

**РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ**

УДК 623.746:621.396.677.3

**ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ АНАЛИЗА  
ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ РЕШЕТОК  
БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ**

**С. Н. Разиньков**, д.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительных систем) ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия;  
orcid.org/0000-0002-3987-0607, e-mail: razinkovsergey@rambler.ru

**А. В. Богословский**, к.т.н., заместитель начальника кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия;  
orcid.org/0000-0002-6469-3366, e-mail: bogosandrej@yandex.ru

**Д. Н. Борисов**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия;  
orcid.org/0000-0002-1265-7195, e-mail: borisov@sc.vsu.ru

**Э. В. Сёмка**, преподаватель кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия;  
orcid.org/0000-0002-0194-6979, e-mail: semka\_elya@mail.ru

*Разработан алгоритм анализа характеристик направленности антенных решеток (АР), применяемых в целевых нагрузках беспилотных летательных аппаратов (БЛА) из состава радиотехнического беспилотного авиационного комплекса (БАК). Раскрыты особенности структуры алгоритма, и дано физико-математическое обоснование каждого этапа его реализации с выделением областей аналитических и численных расчетов.*

*С применением программного обеспечения для трехмерного электродинамического моделирования CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave получены диаграммы направленности (ДН) и вычислены коэффициенты направленного действия (КНД) вибраторных решеток, размещенных на металлическом цилиндре конечных размеров с диэлектрическим покрытием.*

*Целью работы является анализ конструкций АР с проведением оценки их ДН и КНД, размещенных на БЛА самолетного типа радиотехнического БАК с использованием программного обеспечения электродинамического моделирования.*

*Установлено, что при формировании нуля глубиной – 20 дБ в области бокового лепестка диаграммы направленности 7-элементной АР для варианта конструкции № 1 потери КНД не превышают 1,5 дБ от первоначального значения. С уменьшением количества вибраторов до 6-ти при рассмотрении 2-го варианта АР, её КНД составил 8,4 дБ, в случае уменьшения количества вибраторов до 4-х с сохранением общей длины решетки, КНД достигал величины 8,6 дБ.*

**Ключевые слова:** конструкции антенных решеток, алгоритм анализа, аналитические и численные расчеты, беспилотный летательный аппарат.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2022-79-3-11

**Введение**

Антенные решетки находят широкое применение в радиотехнических комплексах различных диапазонов длин волн. Для получения заданной диаграммы направленности совокупность их приемозлучающих элементов располагают в определенном порядке и обеспечивают возбуждение токами с учетом взаимного влияния вибраторов.

Для обеспечения приёма-передачи широкополосных сигналов требуется расширение рабочей полосы, зоны покрытия, скорости передачи данных, что достигается применением со-

временных антенных решеток, функционирующих в широкой полосе частот. В связи с этим важной задачей является анализ антенных решеток, позволяющих обеспечивать требуемые показатели КНД в рабочей полосе частот, имеющих низкий коэффициент стоячей волны и обладающих малыми массогабаритными показателями.

Предъявленным требованиям удовлетворяют низкопрофильные антенные решетки вибраторного типа [1, 2], находящие широкое применение в радиотехнических комплексах с БЛА за счет возможностей согласования антенных элементов с распределительными линиями в широкой полосе частот, обусловленных отсутствием знакопеременных реактивных составляющих входных импедансов и значительным сопротивлением излучения [3, 4].

Характеристики антенных систем, подлежащих включению в состав радиоэлектронного комплекса, находятся по результатам электродинамического моделирования их приемопередающих структур, расположенных на объектах, контуры которых характерны для профилей поверхностей носителя. Параметры конструкций антенн, обладающих требуемыми характеристиками, определяются на основе решения обратной задачи, суть которой заключается в восстановлении комплексных амплитуд токов приемопередающих структур и несущих поверхностей по пространственно-частотному распределению возбуждающего электромагнитного поля [5].

### Теоретическая часть

В связи с необходимостью совершенствования мобильных радиотехнических комплексов как в направлении повышения эффективности передачи-приема и обработки сигналов, так и в направлении выполнения целевых функций в интересах защиты от преднамеренных деструктивных воздействий тема исследования является актуальной. Для комплексного решения указанных задач значительное внимание уделяется определению технического облика бортовых антенных систем [5].

За счет рационального выбора параметров конструкций антенн реализуются возможности передачи-приема сигналов с высокими показателями пространственно-частотной избирательности и пространственной селекции потоков, полезных и мешающих радиоизлучений. При этом применение низкопрофильных малогабаритных приемопередающих структур способствует уменьшению числа и фоновой контрастности демаскирующих признаков, позволяющих выполнять преждевременное обнаружение радиоэлектронных комплексов средствами радиолокационного мониторинга [6, 7].

