



УДК 623.746:621.396.677.3
ГРНТИ 78.25.13:47.45.29

АНАЛИЗ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК МАЛОЗАМЕТНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ САМОЛЕТНОГО ТИПА

*С.Н. РАЗИНЬКОВ, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
А.В. БОГОСЛОВСКИЙ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Д.Н. БОРИСОВ, кандидат технических наук, доцент
Воронежский государственный университет (г. Воронеж)
Д.С. МАТВЕЕВ, кандидат военных наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

С использованием пакета электродинамического моделирования типа CST MWS (Computer Simulation Technology Microwave Studio) проведен анализ диаграмм направленности и коэффициентов направленного действия вибраторных антенных решеток, расположенных на крыле и фюзеляже малозаметных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. Найдены закономерности изменения направленных свойств решеток при покрытии несущих поверхностей радиопоглощающими материалами. Показано, что при использовании материалов с диэлектрической проницаемостью, позволяющей уменьшать уровень вторичного электромагнитного излучения несущих поверхностей на 8...12 дБ, обеспечивается возрастание коэффициента направленного действия решетки на 30 % относительно значения, достижимого для решетки, размещенной на идеально проводящей несущей поверхности.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, диаграмма направленности и коэффициент направленного действия антенной решетки, радиолокационная заметность объекта, пакет электродинамического моделирования, радиопоглощающий материал.

THE AIRPLANE TYPE LOW-VISIBILITY UNMANNED AERIAL VEHICLES DIPOLE ANTENNA ARRAYS ANALYSIS

*S.N. RAZINKOV, Doctor of Physical and Mathematical sciences, Senior Researcher
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
A.V. BOGOSLOVSKIY, Candidate of technical sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
D.N. BORISOV, Candidate of Technical sciences, Associate Professor
Voronezh State University (Voronezh)
D.S. MATVEEV, Candidate of Military sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

Using the CST MWS (Computer Simulation Technology Microwave Studio) electrodynamic modeling package, the dipole antenna arrays directional patterns and directional coefficients analysis located on the wing and fuselage of inconspicuous unmanned aerial vehicles of the aircraft type was carried out. The regularities of changes in arrays directional properties when covering the bearing surfaces with radio-absorbing materials are found. It is shown that when using materials with a dielectric permittivity that allows reducing the bearing surfaces secondary electromagnetic radiation level by 8...12 dB, an increase in the grating directional coefficient by 30 % is provided relative to the value achievable for a grating placed on an ideally conducting bearing surface.

Keywords: unmanned aerial vehicle, radiation pattern and antenna array directional coefficient, object radar visibility, electrodynamic modeling package, radio-absorbing material.



Введение. Разработка современных радиотехнических комплексов воздушного базирования осуществляется в условиях неуклонного возрастания требований к их радиолокационной заметности [1, 2], определяющей возможности дистанционного обнаружения и распознавания в системах контроля воздушного пространства [3, 4]. Снижение радиолокационной заметности заключается в преднамеренном изменении отражательной сигнатуры объекта, определенной в виде совокупности демаскирующих признаков [1, 4, 5], проявляющихся в диапазонах рабочих частот радиолокационных станций.

Наиболее эффективные по техническим и стоимостным показателям способы снижения радиолокационной заметности воздушных объектов базируются на покрытии участков (доминирующих центров) интенсивного вторичного электромагнитного излучения радиопоглощающими материалами [2, 6–8]. Для реализации этих способов требуется обосновать электрофизические параметры и правила выбора мест нанесения материалов в интересах достижения минимально допустимых уровней отраженных радиолокационных сигналов в секторах углов, где осуществляется контроль воздушного пространства [7].

Согласно оценкам [2, 6], за счет рационального выбора параметров и участков поверхностей для размещения покрытий эффективные площади рассеяния летательных аппаратов (ЛА) самолетного типа могут быть уменьшены на 8...12 дБ, что соответствует сокращению дальности обнаружения радиолокационными станциями в 1,6...2 раза.

Вместе с тем, повышение скрытности объектов от систем контроля воздушного пространства может сопровождаться нарушением режимов нормального функционирования бортового радиоэлектронного оборудования, поскольку изменение отражательных свойств поверхностей при нанесении радиопоглощающих материалов приводит к искажению диаграмм направленности и потерям коэффициентов направленного действия (КНД) антенных систем. Отклонение диаграммы направленности антенны от требуемой формы, проявляющееся в виде расширения главного луча или возрастания среднего уровня боковых лепестков [9], способствует ухудшению пространственной избирательности передачи-приема сигналов и создает дополнительные каналы для паразитного излучения и воздействия интерференционных помех [9] на радиоэлектронные средства ЛА. При уменьшении КНД антенной системы сокращаются размеры зон информационного обмена, снижаются показатели эффективности обнаружения и точности оценки параметров сигналов.

