), диапазоны частот и угловых ракурсов падающего излучения задавались в пределах 1–10 ГГц с шагом 1 ГГц и φ = 0–180° с шагом 1° соответственно (рис. 3*а*). Вид системы координат и обозначения угловых величин приведены на рисунке 3*б*.

Результаты расчета ДОР на различных частотах приведены на рисунке 4. Значение азимута –90° соответствует облучению

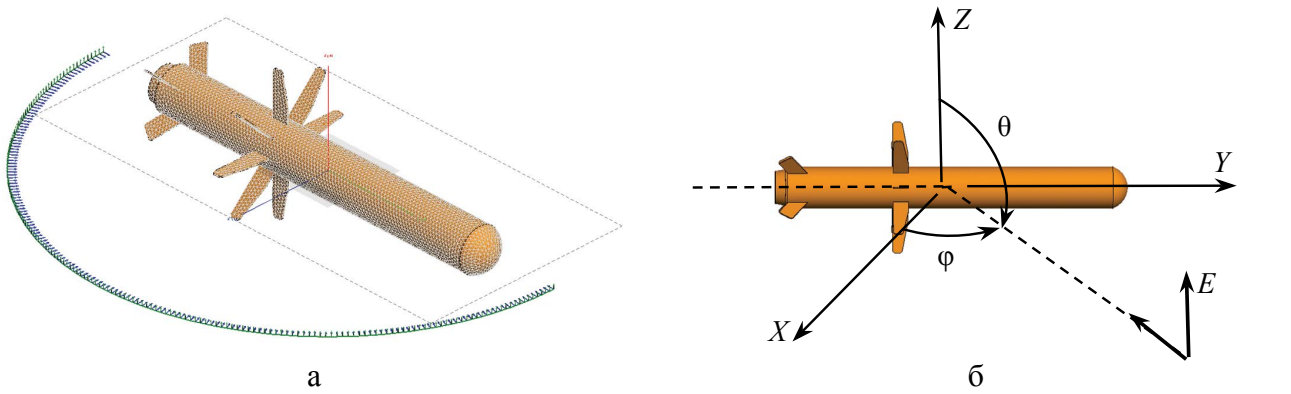


Рис. 3. Вид 3D-модели ПТУР Javelin и схема ее облучения (*а*), взаимная ориентация вектора напряженности падающей волны и модели при вертикальной поляризации падающей волны (*б*)

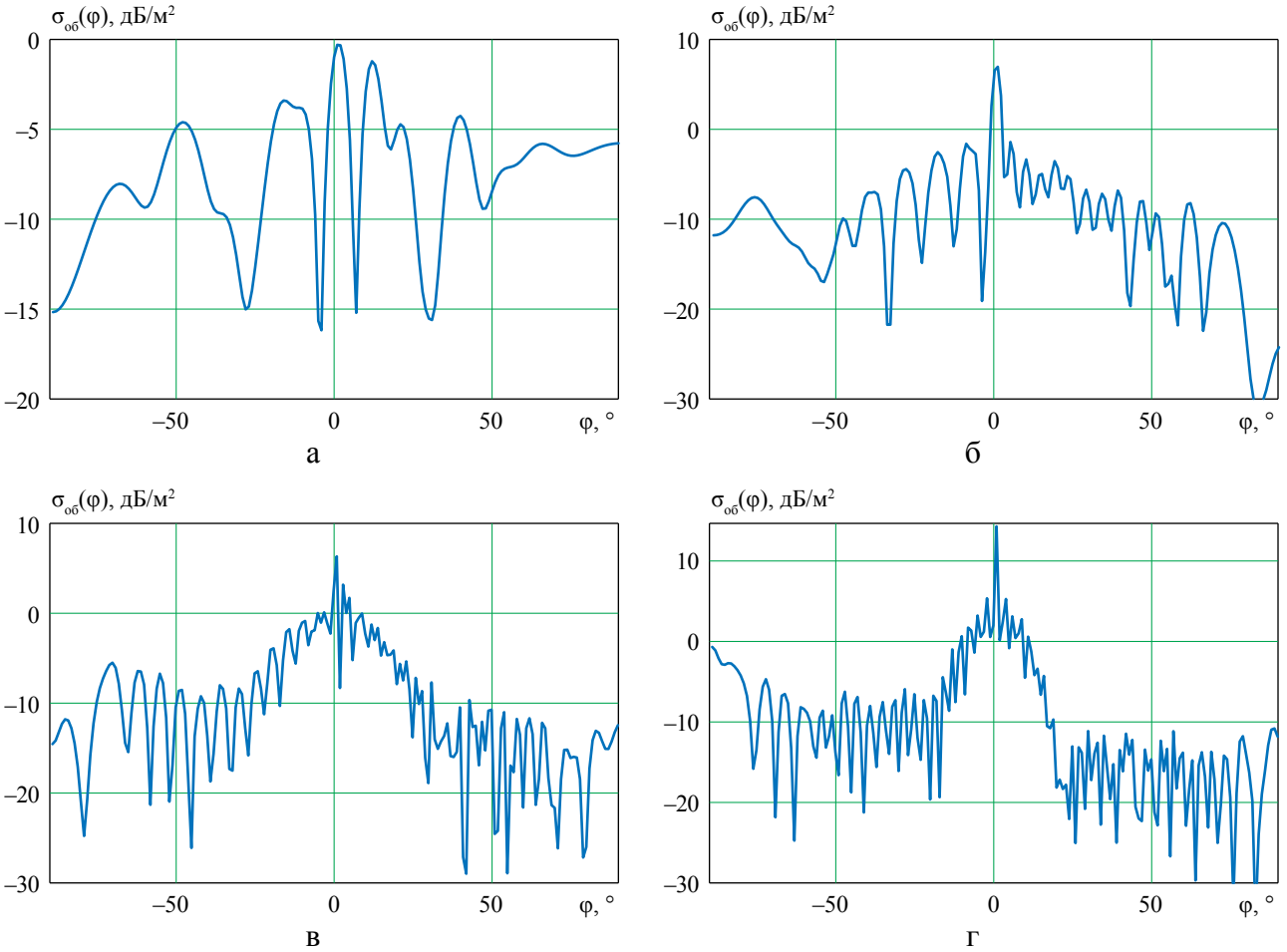


Рис. 4. Азимутальные диаграммы обратного рассеяния ПТУР Javelin на частотах: *а* – 1 ГГц; *б* – 3 ГГц; *в* – 6 ГГц; *г* – 10 ГГц

с направления двигателя ракеты, 90° – облучению со стороны носовой части.

Из анализа зависимостей на рисунке 4 следует, что по мере увеличения частоты пик ДОР около 0° становится более выраженным и узким. Это объясняется очевидными соображениями исходя из того, что фюзеляж ракеты имеет форму цилиндра с длиной, в 3,6 раз превышающей длину волны даже на нижней границе частотного диапазона. Максимальные значения ЭПР составили примерно 1–5 м^2 (0–7 дБ/м^2) на частотах до 3 ГГц и от 4 до 30 м^2 (6–15 дБ/м^2) на частотах 6–10 ГГц. По заявлениям разработчиков САПР Altair FEKO [10], метод моментов обеспечивает высокую точность моделирования в случае, когда средняя длина стороны фацеты $l_ф$ не превышает одной десятой длины волны ($10l_ф \le \lambda = c / f$). При заданной средней длине стороны фацеты 0,9 см это условие выполняется при частотах до 3 ГГц. Для 10 ГГц $l_ф \approx \lambda/3$, тем не менее здесь получаемые оценки максимальной ЭПР и ширины главного лепестка ДОР являются достаточно точными благодаря тому, что их значения в основном определяет фюзеляж ракеты, имеющий гладкую цилиндрическую форму.

Из-за неточности моделирования двигателя и головки самонаведения оценки ЭПР около –90° или 90° могут несколько отличаться от реальных значений. В части двигателя это не является существенным, так как наблюдение ПТУР с ракурса –90° РЛС КАЗ не осуществляет. Вследствие отсутствия открытых сведений о конструкции головки самонаведения, а тем более электрических характеристик ее элементов, форма носовой части ракеты воспроизводилась в соответствии с ее изображением. Безусловно, это является упрощением, но упрощением, позволяющим избежать завышенных оценок уровня эхосигнала при облучении с носового ракурса.

Рассчитанные ДОР (рис. 4) позволяют оценить ЭПР ПТУР с учетом ее текущего ракурса относительно РЛС, что, в свою очередь, требует оценки характера изменения ориентации ракеты относительно РЛС на всех этапах полета к цели. Зависимость текущего направления на РЛС относительно оси ПТУР в угломестной плоскости $\varphi(x_р)$ (рис. 5) от удаления ПТУР от точки пуска $x_р$ может быть определено в соответствии с выражением

$$\varphi(x_р) = \begin{cases} \varphi'(x_p), & \varphi'(x_р) > 0 \\ 2\pi + \varphi'(x_р), & \varphi'(x_р) \le 0 \end{cases}, \qquad (2)$$

где $\varphi'(x_р) = \varphi_{рлс}(x_р) - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_р(x_р)\right)$;

$\varphi_р(x_р) = \operatorname{arctg}\left.\frac{dy_р(x)}{dx}\right|_{x=x_р}$ – функция, характеризующая изменение ориентации оси ракеты относительно оси абсцисс в процессе полета;

$\varphi_{рлс}(x_р) = \begin{cases} \varphi'_{рлс}(x_р), & \varphi'_{рлс}(x_р) > 0 \\ 2\pi + \varphi'_{рлс}(x_р), & \varphi'_{рлс}(x_р) \le 0 \end{cases}$ – функция, характеризующая изменение угла между осью ординат и направлением на РЛС в процессе полета ракеты; $\varphi'_{рлс}(x_р) = \operatorname{arctg}(x_{рлс} - x_р; - y_р(x_р))$ – четырехквадрантный арктангенс

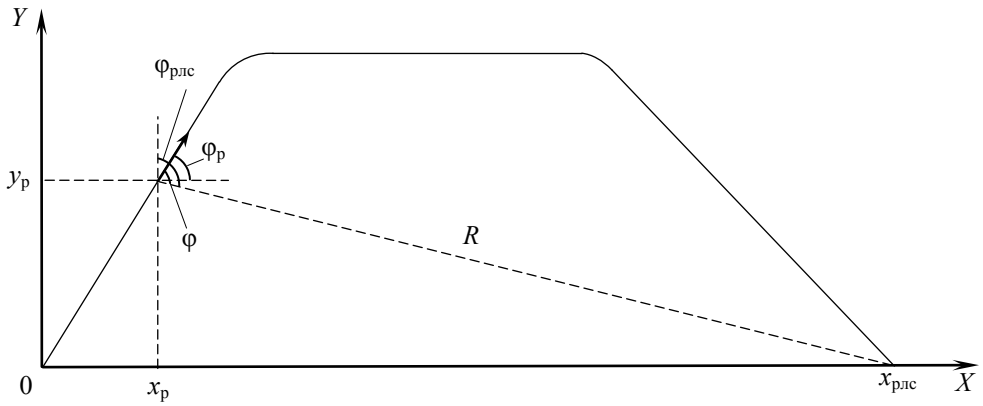


Рис. 5. Величины, характеризующие взаимное расположение ПТУР и РЛС (координата $x = 0$ соответствует точке пуска ракеты, $x_р$ – текущему положению ракеты в процессе полета, $x_{рлс}$ – позиции РЛС)

(с областью определения [–π;π]); $x_{рлс}$ – удаление РЛС от точки пуска ПТУР.

Текущее расстояние между ракетой и РЛС определяется как

$$R(x_р) = \sqrt{(x_{рлс} - x_р)^2 + y_р^2(x_р)}. \qquad (3)$$

Функция $y_р(x_р)$ описывает выбранную траекторию полета ракеты, виды которых для разной дальности пуска приведены на рисунке 2.

Полученные оценки ДОР ПТУР (рис. 4) и выражения (2) и (3) позволяют рассчитать зависимости $\sigma_{об}(\varphi(x_р) / R^4(x_р)$ для широкого диапазона условий наблюдения (в различных диапазонах частот, при различном удалении объекта удара от точки пуска ПТУР).

