



Уважаемые читатели!

Интерес к научно-техническому журналу «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» и тематика публикуемых статей растут с каждым годом. В 2019 г. для публикации в журнал поступила 129 статья, что на 27 % больше, чем в 2018 г.

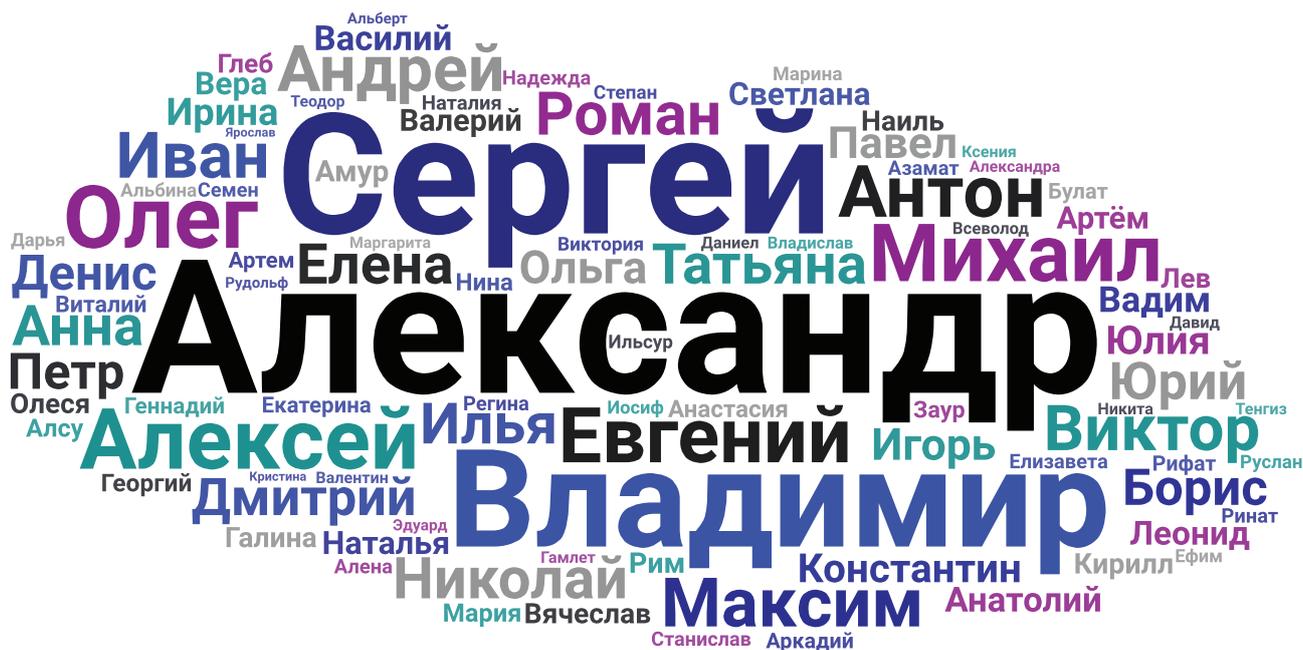
Напоминаю, что на сайте Концерна www.almaz-antey.ru/about/618 представлена возможность до выхода бумажной версии оформить бесплатную подписку на e-mail-рассылку электронной версии номеров журнала.

Жду от вас новых интересных научных статей, а также отзывов, предложений и вопросов по поводу публикации на мой личный электронный адрес antey@inbox.ru или по телефону +7 (495) 276-26-13. Напоминаю, что статьи принимаются от организаций России и зарубежья, публикация бесплатная.

Заместитель главного редактора

Денис Большаков





Д. Ю. Большаков

Наши читатели

С 2015 г. научно-технический журнал «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» размещается на сайте Концерна. Редакция направляет по электронной почте информацию о выходе свежего номера журнала. В марте 2015 г. первоначальный объем базы e-mail-рассылки содержал 132 адреса авторов статей и заинтересованных читателей. Стоит отметить, что одним из действенных способов привлечения читателей стала отправка писем редакцией на предприятия Концерна с предложением подписаться на рассылку. Благодаря этому к концу 2015 г. объем был увеличен до 346 адресов, а на момент написания заметки составлял 999 адресов (рис. 1).

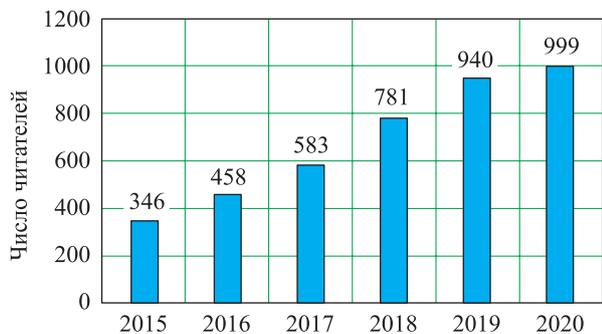


Рис. 1. Рост количества подписчиков e-mail-рассылки

С марта 2015 г. база подписчиков собиралась в ручном режиме, с июля 2015 г. процесс автоматизирован: читатели могут оформить подписку на сайте Концерна. Для этого требуется только электронный адрес. Разрез подписчиков по каналам привлечения приведен на рис. 2.

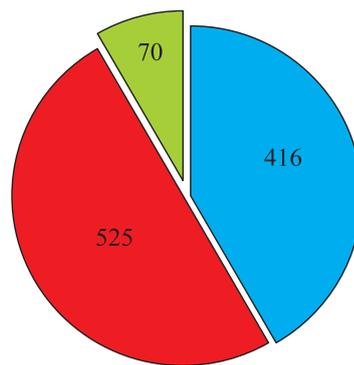


Рис. 2. Распределение подписчиков: ■ – авторы; ■ – сайт; ■ – предприятия

По данным рис. 2 видно, что база подписчиков состоит из трех частей и включает:

- 70 общих адресов электронной почты предприятий Концерна;
- 416 адресов читателей, оформивших подписку на сайте Концерна;



• 525 адресов авторов статей и заинтересованных читателей.

На основании данных 525 подписчиков была построена схема в форме облака, она приведена в начале этой заметки и содержит имена читателей журнала. Наиболее часто встречаемые выделены крупным шрифтом. По распределению имен была составлена диаграмма распределения читателей журнала «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» по половому признаку: большинство (84 %) составляют мужчины, но и женщины занимают немалую долю – 16 % (рис. 3).

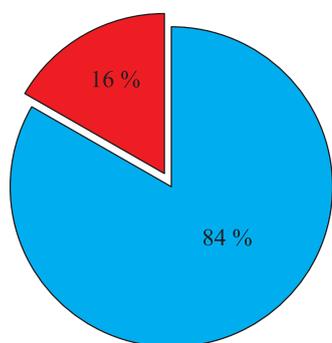


Рис. 3. Распределение читателей журнала «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» по половому признаку: ■ – мужчины; ■ – женщины

Редакция журнала старается повысить «интересность» каждого выпуска. Тематика журнала охватывает практически все на-

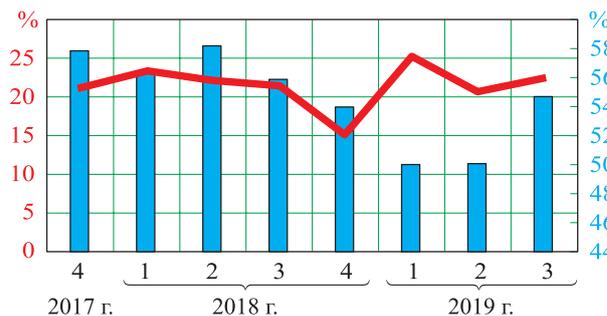


Рис. 4. Открываемость (■) и кликабельность (—) писем e-mail-рассылки читателями

правления деятельности Концерна, а их немало, поэтому собрать в одном выпуске статьи по каждой из них невозможно. Более того, в № 2–2018 журнала не было ни одной статьи по профильной для него тематике – «Радиотехника. Электроника», и весь объем был занят материалами по газодинамике, исследованию свойств керамик и машиностроению. Но даже с учетом разнонаправленности тематик аудитория журнала стабильно находит интересные для себя статьи. На рис. 4 показано, как читатели открывали письма e-mail-рассылки журнала за последние два года.

Под данным рис. 4 видно, что в среднем открываемость писем рассылки составляет 55 %, а кликабельность – 21 %. Значит, более половины аудитории открывают письма рассылки и каждый пятый загружает одну статью и более. Более половины аудитории – это

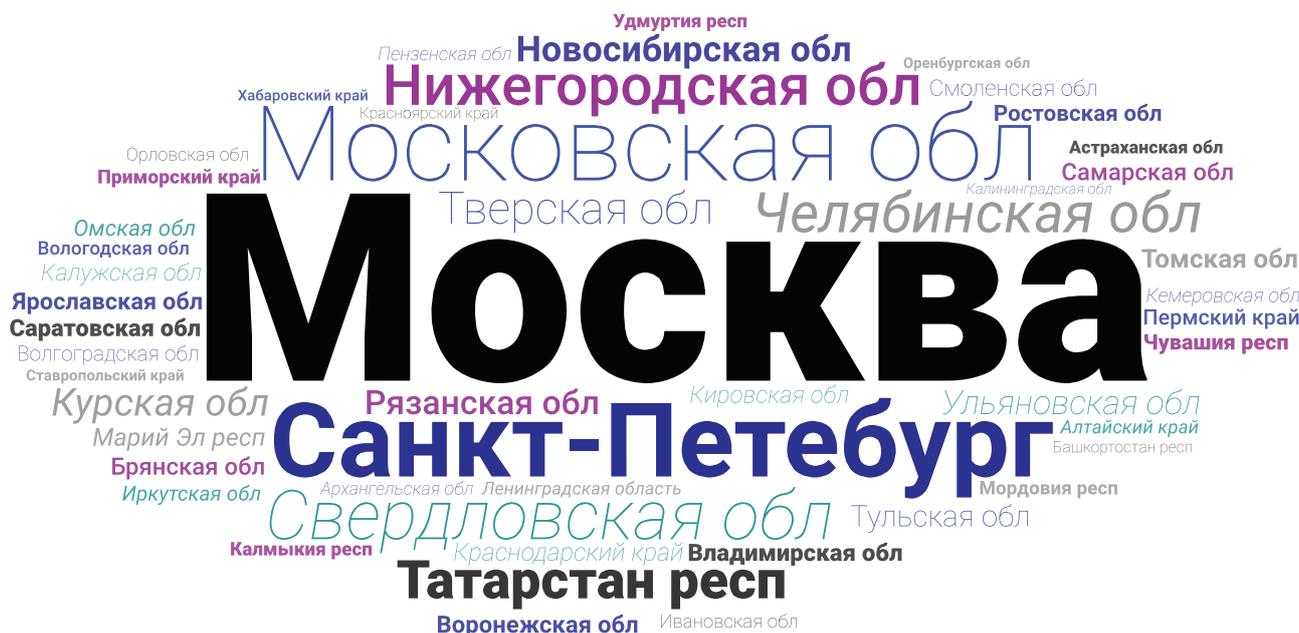


Рис. 5. География подписчиков журнала



500 адресов электронной почты, что превышает бумажный тираж издания на 100 читателей. И к этим адресатам журнал доставляется на рабочую или домашнюю электронную почту.

На основании данных сервиса электронных рассылок определена география наших читателей (рис. 5).

Согласно данным рис. 5, география читателей журнала довольно обширна и составляет 50 из 87 регионов России, что на 8 регионов больше расчета рассылки бумажной версии журнала. А в Москве и Санкт-Петербурге сосредоточено наибольшее число –

12 и 5, соответственно, предприятий Концерна, поэтому в этих городах читателей больше.

Редакция научно-технического журнала «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» постоянно изучает и использует современные методы продвижения в Интернете.

Редакция журнала открыта для диалога с читателями. Предложения по расширению рассылки журнала, 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», г. Москва.



УДК 623.76

С. В. Друзин, В. В. Майоров, Б. Н. Горевич

Создание перспективной системы вооружения войсковой ПВО нового облика

Выполнен ретроспективный анализ развития системы вооружения войсковой ПВО, описаны основные современные тенденции и технологии создания ее элементов. Обоснованы принципы построения и структура перспективной системы вооружения войсковой ПВО. Предложен порядок создания системы вооружения войсковой ПВО нового облика.

Ключевые слова: войсковая ПВО, система вооружения, зенитная ракетная система, разработка.

1. Необходимость и основания создания системы вооружения войсковой ПВО нового облика

Под системой вооружения рода войск (сил), вида (рода) вооруженных сил в общем случае понимается совокупность функционально связанных средств (образцов вооружения), предназначенных для выполнения определенных боевых задач [1].

Система вооружения войсковой ПВО – это совокупность функционально связанных зенитных ракетных (ракетно-артиллерийских) средств, средств разведки и целеуказания, автоматизированных средств управления (АСУ), средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и других средств, служащих для решения задач прикрытия войск от ударов противника, наносимых с воздушных объектов или через воздушную и космическую среду (от ударов средств воздушно-космического нападения – СВКН).

Особенностями вооружения войсковой ПВО по сравнению с ПВО других видов вооруженных сил являются нахождение вооружения в боевых порядках группировок сухопутных войск и применение его для защиты войсковых объектов и инфраструктуры в обороне, наступлении и на марше (в ходе выдвигания на заданные рубежи и позиции), что предполагает необходимость прежде всего высокой мобильности вооружения и устойчивости ко всем видам воздействия противника. При этом нужно учесть, что при использовании вооружения войсковой ПВО в воздушно-десантных войсках (ВДВ) и береговых войсках ВМФ возникают дополнительные требования.

Технический облик системы вооружения войсковой ПВО определяется перечнем входящих в нее образцов вооружения, их характеристиками и свойствами, структурными связями между образцами, а также возможностями в составе систем (комплексов) по решению задач противовоздушной обороны войск во всех видах боевых действий.

Развитие системы вооружения войсковой ПВО, как и других систем вооружения, идет в диалектическом технологическом противостоянии средств нападения и средств обороны (сдерживания нападения). Поступательное развитие технологий создания средств для той и другой сторон приводит к появлению образцов вооружения и способов применения, снижающих эффективность вооружения противника, и к его ответным действиям по созданию более совершенных образцов вооружения. Диалектику этого противоборства можно представить устремленной вверх спиралью (рис. 1), вертикальная ось которой отражает уровень развития базовых технологий создания средств вооружения. Витки в горизонтальной плоскости характеризуют конкретные виды образцов вооружения, созданных на основе этих технологий и обладающих определенными техническими характеристиками и возможностями, обеспечивающими ранее имевшееся преимущество противника в вооружениях.

Каждый виток спирали развития системы вооружения войсковой ПВО проходит за определенный интервал времени, зависящий от уровня развития технологий, а также от наличия у государства производственных и экономических возможностей по их реализации. Смена интервалов спирали развития зависит



Рис. 1. Поступательное развитие вооружения войсковой ПВО

(АГСН ЗУР – активная головка самонаведения зенитной управляемой ракеты; АФАР – активная фазированная решетка)

от степени мобилизации ресурсов государства и, согласно истории развития войсковой ПВО, в мирное время занимает 20–25 лет.

Современный виток технологического противостояния СВКН и вооружения войсковой ПВО, начало которого можно отнести на середину – конец 2010-х гг., характеризуется следующими особенностями.

Со стороны СВКН противника, за счет развития технологий самолето- и ракетостроения, технологий построения средств разведки, связи и управления, происходит всеобъемлющее расширение сферы действия средств нападения по объектам прикрытия войсковой ПВО, идет стирание границ между аэродинамическими и баллистическими средствами нападения, которые могут функционировать в атмосфере, переходном слое и через космос.

Расширяется типаж применяемых средств – от пилотируемых и беспилотных аэродинамических средств различного назначения до гиперзвуковых летательных аппаратов и баллистических ракет с малым уровнем заметности и скоростями до 15–20М. С выходом

США из договора о ликвидации ракет средней и меньшей дальности в перечне средств нападения для войсковой ПВО вновь появляется класс целей, ранее запрещенный Договором, – баллистические ракеты средней дальности (БРСД) – баллистические ракеты (БР) с дальностью пуска 1000–5500 км.

Повышаются возможности противника по массированному нанесению ударов с одновременным использованием большого количества ложных и отвлекающих средств и интенсивных помех. Снижается порог чувствительности к потерям за счет увеличения доли применяемых беспилотных аппаратов, исключения или кратковременного входа пилотируемой авиации в зону действия ПВО на интервал времени применения оружия. Уже к 2025–2030 гг. в зоне обороны во всем диапазоне высот и скоростей средств нападения будут действовать в основном беспилотные аппараты и собственно средства поражения. Практически все оружие, применяемое по элементам боевых порядков ПВО и обороняемых войск, будет высокоточным.



Эти и другие тенденции развития СВКН существенно повышают требования к эффективности вооружения войсковой ПВО, его помехоустойчивости, мобильности и живучести, величине готового к применению боекомплекта (БК) ЗУР.

Соответственно наращиванию возможностей противника с целью парирования его потенциального превосходства развивается технологическая база создания перспективного вооружения войсковой ПВО. Наиболее значимыми тенденциями создания вооружения войсковой ПВО и технологиями, которые разработаны в последние годы, развиваются в настоящее время или могут достичь зрелости в ближайшем будущем, являются следующие.

В создании информационно-разведывательных средств, и прежде всего радиолокационных средств обнаружения и целеуказания:

1. Освоен весь спектр диапазонов активной радиолокации (X, C, S, L, UHF), необходимых для своевременного обнаружения средств нападения различного типа (с учетом их сфер действия, отражающих и летно-технических характеристик) и точного определения их координат. Ведется комплексирование разнодиапазонных средств локации в составе одного образца вооружения, с размещением на едином шасси. При этом существующие технологии конструирования прежде всего антенных устройств позволяют создавать их свертываемыми, с малым временем приведения в готовность, измеряемым единицами – десятками минут.

2. Разработаны технологии создания высокоэффективных средств пассивной радиолокации – радиотехнической разведки (РТР), в том числе малогабаритных, позволяющих комплексовать их в одном образце вооружения со средствами активной локации.

3. В построении антенных систем происходит переход на АФАР и цифровые АФАР (ЦАФАР) с одновременным освоением GaN -технологий создания приемо-передающих модулей, обеспечивается расширение полосы пропускания приемных устройств до 10–15 % от несущей частоты, разработаны уникальные технологии пространственно-временной обработки радиолокационных сигналов, что в совокупности переводит локационные средства по возможностям обнаружения и обработки сигналов

на качественно новый уровень, кардинально повышает канальность, помехозащищенность, дальность действия, их точностные характеристики и надежность.

4. На новый технологический уровень вышло создание оптико-электронных средств (ОЭС), обеспечивающих обнаружение и высокоточное сопровождение целей в условиях интенсивных помех средствам радиолокации.

В создании исполнительных элементов образцов вооружения (средств непосредственного поражения/подавления):

1. Достигнут существенный прогресс в технологиях построения всех функционально-значимых составных элементов ЗУР. Разработаны и развиваются технологии создания высокопотенциальных АГСН с относительно малым диаметром антенного полотна, высокоэнергетических порохов двигателей ракет с удельным импульсом тяги до 2500–2800 Н·с/кг [2], малогабаритных бортовых навигационных и вычислительных средств. В сочетании с освоением технологий высокоплотного монтажа это позволяет, например, уменьшить мидель ракет средней дальности (СД) и дальнего действия (ДД) до 20–30 см, что обеспечивает повышение скорости ракет в атмосфере до 2000–3000 м/с. Совершенствование бортовых пеленгаторов и инерциальных навигационных систем (ИНС), применение высокопроизводительных бортовых вычислителей позволяют снизить величину промаха до единиц метров, а в ряде случаев обеспечивают прямое попадание ракеты в цель. Уменьшение габаритов ЗУР позволяет существенно увеличить возимый боекомплект готовых к применению ракет (для ЗУР СД – до 12–16 единиц на одном типовом шасси), а повышение скорости полета, использование для управления полетом ЗУР преимущественно ИНС с относительно редкой коррекцией с земли и применение АГСН на конечном участке наведения позволяют повысить огневую производительность комплексов, довести канальность ЗРК до 15–20 одновременно обстреливаемых целей.

2. Развитие элементной базы и технологий построения средств РЭБ, в том числе с использованием адаптивных АФАР, позволяет размещать их на одном шасси с локационными средствами огневого комплекса и интегрировать



в единую систему, тем самым создавать универсальное средство поражения/подавления целей.

3. Создание новых технологий построения зенитного артиллерийского вооружения, размещение на снаряде системы наведения позволило существенно повысить точность стрельбы, а использование программного или командного подрыва снаряда с образованием облака поражающих элементов обеспечило создание относительно дешевого и эффективного средства борьбы с новым типом целей – мини- и микробеспилотными летательными аппаратами (БПЛА).

В средствах управления оружием и войсками:

1. Разработаны и развиваются технологии создания высокопроизводительных спецвычислителей и вычислительных машин общего назначения, а также эффективных алгоритмов обработки информации, позволяющие решать весь спектр вычислительных задач – от обработки локационных сигналов в реальном времени, распознавания целей и завязки трасс, до решения задач оптимального распределения огневых и информационных ресурсов в динамике боевых действий противоборствующих сторон.

2. Развитие средств управления в сочетании с развитием средств связи и средств временной синхронизации (единой системы времени) позволяет по-новому решать задачи организации обороны, целераспределения и целеуказания, в том числе создавать единую информационно-управляющую среду, что на порядок повышает помехозащищенность и живучесть системы управления и обеспечивает новое качество процессов обработки информации. Так, за счет совместной обработки информации от различных локационных средств может оперативно формироваться единый пространственно-распределенный локатор наблюдения целей, когерентной обработки их сигналов и наведения ракет.

3. Интеграция информации от средств ПВО в межвидовых (общевойсковых) АСУ стратегического, оперативного и тактического уровней с более детальным учетом положения и возможностей средств ПВО позволяет сократить время на принятие решений и в целом повысить эффективность боевых действий группировки сухопутных войск.

2. Принципы построения и структура перспективной системы вооружения войсковой ПВО

Наличие развитой технологической основы обеспечивает возможность формирования облика перспективной системы вооружения войсковой ПВО, позволяющей парировать существующие тенденции развития СВКН и способов его применения.

Система вооружения войсковой ПВО, исходя из организационной структуры защищаемых войск, традиционно строится по иерархическому принципу. Каждому уровню иерархии войск (стратегическому, оперативному, тактическому) соответствует своя система вооружений ПВО (совокупность образцов вооружений, т. е. зенитных ракетных систем (ЗРС) и комплексов (ЗРК) соответствующего уровня), наиболее эффективная против тех СВКН, которые применяются по прикрываемым войскам (соединениям, частям и подразделениям). Иерархический принцип построения ПВО реализован как в боевых возможностях образцов вооружения, так и в системе управления. Этим обеспечивается управляемость войск, достигается возможность организации ПВО в общей системе решаемых войсками задач по единому замыслу ведения боевых действий.

Вместе с тем реалии современной обстановки, возросшие возможности противника требуют уточнения базового принципа иерархического построения системы вооружения войсковой ПВО. При сохранении иерархии в управлении вооружением ПВО в общей структуре войск имеется необходимость придания системам вооружения отдельных иерархических уровней возможностей по поражению средств нападения, по которым ранее работали системы вооружения смежных уровней.

Так, образцы вооружения ПВО стратегического уровня (ЗРС ДД), решая традиционные задачи противодействия воздушной системе управления и разведки противника за счет недопущения выхода из-за радиогоризонта воздушных командных пунктов (ВКП), самолетов дальнего радиолокационного обнаружения и управления (ДРЛОУ) и разведки, а также отражая удары БРСД и оперативно-тактических ракет (ОТР) по наиболее важным объектам,



одновременно должны принимать участие в отражении массированных ударов средств, являющихся типовыми для ЗРС СД, плотность которых в войнах будущего существенно возрастет.

Образцы вооружения ПВО оперативно-го уровня (ЗРС СД), решая в частности задачи поражения тактической авиации и тактических ракет (ТР), отражая массированные удары крылатых ракет и другие традиционные для них задачи, должны иметь возможность защищать войска от ударов ОТР и в то же время обеспечивать прикрытие объектов и самоприкрытие от малоразмерных беспилотных ударных аппаратов. Опыт боевого применения средств ПВО в современном вооруженном конфликте в Сирии, а также выход США из договора по РСМД позволяют сделать вывод, что такие задачи для ЗРС СД будут типовыми в возможных локальных войнах в среднесрочной перспективе (на ближайшие 15–20 лет).

Из этого следует, что должна быть обеспечена возможность комплексирования систем вооружения, полноценного применения в составе ЗРС ДД средств из состава ЗРС СД, а в системах вооружения средней дальности – средств из состава ЗРС ДД и ЗРС малой дальности (МД). Системной основой комплексирования вооружения является единое разведывательно-информационно-управляющее поле (единые алгоритмы оценки воздушной обстановки и единые протоколы обмена информацией систем вооружения) группировки ПВО. Кроме того, для непосредственного прикрытия позиционных районов под единым управлением должны использоваться средства ПВО ближнего действия (БД) и зенитной артиллерии.

Вместе с необходимостью изменения облика системы вооружения для парирования развития технологий и повышения возможностей противника, необходимо учитывать, что создание новой системы вооружения является дорогостоящей экономической задачей и требует использования технологий и принципов построения вооружения, максимально обеспечивающих снижение затрат на вооружение на всем жизненном цикле, как при его разработке и производстве, так и в процессе эксплуатации.

Единственный способ для разрешения дилеммы создания перспективной системы

вооружения войсковой ПВО, обеспечивающей парирование растущих возможностей СВКН противника (с учетом сохранения иерархической структуры системы вооружения и расширения возможностей образцов вооружения до решения задач вооружения смежных уровней иерархии), и одновременной минимизации затрат на всем жизненном цикле, состоит в использовании принципов *универсальности* и *унификации* построения вооружения.

2.1. Принципы универсальности и унификации построения системы вооружения

Универсальность предполагает использование функционально законченного изделия (средства управления, радиолокационной станции (РЛС), ЗУР, пусковой установки (ПУ), выносного средства связи) в составе систем вооружения различных уровней иерархии войсковых структур. При этом существует определенная функциональная избыточность используемого средства в системах нижних уровней иерархии, которая, однако, компенсируется за счет достигаемых системных преимуществ.

Например, средства управления оружием и войсками (пункты боевого управления (ПБУ), комплексы средств автоматизации (КСА)), имея в своем составе универсальные вычислительные средства и размещаясь на универсальных шасси, могут быть одинаковыми для всех уровней иерархии войсковых структур ПВО и отличаться только специальным программным обеспечением и настройкой органов управления, при наличии универсальной цвето-лингвистической схемы отображения информации. Аналогично могут быть универсальными ПУ, предназначенные для контейнерного размещения и обеспечения пуска ЗУР разных типов. Загрузка ПУ контейнерами с ЗУР определенного типа будет зависеть от решаемых боевых задач. При этом сами разнотипные ЗУР, обладая максимальной автономностью в части системы наведения, являются универсальными для использования в ЗРК различных войсковых структур.

Унификация средств систем вооружения заключается в построении разнотипных изделий с использованием одинаковых (типовых) составных частей (блоков, модулей) и элементов



программного обеспечения. Так, в конструкции ЗУР разного типа могут применяться типовые модули бортовой аппаратуры и оборудования (ИНС, приемо-ответчики, ГСН и даже корпус отдельных ступеней). При этом ЗУР будут отличаться, например, используемым разгонным двигателем и мощностью передатчиков АГСН. Подобным же образом должна обеспечиваться унификация конструкции радиолокаторов – за счет использования типовых блоков аппаратуры и оборудования и комплектования антенного полотна ФАР нужных размеров типовыми антенными модулями.

Основным положительным системным результатом универсальности и унификации построения вооружения является существенное снижение стоимости его разработки и производства, а также сокращение эксплуатационных затрат за счет уменьшения объемов запасных частей, сокращения номенклатуры и численности средств войскового ремонта и эксплуатации системы вооружения. Сокращение численности средств ремонта и эксплуатации одновременно повышает мобильность системы вооружения.

Помимо внутренней (внутри рода войск) унификации средств войсковой ПВО, необходимо обеспечить их межвидовую унификацию со средствами ПВО ВКС и ПВО ВМФ – на уровне изделий (использование однотипных ЗУР и РЛС) и на уровне их составных частей. Такая унификация снизит стоимость изготовления и эксплуатации вооружения, повысит возможности по его ремонту за счет использования сети ремонтных органов видов вооруженных сил, обеспечит быстрое восстановление в войсковых ремонтных органах группировки войск (сил) поврежденного вооружения в военное время. При этом межвидовая унификация средств ПВО возможна с учетом выполнения специфических (повышенных) требований, предъявляемых к маневренным возможностям вооружения войсковой ПВО и его массогабаритным характеристикам.

2.2. Принципы построения отдельных образцов вооружения

2.2.1. *Согласованность технических характеристик образцов.* Образцы вооружения, входящие в единую систему вооружения, должны быть согласованы по своим техническим характеристикам. Средства обнаружения

целей (СОЦ) по своим зонам действия, пропускной способности, точностным характеристикам должны обеспечивать своевременное обнаружение аэродинамических и баллистических целей различного типа и выдачу по ним информации на РЛС стрельбовых средств для последующего вывода ракет на дальнюю границу зоны поражения и наведения ракет на цели с необходимой точностью. РЛС стрельбовых средств должны обеспечивать ЗУР информацией необходимой точности на рубежах, обеспечивающих полную реализацию их летно-технических характеристик, позволяющих поражать цели на дальней границе и в глубине зоны поражения до нанесения целями ущерба прикрываемым объектам. Величина БК ЗУР, скоростные характеристики ЗУР и система управления ими, пропускные способности стрельбовых РЛС и СОЦ должны быть согласованными и обеспечивать отражение массивных ударов различных типов СВКН.

Завышение возможностей отдельных образцов вооружения по сравнению с другими является экономически нецелесообразным, а занижение их характеристик – недопустимым.

Образцы вооружений разных уровней иерархии системы вооружений должны быть согласованы по возможностям обороны от всего спектра действующих СВКН: от малоскоростных малоразмерных БПЛА до баллистических целей (БЦ) и гиперзвуковых летательных аппаратов.

2.2.2. *Совместимость создаваемых и существующих средств.* Должна быть обеспечена полная информационная и аппаратная совместимость создаваемых и существующих средств без доработки последних. Это предполагает, что новое средство в составе системы должно выполнять в полном объеме функции заменяемого средства того же типа без каких-либо конструктивно-технических изменений взаимодействующих с ним существующих средств.

Вместе с этим не исключается возможность определенной модернизации существующих средств в случае, если ввод нового средства в состав системы вооружения ведет к значительному росту ее эффективности и экономически обоснован. Так, например, создаваемые пусковые установки с ЗУР МД могут быть интегри-



рованы в существующие ЗРС СД после определенной их модернизации.

2.2.3. Принципы построения радиолокационных средств. Стрельбовые РЛС должны обеспечивать ЗУР информацией с требуемой точностью для наведения их на цели и иметь достаточную пропускную способность для одновременного наблюдения целей и взаимодействия с наводимыми на них ЗУР. Высокие плотности ударов СВКН и необходимость быстрого переброса луча по наблюдаемым объектам в сравнительно больших рабочих секторах ЗРК СД и ДД определяют необходимость построения их РЛС на основе АФАР, ЦАФАР. В ЗРК МД, имеющих меньшие зоны действия, могут применяться пассивные ФАР (ПФАР) и АФАР. Точностные характеристики стрельбовых РЛС обеспечиваются при использовании X-, C-диапазонов волн и применении широкополосных сигналов.

Маловысотные РЛС обнаружения целей в составе стрельбовых комплексов, исходя из необходимости беспровального наблюдения целей на фоне подстилающей поверхности и с учетом прогнозируемых плотностей ударов МВЦ, могут быть построены на базе ПФАР или АФАР С-диапазона волн, с обязательным подъемом антенны для удаления линии радиогоризонта.

Одними из наиболее сложных целей являются головные части (ГЧ) БРСД. Поражение таких целей обеспечивается ЗРК ДД.

РЛС обнаружения и сопровождения баллистических целей из состава ЗРК ДД, исходя из требований мобильности средств ЗРК, величины эффективной поверхности рассеивания (ЭПР) ГЧ БРСД, необходимости высокой точности оценки координат цели, могут быть построены на базе АФАР S-, L-диапазонов волн.

На командном пункте (КП) ЗРС ДД для работы по целям типа ГЧ БРСД, исходя из необходимости обнаружения БЦ на больших дальностях, должны использоваться РЛС с АФАР L-, UHF-диапазонов волн. В этом диапазоне потери сигнала на прохождение атмосферы при сканировании барьерной зоны при поиске выходящих из-за горизонта БЦ минимальны и в то же время за счет резонансного эффекта БЦ имеют максимальную ЭПР.

РЛС обнаружения аэродинамических целей, входящие в состав СОЦ КП ЗРС ДД, по условиям точности и производительности, могут быть построены на базе АФАР S-, L-диапазонов волн.

Аналогичным образом, исходя из требуемых дальностей действия, точностных характеристик и пропускной способности, с учетом обеспечения мобильности, определяется облик СОЦ огневых средств СД, МД, а также КП бригад войсковой ПВО.

2.2.4. Принципы построения ЗУР и их систем наведения. В основу конструктивного построения ЗУР должна быть положена минимизация миделя ракеты для повышения ее скоростных характеристик. Скорость ракеты, в свою очередь, определяет зону ее действия, располагаемые перегрузки ракеты и возможности по выбору промаха, а также огневую производительность комплекса. Снижение габаритов ЗУР также обеспечивает увеличение боекомплекта ЗУР, размещаемых на ПУ. Ограничениями для уменьшения миделя являются: достигнутая плотность монтажа бортовой аппаратуры, диаметр антенны бортового пеленгатора и величина поперечного сечения сопла двигателя, определяющая требуемую скорость истечения газов.

Для ЗУР СД, ДД и особенно ЗУР перехвата БЦ выше атмосферы должна быть обеспечена возможность гибкого программного расходования топлива в зависимости от профиля полета ЗУР – для экономии топлива плотные слои атмосферы должны преодолеваются на относительно низких скоростях. В то же время для увеличения дальней границы перехвата средняя скорость ракеты должна быть максимальной.

Набор ЗУР, входящих вместе с ПУ в состав ЗРК (батарей) разного типа, должен позволять решать весь спектр огневых задач по отражению налетов (ударов) СВН заданных для ЗРК типов. Для этого стрельбовый локатор должен обеспечивать одновременное наведение ракет различного типа. В связи с этим система наведения ракет должна быть унифицирована.

Унификация системы наведения ракет может быть достигнута за счет использования на большей части траектории полета управления с радиокоррекцией. При такой системе управ-



ления команды управления полетом вырабатываются непосредственно на борту по данным бортовой ИНС о положении ракеты, а корректирующая информация о текущем положении ракеты и цели передается наземным локатором унифицированным для разных типов ракет кодом. Временной интервал сигналов коррекции – адаптивный, определяется динамикой полета и текущими ошибками наведения. Приемопередатчик ЗУР должен работать в частотном диапазоне стрельбового локатора, что, с учетом возможности использования ракет под управлением локаторов разного типа, может быть достигнуто многодиапазонностью приемопередатчика ракеты или наличием набора ЗУР с приемопередатчиками, настроенными на частоту определенного локатора.

На заключительном участке траектории в случае, если точность инерциального наведения с радиокоррекцией недостаточна (что характерно для ракет систем средней и большой дальности), ракета наводится по данным бортового пеленгатора (пассивного, полуактивного или активного). Использование бортовых пеленгаторов необходимо также в ракетах, применяемых по высокоскоростным, малоразмерным и маневренным целям. Выбор типа ракеты в зависимости от типа цели осуществляется автоматически системой подготовки пуска.

Применение метода радиокоррекции для наведения ЗУР, помимо универсальности их применения в ЗРК различных типов, повышает целевую канальность огневых средств по сравнению с командным наведением ввиду снижения частоты обращения к ракете. Аналогичный эффект имеет использование АГСН в составе ЗУР, однако при этом возрастает стоимость ракеты.

2.2.5. Принципы построения ПБУ. ПБУ ЗРС решает задачи приведения в готовность подчиненных ЗРК, целераспределения и выдачи целеуказания стрельбовым комплексам ЗРС.

ПБУ должен быть универсальным (УПБУ), типовым для ЗРС ДД, СД, МД. Отличие УПБУ различных типов ЗРС определяется составом и настройкой органов управления рабочих мест, а также загруженным специальным программным обеспечением и особенностями

реализации единой для всех типов ЗРС цветолингвистической схемы отображения информации.

2.2.6. Шасси образцов вооружения системы вооружения. С целью снижения стоимости и повышения ремонтпригодности должна быть обеспечена максимальная унификация шасси средств ПВО между собой, со средствами технического обеспечения (ремонта вооружения и подвоза ракет) и со средствами вооружения в общей группировке войск. Исходя из этого, базовое шасси средств бригадного уровня – колесное. КП и СОЦ в составе ЗРС размещаются на шасси, аналогичных шасси средств ЗРК.

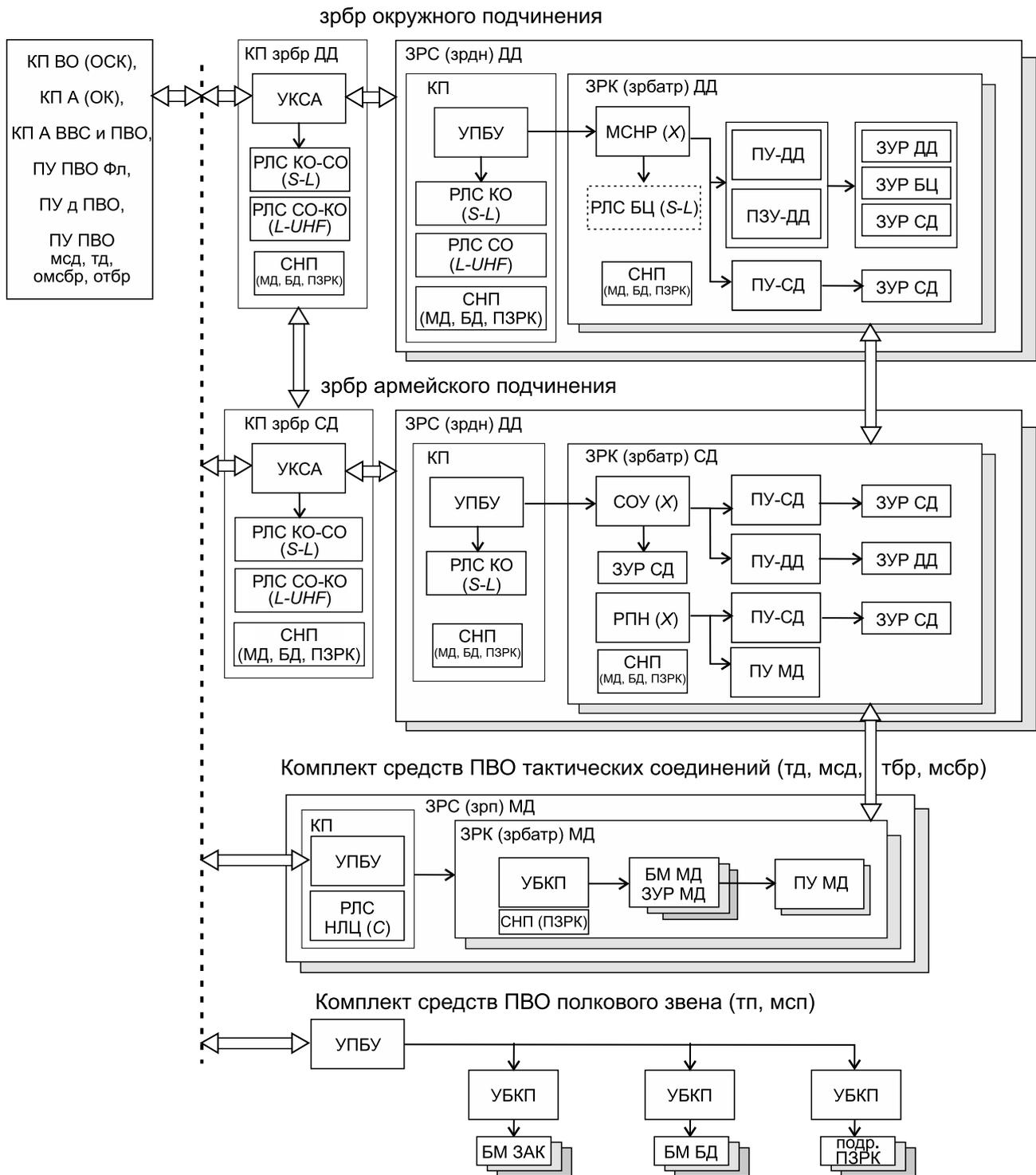
Все наземные средства ЗРК (батарей) для повышения их мобильности и проходимости при организации боевых порядков в составе войск размещаются на гусеничном шасси. При этом следует учесть необходимость создания ЗРК СД, МД и БД на колесном шасси для общевойсковых соединений и частей на бронетранспортерах (БТР), а также выполнение требований по плавучести (для морской пехоты) и десантированию (для ВДВ).

2.3. Структура перспективной системы вооружения войсковой ПВО

Возможный вариант структуры системы вооружения войсковой ПВО, обеспечивающей организацию ПВО группировки войск (сил) на стратегическом направлении, построенной с использованием рассмотренных выше принципов, приведен на рис. 2.

В приведенной структуре система вооружения обеспечивает решение задач ПВО на трех уровнях – стратегическом, оперативном и тактическом. Согласно этому, в структуре системы вооружения показаны ЗРС трех типов – ДД, СД и МД. Средства ПВО полкового звена для облегчения восприятия показаны схематично.

В данной структуре на различных уровнях иерархии используются универсальные средства управления – универсальный КСА (УКСА), универсальный ПБУ, универсальный батарейный командирский пункт (УБКП), и универсальные РЛС различного типа. Состав оборудования и аппаратуры отдельных средств максимально унифицирован.



← – обмен информацией в едином информационном пространстве; ВО – военный округ; ОСК – оперативно-стратегическое командование; А – армия; ОК – оперативное командование; ПУ ПВО – пункт управления ПВО; ПУ д ПВО – пункт управления дивизии ПВО; мсд – мотострелковая дивизия; тд – танковая дивизия; омсбр – отдельная мотострелковая бригада; отбр – отдельная танковая бригада; збр – зенитная ракетная бригада; зрбатр – зенитная ракетная батарея; КО – круговой обзор; СО – секторный обзор; МСНР – многофункциональная станция наведения ракет; СНП – средства непосредственного прикрытия; ПЗУ – пуско-заряжающая установка; НЛЦ – низколетящие цели; БМ – боевая машина; ЗАК – зенитно-артиллерийский комплекс; ПЗРК – переносной зенитно-ракетный комплекс.

Рис. 2. Вариант структуры перспективной системы вооружения ПВО группировки войск (сил) на стратегическом направлении



Показана возможность обмена информацией между всеми информационными средствами ЗРК и ЗРС различных уровней и решения в едином информационном поле задач обнаружения и сопровождения целей, целераспределения и наведения ракет. Учтено взаимодействие КП бригад различных типов с КП общевойсковых формирований соответствующих уровней, а также межвидовое взаимодействие сил и средств ПВО (взаимодействие со средствами ПВО ВКС и флота).

При сохранении принципа иерархической подчиненности войсковых формирований предусмотрена возможность использования в ЗРК определенного уровня ПУ и ЗУР комплексов других (смежных) уровней. Применение ЗУР определенного типа в ЗРК смежных уровней обеспечивается описанной выше универсализацией системы управления ЗУР. При этом передача ЗУР в состав ЗРК смежного уровня возможна вместе с передачей ПУ или же, что предпочтительнее, обеспечивается с помощью универсальных ПУ с контейнерным размещением на ПУ комплексов ЗУР различного типа.

Учтены особенности ЗРК ДД для работы по целям типа ГЧ БРСД с использованием ЗУР специального типа – ЗУР БЦ. Такая ЗУР отличается применением на большей части траектории полета (вне атмосферы) газодинамического управления, использованием специального боевого снаряжения, обеспечивающего поражение малоразмерных высокоскоростных целей с прочным корпусом, а также наличием оптоэлектронного или *Ka*-бортового пеленгатора, позволяющего минимизировать величину промаха. Для решения задач перехвата БЦ с использованием ЗУР БЦ может быть создан специальный ЗРК, имеющий в своем составе специализированную РЛС БЦ *X*-диапазона или же многофункциональную РЛС на базе АФАР (ЦАФАР) с повышенными возможностями наблюдения целей и наведения ракет.

Принципиально новым элементом ЗРК МД, показанным на схеме, является ПУ МД, представляющая собой мобильную установочноситель большого количества ЗУР МД. Этот элемент может быть использован в составе как ЗРК МД, так и ЗРК СД.

Конкретная проработка структуры системы вооружения выполняется при дальнейшей разработке технического облика системы вооружения.

3. Порядок создания системы вооружения войсковой ПВО нового облика

Ввиду необходимости кардинальных изменений как в построении отдельных средств вооружения ПВО, так и всей системы вооружения в целом, задача создания (разработки и производства) системы вооружения на описанных принципах является существенно дорогостоящей.

Принцип универсализации отдельных средств, закладываемый в построение системы вооружения, позволяет снизить общую стоимость создания системы за счет распределения разработки универсальных средств разного типа по отдельным комплексным ОКР, выполняемым по взаимосвязанным тактико-техническим заданиям на разработку.

При значительных ограничениях финансирования разработки системы вооружения процесс ее создания может быть распределен во времени. При этом в рамках существующих финансовых ограничений первоочередной разработке и производству подлежат те универсальные средства и составные части средств, которые обеспечивают максимальный прирост эффективности системы вооружения. Эффективность системы вооружения должна оцениваться с учетом развития средств нападения противника на момент готовности средств ПВО и поступления их в войска. В последующем, по мере финансирования, создаются средства, влияющие на эффективность системы вооружения в меньшей степени.