Для парирования указанных негативных эффектов при достижении целевой функции снижения радиолокационной заметности радиотехнического комплекса важное практическое значение приобретают вопросы электродинамического анализа антенн, размещаемых на поверхностях, покрытых радиопоглощающими материалами.

Актуальность. Суть электродинамического анализа антенных систем объектов со сниженной радиолокационной заметностью заключается в установлении зависимостей характеристик передачи-приема сигналов от конфигурации и электрических размеров приемоизлучающей структуры при различных электрофизических параметрах радиопоглощающих материалов и электрических габаритах несущих поверхностей. Зависимости находятся по результатам решения краевых задач [7, 8] для антенн, расположенных на телах простой геометрической формы, которыми могут быть представлены фрагменты корпуса носителя, при граничных условиях для металлodieлектрических слоистых сред [7, 10]. Правила декомпозиции ЛА самолетного типа для представления в виде совокупности тел простой формы изложены в [11].

Анализ антенных систем на поверхностях с радиопоглощающими покрытиями эффективно выполняется с применением пакета электродинамического моделирования типа CST MWS (Computer Simulation Technology Microwave Studio). При расчете токов и полей антенн и несущих конструкций используются операции численного решения краевых задач методами конечных элементов FEM – Finite Element Method и конечных интегралов FITF(T)D – Finite Integration Technique in Frequency (Time) Domain. Как показано в [12], время расчета



диаграммы направленности 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 не превышает 5...6 часов. При использовании вычислительного средства на базе процессора Intel Core i7-10700 К с объемом оперативной памяти 32 Гб становится возможным выбор рациональных вариантов построения антенных систем по результатам многократных расчетов характеристик для различных параметров конструкций.

В предлагаемой работе с использованием пакета CST MWS решена актуальная задача исследования вибраторных антенных решеток, расположенных на малозаметных беспилотных ЛА (БЛА) самолетного типа.

Ввиду малого времени и ограниченного перечня мероприятий предполетной подготовки БЛА самолетного типа ближнего действия и малой дальности используются в качестве носителей аппаратуры мониторинга радиоэлектронной обстановки [13–15]. Типовые значения высот их горизонтального полета обеспечивают значительные дистанции прямой видимости [10] для глобального охвата контролируемых участков, в том числе характеризующихся сложным рельефом местности, при исключении приема излучений удаленных источников. Высокая мобильность БЛА позволяет оперативно осуществлять перебазирование в районы мониторинга и сосредотачивать усилия по контролю (наблюдению) за наиболее важными объектами.

Малые массогабаритные показатели вибраторных конструкций позволяют сохранить аэродинамические свойства носителей. Входные сопротивления вибраторов позволяют осуществлять согласование с приемными устройствами в широкой полосе частот с применением полосковых устройств [9]. Низкий уровень радиолокационной заметности АР обеспечивает скрытность беспилотных комплексов мониторинга от систем контроля воздушного пространства.

Рассмотрены варианты размещения решеток в нижней полусфере на фюзеляже и в верхней полусфере на крыле БЛА самолетного типа на удалениях от краев несущих поверхностей, установленных из условия сохранения симметрии диаграмм направленности в плоскости угла места и минимизации эффектов экранирования [16]. При моделировании крыло БЛА, согласно рекомендациям [11, 16], представляется плоским экраном с параллельными прямолинейными границами, а фюзеляж – круглым цилиндром конечной длины с плоскими торцами.

Цель работы – анализ диаграмм направленности и КНД вибраторных АР, расположенных на малозаметных БЛА самолетного типа, и установление закономерностей изменения их направленных свойств при покрытии несущих поверхностей радиопоглощающими материалами.

Принципы модельного представления и расчета токов и полей объектов с использованием пакета электродинамического моделирования CST MWS. Пакет электродинамического моделирования предназначен для анализа антенных систем, расположенных вблизи или непосредственно на поверхностях объектов, представляемых наборами проводящих и металлодиэлектрических фрагментов. Для аппроксимации несущих экранов, которые в общем случае следует рассматривать как множество замкнутых и разомкнутых оболочек, используются многомерные поверхности, образованные кривыми второго порядка, а также поверхности, развернутые на трехмерных сплайн-линиях. При аппроксимации боковой поверхности цилиндра конечной длины окружность может быть представлена правильным многоугольником, содержащим 36 сторон; для повышения точности вычислений характеристик АР с учетом переотражения полей между вибраторами и несущими экранами число сторон аппроксимирующего многоугольника увеличивалось до 100.