На рисунке 6 приведены эти зависимости для случая атаки в режиме пикирования. Дальность до цели принималась равной 2000 м. Из их анализа следует, что основным фактором, определяющим уровень эхосигнала ПТУР на входе радиолокационного приемника, является дальность. Несмотря на то что ДОР ракеты (рис. 4) имеет выраженный изрезанный характер, ее флюктуации не оказывают существенного влияния на вид зависимостей, показанных на рисунке 6. Это связано с относительно незначительным изменением ракурса наблюдения ракеты на всех этапах ее полета (рис. 7а, режим атаки с пикирования на максимальной дальности). При расчете профиль полета ракеты описывался кривой (рис. 7б), представляющей собой результат сплайновой аппроксимации профиля, показанного на рисунке 2а.

Результаты оценки энергии сигнала, необходимой для обнаружения ПТУР с вероятностью правильного обнаружения $D_{по} = 0{,}9$ при вероятности ложной тревоги $F_{лт} = 10^{-6}$, представлены на рисунке 8.

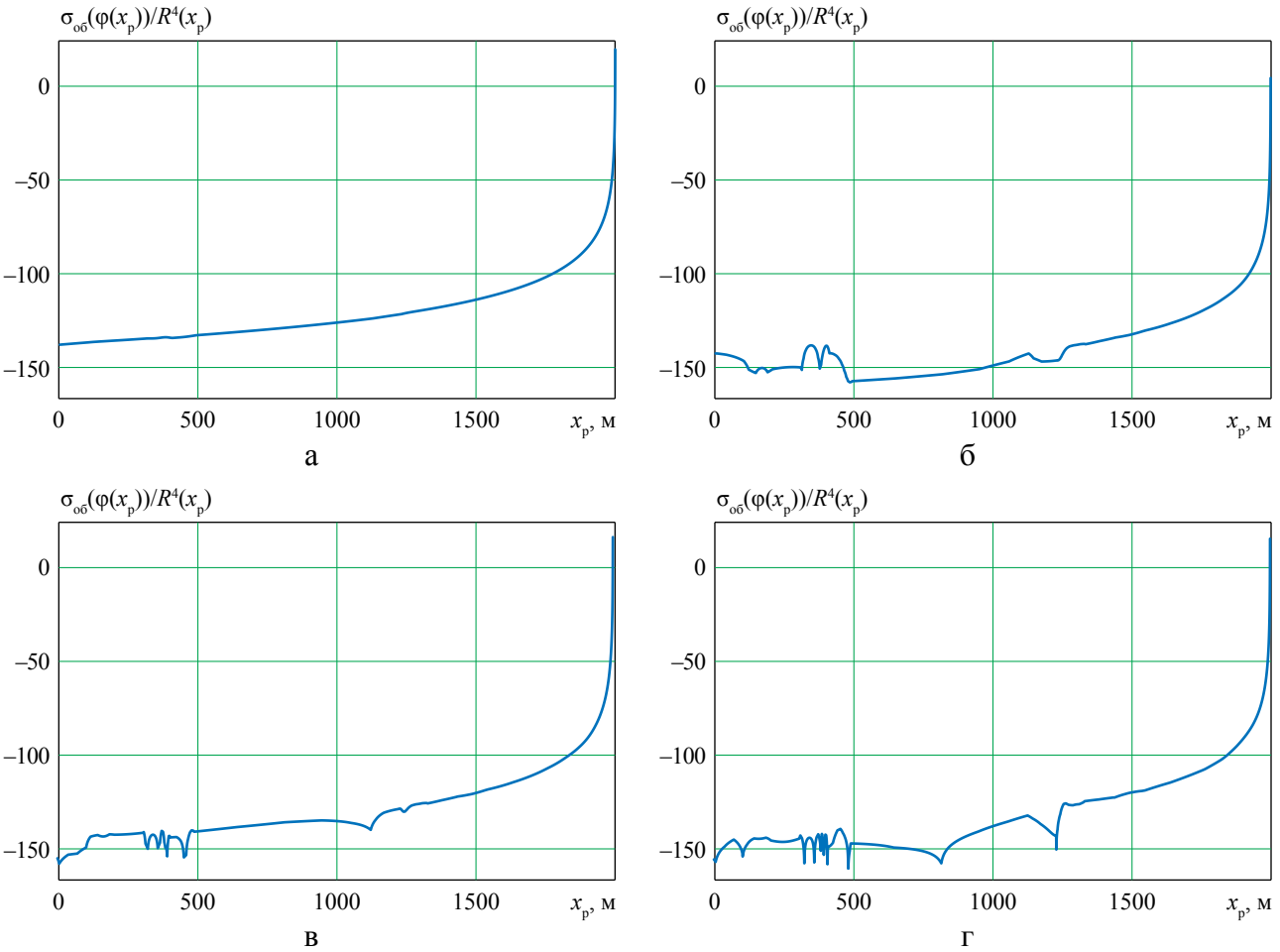


Рис. 6. Зависимости $\sigma_{об}(\varphi(x_р) / R^4(x_р)$ для ПТУР Javelin в режиме пикирования ($x_{рлс} = 2000$ м) на частотах: *а* – 1 ГГц; *б* – 3 ГГц; *в* – 6 ГГц; *г* – 10 ГГц

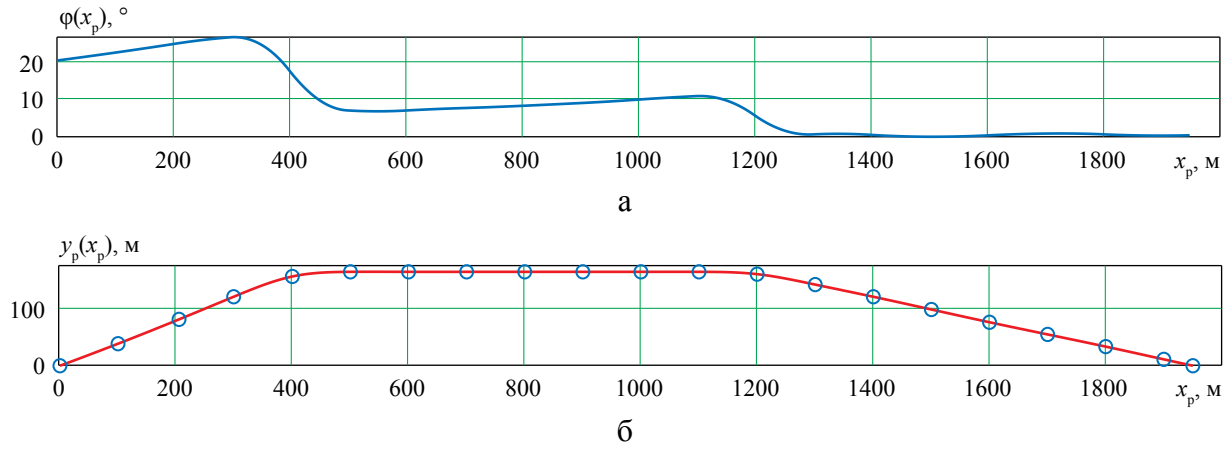


Рис. 7. Характер изменения угла между осью ракеты и направлением на РЛС (*а*) для профиля полета в режиме атаки с пикирования на максимальной дальности (*б*)

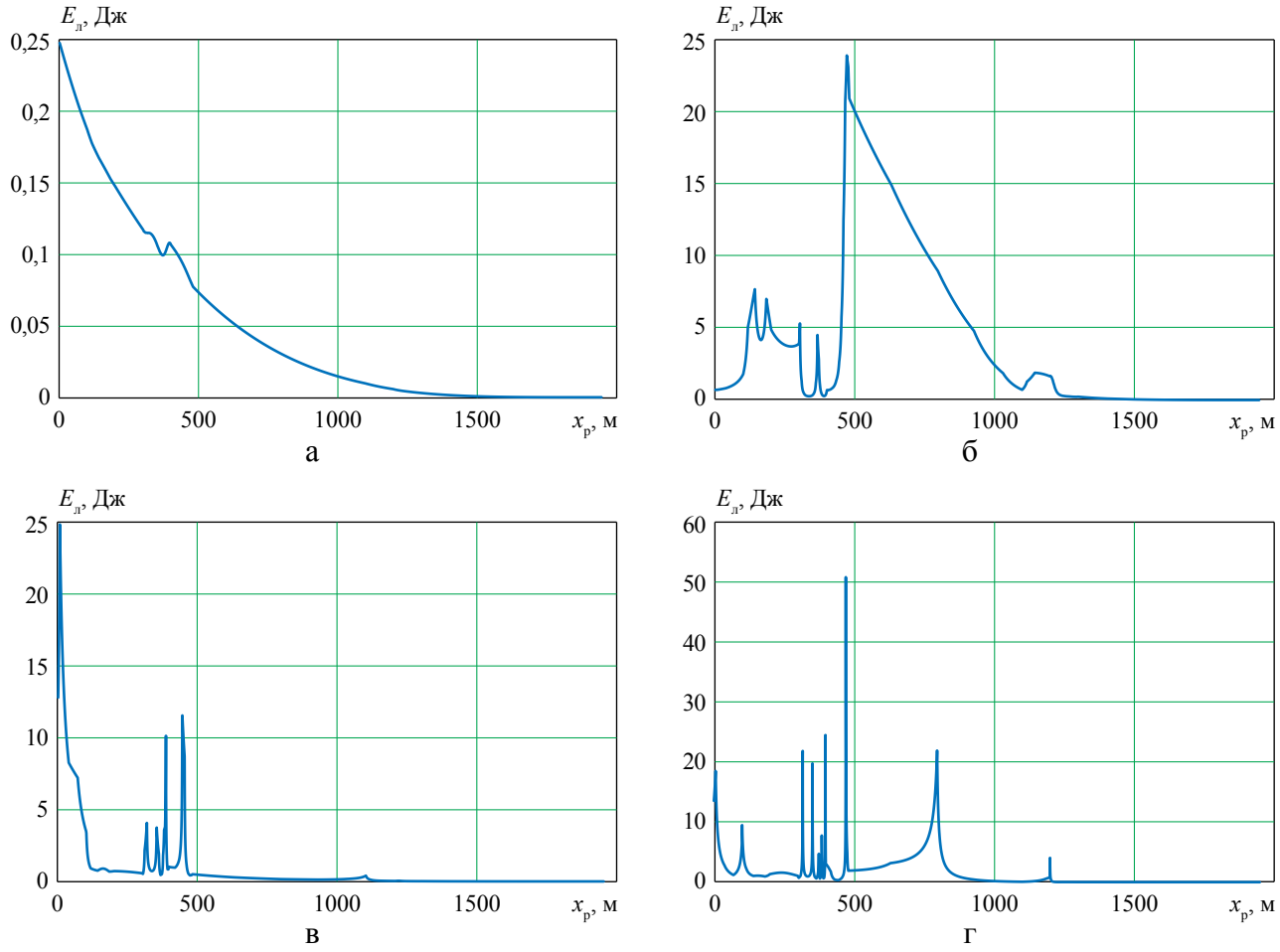


Рис. 8. Зависимости энергии зондирующего сигнала, необходимой для обнаружения ПТУР Javelin в режиме пикирования ($x_{рлс}$ = 2000 м) на частотах: *а* – 1 ГГц; *б* – 3 ГГц; *в* – 6 ГГц; *г* – 10 ГГц

Расчеты производились с использованием (1) для режима атаки с пикирования как более сложного с точки зрения обнаружения при значении коэффициента шума приемника РЛС $K_ш$ = 3 и μ = –3 дБ. Расчет требуемого отношения сигнал/помеха осуществлялся в соответствии с выражением вида $q^2_{тр} = \frac{\ln F_{лт}}{\ln D_{по}} - 1$, т.к. принималась модель приема сигнала с неизвестной амплитудой и начальной фазой на фоне белого шума со спектральной плотностью $N_0 = K_ш kT$.