Переход на новые, преимущественно цифровые технологии построения средств вооружения, позволяет существенно унифицировать их составные части. На рис. 3 приведен обобщенный перечень составных частей основных средств вооружения создаваемой системы ПВО.

Фактически неунифицированными являются только исполнительные элементы средств вооружения, которые и определяют особенность средств различного уровня иерархии. Например, для РЛС к таким уникальным составным частям относятся антенные элементы фазиро-

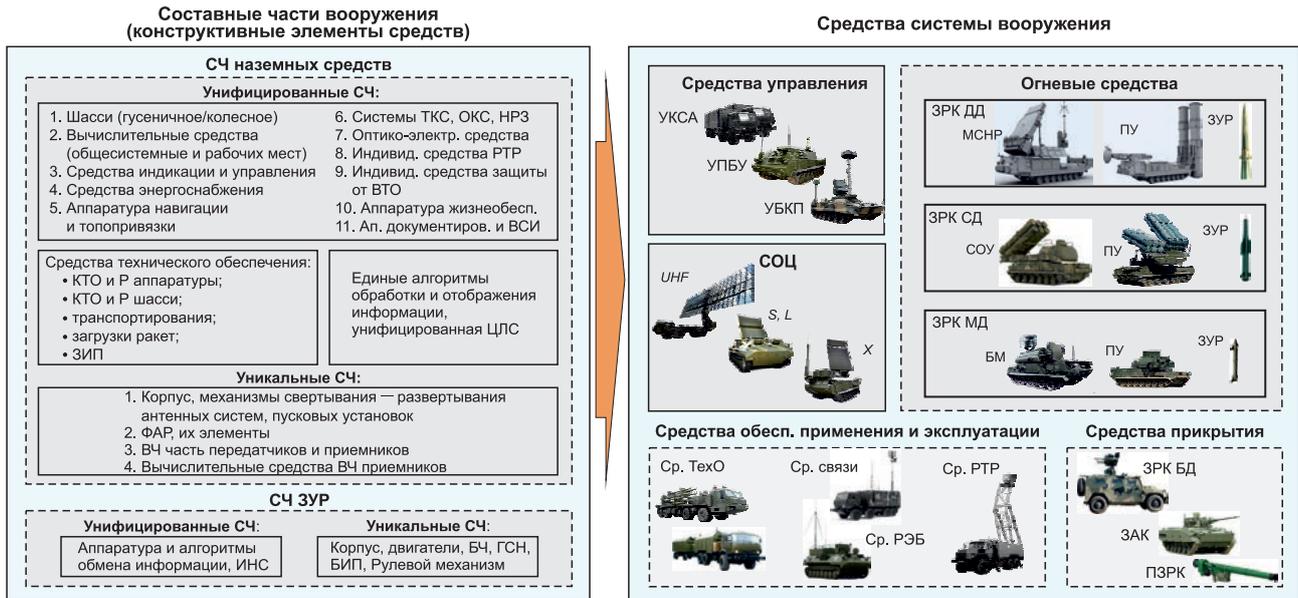


Рис. 3. Проектирование системы вооружения на основе максимальной конструктивной унификации (БИП – бортовой источник питания (ракеты); СЧ – составная часть; ТехО – техническое обеспечение)

ванных решеток, высокочастотные устройства приемопередачи, устройства свертывания/развертывания, корпус образца вооружения. Унификации в средствах управления и радиолокационных средствах подлежат шасси, вычислительные средства различного типа, средства индикации, энергооборудование, аппаратура навигации и топопривязки, системы телекодовой, оперативно-командной связи (ТКС и ОКС), наземные радиолокационные запросчики (НРЗ), индивидуальные средства радиотехнической разведки (РТР) и защиты от высокоточного оружия (ВТО), аппаратура документирования (объективного контроля) и внутрисистемной информации (ВСИ) и другие, в соответствии с рис. 3.

Унификация составных частей средств вооружения одновременно приводит к унификации средств технического обеспечения (комплексного технического обслуживания и ремонта – КТО и Р), в том числе подвоза и зарядки ЗУР, и к сокращению объемов транспортируемых запасных элементов.

Исходя из принципа максимального прироста эффективности системы вооружения на единицу выделяемых финансовых средств, а также с учетом степени готовности имеющихся технологий приоритетность разработки средств вооружения может быть следующей.

Первоочередной разработке подлежат средства управления бригад и дивизионов

(УКСА и УПБУ соответственно), в том числе вычислительные средства и алгоритмы, обеспечивающие организацию обороны и управления средствами вооружения, а также средства связи. Основной задачей является переход на новые принципы обмена информацией и ее обработки в едином информационном поле. На этом пути с учетом существующего технологического задела, в сравнительно короткие сроки обеспечивается максимальный прирост эффективности за счет повышения живучести системы вооружения, а также более полного использования потенциальных возможностей отдельных средств.

Создаваемые новые средства управления должны обеспечивать полную информационную и аппаратную совместимость с уже существующими средствами системы вооружения ПВО.

Дальнейшими задачами, в соответствии с развитием противника, является создание СОЦ, а также средств огневых комплексов. При этом в составе этих средств могут быть использованы унифицированные модули (вычислительные средства, средства индикации и др.) из состава созданных УКСА и УПБУ.

Одновременно или в последующем (в зависимости от финансирования) должны создаваться ЗУР с новыми принципами управления и методами наведения, в том числе ЗУР БЦ. При этом нужно учитывать, что создание такой ЗУР – чрезвычайно сложная задача, требующая



больших финансовых и временных затрат, однако эта задача является безальтернативной ввиду высокой значимости защиты обороняемых объектов группировки войск от ударов БРСД.

Проработка очередности создания средств вооружения, разрабатываемых на базе применения унифицированных составных частей, выполняется в ходе дальнейших работ по разработке технического облика системы вооружения.

Создаваемые средства должны предусматривать их дальнейшую модернизацию за счет ввода создаваемых унифицированных частей без кардинальных изменений корпуса и шасси. При вводе новых элементов должна соблюдаться

преимущество – на основе имеющегося шасси должна обеспечиваться совместимость новых составных частей с уже имеющимся (обновленным ранее) оборудованием и аппаратурой.

Список литературы

1. Словарь военных терминов. М.: Изд-во ВАГШ ВС РФ, 2017. 221 с.
2. Проектирование зенитных управляемых ракет / под ред. *И. С. Голубева, В. Г. Светлова*. М.: Изд-во МАИ, 2001. 732 с.

Поступила 27.01.20

Друзин Сергей Валентинович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научно-техническому развитию – первый заместитель генерального конструктора АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», г. Москва. Область научных интересов: системный анализ, радиолокация.

Майоров Вячеслав Викторович – кандидат военных наук, начальник штаба – первый заместитель начальника войсковой ПВО Вооруженных сил Российской Федерации, г. Москва. Область научных интересов: системный анализ, военное искусство.

Горевич Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор, руководитель проекта АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», г. Москва. Область научных интересов: системный анализ, радиолокация.

An advanced new-look tactical air defense armament system

The study looks back at the development of the tactical air defense armament system, and describes the main current trends and technologies for creating its elements. The principles of construction and the structure of the advanced tactical air defense armament system are substantiated. A procedure has been proposed for creating a new-look tactical air defense armament system.

Keywords: tactical air defense, armament system, anti-aircraft missile system, development.

Druzin Sergey Valentinovich – Candidate of Engineering Sciences, Deputy General Director for Scientific and Technical Development – First Deputy General Designer, the “Almaz – Antey” Air and Space Defense Corporation, Joint Stock Company, Moscow. Science research interests: system analysis, radar.

Mayorov Vyacheslav Viktorovich – Candidate of Military Sciences, Executive Officer – First Deputy Chief of Tactical Air Defense of the Armed Forces of the Russian Federation, Moscow. Science research interests: system analysis, military art.

Gorevich Boris Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Project Officer, the “Almaz – Antey” Air and Space Defense Corporation, Joint Stock Company, Moscow. Science research interests: system analysis, radar.



УДК 621.396.96

В. Я. Мизрохи

Влияние подстилающей морской поверхности на угловые измерения радиолокационной головки самонаведения

Впервые по результатам пусков зенитных ракет по низколетящим над морской поверхностью противокорабельным ракетам была предпринята попытка построить модель влияния подстилающей морской поверхности на угловые измерения активной радиолокационной головки самонаведения. Выявлен фактор, характеризующий это влияние, и показано, что он является определяющим точность самонаведения («определяющий фактор»).

Ключевые слова: зенитный ракетный комплекс, зенитная управляемая ракета, противокорабельная ракета, радиолокационная головка, диаграмма направленности, активная головка самонаведения.

Защита кораблей Военно-морского флота (ВМФ) от противокорабельных ракет (ПКР) является важнейшей задачей зенитных ракетных комплексов. Такие ракеты представляют наибольшую угрозу для кораблей ВМФ.

Зенитные ракетные комплексы, использующие теленаводящиеся зенитные управляемые ракеты (ЗУР), не способны обеспечить поражение низколетящих ПКР с требуемой вероятностью. Только при использовании радиолокационного самонаведения на конечном участке полета появляется возможность решить задачу поражения низколетящих над морем ПКР с требуемой вероятностью.

При использовании радиолокационного самонаведения для перехвата низколетящих целей важно определить влияние подстилающей морской поверхности на угловые измерения активной радиолокационной головки самонаведения (АРГС).

Проблема влияния подстилающей морской поверхности на угловые измерения радиолокационной головки при самонаведении на низколетящие над морем цели рассмотрена во многих публикациях, в том числе в статьях автора: «Определение дальности углового разрешения радиолокационной головкой самонаведения низколетящих над морем целей» (Радиотехника, 2001, № 12); «Построение алгоритмов управления зенитной ракетой с активной радиолокационной головкой самонаведения при наведении на низколетящие цели на фоне подстилающей морской поверхности» (Полет, 2015, № 10).

В «Справочнике по радиолокации» М. Скольника [1] в разд. 8.7 «Теория отражения радиолокационных сигналов от морской поверхности» отмечено, что создать достаточно реалистическую модель моря оказалось очень трудно.

В настоящей статье, соглашаясь с мнением М. Скольника, автор не пытается построить радиолокационную модель моря, а ставит своей задачей построение модели влияния подстилающей морской поверхности на угловые измерения радиолокационной головки самонаведения.

Эта задача решалась на основе анализа натуральных экспериментов одной из зенитных управляемых ракет с АРГС при самонаведении на низколетящие над морской поверхностью цели. Ниже приведены материалы натуральных экспериментов.

Для анализа были использованы телеметрические записи угловых отклонений линии визирования цели от оси диаграммы направленности антенны АРГС в той плоскости, где они оказались наибольшими: del_eps_pf ; del_bet_pf (в вертикальной и горизонтальной плоскостях) или $DEYMS$, $DEZMS$ (в наклонных плоскостях).

Угловые отклонения линии визирования цели от оси диаграммы направленности антенны АРГС в зависимости от времени, оставшегося до точки встречи τ , представлены на рис. 1. Угловые отклонения линии визирования цели от оси диаграммы направленности антенны АРГС измерялись в двух системах координат (рис. 2). Обозначения на рис. 2 соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 1.

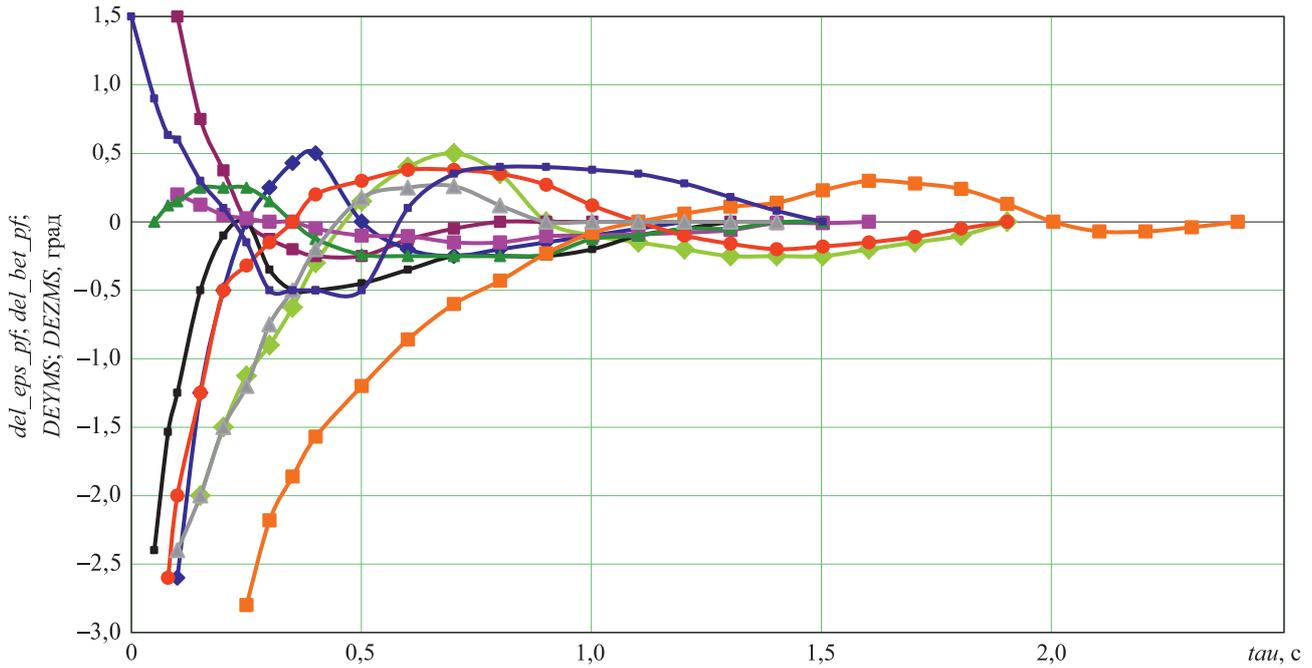


Рис. 1. Угловые отклонения линии визирования цели от оси диаграммы направленности антенны АРГС:
 — $del_eps_pf_1$; — $del_bet_pf_3$; — $del_eps_pf_4$; — $del_bet_pf_4$; — $del_eps_pf_5$;
 — $del_eps_pf_6$; — $del_eps_pf_7$; — $del_eps_pf_8$; — $del_eps_pf_10$; — $DEYMS_2$

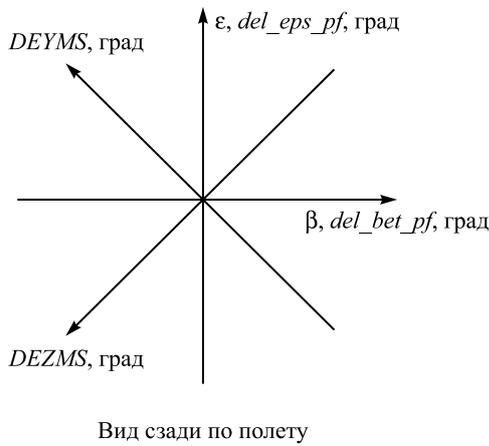


Рис. 2. Угловые отклонения линии визирования цели от оси и диаграммы направленности антенны АРГС

По результатам анализа натурных экспериментов с исследуемой ракетой построена «модель влияния подстилающей морской поверхности на угловые измерения активной радиолокационной головки самонаведения».

Угловые отклонения оси диаграммы направленности антенны АРГС от направления на цель пропорциональны реализовавшемуся промаху, что следует из известных геометрических соотношений.

Величина промаха составляет

$$h_\epsilon = \omega_\epsilon V \tau^2,$$

$$h_\beta = \omega_\beta V \tau^2,$$

где h_ϵ , h_β – промахи по осям ϵ и β соответственно;

ω_ϵ , ω_β – проекции угловой скорости линии визирования на оси (ϵ , β);

V – модуль относительной скорости сближения;

τ – время полета до точки встречи.

Угловые скорости линии визирования связаны с угловыми отклонениями оси антенны АРГС от направления на цель $DEPS$, $DBET$ соотношениями

$$\omega_\epsilon = DEPS \cdot DG,$$

$$\omega_\beta = DBET \cdot DG,$$

где DG – добротность АРГС.

Отсюда проекции промаха на соответствующие оси выражаются через соответствующие проекции угловых отклонений оси антенны АРГС соотношениями:

$$h_\epsilon = DEPS \cdot DG \cdot V \tau^2,$$

$$h_\beta = DBET \cdot DG \cdot V \tau^2.$$

На рис. 3 изображена типичная картина наведения ракеты на цель на конечном участке полета перед точкой встречи ($\tau = 0$) в виде

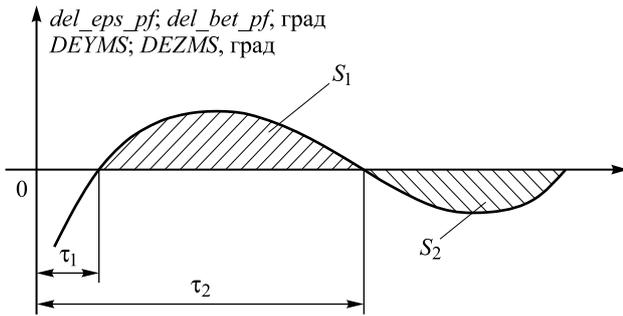


Рис. 3. Кривая угловых отклонений линии визирования цели:

S_1, S_2 – площади под соответствующими участками кривой

кривой угловых отклонений линии визирования цели от оси диаграммы направленности антенны АРГС.

В качестве «определяющего фактора» принята разность

$$S_1\tau_1 - S_2\tau_2. \quad (1)$$

Смысл «определяющего фактора» заключается в следующем.

Команда управления, вызывающая ускорение ракеты $W_{p\perp}$, пропорциональна угловым отклонениям диаграммы направленности головки самонаведения от линии визирования цели, т. е. del_eps_pf, del_bet_pf .

$$W_{p\perp} \doteq del_eps_pf, del_bet_pf. \quad (2)$$

Произведение ускорения ракеты на интервал времени его действия пропорционально создаваемой составляющей скорости ракеты нормальной к линии визирования:

$$S_1, S_2 \doteq W_{p\perp}\tau = V_{p\perp}. \quad (3)$$

Произведение $S_1\tau_1$, где τ_1 – время, оставшееся до точки встречи (см. рис. 3), пропорционально произведению $V_{p\perp}\tau_1$:

$$S_1\tau_1 \doteq V_{\perp 1}\tau_1. \quad (4)$$

Здесь $V_{\perp 1}\tau_1$ вызывает промах h_1 . Аналогично $V_{\perp 2}\tau_2$ вызывает промах h_2 .

Эти соотношения поясняют смысл «определяющего фактора», который заключается в том, что он пропорционален результирующему промаху:

$$|S_1\tau_1 - S_2\tau_2| \doteq h_1 - h_2 = h. \quad (5)$$

Величины реализовавшихся в экспериментах промахов приведены в таблице в относительном виде \bar{h} (отнесены к величине максимального реализовавшегося промаха).

Результаты экспериментов по самонаведению на низколетящую цель и значение «определяющего фактора»

№ эксперимента	Высота полета цели, м	$ S_1\tau_1 - S_2\tau_2 $	\bar{h}
1	232	0,052800	1,000
2	50	0,011000	0,208
3	200	0,016200	0,396
4	83	0,022500	0,438
5	290	0,026500	0,497
6	250	0,024000	0,466
7	68	0,026000	0,498
8	50	0,041400	0,863
9	300	0,005760	0,122
10	200	0,042800	0,859
11	75	0,001837	0,030

Представим относительные величины промахов, реализовавшихся в экспериментах, в зависимости от «определяющего фактора», и аппроксимирующую их функцию.

Аппроксимирующая функция имеет вид

$$\bar{h} = 20|S_1\tau_1 - S_2\tau_2|. \quad (6)$$

Для оптимального алгоритма управления величина относительного промаха связана с «определяющим фактором» соотношением

$$\bar{h} = 1,05|S_1\tau_1 - S_2\tau_2|. \quad (7)$$

Абсолютные величины реализовавшихся промахов зависят не только от «определяющего фактора», но и от быстродействия системы стабилизации и алгоритма управления.

ЗУР, использованные в экспериментах, обладают высоким быстродействием системы стабилизации, однако алгоритм управления ЗУР не является оптимальным.

Графическое изображение этих функций (6), (7) и величины относительных промахов, реализовавшиеся в пусках, представлены на рис. 4.

Телеметрические данные экспериментов позволили определить статистические характеристики промаха:

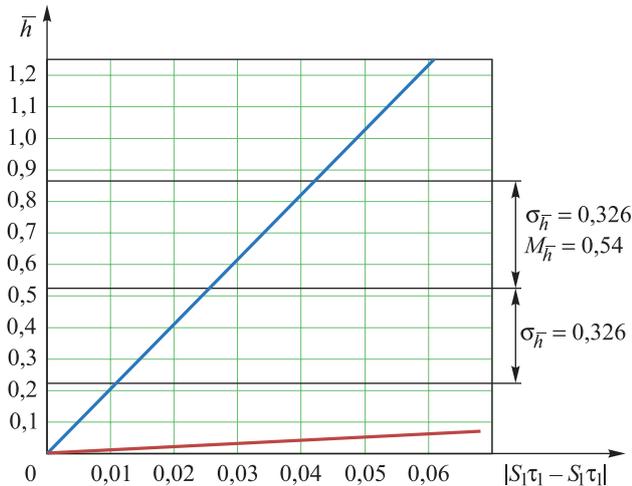


Рис. 4. Зависимости относительного промаха \bar{h} от «определяющего фактора»:

— для экспериментальной ракеты, согласно (6), $\bar{h} = 20|S_1\tau_1 - S_2\tau_2|$; — для ракеты с «оптимальным» алгоритмом управления, согласно (7), $\bar{h} = 1,052|S_1\tau_1 - S_2\tau_2|$

- математическое ожидание относительного промаха

$$M_{\bar{h}} = 0,54; \quad (8)$$

- среднеквадратическое значение относительного промаха

$$\sigma_{\bar{h}} = 0,326. \quad (9)$$

Это дало возможность, используя зависимость (6), перейти к статистическим характеристикам «определяющего фактора»:

$$\begin{cases} M|S_1\tau_1 - S_2\tau_2| = 0,0265; \\ \sigma|S_1\tau_1 - S_2\tau_2| = 0,015. \end{cases} \quad (10)$$

Выражение (10), по сути, представляет собою модель влияния подстилающей морской поверхности на точность самонаведения.

Для оптимального алгоритма управления зависимость относительного промаха от «определяющего фактора» выражается соотношением (7), а статистические оценки точности самонаведения составляют:

$$\begin{aligned} M_{\bar{h}} &= 0,05; \\ \sigma_{\bar{h}} &= 0,108. \end{aligned} \quad (11)$$

Зависимость относительного промаха от «определяющего фактора» (рис. 4) позволяет определить понятие «сильного» и «слабого» влияния подстилающей морской поверхности на угловые измерения АРГС и в результате на точность самонаведения на низколетящие цели.

Если принять в качестве критерия «сильного» влияния воды величину «определяющего фактора», вызывающего относительный промах $\bar{h} \geq 0,2$, то это будет означать, что «сильное» влияние воды проявляется при величине «определяющего фактора», превышающего значение 0,01, т. е. соответствующего

$$|S_1\tau_1 - S_2\tau_2| \geq M - \sigma. \quad (12)$$

Таким образом, приведенные в данной работе материалы анализа экспериментальных работ ЗУР с активной радиолокационной головкой при самонаведении на низколетящие над морской поверхностью цели дали возможность выявить фактор, определяющий влияние подстилающей морской поверхности на угловые измерения АРГС и в итоге на точность самонаведения – «определяющий фактор».

Это позволило построить статистическую модель влияния подстилающей морской поверхности на угловые измерения активной радиолокационной головки самонаведения и выработать рекомендации по построению алгоритма управления.

Список литературы

1. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольникова. М.: Советское радио, 1976.

Поступила 21.10.19

Мизрохи Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор, советник генерального конструктора АО МКБ «Факел имени академика П. Д. Грушина», г. Химки, Московская обл.

Область научных интересов: управление зенитными ракетами, динамика полета зенитных управляемых ракет.



The effect of the underlying sea surface on the angular measurements of the radar homing head

For the first time, based on the results of anti-aircraft missile launches against anti-ship missiles flying low over the sea surface, an attempt was made to build a model of the effect of the underlying sea surface on the angular measurements of an active radar homing head. The factor determining this effect is revealed, and it is shown that this factor determines the accuracy of homing, i.e. it is the determining factor.

Keywords: anti-aircraft missile system, anti-aircraft guided missile, anti-ship missile, radar head, radiation pattern, active homing head.

Mizrokhi Vladimir Yakovlevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Advisor to the General Designer, Engineering Design Bureau “Fakel” named after Academician P. D. Grushin, Joint Stock Company, Khimki, Moscow Region.

Science research interests: anti-aircraft missile control, flight dynamics of anti-aircraft guided missiles.



УДК 621.396.67

В. И. Порсев, А. И. Гелесев, А. Г. Красько

Угловое сверхразрешение сигналов с использованием «виртуальных» антенных решеток

Проведен анализ опубликованных материалов по «виртуальным» антенным решеткам, выявлены ограничения по их использованию в радиолокационных средствах в условиях априорной неопределенности угловых положений источников сигналов. Показана возможность повышения разрешающей способности по угловым координатам в условиях априорной неопределенности угловых положений источников сигналов с использованием «виртуальной» антенной решетки при типовых отношениях сигнал/шум, применяемых при обработке радиолокационных сигналов. Приведены результаты цифрового моделирования сигналов, подтверждающие аналитические выкладки.

Ключевые слова: угловое сверхразрешение сигналов, «виртуальные» антенные решетки, экстраполяция пространственной структуры.

По мере развития информационных радиоэлектронных систем (РЭС) требования к качеству их основных тактико-технических характеристик постоянно повышаются [1, 2]. Особую важность в процессе функционирования РЭС приобретает достоверность определения состава групповых целей, которая зависит прежде всего от разрешающей способности РЭС по угловым координатам, скорости и дальности [3].

До конца 1950-х гг. в различных областях естественных наук в качестве границы разрешающей способности был принят предел, установленный Релеем в 1888 г. Данный предел обуславливается характеристиками реальной аппаратной функции системы $F(\theta)$, определяющими разрешающую способность по данному параметру θ [4].

Величина углового разрешения лимитирована реальными массогабаритными характеристиками антенной системы. В связи с этим для повышения достоверности определения состава групповых целей проводятся исследования сверхрелеевского углового разрешения сигналов, превышающего границы релеевского.

В настоящее время основные задачи сверхрелеевского разрешения относят к новому классу некорректно поставленных задач [4].

Для анализа эффективности разрабатываемых методов сверхрелеевского разрешения предложены различные оценки, из которых используются в основном три показателя [2, 4–7]:

1) первый определяет относительную величину превышения критерия Релея по анализируемому параметру;

2) второй – ошибку найденных значений параметров;

3) третий – отношение сигнал/шум (ОСШ), при котором достигается заданная степень превышения критерия Релея по анализируемому параметру.

По сравнению с релеевским разрешением предлагаемые методы сверхрелеевской обработки, как новый класс некорректно поставленных задач, менее устойчивы к различным мешающим факторам. В связи с этим первый и третий показатели часто объединяют в один, в результате относительную величину превышения критерия Релея ставят в зависимость от ОСШ [2, 4–7].

Анализ эффективности известных методов углового сверхразрешения, например, алгоритмов Берга, Кейпона, MUSIC и других показывает, что пара равномошных источников, разнесенных на полуширину $\Delta\theta/2$ и треть $\Delta\theta/3$ диаграммы направленности (ДН), разрешаются, если ОСШ для каждого из источников составит 17...22 дБ и 25...32 дБ соответственно [2, 5, 6].

Помимо обязательного наличия большого ОСШ, существенно превышающего отношение сигнал/шум, достигаемое в радиолокационных системах (РЛС), известным методам углового сверхразрешения присущи и другие недостатки. Так, при использовании данных методов часто отмечается не только



плохая обусловленность корреляционных матриц сигналов, приводящая к неустойчивости вычислительной процедуры, но и потребность априорного знания количества пеленгуемых источников. Последнее нередко приводит к смещенным оценкам угловых координат.

Для преодоления этих недостатков предлагаются различные варианты формирования «виртуальных» антенных решеток (ВАР) [8–19].

Сигналы «виртуальных» элементов ВАР формируют в границах «виртуальной» апертуры, которая находится вне апертуры реальной антенной решетки (РАР), посредством пролонгации сигналов существующих АЭ различными способами [8–19]. Однако аналитически формируемые сигналы должны быть адекватны реальным сигналам, которые могли бы быть получены на входах настоящей апертуры, если бы она была равной «виртуальной».

Из этого следует, что использование сигналов «виртуальных» элементов в ВАР эквивалентно увеличению апертуры реальной антенной системы на величину «виртуальной» апертуры.

При этом следует заметить, что ОСШ на выходах элементов РАР, требуемое для формирования известных ВАР [8–14], намного больше ОСШ, достижимого на выходах антенных элементов в РЛС.

В результате этого известные ВАР применяются при пеленгации, поскольку большое ОСШ на выходе РАР, требуемое для реализации существующих алгоритмов углового сверхрелеевого разрешения, при пеленгации на самом деле существует [8–14].

ОСШ на выходах антенных элементов РАР РЛС намного меньше [1–3], чем требуется для реализации известных ВАР [8–17], поэтому сформировать ВАР на основе антенной системы РЛС, используя известные методы экстраполяции сигналов [8–17], невозможно.

Для того чтобы преодолеть этот недостаток формирования ВАР, в работах [15–17] влияние случайной составляющей на значение принимаемого сигнала предлагается уменьшить за счет коллективной обработки сигналов [15, 17], что должно обеспечить ОСШ на выходах антенных элементов РАР не менее 10...14 дБ.

Однако приведенные численные результаты исследований в работах [15–17] показывают, что предлагаемый метод формирования ВАР эффективен лишь в частном случае, когда положение источников сигналов симметрично относительно ожидаемого углового направления приема сигналов θ_{om} .

В случае произвольного расположения источников сигналов в пространстве предлагаемый метод формирования ВАР приводит к большим ошибкам определения их угловых координат.

Для лучшего понимания предлагаемой обработки и упрощения получаемых выражений, но без потери общности решения задачи, вместо фазированных антенных решеток рассмотрим реальные (РЛ) и «виртуальные» (ВЛ) линейные антенные решетки (ЛАР) изотропных АЭ.

Сигнал $s(t, \theta_m)$, принимаемый с ожидаемого углового направления приема θ_{om} и представляющий собой аддитивную смесь сигналов от M -точечных объектов, находящихся в одном разрешаемом объеме на угловых направлениях θ_m , может быть записан [2, 3] так:

$$s(t, \theta_m) = \sum_{m=1}^M s_m(t - \tau_m, \theta_m), \quad m = \overline{1, M}. \quad (1)$$

Здесь $s_m(t - \tau_m, \theta_m)$ – принимаемый сигнал от m -го объекта;

$\tau_m = R_m / c$ – время запаздывания прихода фазового фронта сигнала от m -го объекта на первый АЭ;

R_m – модуль радиус-вектора, соединяющий первую точку приема антенной плоского фронта волны от m -го точечного объекта и сам объект.

В большинстве случаев пространственно-временная обработка реализуется на разделяемых (факторизуемых) этапах обработки, которая возможна, если обрабатываемые сигналы узкополосны в пространственно-временном смысле [2, 3, 20–22].

С учетом условия факторизации сигнал от m -го объекта, принимаемого n -м АЭ ЛАР, можно записать в виде [2, 3, 20–22]:

$$s_{mn}(t - \tau_m - \tau_{mn}) \approx \text{Re}\{S_m(t - \tau_m)e^{j2\pi f_0 t} S_{\theta mn}\}, \quad (2)$$



где $S_{mn}(t - \tau_m - \tau_{mn})e^{j2\pi f_0 t} \approx S_m(t - \tau_m)e^{j2\pi f_0 t}$, $S_{\theta mn} = e^{j\varphi_n(\theta_m)}$ – комплексные временная и пространственная составляющие узкополосного, в пространственно-временном смысле сигнала;

$$n = \overline{1, N};$$

$\tau_{mn} = [(n - 1)d \sin \theta_m]/c$ – время запаздывания прихода плоского фазового фронта сигнала от m -го объекта относительно первого АЭ ЛАР на n -й антенный элемент РЛ с шагом АЭ d ;

$S_m(t - \tau_m)$ – комплексная огибающая сигнала;

f_0 – несущая частота;

$\varphi_n(\theta_m) = [-2\pi(n - 1)d \sin \theta_m]/\lambda$;

λ – длина волны.

Известно, что комплексная решающая статистика (КРС) Z_m принятия решения об обнаружении полезного детерминированного сигнала от одного m -го объекта на фоне аддитивного эквивалентного пространственно-временного белого шума может быть записана [2, 3, 20–22] так:

$$Z_m = \mathbf{Y}^T \mathbf{K}_{\theta t}^{-1*} \mathbf{S}_{o\theta m}^* = \quad (3.1)$$

$$= \sigma^{-2} \mathbf{Y}^T (\mathbf{S}_{o\theta m}^* \otimes \mathbf{I}_t) (\mathbf{1} \otimes \mathbf{S}_{o\theta m}^*) = \quad (3.2)$$

$$= \sigma^{-2} \mathbf{Y}^T (\mathbf{I}_\theta \otimes \mathbf{S}_{o\theta m}^*) (\mathbf{S}_{o\theta m}^* \otimes \mathbf{1}). \quad (3.3)$$

Здесь $\mathbf{Y} = S_{\theta m} + \mathbf{N}$ – вектор-столбец комплексной огибающей принимаемого сигнала от m -го объекта;

$\mathbf{S}_{\theta m} = \mathbf{S}_{\theta m} \otimes \mathbf{S}_{o\theta m}$, $\mathbf{S}_{o\theta m} = \mathbf{S}_{o\theta m} \otimes \mathbf{S}_{o\theta m}$ – вектор-столбцы комплексных огибающих принимаемого и ожидаемого полезных сигналов от m -го объекта с пространственными $\mathbf{S}_{\theta m} = \|S_{\theta mn}\|$, $\mathbf{S}_{o\theta m} = \|S_{o\theta mn}\|$, $S_{\theta mn} = e^{j\varphi_n(\theta_m)}$, $S_{o\theta mn} = e^{j\varphi_n(\theta_{om})}$, $n = \overline{1, N}$ и временной $\mathbf{S}_{o\theta m} = \|S_{o\theta mk}\|$, $S_{o\theta mk} = S_o(t_k)$, $k = \overline{1, K}$ структурами, получаемыми при пространственной и временной дискретизации;

θ_{om} – угловое направление m -й источник сигнала;

$\mathbf{N} = \|\mathbf{N}_n\|$, $n = \overline{1, N}$ – блочный вектор-столбец пространственно-временного белого шума;

$\mathbf{N}_n = \|N_{nk}\|$, $N_{nk} = N_n(t_k)$, $k = \overline{1, K}$ – вектор-столбец временной структуры шума n -го пространственного канала.

Корреляционная функция пространственно-временного белого шума при равных

мощностях внутренних шумов АЭ ЛАР $\mathbf{K}_{\theta t}$ в выражении (3.1) определяется следующим равенством [20]:

$$\mathbf{K}_{\theta t} = \mathbf{K}_\theta \otimes \mathbf{K}_t = \sigma^2 \mathbf{I}_\theta \otimes \mathbf{I}_t, \quad (4)$$

где $\mathbf{K}_t = M[\mathbf{N}_n \mathbf{N}_n^{*T}] = \sigma^2 \mathbf{I}_t$ – корреляционная матрица временной структуры белого шума;

$M[\bullet]$ – математическое ожидание;

$\sigma^2 = M[N_{nk} N_{nk}^*]$ – дисперсия шума;

\mathbf{I}_θ – пространственная структура корреляционной матрицы $\mathbf{K}_{\theta t}$, характеризующая независимость шумов различных пространственных каналов;

\mathbf{I}_θ , \mathbf{I}_t – единичные матрицы размерностью N и K , соответственно;

\otimes – операция кронекеровского произведения матриц;

$*$, T – верхние индексы комплексного сопряжения и транспонирования матриц.

Соотношение (3.2) определяет алгоритм, в котором сначала осуществлена пространственная обработка, а затем временная. Выражение (3.3) – это алгоритм, в котором первоначально выполнена временная обработка после каждого АЭ, а затем – пространственная [2, 3, 20–22].

При приеме сигналов от M источников сигналов длительностью τ_c с шириной спектра ΔF_c , не разрешаемых по дальности ($\tau_{m \max} - \tau_{m \min} \ll \tau_c$ и частоте ($F_{d \max} - F_{d \min} \ll \Delta F_c$), используя выражение (3.1), сигнальную составляющую КРС Z_m можно представить [2, 3, 20–22] так:

$$M[Z_m] = \sigma^{-2} M \left[\sum_{m=1}^M (\mathbf{S}_{\theta m} \otimes \mathbf{S}_{o\theta m} + \mathbf{N})^T (\mathbf{S}_{o\theta m} \otimes \mathbf{S}_{o\theta m})^* \right] = \\ = q_o^2 N \sum_{m=1}^M \rho(\theta_{om}, \theta_{om}), \\ m = \overline{1, M}. \quad (5)$$

Здесь $N\rho(\theta_m, \theta_{om}) = \mathbf{S}_{\theta m}^T \mathbf{S}_{o\theta m}^* = N \text{sinc}(\pi N d_m \vartheta_m / \lambda) e^{-j(\pi d_m (N-1) \vartheta_m / \lambda)}$ – функция углового рассогласования пространственных структур сигналов (ФР), принимаемых с истинного θ_m и ожидаемого θ_{om} направлений прихода сигнала;

$d_m = d \cos \theta_m$ – проекция шага РЛ на плоский фазовый фронт волны, приходящей под ожидаемым углом θ_{om} ;



$$\vartheta_m = |\theta_m - \theta_{om}| \leq \Delta\Theta;$$

$q_o^2 = \mathbf{S}_{ot}^T \mathbf{S}_{ot}^* / \sigma^2$ – ОСШ m -го объекта после временной согласованной обработки в одном АЭ.

Из выражения (4) следует, что нормированная ФР (НФР) $\rho(\theta_m, \theta_{om})$ совпадает с известным выражением нормированной ДН ЛАР при равномерном амплитудном и линейном фазовом распределениях.

Для наглядности принципа предлагаемого углового сверхразрешения в условиях априорной неопределенности угловых положений источников сигналов ограничимся моделированием обработки, определяемой выражением (3.3).

В качестве примера была выбрана РЛ с 64 АЭ, ширина ДН которой составляет $\Delta\Theta \approx 1,2^\circ$. На основе этой РЛ была сформирована «виртуальная» ЛАР с $N = 64$ реальными и $N_b = 128$ «виртуальными» АЭ, сумма которых $(N + N_b) = 192$.

С целью сравнения углового разрешения были рассмотрены «виртуальная» и ЛАР с равным числом АЭ – 192, при априорно неопределенном пространственном расположении источников сигналов, не разрешаемых РЛ с 64 АЭ.

Были произвольно выбраны несимметричные угловые положения первого $\theta_1 = 11,7^\circ$, второго $\theta_2 = 12,1^\circ$ и третьего $\theta_3 = 12,6^\circ$ неразрешаемых источников сигналов, которые смещены относительно ожидаемого углового направления прихода сигнала $\theta_{om} = 12^\circ$.

На рис. 1 приведен результат моделирования с помощью трех НФР диаграммы направленности РЛ с 64 АЭ по мощности без шумов, описывающих прием сигналов от трех неразрешаемых источников в зависимости от угловой расстройки $\theta = \theta_{om} - \theta_m$. Кроме того, для понимания принципов не только известной обработки (3), но и предлагаемой, были смоделированы распределения в антенных элементах РЛ реальной составляющей пространственной структуры принимаемых сигналов (РРС) $\text{Re} \sum_{m=1}^M (\mathbf{S}_{\theta mn} \mathbf{S}_{\theta mn}^*)$ и значений ее фаз (РФС)

$$\arg \sum_{m=1}^M (\mathbf{S}_{\theta mn} \mathbf{S}_{\theta mn}^*), \quad n = \overline{1, N}.$$

Результаты моделирования РРС и РФС в отсутствие шумов при трех принимаемых неразрешаемых сигналах РЛ с 64 АЭ приведены на рис. 2.

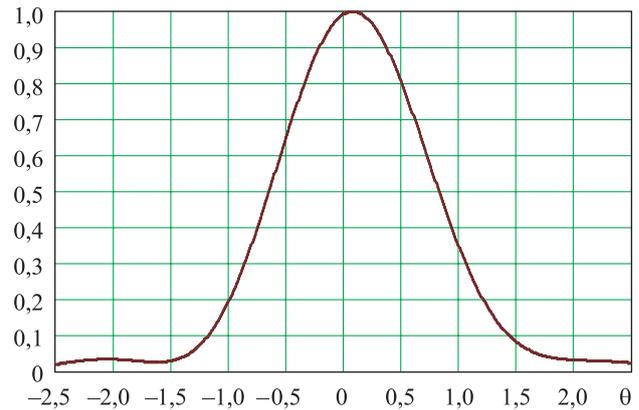


Рис. 1. ДН РЛ с 64 АЭ при обработке трех неразрешаемых источников сигналов

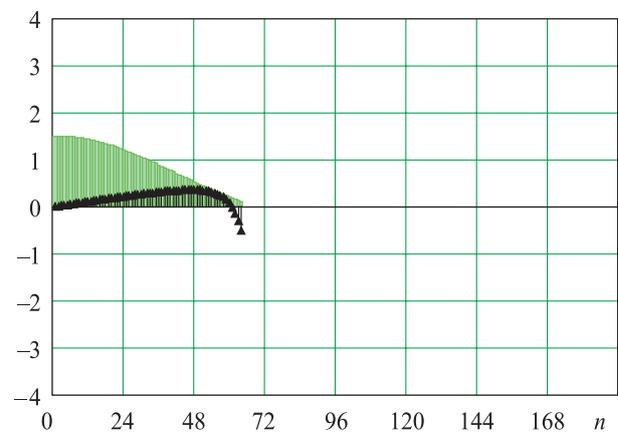


Рис. 2. РРС (■) и РФС (▲) РЛ с 64 АЭ при обработке трех неразрешаемых источников сигналов

На рис. 3 приведены результаты моделирования РРС и РФС без шумов в РЛ со 192 АЭ при фазировании, соответственно, на первый $\theta_{om} = \theta_1$, второй $\theta_{om} = \theta_2$ и третий $\theta_{om} = \theta_3$ источники сигналов.

Известно [14], что в теории прогнозирования любой прогноз будет являться близким к действительности лишь в том случае, если на интервале прогноза будут действовать те же закономерности, которые были на интервале предыстории.

Между тем сравнение РРС реальной ЛАР с 64 АЭ (см. рис. 2) и РРС реальной ЛАР со 192 АЭ (см. рис. 3) показывает, что даже при отсутствии шума закономерности РРС, наблюдаемые в РЛ с 64 АЭ, не встречаются в РРС после 65-го АЭ, в РЛ со 192 АЭ.

Задача существенно усложняется при наличии шума. ОСШ при моделировании после временной обработки в одном простран-

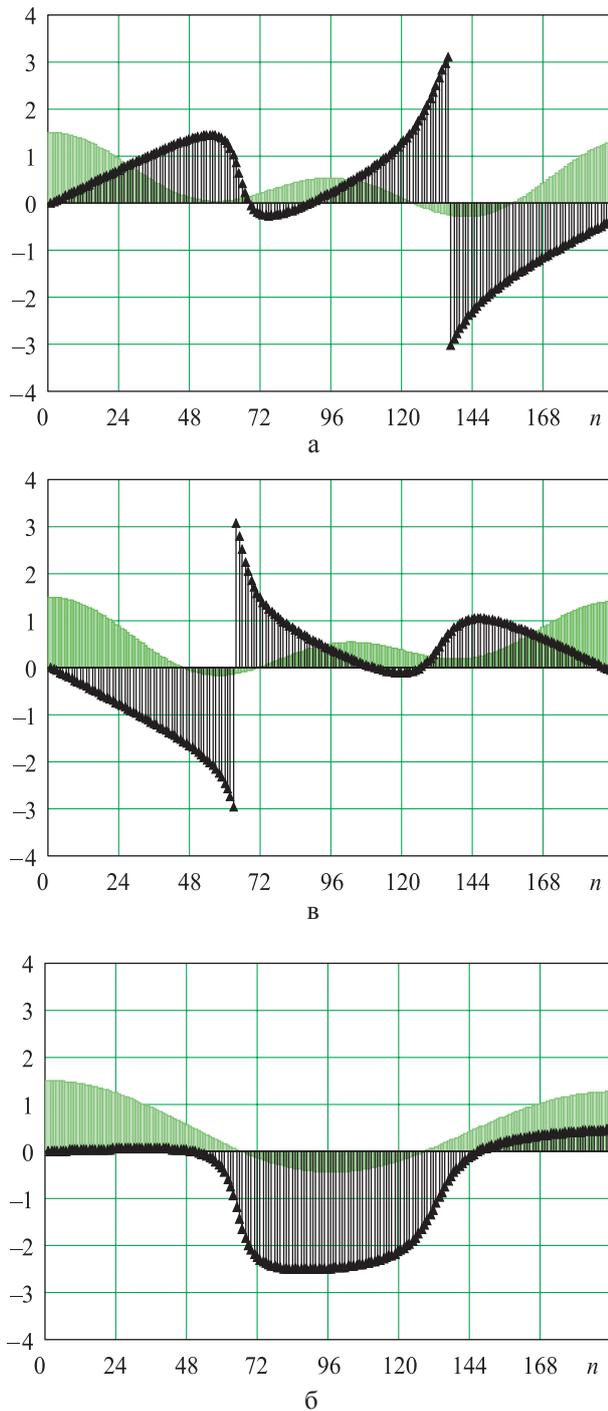


Рис. 3. РРС (■) и РФС (▲) без шумов в РЛ со 192 АЭ при фазировании на разрешаемые источники сигналов на:
а – θ_1 ; б – θ_2 ; в – θ_3

ственном канале РЛ с 64 АЭ было выбрано равным $-4,5$ дБ. Выбор такого ОСШ после АЭ обусловлен областью стандартных показателей качества радиолокационного обнаружения, которые определяются ОСШ после пространственно-временной обработки. Так, ОСШ после пространственно-временной обработки, опре-

деляемое областью стандартных показателей качества обнаружения, было выбрано равным $13,3$ дБ. При этом ОСШ, необходимое для получения стандартных показателей качества радиолокационного обнаружения, на антенных элементах РЛ, составляет величину, намного меньшую, чем требуется для формирования ранее предлагавшихся ВАР [14, 15, 17], а после всей обработки – величину, меньшую, чем для реализации известных алгоритмов углового сверхразрешения, например, Берга, Кейпона, MUSIC и др. [2, 5, 6].