Математическая постановка трехмерной задачи возбуждения поверхности произвольного вида осуществляется с использованием интегральных уравнений относительно плотности поверхностных токов. Остальные типы краевых задач преобразуются к одномерным



интегральным уравнениям (системам уравнений), записанных по контурам сечений анализируемых поверхностей. Если поверхность объекта образована вращением контура вокруг оси Oz цилиндрической системы координат, то система одномерных интегральных уравнений записывается путем разложения токов и полей краевой задачи в ряды Фурье.

Используемые интегральные уравнения эквивалентны гиперсингулярным уравнениям с несобственным интегралом в смысле конечной части по Адамару [17, 18]; их левые части имеют смысл предельных значений касательных компонентов электрического поля при стремлении точки наблюдения к поверхности [17].

При численном решении интегральных уравнений токи объектов представляются последовательностями линейно-независимых функций, краевые задачи приобретают формы систем линейных алгебраических уравнений относительно весовых коэффициентов этих последовательностей, значения которых равны значениям искомых токов в точках дискретизации. Решение линейных алгебраических уравнений осуществляется на основе прямых и итерационных методов (в частности, обобщенного метода минимальных невязок). Анализ сложных структур может быть организован в рамках последовательных приближений, когда результаты расчета токов (полей) для фрагмента структуры используются в качестве возбуждающих функций для ее других частей.

Моделирование АР проводилось методом конечных элементов, поскольку хорошо зарекомендовавший себя метод конечных разностей во временной области непригоден при представлении источников, заключенных в замкнутые области (в частности, в цилиндрическую поверхность). Область поиска решений уравнений разбивалась на конечное количество подобластей, в каждом из которых выбирался вид аппроксимирующей функции; т.е. исходная область определения функции тока разбивалась с помощью сетки, в общем случае неравномерной, на множество конечных элементов. Коэффициенты аппроксимирующих функций находились из условия равенства значений на границах между элементами и выражались через значения функций в узлах конечных элементов. Эти значения, в свою очередь, определялись путем решения системы линейных алгебраических уравнений, сформированной при замене операторов интегральных уравнений матричными элементами, а их аргументов – множеством дискретных значений токов в области определения краевой задачи.

Анализ вибраторных антенных решеток на плоском экране с параллельными прямолинейными границами. Для описания конфигурации и расчета токов АР на плоском экране зададим декартову систему координат $XOYZ$, поля решеток определим в сферической системе (r, ϕ, θ) , где угол ϕ отсчитывается от оси Ox против часовой стрелки, а угол θ – от оси Oz .

Экран толщиной a_0 расположен в плоскости $z=0$. Линейная решетка из N вертикальных вибраторов с шагом d размещена в верхнем полупространстве ($z \geq 0$) вдоль оси Oy при смещении относительно центра по оси Ox на величину $x_0 \geq 0$.

С использованием пакета электродинамического моделирования CST MWS на базе процессора Intel Core i7-10700 K с объемом оперативной памяти 32 Гб проведен расчет диаграмм направленности и КНД решеток из $N=3$ вибраторов электрической длины $l_0/\lambda=0,2$. Нормированные размеры несущей поверхности: $X/\lambda=1$ и $Y/\lambda=5$; шаг решетки $d/\lambda=0,25$, величина смещения решетки к краю $x_0/\lambda=0,3$.

На рисунке 1 приведены диаграммы направленности АР на идеально проводящем экране (а) и экране, покрытым материалом с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=3,6$; толщина покрытия составляет $0,1 \lambda$. Сплошными линиями представлены результаты расчетов на частоте $f=1$ ГГц, пунктирными линиями – на частоте $f=2$ ГГц, точечными линиями – на частоте $f=3$ ГГц.