Коэффициент усиления антенны рассчитывался как $G_{\text{л}} = 0{,}8\dfrac{4\pi l_{\text{г}} l_{\text{в}}}{\lambda^2}$, причем горизонтальная протяженность раскрыва антенны принималась равной длине волны, т.е. $l_{\text{г}} = \lambda$ (ширина азимутальной ДН при этом составляет около 60° во всех диапазонах), а вертикальная – исходя из необходимости обеспечения ширины угломестной ДН не менее $\varepsilon_{\text{p max}}$, при которой возможность наблюдения ПТУР сохранялась бы на всех этапах ее полета, т.е. $l_{\text{в}} = \lambda_{\min} / \varepsilon_{\text{p max}}$ при $\varepsilon_{\text{p max}} = \max\left\{\text{arctg}\left|\dfrac{y_{\text{p}}(x_{\text{p}})}{x_{\text{p}} - x_{\text{рлс}}}\right|\right\}$. Значение $\lambda_{\min}$ соответствует самому коротковолновому диапазону и в рассматриваемом случае составляет 3 см (при $f = 10$ ГГц). Такой выбор горизонтального размера антенны обусловлен существенными ограничениями на ее размеры, обусловленными спецификой размещения на защищаемом объекте.

Из зависимостей на рисунке 8 следует, что при использовании передатчика со средней мощностью $P_{\text{ср}} = 10$ Вт требуемая продолжительность когерентного накопления эхосигнала ПТУР $T_{\text{н}} = E_{\text{л}} / P_{\text{ср}}$ составляет от тысячных долей до единиц секунд. Если же из соображений обеспечения скрытности работы РЛС ограничить среднюю мощность значением порядка 1 Вт, требуемое время накопления составляет от сотых долей до десятков секунд в зависимости от диапазона частот. Из рисунка 8 также следует, что значительные интервалы накопления необходимы лишь для обеспечения возможности обнаружения ПТУР на дальности свыше 1000 м (при $x_{\text{рлс}} - x_{\text{р}} \geq 1000$ м, т.е. для $x_{\text{рлс}} = 2000$ м при $x_{\text{р}} < 1000$ м). Если же выполнение этого условия не требуется, то требования к времени когерентного накопления существенно снижаются.

Так, на рисунке 9 приведены зависимости требуемой продолжительности накопления

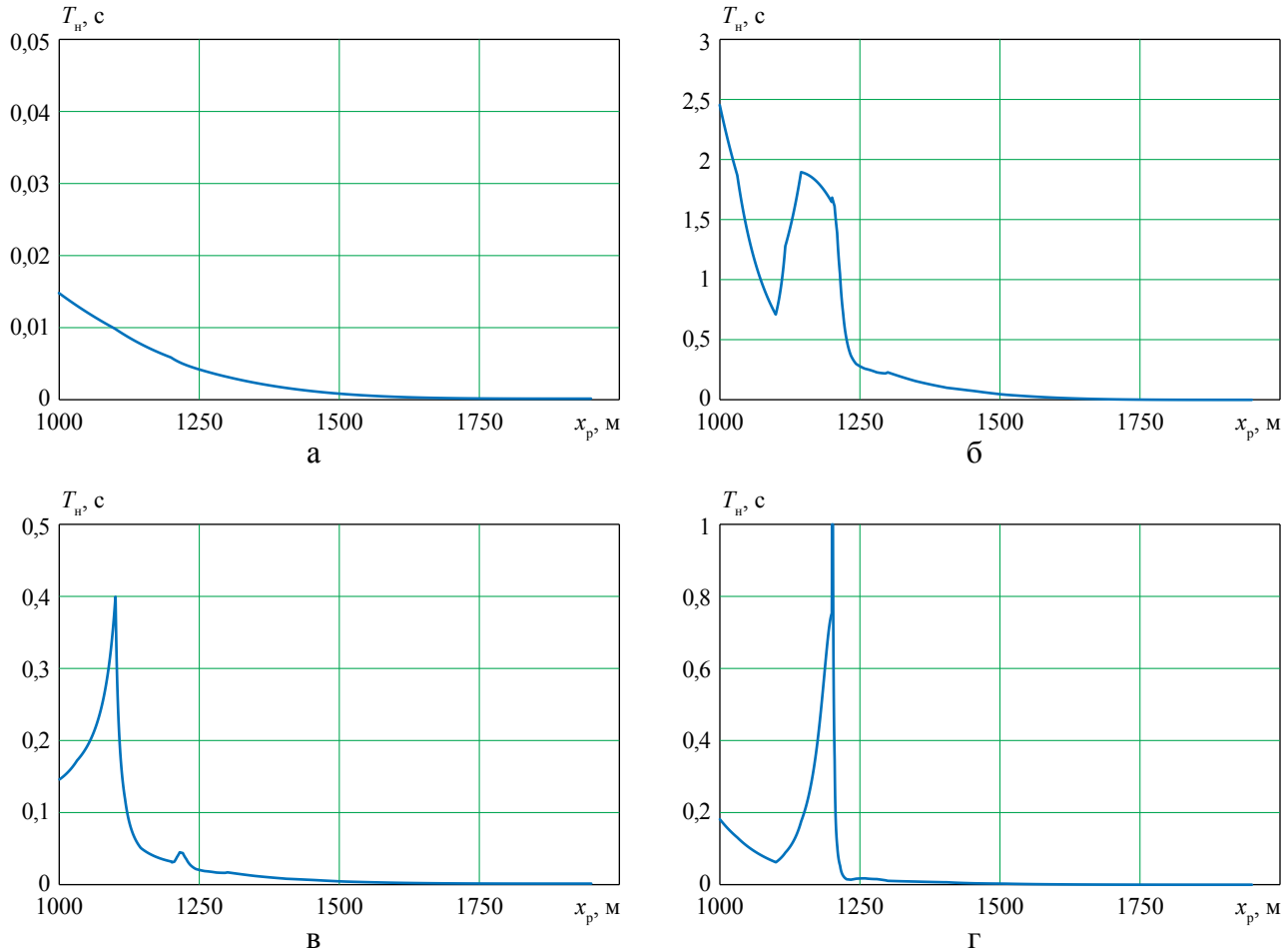


Рис. 9. Зависимости требуемой продолжительности накопления эхосигнала ПТУР Javelin в режиме пикирования на частотах ($x_{\text{рлс}} = 2000$ м) на удалении до 1000 м: *а* – 1 ГГц; *б* – 3 ГГц; *в* – 6 ГГц; *г* – 10 ГГц

эхосигнала ПТУР в РЛС со средней мощностью излучения 1 Вт при требуемой дальности обнаружения не менее 1000 м.

При оценке требуемых энергетических характеристик РЛС не учитывалось влияние подстилающей поверхности на качество обнаружения. Это обусловлено тем, что скорость движения ПТУР достигает сотен метров в секунду, благодаря чему возможна ее эффективная доплеровская селекция. Кроме того, как отмечалось выше, использование сигнала с полосой 100–150 МГц, т.е. обеспечивающей улучшение разрешения по дальности до метра (длины ПТУР), позволяет увеличить отношение мощности эхосигнала цели к мощности эхосигнала разрешаемого элемента подстилающей поверхности (фона местности).

Расширение полосы сигнала также повышает скрытность работы РЛС за счет снижения спектральной плотности мощности ее сигнала, и, исходя из этого соображения, предпочтительным является использование непрерывного частотно-модулированного сигнала. Во-первых, пиковая мощность передатчика при этом соответствует расчетной средней мощности, а во-вторых, в отличие от импульсных РЛС, непрерывный характер сигнала в сочетании с низкой спектральной плотностью существенно затрудняет его идентификацию как сигнала РЛС комплекса активной защиты.

Описания вариантов построения таких РЛС и алгоритмов обработки, обеспечивающих когерентное накопление эхосигналов быстродвижущихся целей при субметровом разрешении, приведены в [2–4].

На рисунке 10 приведена зависимость отношения спектральной плотности сигнала РЛС $N_{\text{с ртр}}$ к спектральной плотности собственного шума приемника средства радиотехнической разведки противника $N_{0\text{ртр}}$ от расстояния между ними $R_{\text{ртр}}$, т.е.

$$q^2_{\text{ртр}} = \frac{N_{\text{с ртр}}}{N_{0\text{ртр}}} = \left\{ N_{\text{с ртр}} = \frac{\mu\lambda^2 P_{\text{ср}} G_{\text{л}} G_{\text{ртр}}}{(4\pi R_{\text{ртр}})^2 \Delta f_{\text{с}}}; \right. \quad (4)$$

$$\left. N_{0\text{ртр}} = K_{\text{ш ртр}} kT \right\} = \frac{\mu\lambda^2 P_{\text{ср}} G_{\text{л}} G_{\text{ртр}}}{(4\pi R_{\text{ртр}})^2 \Delta f_{\text{с}} K_{\text{ш ртр}} kT},$$

где $G_{\text{ртр}}$ и $K_{\text{ш ртр}}$ – коэффициент усиления приемной антенны и коэффициент шума приемного устройства средства разведки противника соответственно.

При расчете зависимости (рис. 10) принимались следующие исходные данные: для РЛС – $\lambda = 0{,}03$ м; $l_{\text{г}} = \lambda$; $l_{\text{в}} = 0{,}115$ м; $P_{\text{ср}} = 1$ Вт; $\Delta f_{\text{с}} = 150$ МГц; для средства разведки – $G_{\text{ртр}} = 20$ дБ; $K_{\text{ш ртр}} = 4$; $\mu = -3$ дБ.

Если в качестве условия уверенного обнаружения сигнала РЛС принять $q^2_{\text{ртр}} \geq 15$–20 дБ, получим, что значение дальности не превысит 10 км. Необходимо отметить, что выбранные характеристики средства РТР являются достаточно жесткими с точки зрения обеспечения скрытности работы РЛС. Так, коэффициент усиления антенны $G_{\text{ртр}} = 20$ дБ в случае авиационных средств РТР реализуется только в высокочастотных диапазонах, заданные потери $\mu = -3$ дБ являются незначительными, на практике же их значение может достигать 8–10 дБ. Тем не менее если даже при таких условиях оценка дальности обнаружения РЛС не превышает 10 км, то в большинстве практических случаев она вряд ли превысит единицы километров.

Таким образом, результаты оценки характера изменения уровня эхосигнала ПТУР на входе приемника РЛС КАЗ с учетом профиля ее полета к цели, полученные на основе результатов моделирования поля рассеяния в САПР СВЧ-устройств, позволили прийти к выводу о возможности ее обнаружения РЛС

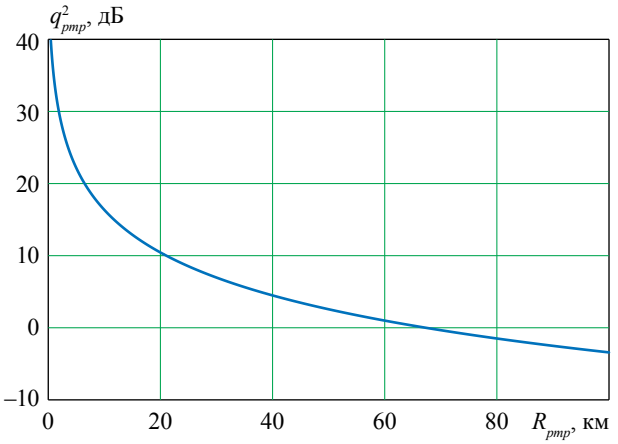


Рис. 10. Зависимость отношения спектральной плотности сигнала РЛС к спектральной плотности шума приемника средства разведки от дальности

с непрерывным излучением на дальности порядка 1000 м при средней мощности излучения в 1 Вт и длительности когерентного накопления эхосигнала не более 0,015, 2,5, 0,4 и 1 с для частот 1, 3, 6 и 10 ГГц соответственно. Оценка дальности обнаружения излучения РЛС (для частоты 10 ГГц при полосе зондирующего сигнала 150 МГц) средством РТР составила около 10 км, что свидетельствует о достаточно высокой скрытности ее функционирования. Полученные оценки отражающих характеристик ПТУР и описанный подход к оценке основных характеристик РЛС позволяют перейти к решению оптимизационной задачи, направленной на обоснование выбора конкретного диапазона длин волн, характеристик антенной системы, мощности зондирующего сигнала и длительности когерентного накопления эхосигнала с учетом ограничений на габариты элементов конструкции РЛС, обусловленные особенностями размещения на защищаемом объекте, а также требований по максимальной дальности обнаружения ее излучения средствами РТР различных диапазонов.

Список литературы

1. Гусев Д. А. Комплексы активной защиты // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 12, Ч. 4. С. 90–104.

2. Купряшкин И. Ф., Лихачев В. П., Рязанцев Л. Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. М.: Радиотехника, 2020. 280 с.

