



УДК 621.396.67
ГРНТИ 78.25.41

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ЗАДАЧИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК БЕСПИЛОТНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

А.В. ТИМОШЕНКО, доктор технических наук, профессор

Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (г. Москва)

С.Н. РАЗИНЬКОВ, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

О.Э. РАЗИНЬКОВА, кандидат технических наук

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Р.В. ГРОМОВ

АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» (г. Москва)

Выполнен обзор современного состояния и обоснованы задачи совершенствования методических основ исследования и разработки антенных решеток для нагрузок беспилотных летательных аппаратов, применяемых для мониторинга радиоэлектронной обстановки. Оценены возможности и перспективы развития моделей и методов анализа и синтеза решеток в соответствии с требованиями к эффективности выполнения целевых функций и радиолокационной заметности беспилотных радиотехнических комплексов. Изложены принципы исследования характеристик антенных систем в режиме возбуждения импульсами малой длительности и закономерностей нестационарного вторичного излучения компонентами искусственных покрытий с зеркально-асимметричными отражательными свойствами, применяемых для снижения радиолокационной заметности беспилотных летательных аппаратов. Представлены положения методик обоснования тактико-технических требований к антенным решеткам средств мониторинга радиоэлектронной обстановки.

Ключевые слова: беспилотный радиотехнический комплекс, мониторинг радиоэлектронной обстановки, антенная решетка, методы анализа и синтеза антенных систем, радиолокационная заметность объектов.

CURRENT STATE AND TASKS OF THE UNMANNED RADIO ENGINEERING COMPLEXES ANTENNA ARRAYS METHODOLOGICAL FOUNDATIONS CONSTRUCTING IMPROVING

A. V. TYMOSHENKO, Doctor of Technical sciences, Professor

National Research University of electronic technology «MIET» (Moscow)

S. N. RAZINKOV, Doctor of Physic-Mathematical sciences, Senior Researcher

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

O. E. RAZINKOVA, Candidate of Technical sciences

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

R. V. GROMOV

JSC «Radio Engineering Institute named after Academician A.L. Mints» (Moscow)

The review of the current state and the tasks of improving the methodological foundations of research and development of antenna arrays for the use of unmanned aerial vehicles used for monitoring the electronic environment are justified. The possibilities and prospects for the development of models and methods for analyzing and synthesizing lattices in accordance with the



requirements for the performance of target functions and radar visibility of unmanned radio systems are evaluated. The principles of studying the characteristics of antenna systems in the mode of excitation by short-duration pulses and the laws of non-stationary secondary radiation by components of artificial coatings with mirror-asymmetric reflective properties used to reduce the radar visibility of unmanned aerial vehicles are described. The provisions of the methods for substantiating the tactical and technical requirements for antenna arrays of means for monitoring the electronic environment are presented.

Keywords: unmanned radio engineering complex, monitoring of radio-electronic environment, antenna array, methods of analysis and synthesis of antenna systems, radar visibility of objects.

Введение. Тенденции совершенствования технологий анализа радиоэлектронной обстановки в условиях возрастания требований к расширению контролируемых территорий и повышения разведывательной защищенности радиоэлектронных объектов связаны с применением беспилотных радиотехнических комплексов. Высота полета беспилотного летательного аппарата (БЛА) увеличивает дальность прямой видимости источников радиоизлучения с его борта по сравнению с дистанциями, характерными для наземных средств мониторинга [1, 2]. За счет совместной обработки сигналов, принимаемых целевыми нагрузками группы БЛА, совершающих совместный полет, или многократного измерения пеленгов на маршрутах движения одиночных БЛА, реализуются функции оценки местоположения объектов. Инвариантность координат к текущей контрастности демаскирующих признаков позволяет распознавать состояния излучателей при смене режимов работы и параметров сигналов [3]. Вследствие высокой мобильности БЛА и способности выполнять маневры со значительными перегрузками возможно оперативное перемещение комплексов; при совершении полетов на малых высотах с использованием защитных свойств рельефа местности достигается скрытное сосредоточение усилий мониторинга в заданных районах [1].

Ключевыми при разработке беспилотных радиотехнических комплексов являются вопросы создания бортовых антенных систем, которые, с одной стороны, должны обладать высокими показателями направленности для обеспечения энергетической доступности объектов и пространственно-частотной избирательности для селекции сигналов и помех, а с другой стороны – малым уровнем радиолокационной заметности. Улучшение направленных свойств антенн, как правило, сопровождается увеличением их габаритов и, согласно теореме Пойнтинга [4], приводит к повышению радиолокационной заметности. Согласно [5], эффективные площади рассеяния (ЭПР) воздушных объектов, выступающих в качестве носителей целевых нагрузок беспилотных радиотехнических комплексов, в секторах, опасных для обнаружения наземными радиолокационными станциями, на 85...90 % определяются вторичным излучением бортовых антенн.

Наиболее широкое применение в целевых нагрузках БЛА мониторинга находят антенные решетки (АР). В диапазоне частот L эффективно используются низкопрофильные решетки вибраторного типа, размещаемые в верхней полусфере, а в диапазонах частот S, C, X и Ku – щелевые АР, встраиваемые в корпус носителя. Избирательное усиление сигналов для определенных направлений и частот обеспечивается за счет синфазного сложения токов на выходах антенных элементов; при этом профили элементов позволяют достичь равенства их входных сопротивлений сопротивлениям сбалансированных распределительных линий для согласования с нагрузками в диапазонах рабочих частот при малых электрических размерах, без применения громоздких согласующих устройств [6–8]. При установлении в распределительной линии режима работы, близкого к режиму бегущей волны [6], распределение токов решетки не претерпевает существенных амплитудно-фазовых искажений, что позволяет избежать энергетических потерь сигналов в антенных нагрузках [7, 8].



Качество технических решений по созданию АР в значительной мере определяется уровнем развития методических основ их проектирования и оценки характеристик с учетом специфики размещения на носителях и применения при выполнении функциональных задач.

Цель работы – обзор современного состояния и обоснование задач совершенствования методов анализа и синтеза решеток для беспилотных радиотехнических комплексов.

Актуальность. Эффективность мониторинга радиоэлектронной обстановки при использовании АР возрастает вследствие реализации в целевых нагрузках беспилотных радиотехнических комплексов следующих функций:

- безынерционный обзор пространства за счет электронного сканирования главным лучом диаграммы направленности (ДН), обеспечивающий снижение вероятности пропуска кратковременных излучений при отказе от многолучевых антенн и многоканальных по пространству приемников, обладающих значительными массогабаритными характеристиками [3];

- формирование ДН с требуемой шириной и малым уровнем боковых лепестков, а также достижение высоких коэффициентов усиления путем создания соответствующих распределений и синфазного (синхронного) сложения токов антенных элементов [6]. В результате становятся возможными усиление сигналов, селекция направлений их прихода и пространственная режекция помех, частотно-временные параметры которых совпадают или перекрываются по значениям с параметрами излучений объектов мониторинга, т.е. антенная система выступает в качестве устройства пространственно-временной обработки добываемых данных;

- снижение энергетических потерь сигналов в фидерных трактах за счет включения в каналы антенных элементов высокочастотных усилителей. При повышении отношения сигнал-шум на выходе АР возрастает помехозащищенность аппаратуры мониторинга. В сочетании с возможностями электронного управления положением главного луча и адаптивного изменения формы ДН решетка приобретает свойства многофункциональности [6] путем совмещения в ней функций поиска, обнаружения и траекторного сопровождения объектов.

Для исследования характеристик АР беспилотных радиотехнических комплексов применяются методы электродинамического анализа их конструкций, расположенных на несущих поверхностях правильной геометрической формы, соответствующих фрагментам корпусов носителей. Суть анализа заключается в установлении закономерностей преобразований пространственно-временных (пространственно-частотных) распределений полей и токов антенных элементов, а также изменений вероятностно-временных показателей эффективности приема и обработки сигналов в зависимости от топологии и электрических размеров решеток.

Технический облик АР с характеристиками, установленными на основании требований к средствам мониторинга, определяется по результатам решения задачи синтеза. Данная процедура, выполняемая для решетки конкретного класса с предварительно обоснованными принципами конструктивного исполнения и размещения на носителе, включает в себя два этапа [9].

Первый этап – нахождение распределения токов антенных элементов, соответствующего заданным показателям пространственно-частотной избирательности при возбуждении полем стороннего источника (структурный синтез АР).

Второй этап – определение параметров конструкции и выбор вариантов построения согласующих устройств и распределительных линий для формирования обоснованного распределения токов (параметрический синтез АР).

Согласно представленной декомпозиции, задачи структурного и параметрического синтеза могут решаться независимо с последующим логическим объединением результатов [6, 10]. Вместе с тем, для нахождения рациональных вариантов конструкций при минимальной технической сложности исполнения важно сохранение единого методологического подхода к



вопросам синтеза при взаимодополняющем объединении результатов каждого этапа. Так, для достижения предельных значений характеристик активных фазированных АР и решеток с нагрузками, выполненными на базе функциональной электроники [6], на каждом этапе синтеза необходимо учитывать электромагнитное взаимодействие элементов через поля вторичного излучения, нелинейные зависимости токов и динамических параметров приемных трактов от уровней принимаемых сигналов.

Таким образом, совершенствование методических основ построения АР, предназначенных для размещения на БЛА, является актуальной задачей для разработки беспилотных радиотехнических комплексов.