Для достоверности анализа влияния шумов на РРС реальных ЛАР при разрешении разных источников сигналов моделировалась одна и та же реализация пространственно-временного шума.

На рис. 4 приведены РРС и РФС для РЛ со 192 АЭ при приеме сигналов с шумами, когда РЛ сфазирована, соответственно, на первый $\theta_{om} = \theta_1$, на второй $\theta_{om} = \theta_2$ и на третий $\theta_{om} = \theta_3$ разрешаемые источники сигналов.

Из результатов моделирования следует, что, поскольку шум превалирует, РРС реальных ЛАР со 192 АЭ отличаются друг от друга незначительно (см. рис. 4). Такая нивелировка РРС, несмотря на то что зависимости РРС для разных ожидаемых угловых направлений приема сигналов без шумов различаются существенно (см. рис. 3), подтверждает низкую вероятность получения точной экстраполяции сигналов известными методами при малом ОСШ на антенных элементах РЛ [17].

Таким образом, при типовых показателях качества обнаружения сигналов радиолокационными средствами в условиях априорной неопределенности угловых положений их источников решение задачи углового сверхразрешения с использованием «виртуальных» антенных решеток представляет не только научный, но и практический интерес.

Приведенные результаты моделирования РРС подтверждают известный вывод о том, что в условиях априорной неопределенности угловых положений источников сигналов, когда ОСШ на антенных элементах меньше (много меньше) единицы, задача экстраполяции пространственной структуры совокупного сигнала (1), сформированного M точечными

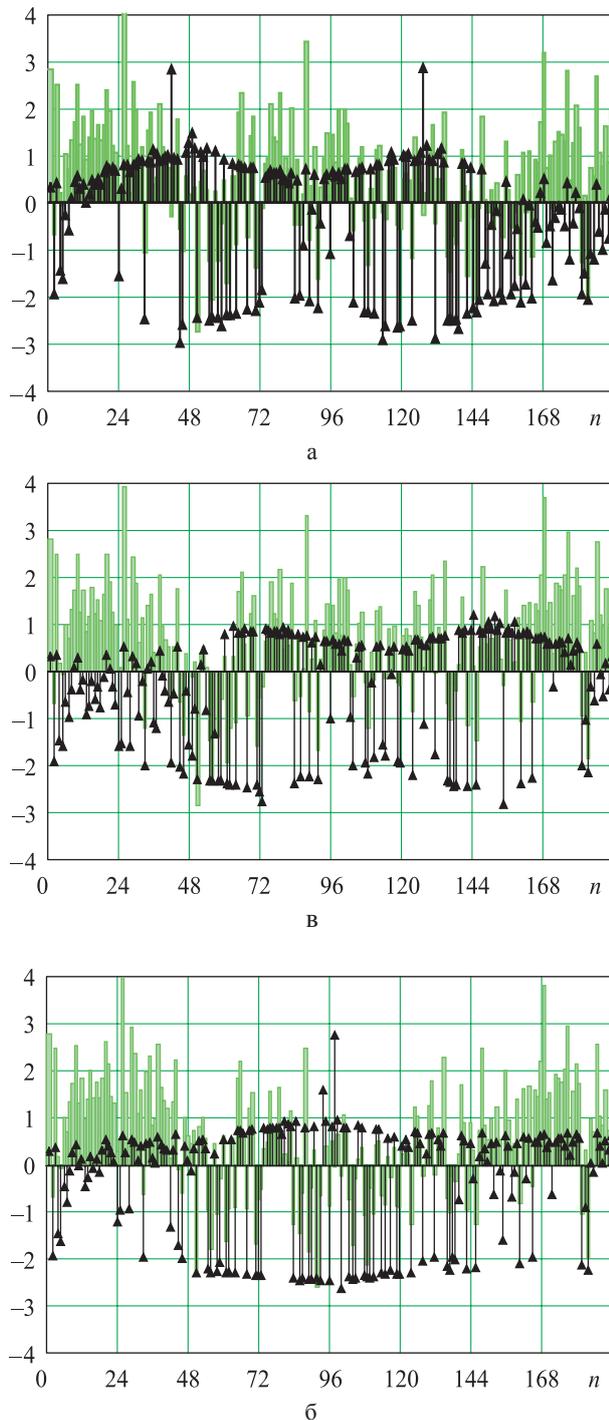


Рис. 4. РРС (■) и РФС (▲) с шумами в РЛ со 192 АЭ при фазировании на разрешаемые источники сигналов:

а – на первый; б – на второй; в – на третий

объектами, находящимися в одном разрешаемом объеме, известными методами не может быть решена.

При приеме сигнала из дальней зоны фазовая структура его пространственной составляющей для любого n_b -го «виртуального»

АЭ, аналогично реальному, может быть записана так:

$$S_{\theta m b} = e^{j\varphi_{nb}(\theta_m)} = e^{-j2\pi(N+n_b-1)d\sin\theta_m/\lambda}$$

Поскольку в ряде случаев исследователи стремятся, чтобы апертура ВЛ в G раз превышала апертуру РЛ, то количество АЭ в ВЛ составит

$$N_b = GN,$$

где G – количество итераций сигналов РЛ, необходимых для формирования требуемого количества N_b .

Тогда ожидаемый фазовый набег сигнала от m -го объекта в n_b -м антенном элементе ВЛ $\varphi_{nbg}(\theta_m)$ при g -й итерации определится соотношением

$$\varphi_{nbg}(\theta_m) = \varphi_{Nbg-1}(\theta_m) + \varphi_{nbg}(\theta_m).$$

Здесь $\varphi_{nbg}(\theta_m) = -2\pi(n_{bg} - 1)d\sin\theta_m/\lambda$ – фазовый набег в n_{bg} -м антенном элементе ВЛ при g -й итерации;

$n_{bg} = \overline{(g-1)N + 1 - (g-1)N, (g+1)N - gN} = \overline{1, N}$ – локальный номер антенного элемента ВЛ на g -й итерации;

$$g = \overline{1, G};$$

$\varphi_{Nbg-1}(\theta_m) = -2\pi(g-1)Nd\sin\theta_m/\lambda$ – групповой фазовый набег всех антенных элементов ВЛ для g -й итерации.

Поскольку экстраполяция принимаемого сигнала $S_{\theta m}$ может осуществляться только в присутствии аддитивного шума, то экстраполируется принимаемая реализация Y :

$$Y_G = \|S_{\theta omg} Y\| = S_{\theta omG} \otimes \Psi, g = \overline{1, G}.$$

Здесь $S_{\theta omG} = \|S_{\theta omg}\| = \|e^{-2\pi(g-1)Nd\sin\theta_m/\lambda}\|, g = \overline{1, G}.$

Тогда после G итераций принимаемых сигналов РЛ комплексная решающая статистика Z_{mG} принятия решения об обнаружении разрешаемого полезного детерминированного сигнала от m -го объекта на фоне аддитивного эквивалентного пространственно-временного белого шума N аналогично выражениям (3.1)–(3.3) может быть записана так:

$$Z_{mG} = Y_G^T K_{\theta mG}^{-1} S_{\theta omG}^* = \tag{5.1}$$

$$= \sigma^{-2} Y_G^T (S_{\theta omG}^* \otimes I_t) (1 \otimes S_{\theta om}^*) = \tag{5.2}$$



$$= \sigma^{-2} \mathbf{Y}_G^T (\mathbf{I}_{\theta G} \otimes \mathbf{S}_{\theta m}^*) (\mathbf{S}_{\theta m G}^* \otimes \mathbf{1}), \quad (5.3)$$

где $\mathbf{K}_{\theta r G} = M[\mathbf{N}_G \mathbf{N}_G^{*T}]$;

$$g = \overline{1, G};$$

$$\mathbf{N}_G = \|\mathbf{S}_{\theta omg} \mathbf{N}\| = \mathbf{S}_{\theta omG} \otimes \mathbf{N},$$

$$\mathbf{S}_{\theta omG} = \|\mathbf{S}_{\theta omg} \mathbf{S}_{\theta om}\|;$$

$\mathbf{S}_{\theta omG} = \mathbf{S}_{\theta omG} \otimes \mathbf{S}_{\theta om}$ – ожидаемый полезный сигнал с учетом G итераций;

$\mathbf{I}_{\theta G}$ – единичная матрица размерностью $N + N_B$.

Тогда, принимая во внимание выражение (5.1), сигнальную составляющую КРС Z_{mG} можно представить в виде формулы

$$M[Z_{mG}] = \mathbf{S}_{\theta mG}^T \mathbf{K}_{\theta rG}^{-1*} \mathbf{S}_{\theta omG}^* + \sum_{r=1, r \neq m}^M \mathbf{S}_{\theta rG}^T \mathbf{K}_{\theta rG}^{-1*} \mathbf{S}_{\theta omG}^*, \quad (6)$$

где $\mathbf{S}_{\theta mG} = \mathbf{S}_{\theta mG} \otimes \mathbf{S}_{\theta om}$;

$$\mathbf{S}_{\theta mG} = \|\mathbf{S}_{\theta omg} \mathbf{S}_{\theta om}\|;$$

$$g = \overline{1, G};$$

$$\mathbf{S}_{\theta rG} = \mathbf{S}_{\theta mrG} \otimes \mathbf{S}_{\theta or}$$

$$\mathbf{S}_{\theta mrG} = \mathbf{S}_{\theta mG} \otimes \mathbf{S}_{\theta or}$$

$$\mathbf{S}_{\theta r} = \mathbf{S}_{\theta r} \otimes \mathbf{S}_{\theta or}$$

$$\mathbf{S}_{\theta r} = \|\mathbf{S}_{\theta om}\|;$$

$$\mathbf{S}_{\theta rn} = e^{-j2\pi(n-1)d \sin \theta r / \lambda};$$

$$r \neq m, r = \overline{1, M}.$$

Получить аналитическое выражение оценки истинного углового направления на m -й источник сигнала $\hat{\theta}_m$ не представляется возможным, поэтому минимизация расстройки $v_m = (\theta_{mo} - \theta_m)$ ожидаемого углового направления приема θ_{moi} ВЛ и истинного направления на m -й источник θ_m сигнала будет достигнута при максимизации решающей статистики [3, 21]:

$$\max_{\theta_{moi}} (\operatorname{Re} M[Z_{mG}(\theta_{moi})]), \quad i = \overline{1, I}.$$

Количество точек $I = \Delta\Theta / \Delta\theta_{\text{мов}}$ определится требуемой точностью и возможным шагом дискретизации ожидаемого углового направления прихода сигнала $\Delta\theta_{\text{мов}}$ в ВЛ в пределах ширины $\Delta\Theta$ ДН РЛ.

В результате этого максимальное значение ДН ВЛ, сфазированной на ожидаемое угловое направление θ_{moi} , обеспечит выделение сигналов с углового направления θ_m .

Для подтверждения возможности обработки с помощью ВЛ, предложенной авторами

данной статьи в патенте [18], было проведено математическое моделирование, ограниченное двумя итерациями сигналов РЛ. Для наглядности углового сверхразрешения в условиях априорной неопределенности угловых положений источников сигналов вначале осуществлялась временная согласованная обработка сигналов в каждом пространственном канале, а затем – пространственная с помощью ВЛ.

На рис. 5 представлены результаты моделирования без шумов и с пространственно-временными шумами РРС и РФС «виртуальной» ЛАР, формируемой двумя итерациями, с $N = 64$ реальными и $N_B = 128$ «виртуальными» АЭ при максимизации решающей статистики $\max_{\theta_{moi}} (\operatorname{Re} M[Z_{mG}(\theta_{moi})])$, $i = \overline{1, I}$ при фазировании, соответственно, на первый θ_{o1} , второй θ_{o2} и третий θ_{o3} источники сигналов.

Моделирование идеального случая, когда шумы отсутствуют, приведено с целью пояснения предлагаемого принципа формирования ВЛ.

На рис. 6 приведены результаты моделирования диаграммы направленности по мощности ВЛ со $(N + N_B) = 192$ АЭ в присутствии пространственно-временного шума, разрешающей, соответственно, первый θ_{o1} , второй θ_{o2} и третий θ_{o3} источники сигналов, которые не разрешаются РЛ с $N = 64$ АЭ (см. рис. 1), при максимизации решающей статистики

$$\max_{\theta_{moi}} (\operatorname{Re} M[Z_{mG}(\theta_{moi})]), \quad i = \overline{1, I}.$$

Как и ранее, ОСШ при моделировании после временной обработки в одном пространственном канале РЛ с 64 АЭ было равно $-4,8$ дБ, а на выходе РЛ составило $13,3$ дБ.

Подведем итоги моделирования.

1. Наличие превалирующего шума в каналах приема радиолокационных систем исключает возможность формирования ВАР путем экстраполяции сигналов с выходов антенных элементов РАР известными методами.

2. Для углового сверхразрешения радиолокатором при ОСШ, типичном для обнаружения целей, целесообразно реализовать способ, предложенный авторами данной статьи в патенте [18]. При его использовании после требуемого

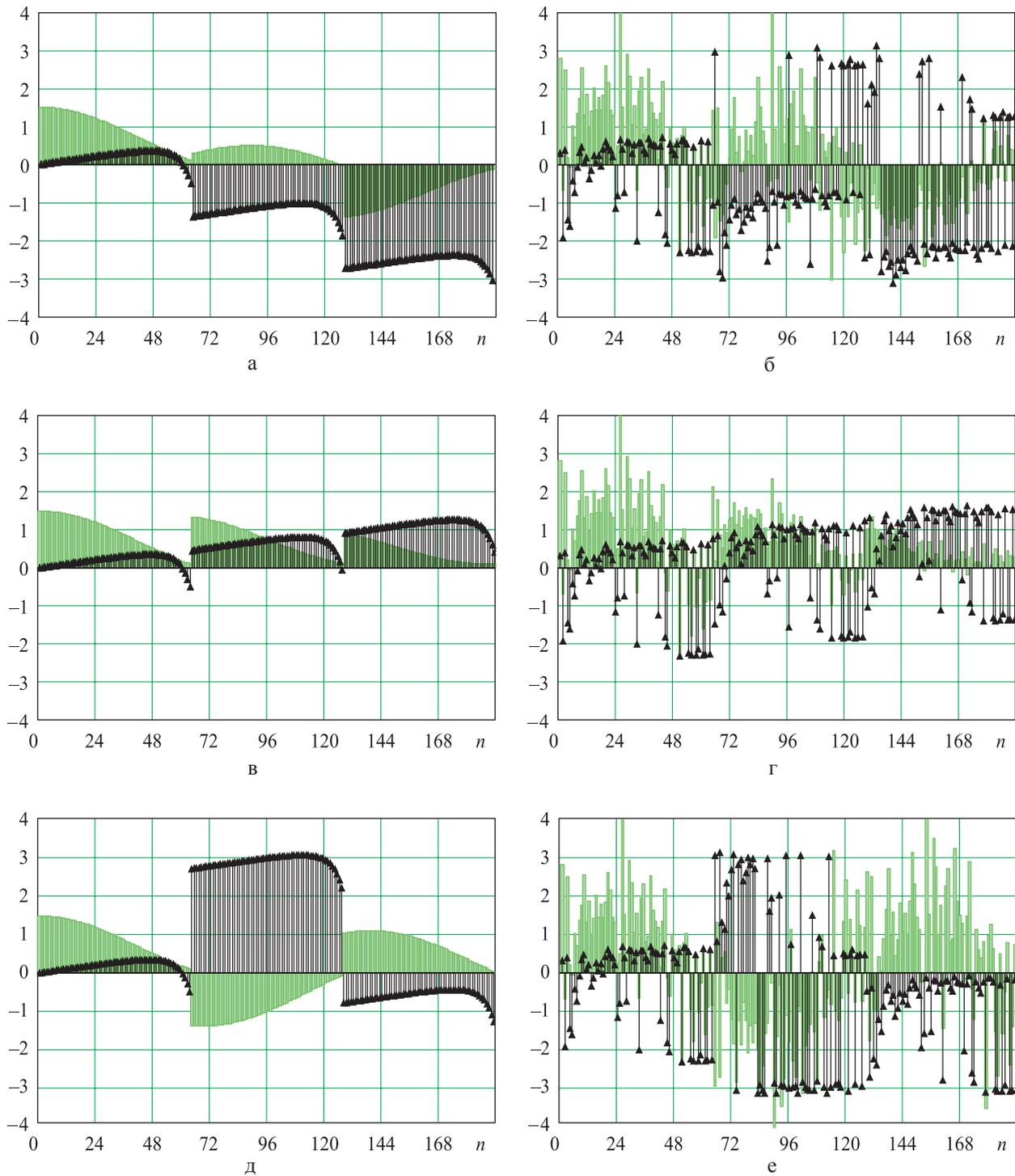


Рис. 5. RPC (■) и RFC (▲) без шумов и с шумами «виртуальной» ЛАР с 64 реальными и со 128 «виртуальными» АЭ при разрешении первого источника (а, б), второго – (в, г), третьего – (д, е)

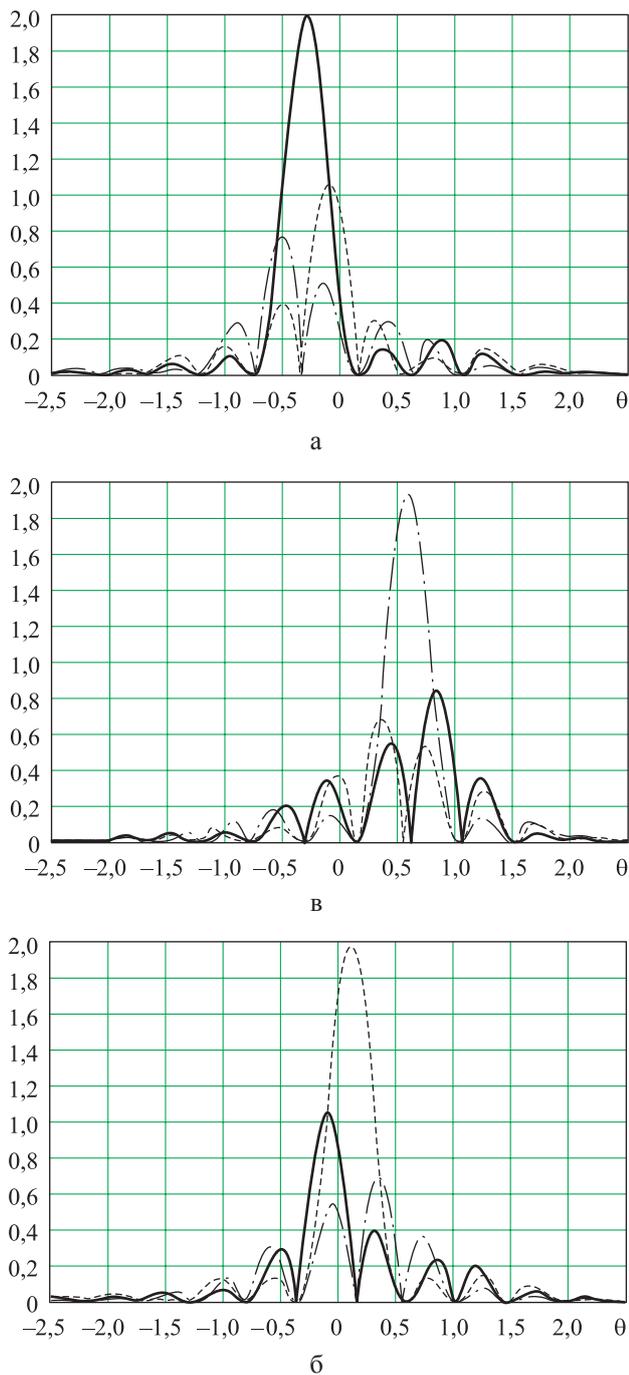


Рис. 6. ДН ВЛ с двойной итерацией РЛ с 64 реальными АЭ при фазировании на первый (а), второй (б) и третий (в) источники сигналов

количества итераций пространственной структуры сигналов РЛ с учетом ожидаемых угловых направлений их приема фазирование ВЛ на соответствующий источник сигналов определится максимизацией решающей статистики.

3. Предлагаемый метод углового сверхразрешения в условиях априорной неопределенности угловых положений источников сигналов

обеспечил разрешение ВЛ сигналов с ОСШ. После временной обработки в одном пространственном канале РЛ с 64 АЭ оно составило $-4,8$ дБ, что намного меньше результатов, полученных по известным методам экстраполяции сигналов. При этом ОСШ на выходе РЛ равно $13,3$ дБ, что меньше, чем требуется для реализации известных алгоритмов после пространственно-временной обработки. Смоделированное значение ОСШ находится в области типовых показателей качества обнаружения радиолокационными средствами.

4. Предлагаемый метод формирования ВАР позволяет разрешать в основном лепестке ДН источники сигналов, расположенные произвольно относительно ожидаемого углового направления приема сигналов (см. рис. 6), которые не разрешаются РАР (см. рис. 2).

5. При реализации предлагаемого метода и алгоритма углового сверхразрешения в условиях априорной неопределенности угловых положений источников сигналов выявлено наличие следующих признаков, позволяющих отнести данную задачу к новому классу некорректно поставленных задач:

- необходимость разработки новых приемов решения задачи углового сверхразрешения не только в теории антенн и пространственно-временного обнаружения сигналов, но и при построении алгоритмов пространственной обработки сигналов антенными решетками;
- формирование ВАР возможно при использовании новых закономерностей, ранее не применявшихся в классической теории не только антенн, но и пространственно-временного обнаружения сигналов;
- потребность в создании новых алгоритмов углового сверхразрешения при использовании нестандартной априорной информации о пространственной структуре источников сигналов ВАР.

6. Реализована двойная итерация РРС реальной ЛАР с 64 АЭ, учитывающая на каждом шаге изменения ожидаемых фазовых структур итерлируемых сигналов, необходимых для формировании ВЛ (см. рис. 5, а, в, д). Установлено, что структуры итерлируемых сигналов с разными ожидаемыми угловыми направлениями их приема θ_{01} , θ_{02} и θ_{03} отличаются друг от друга,



несмотря на одни и те же исходные сигналы РЛ с 64 АЭ (см. рис. 2).

7. РРС и РФС реальной (см. рис. 3, а, б, в) и «виртуальной» (см. рис. 5, а, в, д) ЛАР с одним количеством АЭ существенно отличаются друг от друга при наличии и отсутствии шумов.

8. Наличие нескольких разрешаемых целей приводит к некоторому смещению максимума ДН ВЛ (см. рис. 6). Это вызвано предлагаемым методом решения нового класса некорректно поставленных задач.

Таким образом, предложенный метод обеспечивает в радиолокационных средствах при отношении сигнал/шум, определяемом стандартными показателями качества радиолокационного обнаружения, угловое сверхразрешение «виртуальными» антенными решетками источников сигналов при их произвольном угловом положении.

Список литературы

1. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие. М.: Советское радио, 1974. 360 с.
2. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Я. Д. Ширман, С. Т. Багдасарян, А. С. Маляренко и др.; под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 510 с.
3. Обработка сигналов в радиотехнических системах / А. Д. Долматов, А. А. Елисеев, А. П. Лукошкин и др.; под ред. А. П. Лукошкина. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. 400 с.
4. Агеев А. Л., Антонов Т. В. О новом классе некорректно поставленных задач // Известия УрГУ. 2008. № 58. С. 24–42.
5. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003. 200 с.
6. Варюхин В. А. Основы теории многоканального анализа. Киев: Наук. думка, 2015. 168 с.
7. Климов С. А. Метод повышения разрешающей способности радиолокационных систем при цифровой обработке сигналов // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 1. С. 1–25.
8. Buhren M., Pesavento M., Bohme J. F. A new approach to array interpolation by generation of artificial shift invariances: interpolated ESPRIT. Proceedings IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Proces. (ICASSP). 2003. Vol. 5. Pp. 362–370.
9. Bajwa W. U., Gedalyahu K., Eldar Y. C. Identification of Parametric Under spread Linear Systems and Super-Resolution Radar // IEEE Transactions on Signal Processing. 2011. Vol. 52. No. 5. Pp. 2548–2561.
10. Ашихмин С. А., Перишин П. В., Федоров С. М. Улучшение разрешения двух источников с помощью формирования «виртуальной» антенной решетки // Воронеж: Вестник Воронежского института МВД России. 2018. № 3. С. 64–69.
11. Herman M. A., Strohmer T. High-resolution radar via compressed sensing // IEEE Trans. Signal Processing. 2009. Vol. 57. № 6. Pp. 2275–2284.
12. Hyberg P. Antenna Array Mapping for DOA Estimation in Radio Signal Reconnaissance. PhD thesis. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden. 2005. DOI: 10.11648/j.ajea.20150301.11
13. Belloni F., Richter A., Koivunen V. Reducing Excess Variance in BeamSpace Methods for Uniform Circular Array. In Proceedings of the IEEE Workshop on Statistical Signal Processing (SSP), Bordeaux, France. July 17–20, 2005. Pp. 940–943.
14. Орлов И. Я., Евсеев А. П., Вьюгин П. Н., Пучков А. В. Анализ проблем создания «сверхразрешающей» цифровой антенной решетки с помощью алгоритма полигармонической экстраполяции // Труды 24-й Междунар. научн.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2018. С. 1–12.
15. Лаговский Б. А. Восстановление изображения групповой цели цифровыми антенными решетками // Антенны. 2011. Вып. 2 (165). С. 40–46.
16. Лаговский Б. А., Шумов И. Ю. Восстановление двумерных изображений источников излучения со сверхразрешением // Антенны. 2013. Вып. 4 (191). С. 60–65.
17. Лаговский Б. А. Сверхразрешение на основе синтеза апертуры цифровыми антенными решетками // Антенны. 2013. Вып. 6 (193). С. 9–16.
18. Гелесев А. И., Зайцев В. Е., Красько А. Г., Порсев В. И. Пат. 2642883 РФ. Способ углового сверхразрешения цифровыми антенными решетками // Бюл. 2018. № 4. 15 с.
19. Порсев В. И., Гелесев А. И., Ворошилин Е. П. и др. Выделение парциальных траекторий с применением синтезируемой виртуальной апертуры антенны РЛС // Вестник воздушно-космической обороны. 2016. Вып. 3 (11). С. 87–92.



20. Пространственно-временная обработка сигналов / *И. Я. Кремер, А. И. Кремер, В. М. Петров* и др.; под ред. *И. Я. Кремера*. М.: Радио и связь, 1987. 224 с.

21. Теория обнаружения сигналов / *П. С. Акимов, П. А. Бакут, В. А. Богданович* и др.; под

ред. *П. А. Бакута*. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.

22. *Гелесев А. И.* Радиолокационные и радионавигационные системы. Введение в теорию. М.: Изд-во филиала Воен. Акад. РВСН, 1999. 128 с.

Поступила 18.10.19

Порсев Валерий Иосифович – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», г. Москва.

Область научных интересов: радиолокация, математическое и имитационное моделирование.

Гелесев Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, начальник сектора Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», г. Москва.

Область научных интересов: пространственно-временная обработка сигналов.

Красько Александр Григорьевич – инженер 1-й категории Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», г. Москва.

Область научных интересов: антенные решетки, помехозащищенность, математическое моделирование антенных систем.

Angular superresolution of signals using virtual antenna arrays

We analysed existing publications concerning virtual antenna arrays and determined the limitations of using them in radar systems for the case of prior uncertainty regarding angular positions of signal sources. The paper shows that it is possible to increase angular coordinate resolution for the case of prior uncertainty regarding angular positions of signal sources by employing a virtual antenna array at typical signal-to-noise ratios used in radar signal processing. We provide results of simulating the signals numerically, which confirm our analytical calculations.

Keywords: angular superresolution of signals, virtual antenna arrays, spatial structure extrapolation.

Porsev Valeriy Iosifovich – Doctor of Engineering Sciences, Deputy General Director in Research Work, Joint stock company “All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering”, Moscow.

Science research interests: radiolocation, mathematical and physical simulation.

Gelesev Aleksandr Ivanovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Sector, Joint stock company “All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering”, Moscow.

Science research interests: spatio-temporal signal processing.

Krasko Aleksandr Grigorevich – Engineer of the 1st rank, Joint stock company “All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering”, Moscow.

Science research interests: antenna arrays, interference immunity, mathematical simulation of antenna systems.



УДК 621.396.677

С. А. Алексейцев, Д. А. Бухтияров, А. П. Горбачев,
Ю. Н. Паршин, Н. В. Тарасенко

Печатные двухдиапазонные излучатели дипольного вида с концевым питанием

Описан новый двухдиапазонный печатный излучатель дипольного вида, входящий в состав интегрированного модуля, который содержит полосково-щелевое симметрирующее устройство, выходы которого впервые соединены с удаленными концами обеих половин излучателя дипольного вида. Рассмотрены особенности его структурной реализации, компоновки и технологического исполнения. Приведены оптимизированные геометрические параметры печатного модуля. Экспериментальные результаты верифицируют предлагаемый подход и служат свидетельством о приемлемости полученных рабочих характеристик излучателей.

Ключевые слова: излучатель дипольного вида, печатное исполнение, диаграмма направленности, коэффициент отражения.

Введение

Классические дипольные излучатели, питаемые на центральных, близкорасположенных смежных клеммах, являются элементной базой различных антенных систем, от турникетной антенны вплоть до многофункциональных активных фазированных антенных решеток [1].

Как правило, при печатном исполнении таких систем используется питание от несимметричной коаксиальной или полосковой линии, при этом возникает необходимость использовать симметрирующее устройство (СУ) той или иной структуры. СУ – это противофазный делитель мощности в отношении 1:1, обеспечивающий такое деление в требуемой относительной полосе частот (рис. 1, а). Но его размещение на подложке вблизи входных центральных смежных клемм диполя, находящихся в непосредственной близости, неизбежно приводит к усложнению компоновочной схемы, возрастанию диссипативных потерь и входного коэффициента отражения излучаю-

щего модуля за счет изгибов и поворотов печатных линий передачи внутри самого СУ и между противофазными выходами СУ и входными клеммами диполя. Кроме того, уровень кроссполяризации модуля весьма чувствителен к структуре и свойствам СУ, потому что обычно диполь возвышается над заземленным корпусом объекта установки на четверть или большую часть длины волны. В результате этого неприкрытый экраном участок планарной структуры СУ участвует в нежелательном («паразитном») излучении наряду с диполем. Несмотря на разработанные для широкого применения различные весьма компактные печатные СУ [2], при интенсивных доработках печатных интегрированных дипольных излучателей приходится принимать во внимание перечисленные неблагоприятные факторы. За многие десятилетия решение этой ситуации так и не было найдено. Однако экстенсивный поиск путей даже частичного преодоления хотя бы нескольких этих факторов уже представляет собой достойную усилий научно-техническую задачу.

Отметим, что равноамплитудные противофазные напряжения можно подать не только на центральные близкорасположенные концы половин диполя, но и на их удаленные, существенно разнесенные в пространстве концы [3], формируя тем самым излучатель дипольного вида (ИДВ) с концевым питанием (рис. 1, б). Степень разнесения (т. е. расстояние между концами) может достигать половину длины волны, соответствующей центральной частоте рабочего диапазона ИДВ, а в ряде случаев

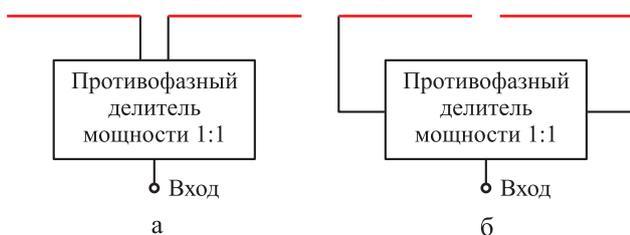


Рис. 1. Функциональные схемы:

а – классического диполя; б – излучателя дипольного вида с концевым питанием

© Алексейцев С. А., Бухтияров Д. А., Горбачев А. П., Паршин Ю. Н., Тарасенко Н. В., 2019

может быть и больше [3]. Такой излучатель с цилиндрическими проводниками был успешно применен как для уединенных антенн с волноводным питанием [4, 5], так и для однодиапазонной полосково-стержневой директорной антенны [6].

Цель статьи – исходя из предложенного в работе [3] ИДВ с концевым питанием его объемных цилиндрических проводников, исследовать характеристики печатного двухдиапазонного излучающего модуля, позволяющего разнести центральные частоты рабочих диапазонов при хорошем согласовании и приемлемых формах диаграмм направленности на каждом из них.

Системный подход к формированию топологии печатного излучающего модуля на базе двух ИДВ

В соответствии с системным подходом, рекомендованным в работе [1], анализируемый интегрированный модуль включает в себя широкополосное печатное полосково-щелевое СУ [7], перекрывающее полосу частот до трех октав и характеризующееся отсутствием каких-либо сквозных металлизированных отверстий (рис. 2).

Такие отверстия усложняют технологию изготовления модуля. При их наличии требуется провести ряд работ, в числе которых прецизионное сверление твердосплавными сверлами, последующая ультразвуковая очистка отверстий от продуктов сверления, металлической стружки и заусенцев для процедуры

химико-гальванической металлизации на всю глубину отверстия.

Наличие в СУ фрагмента на основе щелевой линии автоматически обеспечивает равенство и противофазность высокочастотных напряжений на противоположных краях щели в широкой полосе частот ее одномодового режима, с запасом перекрывающей оба разнесенных сравнительно узкополосных частотных канала, которые формируются каждым из ИДВ с концевым питанием. Сами ИДВ реализованы параллельно друг другу. Причем для уменьшения возрастающих с частотой диссипативных потерь ближайшим к полосково-щелевому делителю и, следовательно, к заземленной кромке «а» – «б» его обратной металлизации (см. рис. 2) выполнен ИДВ высокочастотного канала. На рис. 2 введены следующие обозначения:

$B, C, w, w_D, l_D, R_D, a_D, s_D, b_D, c_D, d_D, a_T, a_G, L_P, w_P, l, m, m_1, m_2, m_3, m_5, s_M, b_S, b_T, b_P, m_4$ – размеры;

A – точка пайки штырька разъема.

Габаритный размер излучающей части интегрированного модуля определяется длиной именно этого ИДВ, поэтому низкочастотный ИДВ приходится свертывать в меандр. Обратная процедура, т. е. растяжение (разнесение) половин высокочастотного ИДВ за счет увеличения расстояния между разомкнутыми смежными концами его половин, не представляется возможной, так как эти концы должны находиться в непосредственной близости [3].

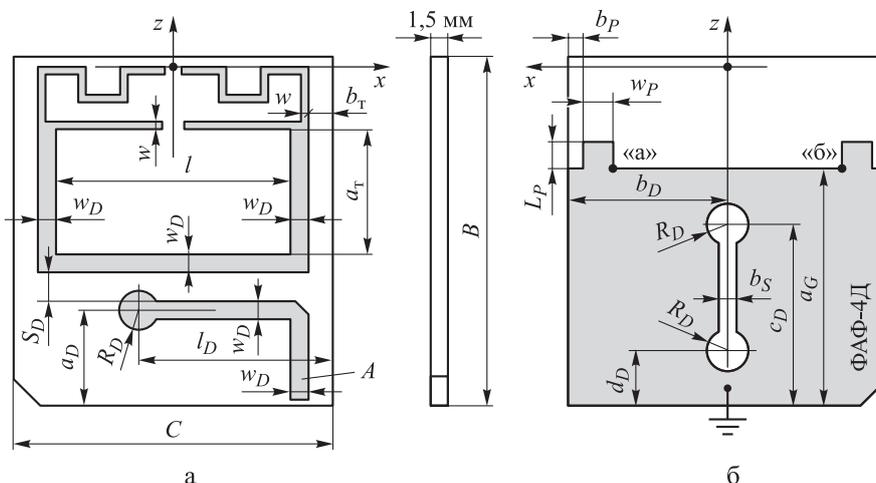


Рис. 2. Топология двухдиапазонного излучателя дипольного вида с концевым питанием:

а – лицевая сторона подложки; б – обратная сторона подложки



И хотя свертывание линейного излучателя в меандр не способствует сохранению его «поляризационной чистоты» (т. е. высокой линейности поляризации), на сегодняшний день пока нет альтернативы свертывания при компоновке двух параллельных друг другу различных по длине ИДВ.

В результате модуль выполняется на фольгированной с двух сторон заготовке размером $B \times C$ из материала ФАФ-4Д толщиной 1,5 мм (см. рис. 2). В отличие от материалов, использованных в работах [1, 2], в рассматриваемом случае отсутствуют какие-либо проводники и диэлектрики вблизи разомкнутых смежных концов излучающих проводников (за исключением самой подложки). Тем самым создаются предпосылки к упрощению компоновочных работ при проектировании многомодульных антенных систем. При этом возбуждающие напряжения подаются на существенно разнесенные в пространстве (на подложке) концы излучающих проводников, что снимает ограничения на типы печатных противозаземленных делителей мощности – они могут быть любыми с подходящей широкополосностью. Модуль содержит минимальное число изгибов и поворотов питающих полосковых линий, что способствует заметному снижению входного коэффициента отражения. Почти вся топология лицевой стороны делителя мощности прикрыта проводящим экраном, верхний (ориентация согласно рис. 2) край которого расположен над кромкой «а» – «б» металлизации обратной стороны подложки.

Два небольших пьедестала размером L_p и w_p необходимы как обратная металлизация верхней части подводных линий. Оба эти размера вместе с другими варьируются в процессе нелинейной параметрической оптимизации, чтобы одновременно достичь минимума модуля коэффициента отражения на обеих центральных частотах f_{0L} и f_{0H} низко- и высокочастотного каналов соответственно.

При этом излучающие проводники высокочастотного ИДВ расположены гораздо ближе к кромке «а» – «б» заземленной металлизации по сравнению с классическим диполем. Это связано со значительной емкостной составляющей входного импеданса уединенного ИДВ [3],

для компенсации которой приходится приближать проводники высокочастотного ИДВ к «земле», чтобы в него вносилась реактивная составляющая индуктивного характера, обусловленная наведенным током проводимости, текущим вдоль кромки «а» – «б» и локализованном в примыкающей к этой кромке полосе заземленной фольги. Ширина последней зависит от частоты и соотношения размеров в процессе оптимизации (настройки).

В результате входной коэффициент отражения двухдиапазонного модуля и интенсивность его излучения на основной и кроссполяризациях целесообразно рассчитывать с помощью программы трехмерного электродинамического проектирования, например, *CST Studio Suite*, доступной в сети Интернет по ссылке [8].

Можно найти все ключевые размеры топологии при заданных центральных частотах каналов, марке диэлектрика и допустимом уровне модуля входного коэффициента отражения на обеих частотах. Для этого используем полученную на основе системно-эвристического подхода (в значительной мере зависящего от опыта разработчика) [1] топологию излучающего модуля (см. рис. 2) в качестве стартового (начального) облика, за счет встроенного в систему *CST Studio Suite* параметрического оптимизатора.

При этом целесообразно учитывать, что неудачный (непрофессиональный) выбор облика начального приближения топологии всего излучателя, как правило, не может быть компенсирован за счет оптимизации размеров, расстояний и параметров диэлектрика подложки [1]. Кроме того, имеющийся опыт работы с излучателями дипольного вида [3–6] позволяет авторам полагать, что с большой вероятностью диаграммы направленности по основной поляризации на обеих центральных частотах будут вполне приемлемы, если на этих частотах будет достигнут минимум модуля входного коэффициента отражения.

Что касается кроссполяризованного излучения, то остается только надеяться, что его интенсивность не превысит допустимые уровни. Исходя из опыта работы авторов, сформулировать и разработать эффективный алгоритм процедуры минимизации кроссполяризован-

ной интенсивности в полном телесном угле 4π стерадиан на этапе параметрической оптимизации топологии печатной заготовки (см. рис. 2) не представляется возможным. Это связано с временными и материальными затратами, а также неактуальностью этой процедуры на этапе эскизного проектирования, когда не вполне однозначно определены факторы ближайшей к модулю конструктивно-компоновочной архитектуры антенной системы. В этом, по мнению авторов статьи, проявляется сущность метода целенаправленных проб и ошибок, широко применяемого в работах [1, 2] при проектировании симметрирующих устройств и различных излучателей.

Результаты параметрической оптимизации и рабочие характеристики двухдиапазонного излучателя дипольного вида

Итерационная процедура вариации ключевых размеров топологии излучателя (см. рис. 2) реализуется алгоритмом нелинейной оптимизации, встроенном в систему *CST Studio Suite* [8]. На рис. 3 показана излучающая часть в более крупном масштабе. Выбор этой системы обусловлен не только доступностью ее компактной версии, упомянутой в работе [8], вполне достаточной для моделирования и оптимизации уединенных печатных антенн, но и тем, что Новосибирский государственный технический университет приобрел в конце 2019 г. лицензию полной версии *CST Studio Suite*.

В данной программе можно моделировать многоэлементные ФАР и системы излучателей и материалов практически любого типа (рупоры с внутренними импедансными поверхностями, излучатели Вивальди, диполи всех видов, метаматериалы, графен, зеркальные антенны, ионизированная плазма и т. п.).

При этом существенное значение имеет все еще во многом эвристическая процедура придания тому или иному размеру или параметру топологии статуса «ключевой». Неудачное назначение этого статуса кроме возрастания временных затрат на оптимизацию может привести к потере перспективного с точки зрения достижения полезного эффекта конечного облика излучателя [1]. Рассматривая в качестве ключевых размеры $B, C, w, w_D, l_D, R_D, a_D, s_D, b_D, c_D, d_D, a_T, a_G, L_P, w_P, l, m, m_1, m_2, m_3, m_5, s_M, b_S$ (см. рис. 2, 3; всего 23 размера), удалось достичь приемлемых показателей на материале ФАФ-4Д толщиной 1,5 мм для частот $f_{0L} = 2,0$ ГГц и $f_{0H} = 2,6$ ГГц.

Согласование излучателя с коаксиальным кабелем волнового сопротивления 50 Ом характеризуется зависимостью модуля входного коэффициента отражения от частоты (рис. 4, красная линия). Расчетные диаграммы направленности по основной поляризации в плоскости вектора \mathbf{E} напряженности электрического поля (сечение xoz) обозначены красными линиями на рис. 5, а в плоскости вектора \mathbf{H} напряженности магнитного поля (сечение yoz) – красными линиями на рис. 6. Синими линиями

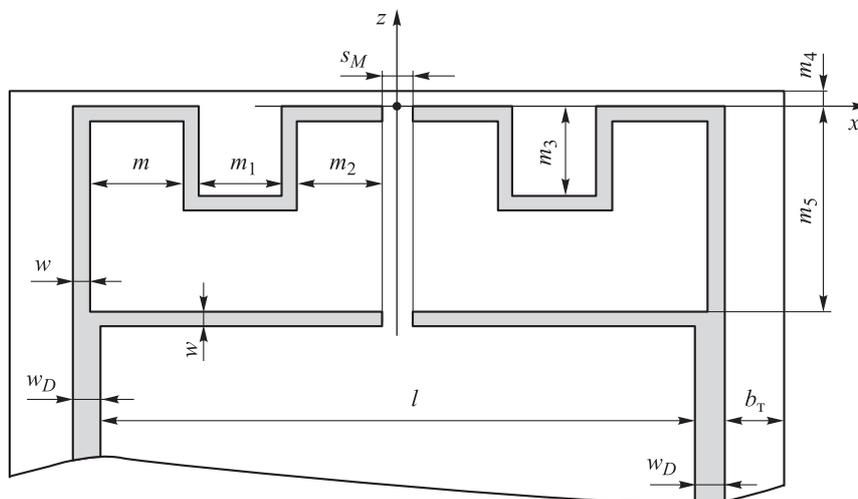


Рис. 3. Топология лицевой стороны подложки излучающей части модуля:
 $w, w_D, l, m, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, s_M, b_T$ – размеры



на рис. 5, 6 изображены полярные диаграммы интенсивности кроссполяризационного излучения, полученные после оптимизации. При этом значения ключевых и трех вспомогательных технологически обоснованных размеров (мм) составили (см. рис. 2, 3; всего 26 размеров):

$$\begin{aligned}
 B &= 95; & C &= 57,0; & w &= 1,9; & w_D &= 4,2; \\
 l_D &= 39,2; & R_D &= 2,9; & a_D &= 30,3; & s_D &= 7,5; \\
 b_D &= 28,5; & c_D &= 46,0; & d_D &= 25,5; & a_T &= 44,9; \\
 a_G &= 80,5; & L_P &= 2,2; & w_P &= 6,8; & l &= 32,0; \\
 m &= 4,0; & m_1 &= 3,5; & m_2 &= 6,5; & m_3 &= 6,7; \\
 m_4 &= 0,8; & m_5 &= 10,2; & s_M &= 1,2; & b_P &= 6,9; \\
 b_S &= 1,1; & b_T &= 8,0.
 \end{aligned}$$

Эти размеры были использованы при изготовлении опытного образца, обследованного в безэховой камере Акционерного общества «НИИ измерительных приборов – Новосибирский завод имени Коминтерна». В ней размещены стандартные поворотные и отсчетные устройства, а также векторный анализатор цепей *Agilent N5241A (PNA-X)*, генератор сигналов *E8257D PSG* и рупорные антенны с линейной поляризацией.

При этом подложка излучателя, реализованная согласно рис. 2, была размещена в плоском, почти сплошном сборном металлическом корпусе. В нижней узкой стенке корпуса было выполнено локальное прямоугольное отверстие для обеспечения доступа к коаксиально-полосковому переходу типа *SMA (SubMiniature version A connector)*. Верхняя узкая стенка полностью отсутствовала для беспрепятственной установки печатной платы излучателя, выступавшей за пределы верхней части корпуса на весь размер своего излучающего фрагмента (см. рис. 3). В результате верхний край корпуса проецировался на кромку «а» – «б» металлизации обратной стороны подложки (см. рис. 2, б).