3. Рязанцев Л. Б., Лихачев В. П. Оценка дальности и радиальной скорости объектов широкополосной радиолокационной станцией в условиях миграции отметок по каналам дальности // Измерительная техника. 2017. № 11. С. 61–64.

4. Соколик Н. В. Определение скорости движения и дальности быстродвижущихся объектов в РЛС с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением с использованием автокорреляционной схемы // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 2. С. 63–72.

5. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.

6. Javelin – Close Combat Missile System, Medium. Field Manual 3-22.37. Headquarters, Department Of The Army, 2008. 264 p.

7. Банков С. Е., Курушин А. А. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. М.: ЗАО НПП «РОДНИК», 2008. 246 с.

8. Ахияров В. В. Решение задач дифракции с использованием САПР СВЧ-устройств // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ РАН, 2009.

9. Alves M. A., Martins I. M., Miacci M. A. S., Rezende M. C. RCS of Simple and Complex Targets in the C-Band: A Comparison between Anechoic Chamber Measurements and Simulations. PIERS Online. 2008. Vol. 4. No. 7. pp. 791–794

10. Altair FEKO 2019.2. User Guide. Altair Engineering Inc. 2019. 1520 p.

Об авторах

Заводских Кирилл Юрьевич – инженер-технолог акционерного общества «НПО Корпорация «РИФ», Воронеж, Российская Федерация.

Область научных интересов: моделирование поля рассеяния объектов сложной формы в САПР СВЧ-устройств.

Купряшкин Иван Фёдорович – доктор технических наук, доцент, начальник кафедры боевого применения средств РЭБ (с воздушно-космическими системами управления и наводящимся оружием) Военного учебно-научного центра «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация.

Область научных интересов: радиолокационные системы, системы радиоэлектронного противодействия радиолокационным системам.

Modelling of the anti-tank guided missile scattering field and radar performance evaluation in terms of missile detection

K. Yu. Zavodskikh[1], I. F. Kupryashkin[2]

[1] Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education "Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh, Russian Federation

[2]NPO "RIF Corporation" JSC, Voronezh, Russian Federation

The study presents the results achieved in an analysis of the variation of the level of an echo signal generated by the FGM-148 Javelin anti-tank missile, received by the active protection system radar with consideration given to the target attack flight profile. For our study, we use the results of modelling of the missile's scattering field at frequencies of 1, 3, 6, and 10 GHz using the Altair FEKO CAD suite. According to estimated data, a radar using the frequency-modulated signal and operating at a medium radiation power of up to 1 W is able to detect a missile at a distance of at least 1,000 m. The results show that a combination of low power and a continuous broadband signal (100…150 MHz) along with coherent integration to units of seconds ensures concealed operations of the active protection system radar (estimated range of its radiation detection by a reconnaissance radar is not greater than 10 km).

Keywords: anti-tank guided missile, radar station, active protection system,wavelength, radar cross-section

Information about the authors

Zavodskikh Kirill Yurievich – Process Engineer, "NPO "RIF Corporation" JSC, Voronezh, Russian Federation.
Science research interests: modelling of the complex-shaped objects scattering field using a CAD suite for microwave devices.

Kupryashkin Ivan Fedorovich – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Department "Combat Operation of EW Systems" (including aerospace control systems and guided weapons), Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education "Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation.
Science research interests: radar systems, electronic countermeasure systems.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-90-97
УДК 62: 517.1

Использование оператора «перенос» группового анализа в методе подобия при исследовании процесса горения топлив в двигателях

В. Д. Головатенко

Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро «Новатор», Екатеринбург, Российская Федерация

Рассматривается моделирование процесса горения малых навесок пиротехнической смеси на основе перхлората калия и порошка алюминия в импульсных устройствах (двигателях). В анализ процессов горения введен общий критерий (прим-критерий) подобия, составленный из чисел Воббе, теоретически или экспериментально найденных для двигателя и его модели. Показано, что оператор «перенос» теории групп используется в основном при описании процесса горения металлизированных пиротехнических смесей.

Ключевые слова: горение, двигатель, прим-критерий подобия, оператор «перенос», число Воббе

Для цитирования: Головатенко В. Д. Использование оператора «перенос» группового анализа в методе подобия при исследовании процесса горения топлив в двигателях // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 90–97. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-90-97

For citation: Golovatenko V. D. Using the group analysis transfer operator in the method of similarity for studying the fuel combustion process in engines // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 3. P. 90–97. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-90-97

Поступила 07.09.2021 *Отрецензирована* 28.09.2021 *Одобрена* 29.09.2021 *Опубликована* 20.10.2021

Известно, что изучение и описание наблюдаемых явлений природы (технических систем и др.) производится двумя способами, а именно детерминистическим (по Г. Биркгоффу – континуальным) и вероятностным. Первый, насчитывающий более 1000 лет применения, преобладает в работах исследователей. В последнее время стало возможным решать задачи и вероятностным методом.

Моделирование процессов горения пиротехнической смеси, включающей алюминий, анализируется детерминистическим методом, а при невозможности предсказать конечный результат, с учетом многочисленных физико-химических воздействий, влияющих на конечный состав продуктов горения, – вероятностным методом. При детерминистическом описании, при значительных отклонениях параметров, полученных в модели и натурном агрегате, требуется включение в анализ оператора «перенос».

Целью работы является введение в метод подобия оператора «перенос» («сдвиг») из группового анализа для описания процессов горения топлив в двигателях.

С момента установления положения о горении твердых топлив параллельными слоями для смесевых топлив Пиобертом (1839 г., [1]), а для баллиститных – Вьелем (1880 г., [2]) в области двигателестроения на твердом топливе стало возможным применение методов подобия (размерности) в моделировании. В работах Л.И. Седова [3], Г. Гребера, С. Эрка, У. Григуллья [4], Уэллера [5], Крокко [6] показано, что при анализе работы агрегатов или процессов на изготовленной модели с помощью ряда критериев подобия (размерности) определяются характеристики проектируемого изделия. Эти критерии независимы один от другого, должны быть увязаны с энергетической

© Головатенко В. Д., 2021

характеристикой двигателя и требуют введения более общего критерия, с которым частные критерии должны быть соотнесены, и не противоречить требованиям, оговоренным авторами А.В. Алиевым и О.В. Мищенковой [7], согласно которым «выживают» лишь те критериальные соотношения, по численным значениям которых удается восстановить те или иные закономерности исследуемого процесса. Ранее Г. Дамкелер [8] установил основные критерии подобия для горения топлив в двигательной установке, которые достигаются «…лишь при однозначно протекающих процессах, свободных от чувствительных к температурным колебаниям конечных и побочных реакций». Известно, что в зависимости от условий, в которых происходит сгорание пиротехнического топлива, образуются в одних случаях, например, оксиды химического вещества, а в других – субоксиды.

Таким образом, применяя критерии подобия, нельзя разработать адекватную модель, предназначенную для исследования двигателя на пиротехническом твердом топливе без рассмотрения физических и химических процессов, протекающих в этих устройствах при сгорании топлива. Но при представлении любых процессов методом группового анализа, а именно операциями ***растяжение***, ***перенос*** и ***вращение***, возможно более адекватно представить работу натурного двигателя через данные, полученные на модельной установке [9]. Однако, насколько известно, групповой анализ применяется при расчетах, например, в квантовой физике (см. [10]), но не акцентируется его использование при моделировании и расчетах характеристик ракетных двигателей на твердом пиротехническом топливе. Согласно Г. Биркгофу [9], впервые на требования к инвариантности решений (преобразований), требование теории групп указала Т. Афанасьева-Эренфест в 1926 г.

Таким образом, при моделирования физических процессов необходимо выполнение требований инвариантности решений, что подчеркивают математики Э. Нетер, Г. Биркгоф, Т. Афанасьева-Эренфест, Н.Х. Ибрагимов. А это накладывает на критерии теории подобия требования, чтобы они содержали законы сохранения. Что касается моделирования процессов горения в РДТТ с помощью операции *«растяжения»,* то оно не представляет затруднений [7]. Возникает вопрос: в каких случаях и какие процессы должны быть представлены операцией *«перенос»,* чтобы получить во всех отношениях размерную модель? Ясно, что для этого необходимо выделить в функциональном описании процесса горения топлива в двигательной установке, в химических и тепловых реакциях, ведущие изотропные процессы, происходящие в перемещающихся продуктах горения по камере двигателя. Для операции «подобие» (соответствует операции *«растяжение» теории групп),* по Биркгофу Г. [9], – закон Кранца, что допустимо и в случае, когда в «напряженном состоянии освобождается химическая энергия». Кроме этого, он справедлив «всегда, когда тензор напряжений есть функция только от деформации и не зависит от ее скорости» ([9], стр. 147).

Учитывая разнообразие предложенных составов топлив, например приведенных в монографии С. Сарнера [10], давление, являющееся единственным параметром двигательной установки твердого топлива, через который определяют способность топлива произвести механическую работу, характеризуется химическими процессами горения, описываемыми уравнением энергии Дж. В. Гиббса. Поэтому при моделировании процессов горения и их описании необходимо ввести формально новый *критерий* (условно названный «прим-критерий») как более общий, характеризующий объемные низшие теплоты сгорания газообразных смесей в реальном двигателе и его модели, который составим как отношения чисел Воббе (Wobbe) [11] (см. также ГОСТ 17356-89, ГОСТ Р 51733-2001) в виде:

$$K' = \frac{Q_{1н}}{Q_{2н}} \times \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}, \qquad (1)$$

где: $Q_{1н}$, $Q_{2н}$ – объемные низшие теплоты сгорания газовых смесей, полученные в камерах сгорания двигателя, и его модели в течение единицы времени для единиц масс этих смесей;

ρ_1, ρ_2 – плотности продуктов горения газовых смесей в двигателе и его модели.

Этот критерий представляет собой аналитическое положение Дамкелера [8] к требованию состава продуктов горения, очевиден и обычно не оговаривается.

В предложенном критерии в числителе и знаменателе записаны низшие теплоты сгорания газообразных продуктов, полученных или в процессе дегазации твердого топлива в РДТТ, или образованные при испарении окислителя и горючего в ЖРД в камерах сгорания двигателя, его сгорание и модели без указания на их состав, но, согласно уравнению Дж.В. Гиббса, при этом будет учтено тепло и не газообразных продуктов горения. Таким образом, введенный прим-критерий в конечном счете подразумевает подобие совершаемых работ газообразными продуктами горения в двигателе и его модели, является оценочным в смысле достаточности одного или всех операторов из теории групп для проведения полноценного моделирования исследуемого процесса и обычно выполняется для двигательных установок, содержащих газообразные продукты горения.

Если значение прим-критерия отлично от единицы в технически допустимом пределе, то моделирование горения топлива в двигательной установке проводят по методу подобия. Однако применяются топлива, содержащие в качестве горючего дополнительно и металл, дающие при горении значительные отклонения параметров от одного испытания к другому, для которых при описании результатов применяют ту или иную статистическую модель теории вероятностей. Так, для детального описания результатов испытаний пиротехнических составов используется многомерное нормальное представление [12]. При этом для пиротехнического состава, содержащего в качестве горючего порошкообразный алюминий, а в качестве окислителя перхлорат калия ($KClO_4$), при сжигании которого наблюдаются значительные разбросы давления в постоянном замкнутом объеме, способ представления результатов испытаний методом подобия не является наглядным. Поскольку основным источником энергии при горении порошка алюминия и перхлората калия является диоксид алюминия (Al_2O_3), то способ его сохранения среди продуктов горения от диссоциации в основном на монооксид алюминия (AlO) достигается техническим приемом, заключающимся в быстром съеме с частичек диоксида тепла после их образования. Одним из способов является использование фракций алюминия с наименьшим значением размера частичек алюминия в исходном порошке, вплоть до использования нанопорошка. Вторым способом сохранения диоксида алюминия является использование в качестве окислителя такого химического соединения, которое после выделения кислорода остается инертным в химическом отношении к продуктам горения топлива, например использование в качестве окислителя перхлората калия.