Анализ методических основ построения антенных решеток беспилотных радиотехнических комплексов. В настоящее время методические основы исследования и обоснования характеристик и параметров конструкций АР беспилотных радиотехнических комплексов составляют:

- электродинамические модели и методы анализа идеально проводящих цилиндров конечной длины, являющихся базовыми элементами для построения вибраторных АР, при возбуждении непрерывным и импульсным излучением сторонних источников;

- электродинамические модели и методы анализа решеток резонансных и диапазонных вибраторов;

- электродинамические модели вибраторных и щелевых АР, расположенных на ограниченных идеально проводящих и металлодиэлектрических поверхностях плоской и цилиндрической формы, соответствующих участкам несущих поверхностей БЛА мониторинга;

- методы синтеза АР с максимально достижимыми коэффициентами усиления и заданными формами ДН;

- электродинамические модели зеркально-асимметричных идеально проводящих элементов для оценки отражательных свойств искусственных киральных покрытий, применяемых в интересах улучшения диапазонных и направленных свойств АР и снижения радиолокационной заметности БЛА;

- методики обоснования тактико-технических требований к антенным системам радиотехнических комплексов по результатам оценки эффективности мониторинга радиоэлектронной обстановки.

В трудах д.т.н. Васильева Е.Н. [11–14], д.т.н. Маркова Г.Т. [14, 15] разработаны основы электродинамического анализа идеально проводящих круглых цилиндров резонансных размеров и методы численного решения краевых задач при разложении поверхностных токов в ряды пространственных гармоник. Плотности поверхностных токов представляются в виде векторов продольных и азимутальных компонентов, распределение каждого из которых является функцией продольной и азимутальной координат цилиндрической системы. Распределение токов находится путем суммирования бесконечных рядов Фурье с весовыми коэффициентами в виде азимутальных гармоник, численные значения которых определяются как суммы последовательностей базисных функций краевой задачи [11, 14].

В работах д.ф.-м.н. Звездиной М.Ю. [16–19], д.ф.-м.н. Шороховой Е.А. [20–23] представлены модели рассеяния электромагнитных волн, возбуждаемых элементарными электрическими и магнитными вибраторами, на цилиндрах конечной длины, построенные на основе метода наведенных токов [24]. Исследованы направленные свойства элементарных излучателей, расположенных вблизи боковых и торцевых поверхностей цилиндров.

Однако метод наведенных токов основан на допущении, что поверхностные токи объектов конечных размеров остаются неизменными по сравнению с распределением на соответствующем фрагменте тела бесконечных размеров. Плотность поверхностных токов немонотонно убывает по мере удаления от возбуждающего источника; при достаточно больших размерах объекта, удовлетворяющих приближению физической оптики, токи, наведенные на его краях, достаточно малы, что позволяет пренебречь как волной поверхностного тока,



отраженного от границы, так и током, затекающим через край [23]. Для объектов, электрические размеры которых принадлежат резонансной области, указанные приближения не выполняются; поэтому применение метода наведенных токов для анализа АР, монтируемых на корпусах легких и средних БЛА, в общем случае затруднено.

Кроме того, область применения результатов, полученных с использованием данного метода, ограничена условием монохроматического приближения возбуждающего воздействия, при котором токи (поля) объектов представляются гармоническими колебаниями (волнами) с циклическими частотами несущих. Данное ограничение не позволяет исследовать переходные процессы возбуждения цилиндров импульсными излучениями; распределения поверхностных токов (полей) объектов являются нестационарными, что определяет необходимость выявления закономерностей его изменения не только в различных точках пространства, но и в различные моменты времени с учетом длительности возбуждающих воздействий.

В работах д.ф.-м.н. Потапова А.А. [25–27], д.т.н. Соколова А.А. [25, 28–30] с использованием аппарата интегральных уравнений относительно пространственно-временных распределений эквивалентных токов и зарядов [31] в приближении проволочной конструкции [32] построены модели идеальных проводников во внешнем неоднородном нестационарном электромагнитном поле. Разработаны аналитические методы расчета комплексных амплитуд импульсных излучений во временной области, основанные непосредственно на нахождении поля бегущей волны тока произвольной формы без предварительного вычисления запаздывающих потенциалов. Получены корреляционные функции поляризации составляющих тензора поля обратного рассеяния, позволяющие оценивать их пространственные коэффициенты корреляции и спектральные функции когерентности с учетом формы ДН возбуждающего излучателя.

Вместе с тем, разработанные методы применимы для анализа токов объектов больших электрических размеров, для токов которых время установления стационарного режима существенно меньше времени распространения возбуждающего сигнала в пределах объекта. Их применение для анализа решеток резонансных и диапазонных вибраторов, возбуждаемых импульсными сигналами, затруднено по следующим причинам:

– при значительной эквивалентной (эффективной) ширине спектра возбуждающего воздействия электрические размеры антенных элементов принадлежат квазиоптической и резонансной области, где исключается их представление как объектов значительной протяженности;

– постановка задач нестационарного возбуждения объектов выполнена при контроле условия Зоммерфельда для излучения на бесконечности [4] и условия обращения в нуль поля на нулевой частоте спектра [33]; для исследования АР требуется применять граничные условия на поверхностях элементов для суперпозиции их полей в целях учета электромагнитных связей через вторичное излучение.

Корпус БЛА выполняется в виде совокупности криволинейных поверхностей, не совпадающих по форме с координатными поверхностями ни одной из систем координат, в которых известны решения электродинамических задач. Однако, согласно выводам аналитических обзоров результатов многочисленных исследований в [23, 34], при оценке электромагнитного поля в дальней зоне [4] фюзеляж воздушного объекта самолетного типа может быть представлен круглым цилиндром конечной длины, а крыло – плоской поверхностью с прямолинейными границами. Поэтому при моделировании АР радиотехнических комплексов возможно использование методических приемов, разработанных для анализа закономерностей возбуждения несущих поверхностей правильной геометрической формы.

В публикациях д.т.н. Габриэльяна Д.Д. [35–37], д.т.н. Радцига Ю.Ю. [38, 39], кандидатских диссертациях Герасимова И.А. [40], Сурикова В.В. [41], Хавановой М.А. [42] представлены модели и результаты исследования характеристик АР, расположенных на



идеально проводящих и диэлектрических поверхностях. В работах д.т.н. Останкова А.В. [43], д.т.н. Пастернака Ю.Г. [44, 45] решены задачи согласования антенных систем с фидерным трактом при ограничениях на электрические габариты приемоизлучающих структур.

Методической основой для построения моделей является дифракционный метод. В отличие от метода наведенных токов, он базируется на вычислении не только первичных поверхностных токов, наводимых падающей волной, но и токов, обтекающих облучаемую поверхность. Метод применяется для расчета полей объектов с электрическими размерами, принадлежащими резонансной, квазиоптической и оптической областям рассеяния. Напряженность поля объекта находится путем суммирования бесконечного ряда собственных функций задачи дифракции; вид функций определяется формой объекта, а их аргументы, как правило, пропорциональны отношению его характерных размеров к длине волны [4, 23].

Анализ антенных систем, размещаемых вблизи экранирующих конструкций, может выполняться только в тех случаях, когда известны решения задач дифракции плоской волны на таких конструкциях или их фрагментах в виде тел правильной геометрической формы, вторичное излучение которых вносит доминирующий вклад в дифракционное поле [23].

Таким образом, область применения моделей лежит в границах методов физической оптики, поэтому они не могут использоваться для анализа АР легких БЛА самолетного типа с резонансными электрическими размерами в диапазонах рабочих частот целевых нагрузок мониторинга.

В трудах д.ф.-м.н. Неганова В.А. [6–8, 46–49], д.т.н. Панченко Б.А. [50, 51], кандидатских диссертациях Аронова С.Ю. [52], Соколовой Ю.В. [53] с использованием метода интегральных уравнений построены модели вибраторных и щелевых антенн на экранах конечных размеров. В кандидатских диссертациях Авдюшина А.С. [54], Виленского А.Р. [55], Копылова Д.А. [56], Латыповой А.Ф. [57], Мещерякова И.И. [58] обоснованы способы улучшения направленных свойств щелевых антенн за счет выбора профиля и комплексной диэлектрической проницаемости несущей поверхности.

Метод интегральных уравнений применяется для электродинамического анализа поверхностных токов по заданному распределению возбуждающего поля при граничных условиях на поверхности объекта, базирующийся на частичном обращении оператора краевой задачи. Поле определяется путем задания в аналитическом виде его компонентов, создаваемых токами на элементарном участке, и интегрирования по всей поверхности объекта. Частичное обращение оператора краевой задачи осуществляется на основе аппроксимации поверхностных токов последовательностями линейно независимых базисных функций (собственных функций краевой задачи для объекта). Полученные интегральные уравнения преобразуются в систему линейных алгебраических уравнений относительно весовых коэффициентов аппроксимирующих последовательностей; корни уравнений находятся путем решения сформированной системы численными методами (например, методом Гаусса с выбором главного элемента по столбцу).

Метод интегральных уравнений разработан д.т.н. Васильевым Е.Н. [11, 14]. Существенное развитие получил в работах д.ф.-м.н. Неганова В.А. [6–8, 32, 46–49], где были обоснованы правила физической регуляризации краевых задач, обеспечивающие устранение несамосогласованного приближения Кирхгофа для поля в ближней зоне [6] за счет его сингулярного интегрального представления. При использовании сингулярных интегральных уравнений устанавливаются взаимосвязи плотностей поверхностных токов с напряженностями электрического и магнитного полей в каждой точке пространства, выполняется предельный переход в распределении полей на поверхностях объектов и вблизи них [6, 32].