По результатам измерений рабочих характеристик сформированы соответствующие зависимости (см. рис. 4–6, зеленые линии). Отличия между экспериментальными и расчетными характеристиками находятся в приемлемых границах и свидетельствуют об адек-

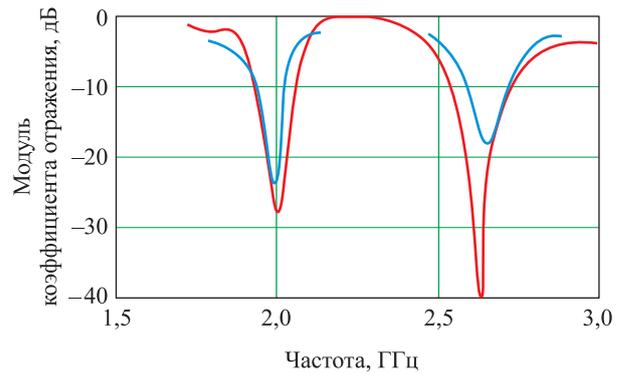


Рис. 4. Частотные характеристики модуля коэффициента отражения двухдиапазонного ИДВ, полученные в результате моделирования (—) и экспериментально (—)

ватности описанной методики проектирования двухдиапазонных ИДВ с концевым питанием. И хотя этапы проектирования еще предстоит упорядочить, полученные результаты можно квалифицировать как обнадеживающие. Отметим, что более подробно эти этапы описаны в заявке на патент Российской Федерации, положительное решение о выдаче которого получено недавно [9].

С одной стороны, описанные выше результаты свидетельствуют о возможности заметного разнесения центральных частот f_{0L} и f_{0H} обоих каналов без существенного искажения диаграмм направленности по основной поляризации и роста уровня кроссполяризационного излучения.

С другой стороны, возникает необходимость оценивать предельные возможности по разнесению центральных частот каналов с ИДВ. Такие оценки можно сформулировать лишь с привлечением статистических подходов. При этом полученные численные методы конкретных значений отношения f_{0H}/f_{0L} аппроксимируются полиномом соответствующей формы и степени при заданных типах диэлектрика, допустимой степени искажения диаграмм направленности и уровня кроссполяризационного излучения в пределах телесного угла ее главного лепестка. Так, например, для материала ФАФ-4Д толщиной 1,5 мм удалось обеспечить разнесение центральных частот, при котором $f_{0H}/f_{0L} = 1,4$.

Надо полагать, что природные свойства уединенных ИДВ в значительной мере будут влиять на разнесение частот двух близко рас-

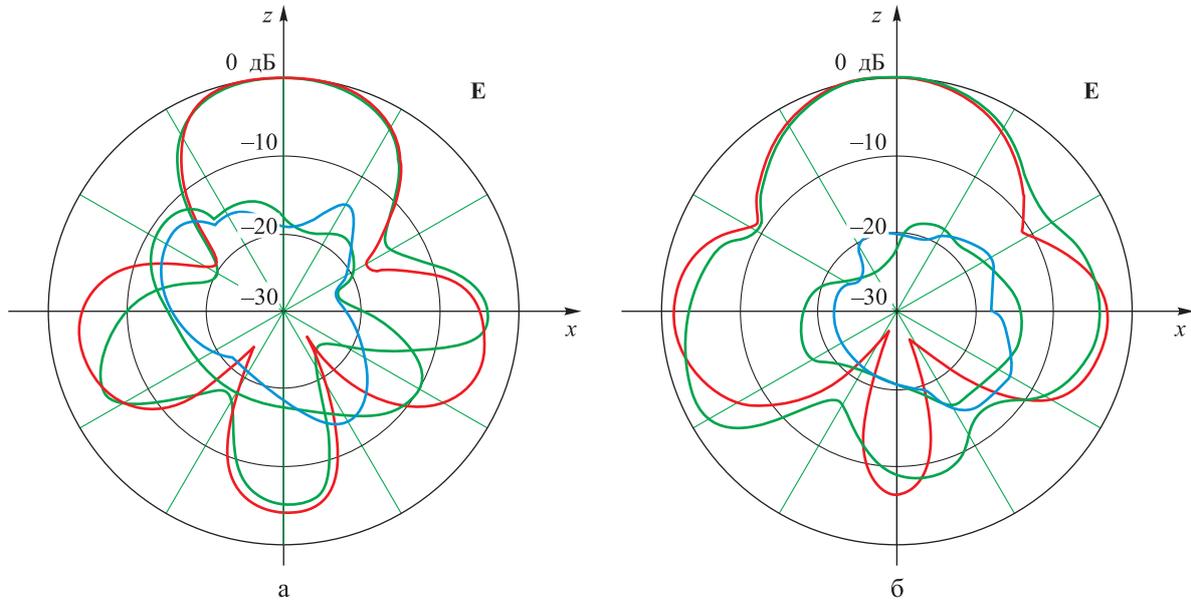


Рис. 5. Интенсивность кроссполаризационного излучения двухдиапазонного ИДВ в плоскости вектора **E** напряженности электрического поля (дБ) для частот f_{0L} (а) и f_{0H} (б) и полученные в результате моделирования:

— диаграммы направленности; — полярные диаграммы кроссполаризации;
— диаграммы, полученные экспериментально

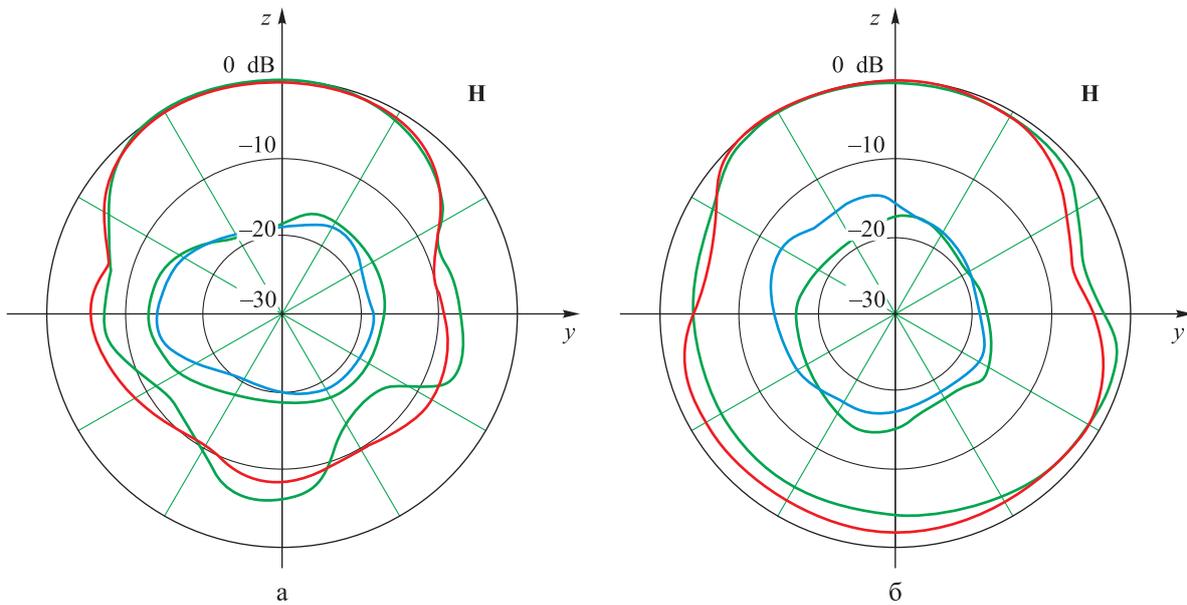


Рис. 6. Интенсивность кроссполаризационного излучения двухдиапазонного ИДВ в плоскости вектора **H** напряженности магнитного поля (дБ) для частот f_{0L} (а) и f_{0H} (б) и полученные в результате моделирования:

— диаграммы направленности; — полярные диаграммы кроссполаризации;
— диаграммы, полученные экспериментально

положенных в пространстве излучателей этого типа. И в этом плане авторы считают целесообразным рекомендовать работу [3], в которой на основе электродинамического анализа систематизированы ряд свойств уединенных ИДВ, включая частотные характеристики их комплексных входных импедансов и форму

диаграммы направленности по основной поляризации.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования ИДВ с концевым питанием при модернизации антенных систем с линейной поляризацией. Выбор кон-



цевых клемм обеих половин ИДВ для подачи возбуждающих противофазных напряжений привносит в процедуры проектирования дополнительные степени свободы как в плане выбора типов симметрирующих устройств, так и в конструктивно-компоновочных аспектах. Предложенная топология не требует реализации сквозных переходных металлизированных отверстий и/или каких-либо проводящих межслойных переходов в виде узких полосок фольги на торцах платы, припаиваемых к печатным фрагментам лицевой и обратной сторон подложки. Как приведенные результаты, так и аналогичные для других частот, могут быть полезны при оперативном принятии решений во время эскизного проектирования, а также при оценивании предельно достижимых (потенциальных) характеристик модернизируемых и вновь проектируемых антенных систем.

Список литературы

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д. И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2012, 744 с.
2. Zhi Ning Chen, ed. Handbook of antenna technologies. Springer Science + Business Media Singapore, 2016. XXXI. 3473 p.
3. Патент на изобретение № 2472261. Дипольный излучатель // Д. А. Бухтияров, А. П. Гор-

бачев, Ю. О. Филимонова. Оpubл.: 10.01.2013. Бюл. № 1.

4. Бухтияров Д. А., Горбачев А. П., Шведова А. В. Модифицированная дипольная антенна, питаемая круглым волноводом с доминантной волной // Антенны. 2015. Вып. 9 (220). С. 44–52.
5. Buhtiyarov D. A., Gorbachev A. P., Atuchin V. V. The linearly polarized waveguide-fed dipole-like antenna // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. August 2015. No. 29:13. Pp. 1720–1727.
6. Buhtiyarov D. A., Gorbachev A. P., Zhelezko S. Yu. Improvement of the quasi-Yagi antenna performances by using an ends-fed dipole driver // Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering. January 2014. Vol. 2. No. 1. Pp. 6–17.
7. Bialkowski M. E., Abbosh A. M. Design of a compact UWB out-of-phase power divider // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. Apr. 2007. Vol. 17. No. 4. Pp. 289–291.
8. CST Studio Suite. URL: <http://www.cst.com/academia/student-edition> (data access 21.11.2019).
9. Алексейцев С. А., Горбачев А. П. Двухдиапазонная антенна. Решение от 03.12.2019 о выдаче патента на изобретение по заявке № 2019115309/28(029170) от 20.05.2019.

Поступила 02.12.18

Алексейцев Сергей Александрович – инженер-конструктор 2-й категории Акционерного общества «НИИ измерительных приборов – Новосибирский завод имени Коминтерна», аспирант кафедры «Радиоприемные и радиопередающие устройства» Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск. Область научных интересов: радиолокация, антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.

Бухтияров Дмитрий Андреевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Акционерного общества «НИИ измерительных приборов – Новосибирский завод имени Коминтерна», г. Новосибирск. Область научных интересов: радиолокация, антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.

Горбачев Анатолий Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоприемные и радиопередающие устройства» Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск. Область научных интересов: радиолокация, антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.

Паршин Юрий Николаевич – инженер-электроник 2-й категории Акционерного общества «НИИ измерительных приборов – Новосибирский завод имени Коминтерна», аспирант кафедры «Радиоприемные и радиопередающие устройства» Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск. Область научных интересов: радиолокация, антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.

Тарасенко Наталья Валентиновна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая физика» Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск. Область научных интересов: радиолокация, антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.



Printed dual-band end-feed dipole radiators

The study describes a new dual-band dipole printed radiator, which is part of an integrated module that contains a strip-slotted balun, whose outputs are first connected to the remote ends of both halves of the dipole radiator. We examine the features of its structural implementation, layout and technological performance, and give optimized geometric parameters of the printing module. The experimental results verify the proposed approach and serve as evidence of the acceptability of the obtained operating characteristics of the radiators.

Keywords: dipole radiator, printed design, radiation pattern, reflection coefficient.

Alekseytsev Sergey Aleksandrovich – second category design engineer, Research Institute of Measuring Instruments – Comintern Novosibirsk Plant, Joint Stock Company; post-graduate, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk.

Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.

Bukhtiyarov Dmitriy Andreevich – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow, Research Institute of Measuring Instruments – Comintern Novosibirsk Plant, Joint Stock Company, Novosibirsk.

Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.

Gorbachev Anatoliy Petrovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk.

Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.

Parshin Yuriy Nikolaevich – second category electronic engineer, Research Institute of Measuring Instruments – Comintern Novosibirsk Plant, Joint Stock Company; post-graduate, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University, r. Novosibirsk.

Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.

Tarasenko Natalya Valentinovna – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of General Physics, Novosibirsk State Technical University, r. Novosibirsk.

Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.



УДК 621.396.96

И. О. Девятьяров, В. А. Доброжанский

Алгоритм расчета ковариационной матрицы оцененного положения постановщика активной шумовой помехи

Рассмотрены алгоритм отождествления трасс постановщиков активных шумовых помех и построение оценки координат предполагаемого положения такого постановщика как линейной оценки истинного положения с минимальной дисперсией. Предложен алгоритм расчета ковариационной матрицы полученной оценки. Результаты работы могут быть использованы для модификации и развития алгоритмов, обеспечивающих работу перспективной зенитной ракетной системы по постановщику активных шумовых помех.

Ключевые слова: постановщики, активные шумовые помехи, отождествление, ковариационная матрица.

Введение

В состав перспективной зенитной ракетной системы (ЗРС) входят многофункциональные радиолокаторы (МФР), пусковые установки (ПУ), а также пункт боевого управления (ПБУ).

Важной задачей ПБУ является формирование единой воздушной обстановки на основе данных, получаемых от подчиненных источников радиолокационной информации. Данная задача решается алгоритмом формирования единого массива трасс (ЕМТ).

В современных условиях работа перспективной зенитной ракетной системы будет проводиться в условиях сложной многоцелевой и помеховой обстановки. Одним из возможных вариантов помех являются активные шумовые помехи (АШП), для которых МФР определяет и передает на ПБУ только угловые координаты и признак помехи. Если в составе ЗРС находятся как минимум два пространственно-разнесенных МФР, то становится возможным определить координаты предполагаемого положения постановщика АШП. Однако при наличии нескольких одновременно действующих постановщиков АШП становится актуальной задача корректного отождествления трассовой информации, поступившей от нескольких МФР.

В данной статье приведен алгоритм отождествления трасс постановщиков АШП, частью которого является алгоритм оценки координат предполагаемого положения цели. Предложен алгоритм расчета ковариационной матрицы такой оценки.

Алгоритм отождествления трасс постановщиков АШП

Для решения задачи оценки координат постановщиков АШП необходимо вначале принять решение о том, что информация о постановщике АШП, поступившая от разных источников, принадлежит одному и тому же постановщику АШП. Для аэродинамических целей задача отождествления в ПБУ уже решается путем вычисления значения отношения максимального правдоподобия с последующим сравнением его с порогом [1]. Отношение правдоподобия строится с использованием координат целей и информации о точности измерения этих координат (выраженной в виде ковариационной матрицы), поступивших от МФР (в декартовой местной земной системе координат (МЗСК) МФР – координаты x, y, z).

Для унификации было предложено строить алгоритм отождествления постановщиков АШП аналогичным способом с учетом того, что поступающая от МФР в МЗСК информация сформирована на основе измерения двух независимых угловых координат. Для этого на каждой из прямых, содержащих пеленги на цель от каждого МФР, выбираются точки, между которыми будет наименьшее расстояние. Этим расстоянием будет общий перпендикуляр к двум прямым [1].

Схема ЗРС и пеленги приведены на рис. 1. Введем следующие обозначения:

Q – координаты точки на пеленге, поступившем от МФР № 2;

L – координаты точки на пеленге, поступившем от МФР № 1;

H – координаты МФР № 1;

E – координаты МФР № 2;

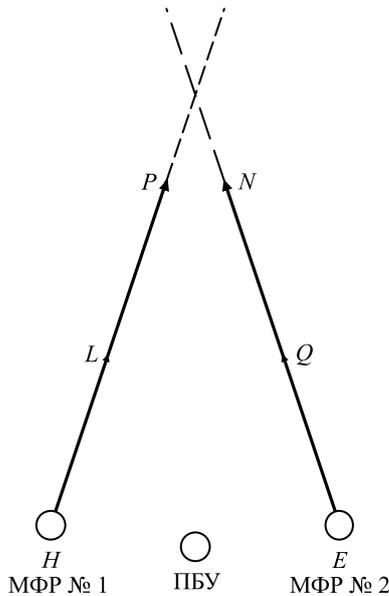


Рис. 1. Схематичное изображение средств ЗРС и пеленгов на предполагаемое положение постановщика АШП

N – координаты предполагаемого положения постановщика АШП на пеленге, поступившем от МФР № 2;

P – координаты предполагаемого положения постановщика АШП на пеленге, поступившем от МФР № 1.

Для векторов декартовых прямоугольных координат \mathbf{EN} и \mathbf{HP} справедливы следующие выражения [2]:

$$\mathbf{EN} = \mathbf{EQ}t; \quad (1)$$

$$\mathbf{HP} = \mathbf{HL}s. \quad (2)$$

Здесь коэффициенты t и s находятся из условия компланарности векторов \mathbf{HN} , \mathbf{HL} , $[\mathbf{HL} \times \mathbf{EQ}]$ и \mathbf{EP} , \mathbf{EQ} , $[\mathbf{HL} \times \mathbf{EQ}]$, а именно равенства нулю их смешанного произведения:

$$(\mathbf{EN} + \mathbf{EQ}t; \mathbf{HL}; [\mathbf{HL} \times \mathbf{EQ}]) = 0; \quad (3)$$

$$t = \frac{(\mathbf{EN}, [\mathbf{HL} \times [\mathbf{HL} \times \mathbf{EQ}]])}{(\mathbf{EQ}, [\mathbf{HL} \times [\mathbf{HL} \times \mathbf{EQ}]])}. \quad (4)$$

Аналогично для коэффициента s справедливо следующее:

$$(\mathbf{HE} + \mathbf{HL}s; \mathbf{EQ}; [\mathbf{HL} \times \mathbf{EQ}]) = 0; \quad (5)$$

$$s = \frac{(\mathbf{EH}, [\mathbf{EQ} \times [\mathbf{HL} \times \mathbf{EQ}]])}{(\mathbf{HL}, [\mathbf{EQ} \times [\mathbf{HL} \times \mathbf{EQ}]])}. \quad (6)$$

Ковариационные матрицы в точках N и P рассчитываются по формулам:

$$\mathbf{K}_N = \mathbf{K}_Q \begin{pmatrix} |\mathbf{EN}| \\ \mathbf{EQ} \end{pmatrix}^2; \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_P = \mathbf{K}_L \begin{pmatrix} |\mathbf{HP}| \\ \mathbf{HL} \end{pmatrix}^2, \quad (8)$$

где \mathbf{K}_Q – ковариационная матрица ошибок координат точки Q ;

\mathbf{K}_P – ковариационная матрица ошибок координат точки P .

Далее проводится отождествление трасс постановщиков АШП путем сравнения с порогом обобщенного расстояния [3]:

$$(\lambda_N - \lambda_P)^T (\mathbf{K}_N + \mathbf{K}_P)^{-1} (\lambda_N - \lambda_P) < C. \quad (9)$$

Здесь λ_N, λ_P – векторы координат точек предполагаемого положения постановщика АШП в прямоугольной декартовой местной земной системе координат ПБУ;

C – пороговое значение.

Обобщенное расстояние является случайной величиной с распределением χ^2 . Степень свободы распределения определяется количеством независимых координат [4, 5]. В случае отождествления постановщиков АШП число независимых координат равно 2. Порог выбирается исходя из нужной процентной точки распределения χ^2 с учетом степени свободы. Если обобщенное расстояние не превысило порог, то принимается решение о том, что данные две трассы принадлежат одной цели – постановщику АШП.

Алгоритм оценки координат триангуляционной точки

После успешного отождествления постановщиков АШП с использованием описанного алгоритма в качестве координат целей в ПБУ необходимо оценить координаты постановщика АШП. В качестве оценки этих координат предлагается использовать линейную несмещенную оценку с минимальной дисперсией $\hat{\lambda}_{\text{triang}} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})^T$ вектора $\lambda_{\text{triang}} = (x, y, z)^T$ на основе двух измерений ближайших точек на пеленгах

$$\lambda_1 = (x_1, y_1, z_1)^T \text{ и } \lambda_2 = (x_2, y_2, z_2)^T.$$

При этом

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{triang}} + \xi_1; \quad (10)$$



$$\lambda_2 = \lambda_{\text{triang}} + \xi_2, \quad (11)$$

где $\xi_1 = (\xi_{1x}, \xi_{1y}, \xi_{1z})$, $\xi_2 = (\xi_{2x}, \xi_{2y}, \xi_{2z})$ – векторы шума измерений.

Ковариационные матрицы векторов шума рассчитываются по формулам:

$$\mathbf{K}^1 = \begin{pmatrix} K_{xx}^1 & K_{xy}^1 & K_{xz}^1 \\ K_{xy}^1 & K_{yy}^1 & K_{yz}^1 \\ K_{xz}^1 & K_{yz}^1 & K_{zz}^1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{K}^2 = \begin{pmatrix} K_{xx}^2 & K_{xy}^2 & K_{xz}^2 \\ K_{xy}^2 & K_{yy}^2 & K_{yz}^2 \\ K_{xz}^2 & K_{yz}^2 & K_{zz}^2 \end{pmatrix}.$$

Измерения ближайших точек на пленках – это зависимые величины с ковариацией:

$$\mathbf{K}^{12} = \begin{pmatrix} K_{xx}^{12} & K_{xy}^{12} & K_{xz}^{12} \\ K_{yx}^{12} & K_{yy}^{12} & K_{yz}^{12} \\ K_{zx}^{12} & K_{zy}^{12} & K_{zz}^{12} \end{pmatrix}; \quad (12)$$

$$\mathbf{K}^{21} = (\mathbf{K}^{12})^T. \quad (13)$$

Линейная оценка будет иметь вид

$$\hat{\lambda}_{\text{triang}} = \mathbf{A}_1 \lambda_1 + \mathbf{A}_2 \lambda_2, \quad (14)$$

$$\text{где } \mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} A_{xx}^1 & A_{xy}^1 & A_{xz}^1 \\ A_{xy}^1 & A_{yy}^1 & A_{yz}^1 \\ A_{xz}^1 & A_{yz}^1 & A_{zz}^1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} A_{xx}^2 & A_{xy}^2 & A_{xz}^2 \\ A_{xy}^2 & A_{yy}^2 & A_{yz}^2 \\ A_{xz}^2 & A_{yz}^2 & A_{zz}^2 \end{pmatrix}$$

– матрицы весов.

Из условия несмещенности оценки с учетом того, что $M\xi_1 = M\xi_2 = 0$, получим:

$$\lambda_{\text{triang}} = M\hat{\lambda}_{\text{triang}} = M(\mathbf{A}_1 \lambda_1 + \mathbf{A}_2 \lambda_2) = \mathbf{A}_1 \lambda_{\text{triang}} + \mathbf{A}_2 \lambda_{\text{triang}}; \quad (15)$$

$$\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 = \mathbf{I}. \quad (16)$$

Здесь \mathbf{I} – единичная матрица;

M – математическое ожидание.

Для определения матриц весов \mathbf{A}_1 и \mathbf{A}_2 используем критерий минимума среднеквадратического отклонения оценки $M(\hat{\lambda}_{\text{triang}} - \lambda_{\text{triang}})^2 \sim \min$:

$$D(\lambda_{\text{triang}}) = M(\hat{\lambda}_{\text{triang}} - \lambda_{\text{triang}})^2 = M(\mathbf{A}_1 \xi_1 + (\mathbf{I} - \mathbf{A}_1) \xi_2)^2 \sim \min_{\mathbf{A}_1}, \quad (17)$$

$$\text{где } A_i \xi_i = \begin{pmatrix} \sum_{\alpha} A_{x\alpha}^i \xi_{i\alpha} \\ \sum_{\alpha} A_{y\alpha}^i \xi_{i\alpha} \\ \sum_{\alpha} A_{z\alpha}^i \xi_{i\alpha} \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2.$$

Выражение для дисперсии можно переписать в виде

$$M(\mathbf{A}_1 \xi_1 + (\mathbf{I} - \mathbf{A}_1) \xi_2)^2 = M \left(\sum_{\alpha} A_{x\alpha}^1 \xi_{1\alpha} + \sum_{\beta} (I_{x\beta} - A_{x\beta}^1) \xi_{2\beta} \right)^2 + M \left(\sum_{\alpha} A_{y\alpha}^1 \xi_{1\alpha} + \sum_{\beta} (I_{y\beta} - A_{y\beta}^1) \xi_{2\beta} \right)^2 + M \left(\sum_{\alpha} A_{z\alpha}^1 \xi_{1\alpha} + \sum_{\beta} (I_{z\beta} - A_{z\beta}^1) \xi_{2\beta} \right)^2. \quad (18)$$

Каждое из трех слагаемых в выражении (18) является неотрицательным. Рассмотрим подробнее первое из них, а выражения для остальных будут аналогичными:

$$M \left(\sum_{\alpha} A_{x\alpha}^1 \xi_{1\alpha} + \sum_{\beta} (I_{x\beta} - A_{x\beta}^1) \xi_{2\beta} \right)^2 = M(A_{xx}^1 \xi_{1x} + A_{xy}^1 \xi_{1y} + A_{xz}^1 \xi_{1z} + (1 - A_{xx}^1) \xi_{2x} - A_{xy}^1 \xi_{2y} - A_{xz}^1 \xi_{2z})^2. \quad (19)$$

Поскольку $M(\xi_{i\alpha} \xi_{j\beta}) = K_{\alpha\beta}^{ij}$, то из условия минимума среднеквадратического отклонения оценки, получим после раскрытия скобок, дифференцируя по каждой из компонент:

$$A_{xx}^1 K_{xx}^1 + A_{xy}^1 K_{xy}^1 + A_{xz}^1 K_{xz}^1 + A_{xx}^1 K_{xx}^2 + A_{xy}^1 K_{xy}^2 + A_{xz}^1 K_{xz}^2 - 2A_{xx}^1 K_{xx}^{12} - A_{xy}^1 K_{xy}^{12} - A_{xz}^1 K_{xz}^{12} - A_{xy}^1 K_{yx}^{12} - A_{xz}^1 K_{zx}^{12} - A_{xz}^1 K_{zx}^{12} = K_{xx}^2 - K_{xx}^{12}; \quad (20)$$

$$A_{xy}^1 K_{yy}^1 + A_{xx}^1 K_{xy}^1 + A_{xz}^1 K_{yz}^1 + A_{xx}^1 K_{xy}^2 + A_{xy}^1 K_{yy}^2 + A_{xz}^1 K_{yz}^2 - A_{xx}^1 K_{xy}^{12} - A_{xx}^1 K_{yx}^{12} - 2A_{xy}^1 K_{yy}^{12} - A_{xz}^1 K_{yz}^{12} - A_{xz}^1 K_{zy}^{12} = K_{xy}^2 - K_{yx}^{12}; \quad (21)$$

$$A_{xz}^1 K_{zz}^1 + A_{xx}^1 K_{xz}^1 + A_{xy}^1 K_{yz}^1 + A_{xx}^1 K_{xz}^2 + A_{xy}^1 K_{yz}^2 + A_{xz}^1 K_{zz}^2 - A_{xx}^1 K_{xz}^{12} - A_{xx}^1 K_{zx}^{12} - A_{xy}^1 K_{xz}^{12} - A_{xy}^1 K_{zx}^{12} - 2A_{xz}^1 K_{zz}^{12} = K_{xz}^2 - K_{zx}^{12}, \quad (22)$$

или, в матричной форме,

$$\mathbf{K} \mathbf{A}_x^1 = \mathbf{G}_x^2, \quad (23)$$

где $\mathbf{K} = \mathbf{K}^1 + \mathbf{K}^2 - \mathbf{K}^{12} - \mathbf{K}^{21}$;



$$\mathbf{A}_x^1 = \begin{pmatrix} A_{xx}^1 \\ A_{xy}^1 \\ A_{xz}^1 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{G}_x^2 = \begin{pmatrix} K_{xx}^2 - K_{xx}^{12} \\ K_{xy}^2 - K_{yx}^{12} \\ K_{xz}^2 - K_{zx}^{12} \end{pmatrix}.$$

Получив аналогичные выражения для остальных компонент \mathbf{A}^1 , запишем

$$\mathbf{K}\mathbf{A}^1 = \mathbf{G}^2, \quad (24)$$

где $\mathbf{G}^2 = \mathbf{K}^2 - \frac{\mathbf{K}^{12} + \mathbf{K}^{21}}{2}$.

Таким образом, выражение для \mathbf{A}^1 будет иметь вид

$$\mathbf{A}^1 = (\mathbf{K})^{-1} \mathbf{G}^2. \quad (25)$$

Поскольку $\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 = \mathbf{I}$, то

$$\mathbf{A}^2 = \mathbf{I} - (\mathbf{K})^{-1} \mathbf{G}^2 = (\mathbf{K})^{-1} \mathbf{G}^1. \quad (26)$$

В итоге для линейной оценки вектора координат триангуляционной точки

$$\hat{\lambda}_{\text{triang}} = \mathbf{A}_1 \lambda_1 + \mathbf{A}_2 \lambda_2 = (\mathbf{K})^{-1} (\mathbf{G}^2 \lambda_1 + \mathbf{G}^1 \lambda_2). \quad (27)$$

Алгоритм оценки ковариационной матрицы триангуляционной точки

Ковариационная матрица оценки ближайших точек на пеленгах содержит две составляющие, первая из которых обусловлена используемым методом отождествления. Вторая составляющая связана с неточностью определения угловых координат. В связи с этим для ковариационных матриц справедливы следующие выражения [6]:

$$\mathbf{K}_{\text{сск}}^1 = \mathbf{K}_{\text{м_сск}}^1 + \mathbf{K}_{\text{и_сск}}^1; \quad (28)$$

$$\mathbf{K}_{\text{сск}}^2 = \mathbf{K}_{\text{м_сск}}^2 + \mathbf{K}_{\text{и_сск}}^2, \quad (29)$$

где $\mathbf{K}_{\text{м_сск}}$ – ковариационная матрица ошибок сферических координат, обусловленных используемым методом отождествления;

$\mathbf{K}_{\text{и_сск}}$ – ковариационная матрица ошибок сферических координат, обусловленных характеристиками текущей оценки координат цели радиолокатором.

Ковариационная матрица измерений сферических координат ближайшей точки находится из ковариационной матрицы измерений декартовых координат по формуле

$$\mathbf{K}_{\text{и_сск}} = \mathbf{S} (\mathbf{K}_{\text{и_пск}}) \mathbf{S}^T. \quad (30)$$

Здесь \mathbf{S} – матрица производных сферических координат ближайшей точки по прямоугольным декартовым координатам в МЗСК, вычисляемая по формуле

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R}{\partial x} & \frac{\partial R}{\partial y} & \frac{\partial R}{\partial z} \\ \frac{\partial \beta}{\partial x} & \frac{\partial \beta}{\partial y} & \frac{\partial \beta}{\partial z} \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} & \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} & \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} & \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} & \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \\ \frac{-z}{x^2 + z^2} & 0 & \frac{x}{x^2 + z^2} \\ \frac{-xy}{(x^2 + y^2 + z^2)(x^2 + z^2)} & \frac{x^2 + z^2}{x^2 + y^2 + z^2} & \frac{-yz}{(x^2 + y^2 + z^2)(x^2 + z^2)} \end{pmatrix}, \quad (31)$$

R – азимут в сферической системе координат;

β – дальность в сферической системе координат;

ε – угол места в сферической системе координат;

$\mathbf{K}_{\text{и_пск}}$ – ковариационная матрица ошибок прямоугольных декартовых координат, получаемая от МФР.

Ковариационная матрица ошибок, причиной которых является используемый метод отождествления, имеет следующий вид:

$$\mathbf{K}_{\text{м_сск}}^1 = \begin{pmatrix} D(R_1) & cov(R_1, \beta_1) & cov(R_1, \varepsilon_1) \\ cov(R_1, \beta_1) & 0 & 0 \\ cov(R_1, \varepsilon_1) & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (32)$$

Оценка дисперсии дальности ближайшей точки проводится следующим образом:

$$D(R_1) = D(s | \mathbf{HL}) = |\mathbf{HL}|^2 D(s) = dD(s). \quad (33)$$

Дисперсия s рассчитывается по формуле

$$D(s) = \mathbf{grad}(s_1) \mathbf{K}_{\text{и_сск}}^1 \mathbf{grad}(s_1)^T + \mathbf{grad}(s_2) \mathbf{K}_{\text{и_сск}}^2 \mathbf{grad}(s_2)^T, \quad (34)$$

где \mathbf{grad} – вектор частных производных по декартовым координатам соответствующих трасс.

Ковариации дальности триангуляционной точки с углами определяют следующим образом:



$$\text{cov}(R_1, \beta_1) = \sqrt{d} \cdot \text{grad}(s_1) \mathbf{K}_{\text{и_цск}}^1 \cdot \text{grad}(\beta_1); \quad (35)$$

$$\text{cov}(R_1, \varepsilon_1) = \sqrt{d} \cdot \text{grad}(s_1) \mathbf{K}_{\text{и_цск}}^1 \cdot \text{grad}(\varepsilon_1). \quad (36)$$

Аналогичным образом осуществляется расчет элементов ковариационной матрицы ошибок координат для второго измерения.

Значения координат точек на пеленгах, используемых при оценке координат постановщика АШП, являются зависимыми. Ковариационная матрица двух измерений имеет следующий вид в сферических координатах:

$$\mathbf{K}_{\text{цск}}^{12} = \begin{pmatrix} \text{cov}(R_1, R_2) & \text{cov}(R_1, \beta_2) & \text{cov}(R_1, \varepsilon_2) \\ \text{cov}(R_2, \beta_1) & 0 & 0 \\ \text{cov}(R_2, \varepsilon_1) & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (37)$$

Ковариации вычисляются следующим образом:

$$\text{cov}(R_1, R_2) = \sqrt{bd} (\text{grad}(s_1) \mathbf{K}_1 \cdot \text{grad}(t_1)^T + \text{grad}(s_2) \mathbf{K}_2 \cdot \text{grad}(t_2)^T); \quad (38)$$

$$\text{cov}(R_1, \beta_2) = \sqrt{d} \cdot \text{grad}(s_2) \mathbf{K}_2 \cdot \text{grad}(\beta_2)^T; \quad (39)$$

$$\text{cov}(R_1, \varepsilon_2) = \sqrt{d} \cdot \text{grad}(s_2) \mathbf{K}_2 \cdot \text{grad}(\varepsilon_2)^T; \quad (40)$$

$$\text{cov}(R_2, \beta_1) = \sqrt{b} \cdot \text{grad}(t_1) \mathbf{K}_1 \cdot \text{grad}(\beta_1)^T; \quad (41)$$

$$\text{cov}(R_2, \varepsilon_1) = \sqrt{b} \cdot \text{grad}(t_1) \mathbf{K}_1 \cdot \text{grad}(\varepsilon_1)^T. \quad (42)$$

После расчета ковариационных матриц в сферических координатах необходимо провести переход к декартовым координатам по формулам:

$$\mathbf{K}^1 = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{K}_{\text{цск}}^1 \times \mathbf{V}_1^T; \quad (43)$$

$$\mathbf{K}^2 = \mathbf{V}_2 \times \mathbf{K}_{\text{цск}}^2 \times \mathbf{V}_2^T; \quad (44)$$

$$\mathbf{K}^{12} = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{K}_{\text{цск}}^{12} \times \mathbf{V}_2^T. \quad (45)$$

Здесь \mathbf{V} – матрица производных декартовых координат МЗСК по сферическим координатам МЗСК соответствующих трасс, а именно:

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial R} & \frac{\partial x}{\partial \beta} & \frac{\partial x}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial y}{\partial R} & \frac{\partial y}{\partial \beta} & \frac{\partial y}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial z}{\partial R} & \frac{\partial z}{\partial \beta} & \frac{\partial z}{\partial \varepsilon} \end{pmatrix} = \quad (46)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \varepsilon & -R \cos \varepsilon \sin \beta & -R \sin \varepsilon \cos \beta \\ \sin \beta & 0 & R \cos \varepsilon \\ \cos \varepsilon \sin \beta & R \cos \beta \cos \varepsilon & -R \sin \varepsilon \sin \beta \end{pmatrix}.$$

Координаты триангуляционной точки, согласно предыдущему разделу, определяются следующим образом:

$$\hat{\lambda}_{\text{triang}} = \mathbf{A}_1 \lambda_1 + \mathbf{A}_2 \lambda_2. \quad (47)$$

Следовательно, ковариационная матрица триангуляционной точки определяется так:

$$\mathbf{K}_{\text{triang}} = \mathbf{A}_1 \times \mathbf{K}^1 \times \mathbf{A}_1^T + \mathbf{A}_2 \times \mathbf{K}^2 \times \mathbf{A}_2^T + \mathbf{A}_1 \times \mathbf{K}^{12} \times \mathbf{A}_2^T + (\mathbf{A}_1 \times \mathbf{K}^{12} \times \mathbf{A}_2^T)^T. \quad (48)$$

Результаты исследования

Для исследования работы алгоритмов была разработана модель формирования и обработки трассовой информации. Воздушная обстановка состояла из одного постановщика АШП. В состав ЗРС входили два пространственно-разнесенных МФР. В биконической системе координат среднеквадратические отклонения (СКО) угловых координат составляли 3' для одного и 9' для второго МФР.

В качестве простой оценки координат триангуляционной точки с учетом представленного алгоритма отождествления может быть выбрана полусумма координат ближайших точек на пеленгах. На рис. 2 приведена гистограмма координаты у триангуляционной точки, получаемой таким простым способом, и способом, описанным в данной работе.

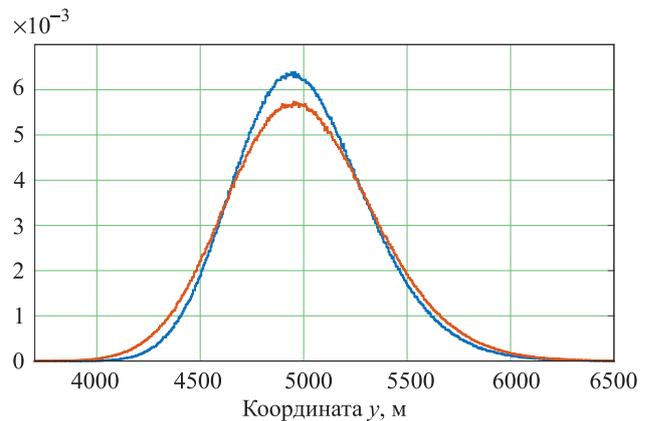


Рис. 2. Гистограммы координаты у триангуляционной точки для оценки:
— с минимальной дисперсией; — равной полусумме измерений

СКО координаты у уменьшилось на 9,4 % в моделируемом варианте.

Ковариационную матрицу триангуляционной точки в декартовых прямоугольных ко-

ординатах можно с помощью матрицы перехода преобразовать к ковариационной матрице в сферических координатах. Ее диагональными элементами являются дисперсии по дальности, углу места и азимуту. СКО дальности триангуляционной точки можно определить как корень из дисперсии дальности. СКО дальности также оценена с помощью статистического моделирования. На рис. 3 представлены результаты расчета СКО дальности триангуляционной точки, определенной двумя способами.

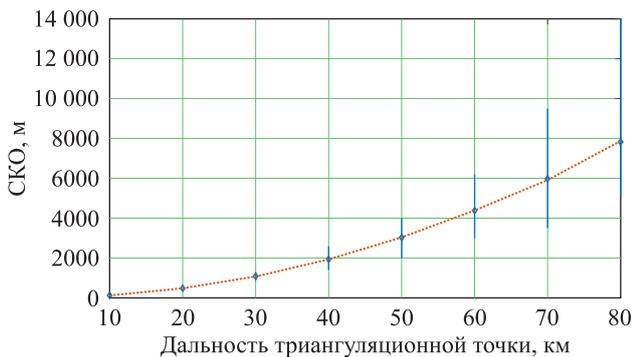


Рис. 3. СКО дальности триангуляционной точки, определенные:
♦ — по ковариационной матрице; — по математической модели

На рис. 3 вертикальными линиями показаны возможные значения получаемой по ковариационной матрице СКО дальности триангуляционной точки. Точками обозначены математические ожидания получаемых СКО. Математические ожидания СКО совпали с определенной по математической модели СКО с точностью до 1 %.

Заключение

В данной статье рассмотрены алгоритмы отождествления постановщиков АШП и оценки координат предполагаемого положения

постановщика АШП, обеспечивающие минимальную дисперсию ошибок. Кроме того, предложен алгоритм расчета ковариационной матрицы получившейся оценки. Проведено сравнение рассчитанной по ковариационной матрице СКО дальности триангуляционной точки с результатами моделирования.

Полученные результаты могут быть использованы для развития алгоритмов, обеспечивающих работу по постановщику АШП.

Список литературы

1. *Доброжанский В. А.* Объединение радиолокационной информации в пункте боевого управления ЗРК средней дальности // Сб. тез. докл. III Всерос. науч.-техн. конф. «Расплетинские чтения». М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2018. 112 с.
2. *Девятьяров И. О., Доброжанский В. А.* Отождествление целей и постановщиков АШП в пункте боевого управления // Сб. докл. VIII межвуз. студ. конф. по тематике «Научная сессия – современная радиоэлектроника». М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2019. 488 с.
3. *Биченко И. Г., Доброжанский В. А.* Отождествление трассовой информации многофункциональных радиолокаторов с учетом ковариационной матрицы ошибок координат // Антенны. М.: Радиотехника, 2013. 168 с.
4. *Большев Л. Н., Смирнов Н. В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983, 416 с.
5. *Крамер Г.* Математические методы статистики. М.: Мир, 1975, 648 с.
6. *Девятьяров И. О., Доброжанский В. А.* Алгоритм отождествления постановщиков активных шумовых помех в пункте боевого управления // Тр. 61-й Всерос. науч. конф. МФТИ. М.: МФТИ, 2018. 168 с.

Поступила 11.10.19

Девятьяров Игорь Олегович – инженер ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва.

Область научных интересов: алгоритмы третичной обработки радиолокационной информации, компьютерные методы обработки и анализа данных.

Доброжанский Владимир Алексеевич – начальник отдела ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва.

Область научных интересов: алгоритмы вторичной и третичной обработки радиолокационной информации, математическое и имитационное моделирование радиолокационных систем и пунктов управления.



Algorithm for calculating the covariance matrix of the noise jammer estimated position

The study considers an algorithm for identifying the noise jammers tracks and estimates the coordinates of the assumed position of such a jammer as a linear estimate of the true position with minimal dispersion. An algorithm for calculating the covariance matrix of the resulting estimate is proposed. Findings of the research can be used to modify and develop algorithms which ensure the operation of a promising anti-aircraft missile system for noise jamming.

Keywords: jammers, noise jamming, identification, covariance matrix.

Devyat'yarov Igor Olegovich – engineer, NPO Almaz named after A. A. Raspletin, Joint Stock Company, Moscow.
Science research interests: algorithms for tertiary processing of radar data, computer methods for processing and analyzing data.

Dobrozhanskiy Vladimir Alekseevich – Head of Department, NPO Almaz named after A. A. Raspletin, Joint Stock Company, Moscow.
Science research interests: algorithms for secondary and tertiary processing of radar data, mathematical and simulation modeling of radar systems and control centers.

УДК 621.396.96

А. В. Зайцев, А. А. Разин

Исследование частотного метода измерения дальности с использованием пачечного ЛЧМ-сигнала

Предложен способ измерения дальности в режиме «Сопровождение на проходе». Исследована зависимость погрешности измерения для разных частот девиации методом математического моделирования в среде *MATLAB*.

Ключевые слова: вторичная обработка, измерение дальности, пачечный линейно-частотно-модулированный сигнал, девиация, *MATLAB*.

Посредством режима «Сопровождение на проходе» (СНП) можно организовать многоцелевое сопровождение в зоне обзора с количеством до 100 целей. Однако в режиме квазинепрерывного излучения зондирующих импульсов возникает неоднозначность по частоте Доплера, когда доплеровский сдвиг частоты отраженного от объекта сигнала превышает частоту повторения импульсов. Также возникает неоднозначность по дальности, связанная с тем, что период повторения зондирующих импульсов меньше реальной задержки принятого сигнала.

В связи с этим для измерения координат происходит одновременное излучение нескольких пачек сигналов с различными значениями частоты повторения в каждой пачке. Путем корреляционной обработки по неоднозначным координатам, измеренным при приеме каждой пачки, вычисляют однозначные координаты целей – дальность и скорость. Данный метод требует 8–10 излучений в одной угловой позиции на разных частотах повторения.

В режиме СНП можно уменьшить время измерения однозначной дальности. Для этого

необходимо провести излучение и обработку сигнала в двух тактах обзора подряд с пачечным линейно-частотно-модулированным сигналом (ЛЧМ-сигналом).

Использование частотной модуляции внутри пачки когерентно излучаемых импульсов позволяет применять доплеровскую обработку отраженных сигналов с измерением частоты Доплера [1]. Изменение девиации от пачки к пачке позволяет измерить зависимость частоты Доплера от значения девиации и дальности до цели. Частотный метод позволяет за короткое время получить однозначное измерение дальности [2–4].

В данной статье методом математического моделирования исследована зависимость точности измерения дальности до цели:

- от полосы пропускания и расстановки доплеровских фильтров;
- девиации частоты;
- шум-фактора (С/Ш) при измерении частоты Доплера.

Структурная схема дальномера представлена на рис. 1.