Но применение порошка алюминия, не разделенного на фракции, дает в смеси с перхлоратом калия значительные отклонения по величине рабочего давления. В работе [13] показано, что в этой смеси рабочим телом, совершающим работу, является газообразный KCl, для перевода которого в парообразное состояние используется до 80 % теплоты образования диоксида алюминия, а остальное тепло идет на нагревание этих паров, при этом процесс образования рабочего тела принимается происходящим безынерционно. Так, отклонение в выделении теплоты от оксида алюминия на 5 % приведет к изменению в величине давления в одном и том же объеме на 25 %, а 10 % – к 50 %. Физический смысл такого отклонения приведен в работе [13] и заключается в том, что для образования давления в двигателе используется только часть теплоты при образовании оксида алюминия, перенесенная к инертному ингредиенту из состава продуктов горения, и именно KCl. Поэтому любое отклонение в теплоте при образовании диоксида алюминия приведет к значительному отклонению в величине давления рабочего тела в данном объеме и совершающего работу. Так, по данным Де Марки [14], разность в величине давления при сжигании одной и той же по массе навески смеси алюминиевого порошка и перхлората калия при изменении осредненного по поверхности алюминия с 15,2 мкм (фракция GG-1) до 5,38 мкм (фракция B-1) приводит при их сжигании к увеличению

давления в установке на 3995 %. В связи с этим для данной смеси, разбитой на фракции, представляется необходимым при моделировании использовать второй оператор теории групп – «перенос» (сдвиг).

Графическое представление результатов, полученных при сжигании указанной пиротехнической смеси, заключается в сдвиге кривой нарастания давления в конкретном объеме. Однако не исключается и традиционное представление полученных результатов при моделировании – использовать метод подобия. Таким образом, для ряда топлив, редко используемых в двигательных установках, но не в пиромеханизмах, возможны два подхода при проведении моделирования: традиционный – метод подобия и предложенный с использованием теории групп как более наглядный.

В описываемых ниже экспериментах пиротехнические смеси из порошка алюминия и перхлората калия составляли основу стандартного пиропатрона. Сжигались навески пиропатрона в манометрической бомбе. При этом теоретически [13] для рассматриваемой смеси и продуктов горения было определено максимальное значение RT = 920 кДж/кг, а относительная величина «дефекта» (отклонений в величине RT) по результатам экспериментов составила 0,483. Объяснение столь значительного отклонения для случая сжигания навесок топлива дано в публикации [13], в которой были рассмотрены причины больших отклонений в воспроизводимости баллистических характеристик этой смеси на примере данных работы Де Марки [14]. Согласно последней, значение интеграла давления по времени для разделенной на фракции порошка алюминия от GG-1 до BB-1 может достичь по величине 550 %.

На рисунке 1 приведен ряд экспериментальных кривых, полученных автором для не разделенной на фракции смеси Al + $KClO_4$ при сжигании пиротехнических составов пиропатрона, состоящих из алюминиевой пудры марки ПП-1 и перхлората калия в пироклапане С5.511А.0-0. Математическое ожидание (А) перемещения подвижной части пироклапана, а также кривые (**B** и **D**), учитывающие рассчитанное стандартное отклонение σ, представлены на рисунке 1 при решении системы уравнений (1), см. ниже. Кривые **B** и **D** построены для случаев: **B** – для соответствия физических и химических процессов в камере сгорания пироклапана (в предпоршневом объеме) и **D** – при неполном соответствии, которое было определено опытным путем. При определенной опытным путем в манометрической бомбе работоспособности пиротехнической смеси (RT), равной 698,25 кДж/кг, значение стандартного отклонения было равным 74 кДж/кг (было принято, что статистические данные подчиняются нормальному закону распределения). Расчет кривых **B** и **D** был проведен по следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} dE = E/\theta[1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right)] - PSV \\ l = (n-1)\cdot E/PS - Wo/S \end{cases}, \qquad (2)$$

где E – энергия пиронавески;
M и S – масса и площадь поршня пироклапана;
P – давление в предпоршневом пространстве пироклапана;
V – скорость перемещения штока пироклапана;
t и θ – текущее время и время сгорания пиротехнической навески пиропатрона;
Wo – предпоршневый объем в пироклапане;
l – перемещение поршня в пироклапане;
n – показатель термодинамического процесса продуктов горения пиротехнической навески пиропатрона.

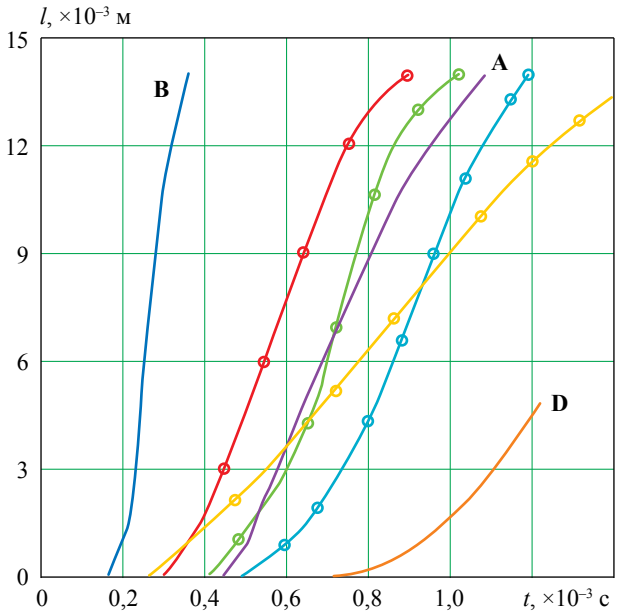


Рис. 1. Кривые перемещения штока пиромеханизма во времени

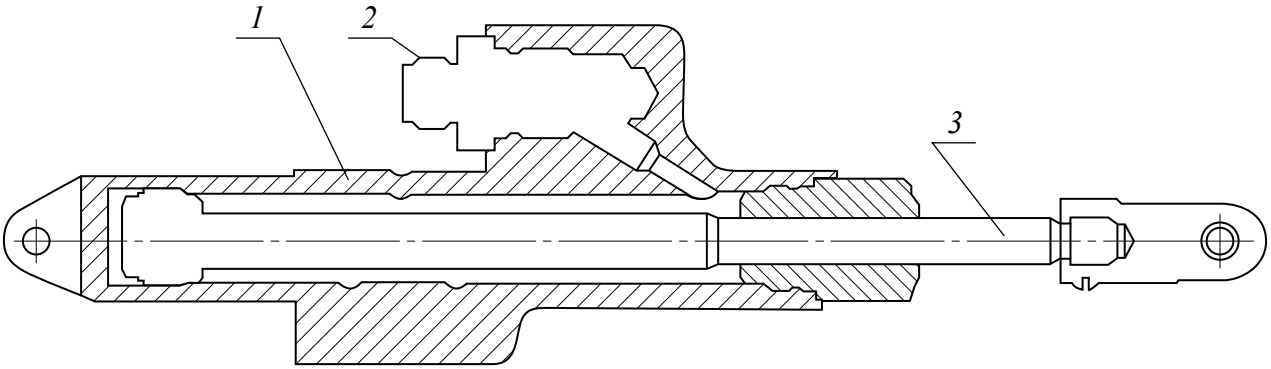


Рис. 2. Пиромеханизм для перемещения панели летательного аппарата. 1 – корпус, 2 – пироэлемент, 3 – поршень

Ниже рассмотрен механизм (рис. 2) перемещения панели у летательного аппарата, работа которого происходит также от стандартного пиропатрона. Этот механизм включает две полости; рабочую, воспринимающую продукты горения пиротехнической навески пиропатрона, и тормозную, в которой происходит сжатие заключенного в ней воздуха. Механизм предназначен для перемещения аэродинамической панели летательного аппарата в начальный момент и торможения последней на конечном участке ее движения. Причем на панель при ее перемещении действует внешняя нагрузка, которая в экспериментах имитировалась резиновым жгутом. Расчетная система уравнений, по которой был рассчитана осредненная во времени кривая нагрузки на шток

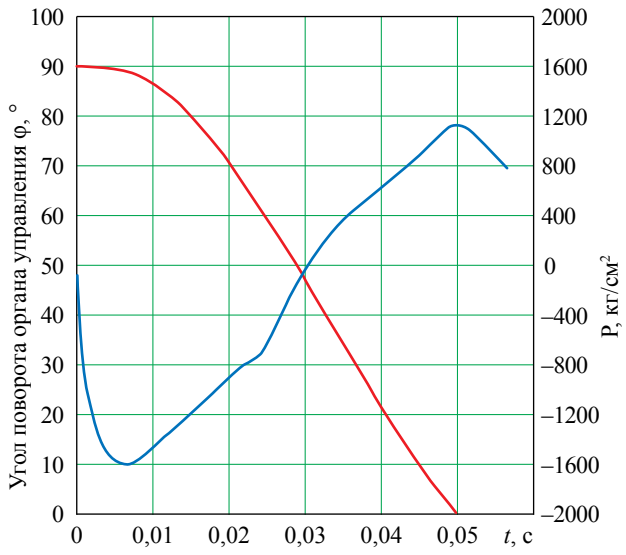


Рис. 3. Кривые нагрузки и поворота панели во времени
– нагрузка на шток; – угол поворота

пиромеханизма (рис 3, выделена синим цветом), следующая:

$P = (n - 1) \times E / (W\text{o} + Sl)$ – изменение давления в предпоршневом объеме пиромеханизма;

$M\,dV/dt = PS - R\text{o}$ – уравнение движения поршня пиромеханизма;

$R\text{o} = 0{,}222\ \alpha$ – нагрузка на шток пиромеханизма от резинового шнура, где α – угол поворота панели.

Здесь обозначения переменных соответствуют переменным системы (1).

Работа сжатия воздуха в тормозной полости пиромеханизма определялась по уравнению [15]:

$$l\text{o} = (n/n - 1)\ RT\ [1 - (P\text{o}/P1)^{(n-1)/n}$$

где: n – средний показатель политропы воздуха;

R – газовая постоянная воздуха;

T – температура воздуха в тормозной полости пиромеханизма;

$P\text{o}$ – давление воздуха в тормозной полости перед его сжатием;

$P1$ – давление воздуха в тормозной полости в процессе сжатия.

Из вышеизложенных данных, представленных на рисунках 1 и 3, следует, что характеристики продуктов горения пиротехнического состава, включающего алюминий и перхлорат калия, не подобны и к ним нельзя применить критерий подобия («растяжение» – из теории групп). В зависимости от исходных характеристик порошков алюминия данные математического ожидания сдвинуты от теоретически ожидаемых. Выше было отмечено, что значение «сдвига» в величине (RT) определяется

количеством оксида или субоксида (AlO) в составе продуктов горения, и, естественно, имеют свои значения математического ожидания, отличные друг от друга. Если полученные характеристики по перемещению аэродинамической панели во времени не удовлетворительны, то используется другой тип пиропатрона или используют пиропатроны с конкретной фракцией алюминиевого порошка, и таким образом операция «перенос» («сдвиг») осуществляется предварительно до изготовления пиропатронов и их применения.

Величина «сдвига», представленная как перенос данных на графике, на практике определяется экспериментально по отклонениям исследуемого параметра, но может быть рассчитана и теоретически при знании всех физических и химических процессов, которые будут наблюдаться в каждом случае в исследуемых системах. Введение в анализ оператора «перенос» позволяет разнести наблюдаемые в экспериментах отклонения на технические, определяемые технологическими возможностями производства, и функциональные, которые исследуются известными методами физики и химии. Критерием востребованности методов теории групп в моделировании работы технических устройств служат данные по соответствию характеристик, полученные на модели и в реальном объекте. Отклонения выходных характеристик, не превышающие оговоренные потребителем машин, служат основанием ограничиться при моделировании методами подобия, то есть оператором «растяжение» теории групп (в методе Подобия этот прием назван «подобием»).

На практике вместо определения среднестатистического значения параметра находят его наибольшее (кривая **B** на рисунке 1) и наименьшее (кривая **D**) значения. По первой проводят моделирование с помощью оператора «растяжение» (метод подобия), по второй – определяют величину «сдвига» в операторе «перенос». При этом принимается (или доказывается), что в случае **B** наблюдается соответствие при протекании физических и химических процессов в модели и натурной установке. Методика определения наименьшего количества испытаний для определения среднестатистического значения параметра была представлена в докладе А.М. Липанова, С.Д. Ваулина и И.Ф. Юрина [16].