Алгоритм анализа характеристик АР с применением аналитических и численных расчетов: блок-схема разработанного алгоритма приведена на рисунке 1, последовательность достижения поставленной цели пронумерована в соответствии с порядком проведения расчетов.

Моделирование решетки электрических вибраторов, расположенных на боковой поверхности круглого идеально проводящего цилиндра конечной длины, базируется на нахождении асимптотических оценок электрического поля в дальней зоне несущей поверхности при исходном представлении токов несущей поверхности распределением токов цилиндра бесконечной протяженности [8, 9].

Вначале определяется критерий синтеза АР (блок 1), который задает направление максимума КНД решетки и уровни комплексной ДН для множества угловых положений [10]. Далее (блок 2) осуществляется ввод исходных данных, определяющих исследуемую конструкцию АР, задаются расстояние между элементами решетки и их количество. Блок 3 определяет линейную или кольцевую структуру антенны с последующим расчетом в блоке 4 соответствующих фазовых соотношений и парциальных диаграмм (блок 5).

В соответствии с методом неопределенных множителей Лагранжа – LaGrange's method of undetermined multipliers формирование ДН, проходящей через заданные уровни, сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [11, 12], как показано в блоке 6. Расчет комплексных амплитуд токов на элементах решетки и построение ДН осуществляются в блоках 7 и 8 соответственно. Корректировка ДН ведется в цикле проверки критерия

синтеза (блок 9) за счет выбора новых точек аппроксимации (блок 10). Этапы с 1 по 10 составляют основу аналитического расчета, как показано на рисунке 1.