Передатчик, состоящий из частотного модулятора и генератора высокой частоты, ге-



Рис. 1. Структурная схема дальномера:

БПФ – быстрое преобразование Фурье; АЦП – аналого-цифровой преобразователь



нерирует колебания, частота которых меняется по пилообразному периодическому закону. Аналитическая запись ЛЧМ-сигнала имеет вид:

$$S(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2), \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда;
 f_0 – несущая частота;
 t – время, изменяющееся в диапазоне $0 \dots T_{signal}$ с периодом дискретизации Δt ;
 T_{signal} – длительность тактов обзора;
 k – девиация частоты.

Таким образом, мгновенная частота в сигнале изменяется по линейному закону:

$$f_{и} = f_0 + kt. \quad (2)$$

В случае отраженного сигнала мгновенная частота будет иметь следующий вид:

$$f_c = f_0 + k(t - \tau_D), \quad (3)$$

где $\tau_D = \frac{2D}{c}$ – время задержки;
 D – дальность;
 c – скорость света.

Учитывая эффект Доплера, получим:

$$f_c = f_0 \left(1 + \frac{2V_{radial}}{c} \right) + k(t - \tau_D). \quad (4)$$

Здесь V_{radial} – радиальная скорость цели.

Измерив разность частот излучаемых и принимаемых колебаний, получим значение частоты Доплера:

$$f_D = f_{и} - f_c = k\tau_D + \frac{2f_0 V_{radial}}{c}. \quad (5)$$

При излучении сигнала в двух тактах обзора подряд на одной несущей частоте, но с разными девиациями частот k_1 и k_2 , вычислим разность между значениями частот Доплера:

$$f_{D1} - f_{D2} = k_1\tau_D - k_2\tau_D(k_1 - k_2). \quad (6)$$

Затем, измерив значения частот Доплера сигнала в двух тактах обзора, можно получить дальность до цели. Кроме того, точность измерения будет зависеть не от скорости цели, а от разности частот Доплера.

Зная излучаемый сигнал при нулевой дальности, можно вычислить зависимость сдвига автокорреляционной функции от те-

кущей дальности. Для отраженного сигнала с временной задержкой строится взаимно корреляционная функция по излучаемому и принимаемому сигналам [5, 6].

По максимальным значениям функций, зная разницу на частотной оси, можно определить частоты Доплера f_{D1} и f_{D2} для двух значений девиации.

Таким образом, дальность до цели рассчитывается по формулам:

$$\tau_{Дизм} = \left| \frac{f_{D1} - f_{D2}}{k_1 - k_2} \right|; \quad (7)$$

$$D_{изм} = \frac{c\tau_{Дизм}}{2}. \quad (8)$$

Для построения модели использован программный пакет *MATLAB* с расширением *Simulink*. В качестве входного воздействия имитирована траектория движения точечной цели в прямоугольной системе координат. На траектории были выбраны значения дальности до цели $D = 1 \dots 220$ км с шагом 500 м.

На первом этапе моделирования была исследована зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) от значения дисперсии шума для следующих значений девиации для первого и второго тактов обзора соответственно:

- $k_1 = 40$ кГц, $k_2 = 60$ кГц;
- $k_1 = 300$ кГц, $k_2 = 500$ кГц;
- $k_1 = 3$ МГц, $k_2 = 5$ МГц.

Для пачки длительностью $T_{signal} = 10$ мс шаг расстановки доплеровских фильтров составляет $1/T_{signal}$, т. е. 100 Гц. Были получены ошибки измерения дальности для разных значений девиации. На каждой позиции цели с шагом 500 м была последовательно проведена серия численных опытов на дальностях в диапазоне 1...220 км. Всего было проведено 440 опытов. Статистическая обработка численных опытов дает следующие погрешности измерений дальности:

- для девиаций 40 и 60 кГц – 1500 м;
- для девиаций 300 и 500 кГц – 100 м;
- для девиаций 3 и 5 МГц – 10 м.

Радиолокационным измерениям сопутствует флюктуационная составляющая. В математической модели в качестве источника шума использован генератор случайных чисел



с нормальным распределением. СКО случайного числа σ выбрано в диапазоне с шагом 5 Гц. Для каждого значения дисперсии шума была последовательно проведена серия численных опытов на дальностях в диапазоне 1...220 км с шагом 500 м. Общее количество выборок на каждом значении дисперсии шума составило 4400 численных опытов.

По результатам статистической обработки измерения дальности был проведен расчет СКО. На рис. 2 приведены зависимости СКО измерения дальности от дисперсии шума для разных значений выбранных девиаций частот.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что увеличение девиации частоты приводит к уменьшению погрешности измерения дальности.

На втором этапе моделирования был уменьшен шаг расстановки доплеровского фильтра со 100 до 20 Гц. Были выбраны следующие значения девиации k : 40 кГц для первого и 60 кГц для второго тактов обзора.

Аналогично на каждой позиции цели с шагом 500 м была последовательно проведена серия численных опытов на дальностях в диапазоне 1...220 км. При отсутствии шум-фактора по полученным 440 измерениям дальности погрешность уменьшается с 1500 до 400 м.

СКО случайного числа σ было выбрано в диапазоне 0...100 Гц с шагом 1 Гц. Для каждого значения дисперсии шума была последовательно проведена серия численных опытов на дальностях в диапазоне 1...220 км с шагом 500 м.

На рис. 3 представлены результаты статистической обработки измерения дальности в зависимости от дисперсии шума. Общее количество выборок на каждом значении дисперсии шума составило 4400 численных опытов.

Из рис. 2 и 3 следует, что точность измерения можно повысить, не только увеличив девиацию частоты, но и уменьшив шаг расстановки доплеровских фильтров.

В данной статье проведено численное моделирование измерения дальности частотным методом с использованием пачечного ЛЧМ-сигнала. Установлено, что погрешность измерения дальности до цели можно уменьшить, увеличив девиацию и уменьшив шаг расстановки доплеровских фильтров.

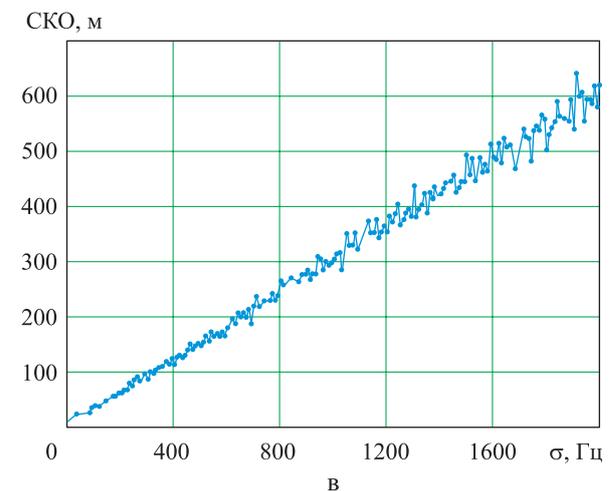
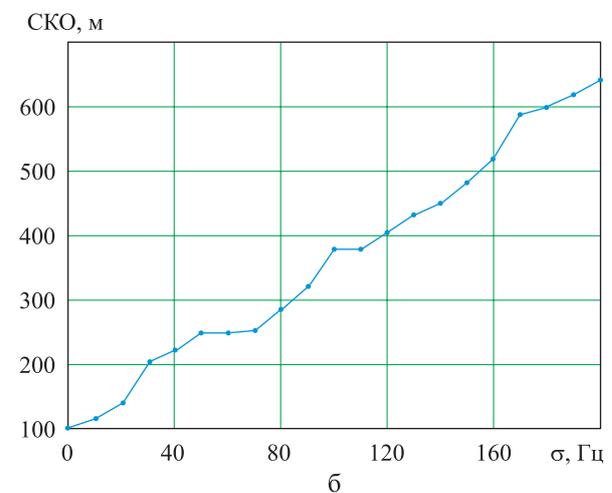
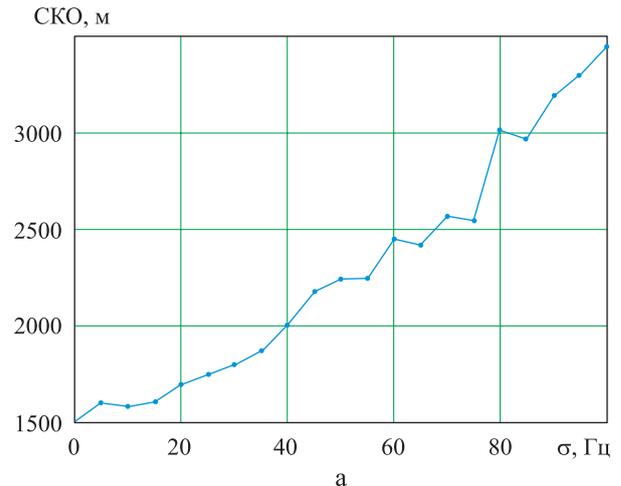


Рис. 2. Зависимости СКО от значения дисперсии шума:
а – девиации 40/60 кГц; б – девиации 300/500 кГц;
в – девиации 3/5 МГц

Для реализации данного метода измерения дальности с учетом возможности технической реализации в РЛС оптимальными значениями девиации оказались частоты порядка 40 и 60 кГц.

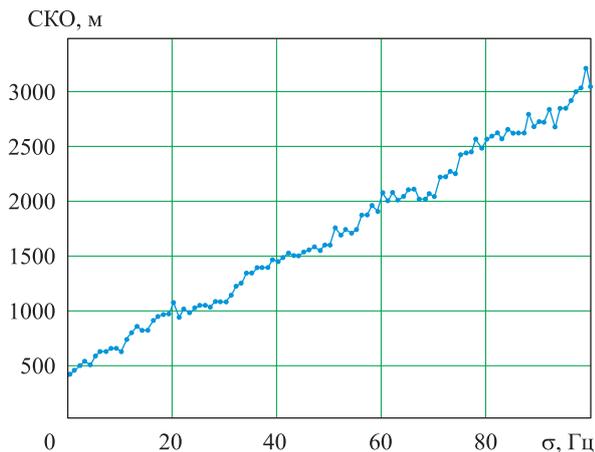


Рис. 3. Зависимость СКО от значения дисперсии шума с уменьшенным шагом расстановки доплеровских фильтров (девиации 40/60 кГц)

При отсутствии шум-фактора погрешность измерения дальности определяется разрешающей способностью по частоте Доплера.

Для частот девиации 40 и 60 кГц при длительности накопления сигнала 10 мс погрешность измерения дальности составляет 1500 м.

Для типовых значений соотношения С/Ш $\geq 15 \dots 20$ дБ в режиме СНП дисперсия доплеровского шума менее 30 Гц, СКО измерения дальности составит не более 1700 м.

При значении девиации, превышающем частоту повторения импульсов в пакете, возникнет неоднозначность по частоте Доплера, что

стоит учитывать при выборе частот.

Полученные этим методом однозначные значения координат целей позволяют выполнить процедуру сопоставления вновь измеренных значений координат с координатами уже сопровождаемых целей в режиме СНП, при этом уменьшается время измерения однозначной дальности. При работе радиолокационных станций в автоматическом режиме это единственный метод организации обзора заданного сектора ответственности с формированием трасс по многим целям.

Список литературы

1. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. школа, 1983. 536 с.
2. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2004. 320 с.
3. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации. М.: Советское радио, 1970. 560 с.
4. Теоретические основы радиолокации / под ред. В. Е. Дулевича. М.: Советское радио, 1978. 608 с.
5. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 992 с.
6. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. 3-е изд. М.: Техносфера, 2012. 1048 с.

Поступила 01.11.19

Зайцев Алексей Вячеславович – инженер Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.

Область научных интересов: радиолокационные системы, вторичная обработка радиолокационной информации.

Разин Анатолий Анатольевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.

Область научных интересов: радиолокационные системы, вторичная обработка радиолокационной информации.

Study of the frequency range measurement method using train chirp signal

The paper proposes a method for measuring range in the track-while-scan mode. The dependence of the measurement error for different deviation frequencies is studied by the method of mathematical modeling in *MATLAB*.

Keywords: secondary processing, range measurement, train chirp signal, deviation, *MATLAB*.

Zaytsev Aleksey Vyacheslavovich – engineer, V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Joint Stock Company, Zhukovskiy.

Science research interests: radar systems, secondary processing of radar information.

Razin Anatoliy Anatolievich – Candidate of Engineering Sciences, Head of Laboratory, V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Joint Stock Company, Zhukovskiy.

Science research interests: radar systems, secondary processing of radar information.



УДК 621.785.377

А. В. Вершинин, Е. Г. Белякова, М. В. Вершинина,
Е. В. Поляков, В. Г. Бамбуров, И. В. Бакланова,
Э. Г. Вовкотруб, К. А. Язовских

Структурный анализ включений, выявляемых в процессе рентгеновского контроля заготовок и деталей из мелкозернистого графита марки МПГ-7

Методами рентгеноструктурного анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния выполнено исследование образцов мелкозернистого графита марки МПГ-7 с выявленными химическими и структурными дефектами. Установлено влияние структурных и химических дефектов на микро- и макроструктуру графита. Проведена оценка его кристалличности в зависимости от типа обнаруженных дефектов.

Ключевые слова: графит марки МПГ-7, рентгеноструктурный анализ, спектроскопия комбинационного рассеяния, структура, структурные неоднородности.

Введение

Графит марки МПГ-7 относится к классу искусственных графитовых материалов. Благодаря своей устойчивости в условиях теплового удара и высокого градиента температур он сохраняет работоспособность до 3900 К в среде газового потока эрозионно-агрессивных продуктов сгорания смесевого топлива [1], а также отдает избыточное тепло за счет излучения в инфракрасном и оптическом диапазонах длин волн. По этим причинам графит МПГ-7 является одним из важнейших конструкционных материалов в изготовлении вкладышей критического сечения сопловых блоков ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ).

Как известно, механические и теплофизические свойства искусственных графитовых материалов определяются прежде всего их структурными характеристиками. Графит марки МПГ-7, используемый в составе изделий ОКБ «Новатор», представляет собой мелкопористый материал, полученный методом спекания порошка в форме спрессованных блоков [2]. Процесс графитизации полуфабрикатов (блоков из спрессованного порошка) происходит при температуре выше 2700 К, поэтому графит, как правило, должен обладать хорошей гомогенностью и кристалличностью. Критерием совершенства такой структуры мо-

жет служить показатель степени графитации g , который определяется так:

$$g = \frac{0,344 - d_{002}}{0,344 - 0,3354}, \quad (1)$$

где 0,344 нм – межслоевое расстояние в углеводе турбостратного строения [3];

d_{002} – межслоевое расстояние (нм) в графите;

0,3354 нм – межслоевое расстояние в бездефектном монокристалле графита.

Для искусственных графитов марки МПГ с повышенной температурой обработки степень графитации составляет 0,8...0,9 отн. ед. [4, 5]. При этом графит с более упорядоченной структурой обладает большей прочностью и работоспособностью в высокотемпературном газовом потоке.

Как было установлено ранее [6], в матрице графита МПГ-7 обнаружены области, характеризующиеся высоким (до 20 мас. %) содержанием примесных элементов, а также гетерогенностью макроструктуры. Эти области характеризуются разноплотностью, выявляемой на рентгеновских снимках. Можно предположить, что причиной возникновения такой макроструктуры являются дефекты в упаковке ее слоев и связях решетки, когда часть атомов углерода имеет sp^3 -гибридизацию [7]. Однако в настоящее время в научной литературе отсутствуют упоминания о наличии такого рода взаимосвязей между наблюдаемой негомогенностью макроструктуры графита и его структурными дефектами.

© Вершинин А. В., Белякова Е. Г., Вершинина М. В., Поляков Е. В., Бамбуров В. Г., Бакланова И. В., Вовкотруб Э. Г., Язовских К. А., 2019



Цель данной статьи – установление природы макроструктурных неоднородностей при проведении рентгеноскопического контроля деталей из графита марки МПГ-7 и их влияния на структуру и кристалличность графита.

Экспериментальная часть

Посредством исследований заготовок и деталей из графита марки МПГ-7 методами электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа, рентгеноскопического анализа [5] для проведения структурных исследований были выбраны следующие образцы:

- 1) без определяемых примесей и макроструктурных неоднородностей;
- 2) с примесными химическими элементами;
- 3) с макроструктурными неоднородностями.

Детальное описание образцов № 2 и 3 и наблюдаемых в них аномалий приведено в работе [5].

Кристаллическая структура и фазовый состав образцов были исследованы на дифрактометре *Empyrean (PANalytical)* в монохроматизированном $\text{Cu-K}\alpha$ излучении (графитовый монохроматор). Чувствительность метода – до 1 % об. примесной фазы. Расчет параметров кристаллической структуры проведен с использованием комплекса программ рентгеноструктурного анализа [8, 9]. В качестве образцов для исследования выбран размолотый графит. Для оценки кристаллографической текстуры была использована пластинка, вырезанная из графитовой заготовки.

Спектры комбинационного рассеяния (КР-спектры) получены при комнатной температуре на спектрометре *RENISHAW-1000* ($\lambda = 532$ нм, $P = 7$ мВт). В качестве образцов использованы пластинки, также вырезанные из графитовых заготовок.

Результаты

Для всех исследуемых образцов рентгеновских дифрактограмм (рис. 1) характерно присутствие основных рефлексов 2H поли-типа графита ($\text{P6}_3/\text{mmc}$). При этом однофазным является только образец № 1 (рис. 1, а). Рефлекс (*) на дифрактограмме образца № 2 (рис. 1, б) не принадлежит графиту. В результате энергодисперсионного микроанализа,

выполненного для данного образца в рамках работы [5], в составе обнаружены примесные элементы Al, Si и Ti. В качестве примесных фаз могут быть TiO_2 (орторомб.) и/или $\text{Al}_4\text{C}_4\text{Si}$ (гекс.), для которых рефлекс (*) является самой интенсивной линией (100 % отн. интенсивности).

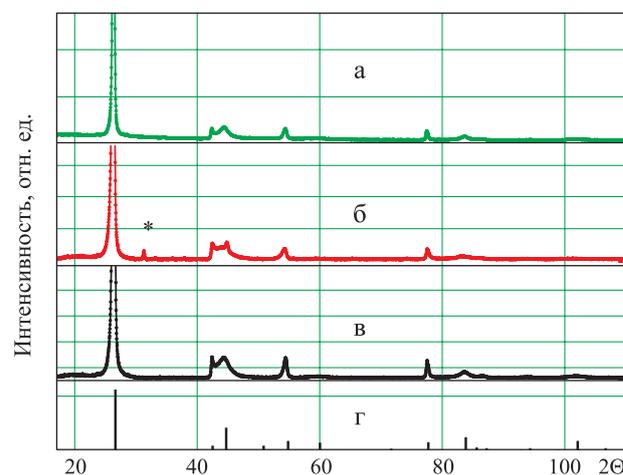


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов: а – № 1; б – № 2; в – № 3; г – диаграмма-идентификатор кристаллической фазы; (*) – рефлекс примесной фазы

Наблюдаемое возрастание уровня фона в малоугловой области дифрактограммы ($17\text{--}23^\circ$) свидетельствует о присутствии в образце наряду с примесными фазами аморфной составляющей. В образце № 3 примесных фаз не наблюдается, однако, как и в образце № 2, в нем присутствует аморфная составляющая (рис. 1, в). Уширение рефлексов графита может быть вызвано дефектами в его структуре. Наиболее узкими рефлексами линий $00l$ и $hk0$ характеризуется образец № 1, что доказывает наличие областей когерентного рассеяния (ОКР) больших размеров по сравнению с другими образцами (см. рис. 1).

В таблице для образцов графита представлены параметры решетки a и c , размер ОКР $\langle L \rangle$ и показатель степени графитации g , рассчитанный по уравнению (1). Для сравнения также приведены значения величин a , c и g , взятые из литературы [4, 10] для графита марки МПГ-7. Как видно из таблицы, образец № 1 с минимальным значением параметра решетки c и максимальным показателем степени графитации g среди рассматриваемых образ-

Параметры решетки a и c , размер ОКР $\langle L \rangle$ и параметр графитации g для рассматриваемых образцов графита МПГ-7

Образец	a , Å ($\pm 0,002$)	c , Å ($\pm 0,002$)	$\langle L \rangle$, нм (± 1)	g , отн. ед.
№ 1 (а)	2,466	6,745	15	0,8
№ 2 (б)	2,459	6,775	10	0,6
№ 3 (в)	2,462	6,778	8	0,6
Графит МПГ-7 (данные [4, 10])	2,460	6,716–6,754	29	0,8–0,9

цов имеет более совершенную кристаллическую структуру. Полученные значения величин для этого образца хорошо согласуются с данными [4, 10], тогда как значения параметра c образцов № 2 и 3 более характерны для турбостратной, чем для упорядоченной трехмерной пространственной структуры графита.

Наряду с определением параметров решетки оценена кристаллографическая текстура в рассматриваемых образцах. Для этого проведено сравнение дифракционных спектров, полученных на порошках и с поверхности пластины. Интенсивности и формы линий спектров в обоих случаях показали абсолютное совпадение, указывающее на отсутствие в них какой-либо преимущественной структурной ориентации.

Для оценки дефектности и количества аморфной фазы в образцах дальнейшее исследование их структуры проводилось с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния, позволяющей количественно оценить степень совершенства кристаллической структуры графита и получить представление о характере и объемах структурных дефектов. Данный метод чувствителен к дефектам в слоях, к присутствию атомов внедрения, упорядочению в упаковке. Кроме того, с его помощью можно определить характер гибридизации в слоевых фрагментах графита.

На рис. 2 представлены КР-спектры образцов графита.

КР-спектры всех образцов включают линии, характерные для поликристаллического графита. Линия при 1572 см^{-1} соответствует его идеальной колебательной моде с симметрией E_{2g} (линия G) [11]. Положение и интенсивность линии G , посредством которой можно определить степень графитизации углерода, соответствуют колебаниям ато-

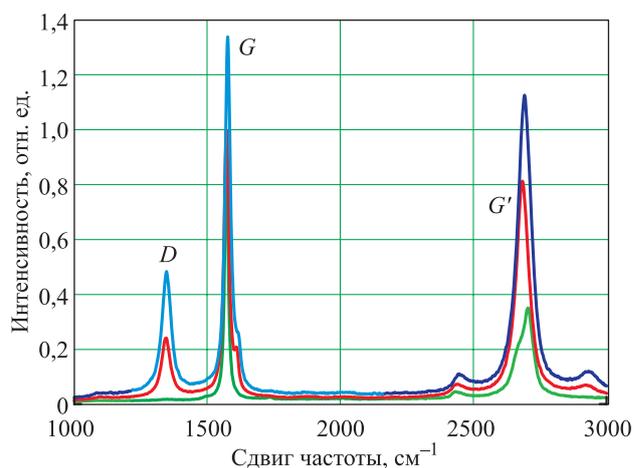


Рис. 2. КР-спектры образцов графита:
— № 1; — № 2; — № 3

мов углерода в sp^2 -гибридизации. Линия при 1343 см^{-1} индуцируется неупорядоченными атомами углерода, она относится к колебаниям решетки с симметрией A_{1g} (линия D). Эта линия обусловлена C–C-связями с sp^3 -типом гибридизации. Линия D представляет собой характеристику степени дефектности углеродного материала и является причиной структурного разупорядочения. Она отсутствует в монокристаллическом графите, и увеличение ее интенсивности принято считать результатом увеличения количества неупорядоченного углерода в образце. Линия при 2693 см^{-1} (линия G') является обертоном линии D .

Все три образца характеризуются хорошо разрешенной и интенсивной линией G (см. рис. 2), что означает наличие во всех образцах большого количества атомов углерода в sp^2 -гибридизации. В спектре для образца № 1 линия D не наблюдается. Следовательно, данный образец характеризуется хорошей кристаллическостью. В образцах № 2 и 3 линия D проявляется. Ее значительная в сравнении с линией G интенсивность указывает на присутствие в структуре образцов дефектных областей.



Известная интерпретация соотношения интенсивностей линий D и G позволяет на полуколичественном уровне оценить размеры упорядоченных областей аморфно-кристаллического вещества и отличить графит по его КР-спектру от других форм углерода [12]. Большое значение соотношений интенсивностей линий D/G свидетельствуют о существенной дефектности образцов. Отношения (I_D/I_G) связаны полуколичественным выражением (2) с размером присутствующих в базисной плоскости графеновых кристаллитов (L_a) [13]:

$$L_a = (2,4 \cdot 10^{-10}) \lambda_{\text{лазер}}^4 (I_D/I_G)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь λ – длина волны возбуждающего лазера в нм (в рассматриваемом случае – 532 нм).

Образец № 1, для которого линия D отсутствует (см. рис. 2), следует отнести к кристаллическому графиту, тогда как образцы № 2 и 3 являются аморфизованными графитами, для которых размер L_a составляет 5 и 7 нм соответственно.

В результате структурного анализа наблюдаемых при рентгеноконтроле изделий макроструктурных и химических неоднородностей [5] была установлена их принадлежность к объектам с плохой кристаллическостью [4, 14]. Образцы с такими дефектами можно отнести к аморфному графиту ввиду минимального размера упорядоченных областей и максимального содержания аморфной фазы с sp^3 -типом гибридизации.

Примесные элементы при этом формируют отдельные фазы, характеризующиеся своим типом симметрии и параметрами решетки, и увеличивают его суммарную дефектность. Можно утверждать, что наблюдаемые примесные фазы в графите обусловлены качеством исходного сырья [15]; его низкая гомогенность и кристаллическость являются следствием недостаточной термической обработки заготовок. Такие структурные дефекты могут стать причиной нежелательных изменений физико-механических свойств конечных изделий [2]. В дальнейшем графитовые заготовки с выявленными рентгенографическим методом особенностями в структуре (химической и макроструктурной неоднородностями), приме-

няемые в разработках ОКБ «Новатор», требуют дополнительной оценки и отбраковки для повышения их работоспособности в качестве вкладышей критического сечения РДТТ.

Выводы

1. Макроструктурные неоднородности, наблюдаемые при рентгеноконтроле деталей, изготовленных из графита марки МПГ-7, являются аморфизованным графитом с размером упорядоченных областей углерода порядка 5–10 нм.

2. Элементы примесей, наблюдаемые в графите, образуют собственные фазы, характеризующиеся своим типом симметрии и параметрами решетки.

3. Исследованные образцы графита с присутствующими химическими и структурными дефектами характеризуются турбо-стратной, а не упорядоченной трехмерной пространственной структурой, характерной для графита марки МПГ-7.

4. На основе полученных данных для проведения входного контроля методом рентгенографического анализа созданы эталоны качества заготовок и деталей вкладышей критического сечения сопловых блоков РДТТ из графита марки МПГ-7.

Работа выполнена по договору № 125-2016-НТС от 12 декабря 2016 г. между АО «ОКБ «Новатор» и ИХТТ УрО РАН.

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику ИФМ УрО РАН В. С. Гавико за помощь в проведении рентгеноструктурного анализа.

Список литературы

1. Рабинович В. А., Хавин З. Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978. 392 с.
2. O'Driscoll W. G. Features and Behaviour of Carbon // Nuclear Engineering. 1958. Vol. 3. № 32. Pp. 479–485.
3. Щурик А. Г. Искусственные углеродные материалы. Пермь, 2009. 342 с.
4. Виргильев Ю. С., Селезнев А. Н., Свиридов А. А., Калягина И. П. Реакторный графит: разработка, производство и свойства // Российский химический журнал. 2006. Т. 1. № 1. С. 4–12.
5. Самойлов В. М. Получение тонкодисперсных углеродных наполнителей и разработка техно-



логии производства тонкозернистых графитов на их основе: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17. 11. М., 2006. 358 с.

6. Вершинин А. В., Вершинина М. В., Белякова Е. Г. и др. Структурный анализ включений, выявляемых в процессе рентгеноконтроля заготовок и деталей из мелкозернистого графита марки МПГ-7 // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2017. № 4. С. 80.

7. Графитация и алмазообразование / В. И. Костиков, Н. Н. Шипков, Я. А. Калашиников и др. М.: Металлургия, 1991. 223 с.

8. Kraus W., Nolze G. POWDER CELL – a program for representation and manipulation of crystal structures and calculation of the resulting X-ray powder patterns // Journal of Applied Crystallography. 1996. Vol. 29. Pp. 301–303.

9. Powder Diffraction File. Alphabetical Index. Inorganic Phases. International Center for Diffraction Data, 1601 Park Lane, Swarthmore, Pennsylvania 19081, USA, 1985. 162 p.

10. Жмуриков Е. И., Романенко А. И., Аникеева О. Б. и др. Надежность и стабильность конвертора высокотемпературной нейтронной

мишени на основе графитовых композитов // ИЯФ 2005-2. Новосибирск, 2005. 16 с.

11. Ferrari A. C., Robertson J. Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous and diamondlike carbon // Physical Review B. 2001. Vol. 64. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.64.075414> (data access 04.10.19).

12. Tuinstraand F., Koenig J. L. // Journal of Chemical Physics. 1970. Vol. 53. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1674108> (data access 04.10.19).

13. Pimenta M. A., Dresselhaus G., Dresselhaus M. S. et al. // Physical Chemistry Chemical Physics. 2007. Vol. 9. URL: <http://dx.doi.org/10.1039/b613962k> (data access 04.10.19).

14. Комир А. И., Одеичук Н. П., Николаенко А. А. Рентгеноструктурный анализ облученного ядерного графита марки АРВ и МПГ // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 6/5 (78). С. 12–16.

15. Bacon G. E. Radiation damage in graphite // Journal de Chimie Physique. 1960. Vol. 70. P. 829.

Поступила 05.03.19

Вершинин Александр Вадимович – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер-конструктор АО «ОКБ «Новатор», г. Екатеринбург.

Область научных интересов: структура и свойства углеродных материалов.

Белякова Елена Германовна – доктор технических наук, начальник бюро АО «ОКБ «Новатор», г. Екатеринбург.

Область научных интересов: химия и технология неметаллических материалов.

Вершинина Марина Вадимовна – кандидат технических наук, начальник отдела АО «ОКБ «Новатор», г. Екатеринбург.

Область научных интересов: неразрушающий контроль.

Поляков Евгений Валентинович – доктор химических наук, главный научный сотрудник Института химии твердого тела УрО РАН, г. Екатеринбург.

Область научных интересов: сорбция, термодинамика, кинетика, микроэлементы, радионуклиды, формы состояния.

Бамбуров Виталий Григорьевич – доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Института химии твердого тела УрО РАН, г. Екатеринбург.

Область научных интересов: физикохимия редких и редкоземельных элементов, процессы и аппараты получения химических соединений.

Бакланова Инна Викторовна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии твердого тела УрО РАН, г. Екатеринбург.

Область научных интересов: изучение структурных особенностей неорганических соединений методами колебательной спектроскопии (спектроскопия комбинационного рассеяния, инфракрасная спектроскопия), определение их оптических и эмиссионных характеристик, электронные спектры поглощения ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасных областей, люминесценция.



Вовкотруб Эмма Гавриловна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург.

Область научных интересов: спектроскопия комбинационного рассеяния неорганических соединений.

Язовских Ксения Александровна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН, г. Ижевск.

Область научных интересов: рентгеновская дифракция, структурно-фазовый анализ, кристаллическая структура.

Structural analysis of inclusions detected by x-ray inspection of preforms and parts from fine-grained graphite MPG-7

By X-ray diffraction analysis and Raman spectroscopy, we studied samples of fine-grained graphite MPG-7 with detected chemical and structural defects. We determined the effect of structural and chemical defects on the micro- and macrostructure of graphite and estimated its crystallinity depending on the type of defects detected.

Keywords: MPG-7 graphite grade, X-ray analysis, Raman spectroscopy, structure, structural inhomogeneities.

Vershinin Aleksandr Vadimovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Design Engineer, Experimental Design Bureau “Novator”, Joint Stock Company, Ekaterinburg.

Science research interests: structure and properties of carbon materials.

Belyakova Elena Germanovna – Doctor of Engineering Sciences, Head of Experimental Design Bureau “Novator”, Joint Stock Company, Ekaterinburg.

Science research interests: chemistry and technology of non-metallic materials.

Vershinina Marina Vadimovna – Candidate of Engineering Sciences, Head of Department, Experimental Design Bureau “Novator”, Joint Stock Company, Ekaterinburg.

Science research interests: nondestructive control.

Polyakov Evgeniy Valentinovich – Doctor of Chemical Sciences, Chief Research Fellow, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg.

Science research interests: sorption, thermodynamics, kinetics, trace elements, radionuclides, state forms.

Bamburov Vitaliy Grigorievich – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Chief Research Fellow, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg.

Science research interests: physical chemistry of rare and rare earth elements, processes and apparatus for producing chemical compounds.

Baklanova Inna Viktorovna – Candidate of Chemical Sciences, Senior Research Fellow, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg.

Science research interests: study of structural features of inorganic compounds by vibrational spectroscopy (Raman spectroscopy, infrared spectroscopy), determination of their optical and emission characteristics, electronic spectra of absorption of ultraviolet, visible and near infrared regions, luminescence.

Vovkotrub Emma Gavrilovna – Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Fellow, Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg.

Science research interests: Raman spectroscopy of inorganic compounds.

Yazovskikh Kseniya Aleksandrovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, Physical-Technical Institute, Federal State Budgetary Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk.

Science research interests: X-ray diffraction, structural phase analysis, crystal structure.



УДК 62-822

А. О. Кузьмин, С. М. Стажков,
Н. В. Тарасова, П. И. Валиков

Применение метода дробных шагов для решения задач гидромеханических процессов в поршневой паре аксиально-поршневых гидромашин с наклонным диском

На базе анализа кинематики поршневой пары получено уравнение для высоты зазора в поршневой паре для случая низких скоростей, являющееся основой для уравнения Рейнольдса для смазочного слоя поршневого механизма. С помощью численного эксперимента методом дробных шагов построено поле давления для двух различных случаев кинематики поршневого механизма, сопоставлена несущая способность гидродинамической силы. Выявлено аналитически и с помощью численного эксперимента, что при обкатывании поршнем кромок направляющей втулки суммарная гидродинамическая сила значительно превышает силу, создаваемую при скольжении поршня во втулке.

Ключевые слова: гидромашина, динамическая характеристика, наклонный диск, жидкостной режим трения.

Наиболее ответственный узел аксиально-поршневой гидромашин с наклонным диском – это поршневой механизм. От его функционирования зависят характеристики всей гидромашин, такие как коэффициент полезного действия (КПД), а также статические и динамические характеристики. Динамические характеристики поршневых гидромашин зависят от зоны нечувствительности, возникающей при реверсе гидромашин в связи с высокими значениями сил трения и объемными утечками.

Аксиально-поршневые гидромашин широко представлены в приводах, где требуется высокое давление при высоких частотах вращения выходного вала. Данные гидромашин обеспечивают энергоемкость, что делает их безальтернативными для силового гидравлического привода в ряде образцов техники: приводы подъема качающейся части; приводы горизонтирования; привод отбора мощности и др.

Гидромашин востребованы и в энергоемких высокоточных приводах. В первую очередь это приводы, к которым предъявляются требования по статическим и динамическим характеристикам: приводы летательных аппаратов; объемные гидромеханические передачи наземной техники различного назначения, обеспечивающие передачу энергии с приводящего двигателя машины на исполнительные механизмы [1, 2].

Аксиально-поршневые гидромашин с наклонным диском (АПГНД) обладают такими преимуществами, как относительная простота конструкции и более удобные компоновочные характеристики в сравнении с аксиально-поршневыми гидромашин с наклонным блоком (АПГНБ). Однако актуальной проблемой для таких машин является обеспечение работы на низких оборотах и в режиме страгивания, чего можно достичь за счет снижения сил трения в поршневой паре.

Цель данной статьи – уменьшение сил трения между поршнем и направляющей втулкой. Эта задача может быть решена с помощью реализации жидкостного режима трения [3], возникающего при достаточно большой подъемной силе, вызываемой движением поршня относительно втулки. Для определения величины гидродинамической силы, обуславливающей жидкостный режим трения, необходимо вычислить гидродинамическое давление в поршневой паре [4].

Ось поршня, находясь под воздействием поперечной силы, развернута относительно оси направляющей втулки на максимально возможный угол, обусловленный величиной радиального зазора, создавая благоприятные условия для формирования «масляного клина». Однако при страгивании и малых скоростях движения поршня относительно внутренней поверхности направляющей втулки подъемная сила со стороны масляной пленки недостаточна для обеспечения жидкостного режима

© Кузьмин А. О., Стажков С. М., Тарасова Н. В., Валиков П. И., 2019



трения [5]. Поверхность поршня находится в непосредственном контакте с внешней и внутренней кромками направляющей втулки, что обуславливает реализацию в поршневой паре высокого уровня трения (рис. 1).

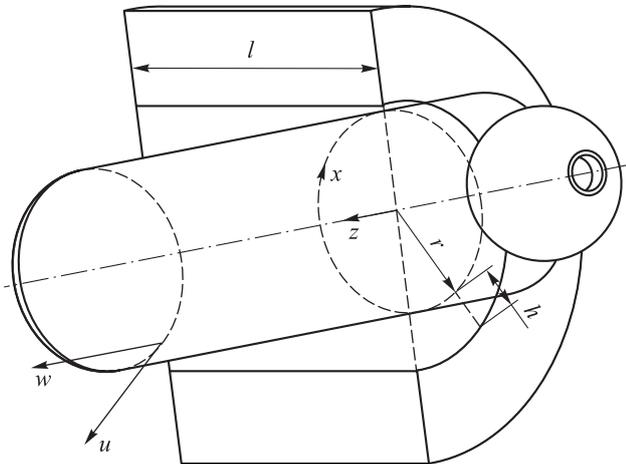


Рис. 1. Основные параметры поршневой пары

На рис. 1 введены следующие обозначения:

- u – линейная скорость точки на поверхности поршня при его вращении во втулке;
- w – поступательная скорость точки на поверхности поршня относительно втулки;
- l – длина направляющей втулки;
- r – радиус поршня;
- h – зазор между поршнем и внутренней поверхностью втулки.

В данном случае рассмотрены гидродинамические процессы в паре поршень – направляющая втулка до момента «всплытия» поршня. Для построения поля гидродинами-

ческого давления использована развертка поверхности поршня, привязанная к декартовой системе координат с осями x и z . В виду того что радиус кривизны поверхности поршня на два порядка превосходит величину зазора, допускается использовать прямоугольную систему координат [4]. Координата y определяется толщиной слоя рабочей жидкости.

Линейную скорость точки на поверхности поршня при его вращении во втулке можно вычислить по формуле

$$u = \omega r, \tag{1}$$

а поступательную скорость точки на поверхности поршня относительно втулки –

$$w = \omega R \tan(\gamma) \sin(\alpha). \tag{2}$$

Здесь ω – частота вращения вала гидромашин; R – радиус блока цилиндров; γ – угол наклона опорного диска; α – угловое положение поршня в течение рабочего цикла.

Формула (1) применима для скольжения поверхности поршня по кромкам втулки. Соответствующие формуле (1) уравнения скоростей на поверхности поршня в случае кинематики обкатывания поршнем кромок направляющей втулки представлены в работе [6].

На рис. 2 показаны основные геометрические параметры зазора между поршнем и направляющей втулкой. Величина зазора по сечению вычислена с помощью теоремы синусов и представлена в уравнении (3). По длине втулки

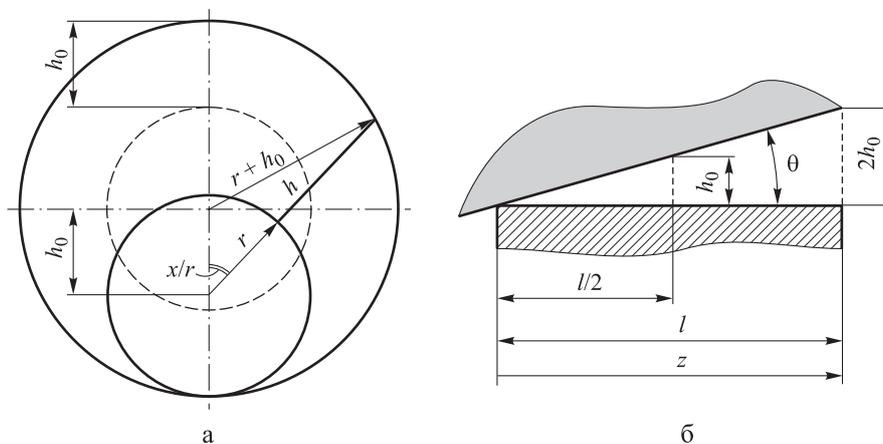


Рис. 2. Основные геометрические параметры для определения толщины смазочного слоя в поршневой паре:
 θ – угол наклона поршня



зазор при координате x , соответствующей непосредственному контакту поршня и втулки, изменяется линейно от 0 до зазора, равного удвоенному значению номинального зазора h_0 :

$$h = (r + h_0) \frac{\sin\left(\pi - \frac{x}{r} - \arcsin\left(\frac{h_0 - z \tan\theta}{r + h_0} \sin \frac{x}{r}\right)\right)}{\sin x / r} r. \quad (3)$$

Формула (3) является менее универсальной, чем используемая в работе Пелоси [7], однако для случая неизменного угла наклона θ высоту зазора с ее помощью вычислить значительно проще. При использовании формулы (3) можно упростить вычисления поля давления в соответствии с уравнениями Рейнольдса.

Запишем уравнение Рейнольдса для кинематики поршневого механизма, при котором поршень совершает полный оборот относительно внутренней поверхности направляющей втулки за один оборот вала и сохраняет максимальный угол наклона [6, 7]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu u \frac{\partial h}{\partial x} + 6\mu w \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (4)$$

где p – гидродинамическое давление в слое рабочей жидкости;

μ – коэффициент динамической вязкости жидкости.

Как показано в работе [6], формула (4) применима лишь для кинематики, при которой вращательное движение поршня во втулке имеет характер скольжения на обеих кромках. Также в работе [6] приведено уравнение Рейнольдса для кинематики, при которой происходит обкатывание поршнем внешней и внутренней кромок втулки. Однако данное уравнение слишком громоздкое и содержит слагаемые второго и выше порядков малости. Для сравнения последних для каждого слагаемого сопоставлено выражение, содержащее характерные величины:

$$12\mu v' \sim 12\mu v_0; \quad 6\mu u' \frac{\partial h}{\partial x} \sim 6\mu u_0 \frac{h_0}{r}; \quad 6\mu h \frac{\partial u'}{\partial x} \sim 6h_0 \mu \frac{u_0}{r};$$

$$18\mu v' \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 \sim 18\mu v_0 \left(\frac{h_0}{r} \right)^2; \quad 6\mu h \frac{\partial v'}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} \sim 6h_0 \mu \frac{v_0 h_0}{r^2};$$

$$6\mu h v \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \sim 6\mu h_0 v_0 \left(\frac{h_0}{r} \right)^2;$$

$$6\mu w' \frac{\partial h}{\partial z} \sim 6\mu w_0 \frac{h_0}{l}; \quad 18\mu v' \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 \sim 18\mu v_0 \left(\frac{h_0}{l} \right)^2;$$

$$6\mu h v' \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \sim 6\mu h_0 v_0 \left(\frac{h_0}{l} \right)^2.$$

Здесь v_0, u_0, w_0 – максимальные значения скоростей для заданной частоты вращения вала гидромашины.

Номинальный зазор имеет величину порядка 10 мкм, следовательно, можно исключить слагаемые, имеющие два и более множителей h_0 . Характерные величины скоростей v_0 и u_0 имеют один порядок малости, значение скорости w_0 может превышать данные составляющие не более чем на порядок, а радиус и длина направляющей втулки принимают значения порядка 10^{-2} м. По этой причине слагаемые, имеющие даже один множитель h_0 , будут как минимум на три порядка меньше слагаемого без данного множителя.

Итоговая формула для кинематики обкатывания кромок втулки представлена в формуле

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 12\mu v'. \quad (5)$$

Для решения уравнений (4) и (5) используется метод установления, в частности метод дробных шагов (или метод Яненко) [8]. При его использовании обеспечивается достаточно высокая точность вычислений. Метод дробных шагов подразумевает применение метода прогонки в каждом полушаге по времени.

Запишем схему для первого и второго полушагов:

$$\frac{p_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} - p_{i,j}^k}{\Delta\tau} =$$

$$= \lambda \left(\frac{\partial h_{i,j}^3}{\partial z} \frac{p_{i,j+1}^{k+\frac{1}{2}} - p_{i,j-1}^{k+\frac{1}{2}}}{2\Delta z} + h_{i,j}^3 \frac{p_{i,j+1}^{k+\frac{1}{2}} - 2p_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + p_{i,j-1}^{k+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right) -$$

$$- \lambda \left(6\mu u \frac{\partial h}{\partial x} + 6\mu w \frac{\partial h}{\partial z} \right);$$

$$\frac{p_{i,j}^{k+1} - p_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}}{\Delta\tau} =$$



$$= \lambda \left(\frac{\partial h_{i,j}^3}{\partial x} \frac{p_{i+1,j}^{k+1} - p_{i-1,j}^{k+1}}{2\Delta x} + h_{i,j}^3 \frac{p_{i+1,j}^{k+1} - 2p_{i,j}^{k+1} + p_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta x^2} \right) - \lambda \left(6\mu u \frac{\partial h}{\partial x} + 6\mu w \frac{\partial h}{\partial z} \right).$$

Здесь $\Delta\tau$ – шаг по времени;

λ – коэффициент, определяющий скорость решения задачи;

k – номер шага по времени.

В данном случае время введено как фиктивный параметр, каждый шаг итерации при вычислении итогового значения давления в каждой точке не отражает реальное изменение гидродинамического давления во времени. В связи с этим коэффициент λ выбран с учетом порядков и размерностей слагаемых. Коэффициент λ для первого и второго полушагов выбран в соответствии с коэффициентами метода прогонки:

- для первого полушага

$$\lambda = \frac{l^2}{h_{i,j}^3};$$

- для второго полушага

$$\lambda = \frac{(\pi d)^2}{h_{i,j}^3}.$$

Здесь d – диаметр поршня.

Выбраны шаги по пространственным координатам $\frac{l}{200}$ м и $\frac{\pi d}{200}$ м, шаг по времени $\Delta\tau = \frac{1}{40\,000}$ с, разница между шагами для завершения счета выбрана как разница в 0,0001 от значения функции.