При этом приведенные результаты в полной мере не могут быть использованы для исследования АР ввиду отсутствия электромагнитного взаимодействия между элементами через поля вторичного излучения [59].



Вопросы построения моделей и методик анализа вторичного излучения, а также разработки способов оценки и снижения радиолокационной заметности антенн и АР прорабатывались д.т.н. Михайловым Г.Д. В [60, 61] обоснованы направления исследований и предложения по созданию малоотражающих антенн воздушных объектов. Показано, что снижение радиолокационной заметности антенн достигается за счет включения сосредоточенных реактивных нагрузок в разрывы приемоизлучающих структур вследствие уменьшения их эффективных площадей [6, 32], применения фильтров, поглощающих сигналы, отраженные от антенных нагрузок, и частотно-поляризационных селективных экранов, уменьшающих плотность потока поля, рассеянного элементами конструкций антенн [61]. Кроме того, эффективные способы снижения вторичного излучения АР базируются на противофазном сложении облучающего поля и отраженных полей различных элементов с использованием управляющих устройств на базе р-і-п диодов и сегнетокерамических конденсаторов [60], включаемых в диаграммообразующие устройства (ДОУ).

Однако технические решения по снижению заметности антенных систем разработаны в виде требований к средствам уменьшения рассеяния приемоизлучающих структур при контроле допустимом снижении показателей эффективности передачи-приема сигналов. Реализация этих требований не предполагает изменение форм и параметров конструкций антенн в целях определения рациональных вариантов их построения для наиболее полного обеспечения необходимых эксплуатационных характеристик и радиолокационной заметности радиотехнических комплексов. В связи с этим разработанный подход к снижению радиолокационной заметности антенн на основе изменения отражательных свойств конструкций, обоснованных в соответствии с заданными показателями передачи-приема сигналов, не может быть использован для построения антенных систем малозаметных БЛА мониторинга.

В трудах д.т.н. Бахраха Л.Д. [62, 63], д.т.н. Воскресенского Д.И. [63–65], д.т.н. Кашина В.А. [66] представлены методы синтеза АР при минимизации среднего уровня боковых лепестков и среднеквадратического отклонения ДН от требуемой формы. Методы синтеза ДН решеток при сохранении равносигнальных направлений приема сигналов разработаны д.т.н. Башлы П.Н., д.т.н. Мануиловым Б.Д. [67–69]. В работах д.т.н. Обуховца В.А. [70, 71], д.т.н. Пономарева Л.И. [72, 73], кандидатской диссертации Цупикова А.Е. [74] с использованием аппарата неопределенных множителей Лагранжа [75] выполнен синтез резонансных и диапазонных решеток с нулями ДН в фиксированных направлениях и максимально достижимыми коэффициентами усиления.

Для синтеза АР использованы два базовых критерия [66]:

- минимизация среднеквадратического отклонения (СКО) ДН решетки от требуемой формы;
- минимизация СКО квадрата ДН решетки от требуемой формы.

При применении первого критерия достигается достаточно точное восстановление искомой ДН антенной системы; и ввиду того, что главный луч приобретает точно заданную форму, минимизируются потери коэффициента усиления. Однако его величина убывает пропорционально ширине ДН решетки во второй степени. При синтезе АР в соответствии со вторым критерием имеет место линейная зависимость снижения коэффициента усиления по мере расширения ДН [6, 66].

Различие закономерностей изменения направленных свойств при использовании различных критериев синтеза объясняется тем, что в рамках первого критерия фигурирует требование приближения ДН к заданной форме по амплитудно-фазовому распределению токов элементов, а применение второго критерия накладывает ограничения только на абсолютные значения токов АР [6].

Общий недостаток указанных подходов заключается в том, что нахождение вектора токов решетки сводится к решению математически некорректных задач [76] методами нелинейного программирования с применением неформализованных процедур регуляризации [66, 71].



Кроме того, при электрических размерах, характерных для АР легких, средних БЛА, формирование нулей в направлениях локальных экстремумов ДН в секторах ближних боковых лепестков сопровождается повышением уровня дальних боковых лепестков, что приводит к снижению показателей пространственной избирательности и помехозащищенности приемника. Подавление среднего уровня боковых лепестков ДН путем увеличения числа формируемых нулей сопровождается потерями коэффициентов усиления, приводящими к уменьшению эквивалентной чувствительности разведывательной аппаратуры.

В работах д.ф.-м.н. Осипова О.В. [77] с использованием сингулярного интегрального представления электромагнитного поля [76, 78, 79] выполнены постановки краевых задач для идеально проводящих тонкопроволочных элементов с симметричными и зеркально-асимметричными конструкциями; разработаны методы анализа отражательных свойств искусственных метаматериалов, реализованных в виде упорядоченных структур этих элементов. В кандидатских диссертациях Градинаря И.М. [80], Морозова С.В. [81], Нещерета А.М. [82] на основе аппарата сингулярных интегральных уравнений [32, 83, 84] построены модели и исследованы характеристики вторичного излучения киральных элементов с различными типами симметрии. В трудах д.ф.-м.н. Клюева Д.С., д.ф.-м.н. Табакова Д.П. [7, 8], кандидатских диссертациях Бирюковой Н.Р. [85], Вороного А.А. [86], Панферовой Т.И. [87], Почепцова А.О. [88] получены оценки предельно достижимых уровней поля, рассеиваемого плоскими поверхностями с киральными покрытиями.

Однако методические основы выполненных исследований разработаны для условий возбуждения метаструктур и их компонентов монохроматическими волнами и не могут применяться для анализа вторичного излучения нестационарных негармонических процессов, к классу которых принадлежат сигналы радиолокационных систем, применяемых для обнаружения БЛА [1, 2, 89].

В трудах д.т.н. Мельникова Ю.П. [90, 91], д.т.н. Радзиевского В.Г., д.т.н. Сироты А.А. [3, 92] представлены методики оценки эффективности и обоснования тактико-технических требований к характеристикам средств мониторинга. Вероятностные показатели обнаружения, распознавания (классификации) и дисперсии оценок пространственно-временных параметров сигналов определяются методами статистической проверки гипотез. В интересах обеспечения реализуемости процедур добывания и обработки данных с использованием отечественных радиоэлектронных и информационных технологий выполняются ключевые переходы от оптимальных алгоритмов приема и технического анализа потоков радиоизлучений к их квазиоптимальным модификациям.

Вместе с тем, в указанных методиках обоснование требований к средствам мониторинга заключается в определении рациональных способов формирования достаточной статистики и решающих правил для обработки сигналов и проводится без установления характеристик отдельных функциональных блоков. Антенны системы представляются оптимальными фильтрами радиоизлучений в секторах рабочих углов и диапазонах частот без исследования закономерностей преобразования потока облучающего поля в электродвижущие силы, развиваемые на входных сопротивлениях антенных нагрузок. Антенна характеризуется только коэффициентом усиления; эквивалентная чувствительность аппаратуры мониторинга, определяемая разностью (в дБ) между чувствительностью входного каскада приемника и коэффициентом усиления антенны [3], позволяет оценивать отношение сигнал-шум. Синтез алгоритмов и анализ эффективности обработки сигналов выполняется при формализованном задании их комплексных амплитуд на входах приемников, что не отражает частотно-временные преобразования сигналов в антенно-фидерных трактах.

Следует отметить, что в настоящее время для анализа антенн и АР на носителях применяются программы (пакеты) электродинамического моделирования типа CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio. В них реализованы процедуры численного решения краевых задач методами конечных элементов FEM – Finite Element Method и конечных



интегралов FITF(T)D – Finite Integration Technique in Frequency (Time) Domain. Несущие поверхности, содержащие замкнутые и разомкнутые идеально проводящие, импедансные и металлодиэлектрические оболочки, представляются набором плоских многоугольников, дисков, колец, их секторов, тел вращения, образованных кривыми второго порядка, а также фигур, развернутых на трехмерных сплайн-линиях. Аппроксимация токов при решении задач возбуждения антенн осуществляется с применением кусочно-постоянных функций или функций более высоких порядков (например, RWG-функций). Коэффициенты аппроксимирующих функций находятся из условия равенства комплексных амплитуд токов на границах между элементами и выражаются через значения распределения токов в узлах элементов; их численные значения находятся с применением прямых и итерационных методов (в частности, обобщенного метода минимальных невязок GMREZ) [93]. По найденному распределению токов вычисляются компоненты электрического и магнитного поля в окрестности анализируемых структур и на произвольном удалении от них.

Однако вследствие использования в программах общих вычислительных алгоритмов, не оптимизированных для топологии конкретной антенной системы, проведение расчетов требует значительных вычислительно-временных ресурсов. Время расчета ДН линейной решетки из 3...5 элементарных электрических вибраторов с применением персонального компьютера на базе процессора Intel Core i7-8700 с объемом оперативной памяти 16 Гб составляет порядка 5...6 часов [94]. Данное обстоятельство затрудняет выбор рациональных вариантов построения антенных систем по результатам многократных расчетов их характеристик для различных параметров конструкций. Закрытое внутреннее содержание программ не позволяет адекватно контролировать расчетные погрешности и выявлять причины их появления.