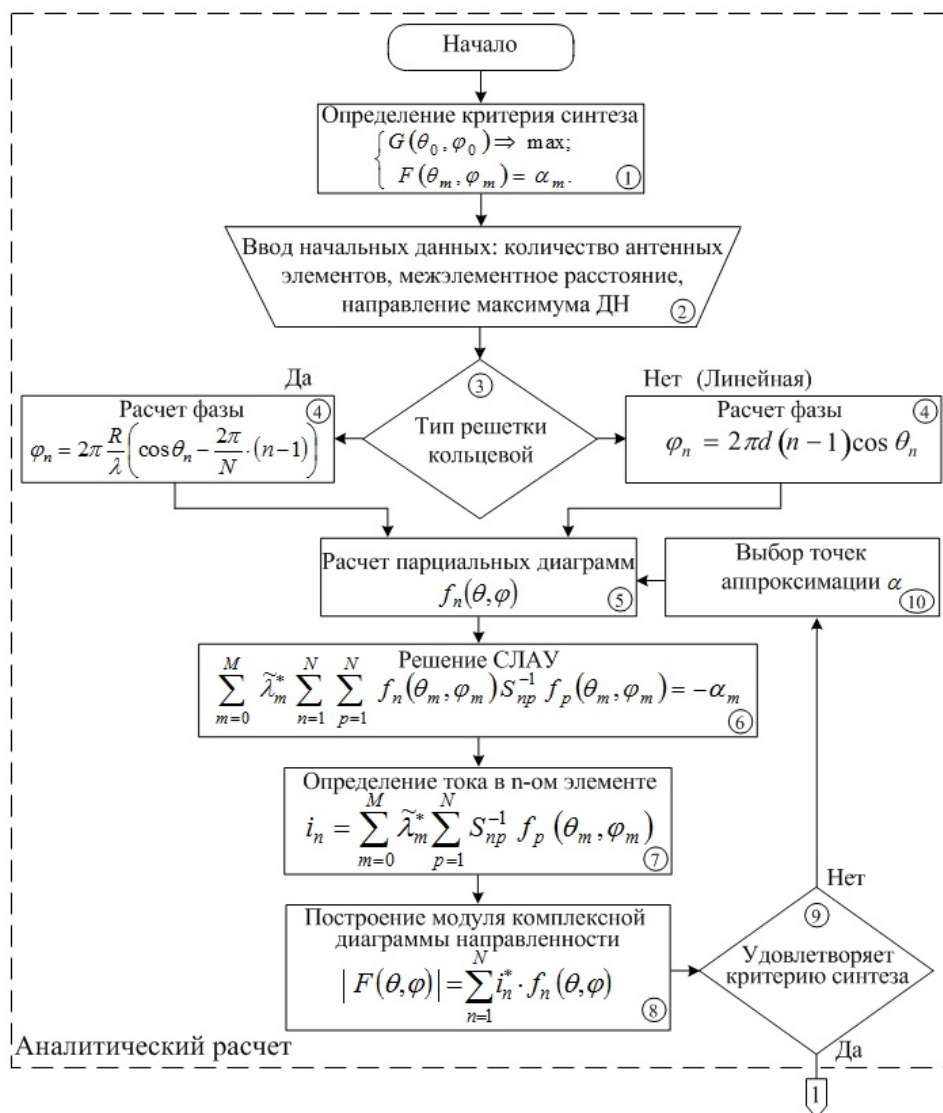


Рисунок 1 – Аналитическая часть алгоритма

Figure 1 – Analytical part of the algorithm

Комплексные токи элементов АР с помощью встроенного вычислителя CCR – Combine Calculation Results импортируются в программу электродинамического моделирования CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio [13] (блок 11). Рассчитываются ДН и КНД исследуемой конструкции АР (блок 12). Сравнение КНД с пороговым значением, определяющим эффективность антенны, проводится в блоке 13. Операции в блоках 14-17 позволяют находить параметры конструкций и реально достижимые характеристики исследуемых АР. Таким образом, 11-17 блоки образуют область численных расчетов, рисунок 2.

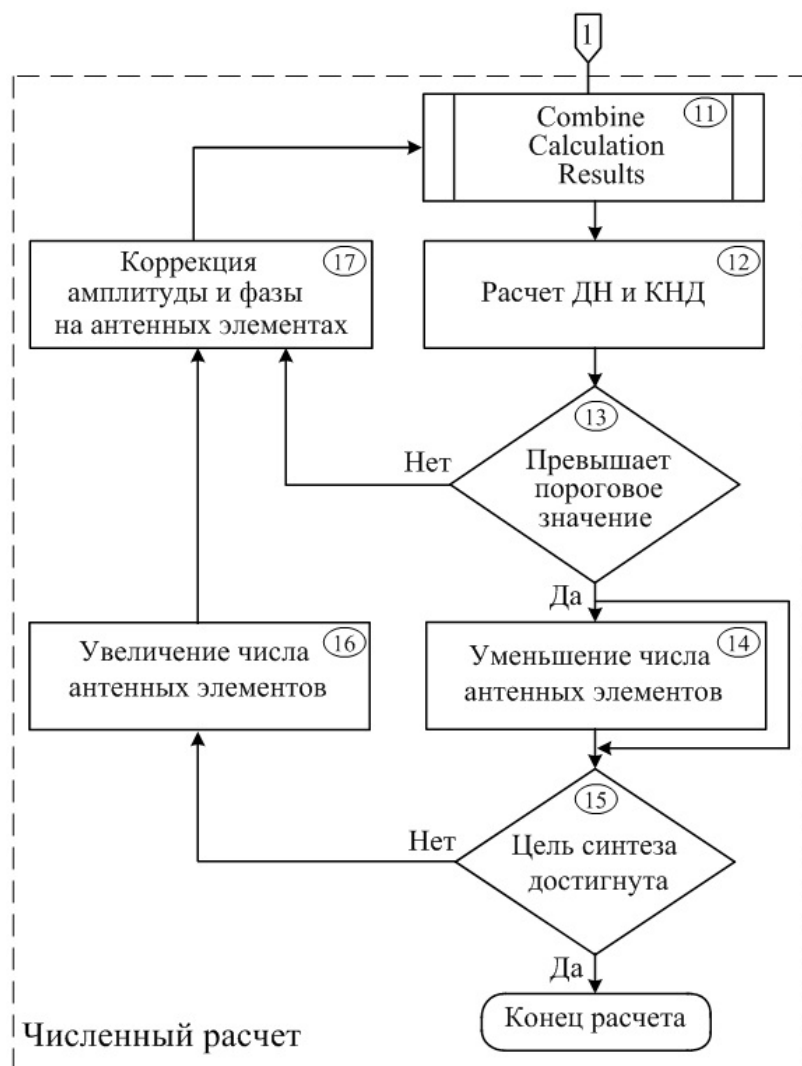
Разработанный алгоритм позволяет исследовать направленные свойства решеток различного конструктивного исполнения в зависимости от электрических размеров, числа антенных элементов, количества и углового положения контролируемых уровней ДН.

### Электродинамический анализ конструкций вибраторных решеток на цилиндре с тонким диэлектрическим покрытием боковой поверхности

С использованием пакета электродинамического моделирования CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave вычисляются поле и показатели направленности решетки электрических вибраторов на цилиндре конечной длины при дискретизации несущей по-

верхности из условий наиболее точного представления поверхностных токов при минимально возможном числе отсчетов [13].

Система моделирования устройств сверхвысоких частот (СВЧ) – CST Microwave Studio представляет собой быстрый и точный программный пакет моделирования сложных объемных СВЧ устройств, таких как антенны и волноводы, с целью получения их универсальных S-параметров. С нашей точки зрения, антенные системы удобно анализировать, используя теорию четырехполюсников, оценивая падающую и отраженную волны на их входах и выходах. Связь между этими волнами описывается волновой матрицей рассеяния или матрицей S-параметров, зависящей от частоты. Во многих случаях матрица рассеяния позволяет полностью описать СВЧ устройства без строгой формулировки электромагнитной задачи и определения граничных условий [14, 15].