Оператор «перенос» группы в детерминистическом методе описывается коэффициентом согласия. Этот коэффициент, обобщая первый и второй арифметические принципы (или выделяя его в отдельный) о неограниченной дробимости, М.К. Гребенча [17] говорит, что любую сумму чисел можно представить через некоторое число, выделенное из множества, умноженное на именованный коэффициент. Например, имеем

$$(A+ B + C +\ldots) = \alpha A, \qquad (3)$$

где коэффициент $\alpha = (A + B + C +\ldots)/A$, при этом $A \neq 0$.

Соотношение (3) при $A \neq 0$ справедливо как к натуральным, так и к комплексным числам. Преимущества такого представления «коэффициента согласия» позволяют соотнести с оператором теории групп «перенос» величину сдвига численно или изобразить результат расчета графически, в зависимости от числа факторов, влияющих на него: на прямой, плоскости или в *n*-мерном пространстве. В теории подобия, если величина сдвига находится в пределе ошибки, в таком представлении нет необходимости, и теория подобия в этом случае ограничивается только оператором группы «растяжение».

Выводы

1. В анализ горения топлива введен общий критерий подобия (прим-критерий) как отношение чисел Воббе для двигателя и для его модели, который фактически используется, но не оговаривается исследователями.

2. Дано обобщение первого и второго принципов арифметики для случая непропорциональной дробимости числа, которое использовано для разъяснения, каким образом оператор «перенос» используется при детерминистическом описании в методе подобия.

3. Оператор «перенос» позволяет исследовать ряд характеристик двигателя на твердом топливе с другими физическими характеристиками, такими как плотность, дисперсность компонентов и др.

4. Используемый при моделировании критерий «подобие» (применяется при исследовании только один оператор «растяжение» из теории групп) достаточен, если отклонения характеристик между двигателем и его моделью не превышают величин, оговоренных потребителем.

5. Если используется предварительно рассеянный на фракции один из компонентов в топливе, обеспечивая подобие выходной характеристики, тогда нет необходимости использовать при моделировании операцию «перенос». Предварительное фракционирование одного из компонентов в топливе перед его сжиганием в двигателе фактически является операцией «перенос» теории групп.

Список литературы

1. Корнер Дж. Внутренняя баллистика орудий, М.: Оборонгиз, 1962. 462 с.
2. Серебреников М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962. 703 с.
3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: 1977. 440 с.
4. Гребер Г., Эрк С., Григулль У. Основы учения о теплообмене. М.: Иностранная литература, 1958. 566 с.
5. Уэллер А.Е. Принципы подобия в горении // В сб.: Вопросы горения ракетных топлив. М.: Иностранная литература, 1959. С. 332–346.
6. Крокко Л. Проблема моделирования ракетных двигателей // В сб.: Вопросы горения ракетных топлив. М.: Иностранная литература, 1959. С. 363–376.
7. Алиев А.В., Мищенкова О.В. Математическое моделирование в технике. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. 475 с.
8. Дамкелер Г. Влияние потока и теплопередачи на производительность реакционных печей (аппаратов) // Успехи химии. 1938. Т. VII, вып. 5. С. 732–755.
9. Биркгоф Г. Гидродинамика. М.: Иностранная литература, 1963. 244 с.
10. Сарнер С. Химия ракетных топлив, М.: Мир, 1969. 488 с.
11. Wobbe G. La definizione della qualita del gas, in L`industria del gas e degli acquedotti. 1926. V. XV (15), no 11. P. 165–172.
12. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. М.: Мир, 1969. 395 с.
13. Головатенко В.Д., Головатенко А.В. Определение внутрибаллистических характеристик топлив на основе пиросмесей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Машиностроение. 2011. Вып. 18, № 31 (248). С. 31–33.
14. Де Марки. Изменчивость и воспроизводимость внутрибаллистических характеристик смеси алюминия и перхлората // Вопросы ракетной техники. 1966. № 7. С. 57–79. № 8. С. 59–70.
15. Кузнецов Ю.В., Кузнецов М.Ю. Сжатый воздух. Екатеринбург: УрО РАН, 2007.
16. Липанов А.М., Ваулин С.Д., Юрин И.Ф. Сокращение числа натурных испытаний пиропатронов путем использования математического моделирования. Материалы VI научно-технической конференции ОАО «ОКБ» «Новатор». Екатеринбург, 2008. С. 58.
17. Гребенча М.К. Арифметика. М. – Л.: Гос. уч.-пед. изд-во министерства просвещения РСФСР, 1947. 315 с.

Об авторе

Головатенко Владислав Денисович – заслуженный конструктор России, кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор акционерного общества «ОКБ «Новатор», Екатеринбург, Российская Федерация.
Область научных интересов: исследование импульсных процессов, протекающих при горении топлив в устройствах малой мощности систем автоматики летательных аппаратов.

Using the group analysis transfer operator in the method of similarity for studying the fuel combustion process in engines.

Golovatenko V. D.

Joint Stock Company Experimental Machine Design Bureau Novator, Yekaterinburg, Russian Federation

In this paper, we study modelling of the process of combustion of small quantities of a pyrotechnic mixture based on potassium perchlorate and aluminium powder in impulse devices (engines). The analysis of combustion processes includes an introduced general criterion (prime criterion) of similarity composed of Wobbe numbers that are determined for the engine and its model in the course of theoretical studies or experiments. Research data show that the transfer operator in the field of group theory is mostly used for describing the process of combustion of metallized pyrotechnic mixtures.

Keywords: combustion, engine, prime criterion of similarity, transfer operator, Wobbe number

Information about the author

Golovatenko Vladislav Denisovich – Honoured Designer of Russia, Candidate of Engineering Sciences, Chief Design Engineer, Joint Stock Company Experimental Machine Design Bureau Novator, Yekaterinburg, Russian Federation.
Science research interests: investigation of impulse processes developing during fuel combustion in low-power devices of aircraft automation systems.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-98-106
УДК 621.922.3

Обработка шлифованием высоколегированных коррозионно-стойких сталей на примере 12Х18Н10Т

А. М. Романенко[1], Д. Б. Шатько[1], А. А. Непогожев[2,3], Я. С. Караваев[3]

[1] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», Кемерово, Российская Федерация

[2] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

[3] Акционерное общество «Московский машиностроительный завод «АВАНГАРД», Москва, Российская Федерация

Работа направлена на исследование процесса обработки высоколегированных коррозионно-стойких сталей методом бесцентрового круглого шлифования. Физико-механические свойства данных сталей обуславливают определенные трудности при их шлифовании в сравнении с другими материалами, что вызывает необходимость подробного изучения этого вопроса. В статье представлены экспериментальные данные зависимости шероховатости и твердости обрабатываемой поверхности, а также средней температуры поверхности заготовки и микротвердости от режимов обработки и характеристик шлифовальных кругов.

Ключевые слова: коррозионно-стойкая сталь, характеристика шлифовального круга, бесцентровое круглое шлифование, шероховатость поверхности, твердость, температура поверхности, микротвердость

Для цитирования: Романенко А. М., Шатько Д. Б., Непогожев А. А., Караваев Я. С. Обработка шлифованием высоколегированных коррозионно-стойких сталей на примере 12Х18Н10Т // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 98–106. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-98-106

For citation: Romanenko A. M., Shatko D. B., Nepogozhev A. A., Karavaev Ya. S. Abrasive machining of high-alloy corrosion resistant steels by example of 12Kh18N10T // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 3. P. 98–106. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-98-106

Поступила 31.05.2021 *Отрецензирована* 11.06.2021 *Одобрена* 25.08.2021 *Опубликована* 20.10.2021

Введение

В последнее время наблюдается тенденция роста использования высоколегированных коррозионно-стойких сталей в различных узлах и механизмах, что объясняется целесообразностью применения данных материалов в условиях высоких нагрузок, температур, давления, а также агрессивных сред. Однако данные стали обладают очень существенным недостатком – плохой обрабатываемостью резанием и, в частности, шлифованием.

Плохая шлифуемость высоколегированных сталей объясняется следующими особенностями характеристик материала:

1. Высокая пластичность.
2. Низкая теплопроводность.
3. Сохранение твердости и прочности при высоких температурах.
4. Низкая виброустойчивость при обработке ввиду нестабильности процесса пластической деформации.

На процесс абразивной обработки оказывает влияние очень большое количество факторов, среди которых – способ шлифования, применяемое оборудование, режимы

© Романенко А. М., Шатько Д. Б., Непогожев А. А., Караваев Я. С., 2021

резания. Помимо этого, в отличие от лезвийных инструментов, сам шлифовальный круг является многокомпонентным телом, параметры которого нужно учитывать при обработке. На свойства и работоспособность кругов влияют форма и ориентация абразивных зерен, используемых в структуре круга, тип связки, рецептура круга, способ смешивания компонентов, особенности технологии производства и пр. [1–3].

Методика проведения исследований

Целью проводимых испытаний было исследование шлифуемости высоколегированных коррозионно-стойких сталей на операции бесцентрового шлифования и определение наиболее оптимальных режимов обработки.

В качестве характеристик работоспособности шлифовальных кругов были приняты следующие параметры:

- шероховатость обработанной поверхности;
- средняя температура поверхности заготовки;
- микротвердость обработанной поверхности;
- среднеквадратичное отклонение размера детали.

Характеристики используемых в работе кругов были выбраны на основе рекомендаций, изложенных в работах [4–6], в соответствии с ГОСТ Р 52781-2007 и имеют следующие обозначения:

- 1350×100×203 25A F80 O6V (25A16CT16K5);
- 1350×100×203 25A F60 O6V (25A25CT16K5);
- 1350×100×203 25A F60 Q6V (25A25CT36K5);
- 1350×100×203 25A F80 N7V (25A16C26K).

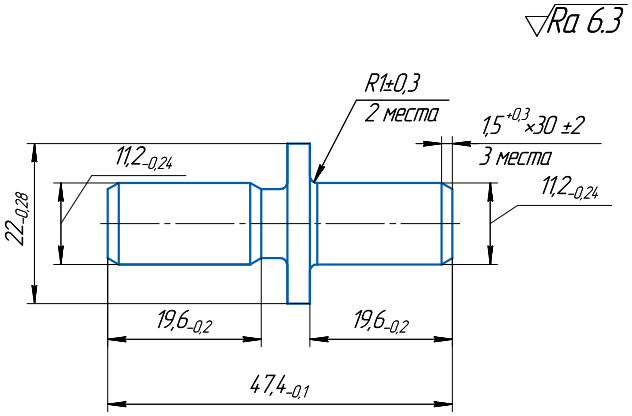


Рис. 1. Заготовка детали

Ведущий абразивный круг имеет следующую характеристику:

- 250×100×127 14A F90 P4R (14A12CT24B).

Обработка проводилась методом бесцентрового шлифования с поперечным врезанием. Исследования проводились на детали, заготовка которой представлена на рисунке 1.

В качестве исследуемого материала была принята сталь марки 12Х18Н10Т (ТУ 14-1-377-72), обладающая плохой обрабатываемостью, поскольку содержит в больших количествах легирующие элементы: хром (15÷18 %), никель (8÷11 %), титан (1,0÷1,5 %).

В таблице 1 представлена приборная база, используемая в ходе проведения экспериментов.

Определение микротвердости осуществлялось на приборе «ПМТ-3» при нагрузке 25 г, на каждом образце делалось 20 отпечатков, на основании которых искомая величина определялась как среднее арифметическое. Остальные параметры определялись по стандартным методикам.

Эксперименты проводились на круглошлифовальном бесцентровом станке мод. 3М182 (рис. 2).

Таблица 1

Используемые средства измерений

Измеряемый параметр	Средство измерения
Отклонение наружного диаметра	Рычажный микрометр мод. «МРИ 0-25» (точность 0,001 мм)
Шероховатость поверхности	Профилометр «MarSurf-1PS»
Твердость	Твердомер мод. «ИТР-60/150-А»
Микротвердость	Прибор «ПМТ-3»
Средняя температура поверхности	Тепловизор «Testo 868»

Рис. 2. Станок круглошлифовальный бесцентровый мод. 3М182

Исследования предусматривали 2 основных этапа:

1. Определение характеристик шлифовального круга, обеспечивающих наилучшие условия шлифования.

2. Оценка влияния режимов обработки на процесс шлифования.

Рассмотрим более подробно данные этапы.

Первый этап

Критериями выбора абразивного инструмента были приняты:

- средняя температура поверхности заготовки;

- изменение исходной твердости поверхности детали после обработки.