Таким образом, ввиду неполного соответствия методических основ построения АР требованиям к целевым нагрузкам БЛА мониторинга имеются потребности совершенствования моделей и методов их анализа и синтеза для обеспечения заданных показателей эффективности применения и радиолокационной заметности беспилотных радиотехнических комплексов.

Задачи совершенствования методических основ построения антенных решеток для беспилотных радиотехнических комплексов. Задачи совершенствования методических основ анализа и синтеза АР БЛА мониторинга радиоэлектронной обстановки определим в соответствии с перечнем моделей и методов исследования и обоснования характеристик аппаратуры беспилотных радиотехнических комплексов.

1. Разработка электродинамических моделей и методов анализа базовых элементов вибраторных АР при приеме импульсных излучений на основе решения нестационарных задач возбуждения при граничных и начальных условиях для электрических полей с нахождением пространственно-временного распределения гармоник поверхностных токов.

В отличие от известных моделей и методов, предназначенных для исследования поверхностных токов, наводимых монохроматической волной, при нахождении решения векторных краевых задач в виде рядов их пространственных гармоник, они открывают возможности исследования показателей пространственно-частотной избирательности приема широкополосных сигналов малой длительности, используемых при работе объектов мониторинга в режиме повышенной скрытности [1–3].

2. Разработка электродинамических моделей и методов анализа решеток резонансных и диапазонных вибраторов, устанавливающих зависимости пространственно-временного распределения токов от угло-временного распределения облучающего поля через операторы нестационарных задач возбуждения антенных элементов. Распределения токов антенных элементов находятся в виде пространственно-временных функций, удовлетворяющих операторным уравнениям задач возбуждения нестационарных волновых процессов, полученным при совместном применении условий излучения Зоммерфельда [4] и обращения в нуль спектров полей на нулевой частоте [33].



В отличие от известных моделей и методов, разработанных для исследования антенных систем, возбуждаемых монохроматическими процессами, через взаимосвязи комплексных амплитуд токов и амплитудно-фазового распределения полей, они позволяют оценивать направленные свойства решеток при приеме широкополосных сигналов с учетом дисперсии фазо- и амплитудно-частотных характеристик согласующих устройств и распределительных линий в диапазонах рабочих частот аппаратуры мониторинга.

3. Разработка электродинамических моделей вибраторных и щелевых АР, расположенных на ограниченных идеально проводящих и металлодиэлектрических экранах плоской и цилиндрической формы, соответствующих участкам поверхностей БЛА мониторинга, базирующихся на расчете токов антенных элементов с дифракционными коэффициентами токов несущих конструкций.

В отличие от известных моделей и методов, разработанных для исследования АР в однородном изотропном пространстве, дифракционные коэффициенты токов позволяет учитывать эффекты экранирования решеток несущими поверхностями. В отличие от антенных систем на экранах больших электрических размеров, анализ которых в приближении физической оптики заключается в расчете токов приемоизлучающих конструкций антенн и поверхностных токов, наводимых возбуждающим полем, дополнительно вычисляются токи, отраженные от краев и затекающие за кромки носителей. В отличие от моделей одиночных антенн на экранах токи элементов АР определяются при граничных условиях для суперпозиции принимаемых и рассеиваемых полей, что позволяет учесть электромагнитные связи в решетках через поля вторичного излучения.

4. Разработка методов синтеза АР с максимально достижимыми коэффициентами усиления и заданными формами ДН при контроле их уровней на множестве направлений.

В отличие от ранее известных методов, основанных на минимизации СКО ДН в первой или второй степени от заданной формы, при фиксации значений ДН для определенных угловых положений при отсутствии требований к форме боковых лепестков снижаются потери коэффициентов усиления решеток. Как показано в [95], при выполнении указанного критерия обеспечивает минимум СКО ДН решетки от заданной формы в области главного луча. В результате последовательной коррекции распределения токов путем итерационного задания уровней ДН в направлениях нежелательных локальных экстремумов формируются ее секторные провалы и достигается снижение среднего уровня боковых лепестков, как и при использовании подхода, основанных на минимизации СКО ДН или ее квадрата от требуемой формы.

Методы синтеза ДН АР с применением совместных и отдельных ДОУ, в отличие от известных методов, где выполнялся контроль смещения равносигнальных направлений, построены на сохранении положений главного луча ДН и диаграмм моноимпульсных групп. Инвариантность положения максимума ДН при формировании нулей позволяет достичь высоких значений КНД в широком диапазоне частот [67, 68].

5. Разработка электродинамических моделей зеркально-асимметричных идеально проводящих элементов для оценки отражательных свойств искусственных киральных покрытий, применяемых в интересах улучшения диапазонных и направленных свойств АР и снижения радиолокационной заметности БЛА, на основе нестационарных уравнений взаимных функциональных преобразований пространственно-временных распределений токов и полей.

В отличие от известных моделей, устанавливающих взаимосвязи эквивалентных токов с облучающим монохроматическим полем через операторы краевых задач при стационарных граничных условиях, по результатам решения нестационарных уравнений при последовательном продвижении по времени обеспечивается анализ переходных процессов возбуждения и динамических изменений диаграмм рассеяния элементов. Таким образом, становится возможной оценка радиолокационной заметности БЛА с киральными покрытиями корпусов при контроле воздушного пространства радиолокационными системами с негармоническими (в том числе широкополосными) сигналами.



6. Разработка методик обоснования тактико-технических требований к АР радиотехнических комплексов по результатам оценки эффективности мониторинга радиоэлектронной обстановки.

Предложения по построению АР беспилотных радиотехнических комплексов, в отличие от ранее известных технических решений, обеспечивающих требуемые показатели пространственно-частотной избирательности приема сигналов за счет рационального выбора параметров конструкции, разработаны в виде требований к структуре, электрическим размерам решеток и их размещению на БЛА. Место расположения решетки на носителе выбирается из условия минимизации уровня боковых лепестков и сохранения симметрии ДН в плоскости угла места, а число антенных элементов и расстояние между ними – из условий достижения наибольшего коэффициента усиления при формировании ДН.

Выводы. На основе материалов, представленных в работах ведущих специалистов в области теории и техники антенн, выполнен обзор современного состояния и обоснованы задачи совершенствования методических основ исследования и разработки АР для нагрузок БЛА, применяемых для мониторинга радиоэлектронной обстановки. Показано, что для обеспечения энергетической доступности и пространственной селекции сигналов объектов мониторинга при низком уровне радиолокационной заметности БЛА в бортовой аппаратуре диапазона частот L эффективно используются низкопрофильные решетки вибраторного типа, размещаемые в верхней полусфере; в диапазонах частот S, C, X и Ku целесообразно применять щелевые АР, встраиваемые в корпус носителя.

Оценены возможности и перспективы развития моделей и методов анализа и синтеза решеток в соответствии с требованиями к эффективности выполнения целевых функций беспилотных радиотехнических комплексов и их защиты от радиолокационного обнаружения системами контроля воздушного пространства. Изложены принципы исследования характеристик АР в режиме возбуждения импульсами малой длительности и закономерностей нестационарного вторичного излучения компонентами искусственных покрытий с зеркально-асимметричными отражательными свойствами, применяемых для снижения радиолокационной заметности БЛА.

Представлены положения методик обоснования тактико-технических требований к антенным системам средств мониторинга радиоэлектронной обстановки по конструктивному исполнению и размещению на носителях. Установлено, что топология и параметры АР должны определяться из условий достижения наибольшего коэффициента усиления при форме ДН, задаваемой исходя из условий пространственно-частотной избирательности средств мониторинга с учетом экранирования секторов обзора несущими конструкциями БЛА. Место расположения решетки на носителе выбирается из условия минимизации уровня боковых лепестков и сохранения симметрии ДН в плоскости угла места.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаренко С.И., Тимошенко А.В., Васильченко А.С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности, 2020. № 1. С. 109–146.

2. Макаренко С.И., Тимошенко А.В. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 2. Огневое поражение и физический перехват // Системы управления, связи и безопасности, 2020. № 1. С. 147–197.

3. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: Радиотехника, 2004. 432 с.

4. Электродинамика и распространение радиоволн / В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский и др. // Под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. М.: Радио и связь, 2005. 648 с.