На рис. 3 и 4 представлены развертка смазочного слоя между поршнем и втулкой при образовании в нем гидродинамического давления, вызванного движением поршня во втулке. Поле давления на поверхности поршня при кинематике скольжения для положения поршня (см. рис. 3) для следующих параметров: $\alpha = 0$; $\omega = 100$ рад/с; $r = 10$ мм; $h_0 = 12,5$ мкм. Так, ось x соответствует развертке по длине окружности, а ось z – оси втулки. Пики давления находятся вблизи мест наименьшего зазора, т. е. наименьшей толщины слоя, однако имеют некоторое смещение, как и описано в работах [4, 5].

Результаты вычислений, приведенные на рис. 3, подтверждены экспериментальными данными, приведенными в работе [7]. Сравнение значений давления на рис. 3, 4 подтверждает результаты, полученные ранее в работе [6] иным численным методом и без отбрасывания слагаемых бóльшего порядка малости.

В соответствии с работой Коровчинского [4] и уравнениями (4) и (5) несущая спо-

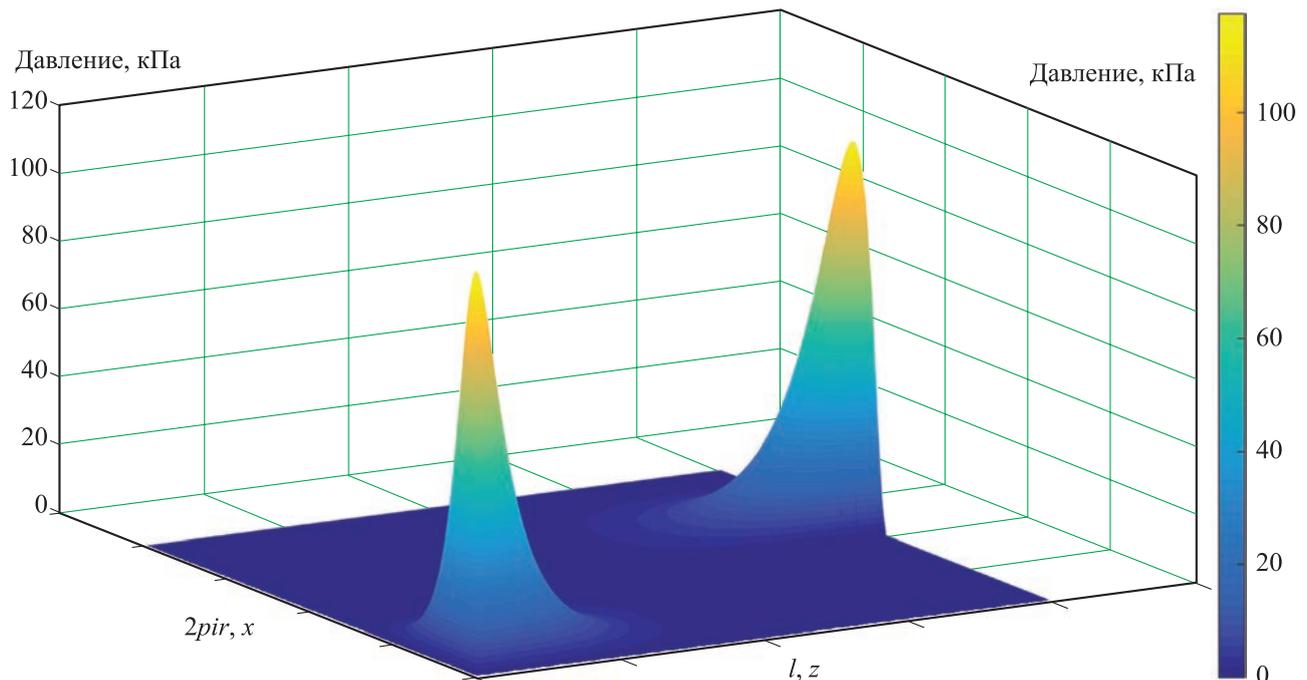


Рис. 3. Поле давления в слое рабочей жидкости в поршневой паре для кинематики скольжения поршня во втулке

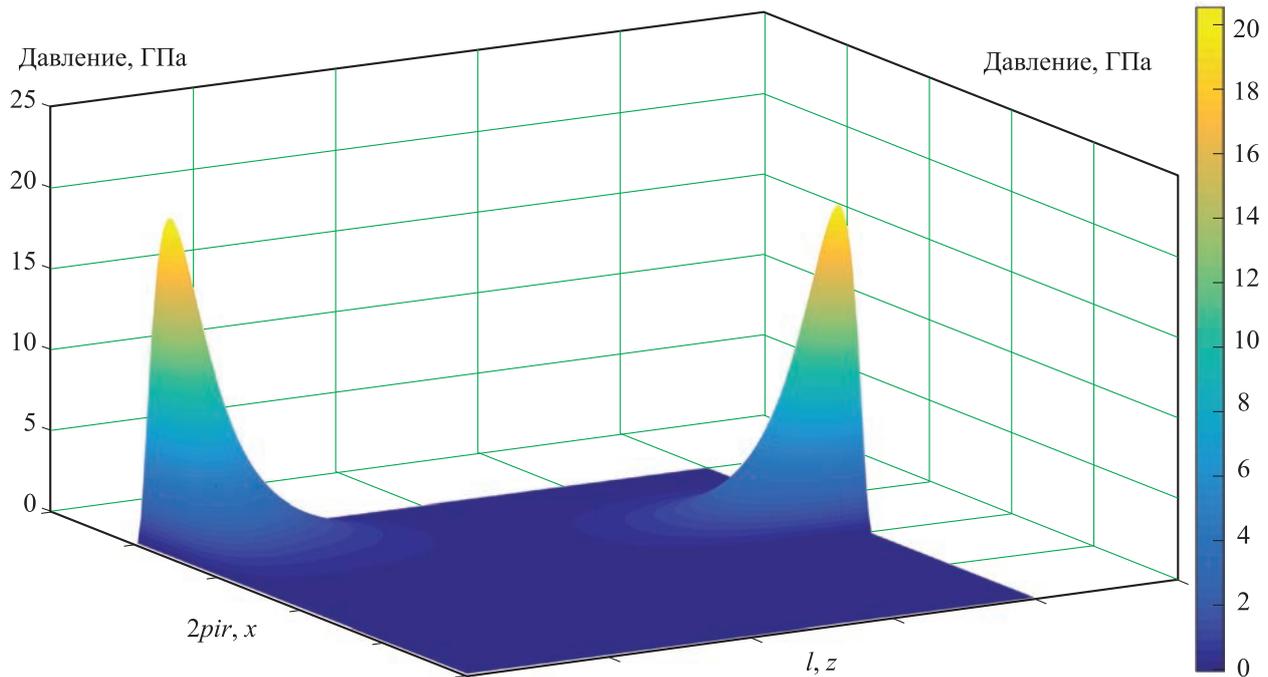


Рис. 4. Поле давления в слое рабочей жидкости в поршневой паре для кинематики обкатывания поршнем кромок втулки

способность гидродинамической силы масляной пленки прямо пропорциональна скорости вращения шипа в подшипнике (в данном случае – поршня во втулке). Для сравнения значений гидродинамической силы для кинематики скольжения и обкатывания без применения численного эксперимента проведено сравнение значений скоростей в точке, в которой, в соответствии с работой [4], гидродинамическое давление должно достигать максимума. Для указанных условий такая точка находится в 14° от места наименьшего зазора между втулкой и поршнем.

Для точки пикового давления скорость скольжения поршня во втулке останется равной $u = \omega r$, в то время как составляющая вращательной скорости $v' = \omega r \cdot \sin 14^\circ$.

Тогда отношение скоростей

$$\frac{v'}{u} = 0,242.$$

Развертка высоты зазора в поршневой паре в поперечном сечении по форме близка к синусоиде, поэтому значение изменения высоты зазора по длине окружности будет иметь тот же порядок малости, что и значение высоты зазора.

Сопоставив правые части уравнений (4) и (5), полученного соотношения скоростей и

принимая во внимание указанную выше оценку порядка малости производной высоты зазора по координате x , получено соотношение

$$12\mu v' / 6\mu u \frac{\partial h}{\partial x} \sim 10^4. \quad (6)$$

Значит, в случае кинематики обкатывания несущая способность гидродинамической силы по крайней мере на четыре порядка выше, чем в случае скольжения поршня.

На рис. 5 представлены значения суммарной гидродинамической силы на внешней кромке направляющей втулки для двух случаев кинематики поршневого механизма, полученные с помощью расчетов после вычисления значений поля давления.

В результате сравнения графиков установлено, что гидродинамическая сила, создаваемая при обкатывании, не менее чем на пять порядков превышает силу, создаваемую при скольжении. Таким образом, обеспечив данную кинематику, можно перейти к жидкостному режиму трения при более низких оборотах вала гидромашин, что улучшит работу на низких оборотах и при страгивании. Однако данная кинематика возможна только при сравнительно низких силах трения в паре поршень – башмак, что трудно реализуемо при текущей конструкции гидромашин.

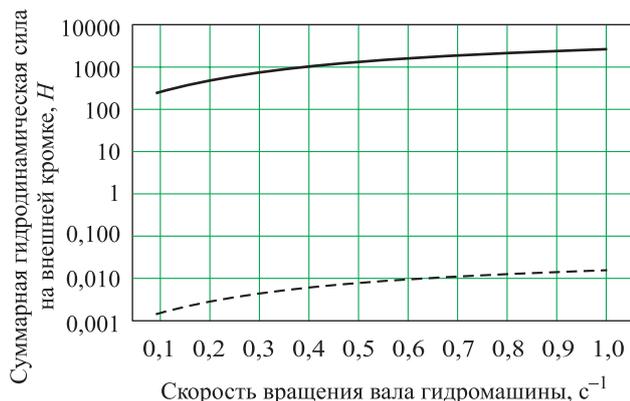


Рис. 5. Зависимость суммарной гидродинамической силы на внешней кромке от скорости вращения вала гидромашин для случая кинематики скольжения (---) и обкатывания (—) поршня во втулке

В результате проведенного исследования получены:

- упрощенная формула для толщины масляного слоя в поршневой паре АПГНД;
- итоговое уравнение для давления в слое для случая обкатывания поршня кромок направляющей втулки.

Проведен численный эксперимент по вычислению поля давления для двух случаев кинематики, выполненного с помощью метода дробных шагов. Показано, что кинематика обкатывания поршнем кромок втулки позволяет создавать гидродинамическую силу, на пять порядков превышающую ту, что создается при кинематике скольжения поршня во втулке.

Список литературы

1. Zhang J., Chao Q., Xu B. et al. Effect of Piston-Slipper Assembly Mass Difference on the Cylinder

Block Tilt in a High-Speed Electro-Hydrostatic Actuator Pump of Aircraft // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2017. № 18 (995). URL: <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0117-1> (data access 01.03.2019).

2. Zeman P., Kemmetmüller W., Kugi A. Mathematical Modeling and Analysis of a Hydrostatic Drive Train // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48. Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.064> (data access 01.03.2019).

3. Крагельский И. В., Виноградова И. Э. Коэффициенты трения. М.: МАШГИЗ, 1962. 220 с.

4. Коровчинский М. В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. М.: МАШГИЗ, 1959. 404 с.

5. Слезкин М. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гос. издательство технико-теоретической литературы, 1955. С. 193–200.

6. Кузьмин А. О., Попов В. В., Стажков С. М. Гидродинамические процессы в поршневой паре аксиально-поршневых гидромашин // Вестник Концерна ВКО Алмаз – Антей. 2017. № 4 (23). С. 86–90.

7. Pelosi M., Ivantysynova M. A Geometric Multigrid Solver for the Piston–Cylinder Interface of Axial Piston Machines // Tribology Transactions. 2012. № 55 (2). DOI: 10.1080/10402004.2011.639049

8. Яненко Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Издательство «Наука» – Сибирское отделение, 1967.

Поступила 15.07.19

Кузьмин Антон Олегович – инженер-конструктор 1-й категории АО «Конструкторское бюро специального машиностроения», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: машиностроение, гидропривод, гидравлические машины, гидродинамика.

Стажков Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы приводов, мехатроника и робототехника» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: мехатроника, робототехника, машиностроение, гидропривод, гидравлические машины.

Тарасова Наталья Вячеславовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: аэродинамика, гидродинамика, численные методы решения задач математической физики.

Валиков Петр Иванович – начальник научно-производственного комплекса ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал», г. Ковров.

Область научных интересов: машиностроение, гидропривод, следящий гидравлический привод.



Fractional step method in problems of hydromechanical processes in piston-cylinder unit of axial piston swash plate hydraulic machines

Having analyzed the piston-cylinder unit kinematics, we obtained an equation for the clearance height in the piston-cylinder unit for the case of low speeds, the equation being the basis for Reynolds equation for the lubricant layer of the piston mechanism. By a numerical experiment using the fractional step method, we built a pressure field for two different cases of the piston mechanism kinematics, and compared the bearing capacity of the hydrodynamic force. It was revealed analytically and with the help of a numerical experiment that when the piston rolls in the edges of the guide bushing, the total hydrodynamic force significantly exceeds the force created when the piston slides in the bushing.

Keywords: hydraulic machine, dynamic response, swash plate pump, fluid friction.

Kuzmin Anton Olegovich – first category Design Engineer, Design Bureau of Special Engineering, Joint Stock Company, Saint Petersburg.

Science research interests: mechanical engineering, hydraulic drive, hydraulic machines, hydrodynamics.

Stazhkov Sergey Mikhaylovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Drive Systems, Mechatronics and Robotics, Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov, Saint Petersburg.

Science research interests: mechatronics, robotics, mechanical engineering, hydraulic drive, hydraulic machines.

Tarasova Natalya Vyacheslavovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov, Saint Petersburg.

Science research interests: aerodynamics, hydrodynamics, numerical methods for solving problems of mathematical physics.

Valikov Petr Ivanovich – Head of the Research and Production Complex, All-Russian Scientific Research Institute Signal, Joint Stock Company, Kovrov.

Science research interests: mechanical engineering, hydraulic drive, servo hydraulic drive.



УДК 004.932

Б. В. Костров, Н. А. Суменков,
Н. В. Лукина, Н. С. Фокина

Формирование архива электронных дел ремонта в информационной системе сервисного обслуживания ВВСТ

Рассмотрен процесс формирования архива документов, которые хранятся в виде изображений в системах информационной поддержки процессов сервисного обслуживания военного вооружения и специальной техники (ВВСТ). Данная операция позволяет устранять информационную избыточность документов в зависимости от целевого назначения системы в целом и характеристических показателей восстановленных изображений.

Ключевые слова: бинарное изображение, ортогональное преобразование, компрессия/сжатие изображения.

Единая стратегия построения и функционирования организации сервисного обслуживания военного вооружения и специальной техники (ВВСТ) предназначена для поддержания их исправного или работоспособного состояния с заданными показателями эффективности и обеспечения его ресурсами. В ее основе – сочетание функций, которые выполняют эксплуатирующая организация, ремонтные предприятия и сервисные центры. На современном этапе эта стратегия должна обеспечиваться:

- действующей инфраструктурой сервисного обслуживания существующего парка ВВСТ;
- экономической обоснованностью целесообразности выполнения заводского ремонта для конкретных образцов специальных технических средств (СТС);
- переходом предприятий и сервисных центров на современные электронные технологии обеспечения мониторинга технического состояния, технического обслуживания и войскового ремонта в первую очередь основной номенклатуры ВВСТ в воинских частях.

Основным элементом информационной системы поддержки сервисного обслуживания, в соответствии со стратегией применения электронных технологий, является электронное дело ремонта. Оно представляет собой сводный технологический документ, отрабатываемый в процессе ремонта ВВСТ. В нем содержится совокупность учетно-отчетных до-

кументов, характеризующих техническое состояние объекта ремонта, потребный объем и состав выполненных работ и их исполнителей, расход сил и средств для восстановления его исправного (работоспособного) состояния. Эти документы накапливаются в электронной базе данных за весь срок действия контрактов на сервисное обслуживание ВВСТ. В связи с тем, что все документы электронного дела ремонта представляют собой скан-копии реальных учетно-отчетных документов, не поддающиеся эффективному сжатию стандартными средствами каталогизации, возникает задача разработки специальных средств архивации таких документов.

Для снижения объема данных на хранении предлагается снижать информационную избыточность таких документов, представляющих по своей сути бинарные изображения, на основе использования бинарного частотного анализа.

Бинарный спектральный анализ может быть построен на бинарных функциях Уолша, создающих ортогональный базис с тем или иным способом упорядочения. В данном случае будем использовать упорядочение по частоте или количеству пересечений значений базисной функции нулевой оси. Такие базисные функции могут быть представлены в следующем виде:

$$S_w = \{wal_w(i, j), i, j = 0, 1, \dots, N-1\}, \quad (1)$$

где $wal_w(i, j)$ – функция Уолша;

w – индекс, обозначающий упорядочение по частоте в отличие от упорядочения по Адамару (h) или Пэли p ;



i – определяет номер функции;
 j – аргумент функции [1–3];
 $N = 2^n$, $n = 1, 2, 3, \dots$

В дискретном представлении упорядочение по Уолшу определяется матрицей [1], элементы которой имеют вид

$$\mathbf{H}_w = (-1)^{\sum_{i=0}^{n-1} r_i(u)v_i}; \quad u, v = 0, 1, \dots, N-1. \quad (2)$$

Здесь $n = \log_2 N = 2^n$;

$$r_0(u) = v_0;$$

$$r_1(u) = v_{n-1} + v_{n-2};$$

$$r_2(u) = v_{n-2} + v_{n-3}, \dots;$$

$$r_{n-1}(u) = v_1;$$

$r_i(u); v_i$ – коэффициенты двоичного представления номеров строк и столбцов.

На основе приведенных представлений может быть построено бинарное спектральное преобразование – преобразование Уолша.

Преобразование Уолша \mathbf{H}_w для некоторого блока ($n \times n$), где $n = 0, N-1$ определяется матричным уравнением

$$\mathbf{B}_{x(n)} = \mathbf{X}_{(n)} \mathbf{H}_{w(n)}, \quad (3)$$

где $\mathbf{B}_{x(n)}$ – матрица коэффициентов прямого преобразования Уолша;

$\mathbf{X}_{(n)}$ – матрица исходного изображения.

Обратное преобразование Уолша выполняется по той же матрице $\mathbf{H}_{w(n)}$ ввиду ее ортогональности и симметричности:

$$\mathbf{X}_{(n)} = \frac{1}{N} \mathbf{H}_{w(n)} \mathbf{B}_{x(n)}. \quad (4)$$

Общая структура процесса сжатия сканов документов дела ремонта представлена на рис. 1.

При использовании каждого варианта обработки получают разные варианты преоб-

разования и, как следствие, разные результаты по измеряемым показателям. Для оценки исследуемых изображений можно использовать среднеквадратический показатель качества исходного и сжатого изображения. Среднеквадратическое отклонение (СКО, в английском варианте – MSE) применяется для оценки искажений восстановленных изображений и рассчитывается по формуле [1–4]:

$$\text{СКО}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [M_0(i, j) - M(i, j)]^2, \quad (5)$$

где N – размер изображений в пикселах;

M_0 – элемент матрицы яркости исходного изображения;

M – элемент матрицы яркости восстановленного изображения.

Если изображения одинаковы, то $\text{СКО} = 0$.

При использовании сжатия информации в изображении после проведенного ортогонального преобразования Уолша удаляются (или отбрасываются) малозначимые элементы, потеря которых не несет видимых глазу человека изменений по сравнению с исходным изображением. Количество отбрасываемых элементов определяется исходя из матричного представления спектра преобразования и задается порогом, элементы ниже которого приравниваются к нулю. Степень удаленных элементов вычисляется по формуле [4, 5]:

$$S = \frac{C}{C_0} 100 \%, \quad (6)$$

где C – общее количество элементов спектра;

C_0 – количество удаленных элементов.

В данной статье исследуются три технологии уменьшения избыточности бинарного спектра:



Рис. 1. Структура процесса сжатия изображения

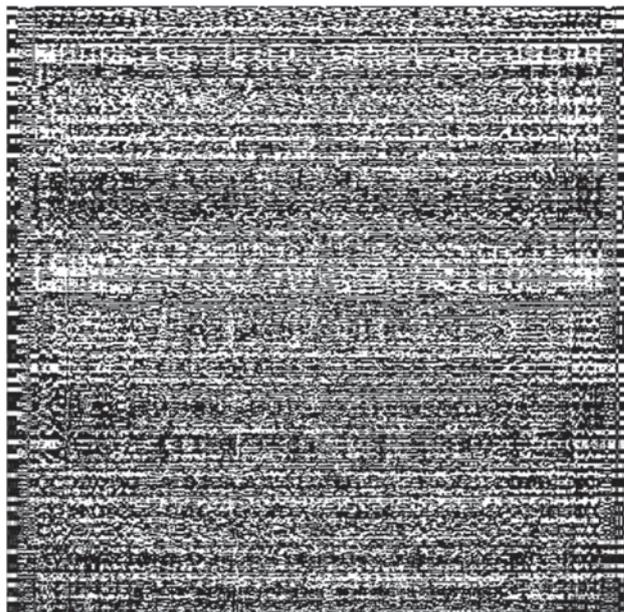


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«ОРЕНБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

460018, г. Оренбург, ГСП, пр. Победы, 13
Телефон: (3532) 77-67-70
Факс: (3532) 72-37-01
E-mail: post@mail.osu.ru

№ _____
на № _____ от _____



а б
Рис. 2. Пример исходного изображения (а) и его бинарный спектр (б)

- 1) удаление малозначимых элементов;
- 2) оптимальное квантование оставшихся составляющих спектра на фиксированное количество уровней;
- 3) оптимальное сжатие последовательностей одинаковых значений.

В качестве третьего действия при проведении экспериментов был использован стандартный архиватор 7Zip. Пример исходного изображения части документа и его бинарный спектр представлены на рис. 2.

В табл. 1 представлен анализ бинарного спектра (см. рис. 2). Восстановленное изобра-

жение, полученное после квантования среднечастотных составляющих спектра, отражено на рис. 3. Такая операция позволяет перейти от восьмибитной кодировки спектральных коэф-

Восстановленное изображение

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«ОРЕНБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

460018, г. Оренбург, ГСП, пр. Победы, 13
Телефон: (3532) 77-67-70
Факс: (3532) 72-37-01
E-mail: post@mail.osu.ru

№ _____
на № _____ от _____

Рис. 3. Восстановленное изображение, полученное после квантования среднечастотных составляющих спектра (СКО = 0,021476); высокочастотная часть спектра не изменена

Таблица 1

Анализ полученного спектра

Кол-во элементов в диапазоне	Пороги
-85...-75 (включительно) = 3	-77,5
-75...-65 (включительно) = 11	-67,5
-65...-55 (включительно) = 61	-57,5
-55...-45 (включительно) = 174	-47,5
-45...-35 (включительно) = 434	-37,5
-35...-25 (включительно) = 1083	-27,5
-25...-15 = 3672	-17,5
-15...0 (включительно) = 122 633	Не трогаем
0...15 (включительно) = 127 903	Не трогаем
15...25 (включительно) = 4106	17,5
25...35 (включительно) = 1116	27,5
35...45 (включительно) = 326	37,5
45...55 (включительно) = 61	47,5
55...65 (включительно) = 16	57,5
65...75 (включительно) = 4	67,5
75...85 (включительно) = 1	77,5



фициентов к четырехбитной, содержащей знак числа и номер уровня, к которому отнесено его значение. Из анализа данных табл. 1 и рис. 3 можно сделать вывод о том, что переход к четырехбитной кодировке практически не влияет на качество восстановленного изображения.

На рис. 4 показаны результат удаления малозначимых элементов спектра в соответствии с порогом ± 3 и восстановленное из этого

спектра изображение. При этом $S = 56,43 \%$; $СКО = 1,55$. Количество отброшенных положительных значений 73 960, отрицательных – 73 971.

На рис. 5 отражен повтор эксперимента, отраженного на рис. 4 при пороге ± 6 . Здесь $S = 80,24 \%$; $СКО = 2,49$. Количество отброшенных положительных значений 105 369, отрицательных – 103 122.



а

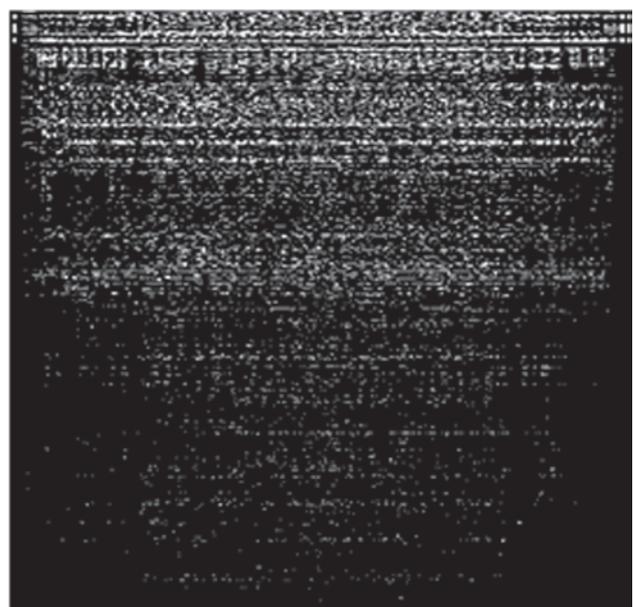


б

Рис. 4. Результат удаления малозначимых элементов спектра в соответствии с порогом ± 3 (а) и восстановленное из этого спектра изображение ($S = 56,43 \%$; $СКО = 1,55$) (б)



а



б

Рис. 5. Результат удаления малозначимых элементов спектра в соответствии с порогом ± 6 (а) и восстановленное из этого спектра изображение ($S = 80,24 \%$; $СКО = 2,49$) (б)



Из приведенных данных можно сделать вывод, что даже при сильной степени сжатия изображения (более 80 %) читаемость текста остается удовлетворительной. Применение квантования и прореживания спектральных составляющих позволяет получить наилучший результат [6]. Сравнение полученных документов по объему приведено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные характеристики полученных документов по объему

Название	Формат	Размер, Байт	
		до сжатия	в zip
1. Исходное изображение	<i>.bmp</i>	263 222	106 320
	<i>.jpeg</i>	57 436	55 536
2. Спектр преобразования Уолша (без сжатия и квантования)	<i>.bmp</i>	263 222	81 039
	<i>.jpeg</i>	165 590	165 605
3. Спектр преобразования Уолша (в результате применения квантования и сжатия)	<i>.bmp</i>	263 222	15 738
	<i>.jpeg</i>	99 021	96 319

Отметим, что после спектральной обработки документы поддаются эффективному сжатию с помощью стандартных архиваторов. Степень сжатия при этом по отношению к исходному документу может составлять примерно 30 раз.

Применение специальных методов сжатия документов позволяет создавать компакт-

ные архивы дел ремонта и оперативно отслеживать степень выполнения контрактов по сервисному обслуживанию ВВСТ.

Моделирование в среде *MATLAB* показало хорошую работоспособность предлагаемых методов и алгоритмов сжатия бинарных изображений, не поддающихся сжатию обычными архиваторами.

Список литературы

1. Ахмед Н., Рао К. Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / под ред. И. Б. Фоменко. М.: Связь, 1980. 248 с.
2. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде *MATLAB*. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
3. Залманзон Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. М.: Наука, 1989. 496 с.
4. Злобин В. К., Костров Б. В., Свирина А. Г. Спектральный анализ изображений в конечных базисах. М.: КУРС: ИНФРА, 2016. 172 с.
5. Костров Б. В., Бастрычкин А. С. Сжатие изображений на основе ортогональных преобразований // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 9. С. 113–118.
6. Костров Б. В., Соломенцева Н. И. Моделирование канала связи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 2. С. 95–100.

Поступила 29.01.19

Костров Борис Васильевич – доктор технических наук, профессор, заместитель начальника отдела автоматизированных систем управления АО «РПТП «Гранит», г. Рязань.

Область научных интересов: обработка изображений, искусственный интеллект, информационные технологии.

Суменков Николай Александрович – доктор технических наук, заместитель генерального директора – главный инженер АО «РПТП «Гранит», г. Рязань.

Область научных интересов: эксплуатация сложных радиотехнических комплексов.

Лукина Наталья Владимировна – студентка Рязанского государственного радиотехнического университета имени В. Ф. Уткина, г. Рязань.

Область научных интересов: обработка изображений, искусственный интеллект, информационные технологии.

Фокина Наталья Сергеевна – начальник управления производственно-хозяйственного обеспечения АО «РПТП «Гранит», г. Рязань.

Область научных интересов: применение информационных технологий и мультимедийных систем в обработке изображений.



Forming an archive of electronic remedial maintenance files in the information system for service maintenance of military weaponry and special equipment

The paper considers the process of archive formation for the case of documents stored as images in information support systems for service maintenance processes concerning military weaponry and special equipment. This operation makes it possible to eliminate data redundancy in documents depending on the purpose of the system on the whole and characteristic markers of the images restored.

Keywords: binary image, orthogonal transformation, image compression.

Kostrov Boris Vasilevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy Head of Department of Automated Control Systems, Joint stock company “Ryazan Production and Technological enterprise “Granit”, Ryazan.
Science research interests: image processing, artificial intelligence, information technology.

Sumenkov Nikolay Aleksandrovich – Doctor of Engineering Sciences, Deputy General Director – Chief Engineer, Joint stock company “Ryazan Production and Technological enterprise “Granit”, Ryazan.
Science research interests: operation of complex radioengineering systems.

Lukina Natalya Vladimirovna – student, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan.
Science research interests: image processing, artificial intelligence, information technology.

Fokina Natalya Sergeevna – Head of Administration of Production and Economics Support, Joint stock company “Ryazan Production and Technological enterprise “Granit”, Ryazan.
Science research interests: using information technology and multimedia systems in image processing.



УДК 629.3.01

В. И. Таричко, П. И. Шалупина

К вопросу о динамической нагруженности несущих конструкций специальных колесных шасси

Рассмотрен метод оценки динамической нагруженности рамы специального колесного шасси при движении по дорогам различных категорий. На основе разработанной конечно-элементной модели рамы получены и проанализированы полноразмерные картины напряженно-деформированного состояния рамы и осциллограммы эквивалентных напряжений в наиболее нагруженных зонах рамы.

Ключевые слова: специальные колесные шасси, тягачи, вооружение, военная техника, военная автомобильная техника, динамическая нагруженность, напряженно-деформированное состояние.

Особое место в структуре парка военной автомобильной техники (ВАТ) занимают специальные колесные шасси и тягачи (СКШТ), предназначенные для установки мобильных наземных установок и других видов вооружений и военной техники (ВВТ). В тяжелых условиях эксплуатации к СКШТ в целом и их несущим системам в частности предъявляются высокие требования в части прочности, долговечности и надежности. В связи с этим в современных условиях перед конструкторами СКШТ стоит сложная задача в кратчайшие сроки спроектировать изделие, отвечающее требованиям заказчика. При этом немаловажными являются вопросы проходимости СКШТ, поскольку доступность мест несения службы может быть серьезно ограничена. А в связи с постоянным совершенствованием и усложнением конструкций ВВТ растет необходимость в повышении грузоподъемности СКШТ.

При этом особую актуальность приобретает применение методов математического моделирования для исследования влияния различных факторов на эксплуатационные свойства СКШТ, что позволяет значительно снизить затраты на проведение испытаний и экспериментальных исследований разрабатываемой техники на этапе проектирования.

В данной статье рассмотрим вопрос оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих систем СКШТ (рам), которые воспринимают нагрузки при движении по неровностям дороги и служат основанием для закрепления узлов и агрегатов. Очевид-

но, что при выходе рамы из строя дальнейшая эксплуатация СКШТ невозможна, однако в условиях ограниченности ресурсов требуется поддерживать оптимальное соотношение прочностных, жесткостных и прочих характеристик с требованиями, предъявляемыми заказчиком. В связи с этим предпочтительным методом исследования НДС рам СКШТ является имитационное моделирование, позволяющее с достаточной точностью оценить степень их динамической нагруженности [1].

Для начала рассмотрим вариант конструкции рамы лонжеронного типа, применяемой в СКШТ семейства «Вощина-1» производства АО «Брянский автомобильный завод». Рама состоит из двух лонжеронов (1), соединенных друг с другом посредством поперечин (2) (рис. 1), и имеет постоянное сечение с сужением в передней части для закрепления бампера (6). Лонжероны представляют собой сварные конструкции из Z-образных профилей, дополнительно усиливаемые накладками (5) переменного сечения с целью увеличения жесткости конструкции. Соединение поперечин с лонжеронами выполняется в основном болтами, дополнительно применяются электрозаклепки. Косынки (3) закрепляются на поперечинах посредством сварных соединений.

Особенностью данной рамы является наличие «выреза» (4) (см. рис. 1), необходимого для размещения дополнительного оборудования заказчика. «Вырез» (4) дополнительно усилен обечайками, имеющими толщину основного профиля лонжерона. Для передачи усилий от дороги на раму применяется независимая торсионная подвеска на поперечных рычагах.

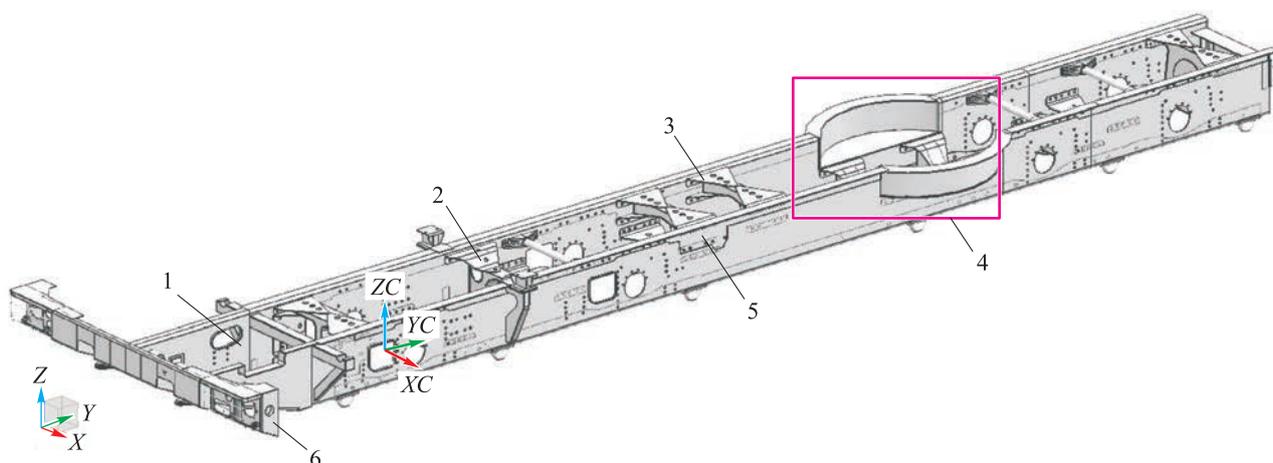


Рис. 1. Общий вид рамы:

1 – лонжерон; 2 – поперечина; 3 – косынка поперечины; 4 – «вырез»; 5 – накладка; 6 – бампер

Основные характеристики рамы и подвески следующие:

Рама	
Материал.....	10ХСНД
Профиль лонжерона	Z-образный
Толщина лонжерона, мм....	8
Высота профиля, мм.....	600
Подвеска	
Тип.....	независимая, торсионная, на поперечных рычагах
Ход сжатия, мм.....	130
Ход отбоя, мм	105
Материал торсионов	45ХН2МФА-Ш-1ГП
Материал рычагов.....	30ХГТ

Рассмотрим методику имитационного моделирования для оценки НДС рассматриваемой рамы. Данная методика основана на методе конечных элементов (МКЭ), применение которого позволяет в рамках единого подхода решать широкий спектр задач по исследованию рам практически любой конструкции.

На первом этапе разработана идеализированная пространственная конечно-элементная модель (КЭМ) подвески, состоящая из одномерных конечных элементов (КЭ). Такие КЭ учитывают характеристики материалов, из которых изготовлены элементы подвески, их инерционные и жесткостные параметры, а также параметры демпфирования для упруго-диссипативных элементов. Нелинейная характеристика амортизатора задавалась в соответствии с типовой характеристикой, регламентированной конструкторской

документацией. Колесо в сборе с шинами и колесный редуктор с рабочими тормозами учтены в модели в виде элемента сосредоточенной массы, расположенном в геометрически определенном центре тяжести. Его соединение с элементами подвески выполнено специальным интерполяционным элементом распределения массовых нагрузок. Общий вид идеализированной модели подвески представлен на рис. 2.

Идеализированная модель рамы представляет собой оболочечную модель. Положение оболочек в ней соответствует расположению срединных поверхностей листовых элементов. При этом в идеализированной модели учитываются места крепления элементов подвески, навесного оборудования (кабины, силового агрегата, мотоотсека и пр.).

Для дискретизации геометрии рамы использованы 3- и 4-узловые плоские КЭ. КЭМ рамы учитывает отверстия в лонжеронах под приводные валы и элементы рулевого управления. Дополнительно моделируются места крепления элементов подвески к раме, а также кронштейны крепления навесного оборудования. Средний размер КЭ в данной КЭМ составляет 40 мм со сгущением в местах возможной концентрации напряжений. Размер КЭ выбран после проведения предварительных тестовых расчетов, выполненных при последовательном сгущении сетки для оценки точности получаемых результатов. В результате удалось значительно снизить итоговую размерность КЭМ и при этом сохранить необходимую точность расчетов.

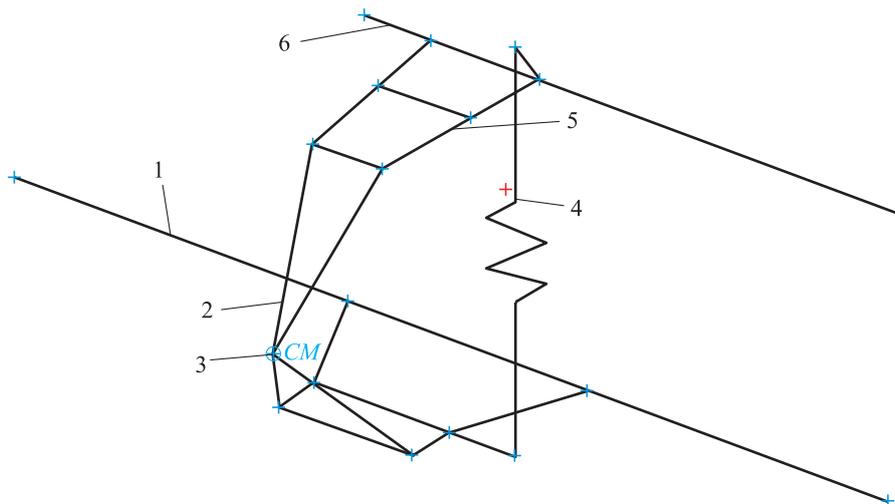
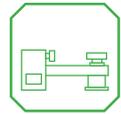


Рис. 2. Общий вид идеализированной модели подвески:
1 – торсионы; 2 – соединение центра масс подвески с ее элементами; 3 – масса подвески; 4 – амортизатор; 5 – рычаги

Болтовые соединения между составными частями моделируются с помощью специальных объектов моделирования, представляющих собой совокупность одномерных элементов. При этом выполняется «паутинное» соединение абсолютно жесткими элементами узлов отверстий болтового соединения с их центрами, после чего центральные узлы отверстий соединяются упругим одномерным элементом, имеющим свойства болта. Сварные соединения в модели также моделируются с использованием специальных объектов моделирования и представляют собой упругие соединения, выполненные из одномерных КЭ и имеющие свойства материала свариваемых частей.

Для учета масс тяжеловесного оборудования применяются КЭ сосредоточенной массы. Их расположение в модели соответствует данным весовой ведомости шасси. Соединение центров масс оборудования с элементами крепления на раме осуществляется посредством интерполяционных одномерных элементов распределения весовых нагрузок. В реальной конструкции соединение элементов подвески с рамой осуществляется с помощью кронштейна подвески. В разработанной модели для передачи усилий со стороны подвески на раму применены абсолютно жесткие одномерные КЭ. В целом разработанная КЭМ содержит 88 520 узлов и 147 677 элементов (рис. 3).

Корректность применяемых КЭМ рамы и подвески подтверждена рядом аналитических расчетов и лабораторных исследований, проведенных на базе предприятия в рамках различных работ и испытаний. В качестве тестовых расчетов в статической линейной постановке рассмотрены статическое положение СКШ на поверхности земли и различные варианты вывешивания осей. Полученные в рамках тестовых задач результаты в части возникающих реакций на осях в целом согласуются с результатами аналитических расчетов и лабораторных работ по взвешиванию аналогичных изделий.

Определяющее влияние на нагруженные режимы колесных машин оказывает микропрофиль дороги [2, 3]. Он в целом определяет динамическую нагруженность несущей системы машины и ограничивает возможность полной реализации скорости, мощности, маневренности и грузоподъемности. Путевые неровности можно определить с помощью спектральных плотностей мощности $S(n)$, $S(\omega)$, которые являются функциями пространственной частоты n (цикл/м) или циклической пространственной частоты $\omega = 2\pi n$ (рад/м). Для генерирования высот неровностей z используется алгоритм, основанный на разложении Райса – Пирсона:

$$z(s_k) = \sum_{i=0}^N \sqrt{2S(n_i)} 2\pi \Delta n \cos(2\pi n_i s_k + \varphi_i),$$

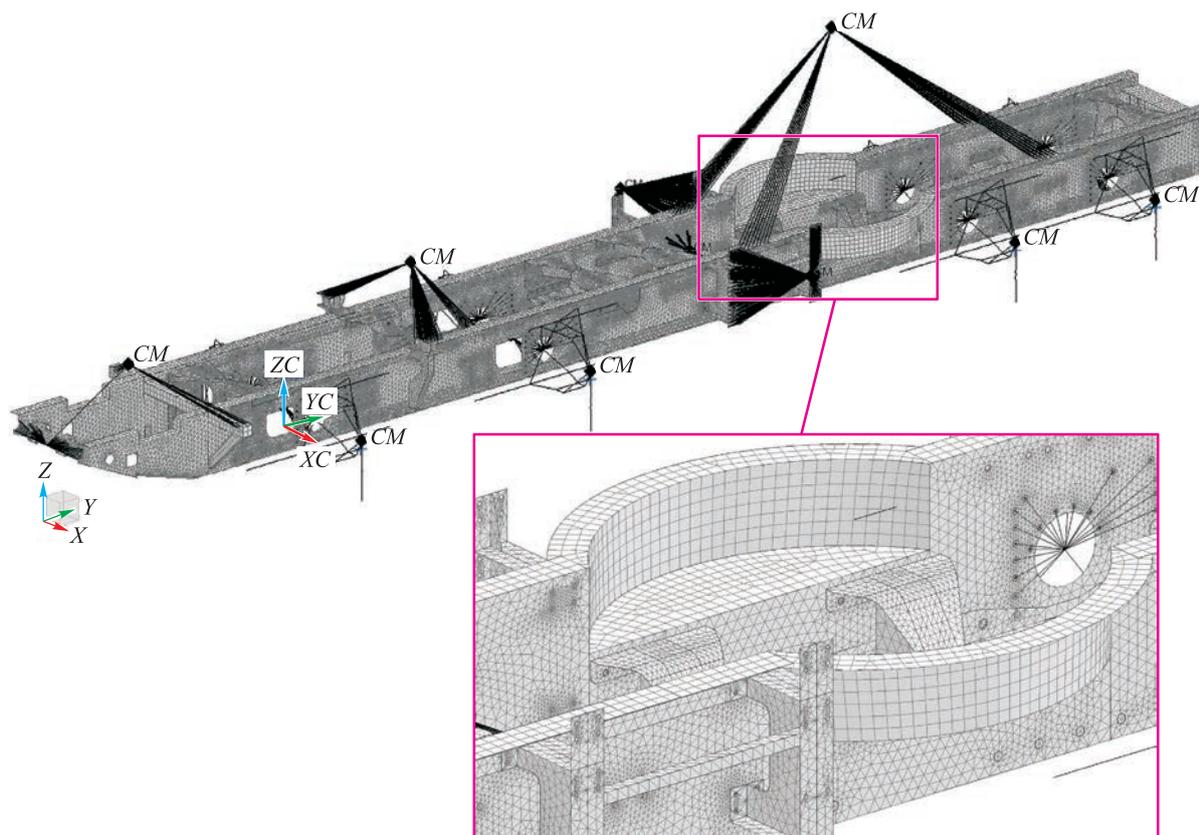


Рис. 3. КЭ модель рамы в сборе с подвеской

$$s_k = k \Delta s,$$

$$n_i = n_0 + i \Delta n,$$

где N – число гармоник;

$S(n)$ – спектральная плотность неровностей пути, $\text{м}^2 / (\text{цикл}/\text{м})$;

n – шаг квантования по частоте;

φ_i – случайная фаза, распределенная равномерно в интервале $[-\pi, \pi]$;

Δs – шаг неровностей, м ;

k – порядковый номер гармоники;

n_0 – минимальная частота.

На основе этих данных реализованы микропрофили дорог различных категорий протяженностью 500 м в виде зависимостей высот неровностей от путевой координаты $h(x)$. При этом будем рассматривать движение СКШ по дорогам следующих категорий:

- дороги с асфальтобетонным покрытием;
- грунтовые дороги (в удовлетворительном состоянии);
- разбитые булыжные дороги.

На рис. 4 приведены примеры реализации микропрофиля различных категорий дорог.

Внешнее возмущение для оценки динамической нагруженности представим в виде кинематического перемещения точек контакта колес согласно рассчитанным параметрам микропрофиля. Для оценки влияния скорости на НДС рамы имитацию движения предлагается проводить на скоростях движения 5, 10 и 20 м/с. При этом примем следующие допущения:

- контакт колеса с дорогой является точечным;
- нагрузочные характеристики торсионов и амортизаторов линейны, коэффициенты жесткости и сопротивления постоянны;
- шины идеализированы в виде упруго-демпфирующей модели с постоянными коэффициентами жесткости и демпфирования;
- грунт недеформируемый;
- заданный микропрофиль симметричен относительно продольной плоскости СКШ для левого и правого бортов;
- скорость движения на протяжении времени моделирования примем постоянной (влияние продольных ускорений не учитывается).