Теплонапряженность процесса шлифования зависит от ряда характеристик круга, а именно его твердости, числа и размера зерен, принимающих участие в процессе резания.

Анализ полученных результатов по средней температуре обрабатываемой поверхности показал, что наименьшая температура наблюдается при шлифовании кругом с характеристикой 25А F60 O6V (25А25СТ16К) и составляет порядка 550–600 °С (рис. 3а). Максимальная температура Т ≈ 700 и более ˚С была зафиксирована при обработке кругами с характеристикой 25А F80 O6V (25А16СТ16К) (рис. 3в) и 25А F80 N7V (25А16С26К) (рис. 3г). Круги с характеристикой 1350×100×203 25А F60 Q6V (25А25СТ36К5) показали промежуточные результаты Т ≈ 650÷700 °С (рис. 3б).

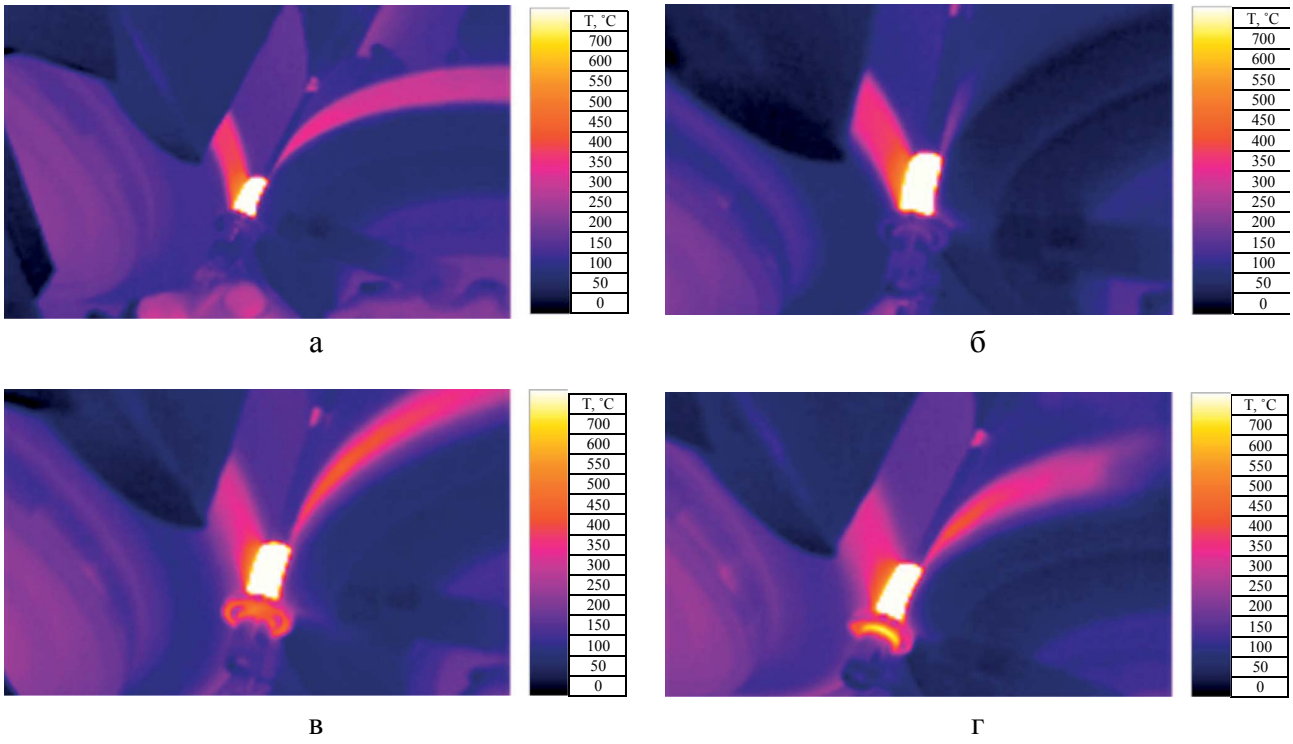


Рис. 3. Изображение зоны резания при шлифовании кругами: а) 25А F60 O6V (25А25СТ16К) (Т ≈ 550÷600 °С); б) 25А F60 Q6V (25А25СТ36К) (Т ≈ 650÷700 °С); в) 25А F80 O6V (25А16СТ16К) (Т ≈ 700 и более °С); г) 25А F80 N7V (25А16С26К) (Т ≈ 700 и более °С)

Результаты изменения исходной твердости после обработки представлены в таблице 2.

Полученные результаты показывают, что наибольшую твердость после шлифования имеют детали, обработанные кругом с характеристикой 25А F60 О6V(25А25СТ16К). Дальнейшие испытания проводились данным инструментом.

Второй этап

В процессе испытания изменялась глубина резания и частота вращения ведущего круга.

В качестве параметров оценки процесса шлифования были приняты следующие показатели:

- шероховатость обработанной поверхности;
- размер детали после шлифования и среднеквадратичное отклонение размера;
- твердость обработанной поверхности;
- микротвердость;
- средняя температура поверхности заготовки.

В таблице 3 представлена зависимость изменения шероховатости от глубины резания.

Из анализа таблицы 3 видно, что с увеличением глубины резания наблюдается значительной рост шероховатости – с Ra 0,81 при глубине резания 0,05 мм до Ra 5,88 при глубине резания 0,35 мм (для детали № 2).

Данное обстоятельство можно объяснить тем, что с увеличением глубины резания в работу вступает все большее количество зерен – как расположенных на поверхности круга, так и более утопленных в тело круга. При этом зерна врезаются в поверхность обрабатываемого материала, деформируют его и оставляют более глубокие срезы. Кроме того, увеличение глубины резания обуславливает повышение контактного давления круга на обрабатываемую поверхность, что приводит к увеличению толщины стружки, а следовательно, росту шероховатости.

В таблице 4 представлены экспериментальные данные изменения параметра шероховатости в зависимости от частоты вращения ведущего круга.

Полученные результаты подтверждают существенное влияние частоты вращения круга на шероховатость обработанной поверхности. Это можно объяснить возникновением налипания и внедрения обрабатываемого материала на рабочую поверхность круга, что подтверждается визуальным осмотром поверхности инструмента.

Анализ влияния режимов обработки на окончательный размер детали и его стабильность представлен в таблицах 5 и 6.

Как видно из полученных результатов – глубина резания и частота вращения ведущего

Таблица 2

Твердость деталей (3 шт.) после операции «Шлифование»

Характеристика абразивного инструмента	Значение по чертежу, HRC	Твердость, HRC
1350×100×203 25А F80О6V (25А16СТ16К)	34	32
1350×100×203 25AF60O6V (25А25СТ16К)	34	34
1350×100×203 25AF60Q6V (25А25СТ36К)	34	33
1350×100×203 25AF80N7V (25А16С26К)	34	31

Таблица 3

Изменение шероховатости в зависимости от глубины резания после операции «Шлифование»

Характеристика абразивного инструмента: 25А F60 О6V (25А25СТ16К)			
Глубина резания, мм	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra, мкм		
	Деталь № 1	Деталь № 2	Деталь № 3
0,05	0,84	0,81	0,80
0,10	0,96	0,94	0,92
0,15	1,23	1,20	1,19
0,20	2,74	2,71	2,70
0,25	3,58	3,56	3,54
0,30	4,25	4,22	4,21
0,35	5,91	5,88	5,87

Таблица 4

Изменение шероховатости в зависимости от частоты вращения ведущего круга после операции «Шлифование»

Характеристика абразивного инструмента: 25А F60 О6V (25А25СТ16К)			
Частота вращения ведущего круга, об/мин	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra, мкм		
	Деталь № 1	Деталь № 2	Деталь № 3
20	0,87	0,85	0,83
42	1,06	1,04	1,02
64	1,16	1,13	1,10
86	2,58	2,56	2,54
108	3,19	3,17	3,15
130	3,47	3,44	3,41
150	5,86	5,84	5,82

Таблица 5

Изменение размера детали в зависимости от глубины резания после операции «Шлифование»

Характеристика абразивного инструмента: 25А F60 О6V (25А25СТ16К)				
Глубина резания, мм	Диаметр, мм			Среднеквадратичное отклонение размера
	Деталь № 1	Деталь № 2	Деталь № 3	
0,05	10,938	10,933	10,929	0,004
0,10	10,931	10,927	10,923	0,003
0,15	10,929	10,923	10,920	0,004
0,20	10,923	10,918	10,916	0,003
0,25	10,916	10,912	10,909	0,002
0,30	10,897	10,891	10,887	0,005
0,35	10,876	10,871	10,868	0,003

Таблица 6

Изменение размера детали в зависимости от частоты вращения ведущего круга после операции «Шлифование»

Характеристика абразивного инструмента: 25А F60 О6V (25А25СТ16К)				
Частота вращения ведущего круга, об/мин	Диаметр, мм			Среднеквадратичное отклонение размера
	Деталь № 1	Деталь № 2	Деталь № 3	
20	10,937	10,936	10,935	0,001
42	10,936	10,934	10,932	0,002
64	10,928	10,927	10,926	0,001
86	10,921	10,920	10,919	0,001
108	10,918	10,916	10,914	0,002
130	10,914	10,913	10,912	0,001
150	10,911	10,910	10,909	0,001

круга оказывают влияние на размер обработанной детали за счет снижения фактического съема металла с обрабатываемой поверхности, но при этом практически не влияют на стабильность получаемых размеров.

Влияние глубины резания на твердость обработанной поверхности представлено на рисунке 4.

Снижение твердости обработанной поверхности с ростом глубины резания объясняется тем, что при обработке твердых материалов быстрее истираются и затупляются абразивные зерна. С увеличением глубины резания этот процесс интенсифицируется, на резание расходуется бóльшая мощность, поверхностный слой обрабатываемой заготовки значительно нагревается.

Рост количества теплоты в зоне резания и продолжительность теплового воздействия шлифовального круга на металл в зоне резания приводят к интенсификации процесса разупрочнения и снятию наклепа поверхностного слоя, обеспечивая при этом снижение твердости.

Зависимость твердости обработанной поверхности от частоты вращения ведущего абразивного круга приведена на рисунке 5.

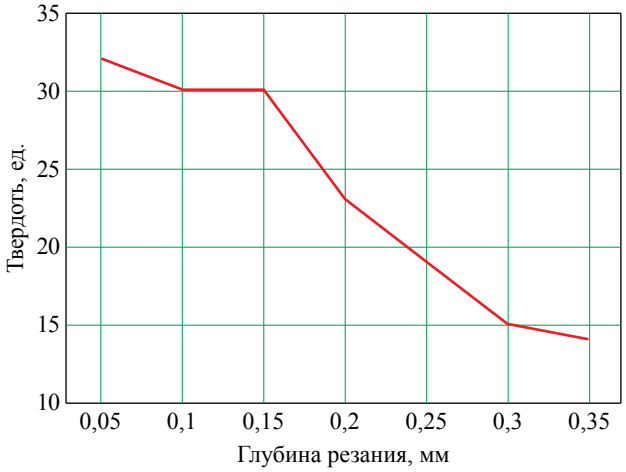


Рис. 4. График изменения твердости детали в зависимости от глубины резания

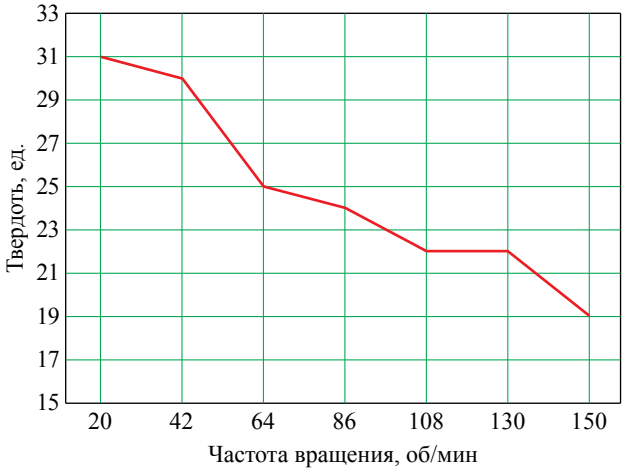


Рис. 5. График изменения твердости детали в зависимости от частоты вращения ведущего абразивного круга

Как видно из графика, при увеличении частоты вращения имеет место существенное снижение твердости обрабатываемой поверхности. Очевидно, это происходит потому, что при снятии стружки с большой скоростью имеет место деформация (уплотнение) шлифуемой поверхности, сопровождаемая трением и возникновением очень высокой температуры. При повышении частоты вращения круга нагрузка на абразивные зерна снижается, а количество теплоты, выделяющейся в зоне шлифования и снимающий наклеп, увеличивается. Упрочнение поверхностного слоя при этом уменьшается.