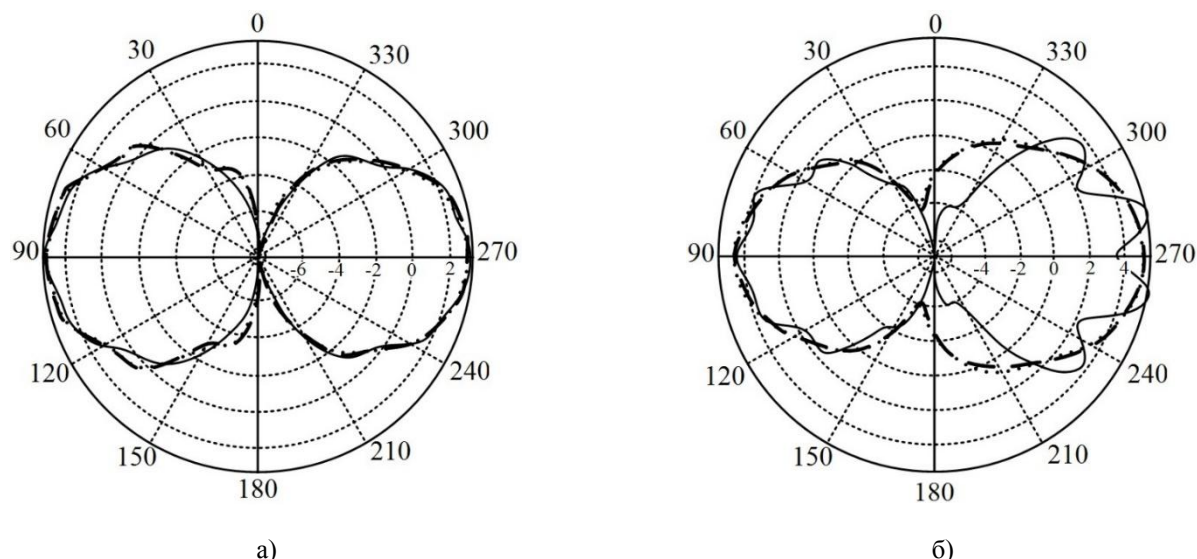


Рисунок 1 – Диаграммы направленности АР на плоском идеально проводящем экране (а) и экране, покрытым материалом с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3,6$ (б)

Наблюдается незначительное изменение формы главных лучей диаграмм направленности при изменении частоты с $f = 1$ ГГц до $f = 2$ ГГц; для частоты $f = 3$ ГГц характерно существенное отличие, заключающееся в появлении лепестковой структуры. Асимметрия формы диаграммы направленности обусловлена смещением решетки к одному из краев прямоугольника, приводящему к усилению влияния поверхностных волн токов, отраженных от кромок на формирование результирующего поля.

В таблице 1 приведены значения КНД решеток на указанных частотах.

Таблица 1 – Значения КНД АР на плоском экране

КНД решетки	Характеристика покрытия	Частота		
		1 ГГц	2 ГГц	3 ГГц
	$\varepsilon = \infty$	3,24 дБ	2,96 дБ	3,11 дБ
	$\varepsilon = 3,6$	5,62 дБ	5,12 дБ	5,1 дБ

Согласно полученным результатам, при покрытии экрана диэлектрическим материалом КНД решетки возрастает вследствие смещения максимума диаграммы направленности относительно плоскости $z = 0$, где располагается главный луч диаграммы направленности АР, расположенной на идеально проводящей поверхности.

Анализ вибраторных антенных решеток на боковой поверхности круглого цилиндра конечной длины. Вычисление токов на поверхности цилиндра будем проводить в цилиндрической системе координат (ρ, ϕ, z) , а поле решетки – в совмещенной сферической системе (r, ϕ, θ) .

Цилиндр радиуса a и длины h расположим вдоль оси Oz ; через его края проходят параллельные плоскости с координатами $z = \mp h/2$. Решетки из N вибраторов длиной l_0 имеют два варианта конструктивного исполнения:

- линейная решетка с шагом d , размещенная на образующей цилиндра (при $\phi = 0$), с удалением первого вибратора от одного из краев на расстояние l , удовлетворяющее условиям: $(N-1)d \leq h - |l|$, $|l| \leq h/2$;

- решетка, расположенная на окружности поперечного сечения цилиндра в плоскости



$z = l$, с угловым расстоянием между элементами $\tilde{\alpha} = \arcsin(d/2a)$, удовлетворяющим условию $\tilde{\alpha} \leq 2\pi/N$.

На рисунке 2 представлены диаграммы направленности решеток из $N=3$ вибраторов электрической длины $l_0/\lambda=0,2$ с шагом $d/\lambda=0,25$, находящихся на боковой поверхности идеально проводящего (а) цилиндра и цилиндра с диэлектрическим покрытием, характеризуемым диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=3,6$ (б).