**Рисунок 2 – Численная часть алгоритма**  
**Figure 2 – Numerical part of the algorithm**

В основе программы лежит метод аппроксимации для идеальных граничных условий Perfect Boundary Approximation (PBA), дополняющий хорошо зарекомендовавшие себя методы конечных элементов FEM (Finite Element Method) и конечных интегралов FITF(T)D (Finite Integration Technique in Frequency (Time) Domain). В любом методе, связанном с моделированием конечных элементов, все поверхности разбиваются на небольшие элементы. Если модель СВЧ устройства задана только прямыми плоскостями, то число анализируемых элементов разбиения невелико, и расчет проводится относительно быстро. При использовании в СВЧ устройствах криволинейных поверхностей для их аппроксимации требуется намного

большее количество элементов разбиения, что приводит к значительным временным затратам при анализе. Комбинация методов РВА и FEM позволяет оперативно решать задачи моделирования сложных СВЧ устройств с криволинейными поверхностями.

Система моделирования имеет в своем составе графический редактор для расчета трехмерной структуры и модули построения рассчитанных частотных зависимостей. Система построения исследуемых структур базируется на ядре геометрического моделирования Geometric Modeling Kernel (GMK) ACIS, используемом большинством известных Computer-Aided Design (CAD) систем. Данная технология позволяет задавать сложные объемные конфигурации СВЧ устройств [16].

Моделирование выполнялось с привлечением 3-х персональных ЭВМ, объединенных в стек с помощью ядра распределенных вычислений Distributed Computing Main Controller (DSMC), на основе 24-ядерных серверных процессоров Intel Xeon GOLD 6212 и объемом оперативной памяти каждого средства 64 Гб.

### Экспериментальные исследования

Для задания местоположения антенных элементов и расчета токов цилиндра использована цилиндрическая система координат  $(\rho, \varphi, z)$ , для вычисления поля, диаграммы направленности и коэффициента направленного действия решетки задавалась сферическая система координат  $(r, \varphi, \theta)$ .

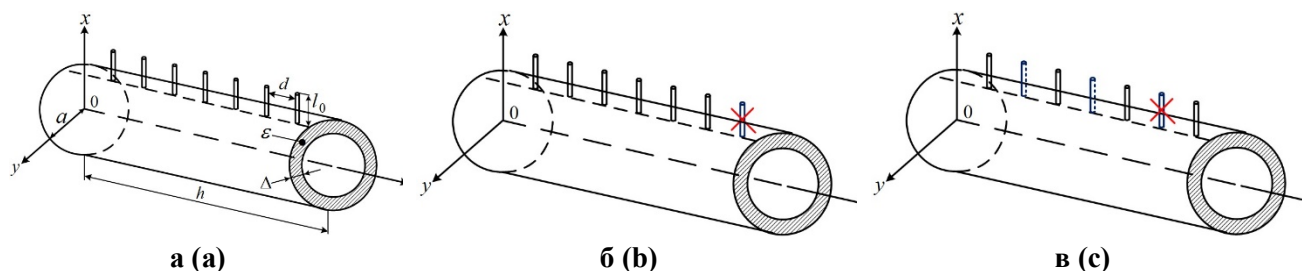
Рассмотрим 3 варианта конструкций АР, расположенных на фюзеляже БЛА самолетного типа, представляемого в виде идеально проводящего цилиндра конечной длины с диэлектрическим покрытием:

- вариант № 1 – 7-элементная решетка с максимальным КНД и возможностью оптимизации распределения токов на элементах для формирования 6-ти нулей или уровней ДН в направлении мешающих радиоизлучений, как показано на рисунке 3, а.

Цилиндр электрическим радиусом  $a/\lambda = 0,3$  и длиной  $h/\lambda = 5$  расположен вдоль оси  $Oz$  цилиндрической системы координат. Решетка состоит из  $N$  электрических вибраторов, характеризующихся электрической длиной  $l_0/\lambda = 0,2$  с шагом  $d/\lambda = 0,25$ ; первый элемент размещается в точке с координатами  $(a, 0, l)$ . Края цилиндра проходят через параллельные плоскости с координатами  $z = \pm h/2$ . Размеры цилиндра и решетки удовлетворяют условиям:  $(N-1)d \leq h - |l|$ ,  $|l| \leq h/2$ . Толщина диэлектрического покрытия составляет  $\Delta/\lambda = 0,1$ . Электрофизические свойства покрытия характеризуются диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 3,2$ ;