5. Львова Л.А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов. Снежинск: РФЯЦ ВНИИТФ, 2003. 232 с.
6. Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практические применения антенн. М.: Радиотехника, 2009. 720 с.
7. Неганов В.А., Ключев Д.С., Табаков Д.П. Устройства СВЧ и антенны. Часть I. Проектирование, конструктивная реализация, примеры применения устройств СВЧ / Под ред. В.А. Неганова. М.: Книжный дом «Либроком», 2013. 608 с.
8. Неганов В.А., Ключев Д.С., Табаков Д.П. Устройства СВЧ и антенны. Часть II. Теория и техника антенн / Под ред. В.А. Неганова. М.: Ленард, 2014. 728 с.
9. Марков Г.Т., Васильев Е.Н. Математические методы прикладной электродинамики. М.: Советское радио, 1970. 120 с.
10. Маторин А. В., Смирнов А.А. Двухэтапный численный метод решения задач синтеза многоэлементных тонкопроволочных антенн и устройств сверхвысоких частот // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 10. С. 652–658.
11. Васильев Е.Н. Возбуждение тел вращения. М.: Радио и связь, 1987. 271 с.
12. Васильев Е.Н. Алгоритмизация задач дифракции на основе интегральных уравнений // Сборник научно-методических статей по электродинамике. М.: Высшая школа, 1983. С. 111–162.
13. Васильев Е.Н., Малушков Г.Д., Фалунин А.Н. Интегральные уравнения первого рода в некоторых задачах электродинамики // Журнал технической физики. 1967. Т. 37. № 3. С. 421–432.
14. Марков Г.Т., Васильев Е.Н. Математические методы прикладной электродинамики. М.: Советское радио, 1970. 120 с.
15. Марков Г.Т., Бодров В.В., Сурков В.И. Модификация метода расчета вибраторной сканирующей антенны с минимизацией необходимого машинного времени // Труды МЭИ. 1980. Вып. 494. С. 104–108.
16. Звездина М.Ю. Влияние импедансной поверхности кругового цилиндра на поле поперечного электрического диполя // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 10. С. 1126–1131.
17. Звездина М.Ю. Поле радиального диполя в присутствии импедансного кругового цилиндра // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 4. С. 381–385.
18. Звездина М.Ю. Взаимная связь продольных электрических вибраторов вблизи импедансного кругового цилиндра // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 11. С. 1175–1180.
19. Звездина М.Ю. Поле диполя, расположенного вблизи импедансного кругового цилиндра // Электромагнитные волны и электронные системы. 2002. Т. 7. № 9. С. 49–54.
20. Шорохова Е.А. Рассеяние электромагнитных волн, возбуждаемых элементарными источниками, на круглом проводящем цилиндре конечных размеров // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 52. № 5. С. 528–537.
21. Шорохова Е.А., Илларионов И.А., Сергеева Н.Н. Исследование направленных свойств радиального вибратора вблизи корпуса летательного аппарата в виде конечного цилиндра // Антенны. 2006. № 8 (111). С. 31–38.
22. Шорохова Е.А. Излучение элементарных источников вблизи идеально проводящего цилиндра в киральной оболочке // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14. № 2. С. 27–34.
23. Шорохова, Е. А. Излучение и дифракция электромагнитных волн в естественных и искусственных неоднородных материальных средах: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.03. Н.-Новгород: НИИИС им. Ю.Е. Седатова, 2010. 342 с.
24. Справочник по антенной технике / Под ред. Л.Д. Бахраха и Е.Г. Зелкина. М.: ИПРЖР, 1997. 248 с.



25. Подосенов С.А., Потапов А.А., Соколов А.А. Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур / Под ред. А.А. Потапова. М.: Радиотехника, 2003. 720 с.
26. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Логос, 2002. 664 с.
27. Потапов А.А. Фрактальный метод и фрактальная парадигма в современном естествознании. М.: Научная книга, 2012. 108 с.
28. Подосенов С.А., Соколов А.А. О нестационарном излучении проволочной антенны бегущей волны // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 4. С. 12–18.
29. Podosenov S.A., Svekis Y.G., Sokolov A.A. Transient Radiation of Traveling Waves by Wire Antennas // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 1995. Vol. 37. № 3. Pp. 367–383.
30. Подосенов С.А., Соколов А.А. Нестационарное излучение V-образной и линейной антенн // Метрология. 1994. № 1. С. 26–35.
31. Schuman H. Time-Domain Scattering from a Nonlinearly Loaded Wire // IEEE Trans. Antennas and Propagat. 1974. Vol. 22. No 5. P. 611–613.
32. Неганов В.А., Павловская Э.А., Яровой Г.П. Излучение и дифракция электромагнитных волн / Под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2004. 264 с.
33. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. Новосибирск: Наука, 2015. 481 с.
34. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / Под ред. Л.Т. Тучкова. М.: Радио и связь, 1985. 236 с.
35. Габриэльян Д.Д., Звезда М.Ю. Представление плотности поверхностного тока при решении задач дифракции на двухмерном теле произвольной формы // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 3. С. 394–396.
36. Габриэльян Д.Д., Звезда М.Ю. Решение задачи дифракции на телах сложной формы больших электрических размеров методом интегральных уравнений // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 4. С. 636–642.
37. Габриэльян Д.Д., Звезда М.Ю. Излучение поверхностных антенн на теле сложной формы больших волновых размеров // Акустический журнал. 1993. Вып. 6. С. 1030–1036.
38. Радциг Ю.Ю., Хаванова М.А. О решении внутренней граничной задачи электродинамики для щелевых антенн излучателей методами нелинейного программирования // Вестник Новгородского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. 1998. № 10. С. 58–59.
39. Радциг Ю.Ю., Хаванова М.А. Решение внутренней задачи синтеза полосковых щелевых антенн с реальными распределениями токов в полосковых линиях // Вестник Новгородского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. 1999. № 13. С. 123–124.
40. Герасимов И.А. Исследование и разработка полосковых и планарных антенн абонентских станций на основе базовых излучающих структур с учетом особенностей размещения: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. Самара: ПГУТИ, 2019. 189 с.
41. Суриков В.В. Электромагнитная совместимость приемо-передающих устройств, расположенных на элементах конструкций сложной формы: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. С.-Петербург: СПбГПУ, 2009. 121 с.
42. Хаванова М.А. Синтез криволинейных щелевых антенн с оптимальными диаграммами направленности для радиотехнических систем летательных аппаратов и других подвижных объектов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04, 05.12.07. Великий Новгород: НГУ им. Ярослава Мудрого, 2002. 114 с.
43. Останков А.В. Электродинамические модели резонансных гребенчатых структур для анализа и синтеза высокоэффективных дифракционных антенн: дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.07. Воронеж: ВГТУ, 2011. 397 с.



44. Моделирование малогабаритных сверхширокополосных антенн / А.Б. Авдеев, А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак и др. // Под ред. А.Б. Авдеева и А.В. Ашихмина. Воронеж: ВГУ, 2005. 223 с.
45. Моделирование малогабаритных сверхширокополосных антенн / А.И. Климов, Ю.Г. Пастернак, В.И. Юдин и др. // Под ред. В.И. Юдина. Воронеж: ВГТУ, 1999. 257 с.
46. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайневых частот. М.: Наука. Физматлит, 1996. 304 с.
47. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн / Под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2002. 416 с.
48. Арефьев А.С., Неганов В.А. Метод частичного обращения оператора в задачах о собственных волнах полосковых и щелевых линий передачи. М.: Радио и связь, 2002. 280 с.
49. Неганов В.А., Яровой Г.П. Теория и применение антенн / Под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2006. 720 с.
50. Электродинамический расчет полосковых антенн / Б.А. Панченко, С.Т. Князев, Ю.Б. Нечаев и др. М.: Радио и связь, 2002. 136 с.
51. Панченко Б.А., Гизатуллин М.Г. Нано-антенны. М.: Радиотехника, 2010. 96 с.
52. Аронов С.Ю. Разработка и практическая реализация методики проектирования антенн городских и линейных радиоцентров на основе комплексного учета назначения и стойкости: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. Самара: ПГУТИ, 2018. 172 с.
53. Соколова Ю.В. Самосогласованный метод анализа микрополосковых вибраторных антенн: дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.03. Самара: ПГУТИ, 2012. 113 с.
54. Авдюшин А.С. Использование искусственных диэлектриков для улучшения характеристик сверхширокополосных антенн УВЧ и СВЧ диапазонов волн: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. Воронеж: ВГТУ, 2015. 226 с.
55. Виленский А.Р. Исследование и разработка сверхширокополосных печатных щелевых антенн бегущей волны: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014. 216 с.
56. Копылов Д.А. Обеспечение электромагнитной совместимости радиосредств подвижного объекта с использованием метаматериалов в составе антенной системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. Самара: ПГУТИ, 2018. 161 с.
57. Латыпова А.Ф. Сверхширокополосные радиопоглощающие структуры с сосредоточенными и распределенными диссипативными элементами: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. Воронеж: ВГТУ, 2015. 167 с.
58. Мещеряков И.И. Оптимизация параметров излучателей сверхкоротких импульсов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. Воронеж: ВГУ, 2012. 150 с.
59. Лавров Г.А. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. М.: Советское радио, 1975. 128 с.
60. Методы и средства уменьшения радиолокационной заметности антенных систем / Г.Д. Михайлов, В.И. Сергеев, Э.А. Соломин и др. // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. № 4/5. С. 36–42.
61. Михайлов Г.Д., Воронов В.А. Перспективы и направления работ по созданию малозаметных антенн бортовых радиоэлектронных комплексов // Оборонная техника. 1995. № 12. С. 35–37.
62. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. Синтез излучающих систем (теория и методы расчета). М.: Радио и связь, 1974. 232 с.
63. Антенны. Современное состояние и проблемы / Под ред. Л.Д. Бахраха и Д.И. Воскресенского. М.: Советское радио, 1979. 124 с.
64. Воскресенский Д.И., Максимов В.М. Развитие антенных систем (обзор) // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1987. Т. 30. № 2. С. 4–15.



65. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004. 488 с.
66. Кашин В.А. Методы фазового синтеза антенных решеток // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 1. С. 47–60.
67. Мануилов Б.Д., Башлы П.Н., Пугачев В.В. Алгоритмы формирования нулей в диаграммах направленности моноимпульсных антенных решеток // Радиолокация, навигация, связь: сб. трудов V Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: ВНИИС, 1999. Т. 2. С. 1588–1594.
68. Мануилов Б.Д., Башлы П.Н. Фазовый синтез нулей в суммарной и разностной диаграммах направленности моноимпульсных антенных решеток // Проблемы теории и практики построения радиотехнических систем и перспективные методы приема и обработки измерительной информации: сб. трудов Всерос. науч.-техн. конф. Ростов-на-Дону: РВИРВ, 1998. С. 56.
69. Мануилов Б.Д., Башлы П.Н. Оптимизация векторных диаграмм направленности моноимпульсных антенных решеток с совместным формированием лучей // Антенны. 2004. № 2 (81). С. 51–58.
70. Обуховец В.А., Касьянов А.О. Микрополосковые отражательные антенные решетки. Методы проектирования и численное моделирование / Под ред. В.А. Обуховца. М.: Радиотехника, 2004. 240 с.
71. Обуховец В.А., Мельников С.Ю. Оптимизация диаграмм направленности антенных решеток // Излучение и рассеяние электромагнитных волн. Таганрог: ТРТУ, 1999. С. 93–101.
72. Пономарев Л.И., Попов В.В. Рассеивающие свойства антенн и фазированных решеток. М.: Российский университет дружбы народов, 2003. 144 с.
73. Пономарев Л.И., Степаненко В.И. Сканирующие многочастотные совмещенные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2009. 328 с.
74. Цупиков А.Е. Оптимизация продольно излучающих антенн с учетом ограничений на структуру ближнего поля: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. Казань: КГТУ им. А.Н.Туполева, 2010. 129 с.
75. Метод неопределенных множителей Лагранжа / В.И. Бахтин, И.А. Иванишко, А.В. Лебедев и др. Минск: БГУ, 2012. 40 с.
76. Неганов В.А. Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. 432 с.
77. Неганов В.А., Осипов О.В. Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами. М.: Радио и связь, 2006. 280 с.
78. Сарычев А.А. Дифракция плоских электромагнитных волн на телах с частичной металлизацией поверхности: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара: ПГАТИ, 2008. 159 с.
79. Устинова Е.С. Особенности волновых процессов в невзаимных волноводных и резонансных структурах: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара: ПГУС, 2017. 155 с.
80. Градинарь И.М. Электродинамические свойства метаматериалов, созданных упорядоченными тонкопроволочными токопроводящими частицами: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара: ПГУТИ, СамГУ, 2012. 119 с.
81. Морозов С.В. Интегральное представление электромагнитного поля тонкопроволочных излучающих структур с различными типами симметрии: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара: ПГУТИ, 2018. 115 с.
82. Нещерет А.М. Исследование микрополосковых излучающих структур на основе киральных метаматериалов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара: ПГУТИ, 2017. 108 с.
83. Алашеева Е.А. Анализ двумерных идеально проводящих структур методом интегральных уравнений: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара: ПГУТИ, 2009. 146 с.



84. Лемжин М.И. Применение сингулярных интегральных уравнений для анализа поля в ближней зоне электрических вибраторных антенн и решеток: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара: ПГУТИ, 2009. 118 с.
85. Бирюкова Н.Р. Исследование дифракции электромагнитных волн на тонкопроволочных спиральных элементах и структурах на их основе: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара: ПГУТИ, 2017. 171 с.
86. Вороной А.А. Применение сингулярных интегральных уравнений для анализа кольцевой рамочной антенны и малоотражающего конформного покрытия объектов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара: ПГУТИ, 2009. 108 с.
87. Панферова Г.И. Применение приближенных граничных условий импедансного типа для расчета дифракционных и волноведущих структур с тонкими киральными слоями: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара: ПГУТИ, 2008. 178 с.
88. Почепцов А.О. Исследование планарных многослойных метаматериалов на основе тонкопроволочных спиральных элементов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара: ПГУТИ, 2017. 155 с.
89. Васильченко О.В. Пространственно-временная обработка сверхширокополосных сигналов в радиолокационных станциях с электронным сканированием диаграмм направленности антенн. Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2011. 114 с.
90. Мельников Ю.П. Методы оценки эффективности воздушной радиотехнической разведки. М.: Изд-во МО РФ, 1996. 345 с.
91. Мельников Ю.П., Попов С.В. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников радиоизлучения. М.: Радиотехника, 2008. 432 с.
92. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Информационное обеспечение радиоэлектронных систем в условиях конфликта. М.: ИПРЖР, 2001. 456 с.
93. Давыдов А.Г., Пименов Ю.В. Возможности программы ЭДЭМ для разработки устройств антенной техники // Антенны, 2006. № 12 (115). С. 54–66.
94. Разиньков С.Н., Борисов Д.Н., Богословский А.В. Исследование направленных свойств решеток элементарных электрических вибраторов на круглых идеально проводящих цилиндрах конечной длины // Радиотехника, 2020. № 2(3). С. 46–54.
95. Калашников А.Н., Власенко В.А., Назаренко А.Ф. Оптимизация линейных аддитивных антенных решеток по энергетическим критериям в узкополосном, широкополосном и импульсном режимах // Антенно-фидерные устройства, системы и средства радиосвязи : сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГУ, 1997. Т. 38. С. 177–182.

REFERENCES

1. Makarenko S.I., Timoshenko A.V., Vasil'chenko A.S. Analiz sredstv i sposobov protivodejstviya bespilotnym letatel'nyh apparatam. Chast' 1. Bespilotnyj letatel'nyj apparat kak ob'ekt obnaruzheniya i porazheniya // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti, 2020. № 1. pp. 109–146.
2. Makarenko S.I., Timoshenko A.V. Analiz sredstv i sposobov protivodejstviya bespilotnym letatel'nyh apparatam. Chast' 2. Ognevoe porazhenie i fizicheskij perehvat // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti, 2020. № 1. pp. 147–197.
3. Radzievskij V.G., Sirota A.A. Teoreticheskie osnovy radio`elektronnoj razvedki. M.: Radiotekhnika, 2004. 432 p.
4. `Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln / V.A. Neganov, O.V. Osipov, S.B. Raevskij i dr. // Pod red. V.A. Neganova i S.B. Raevskogo. M.: Radio i svyaz', 2005. 648 p.
5. L'vova L.A. Radiolokacionnaya zametnost' letatel'nyh apparatov. Snezhinsk: RFYaC VNIITF, 2003. 232 p.



6. Neganov V.A., Tabakov D.P., Yarovoj G.P. *Sovremennaya teoriya i prakticheskie primeneniya antenn*. M.: Radiotekhnika, 2009. 720 p.
7. Neganov V.A., Klyuev D.S., Tabakov D.P. *Ustrojstva SVCh i anteny. Chast' I. Proektirovanie, konstruktivnaya realizaciya, primery primeneniya ustrojstv SVCh / Pod red. V.A. Neganova*. M.: Knizhnyj dom «Librokom», 2013. 608 p.
8. Neganov V.A., Klyuev D.S., Tabakov D.P. *Ustrojstva SVCh i anteny. Chast' II. Teoriya i tehnika antenn / Pod red. V.A. Neganova*. M.: Lenard, 2014. 728 p.
9. Markov G.T., Vasil'ev E.N. *Matematicheskie metody prikladnoj `elektrodinamiki*. M.: Sovetskoe radio, 1970. 120 p.
10. Matorin A. V., Smirnov A.A. *Dvuh`etapnyj chislennyj metod resheniya zadach sinteza mnogo`elementnyh tonkoprovolochnyh antenn i ustrojstv sverhвысокoй chastoty // Radiotekhnika i `elektronika*. 2001. T. 46. № 10. pp. 652–658.
11. Vasil'ev E.N. *Vozbuzhdenie tel vrascheniya*. M.: Radio i svyaz', 1987. 271 p.
12. Vasil'ev E.N. *Algoritmizaciya zadach difrakcii na osnove integral'nyh uravnenij // Sbornik nauchno-metodicheskikh statej po `elektrodinamike*. M.: Vysshaya shkola, 1983. pp. 111–162.
13. Vasil'ev E.N., Malushkov G.D., Falunin A.N. *Integral'nye uravneniya pervogo roda v nekotoryh zadachah `elektrodinamiki // Zhurnal tehnicheckoj fiziki*. 1967. T. 37. № 3. pp. 421–432.
14. Markov G.T., Vasil'ev E.N. *Matematicheskie metody prikladnoj `elektrodinamiki*. M.: Sovetskoe radio, 1970. 120 p.
15. Markov G.T., Bodrov V.V., Surkov V.I. *Modifikaciya metoda rascheta vibratornoj skaniruyushej anteny s minimizaciej neobhodimogo mashinnogo vremeni // Trudy M`EI*. 1980. Vyp. 494. pp. 104–108.
16. Zvezdina M.Yu. *Vliyanie impedansnoj poverhnosti krugovogo cilindra na pole poperechnogo `elektricheskogo dipolya // Radiotekhnika i `elektronika*. 2001. T. 46. № 10. pp. 1126–1131.
17. Zvezdina M.Yu. *Pole radial'nogo dipolya v prisutstvii impedansnogo krugovogo cilindra // Radiotekhnika i `elektronika*. 2002. T. 47. № 4. pp. 381–385.
18. Zvezdina M.Yu. *Vzaimnaya svyaz' prodol'nyh `elektricheskikh vibratorov vblizi impedansnogo krugovogo cilindra // Radiotekhnika i `elektronika*. 2002. T. 47. № 11. pp. 1175–1180.
19. Zvezdina M.Yu. *Pole dipolya, raspolozhennogo vblizi impedansnogo krugovogo cilindra // `Elektromagnitnye volny i `elektronnyye sistemy*. 2002. T. 7. № 9. pp. 49–54.
20. Shorohova E.A. *Rasseyanie `elektromagnitnyh voln, vozbuzhdaemyh `elementarnymi istochnikami, na kruglom provodyaschem cilindre konechnyh razmerov // Radiotekhnika i `elektronika*. 2002. T. 52. № 5. pp. 528–537.
21. Shorohova E.A., Illarionov I.A., Sergeeva N.N. *Issledovanie napravlennyh svojstv radial'nogo vibratora vblizi korpusa letatel'nogo apparata v vide konechnogo cilindra // Anteny*. 2006. № 8 (111). pp. 31–38.
22. Shorohova E.A. *Izluchenie `elementarnyh istochnikov vblizi ideal'no provodyaschego cilindra v kiral'noj obolochke // `Elektromagnitnye volny i `elektronnyye sistemy*. 2009. T. 14. № 2. pp. 27–34.
23. Shorohova, E. A. *Izluchenie i difrakciya `elektromagnitnyh voln v estestvennyh i iskusstvennyh neodnorodnyh material'nyh sredah: dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk: 01.04.03*. N.-Novgorod: NIIS im. Yu.E. Sedakova, 2010. 342 p.
24. *Spravochnik po antennoj tehnike / Pod red. L.D. Bahraha i E.G. Zelkina*. M.: IPRZhR, 1997. 248 p.
25. Podosenov S.A., Potapov A.A., Sokolov A.A. *Impul'snaya `elektrodinamika shirokopolosnyh radiosistem i polya svyazannyh struktur / Pod red. A.A. Potapova*. M.: Radiotekhnika, 2003. 720 p.
26. Potapov A.A. *Fraktaly v radiofizike i radiolokacii*. M.: Logos, 2002. 664 p.