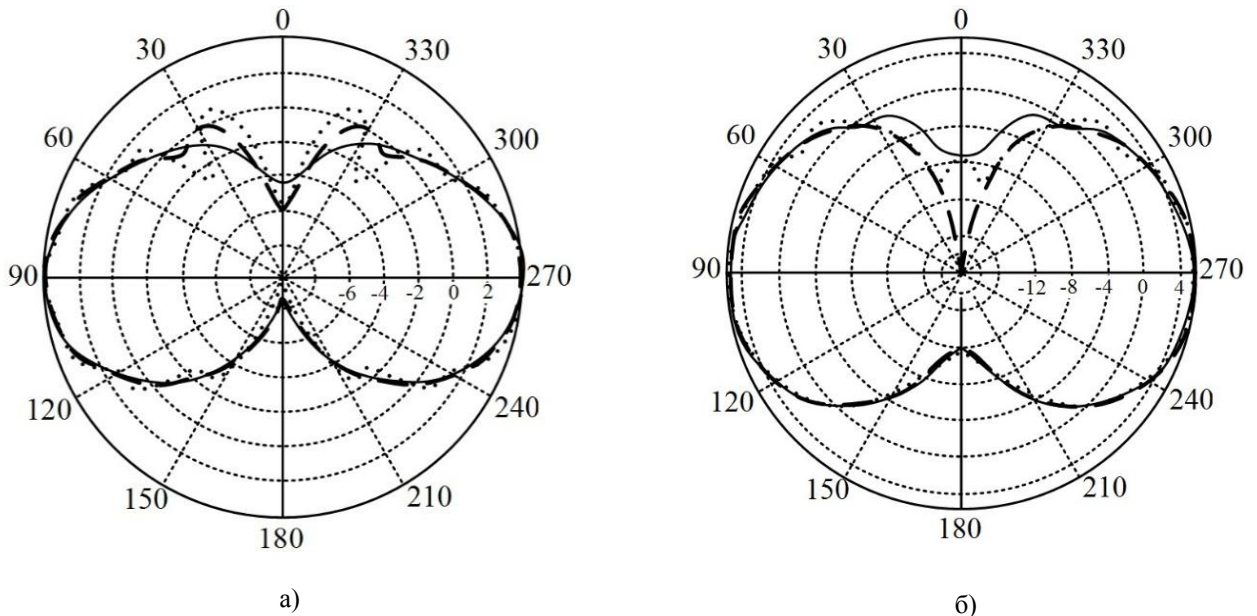


Рисунок 2 – Диаграммы направленности линейной решетки на боковой поверхности идеально проводящего цилиндра (а) и цилиндра, покрытого материалом с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=3,6$ (б)

Нормированные значения длины и радиуса поперечного сечения цилиндра $h/\lambda=5$, $a/\lambda=0,3$ соответственно; первый антенный элемент удален от торца цилиндра на $l/\lambda=0,3$. Сплошными линиями представлены диаграммы направленности АР на частоте $f=1$ ГГц, пунктирными линиями – на частоте $f=2$ ГГц, точечными линиями – на частоте $f=3$ ГГц.

На рисунке 3 приведены диаграммы направленности решеток из $N=3$ элементов, расположенных на окружности поперечного сечения идеально проводящего цилиндра (а) и цилиндра, покрытого диэлектрическим материалом с проницаемостью $\varepsilon=3,6$ (б), на удалении от края $l/\lambda=0,3$. Электрические размеры цилиндра и вибраторов выбраны такими же, как для АР, диаграммы направленности которых изображены на рисунке 2.

Из приведенных результатов следует, что при покрытии цилиндра диэлектрическим материалом диаграмма решетки, расположенной на окружности его поперечного сечения, приобретает лепестковую структуру при существенном изменении формы главного луча.

В таблице 2 представлены значения КНД линейной АР на образующей цилиндра, а в таблице 3 – решетки, расположенной на окружности его поперечного сечения.

Таблица 2 – Значения КНД линейной АР на образующей цилиндра

КНД решетки	Характеристика покрытия	Частота		
		1 ГГц	2 ГГц	3 ГГц
	$\varepsilon = \infty$	3,97 дБ	4,01 дБ	4,12 дБ
	$\varepsilon = 3,6$	5,41 дБ	5,72 дБ	5,67 дБ



Таблица 3 – Значения КНД АР, расположенной на окружности поперечного сечения цилиндра

КНД решетки	Характеристика покрытия	Частота		
		1 ГГц	2 ГГц	3 ГГц
	$\varepsilon = \infty$	6,19 дБ	6,31 дБ	6,2 дБ
	$\varepsilon = 3,6$	3,17 дБ	2,89 дБ	2,65 дБ

Согласно данным таблиц, при использовании диэлектрического покрытия цилиндра КНД линейной вибраторной решетки возрастает не менее чем на 30 %, а КНД решетки, расположенной на окружности поперечного сечения цилиндра, снижается примерно на 3 дБ.

Улучшение направленных свойств линейной АР происходит вследствие смещения главного луча диаграммы направленности от плоскости экрана в сектора углов места, отклоненные от несущей поверхности. Потери КНД решетки, расположенной на окружности поперечного сечения цилиндра, связаны с расширением ее диаграммы направленности по сравнению с величиной, достижимой при использовании идеально проводящей несущей поверхности. Ширина диаграммы направленности АР при покрытии несущей поверхности диэлектрическим материалом возрастает вследствие различных отклонений парциальных диаграмм направленности антенных элементов [9] относительно положений, характерных при использовании поверхностей с идеально проводящими свойствами [10, 12].