- вариант № 2 – 6-элементная решетка, полученная из 1 варианта путем удаления первого вибратора. Представленная конструкция решетки моделирует исходную антенну из 7-ми элементов, поврежденную в результате эксплуатации (рисунок 3, б). Необходимо минимизировать потери КНД и обеспечить функционирование антенны по целевому назначению. Синим цветом выделен утраченный вибратор;

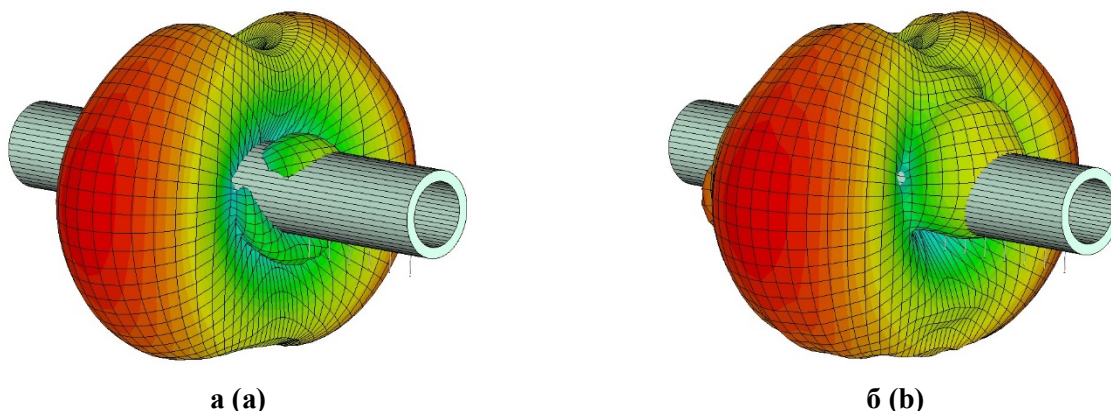
- вариант № 3 – решетка из 4-х вибраторов, полученная из 1 варианта путем удаления 2-го с последующим отключением 4-го и 6-го вибраторов для обеспечения условия эквидистантности элементов в целях корректной работы диаграммообразующей схемы (рисунок 3, в). Данный вариант конструкции моделирует потерю второго (четного) вибратора в результате механического повреждения с последующим отключением оставшихся четных элементов (обозначены синим пунктиром), проводится анализ трансформации формы ДН и регистрируются изменения значений КНД.



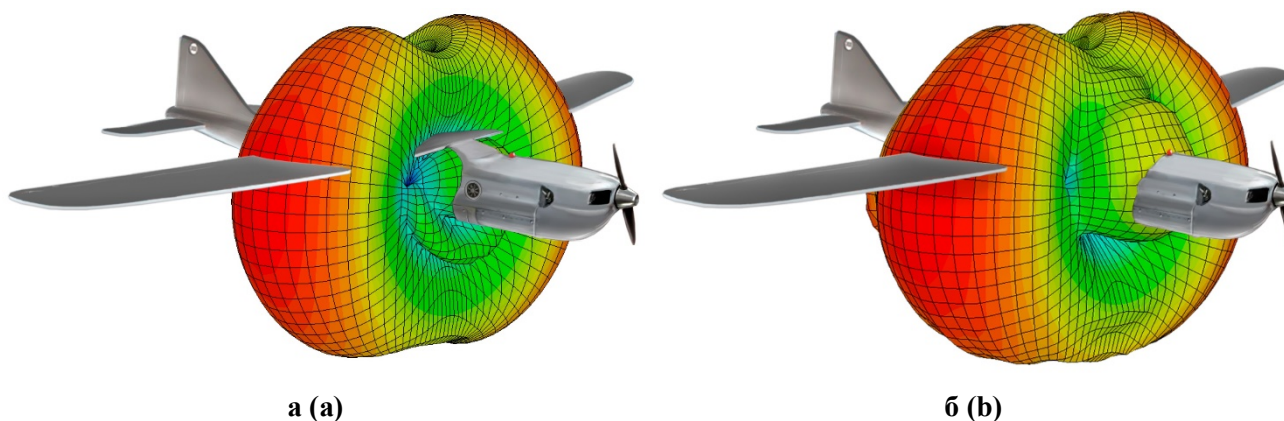
**Рисунок 3 – Исследуемые АР: вариант № 1(а), вариант №2 (б) и вариант №3 (с)**  
**Figure 3 – The investigated ARs: option № 1 (a), option № 2 (b) and option № 3 (c)**

В целях определения степени соответствия аппроксимации БЛА самолетного типа цилиндром конечных размеров проведено сравнение характеристик направленности АР, полученных на цилиндрическом объекте, длина и радиус которого соответствовали габаритным размерам фюзеляжа (рисунок 4) и характеристик, рассчитанных с применением полноразмерной 3D модели БЛА «Орлан-10» для частоты  $f = 3$  ГГц. Различия в полученных результатах составили не более 1...2 %, что подтверждает возможность применения рассматриваемого приближения при анализе характеристик АР.