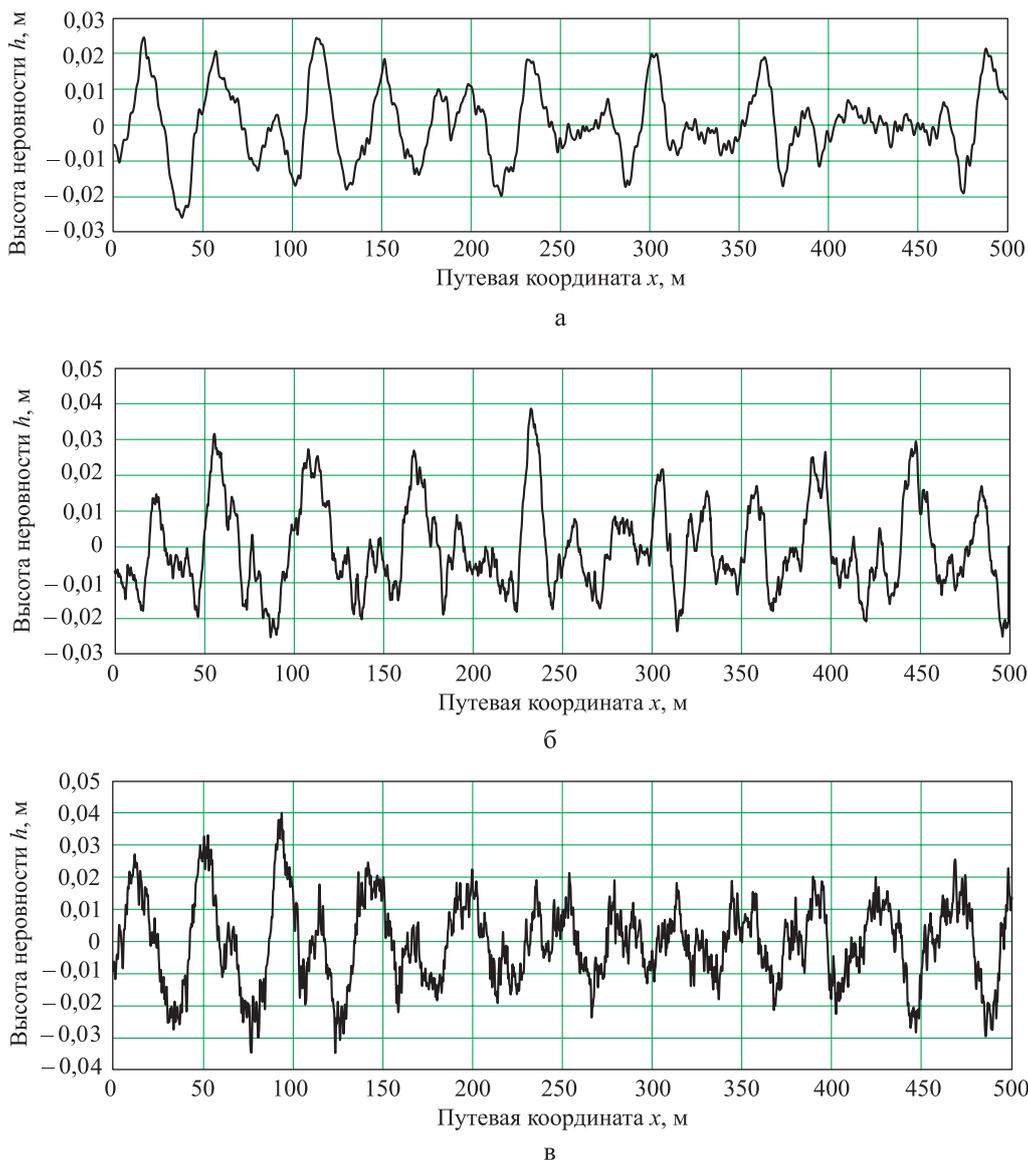
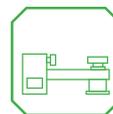


Рис. 4. Микропрофили различных категорий дорог:

а – дорог с асфальтобетонным покрытием; б – грунтовых дорог (в удовлетворительном состоянии); в – разбитых бульжных дорог

Таким образом, сформировано 9 расчетных режимов, информация о которых сведена в таблицу.

Режимы имитации движения СКШ для исследования НДС рамы

Режим	Категория дороги	Скорость движения, м/с	
I	Асфальт	а	5
		б	10
		в	20
II	Грунтовая дорога (в удовлетворительном состоянии)	а	5
		б	10
		в	20
III	Разбитая бульжная дорога	а	5
		б	10
		в	20

Результаты расчетов представлены в виде динамически изменяющихся картин НДС рамы при имитации движения СКШ по заданному микропрофилю дороги.

Примеры результатов расчета в виде полей напряжений приведены на рис. 5. Проанализировав представленные данные (см. рис. 5), можно сделать вывод, что наиболее нагруженными в процессе движения СКШТ являются зоны:

- 1) кронштейна подвески правого колеса первой оси;
- 2) передней части выреза по обе стороны рамы;
- 3) кронштейна подвески правого колеса третьей оси.

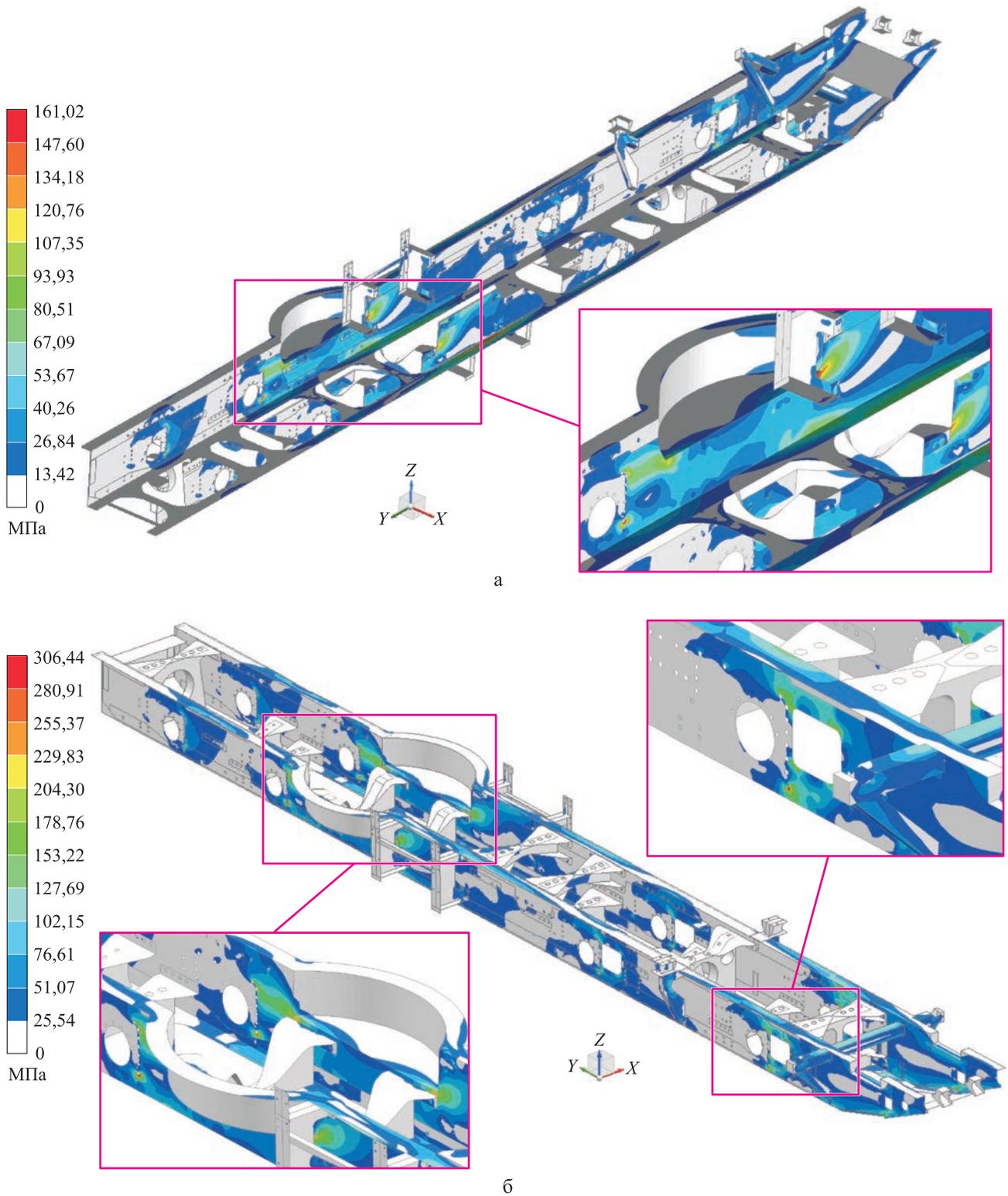


Рис. 5. Картины напряженно-деформированного состояния рамы при имитации движения по заданному микропрофилю (масштаб деформаций 1:1):

а – дорога с асфальтобетонным покрытием, $\vartheta = 5$ м/с, $t = 47$ с, $s = 235$ м; б – грунтовая дорога (удовлетворительное состояние), $\vartheta = 5$ м/с, $t = 63,2$ с, $s = 316$ м



Для удобства анализа представим результаты расчетов в виде осциллограмм изменения динамических напряжений (рис. 6) в указанных выше зонах рамы. Полученные значения напряжений рассчитаны в соответствии с четвертой (энергетической) теорией прочности.

Из рис. 6 видно, что наибольшие динамические напряжения среди рассмотренных режимов возникают в зоне 3 – крепления кронштейна подвески правого колеса третьей оси при движении на скорости 20 м/с по разбитой булыжной дороге. Отметим, что в действи-

тельности реализация подобного режима движения крайне маловероятна, однако для целей анализа в рамках обсуждаемой темы его рассмотрение возможно. При оценке полученных результатов можно отметить значительно более высокую динамическую нагруженность рамы при движении СКШ по дорогам в плохом состоянии. Так, динамические напряжения в раме при движении СКШ по разбитой булыжной дороге в среднем выше на 26 %, чем при движении по грунтовой дороге, и на 32,5 % при движении по асфальтобетонной дороге.

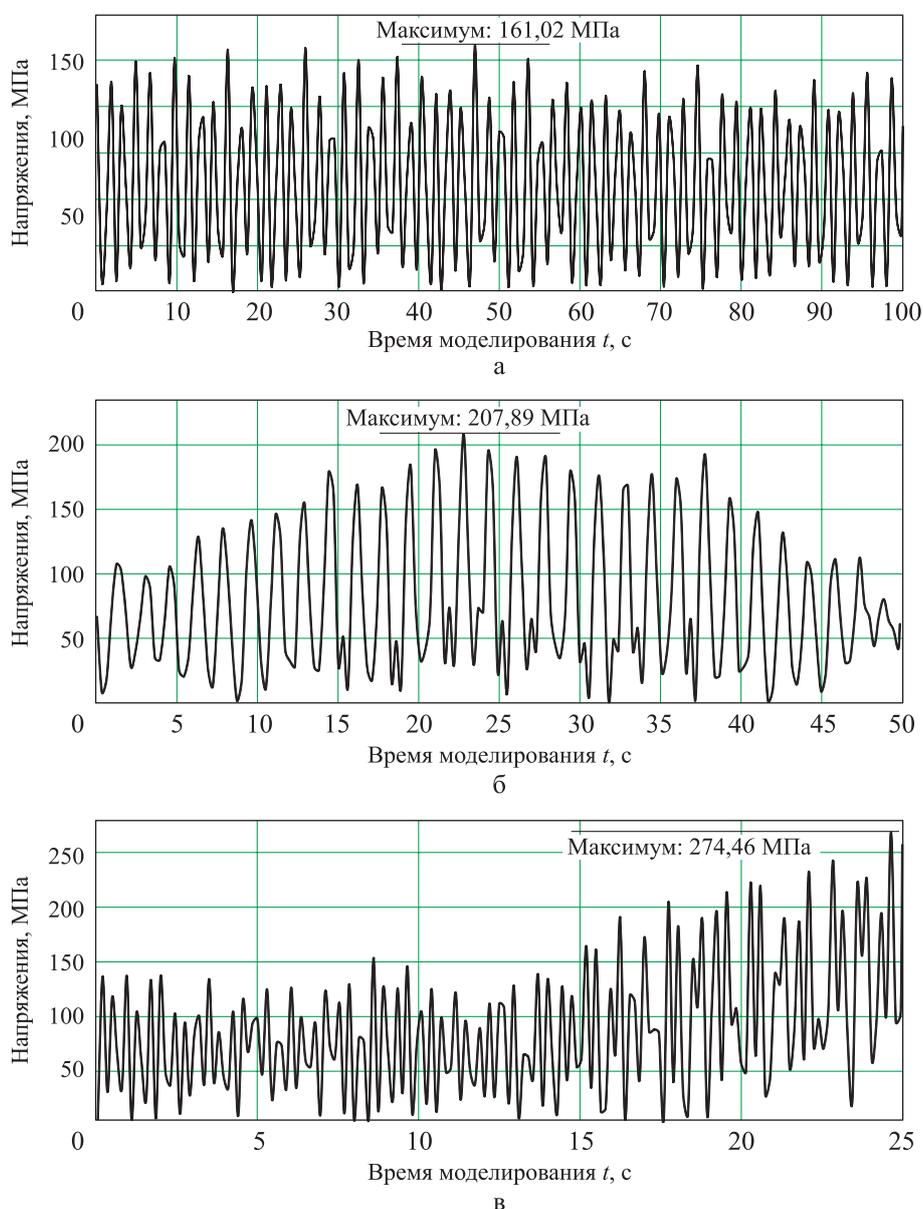


Рис. 6 (начало). Осциллограммы изменения динамических напряжений при имитации движения СКШ по принятым режимам:
а – режим I, а (зона 2); б – режим I, б (зона 2); в – режим I, в (зона 2)

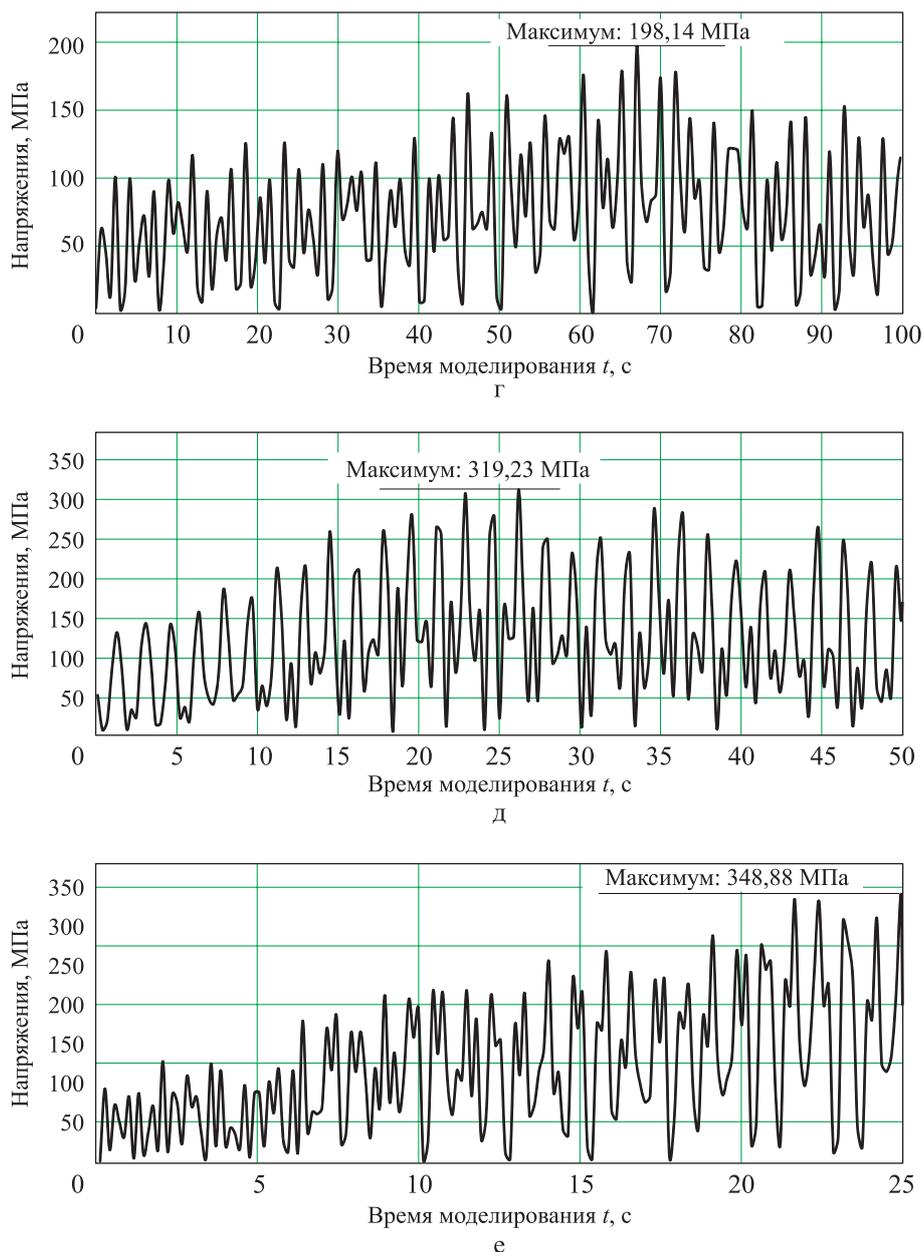
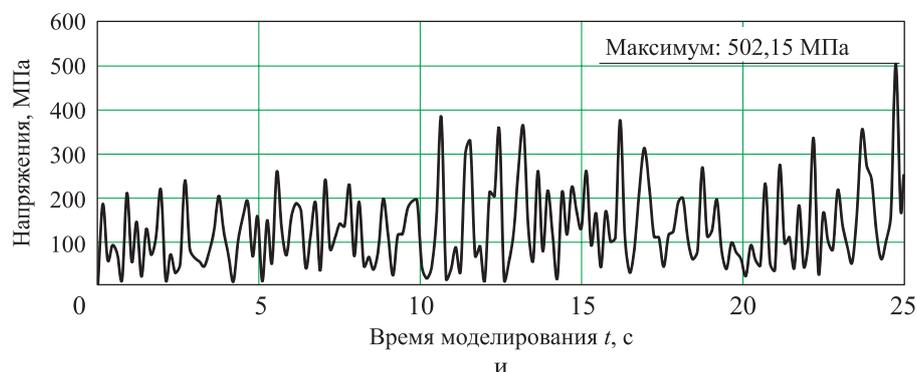
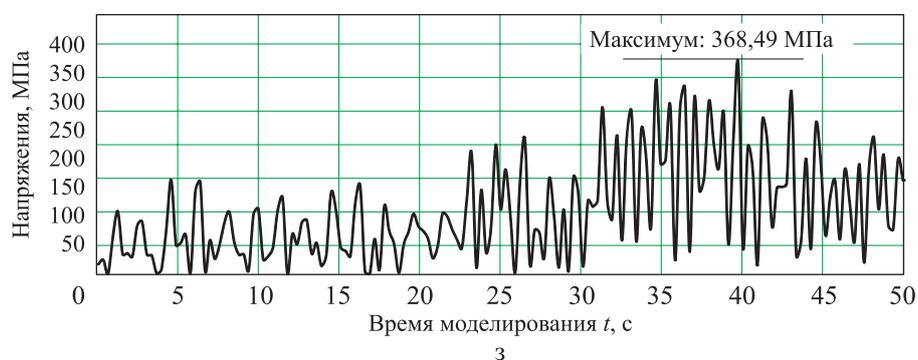
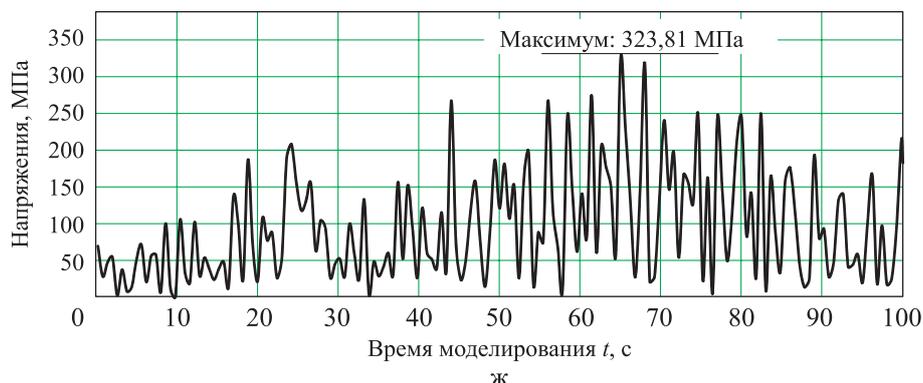
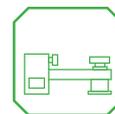


Рис. 6 (окончание). Осциллограммы изменения динамических напряжений г – режим II, а (зона I); д – режим II, б (зона I); е – режим II, в (зона I);

Сравнив результаты по режимам, реализующим движение СКШ по дорогам одной категории на различных скоростях, можно сделать вывод и о некотором влиянии скорости движения СКШ на динамическую нагруженность рамы. Наиболее ощутимая разница заметна при сравнении результатов по режимам со скоростями движения 5 и 20 м/с – в среднем разница напряжений в этих режимах составляет порядка 20...25 %. Если сравнивать результаты по режимам со скоростями движения 10 и 20 м/с, то разница уже не столь заметна – 9...11 %.

Проиллюстрированный подход, несмотря на высокую трудоемкость подготовки моделей для имитационного моделирования, оправдан с точки зрения широты спектра исследований, в которых его можно использовать. К примеру, СКШТ в настоящее время все чаще применяются в составе самоходных артиллерийских орудий для нужд обороны в качестве технологической платформы. В процессе эксплуатации и применения таких изделий по назначению возникают нагрузки различного характера, в том числе динамического,



при имитации движения СКШ по принятым режимам:

ж – режим III, а (зона 3); з – режим III, б (зона 3); и – режим III, в (зона 3)

ударного. Их учет становится критически важным не только при проектировании переходных элементов (так называемых надрамников, осуществляющих передачу усилий от изделия непосредственно на раму СКШТ), но и самих несущих конструкций СКШТ. В связи с этим показанную в статье КЭМ рамы и примененный подход в целом можно считать базовыми. При различных направлениях доработки их можно использовать и для исследования стойкости изделий к внешним воздействиям в части вибропрочности и вибростойкости,

более глубокого исследования влияния скорости движения транспортного средства на НДС несущей конструкции с учетом возникающих линейных ускорений.

Продолжая тему оценки динамической нагруженности несущих конструкций транспортных средств, также отметим известные в сфере железнодорожного транспорта методики [4, 5], основанные на применении методов моделирования динамики многотельных систем [6], в которых тела могут полагаться как абсолютно твердыми, так и упругими. Обоб-



шение подходов, описанных в этих работах, для оценки нагруженности несущих систем автомобильного транспорта позволит более глубоко раскрыть вопросы, затронутые в настоящей статье, однако это является вопросом для дальнейших исследований.

Список литературы

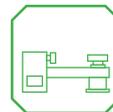
1. Проектирование полноприводных колесных машин: в 3 т. Т. 1 / *Б. А. Афанасьев, Б. Н. Белоусов, Г. И. Гладов* и др.; под ред. *А. А. Полуняна*. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 496 с.
2. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель // под ред. *А. А. Хачатурова*. М.: Машиностроение, 1976. 535 с.
3. *Белоусов Б. Н., Шухман С. Б.* Прикладная механика наземных тягово-транспортных средств с мехатронными системами / под общей ред. д-ра техн. наук, проф. *Б. Н. Белоусова*. М.: Агроконсалт, 2013. 612 с.

4. *Шалупина П. И., Антипин Д. Я.* Использование промышленных программных комплексов для исследования динамической нагруженности конструкций рельсового транспорта // Сб. науч. трудов 5-й Международ. науч.-практ. конф., 2015. С. 342–345.
5. *Тюбаева Т. А., Лазарев М. А., Антипин Д. Я.* Исследование динамической нагруженности кузова вагона-самосвала методами математического моделирования // Материалы VII Всерос. науч.-практ. конф., 2016. С. 145–149.
6. *Михальченко Г. С., Погорелов Д. Ю., Симонов В. А.* Совершенствование динамических качеств подвижного состава железных дорог средствами компьютерного моделирования // Тяжелое машиностроение. 2003. № 12. С. 2–6.

Поступила 05.11.19

Таричко Вадим Игоревич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора, главный конструктор Акционерного общества «Брянский автомобильный завод», г. Брянск.
Область научных интересов: динамические процессы энергетических машин, колесных машин и специального транспортного оборудования.

Шалупина Павел Игоревич – начальник конструкторского бюро расчетов и надежности Акционерного общества «Брянский автомобильный завод», г. Брянск.
Область научных интересов: динамика и прочность наземных транспортных средств.



On the issue of dynamic loading of supporting structures of special wheeled chassis

The paper focuses on a method for assessing the dynamic loading of the frame of a special wheeled chassis when it moves on roads of various categories. Based on the developed finite element model of the frame, we obtained and analyzed full-size patterns of the stress-strain state of the frame and oscillograms of equivalent stresses in the most loaded zones of the frame.

Keywords: special wheeled chassis, tractors, weapons, military equipment, tactical vehicles, dynamic loading, stress-strain state.

Tarichko Vadim Igorevich – Candidate of Engineering Sciences, Deputy General Director, Chief Designer, Bryansk Automobile Plant, Joint Stock Company, Bryansk.

Science research interests: dynamic processes of power machines, wheeled vehicles and special transport equipment.

Shalupina Pavel Igorevich – Head of the Design Bureau of Calculations and Reliability, Bryansk Automobile Plant, Joint Stock Company, Bryansk.

Science research Interests: dynamics and strength of land vehicles.



УДК 62-233.3/9

Б. П. Тимофеев, А. В. Ковалевич

Математическое моделирование неэвольвентного зубчатого зацепления

Рассмотрены несопряженные зубчатые передачи с линейным контактом, зубьями которых является сочетание плоскостей и цилиндров или только цилиндров. Для оптимизации кинематических характеристик предложено использовать новую компоновку – многорядную зубчатую передачу.

Ключевые слова: зубчатые передачи, несопряженные передачи, многорядное зубчатое колесо, многоповодковое зубчатое колесо, ошибка положения, ошибка передаточного отношения, простые формы зубьев.

Введение

Человечество применяет различные механизмы, в том числе и зубчатые, с древнейших времен [1]. Бурное развитие машинной техники в эпоху Возрождения дало толчок развитию зубчатых передач, например, итальянский часовщик Джованни Донди (1318–1387) создал описание планетарных (астрономических) часов [2].

Член Российской академии наук Леонард Эйлер (1707–1783) выявил уникальные свойства эвольвент круга и в 1754 г., задолго до формулирования теоремы Виллиса (1841), предложил использовать их в передачах. В настоящее время более 80 % всех передач в мире являются эвольвентными [3]. Такая передача относится к классу сопряженных зубчатых передач, в которых передаточное отношение при зацеплении одной пары зубьев остается постоянным и соответствует передаточному отношению за оборот.

Однако несопряженные передачи используются и в настоящее время, поскольку, например, до сих пор не удавалось сформировать сферическую эвольвентную поверхность и получить сопряженную коническую передачу.

Главное требование к несопряженным передачам было сформулировано так: необходимо получить пятно контакта, оторванное от всех кромок, в том числе от линии сопряжения (перехода, пересечения) активной и переходной поверхностей зуба. В несопряженных передачах поставлена следующая задача: исключить выход контакта на любую из кромок при всех возможных погрешностях зубчатых

и незубчатых элементов передачи, монтажа и деформации под нагрузкой.

Стоит отметить, что постоянство передаточного отношения в любой момент времени, высокие точности, нечувствительность к погрешностям – наиболее значимые тенденции развития современных передач. В значительной степени малоизученные несопряженные зубчатые передачи зачастую обеспечивают один из заданных параметров, требуемых в решении узкоспециализированной прикладной задачи.

В данной статье рассмотрены несопряженные зубчатые передачи, зубьями которых является сочетание плоскостей и цилиндров или только цилиндров, некоторые из них широко применялись еще в древности. В работе Б. П. Тимофеева и А. А. Уланова [4] показано, что в этих передачах достигалась необходимая кривая функции положения за счет того, что в некоторый период зацепление осуществлялось при контакте поверхностей, а в другой – использовался контакт кромки с поверхностью. При этом функция положения приблизительно соответствовала «кривой Бакстера» [5, 6].

В настоящей статье рассмотрены зубчатые передачи с линейным контактом. Поставлена задача исключить из зацепления линию перехода плоскости и цилиндра ввиду возникновения в этой точке «мягкого» удара из-за скачка радиуса кривизны поверхности и нормального ускорения.

В первой части статьи представлены результаты математического моделирования передач зацеплением с точечным и линейным контактом в среде *MATHCAD*. Математическая модель реализует расчет геометрических параметров передачи с последующим расчетом



значений кинематических параметров зацепления. Условием выполнения данного расчета является отсутствие кромочного контакта.

Далее для уменьшения скачка передаточного отношения и жесткого удара при пересопрежении предложено использовать новую компоновку – многорядную зубчатую передачу. Описаны результаты ее расчета в среде *MATHCAD*, твердотельное моделирование в среде *Solidworks* и создание макета методом 3D-печати.

Цилиндрические зубчатые колеса

В работе [4] исследована прямоугольная форма зуба зубчатого колеса. В данной статье в качестве объекта исследования представлена несопряженная зубчатая передача. В роли ведущего колеса выступает цевочное колесо, которое не изменяется в ходе исследования. В зацепление с цевочным колесом вступает зубчатое колесо с особой формой зуба. С учетом исторического опыта применения приближенных зубчатых передач в качестве первого профиля выбран простой прямоугольный зуб. Формы зубьев и цевки представляют прямые и дуги окружностей [7]. Для исследования выберем три основные формы зуба (рис. 1).

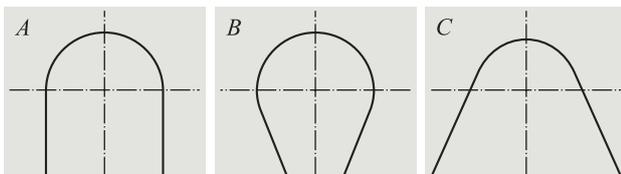


Рис. 1. Варианты форм зуба зубчатого колеса:

A – прямая форма зуба (прямоугольник со скруглением торцевой стороны); *B* – острая форма зуба, образованная прямыми, сходящимися к центру зубчатого колеса и дугой окружности; *C* – раскрытая форма зуба, образованная расходящимися прямыми

Для исследования выберем зацепление с теоретическим (номинальным – $i_{н21}$) передаточным отношением, равным единице:

$$i_{н21} = z_2 / z_1 = 1.$$

Используем стандартный геометрический расчет, аналогичный применяемому для расчета эвольвентного зубчатого зацепления [8].

Геометрический расчет будем вести относительно цевочного колеса ввиду его гео-

метрической простоты и универсальности для всех трех исследуемых случаев.

Введем следующие условия: радиус цевки $\rho_{ц} = 5$ мм; радиусы головок всех видов зубьев будут равны между собой и численно равны радиусу цевки $\rho_3 = \rho_{ц} = \rho$.

Исходя из этого, рассчитаем шаг зубьев на начальной окружности:

$$p = 4\rho_{ц} + c'm.$$

Здесь c' – коэффициент бокового зазора; m – условный модуль зубьев.

Примем коэффициент бокового зазора $c' = 0,25$. Вычислим значение шага зубьев непосредственно через модуль m :

$$p = \pi m.$$

Приравняв правые части двух определенных значения шага, найдем значение модуля m . Затем определим диаметр начальной окружности по формуле

$$D = zm,$$

где z – число зубьев колеса (число цевок).

Примем количество цевок $z = 12$. Для цевочного колеса на начальном диаметре должны располагаться оси цевок.

Для зубчатых колес необходимо рассчитать высоту головки и ножки зуба. Высоту головки зуба примем равной ρ . Высота ножки зуба $h_f = 1,2\rho$.

Геометрические параметры рассматриваемой передачи следующие:

Номинальное передаточное отношение $i_{н21}$	1,000
Количество зубьев z	12,00
Угловой шаг τ , град.....	30,00
Диаметры начальных окружностей D , мм.....	82,80
Модуль m , мм.....	6,900
Угол раствора зуба при центре зубчатого колеса α , град.....	13,84
Радиус скругления зубьев и радиус цевки ρ , мм.....	5,000
Высота ножки зуба h_f , мм.....	6,000
Межосевое расстояние A_w , мм.....	82,80

Рассмотрим процесс зацепления в передаче для одной пары зубьев (рис. 2).

I. Контакт цевки с плоской частью зуба шестерни (контакт линия – окружность).

II. Контакт цевки с круглой частью зуба (контакт окружность – окружность).

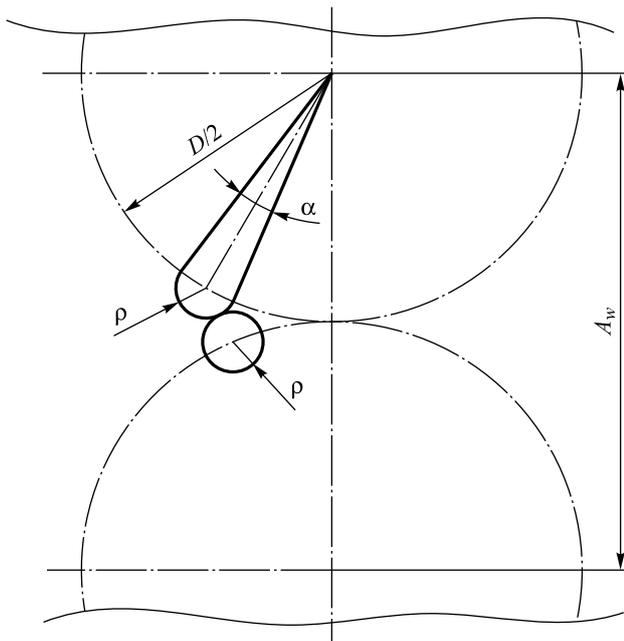


Рис. 2. Упрощенное изображение контакта форм зуба и цевки

III. Контакт цевки в точке сопряжения линии и дуги окружности, образующих форму зуба шестерни.

В данном исследовании основными критериями оценки точности и плавности работы передачи выберем такие кинематические параметры, как функция ошибки положения, ошибки передаточного положения и коэффициент перекрытия. С помощью них можно оценить циклическую погрешность передачи, а также характер и величины ударов при пересопряжении [8].

Ошибку положения определим так:

$$\Delta\varphi_2(\varphi_1) = \varphi_2(\varphi_1) - \varphi_1 i_{н21},$$

где $\Delta\varphi_2(\varphi_1)$ – функция ошибки положения ведомого колеса;

$\varphi_2(\varphi_1)$ – функция положения ведомого колеса;

φ_1 – угол поворота ведущего колеса;

$i_{н21}$ – номинальное передаточное отношение.

Далее вычислим реальное значение передаточного отношения. Мгновенное передаточное отношение – это производная функции положения по углу поворота ведущего колеса φ_1 :

$$i_{21}(\varphi_1) = \frac{d\varphi_2(\varphi_1)}{d\varphi_1}.$$

Определим ошибку функции передаточного отношения:

$$\Delta i_{21}(\varphi_1) = i_{21}(\varphi_1) - i_{н21}(\varphi_1).$$

Математическое моделирование и построение кинематических характеристик исследуемой передачи проводилось в программном пакете *MATHCAD* (компания *Parametric Technology Corporation, PTC*) с использованием матричных методов [7–9] (рис. 3). Данный программный пакет удобен и широко известен. Матрицы взаимной ориентации радиусов-векторов и ортов нормалей непосредственно задаются в рабочей области для составления системы тригонометрических уравнений с последующим решением методом Рунге – Кутты.

Применение систем автоматизированных расчетов значительно упрощает процесс получения функциональных зависимостей с последующим анализом и визуализации полученных результатов. В том числе с помощью продуктов корпорации *PTC* можно проводить комплексные процедуры проектирования, объединяя такие продукты, как *MATHCAD* и *Creo* [10–12]. Математический аппарат этих программ схож, что позволяет с помощью их связки автоматизированно проектировать детали и узлы, основываясь на расчетном файле. Сквозная передача параметров математической модели также возможна в системах автоматизированного проектирования (САПР) прочих производителей.

Положение точки контакта определялось на профиле зуба ведущего колеса и цевки, затем посредством матриц перехода – положение точки относительно неподвижной системы координат. В качестве примера перевода радиус-вектора \mathbf{R}_1 из системы координат S_1 в систему S_0 приведем уравнение:

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{M}_{01} \mathbf{R}_1, \quad (1)$$

где \mathbf{M}_{01} – матрица перехода от S_1 к S_0 .

Были использованы следующие матрицы перехода:

$$\mathbf{M}_{01} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) & 0 \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (2)$$

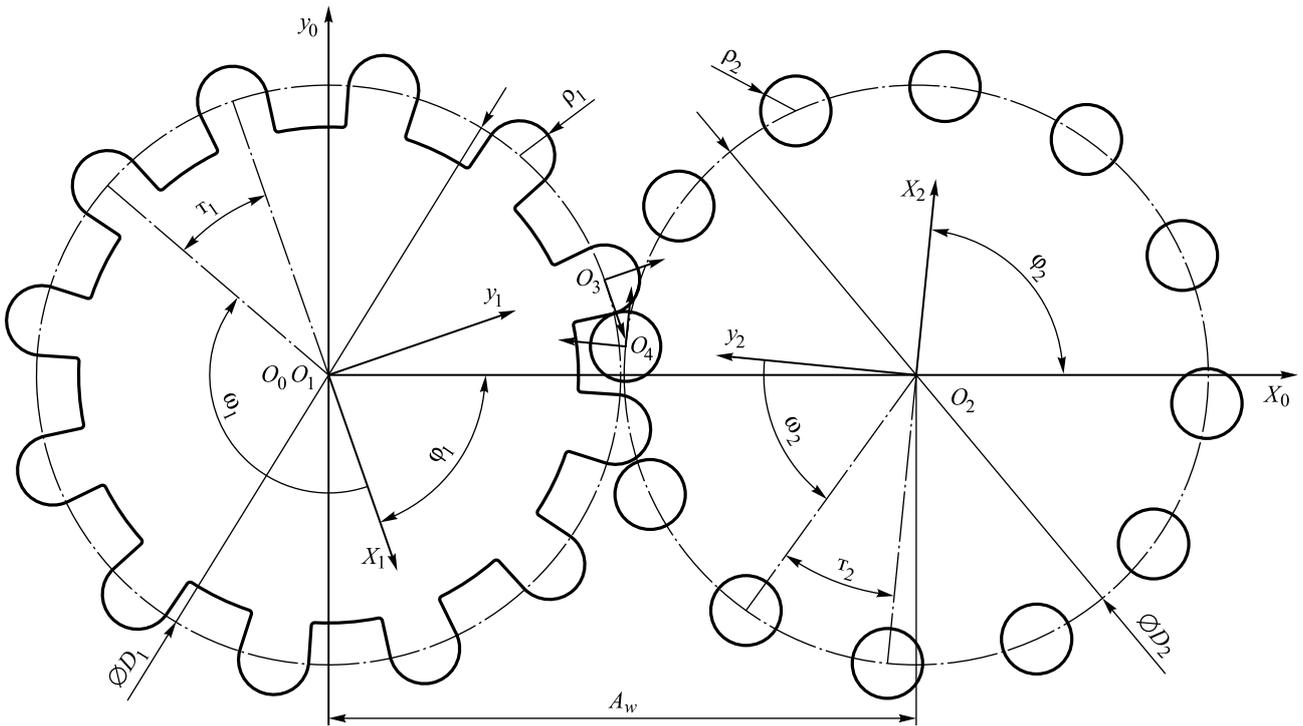


Рис. 3. Геометрические параметры и положение систем координат математической модели зацепления шестерни и цевочного колеса

$$\mathbf{M}_{13} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & R \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_{03} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) & -R\sin(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) & R\cos(\varphi_1) \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{02} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_2) & -\sin(\varphi_2) & 0 \\ \sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) & -A_w \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_{24} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & R \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_{03} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_2) & -\sin(\varphi_2) & -R\sin(\varphi_2) \\ \sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) & R\cos(\varphi_2) - A_w \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Здесь R соответствует $D/2$;

φ_2 – угол поворота ведомого колеса.

Геометрия профилей учитывается при определении радиус-векторов (\mathbf{R}) и ортов нормалей (\mathbf{E}) относительно ведущего (8) и ведомо-

го (9) колес, а также при матричных переходах между промежуточными системами координат.

$$\mathbf{R}_3^3 = \begin{vmatrix} \rho \cdot \cos(\theta_1) \\ \rho \cdot \sin(\theta_1) \\ 1 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{E}_3^3 = \begin{vmatrix} \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) \\ 0 \end{vmatrix}; \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{II}^4 = \begin{vmatrix} \rho \cdot \cos(\theta_2) \\ \rho \cdot \sin(\theta_2) \\ 1 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{E}_{II}^4 = \begin{vmatrix} \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (9)$$

где \mathbf{R}_3^3 – радиус-вектор точки контакта относительно зуба в системе координат S_3 ;

\mathbf{E}_3^3 – орт нормали в точке контакта относительно зуба;

\mathbf{R}_{II}^4 – радиус-вектор точки контакта относительно цевки в системе координат S_4 ;

\mathbf{E}_{II}^4 – орт нормали относительно цевки;

θ_1, θ_2 – углы положения точки контакта на окружности зуба и цевки соответственно.

Таким образом, была составлена система уравнений проекций радиус-векторов положения точки контакта и проекций ортов нормалей профилей в этой точке (10). Решением этой системы уравнений является функция положения $\varphi_2(\varphi_1)$:



$$\begin{cases} \rho \cos(\varphi_1 + \theta_1) - R \sin(\varphi_1) = \\ \quad = \rho \cos(\varphi_2 + \theta_2) - R \sin(\varphi_2); \\ \rho \sin(\varphi_1 + \theta_1) + R \cos(\varphi_1) = \\ \quad = \rho \sin(\varphi_2 + \theta_2) - A_w + R \cos(\varphi_2); \\ \cos(\varphi_1 + \theta_1) = -(\varphi_2 + \theta_2). \end{cases} \quad (10)$$

Математическая модель представляет собой систему тригонометрических уравнений и позволяет рассчитывать значения кинематических параметров зацепления, таких как функция ошибки положения, функция ошибки передаточного отношения и коэффициент торцевого перекрытия. С помощью этих критериев можно оценить циклическую погрешность передачи, а также характер и величины ударов при пересопряжении [8].

По итогам моделирования зацепления и анализа функций ошибки положения и ошибки передаточного отношения можно заключить, что большим преимуществом обладает контакт острого зуба формы *B* с цевкой. На протяжении всего времени зацепления одной пары функция передаточного отношения не имеет скачков.

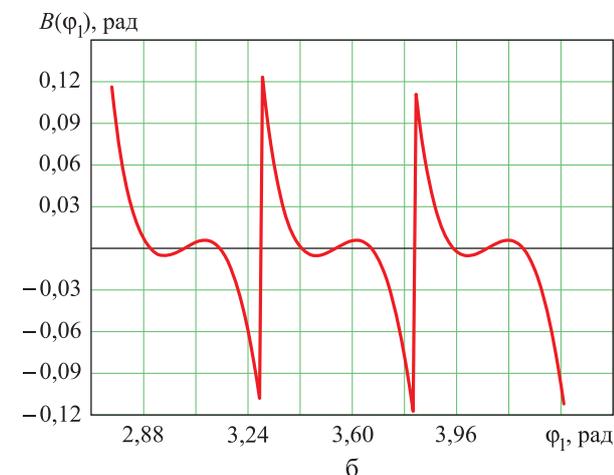
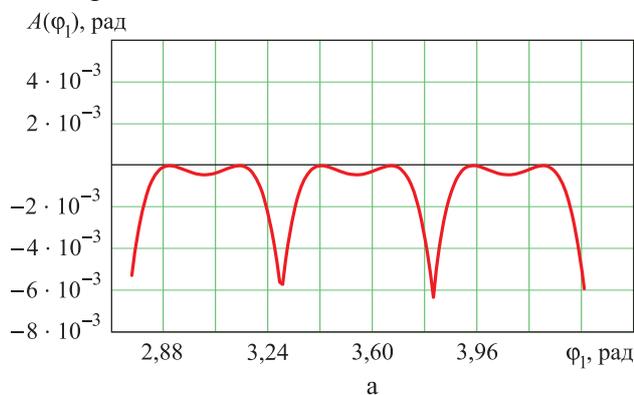


Рис. 4. Функции ошибки положения $A(\varphi_1)$ (а) и передаточного отношения $B(\varphi_1)$ (б) при пересопряжении трех пар зубьев

Функции положения и передаточного отношения дифференцируемы и непрерывны на всем протяжении диапазона шага в отличие от тех же функций для форм *A* и *C*.

На рис. 4 видим, что для функции ошибки положения $A(\varphi_1)$ выполняется требование непрерывности. Момент пересопряжения соседних пар зубьев представлен скачком передаточного отношения. Такие скачки функции являются индикаторами жестких ударов. Однако отметим, что в процессе сопряжения одной пары зубьев нет ни жестких, ни мягких ударов. А коэффициент перекрытия за время поворота на угловой шаг $\varepsilon = 1$. Амплитуда функции $A(\varphi_1)$ составляет $\Delta u_{\max} = 0,006$ рад (рис. 4).

Ввиду полученных характеристик, описанных выше, данная передача не может обеспечивать должный уровень точности и плавности движения. При этом кромочный контакт в процессе зацепления одной пары зубьев отсутствует. Скачки передаточного отношения наблюдаются только при пересопряжении.

Для кардинального улучшения характеристик зацепления необходимо изменить подход к модернизации элементов передачи. В связи с этим предлагаем новую компоновку описанных выше зубчатых колес.