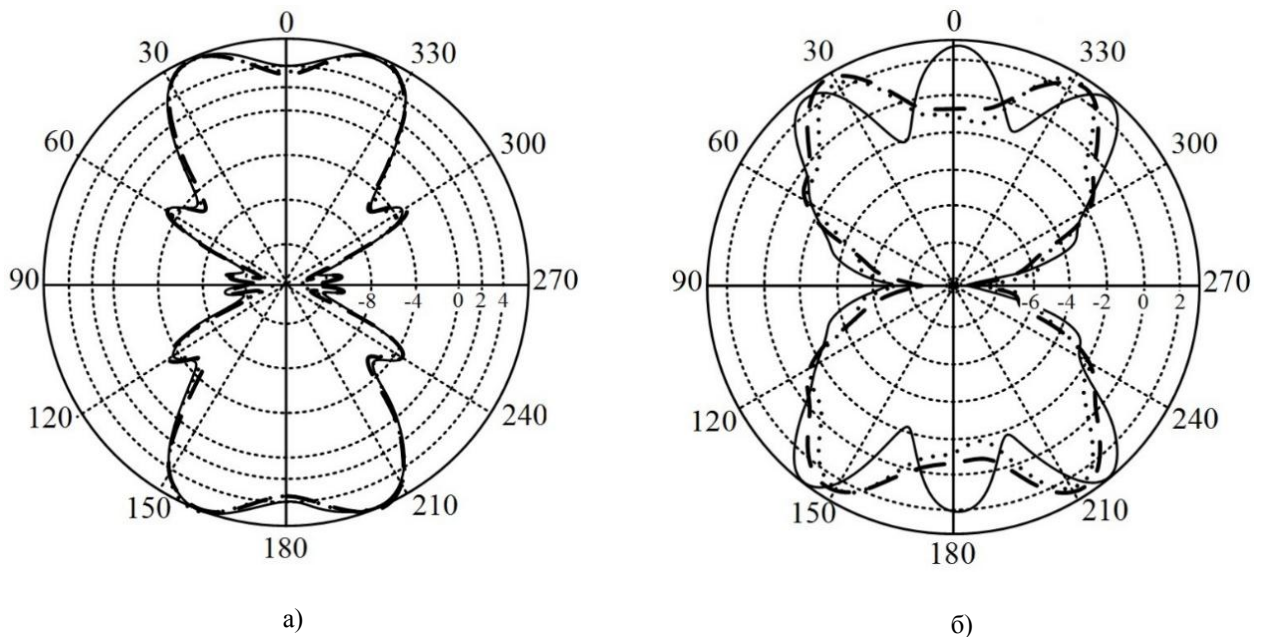


Рисунок 3 – Диаграммы направленности решетки, расположенной на окружности поперечного сечения идеально проводящего цилиндра (а) и цилиндра, покрытого материалом с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3,6$ (б)

Выводы. С использованием пакета электродинамического моделирования CST MWS, установленного на вычислительном средстве с процессором Intel Core i7-10700 К при объеме оперативной памяти 32 Гб, проведен анализ вибраторных антенных решеток БЛА самолетного типа. В качестве поверхностей для размещения решеток рассматривались крыло и фюзеляж БЛА. При моделировании крыло представлялось плоским идеально проводящим экраном с диэлектрическим покрытием, имеющим параллельные прямолинейные границы, а фюзеляж – боковыми поверхностями круглых цилиндров конечной длины; для аппроксимации несущих поверхностей использовались многомерные замкнутые оболочки.

Исследование направленных свойств АР заключается в нахождении закономерностей изменения их диаграмм направленности и КНД при различных вариантах конструкций, а также



формы, электрических размеров и электрофизических свойств (идеально проводящих и диэлектрических) несущих поверхностей. Показатели направленности определялись по результатам численного решения задач возбуждения антенных элементов полями сторонних источников методом конечных элементов при вычислении комплексных амплитуд токов в узлах сеток, развертываемых на объектах, где размещались решетки. Амплитудно-фазовое распределение токов АР и несущих поверхностей восстанавливалось при контроле равенства весовых коэффициентов аппроксимирующих функций, выраженных через значения этих функций в узлах, где задавались позиции конечных элементов. За счет постановки задач возбуждения при граничных условиях для суперпозиции полей элементов и несущих поверхностей диаграммы направленности и КНД вычислялись с учетом реактивной электромагнитной энергии, интерференцией облучающего поля и вторичного излучения АР.