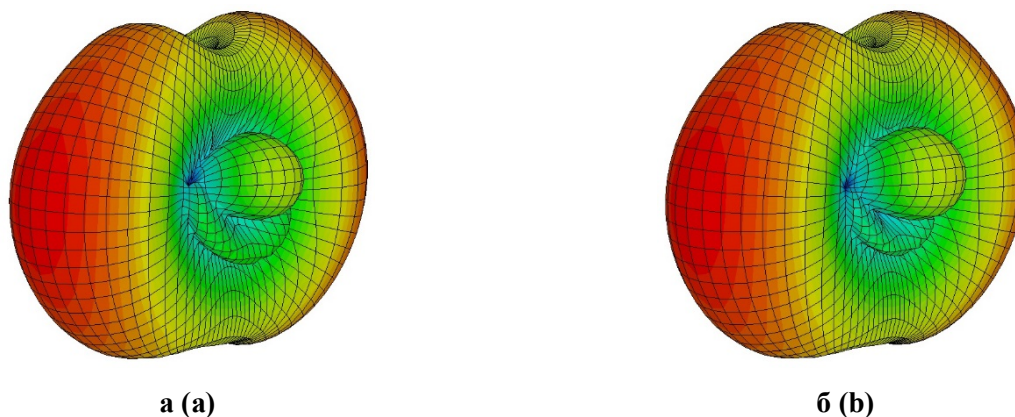
На рисунке 5, а показана исходная ДН решетки из  $N = 7$  вибраторов при КНД 8,7 дБ, а на рисунке 5, б – ДН этой же решетки с нулем глубины – 20 дБ в направлении воздействия радиопомехи, КНД составляет 7,2 дБ. Анализ диаграмм показал, что в нижней полуплоскости, где ранее имел место максимум бокового лепестка, в интересах защиты от преднамеренных деструктивных воздействий сформирован глубокий минимум ДН.



**Рисунок 4 – Начальная ДН антенной решетки (а), с нулем в нижней полуплоскости (б)**  
**Figure 4 – The initial antenna array pattern (a), with zero in the lower half-plane (b)**



**Рисунок 5 – Вид исходной ДН антенной решетки из 7 элементов (а), после оптимизации (б)**  
**Figure 5 – View of the original antenna array pattern of 7 elements (a), after optimization (b)**



**Рисунок 6 – ДН антенной решетки: вариант № 2 (а), вариант № 3 (б)**  
**Figure 6 – Antenna array pattern, option 2 (a), option 3 (b)**

На рисунке 6, а показана ДН решетки 2 варианта конструктивного исполнения, за счет оптимизации распределения токов на вибраторах сведены к минимуму потери КНД до 8,4 дБ. Для 3-го варианта конструкции решетки ДН (приведена на рисунке 6, б) наблюдается расширение главного со спадом уровня бокового лепестков и уменьшение КНД до значений 8,6 дБ.

Таким образом, проведен анализ направленных свойств антенных решеток, расположенных на БЛА самолетного типа. Рассмотрены их исходные конструкции и конструкции, полученные в результате возможных повреждений целевых нагрузок с вибраторными АР при эксплуатации. Например, разрушение отдельных элементов решетки при жесткой посадке БЛА с использованием парашютно-амортизационной системы.

### Заключение

С применением теории неопределенных множителей Лагранжа и электродинамического программного продукта CST MWS обоснована структура алгоритма анализа характеристик АР и разработана его блок-схема, в которой выделены области проведения аналитических и численных расчетов.

Применяя программное обеспечение CST MWS на 3-х персональных компьютерах с процессорами Intel Xeon GOLD 6212 и оперативной памятью 64 Гб, объединенных в единый вычислительный контур, проведен расчет ДН и КНД линейных эквидистантных вибраторных АР, размещенных на металлическом цилиндре конечных размеров с тонким диэлектрическим покрытием. Установлено, что формирование секторного провала в исходной ДН приводит к снижению КНД решетки на 1,5 дБ. Уменьшение количества вибраторов при прогнозируемых повреждениях АР снижает её КНД на 0,1...0,3 дБ. Незначительные потери КНД объясняются проводимой коррекцией токов на вибраторах решётки по разработанному алгоритму с поддержанием его распределения равномерным.