Частота вращения круга (скорость резания) влияет на наклеп через изменение интенсивности теплового воздействия на поверхностный слой и продолжительности воздействия сил резания и нагрева на металл. При повышении скорости резания уменьшается время воздействия сил резания, интенсифицируется трение и выделение теплоты в зоне резания, что способствует ускорению процесса отдыха металла. В результате с ростом скорости резания, как правило, наклеп поверхностного слоя уменьшается и, следовательно, снижается твердость обработанной поверхности.

Далее проводились исследования микротвердости поверхности обрабатываемого материала. Микротвердость поверхностного слоя характеризует его упрочнение (наклеп) и является результатом интенсивной пластической деформации. Уменьшение микротвердости (разупрочнение) после шлифования, как правило, связано с нагревом до 400÷600 °С, отпуском поверхностного слоя стали и, как следствие, изменение его структуры: образованием троостита и сорбита вместо мартенсита.

Таким образом, микротвердость поверхности снижается с повышением глубины резания, а также увеличением температуры в зоне резания. Поэтому все режимные факторы, способствующие повышению температуры в зоне резания или увеличению продолжительности теплового воздействия, приводят к снижению упрочнения поверхности [6].

Вышеприведенные теоретические выкладки были полностью подтверждены практическими исследованиями (рис. 6). Во время проведения испытаний было отмечено, что для принятых условий обработки с увеличением глубины резания микротвердость обрабатываемой поверхности монотонно убывает. Микротвердость (Нμ) материала 12Х18Н10Т в состоянии поставки составила 4584 МПа.

Влияние глубины резания на среднюю температуру шлифования представлено на рисунке 7.

Анализ данных рисунков показывает, что с увеличением глубины резания с 0,05 до 0,25 мм имеет место рост температуры в 2 раза. Это явление можно объяснить увеличением времени шлифования детали и продолжительностью воздействия источника теплоты на обрабатываемую поверхность.

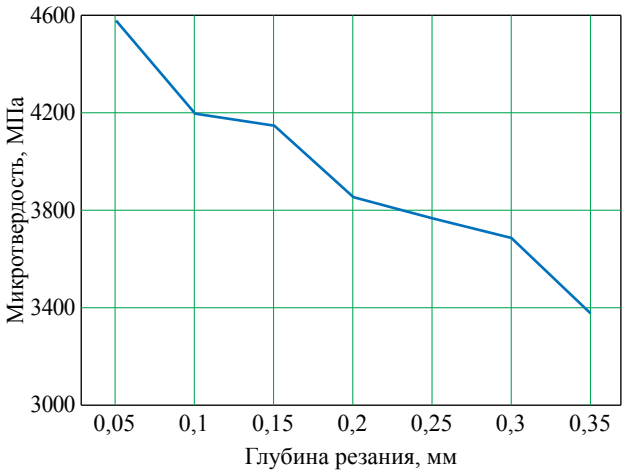


Рис. 6. График изменения микротвердости детали в зависимости от глубины резания

Влияние частоты вращения ведущего круга (рис. 8) несколько ниже – до 1,5 раза. Это можно объяснить тем, что с увеличением трения детали о рабочую поверхность круга, одновременно уменьшается время активного контакта детали с шлифовальным кругом.

Выводы

Полученные в ходе проведения экспериментов статистические данные позволили сформулировать следующие практические рекомендации.

1. При шлифовании высоколегированных коррозионно-стойких сталей целесообразно применять абразивные круги с характеристикой 25А F60 О6V (25А25СТ16К).

2. С увеличением глубины резания и частоты вращения ведущего круга наблюдается увеличение шероховатости обработанной поверхности. Исходя из требований к качеству обработки детали, следует принимать глубину резания не более 0,2 мм и частоту вращения ведущего круга не более 108 об/мин.

3. Глубина резания и частота вращения ведущего круга оказывают влияние на размер обработанной детали за счет снижения фактического съема металла с обрабатываемой поверхности, но при этом практически не влияют на стабильность получаемых размеров.

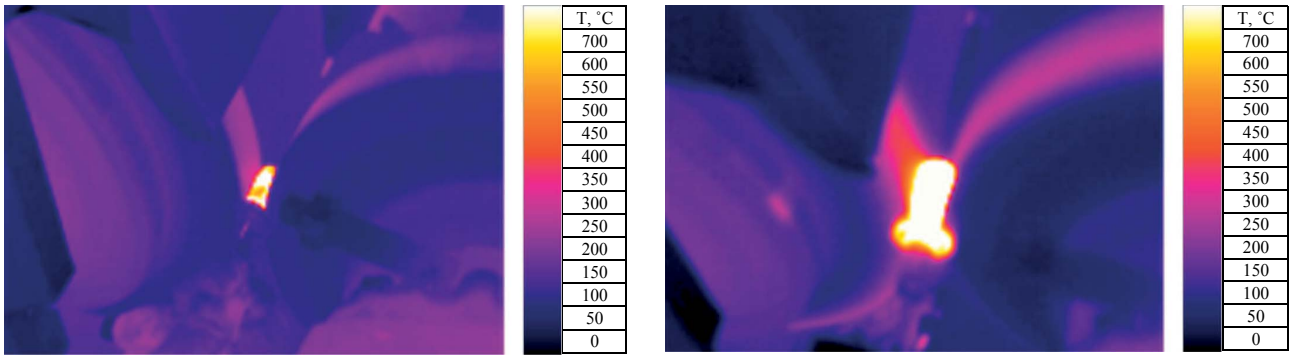


Рис. 7. Изображение зоны резания при шлифовании: а) глубина резания 0,05 мм (Т ≈ 400÷600 °С); б) глубина резания 0,25 мм (Т ≈ 700 и более °С)

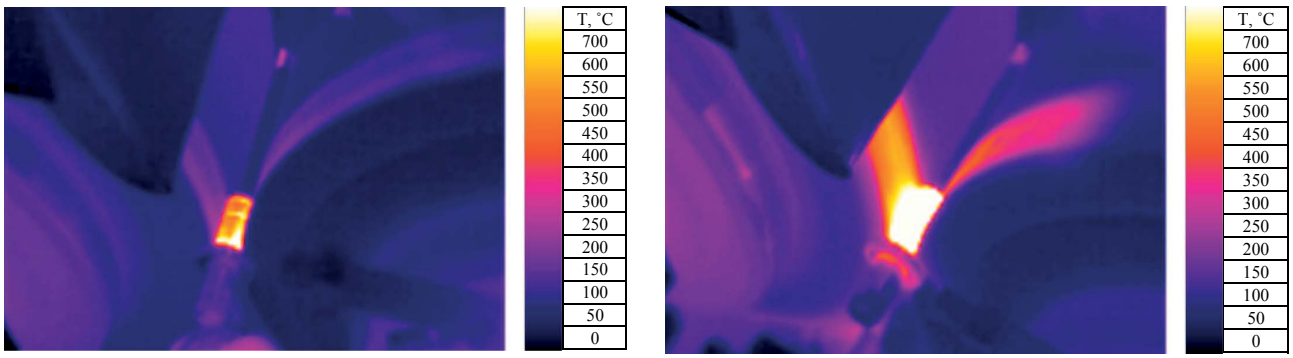


Рис. 8. Изображение зоны резания при шлифовании. Частота вращения ведущего круга: а) 25 об/мин (Т ≈ 400÷450 °С); б) 150 об/мин (Т ≈ 600 и более °С)

4. С увеличением глубины резания и частоты вращения ведущего круга наблюдается снижение твердости и микротвердости обрабатываемой поверхности.

5. Глубина резания оказывает более сильное влияние на среднюю температуру шлифования, чем частота вращения ведущего круга.

Список литературы

1. Romanenko A.M., Shatko D.B., Strelnikov P.L. The influence of the formulation components and the mixing technology on physical and mechanical properties of abrasive wheel. MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 297. 09005. DOI: 10.1051/matecconf/201929709005

2. Shatko D.B., Lyukshin V.S., Strelnikov P.L. The influence of the grinding grains shape and orientation on performance of coated abrasive tools. MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 297. 09006. DOI: 10.1051/matecconf/201929709006

3. Shatko D.B., Lyukshin V.S., Strelnikov P.L., Samorodova L.L. Influence of shape and orientation of grinding grains on their cutting capacity. III[rd] International Innovative Mining Symposium. E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 41. 03003. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103003

4. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.

5. Кащук В.А., Верещагин А.Б. Справочник шлифовщика. М.: Машиностроение, 1988. 480 с.

6. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1977. 261 с.

Об авторах

Романенко Андрей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлорежущих станков и инструментов института информационных технологий, машиностроения и автотранспорта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», Кемерово, Российская федерация.

Область научных интересов: технология обработки материалов резанием, разработки рецептуры абразивного инструмента, разработка технологии изготовления абразивного инструмента.

Шатько Дмитрий Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», начальник отдела «Системы менеджмента качества» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», Кемерово, Российская Федерация.

Область научных интересов: абразивная обработка, проектирование и исследование новых конструкций абразивных инструментов, оптимизация производственных процессов, системы менеджмента качества, бережливое производство.

Непогожев Андрей Александрович – аспирант кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»; инженер-технолог механосборочного цеха № 6 акционерного общества «Московский машиностроительный завод «АВАНГАРД», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: абразивная обработка, подбор рецептуры абразивного инструмента по температурному критерию, технология машиностроения, автоматизация технологического процесса, цифровизация производства.

Караваев Ярослав Сергеевич – кандидат технических наук, начальник технологического бюро механообрабатывающего производства акционерного общества «Московский машиностроительный завод «АВАНГАРД», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: обработка материалов резанием, обработка материалов давлением, технология машиностроения, режущий инструмент.

Abrasive machining of high-alloy corrosion resistant steels by example of 12Kh18N10T

Romanenko A. M.[1], Shatko D. B.[1], Nepogozhev A. A.[2,3], Karavaev Ya. S.[3]

[1] *T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation*

[2] *Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russian Federation*

[3] *Moscow Machine Building Plant "Avangard" JSC, Moscow, Russian Federation*

The paper focuses on research into processing of high-alloy corrosion resistant steels by the method of centreless circular grinding. The physical and mechanical properties of such steels determine certain difficulties in their grinding as compared with other materials, which necessitates a thorough investigation of this issue. The paper presents experimental data on the dependence of machined surface roughness and hardness, as well as workpiece surface average temperature and microhardness, on the machining conditions and grinding wheel characteristics.

Keywords: corrosion resistant steel, grinding wheel characteristic, centreless circular grinding, surface roughness, hardness, surface temperature, microhardness

Information about the authors

Romanenko Andrey Mikhailovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department "Metal Cutting Machines and Tools", Institute of Information Technology, Machine Building, and Motor Transport, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation.
Science research interests: technology of material processing by cutting, cutting tools composition development, abrasive tools manufacturing method development.

Shatko Dmitry Borisovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department "Metal Cutting Machines and Tools", Head of Department "Quality Management Systems", T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation.
Science research interests: abrasive processing, development and research of new abrasive tool designs, optimisation of production processes, quality management systems, lean manufacturing.

Nepogozhev Andrey Aleksandrovich – Post-Graduate Student, Department "High-Efficiency Processing Technologies of Materials", Moscow State University of Technology "STANKIN", Process Engineer of Machine Assembly Shop No. 6, Moscow Machine Building Plant "Avangard" JSC, Moscow, Russian Federation.
Science research interests: abrasive processing, selection of cutting tool composition by thermal criterion, machine building technology, manufacturing process automation, production digitalisation.

Karavaev Yaroslav Sergeevich – Candidate of Engineering Sciences, Head of Process Bureau, Machining Production Operations, Moscow Machine Building Plant "Avangard" JSC, Moscow, Russian Federation.
Science research interests: material processing by cutting, material processing by pressure, machine building technology, cutting tools.