По результатам моделирования установлено, что при покрытии несущих поверхностей материалами с диэлектрической проницаемостью, обеспечивающей снижение уровня вторичного электромагнитного излучения на 8...12 дБ, КНД линейных АР возрастают на 30 % относительно значений, достижимых для решеток, расположенных на идеально проводящих экранах. Прирост показателей направленности обусловлен, главным образом, отклонением главных лучей диаграмм направленности от плоскости, где закреплены антенные элементы, и ориентацией в секторах углов места в полупространстве, ограниченном несущими поверхностями. Для решеток, размещаемых на окружностях поперечных сечений цилиндров с радиопоглощающими покрытиями, КНД снижаются примерно на 3 дБ. Ухудшение направленных свойств АР происходит вследствие различных отклонений направлений максимумов парциальных диаграмм направленности от несущих поверхностей. При этом ширина диаграммы направленности решетки возрастает относительно величины, характерной для АР, размещаемой на идеально проводящем экране.

Установленные закономерности позволяют обосновывать рекомендации по выбору вида и конфигурации решеток и электрофизических параметров радиопоглощающих покрытий для обеспечения требуемой эффективности передачи-приема сигналов и снижения радиолокационной заметности беспилотных радиотехнических комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губарев В.А., Нестеров В.Н., Герасименко О.М., Воронов В.А. Показатели и метод комплексной оценки заметности летательных аппаратов // Оборонная техника. 1995. № 12. С. 9–11.
2. Львова Л.А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов. Снежинск: Издательство РФЯЦ ВНИИТФ. 2003. 232 с.
3. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Вероятность обнаружения беспилотных летательных аппаратов системами дистанционного обнаружения // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции. Воронеж: Воронежский государственный университет. 2017. Т. 3. С. 835–846.
4. Ананенков А.Е., Марин Д.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Соколов П.В. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 1–18.
5. Меньшаков Ю.К. Теоретические основы технических разведок. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2008. 536 с.
6. Ананьин Э.В., Ваксман Р.П., Патраков Ю.М. Методы снижения радиолокационной заметности // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. № 4/5. С. 5–21.
7. Вахитов М.Г. Применение радиопоглощающих покрытий для снижения эффективной поверхности рассеяния // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2015. Т. 15. № 1. С. 139–144.



8. Лагарьков А.Н., Погосян М.А. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий // Вестник Российской академии наук. 2003. Т. 73. № 9. С. 779–787.
9. Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практические применения антенн. М.: Радиотехника, 2009. 720 с.
10. Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б. Электродинамика и распространение радиоволн / под ред. Неганова В.А. и Раевского С.Б. М.: Радио и связь, 2005. 648 с.
11. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / под ред. Л.Т. Тучкова. М.: Радио и связь. 1985. 236 с.
12. Богословский А.В., Борисов Д.Н., Разиньков С.Н., Разинькова О.Э. Моделирование и анализ диаграмм направленности решеток элементарных электрических вибраторов на боковой поверхности цилиндра конечной длины / Информатика: проблемы, методы, технологии: сборник трудов XX Международной научно-технической конференции. Воронеж: ВГУ. 2020. Часть 2. С. 336–348.
13. Разиньков С.Н., Жидко Е.А., Лукин М.Ю. Экспериментальное местоопределение источников радиоизлучения по многократным оценкам угловых координат в беспилотных комплексах мониторинга // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16. № 6. С. 57–63.
14. Жидко Е.А., Разиньков С.Н. Методики определения угловых координат и местоположения источников радиоизлучения в беспилотных комплексах мониторинга и экспериментальные оценки точности этих параметров // Измерительная техника. 2019. № 10. С. 41–46.
15. Разиньков С.Н. Экспериментальные оценки угловых координат и местоположения источников радиоизлучения высокомобильными обнаружителями-пеленгаторами // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22. № 4. С. 74–81.
16. Богословский А.В., Разиньков С.Н. Синтез продольных щелевых решеток на идеально проводящей полосе с максимальными коэффициентами направленного действия и нулями диаграмм направленности // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 4. С. 83–93.
17. Неганов В.А. Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. 432 с.
18. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 1986. 288 с.