### Библиографический список

1. Ашихмин А. В. Проектирование и оптимизация сверхширокополосных антенных устройств и систем для аппаратуры радиоконтроля. М.: Радио и связь, 2005. 365 с.
2. Ашихмин А. В. Моделирование малогабаритных сверхширокополосных антенн / под ред. В.Б. Авдеева. – Воронеж: Воронежский госуниверситет, 2005. 223 с.
3. Резников Г. Б. Антенны летательных аппаратов. М.: Советское радио, 1967. 416 с.
4. Шатраков Ю. Г., Ривкин М. И., Цымбаев Б. Г. Самолетные антенные системы. М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
5. Неганов В. А., Табаков Д. П., Яровой Г. П. Современная теория и практические применения антенн. М.: Радиотехника, 2009. 720 с.
6. Ананьин Э. В., Ваксман Р. П., Патраков Ю. М. Методы снижения радиолокационной заметности // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. № 4/5. С. 5-21.

7. **Львова Л. А.** Радиолокационная заметность летательных аппаратов. Снежинск: РФЯЦ ВНИИТФ. 2003. 232 с.
8. **Неганов В. А., Осипов О. В., Раевский С. Б., Яровой Г. П.** Электродинамика и распространение радиоволн / под ред. В. А. Неганова и С. Б. Раевского. М.: Радио и связь, 2004. 648 с.
9. **Васильев Е. Н.** Возбуждение тел вращения. М.: Радио и связь, 1987. 271 с.
10. **Обуховец В. А., Мельников С. Ю.** Оптимизация диаграмм направленности антенных решеток // в кн.: Рассеяние электромагнитных волн. – Таганрог: ТРТУ, 1999. С. 93-101.
11. **Кашин В. А.** Методы фазового синтеза антенных решеток // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 1. С. 47-60.
12. **Бахрах Л. Д., Кременецкий С. Д.** Синтез излучающих систем (теория и методы расчета). М.: Радио и связь, 1974. – 232 с.
13. **Курушин А. А., Пластиков А. Н.** Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: МЭИ, 2011. 155 с.
14. **Разиньков С. Н., Богословский А. В., Борисов Д. Н.** Исследование направленных свойств решеток элементарных электрических вибраторов на круглых идеально проводящих цилиндрах конечной длины // Радиотехника. 2020. № 2 (3). С. 46-54.
15. **Разиньков С. Н., Разинькова О. Э., Баранов С. О.** Анализ диаграмм направленности и бистатического рассеяния линейных антенных решеток беспилотного летательного аппарата со сниженной радиолокационной заметностью // Радиотехника. 2020. № 5(10). С. 43-52.
16. **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 // Сборник трудов XX Международной научно-технической конференции «Информатика: проблемы, методы, технологии». Воронеж: ВГУ, 2020. Часть 2. С. 368-377.

UDC 623.746:621.396.677.3

## ANALYSIS OF ANTENNA ARRAY CONSTRUCTIONS FOR RADIO ENGINEERING UNMANNED AVIATION COMPLEXES

**S. N. Razinkov**, Dr. Sc. (Phys. and Math.), associate professor, department of aircraft (and computer systems) control automation, VUNC VVS «VVA», Voronezh, Russia;

orcid.org/0000-0002-3987-0607, e-mail: razinkovsergey@rambler.ru

**A. V. Bogoslovsky**, Ph.D. (Tech.), deputy head, department of radio electronics, VUNC VVS «VVA», Voronezh, Russia;

orcid.org/0000-0002-6469-3366, e-mail: bogosandrej@yandex.ru

**D. N. Borisov**, Ph.D. (Tech.), associate professor, head of the department of Information technologies, Voronezh State University, Voronezh, Russia;

orcid.org/0000-0002-1265-7195, e-mail: borisov@sc.vsu.ru

**E. V. Syomka**, lecturer, department of radio electronics, VUNC VVS «VVA», Voronezh, Russia;

orcid.org/0000-0002-0194-6979, e-mail: semka\_elya@mail.ru

*An algorithm has been developed for analyzing the directivity characteristics of antenna arrays (AA) used in target loads of unmanned aerial vehicles (UAV) from the composition of radio engineering unmanned aerial complex (UAC). The features of algorithm structure are revealed, physical and mathematical justification for each stage of its implementation is given with the selection of areas for analytical and numerical calculations.*

*Using the software for three-dimensional electrodynamic modeling CST MWS - Computer Simulation Technology Microwave, directional diagrams (DD) were obtained and directivity coefficients (DC) of vibrator arrays placed on metal cylinder of finite dimensions with dielectric coating were calculated.*

*The aim is to analyze AA structures with assessment of their DD and DC, placed on aircraft-type UAV of radio-technical BAC using electro-dynamic modeling software.*

*It was found that when a zero with the depth of – 20 dB is formed in side lobe of 7-element antenna array for design option № 1, directivity loss does not exceed 1,5 dB from initial value. With the decrease in the*

number of vibrators to 6 when considering the 2nd version of AA, its directivity was 8.4 dB, in the case of reducing the number of vibrators to 4 while maintaining the total length of grating, directivity reached 8,6 dB.