27. Potapov A.A. Fraktal'nyj metod i fraktal'naya paradigma v sovremennom estestvoznanii. M.: Nauchnaya kniga, 2012. 108 p.
28. Podosenov C.A., Sokolov A.A. O nestacionarnom izluchenii provolochnoj anteny beguschej volny // Zarubezhnaya radio`elektronika. 1995. № 4. pp. 12–18.
29. Podosenov S.A., Svekis Y.G., Sokolov A.A. Transient Radiation of Traveling Waves by Wire Antennas // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 1995. Vol. 37. № 3. pp. 367–383.
30. Podosenov C.A., Sokolov A.A. Nestacionarnoe izluchenie V-obraznoj i linejnoj antenn // Metrologiya. 1994. № 1. pp. 26–35.
31. Schuman N. Time-Domain Scattering from a Nonlinearly Loaded Wire // IEEE Trans. Antennas and Propagat. 1974. Vol. 22. No 5. pp. 611–613.
32. Neganov V.A., Pavlovskaya `E.A., Yarovoj G.P. Izluchenie i difrakciya `elektromagnitnyh voln / Pod red. V.A. Neganova. M.: Radio i svyaz', 2004. 264 p.
33. Belichenko V.P., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I. Sverhshirokopolosnye impul'snye radiosistemy. Novosibirsk: Nauka, 2015. 481 p.
34. Radiolokacionnye harakteristiki letatel'nyh apparatov / Pod red. L.T. Tuchkova. M.: Radio i svyaz', 1985. 236 p.
35. Gabri`el'yan D.D., Zvezdina M.Yu. Predstavlenie plotnosti poverhnostnogo toka pri reshenii zadach difrakcii na dvuhmernom tele proizvol'noj formy // Radiotekhnika i `elektronika. 1993. T. 38. № 3. pp. 394–396.
36. Gabri`el'yan D.D., Zvezdina M.Yu. Reshenie zadachi difrakcii na telah slozhnoj formy bol'shikh `elektricheskikh razmerov metodom integral'nyh uravnenij // Radiotekhnika i `elektronika. 1993. T. 38. № 4. pp. 636–642.
37. Gabri`el'yan D.D., Zvezdina M.Yu. Izluchenie poverhnostnyh antenn na tele slozhnoj formy bol'shikh volnovykh razmerov // Akusticheskij zhurnal. 1993. Vyp. 6. pp. 1030–1036.
38. Radcig Yu.Yu., Havanova M.A. O reshenii vnutrennej granichnoj zadachi `elektrodinamiki dlya schelevykh antenn izluchatelej metodami nelinejnogo programmirovaniya // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tehnicheckie nauki. 1998. № 10. pp. 58–59.
39. Radcig Yu.Yu., Havanova M.A. Reshenie vnutrennej zadachi sinteza poloskovykh schelevykh antenn s real'nymi raspredeleniyami tokov v poloskovykh liniyah // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tehnicheckie nauki. 1999. № 13. pp. 123–124.
40. Gerasimov I.A. Issledovanie i razrabotka poloskovykh i planarnykh antenn abonentskikh stancij na osnove bazovykh izluchayuschih struktur s uchetom osobennostej razmescheniya: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.12.07. Samara: PGUTI, 2019. 189 p.
41. Surikov V.V. `Elektromagnitnaya sovместimost' priemo-peredayuschih ustrojstv, raspolozhennyh na `elementah konstrukcij slozhnoj formy: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.03. S.-Peterburg: SPbGPTU, 2009. 121 p.
42. Havanova M.A. Sintez krivolinejnykh schelevykh antenn s optimal'nymi diagrammami napravlenosti dlya radiotekhnicheskikh sistem letatel'nyh apparatov i drugih podvizhnykh ob`ektov: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.12.04, 05.12.07. Velikij Novgorod: NGU im. Yaroslava Mudrogo, 2002. 114 p.
43. Ostankov A.V. `Elektrodinamicheskie modeli rezonansnyh grebenchatykh struktur dlya analiza i sinteza vysoko`effektivnykh difrakcionnykh antenn: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.12.07. Voronezh: VGTU, 2011. 397 p.
44. Modelirovanie malogabaritnykh sverhshirokopolosnykh antenn / A.B. Avdeev, A.V. Ashihmin, Yu.G. Pasternak i dr. // Pod red. A.B. Avdeeva i A.V. Ashihmina. Voronezh: VGU, 2005. 223 p.
45. Modelirovanie malogabaritnykh sverhshirokopolosnykh antenn / A.I. Klimov, Yu.G. Pasternak, V.I. Yudin i dr. // Pod red. V.I. Yudina. Voronezh: VGTU, 1999. 257 p.
46. Neganov V.A., Nefedov E.I., Yarovoj G.P. Poloskovo-schelevye struktury sverh- i krajnevysokikh chastot. M.: Nauka. Fizmatlit, 1996. 304 p.



47. Neganov V.A., Nefedov E.I., Yarovoj G.P. `Elektrodinamicheskie metody proektirovaniya ustrojstv SVCh i antenn / Pod red. V. A. Neganova. M.: Radio i svyaz', 2002. 416 p.
48. Aref'ev A.S., Neganov V.A. Metod chastichnogo obrascheniya operatora v zadachah o sobstvennyh volnah poloskovykh i schelevykh linij peredachi. M.: Radio i svyaz', 2002. 280 p.
49. Neganov V.A., Yarovoj G.P. Teoriya i primenenie antenn / Pod red. V.A. Neganova. M.: Radio i svyaz', 2006. 720 p.
50. `Elektrodinamicheskij raschet poloskovykh antenn / B.A. Panchenko, S.T. Knyazev, Yu.B. Nechaev i dr. M.: Radio i svyaz', 2002. 136 p.
51. Panchenko B.A., Gizatullin M.G. Nano-antenny. M.: Radiotekhnika, 2010. 96 p.
52. Aronov S.Yu. Razrabotka i prakticheskaya realizaciya metodiki proektirovaniya antenn gorodskih i linejnykh radiocentrov na osnove kompleksnogo ucheta naznacheniya i stojkosti: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.12.07. Samara: PGUTI, 2018. 172 p.
53. Sokolova Yu.V. Samosoglasovannyj metod analiza mikropoloskovykh vibratornykh antenn: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk : 01.04.03. Samara: PGUTI, 2012. 113 p.
54. Avdyushin A.S. Ispol'zovanie iskusstvennykh di`elektrikov dlya uluchsheniya harakteristik sverhshirokopolosnykh antenn UVCh i SVCh diapazonov voln: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.12.07. Voronezh: VGTU, 2015. 226 p.
55. Vilenskij A.R. Issledovanie i razrabotka sverhshirokopolosnykh pechatnykh schelevykh antenn begushej volny: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.12.07. M.: MGTU im. N.`E.Baumana, 2014. 216 p.
56. Kopylov D.A. Obespechenie `elektromagnitnoj sovmestimosti radiosredstv podvizhnogo ob`ekta s ispol'zovaniem metamaterialov v sostave antennoj sistemy: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.12.07. Samara: PGUTI, 2018. 161 p.
57. Latypova A.F. Sverhshirokopolosnye radiopogloschayuschie struktury s sosredotochennymi i raspredelennymi dissipativnymi `elementami: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.12.07. Voronezh: VGTU, 2015. 167 p.
58. Mescheryakov I.I. Optimizaciya parametrov izluchatelej sverhkorotkih impul'sov: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.03. Voronezh: VGU, 2012. 150 p.
59. Lavrov G.A. Vzaimnoe vliyanie linejnykh vibratornykh antenn. M.: Sovetskoe radio, 1975. 128 p.
60. Metody i sredstva umen'sheniya radiolokacionnoj zametnosti antennykh sistem / G.D. Mihajlov, V.I. Sergeev, `E.A. Solomin i dr. // Zarubezhnaya radio`elektronika. 1994. № 4/5. pp. 36–42.
61. Mihajlov G.D., Voronov V.A. Perspektivy i napravleniya rabot po sozdaniyu malozametnykh antenn bortovykh radio`elektronnykh kompleksov // Oboronnyaya tekhnika. 1995. № 12. pp. 35–37.
62. Bahrah L.D., Kremeneckij S.D. Sintez izluchayuschih sistem (teoriya i metody rascheta). M.: Radio i svyaz', 1974. 232 p.
63. Antenny. Sovremennoe sostoyanie i problemy / Pod red. L.D. Bahraha i D.I. Voskresenskogo. M.: Sovetskoe radio, 1979. 124 p.
64. Voskresenskij D.I., Maksimov V.M. Razvitie antennykh sistem (obzor) // Izvestiya vuzov. Radio`elektronika. 1987. T. 30. № 2. pp. 4–15.
65. Aktivnye fazirovannyye antennye reshetki / Pod red. D.I. Voskresenskogo i A.I. Kanaschenkova. M.: Radiotekhnika, 2004. 488 p.
66. Kashin V.A. Metody fazovogo sinteza antennykh reshetok // Zarubezhnaya radio`elektronika. Uspehi sovremennoj radio`elektroniki. 1997. № 1. pp. 47–60.
67. Manuilov B.D., Bashly P.N., Pugachev V.V. Algoritmy formirovaniya nulej v diagrammah napravlenosti monoimpul'snykh antennykh reshetok // Radiolokaciya, navigaciya, svyaz': sb. trudov V Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Voronezh: VNIIS, 1999. T. 2. pp. 1588–1594.
68. Manuilov B.D., Bashly P.N. Fazovyj sintez nulej v summarnoj i raznostnoj diagrammah napravlenosti monoimpul'snykh antennykh reshetok // Problemy teorii i praktiki postroeniya radiotekhnicheskikh sistem i perspektivnye metody priema i obrabotki izmeritel'noj informacii: sb. trudov Vseros. nauch.-tehn. konf. Rostov-na-Donu: RVIRV, 1998. 56 p.