REFERENCES

1. Gubarev V.A., Nesterov V.N., Gerasimenko O.M., Voronov V.A. Pokazateli i metod kompleksnoj ocenki zametnosti letatel'nyh apparatov // Oboronnaya tehnika. 1995. № 12. pp. 9–11.
2. L'vova L.A. Radiolokacionnaya zametnost' letatel'nyh apparatov. Snezhinsk: Izdatel'stvo RFYaC VNIITF. 2003. 232 p.
3. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Veroyatnost' obnaruzheniya bespilotnyh letatel'nyh apparatov sistemami distancionnogo obnaruzheniya // Radiolokaciya, navigaciya, svyaz': sbornik trudov XXIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj universitet. 2017. Т. 3. pp. 835–846.
4. Anan'kov A.E., Marin D.V., Nuzhdin V.M., Rastorguev V.V., Sokolov P.V. K voprosu o nablyudenii malorazmernih bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Trudy MAI, 2016. № 91. pp. 1–18.
5. Men'shakov Yu.K. Teoreticheskie osnovy tehniceskikh razvedok. M.: MGTU imeni N. E. Baumana. 2008. 536 p.
6. Anan'in E.V., Vaksman R.P., Patrakov Yu.M. Metody snizheniya radiolokacionnoj zametnosti // Zarubezhnaya radio`elektronika. 1994. № 4/5. pp. 5–21.
7. Vahitov M.G. Primenenie radiopogloschayuschih pokrytij dlya snizheniya `effektivnoj poverhnosti rasseyanija // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tehnologii, upravlenie, radio`elektronika. 2015. Т. 15. № 1. pp. 139–144.



8. Lagar'kov A.N., Pogosyan M.A. Fundamental'nye i prikladnye problemy stels-tehnologij // Vestnik Rossijskoj akademii nauk, 2003. T. 73. № 9. pp. 779–787.
9. Neganov V.A., Tabakov D.P., Yarovoj G.P. Sovremennaya teoriya i prakticheskie primeneniya antenn. M.: Radiotekhnika, 2009. 720 p.
10. Neganov V.A., Osipov O.V., Raevskij S.B. `Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln / pod red. Neganova V.A. i Raevskogo S.B. M.: Radio i svyaz', 2005. 648 p.
11. Radiolokacionnye harakteristiki letatel'nyh apparatov / pod red. L.T. Tuchkova. M.: Radio i svyaz'. 1985. 236 p.
12. Bogoslovskij A.V., Borisov D.N., Razin'kov S.N., Razin'kova O.`E. Modelirovanie i analiz diagramm napravlenosti reshetok `elementarnyh `elektricheskikh vibratorov na bokovoj poverhnosti cilindra konechnoj dliny / Informatika: problemy, metody, tehnologii: sbornik trudov NN Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Voronezh: VGU. 2020. Chast' 2. pp. 336–348.
13. Razin'kov S.N., Zhidko E.A., Lukin M.Yu. `Eksperimental'noe mestoopredelenie istochnikov radioizlucheniya po mnogokratnym ocenkam uglovyh koordinat v bespilotnyh kompleksah monitoringa // Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayuschie sistemy. 2018. T. 16. № 6. pp. 57–63.
14. Zhidko E.A., Razin'kov S.N. Metodiki opredeleniya uglovyh koordinat i mestopolozheniya istochnikov radioizlucheniya v bespilotnyh kompleksah monitoringa i `eksperimental'nye ocenki tochnosti `etih parametrov // Izmeritel'naya tehnika. 2019. № 10. pp. 41–46.
15. Razin'kov S.N. `Eksperimental'nye ocenki uglovyh koordinat i mestopolozheniya istochnikov radioizlucheniya vysokomobil'nymi obnaruzhitelyami-pelengatorami // Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2019. T. 22. № 4. pp. 74–81.
16. Bogoslovskij A.V., Razin'kov S.N. Sintez prodol'nyh schelevykh reshetok na ideal'no provodyaschej polose s maksimal'nymi ko`efficientami napravlennogo dejstviya i nulyami diagramm napravlenosti // Uspehi sovremennoj radio`elektroniki. 2012. № 4. pp. 83–93.
17. Neganov V.A. Fizicheskaya regulyazaciya nekorrektnyh zadach `elektrodinamiki: linii peredachi, anteny, difrakciya `elektromagnitnyh voln. M.: SAJNS-PRESS, 2008. 432 p.
18. Tihonov A.N., Arsenin V.Ya. Metody resheniya nekorrektnyh zadach. M.: Nauka. 1986. 288 p.

© Разиньков С.Н., Богословский А.В., Борисов Д.Н., Матвеев Д.С., 2021

Разиньков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы), Военный учебно-научный 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.

Богословский Андрей Вячеславович, кандидат технических наук, заместитель начальника кафедры радиоэлектроники, Военный учебно-научный 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, bogosandrej@yandex.ru.

Борисов Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем, Воронежский государственный университет, Россия, 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, borisov@sc.vsu.ru.

Матвеев Денис Сергеевич, кандидат военных наук, доцент кафедры радиоэлектроники, Военный учебно-научный 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, matveev.deni@yandex.ru.