**Key words:** antenna array designs, analysis algorithm, analytical and numerical calculations, unmanned aerial vehicle.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2022-79-3-11

### References

1. **Ashikhmin A. V.** *Proektirovanie i optimizatsiya sverhshirokopolosnyh antennoykh ustroystv i sistem dlya apparatury radiokontrolya* (Design and optimization of ultra-wideband antenna devices and systems for radio monitoring equipment). Moscow: Radio and communication. 2005, 365 p. (in Russian).
2. **Ashikhmin A. V.** *Modelirovanie malogabaritnykh sverhshirokopolosnykh anten* (Modeling of small-sized ultra-wideband antennas) / pod red. V.B. Avdeeva. Voronezh: Voronezh State University. 2005, 223 p. (in Russian).
3. **Reznikov G. B.** *Antennny letatel'nykh apparatov* (Aerials of aircraft). Moscow: Sovetskoe radio. 1967, 416 p. (in Russian).
4. **Shatrakov Yu. G., Rivkin M. I., Tsybaev B. G.** *Samoletnye antennoye sistemy* (Aeroplane antenna systems). Moscow: Mashinostroenie. 1979, 184 p. (in Russian).
5. **Neganov V. A., Tabakov D. P., Yarovoy G. P.** *Sovremennaya teoriya i prakticheskie primeneniya anten* (Modern theory and practical applications of antennas). Moscow: Radio Engineering. 2009, 720 p. (in Russian).
6. **Ananyin E. V., Vaksman R. P., Patrakov Yu. M.** *Metody snizheniya radiolokatsionnoy zametnosti. Zarubezhnaya radioelektronika*. 1994, no. 4/5, pp. 5-21 (in Russian).
7. **Lvova L. A.** *Radiolokatsionnaya zametnost' letatel'nykh apparatov* (Radar visibility of aircraft). Snezhinsk: RFNC VNIITF. 2003, 232 p. (in Russian).
8. **Neganov V. A., Osipov O. V., Raevsky S. B., Yarovoy G. P.** *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* (Electrodynamics and radio wave propagation). Edited by V.A. Neganov and S.B. Rayevsky. Moscow: Radio and Communications. 2004, 648 p. (in Russian).
9. **Vasiliev E. N.** *Vozbuzhdeniye tel vrashcheniya* (Excitation of bodies of rotation). Moscow: Radio and Communications. 1987, 271 p. (in Russian).
10. **Obukhovets V. A., Melnikov S. Yu.** *Optimizatsiya diagramm napravlenosti antennoykh reshetok* (Optimization of directional patterns of antenna arrays. In the book: Scattering of electromagnetic waves). Taganrog: TRTU. 1999, pp. 93-101. (in Russian).
11. **Kashin V. A.** *Metody fazovogo sinteza antennoykh reshetok. Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 1997, no. 1. pp. 47-60 (in Russian).
12. **Bakhrakh L. D., Kremenetsky S. D.** *Sintez izluchayushchikh sistem: teoriya i metody rascheta* (Synthesis of radiating systems: theory and calculation methods). Moscow: Radio and Communications. 1974, 232 p. (in Russian).
13. **Kurushin A. A., Plastikov A. N.** *Proektirovanie SVCH ustroystv v srede CST Microwave Studio* (Designing microwave devices in the CST Microwave Studio environment). Moscow: MEI. 2011. 155 p. (in Russian).
14. **Razinkov S. N., Bogoslovsky A. V., Borisov D. N.** *Issledovanie napravlennykh svoystv reshetok elementarnykh elektricheskikh vibratorov na kruglykh ideal'no provodyashchikh cilindrah konechnoy dliny. Radiotekhnika*. 2020, no. 2 (3), pp.46-54 (in Russian).
15. **Razinkov S. N., Razinkova O. E., Baranov S. O.** *Analiz diagramm napravlenosti i bistaticheskogo rasseyaniya lineynykh antennoykh reshetok bespilotnogo letatel'nogo apparata so snizhennoy radiolokatsionnoy zametnost'yu. Radiotekhnika*. 2020, no. 5(10), pp. 43-52 (in Russian).
16. **Bogoslovsky A. V., Borisov D. N., Razinkov S. N., Razinkova O. E.** *Modelirovanie i analiz diagramm napravlenosti reshetok elementarnykh elektricheskikh vibratorov na bokovoy poverkhnosti cilindra konechnoy dliny. Sbornik trudov HKH Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatika: problemy, metody, tekhnologii»*. Voronezh: VGU. 2020, part 2, pp. 368-377 (in Russian).