69. Manuilov B.D., Bashly P.N. Optimizaciya vektornyh diagramm napravlenosti monoimpul'snyh antenny reshetok s sovmestnym formirovaniem luchey // *Antenny*. 2004. № 2 (81). pp. 51–58.
70. Obuhovec V.A., Kas'yanov A.O. Mikropoloskovye otrazhatel'nye antennye reshetki. Metody proektirovaniya i chislennoe modelirovanie / Pod red. V.A. Obuhovca. M.: Radiotekhnika, 2004. 240 p.
71. Obuhovec V.A., Mel'nikov S.Yu. Optimizaciya diagramm napravlenosti antenny reshetok // *Izluchenie i rasseyanie `elektromagnitnyh voln*. Taganrog: TRTU, 1999. pp. 93–101.
72. Ponomarev L.I., Popov V.V. Rasseivayuschie svoystva antenn i fazirovannyh reshetok. M.: Rossijskij universitet druzhby narodov, 2003. 144 p.
73. Ponomarev L.I., Stepanenko V.I. Skaniruyuschie mnogochastotnye sovmeschennye antennye reshetki. M.: Radiotekhnika, 2009. 328 p.
74. Cupikov A.E. Optimizaciya prodol'no izluchayuschih antenn s uchetom ogranichenij na strukturu blizhnego polya: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.12.07. Kazan': KGTU im. A.N.Tupoleva, 2010. 129 p.
75. Metod neopredelennyh mnozhitel'ej Lagranzha / V.I. Bahtin, I.A. Ivanishko, A.V. Lebedev i dr. Minsk: BGU, 2012. 40 p.
76. Neganov V.A. Fizicheskaya regularizaciya nekorrektnykh zadach `elektrodinamiki: linii peredachi, antenny, difrakciya `elektromagnitnyh voln. M.: SAJNS-PRESS, 2008. 432 p.
77. Neganov V.A., Osipov O.V. Otrazhayuschie, volnovodnyye i izluchayuschie struktury s kiral'nymi `elementami. M.: Radio i svyaz', 2006. 280 p.
78. Sarychev A.A. Difrakciya ploskih `elektromagnitnyh voln na telah s chastichnoj metallizaciej poverhnosti: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Samara: PGATI, 2008. 159 p.
79. Ustinova E.S. Osobennosti volnovykh processov v nevzaimnykh volnovodnykh i rezonansnykh strukturah: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Samara: PGUS, 2017. 155 p.
80. Gradinar' I.M. `Elektrodinamicheskie svoystva metamaterialov, sozdannyh uporyadochennymi tonkoprovolochnymi tokoprovodyaschimi chasticami: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Samara: PGUTI, SamGU, 2012. 119 p.
81. Morozov S.V. *Integral'noe predstavlenie `elektromagnitnogo polya tonkoprovolochnykh izluchayuschih struktur s razlichnymi tipami simmetrii*: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Samara: PGUTI, 2018. 115 p.
82. Nescheret A.M. Issledovanie mikropoloskovykh izluchayuschih struktur na osnove kiral'nykh metamaterialov: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Samara: PGUTI, 2017. 108 p.
83. Alasheeva E.A. Analiz dvumernykh ideal'no provodyaschih struktur metodom integral'nykh uravnenij: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Samara: PGUTI, 2009. 146 p.
84. Lemzhin M.I. Primenenie singulyarnykh integral'nykh uravnenij dlya analiza polya v blizhnej zone `elektricheskikh vibratornykh antenn i reshetok: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Samara: PGUTI, 2009. 118 p.
85. Biryukova N.R. Issledovanie difrakcii `elektromagnitnyh voln na tonkoprovolochnykh spiral'nykh `elementah i strukturah na ih osnove: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Samara: PGUTI, 2017. 171 p.
86. Voronov A.A. Primenenie singulyarnykh integral'nykh uravnenij dlya analiza kol'cevoj ramochnoj antenny i malootrzhayuschego konformnogo pokrytiya ob`ektov: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Samara: PGUTI, 2009. 108 p.
87. Panferova T.I. Primenenie priblizhennykh granichnykh uslovij impedansnogo tipa dlya rascheta difrakcionnykh i volnovodnykh struktur s tonkimi kiral'nymi sloyami: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Samara: PGUTI, 2008. 178 p.
88. Pochepcov A.O. Issledovanie planarnykh mnogoslujnykh metamaterialov na osnove tonkoprovolochnykh spiral'nykh `elementov: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Samara: PGUTI, 2017. 155 p.



89. Vasil'chenko O.V. Prostranstvenno-vremennaya obrabotka sverhshirokopolosnyh signalov v radiolokacionnyh stanciyah s `elektronnym skanirovaniem diagramm napravlenosti antenn. Smolensk: VA VPVO VS RF, 2011. 114 p.
90. Mel'nikov Yu.P. Metody ocenki `effektivnosti vozduшной radiotekhnicheskoy razvedki. M.: Izd-vo MO RF, 1996. 345 p.
91. Mel'nikov Yu.P., Popov S.V. Radiotekhnicheskaya razvedka. Metody ocenki `effektivnosti mestoopredeleniya istochnikov radioizlucheniya. M.: Radiotekhnika, 2008. 432 p.
92. Radzievskij V.G., Sirota A.A. Informacionnoe obespechenie radio`elektronnyh sistem v usloviyah konflikta. M.: IPRZhR, 2001. 456 p.
93. Davydov A.G., Pimenov Yu.V. Vozmozhnosti programmy `ED`EM dlya razrabotki ustrojstv antennoj tehniki // Antenny, 2006. № 12 (115). pp. 54–66.
94. Razin'kov S.N., Borisov D.N., Bogoslovskij A.V. Issledovanie napravlennyh svoystv reshetok `elementarnykh `elektricheskikh vibratorov na kruglykh ideal'no provodyaschih cilindrah konechnoj dliny // Radiotekhnika, 2020. № 2(3). pp. 46–54.
95. Kalashnikov A.N., Vlasenko V.A., Nazarenko A.F. Optimizaciya linejnyh additivnyh antennyh reshetok po `energeticheskim kriteriyam v uzkopolosnom, shirokopolosnom i impul'snom rezhimah // Antenno-fidernye ustrojstva, sistemy i sredstva radiosvyazi : sb. trudov Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Voronezh: VGU, 1997. T. 38. pp. 177–182.

© Тимошенко А.В., Разиньков С.Н., Разинькова О.Э., Громов Р.В., 2020

Тимошенко Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, 124498, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, u567ku78@gmail.com.

Разиньков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы), Военный учебно-научного центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, razinkovsergey@rambler.ru.

Разинькова Ольга Эдуардовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы), Военный учебно-научного центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, olga-razinkova@rambler.ru.

Громов Роман Владимирович, заместитель главного конструктора – начальник отдела акционерного общества «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», Россия, 127083, г. Москва, ул. 8 Марта, 10, стр. 1, gromov.r.v@gmail.com.