Многорядное зубчатое колесо

Для улучшения характеристик передачи исследуем новую компоновку – многорядные зубчатые колеса. Элементарную передачу плоского зубчатого колеса и цевочного колеса, описанную выше, расположим в n рядов, сместив каждый последующий ряд на угол

$$\gamma = \tau/n,$$

где τ – угловой шаг колеса;

$$\tau = 2\pi/z;$$

n – количество рядов.

В результате получим многорядную (псевдокосозубую) передачу, в которой полностью отсутствуют осевые составляющие нагрузки при передаче движения (рис. 5). Новизна этой компоновки заключается в возможности уйти от изготовления сложной винтовой поверхности зубьев, при определенных допущениях по точности и скорости работы передачи.

Для данного исполнения зубчатого и цевочного колеса было принято количество ря-

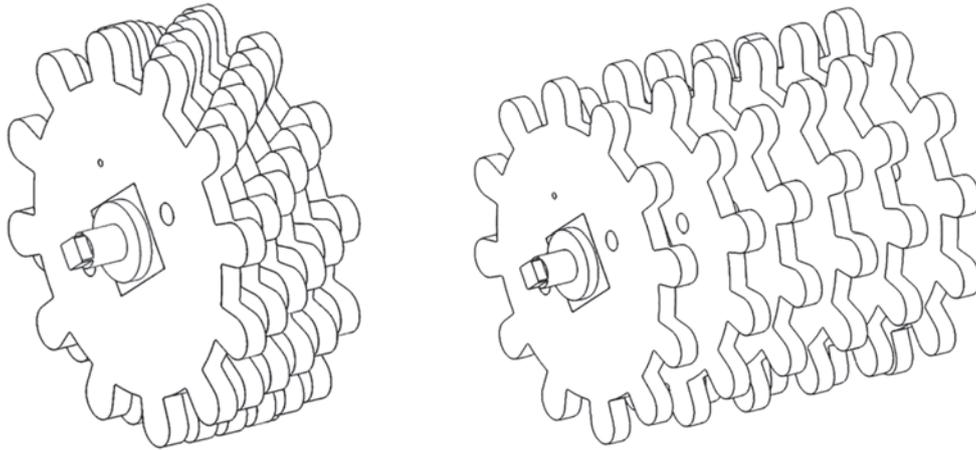


Рис. 5. Многорядное зубчатое колесо

дов $n = 6$, при этом смещение рядов равное. Из этого следует, что угол $\gamma = 5^\circ$. Параметры данной конфигурации являются первичными для данного исследования. Определим функции ошибки положения и передаточного отношения (рис. 6).

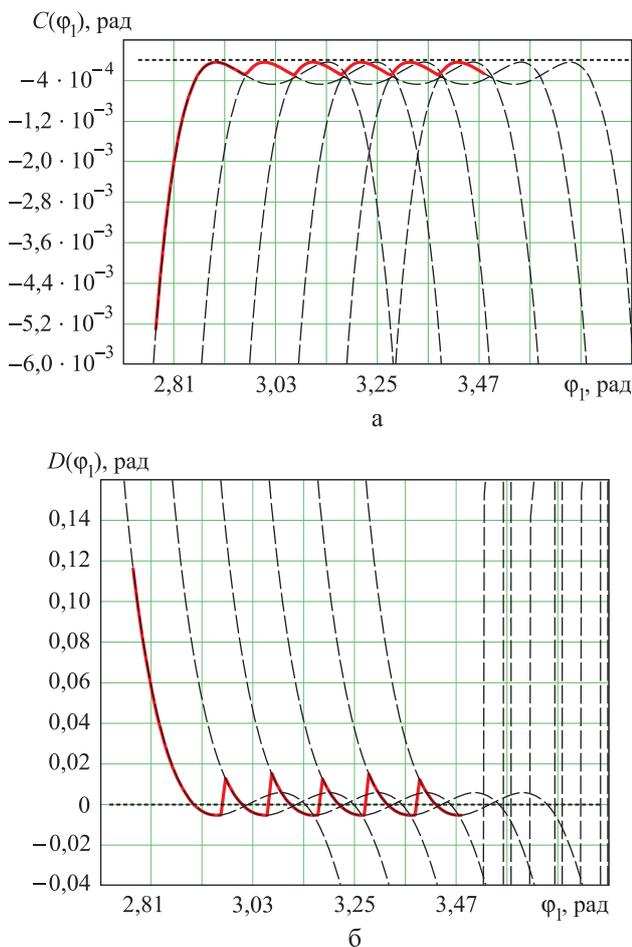


Рис. 6. Функции ошибки положения $C(\varphi_1)$ (а) и передаточного отношения $D(\varphi_1)$ (б) для зацепления многорядных зубчатых колес

На рис. 6 видно, что за счет перехода зацепления на последующие ряды (слои) зубчатого колеса удается уменьшить амплитуду функции ошибки положения $C(\varphi_1)$ и, как следствие, повысить точность и плавность передачи движения.

Из графика $C(\varphi_1)$ (см. рис. 6) видим, что амплитуда функции $\Delta_{y_{\max}} \approx 3 \cdot 10^{-4}$ рад. Следовательно $f_{zr0} = 12,4$ мкм. Такое значение немногим менее шестой степени точности по показателю плавности по ГОСТ 1643–81 для аналогичных параметров эвольвентных цилиндрических зубчатых колес [13]. Очевидно, что при увеличении количества рядов многорядной передачи будет уменьшаться значение амплитуды функции ошибки передаточного отношения.

Рассмотрим график функции ошибки передаточного отношения для многорядной передачи $D(\varphi_1)$ (см. рис. 6). Здесь видны характерные скачки функции при пересопряжении. Однако, в отличие от однорядного зацепления, угол, при котором контактирует одна пара, равен γ . За счет этого уменьшилось абсолютное значение перепада: от 0,24 при однорядном зацеплении до 0,02 при многорядном (с 6 рядами). Можно ожидать, что также уменьшатся шумы при эксплуатации и износ зубчатых колес. Учитывая, что теоретическое передаточное значение для исследуемых зубчатых колес – единица, получаем, что ошибка функции передаточного отношения варьируется в пределах 2 %.

Отдельно было проведено моделирование при передаточных отношениях $i_{h21} = 2,5$ и

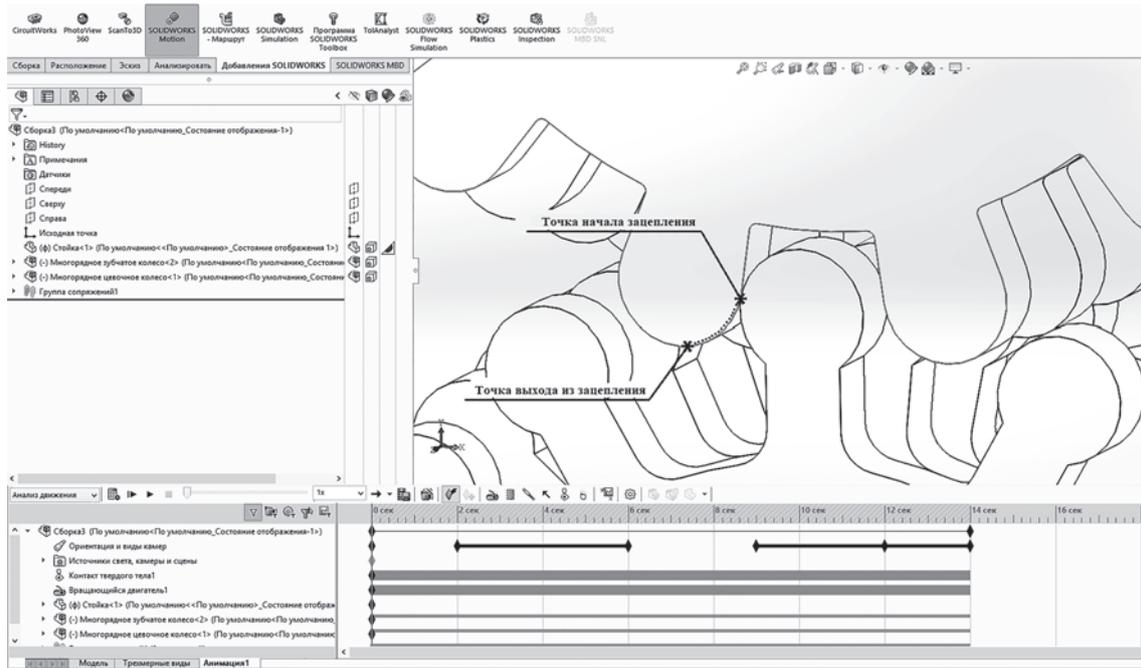


Рис. 7. Интерфейс программной среды *SolidWorks* при динамическом моделировании многорядного зацепления:
— зона контакта

$i_{н21} = 3,17$, где размерности и характеры функций приблизительно схожи, и ошибка передаточного отношения варьируется около 2 %.

На основе проведенных расчетов для многорядной зубчатой передачи были построены 3D-модели однослойных зубчатых колес и многорядных зубчатых колес. Моделирование проводилось в среде автоматизированного проектирования *SolidWorks*. На базе этой программы также было проведено физическое моделирование холостого хода передачи с помощью программных пакетов *Motion* и *Simulation* (рис. 7). Основное внимание уделялось кинематическим параметрам. Моделирование многорядного зубчатого зацепления согласуется с полученными графиками.

Создан макет многорядного зацепления. В ходе поиска технологии для воспроизведения макета предварительно был рассмотрен вариант изготовления зубчатых колес из конструкционной стали 3 методом лазерной резки (рис. 8). Однако менее затратным и простым в вопросе постобработки стало изготовление макета с помощью методов аддитивных технологий.

Все элементы макета были напечатаны на 3D-принтере *FDM* технологии (*Fused Deposition Modeling*) *ABS* пластиком (акрилонитрилбутадиенстирол). Данный материал был

выбран главным образом по причине его высоких механических свойств (по сравнению с пластиками, доступными для бытовой печати), и легкости механической обработки (рис. 9).

В силу физических свойств пластика, таких как усадка и старение, а также невысокой точности бытовых 3D-принтеров данный



Рис. 8. Пример изготовления зубчатого колеса методом лазерной резки



Рис. 9. Макет многорядного зацепления



макет предназначен только для ознакомления. С его помощью можно оценить форму зубчатых колес, реализацию движения, визуализацию зацепления и особенностей работы передачи. Для испытаний кинематических и динамических характеристик планируется создание макета с использованием таких материалов, как стали и сплавы алюминия, с помощью высокопроизводительных средств механической обработки.

Заключение

На данном этапе исследования проведен анализ кинематики несопряженных зубчатых колес, определены характеристики. На основании плоского зацепления предложена новая модель многорядного зацепления для улучшения кинематических характеристик. Проведены кинематический анализ и 3D-моделирование многорядной передачи, изготовлен макет многорядного колеса.

Передачи с простыми кинематическими парами, где взаимодействие происходит между поверхностями первого и второго порядка, как показано в данной статье, могут быть использованы и сегодня. Основное применение таких передач в машинах, где главным качеством будет возможность восстановления передачи, не требующее использования зубонарезающих станков и приспособлений. Кроме того, такие передачи могут быть использованы для экспериментальных установок, поскольку при этом возможно оперативно изменить параметры при незначительных временных затратах на проектирование и изготовление.

Дальнейшие исследования темы приближенных многорядных передач с простейшими формами зубьев ориентированы на вопросы динамики, конструктивные и технологические вопросы изготовления, расчеты механических параметров зубчатых колес и оптимизацию характеристик таких передач.

Список литературы

1. Дильс Г. А. Античная техника. М.-Л.: ОНТИ – Гос. техн.-теор. изд-во, 1934. 215 с.
2. Пипуныров В. Н. История часов с древнейших времен до наших дней. М.: Наука, 1982. 496 с.

3. Бабичев Д. Т., Волков А. Э. История развития зубчатых передач // Вестник научно-технического развития, 2015. № 5. 42 с.
4. Тимофеев Б. П., Уланов А. А. Кинематика зубчатых передач традиционного вида // Теория механизмов и машин. 2013. № 2 (22).
5. Шевелева Г. И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. М.: Мосстанкин, 1999. 494 с.
6. Тимофеев Б. П., Шалобаев Е. В. Состояние и перспективы нормирования точности зубчатых колес и передач // Вестник машиностроения. 1990. № 12. С. 34–36.
7. Тимофеев Б. П., Пономаренко М. Ю., Ковалевич А. В. Приближенные зубчатые передачи с кусочно-линейным контактом // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 2. С. 135–140.
8. Литвин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука, 1968. 584 с.
9. Шевелева Г. И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. М.: Мосстанкин, 1999. 494 с.
10. Интерактивная справка Creo Parametric 5.0.4.0. URL: http://support.ptc.com/help/creo/creo_rma/russian/index.html (дата обращения: 20.02.2020).
11. Куликов Д. Д. САПР технологических процессов. Ч. 1. М.: СПбГУ ИТМО, кафедра технологии приборостроения. URL: https://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=4 (дата обращения: 20.02.2020).
12. Гаврилов П. Я., Брезгин В. И. Объединение расчетной и проектирующей подсистемы при проектировании оборудования паротурбинных установок // Труды 3-й науч.-техн. конф. молодых ученых Уральского энергетического института. 2018 г. С. 143–145.
13. ГОСТ 1643–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. М.: ИПК Издательство стандартов, 1981. 45 с.

Поступила 06.11.19



Тимофеев Борис Павлович – доктор технических наук, профессор, профессор факультета систем управления и робототехники университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: механика.

Ковалевич Александр Валерьевич – инженер-конструктор 1-й категории Акционерного общества «Конструкторское бюро специального машиностроения», аспирант Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: механика.

Mathematical modeling of noninvolute gearing

The paper focuses on non-mating gears with linear contact, their teeth being a combination of planes and cylinders or only cylinders. To optimize the kinematic characteristics, it is proposed to use a new layout - multi-row gearing.

Keywords: gears, non-mating gears, multi-row gear wheel, multi-drive gear wheel, gearing rate error, gear ratio error, simple form teeth.

Timofeev Boris Pavlovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Faculty of Control Systems and Robotics, ITMO University, Saint Petersburg.

Science research interests: mechanics.

Kovalevich Aleksandr Valerievich – Design Engineer of the first category, Design Bureau of Special Engineering, Joint Stock Company, post-graduate, ITMO University, Saint Petersburg.

Science research interests: mechanics.



УДК 621.396.96

А. М. Аминев, А. В. Гилев, Д. Ю. Гришин,
В. Е. Зайцев, В. Н. Сергеев

Программное обеспечение автоматизированного стенда контроля АФАР

Предложено использование программной платформы многомерных кубов данных в автоматизированных стендах контроля активных фазированных решеток. Ее применение значительно облегчает и ускоряет отображение и анализ очень больших объемов данных, поступающих от крупноапертурных активных фазированных решеток в процессе измерений, благодаря чему конечный пользователь может создавать произвольные запросы к данным. Показаны перспективы использования этой платформы и для радиолокационных систем в целом.

Ключевые слова: программное обеспечение, активная фазированная антенная решетка, диагностический контроль, технологическое обслуживание, система управления базами данных.

Введение

При работе с крупноапертурными активными фазированными решетками (АФАР) в рамках пусконаладки и заводской настройки, функционально-диагностического контроля при технологическом обслуживании, выполнении специальных измерений возникает проблема отображения, обработки и анализа очень большого объема результатов измерения параметров. Например, только один тест – однократное измерение пяти параметров каждого приемного и передающего канала АФАР с 10 000 каналов в трех точках рабочего диапазона частот порождает массив размером 150 000 значений.

Как правило, интерес представляют закономерности изменения параметров и их статистических характеристик по времени, прогреву аппаратуры после включения, изменению условий эксплуатации. Типовой пример – анализ поведения среднеквадратического отклонения (СКО) фазового распределения в апертуре решетки по времени и температуре. Так, за сутки при наборе статистики количество измеренных значений может увеличиться еще на один или два порядка.

При таких больших объемах экспериментальных данных существенно возрастают и требования по отображению, обработке и анализу параметров АФАР, в рамках которых необходимо обеспечить:

- оперативный доступ к большим массивам сохраненных данных со стороны пользователей и программ обработки;

- высокоскоростную агрегацию больших массивов измеренных параметров по произвольным интервалам времени и произвольным составным частям АФАР;

- возможность оперативного формирования произвольных отчетов при анализе данных конечным пользователем (не программистом);

- программную поддержку процедур поиска и нахождения скрытых закономерностей в данных.

В состав программного обеспечения (ПО) стендов контроля АФАР входит прежде всего программная платформа реального масштаба времени для управления измерительными приборами и аппаратурой АФАР, сбором данных в темпе их поступления, сохранения, обработки и отображения измеренных значений параметров, например, *National Instruments LabView*. В развитых стендах в состав программного обеспечения включается также и база данных (БД) чаще всего на основе реляционных систем управления базами данных (СУБД), например *Microsoft Access* или *Microsoft SQL Server*. Возможности таких традиционных решений в случае, когда необходимо провести оперативный анализ данных при значительном возрастании их объема, ограничены:

- в системах реального времени данные сохраняются в виде файлов, что снижает гибкость и оперативность доступа к накопленным массивам параметров;

- в реляционных БД конечный пользователь работает с заранее созданными стандартными отчетами, а при необходимости произвольных отчетов для анализа данных вынужден обращаться к программистам;

- скорость агрегации больших массивов измеренных параметров по произвольным интервалам времени и составным частям АФАР как в системах реального времени, так и в реляционных БД недостаточна; задержки при оперативном визуальном анализе данных достигают 10 с и более.

В данной статье для решения проблемы оперативности, удобства, результативности обработки данных контроля крупноапертурных АФАР предлагается использовать современную информационную технологию многомерных кубов данных [1]. Другое название этой технологии – *OnLine Analytical Processing (OLAP)*. Более 20 лет она эффективно применяется для оперативного анализа и принятия решений при наличии очень больших объемов данных в бизнес-приложениях. Именно ограничения классических реляционных СУБД в части оперативного анализа больших объемов данных и послужили главной причиной появления технологии *OLAP*.

Приведено краткое описание разработанного стенда контроля АФАР с использованием *OLAP*, который в течение многих лет применяется для пусконаладки и технологического обслуживания крупноапертурных АФАР. Далее более подробно представлены структура многомерного куба данных, примеры анализа параметров АФАР, перспективы использования *OLAP* не только для контроля АФАР при пусконаладке и технологическом обслуживании, но и в целом для контроля РЛС при ее эксплуатации.

Аппаратное и программное обеспечение автоматизированного стенда контроля АФАР

Блок-схема стенда приведена на рис. 1. В его состав входят следующие основные аппаратные и программные средства:

- персональный компьютер в качестве управляющего (*Windows, Intel Core i7-7700K, 16 ГБ ОЗУ*);
- сервер базы данных (*Windows, Intel Xeon E5-2650, 64 ГБ ОЗУ*);
- автоматизированные рабочие места пользователей (*Windows, Intel Core i3-3770, 16 ГБ ОЗУ*);

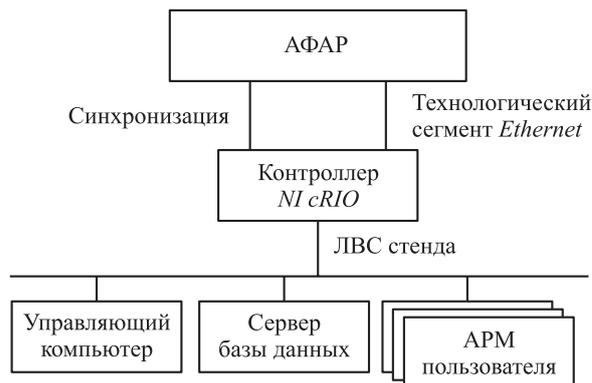


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного стенда контроля АФАР

- локальная вычислительная сеть (ЛВС) стенда (*Gigabit Ethernet*);
- высокоскоростной контроллер *NI cRIO* без измерительных модулей;
- прикладное ПО управляющего компьютера;
- прикладное ПО сервера БД;
- прикладное ПО автоматизированного рабочего места (АРМ) пользователя.

Особенностью контролируемых АФАР является наличие встроенного тракта пилот-сигнала (ПС), к которому может подключаться каждый приемный или передающий канал для контроля работоспособности этого канала, измерения его параметров, диагностики оборудования АФАР и калибровки. Измерение параметров приемного канала при подаче на него ПС выполняется с помощью аналого-цифрового преобразователя самого канала или подрешетки, в состав которой входит данный канал. Измерение параметров передающего канала при подключении его к тракту ПС выполняется с использованием входящего в состав АФАР контрольного приемника, который также подключен к этому тракту. Наличие внутренней вычислительной сети обеспечивает технологический доступ к вычислительным блокам АФАР по высокоскоростному стандартному интерфейсу. Контроллер *NI cRIO* служит для синхронизации АФАР и управляющего компьютера. Внешние средства измерений – координатограф и измерительный зонд (не показаны на рис. 1) – используются только на этапе заводской настройки.

Прикладное ПО управляющего компьютера предназначено для управления измерени-



ем всех параметров приемных и передающих каналов АФАР по пилот-сигналу с использованием штатного оборудования АФАР. Посредством него осуществляется оперативный функциональный контроль всех каналов и блоков АФАР, выравнивание фазового распределения на прием и на передачу в раскрыве АФАР. В нем происходит вычисление диаграммы направленности АФАР по измерениям в раскрыве, а также энергopotенциала АФАР. Кроме того, с его помощью отображаются результаты контроля, массивы проверяемых параметров АФАР передаются на сервер БД.

Прикладное ПО, установленное на сервере БД, предназначено для приема от управляющего компьютера и сохранения измеренных параметров АФАР, обработки принятых данных. В числе его функций:

- ведение долговременного архива данных;
- агрегирование данных, вычисление статистических показателей;
- диагностика отказов АФАР;
- формирование отчетов и протоколов испытаний.

АРМ пользователей подключены к серверу БД и используются для отображения информации о параметрах АФАР, визуального анализа данных, а также конфигурирования, отображения и печати отчетов и протоколов испытаний.

ПО управляющего компьютера стенда реализовано в среде графического программирования *National Instruments LabView* – широко известной и распространенной системы автоматизации измерений во многих отраслях техники, в том числе в области радиолокации и телекоммуникаций.

Сервер БД на рис. 1 включает серверы хранилища данных (ХД) и многомерных кубов данных. Сервер ХД выполнен на основе реляционной системы управления базами данных (СУБД) *Microsoft SQL Server*, принимает и сохраняет оперативные данные от управляющего компьютера. С его помощью можно выполнить ряд промежуточных действий для вычисления параметров АФАР и передать данные на сервер многомерных кубов данных.

Принципиальным вопросом здесь является способ передачи данных от *LabView* к

серверу ХД. Штатный инструмент *LabView* для записи данных в БД на основе реляционной СУБД – программный пакет *LabView Database Connectivity* – не предоставляет средств массовой загрузки данных и на практике оказался чрезвычайно медленным и неудобным.

В распоряжении разработчика есть только операция вставки строки в таблицу, вызов хранимой процедуры, составление текста команды *SQL* и ее исполнение. Вследствие этого в процессе создания автоматизированного стенда контроля АФАР был разработан высокоскоростной универсальный интерфейс *LabView/ХД*, при этом были использованы формат данных *XML* и скрипты для разбора *XML*-документов и преобразования в целевые структуры ХД. В результате скорость загрузки данных в ХД увеличилась более чем в 5 раз.

Сервер многомерных кубов данных реализован на основе *Microsoft Analysis Services* (аналитическая служба СУБД *MS SQL Server*). Он вычисляет и агрегирует параметры АФАР, представляет их в виде, необходимом для формирования отчетов и анализа. Пользователь при работе с БД «видит» на своем АРМ данные так, как они представлены на сервере многомерных кубов.

Многомерные кубы данных

Далее основное внимание уделено технологии многомерных кубов данных (или *OLAP*), поскольку это сравнительно новая информационная технология в практике автоматизированных средств контроля АФАР.

Многомерные кубы данных – это специальным образом организованная информационная среда, в которой доступ к данным осуществляется указанием определенных значений или их интервалов на координатных осях определенного многомерного пространства. На этих координатных осях могут быть заданы различные многоуровневые иерархии.

Данная технология обладает рядом существенных особенностей при ее использовании для контроля АФАР.

Во-первых, скорость выполнения запросов к данным значительно выше, чем при использовании традиционных реляционных баз данных. Основная масса запросов связана с обращением к массивам данных и их агреги-



рованием, т. е. вычислением сумм, средних, СКО, значений максимум/минимум. Это особенно актуально для крупноапертурных АФАР, где размеры агрегируемых массивов могут составлять от сотен тысяч до десятков миллионов только за сутки.

Во-вторых, с помощью *OLAP* конечный пользователь, не являющийся программистом, может создавать произвольный запрос к данным при условии, что он знает предметную область. Многомерный куб данных в отличие от множества таблиц в реляционных БД имеет довольно простую структуру. При его использовании вместе с развитыми программными средствами на АРМ пользователя появляется возможность создавать произвольный отчет за несколько минут с помощью компьютерной мыши.

Несмотря на высокое быстродействие сервера многомерных кубов данных выполнять все вычисления только на одном уровне *OLAP* многоуровневой вычислительной системы (*LabView* + реляционный сервер + сервер *OLAP*) не совсем верно. Максимальной производительности можно достичь при оптимизации распределения вычислений по уровням многоуровневой системы. В результате удалось обеспечить задержку обновления экрана при вычислении заново «на лету» произвольных отчетов не более 1 с (при параметрах компьютеров, указанных выше при описании блок-схемы стенда на рис. 1).

В-третьих, при использовании *OLAP* обеспечивается высокая скорость обработки больших массивов данных, и это важно не только для формирования отчетов для пользователей, но и для программных приложений, манипулирующих множеством больших массивов. Одним из таких приложений является диагностика состояния СВЧ-трактов АФАР – зондирующих импульсов, сигналов гетеродина и т. п.

Составляющие этих трактов (СВЧ-делители и коаксиальные фидеры) не имеют встроенных средств для контроля целостности трактов, поэтому главным способом диагностики отказов здесь является контроль прохождения сигналов через определенную часть СВЧ-тракта до массивов приемопередающих каналов, сигнал на которые поступает через эту часть, например, делителя подрешетки или делителя

полустроки. При таком способе диагностики происходит формирование, агрегирование и сопоставление множества больших массивов данных, поэтому его реализация в автоматизированном стенде контроля АФАР на основе технологии *OLAP* обеспечила необходимое быстродействие.

На сервере многомерных кубов данных для представления и доступа к данным по параметрам АФАР используются три основные координатные оси: время, частота, структура АФАР.

Ось времени включает три иерархических уровня (сверху вниз): сутки, тип теста, начало теста. В данном случае тест – это однократный контроль или измерение определенной группы параметров АФАР в рамках заданного типа теста и данных суток.

Ось частот АФАР включает четыре члена: три точки рабочего диапазона частот НЧ, ЦЧ, КЧ (нижняя, центральная и конечная) для частотно-зависимых параметров АФАР и член «–» для частотно-независимых параметров.

Фрагменты двух иерархий оси структуры АФАР, используемых при построении отчетов, приведены на рис. 2. Иерархия по строкам (см. рис. 2, а) отражает деление прямоугольной АФАР по вертикали на верхнюю и нижнюю половины, строки подрешеток, строки приемопередающих и приемных модулей (ППМ/ПМ) в составе подрешеток, наличие приемных и передающих каналов в составе ППМ/ПМ, параметры каналов. Она раскрыта до конца по дереву: нижняя половина > строка подрешеток 9 > строка ППМ/ПМ 2 > приемные и передающие каналы > параметры.

Иерархия по столбцам (см. рис. 2, б) отражает деление прямоугольной АФАР по горизонтали на левую и правую половины, столбцы подрешеток, наличие в составе каждой подрешетки каналов с двумя поляризациями, номера каналов в составе каждой поляризации. Она раскрыта до конца по дереву: левая половина > столбец подрешеток 3 > поляризация > каналы.

Пересечения членов этих двух иерархий с максимальной гранулярностью (параметр канала) и членов с максимальной гранулярностью осей времени и частоты (тест, частота) определяют элементарные ячейки многомер-

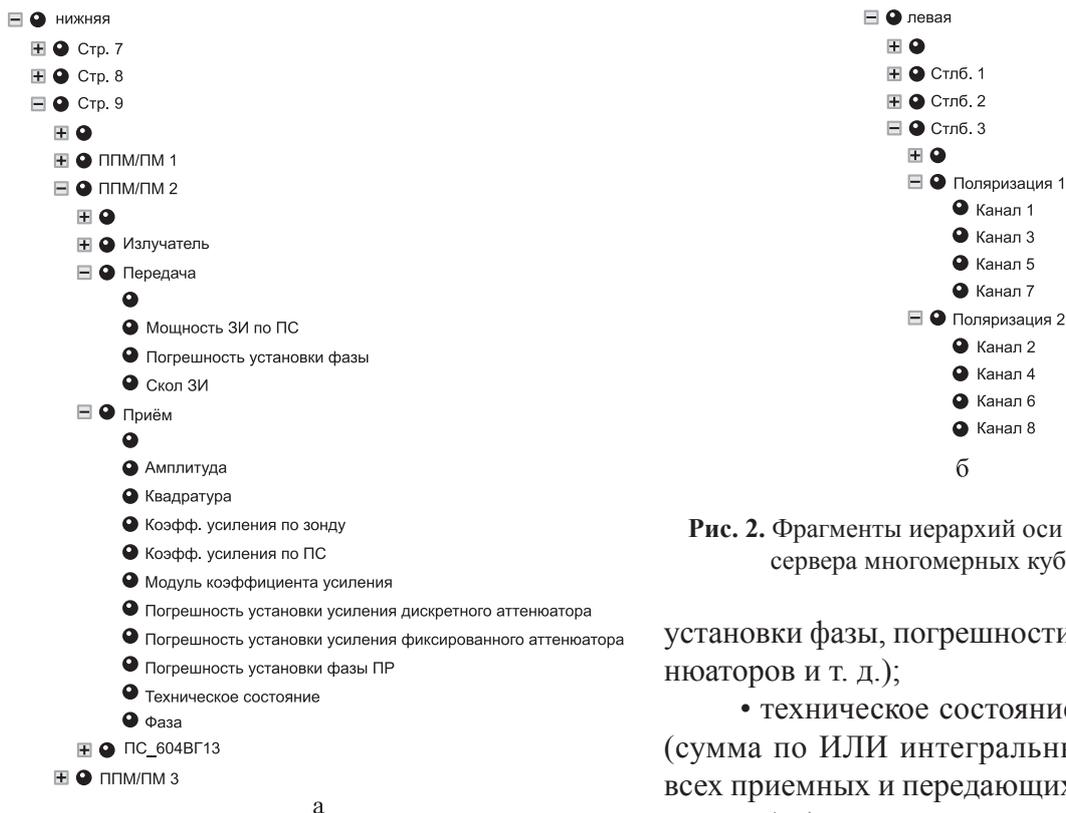


Рис. 2. Фрагменты иерархий оси структуры АФАР сервера многомерных кубов данных

ного куба (в данном случае, трехмерного куба). В ячейки помещаются результаты контроля параметров АФАР – измеренные значения параметров и однобитовые (0 – «норма», 1 – «отказ») значения после сравнения измеренных параметров с установленными порогами, т. е. результаты функционального и диагностического контроля технического состояния (ТС) составных частей (СЧ) АФАР. При запросе параметров группы элементарных ячеек, входящих в состав определенной СЧ АФАР, на сервере многомерных кубов данных автоматически выполняется их агрегация.

Примеры запросов к многомерному кубу данных АФАР с агрегацией параметров:

- суммарная мощность зондирующих импульсов (ЗИ) по каждой строке решетки;
- позиция в решетке и серийный номер ППМ с минимальной суммарной мощностью ЗИ;
- средняя фаза приемных каналов по всей решетке;
- СКО фазы передающих каналов по верхней и нижней половинам АФАР;
- техническое состояние приемного канала (сумма по ИЛИ сигналов ТС по отдельным параметрам технического состояния канала – коэффициента усиления канала, погрешности

установки фазы, погрешности установки аттенуаторов и т. д.);

- техническое состояние столбца АФАР (сумма по ИЛИ интегральных сигналов ТС всех приемных и передающих каналов данного столбца).

Информационной средой для пользователя на АРМ стенда служит программный пакет *Excel*. Основным инструментом для доступа к данным, конфигурирования отчетов и свободного анализа данных с сервера многомерных кубов данных является стандартное средство программного пакета *Excel* – «Сводная таблица».

В качестве шаблона отчета для отображения параметров приняты прямоугольная геометрия и иерархическая структура самой решетки, для чего и используются иерархии на рис. 2. При визуальном анализе это позволяет при необходимости сразу определить позицию (позиции) проблемной составной части АФАР, быстро оценить состояние АФАР по определенному параметру, увеличить или уменьшить детализацию представления состояния решетки от детального поканального представления до АФАР в целом в виде одного квадрата на экране. При этом изменение степени детализации представления состояния АФАР не требует перехода в другое окно, как это обычно принято в стандартных графических интерфейсах. В качестве примера на рис. 3 представлены отчеты о тестах с разной степенью детализации СКО выровненного фазового распре-



ления составных частей АФАР на прием на центральной частоте.

На рис. 3, а представлено СКО фазового распределения по АФАР в целом – степень агрегации фазы по структуре АФАР максимальна. Как правило, представляет интерес и качество выравнивания фазового распределения для составных частей АФАР. Для детализации необходимо раскрывать структуру решетки по горизонтали и вертикали с использованием элементов управления + на раскрываемых уровнях иерархии решетки.

На рис. 3, б приведен результат раскрытия решетки на один уровень иерархии по горизонтали (на левую и правую половины) и вертикали (на верхнюю и нижнюю половины), после этого СКО фазового распределения АФАР детализировано до ее четвертей. Правая нижняя четверть раскрывается далее до уровней строк и столбцов (см. рис. 3, в), левая и верхняя половины остаются в прежнем состоянии, т. е. нераскрытыми. На пересечении строк и столбцов АФАР находятся подрешетки, поэтому данный отчет представляет СКО фазового распределения по подрешеткам раскрытой четверти АФАР. Для дальнейшего визуального анализа строки подрешеток 8 и 10 детализируются до уровня ППМ/ПМ, а столбец 11 – до уровня поляризации (см. рис. 3, г). Для ППМ/ПМ на пересечении строк 8 и 10 со столбцом 11 достигнута предельная степень детализации. Минимальная совокупность каналов, для которых имеет смысл параметр СКО фазы, – это четыре канала одного ППМ/ПМ одной поляризации.

Отображение битовых параметров – результатов функционального контроля и диагностики – проводится на таком же шаблоне АФАР с различной степенью детализации. Отличие состоит в том, что для экономии площади отчета и повышения скорости визуального анализа раскрытых до определенного уровня отчетов показываются только те горизонтальные и вертикальные области решетки, которые содержат составные части АФАР в состоянии «отказ». На этих СЧ АФАР также отображается количество приемных и/или передающих каналов в составе этих СЧ, находящихся в состоянии «отказ».

На рис. 4 приведены результаты функционального контроля каналов АФАР, в которой смоделированы неисправности приемных каналов путем снижения их коэффициентов усиления за минимально допустимый предел.

Из отчета на рис. 4, а следует, что неисправные каналы есть в верхней левой четверти АФАР в количестве 96 шт., в верхней правой четверти АФАР в количестве 24 шт. и в нижней левой четверти АФАР в количестве 32 шт. При детализации верхней левой и правой четвертей АФАР до подрешеток (рис. 4, б) обнаружены отказы в подрешетках на пересечении строки 4 и столбца 2, строки 6 и столбца 4, строки 3 и столбца 8, строки 2 и столбца 10, строки 1 и столбца 12. В продолжении детализации строки подрешеток 1 до уровня ППМ/ПМ и столбца 12 до уровня поляризации и каналов (рис. 4, в) были замечены отказы в ППМ/ПМ4, тип отказавших каналов «Прием», вид отказа «Коэффициент усиления по ПС».

Перспективы развития ПО контроля АФАР

Использование сервера базы данных актуально не только для технологических стендов контроля АФАР, но и для РЛС в целом, в том числе при эксплуатации по назначению. Современная РЛС имеет, конечно, средства сохранения параметров и результатов работы станции. Однако типичная ситуация такова, что все сводится к элементарной фиксации событий. Эти средства представляют собой простейшие текстовые лог-файлы (журналы событий). При этом у каждой крупной подсистемы станции свои собственные лог-файлы со своими форматами, разнесенные пространственно.

Намного больше пользы можно извлечь из сохраняемых данных, если параметры и результаты работы основных подсистем РЛС (АФАР, устройств первичной и вторичной обработки, центра планирования работы станции, подсистем позиционирования, свертывания/развертывания АФАР, охлаждения, электропитания) передавать в единый для станции сервер БД. При этом возникает стандартная архитектура: ряд первичных источников данных (в данном случае подсистемы РЛС) передают параметры и результаты своей работы на один сервер.



СКО фазового распределения
СЧ АФАР на прием, град

1		
2	Check Day	Session
3		
4	07.02.2019	08.02.19 09:12:08
5	08.02.2019	08.02.19 09:19:50
6		
7	СКО фазы Slctd	АФАР
8	Сеанс тестирования	Код частоты
9	08.02.19 09:19:50	ЦЧ

а

СКО фазового распределения
СЧ АФАР на прием, град

1		
2	Check Day	Session
3		
4	07.02.2019	08.02.19 09:12:08
5	08.02.2019	08.02.19 09:19:50
6		
7	СКО фазы Slctd	АФАР
8		Правая/лев
9	Сеанс тестирования	Кд
10	08.02.19 09:19:50	ЦЧ
11		

б

СКО фазового распределения
СЧ АФАР на прием, град

1													
2	Check Day	Session											
3													
4	07.02.2019	08.02.19 09:12:08											
5	08.02.2019	08.02.19 09:19:50											
6													
7	СКО фазы Slctd	АФАР	Правая/л Столбец г										
8			АФАР										
9			левая										
10	Сеанс тестирования	Кд	Верхняя/ни: Строка поз										
11	08.02.19 09:19:50	ЦЧ	верхняя	2,3	2,0	2,2	1,8	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9
12			нижняя	Стр. 7	2,3	1,8	1,7	1,9	1,7	1,9	1,8	2,1	1,6
13				Стр. 8	2,1	1,4	2,3	2,3	2,0	2,1	1,7	2,3	2,1
14				Стр. 9	2,1	2,2	2,0	1,8	2,3	2,2	1,9	2,0	2,1
15				Стр. 10	2,0	1,5	2,3	1,8	2,5	1,8	1,8	2,0	1,8
16				Стр. 11	2,2	2,3	2,0	2,3	1,8	2,5	2,1	1,5	3,0
17				Стр. 12	2,1	1,6	2,1	1,7	2,3	1,3	2,0	2,3	1,6

в

СКО фазового распределения
СЧ АФАР на прием, град

1																
2	Check Day	Session														
3																
4	07.02.2019	08.02.19 09:12:08														
5	08.02.2019	08.02.19 09:19:50														
6																
7	СКО фазы Slctd	АФАР	Правая/ле Столбец пс Поляризация													
8			АФАР													
9			левая													
10	Сеанс тестирования	Кд	Верхняя/ни: Строка пг Блок подреш													
11	08.02.19 09:19:50	ЦЧ	верхняя	2,3	2,0	2,2	1,9	1,8	1,9	2,0	2,0	2,0	1,9			
12			нижняя	Стр. 7	2,3	1,8	1,7	1,5	1,9	1,7	1,9	1,8	2,1			
13				Стр. 8	2,0	1,7	1,7	1,5	1,0	2,1	2,1	1,1	1,7			
14				Стр. 9	2,1	1,5	1,7	1,5	1,0	1,7	1,7	2,0	2,4			
15				Стр. 10	1,9	1,3	1,4	1,7	1,2	2,6	2,3	1,1	1,3			
16				Стр. 11	2,3	1,0	2,4	2,2	0,7	1,3	1,9	2,3	2,9			
17				Стр. 12	2,1	2,2	2,0	1,4	2,1	2,3	2,2	1,9	2,0			
18				Стр. 13	1,8	1,5	2,0	0,8	0,9	2,1	1,4	1,8	2,2			
19				Стр. 14	2,0	1,9	2,3	2,4	2,4	2,3	1,5	1,3	2,2			
20				Стр. 15	1,9	0,9	2,8	1,3	0,9	2,3	1,5	2,2	1,3			
21				Стр. 16	2,1	1,6	1,6	1,9	1,2	2,8	2,1	1,8	1,8			
22				Стр. 17	2,2	2,3	2,0	2,4	2,1	1,8	2,5	2,1	1,5			
23				Стр. 18	2,1	1,6	2,1	1,8	1,5	2,3	1,3	2,0	2,3			

г

Рис. 3. Отчеты с разной степенью детализации о СКО фазового распределения составных частей АФАР на прием



АФАР	Правая/левая
96	24
32	

а

АФАР	Правая/левая
32	
32	
32	

б

АФАР	Правая/левая
16	
32	
32	
32	

в

Рис. 4. Отчеты с разной степенью детализации о техническом состоянии каналов АФАР

Возможны разные исполнения сервера. На этапе пусконаладки, опытной эксплуатации или технологического обслуживания это может быть внешний по отношению к станции компьютер, подключаемый к ней через локальную вычислительную сеть, а на этапе регулярной эксплуатации – встроенный в изделие компьютер или удаленный компьютер, подключаемый к станции через защищенный высокоскоростной канал связи. Наличие в составе сервера БД уровня *OLAP* дает следующие возможности:

- оперативный доступ к текущим и архивным данным всей станции пользователям и программам обработки;
- высокоскоростная ретроспективная обработка больших массивов данных;
- анализ влияния параметров отдельных подсистем на конечные радиолокационные параметры станции;
- поиск и нахождение скрытых закономерностей в данных с использованием современных технологий исследования данных типа

data mining, где решающую роль играет способность сервера *OLAP* перерабатывать очень большие массивы за приемлемое время.

В качестве примера выделим небольшое количество возникающих при этом более конкретных постановок задач, которые направлены на повышение и поддержание технических характеристик РЛС в течение всего ее жизненного цикла:

- анализ поведения СКО фазового распределения АФАР на больших временных интервалах;
- анализ влияния качества электропитания станции на состав и мощность паразитных дискретных составляющих в спектре излучаемого и принимаемого сигналов;
- анализ влияния точности позиционирования и развертывания АФАР на точность угловых измерений;
- накопление статистики по вероятности обнаружения цели и точности измерения ее координат на больших интервалах времени и при разных условиях работы станции, обработка длинных временных рядов;



- анализ влияния разброса параметров каналов АФАР на глубину подавления активных помех;

- раннее распознавание и предупреждение развивающихся на станции аварийных ситуаций, прогнозирование работоспособности станции;

- ведение истории и результатов ремонтов и технологического обслуживания станции;

- консолидация истории эксплуатации экземпляров серийных изделий.

В настоящее время программное обеспечение серверов *OLAP* – это в основном западные коммерческие продукты. Но существуют и другие варианты их реализации. Например,

на основе недавно разработанного отечественного ПО Полиматака или серверов *OLAP* с открытым исходным кодом *Apache Kylin* или *Mondrian OLAP server*. Однако для этого требуется значительная доработка до конкретных приложений. Исполнение при необходимости сервера хранилища данных возможно также на открытой платформе *PostgreSQL*.

Список литературы

1. Многомерные базы данных // Национальная библиотека им. Н. Э. Баумана. *Vauman National Library*. 2019. URL: https://ru.bmstu.wiki/Многомерные_базы_данных (дата обращения: 05.11.2019).

Поступила 06.11.19

Аминев Азат Махмутович – кандидат технических наук, ведущий специалист отдела радиолокационной аппаратуры ООО «Алмаз-Антей Телекоммуникации», г. Москва.

Область научных интересов: автоматизированные системы измерений параметров радиолокационных систем.

Гилев Алексей Вячеславович – кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории СВЧ-техники ООО «Алмаз-Антей Телекоммуникации», г. Москва.

Область научных интересов: базы данных систем реального времени.

Гришин Дмитрий Юрьевич – начальник сектора отдела измерений параметров антенных систем АО «ВНИИРТ», г. Москва.

Область научных интересов: программное обеспечение систем реального времени.

Зайцев Владимир Егорович – кандидат технических наук, генеральный директор АО «ВНИИРТ», г. Москва.

Область научных интересов: радиолокация, фазированные антенные решетки.

Сергеев Владимир Николаевич – кандидат технических наук, директор по научно-техническому развитию АО «ВНИИРТ», г. Москва.

Область научных интересов: СВЧ-техника, антенны.



Automated active phased array control stand software

The study suggests using a software platform for multidimensional data cubes in automated active phased array control stands. The application of the platform greatly facilitates and accelerates the display and analysis of very large volumes of data coming from large-aperture active phased arrays during the measurement process, so that the end user can make spontaneous data requests. The study shows the prospects of using this platform for radar systems as a whole.

Keywords: software, active phased array, diagnostic control, process maintenance, database management system.

Aminev Azat Makhmutovich – Candidate of Engineering Sciences, Leading Specialist, Department of Radar Equipment, Almaz-Antey Telecommunications, Joint Stock Company, Moscow.

Science research interests: automated systems for measuring parameters of radar systems.

Gilev Aleksey Vyacheslavovich – Candidate of Engineering Sciences, Leading Engineer, Laboratory of Microwave Technology, Almaz-Antey Telecommunications, Joint Stock Company, Moscow.

Science research interests: real time database systems.

Grishin Dmitriy Yurievich – Head of the Sector, Department of Antenna System Parameters Measurement, All-Russian Scientific Research Institute of Radio Engineering, Joint Stock Company, Moscow.

Science research interests: real-time database system software.

Zaytsev Vladimir Egorovich – Candidate of Engineering Sciences, Director General, All-Russian Scientific Research Institute of Radio Engineering, Joint Stock Company, Moscow.

Science research interests: radar, phased arrays.

Sergeev Vladimir Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, Director of Scientific and Technical Development, All-Russian Scientific Research Institute of Radio Engineering, Joint Stock Company, Moscow.

Science research interests: microwave technology, antennas.