

# **Электродинамический анализ и синтез антенных решеток для беспилотных комплексов мониторинга со сниженной радиолокационной заметностью**

С. Н. Разиньков, email: razinkovsergey@rambler.ru

О. Э. Разинькова, email: razinkova-olga@rambler.ru

А. В. Евсеев, email: superfisherman1@mail.ru

Ю. В. Сторожук, email: yu.storozhyk@yandex.ru

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (ВУНЦ ВВС «ВВА»), г. Воронеж, Россия

***Аннотация.** Выполнен обзор методов электродинамического анализа и синтеза антенных решеток для беспилотных комплексов мониторинга со сниженной радиолокационной заметностью. Оценены возможности применения этих методов для обоснования технических путей построения средств мониторинга на беспилотных летательных аппаратах с требуемыми показателями эффективности выполнения функциональных задач и защищенности от систем контроля воздушного пространства.*

***Ключевые слова:** Беспилотный летательный аппарат, комплекс мониторинга, антенная решетка, электродинамическое моделирование, радиолокационная заметность объекта.*

## **Введение**

Для скрытного мониторинга обстановки в удаленных регионах и труднодоступных районах со сложным профилем местности широкое применение находят радиотехнические комплексы [1] с беспилотными летательными аппаратами (БЛА), характеризующиеся низкими уровнями радиолокационной заметности [2].

Высота полета БЛА обеспечивает значительную дальность прямой видимости [3], превосходящую значения, достижимые для наземных средств мониторинга, а мобильность комплексов позволяет оперативно переносить усилия по добыванию данных и сосредотачивать усилия по мониторингу в заданных областях [1]. Снижение радиолокационной заметности входит в перечень мер по достижению защищенности БЛА от систем контроля воздушного пространства, реализация которых способствует бескомпроматному выполнению функциональных задач мониторинга [4].

---

© Разиньков С. Н., Разинькова О. Э., Евсеев А. В., Сторожук Ю. В., 2022

Перечень ключевых вопросов создания малозаметных беспилотных комплексов мониторинга включает поиск технических решений по разработке их антенных систем. Облик конструкций бортовых антенн определяется на компромиссной основе при совместном удовлетворении противоречивых требований по эффективности приема [1] и плотности потока энергии вторичного излучения сигналов [2, 4]. Коэффициенты направленного действия (КНД) антенн должны обеспечивать требуемые энергетические потенциалы радиоканалов, а диаграммы направленности (ДН) – показатели пространственной избирательности приема сигналов и помехозащищенности аппаратуры мониторинга [4]. Повышение КНД антенны, способствующее возрастанию дальности действия комплекса, может сопровождаться увеличением уровня боковых лепестков ДН, создавая побочные каналы для воздействия помех внешних источников. При этом, в соответствии с теоремой Умова-Пойнтинга [3], улучшение показателей направленности приводит к возрастанию плотности потока энергии электромагнитного поля, рассеиваемого антенными нагрузками, что определяет увеличение эффективных площадей рассеяния (ЭПР) комплексов в целом.

Для нахождения технических путей построения антенных систем для малозаметных беспилотных комплексов мониторинга требуется решить две группы задач.

Первая группа включает в себя задачи электродинамического анализа антенн для установления взаимосвязей их КНД, ДН и ЭПР с параметрами приемных конструкций и несущих поверхностей.

Вторая группа объединяет задачи синтеза, суть которых состоит в нахождении параметров конструкций антенн для реализации требуемых КНД, ДН и ЭПР при установленных взаимосвязях с характеристиками несущих поверхностей. Требуемые направленные и рассеивающие, как правило, определяются по результатам решения задачи двухэтапного синтеза [5], где сначала определяются параметры конструкции антенны, позволяющие достичь установленный КНД при ограничениях на форму ДН, а затем – требуемую ЭПР при контроле изменений достигнутой ДН.

В предлагаемой работе проведен обзор методов и исследованы возможности анализа и синтеза антенных решеток (АР), применяемых в беспилотных комплексах мониторинга со сниженной радиолокационной заметностью. Целесообразность использования решеток в комплексах обусловлена малыми массогабаритными показателями, позволяющими минимизировать потери аэродинамических характеристик БЛА при получении значительных дальностей приема информационных сигналов за счет их синфазного сложения в различных приемных каналах. При амплитудно-фазовой корректировке токов решеток формируются ДН,

способные выполнять пространственную (пространственно-частотную) режекцию помех без применения вспомогательных компенсационных устройств [5, 6], а также уменьшаются ЭПР в секторах, опасных для обнаружения комплексов системами контроля воздушного пространства.

Цель работы – обоснование рациональных условий выбора методов анализа и синтеза АР для создания комплексов на БЛА с требуемыми показателями эффективности выполнения задач мониторинга и защиты от систем контроля воздушного пространства.

### **1. Задачи электродинамического анализа антенных решеток для беспилотных комплексов мониторинга**

Электродинамический анализ АР для комплексов мониторинга на БЛА выполняется в интересах решения следующих основных задач [7]:

- исследование базовых компонентов конструкций и АР в целом с установлением взаимосвязей их параметров с характеристиками приема и рассеяния сигналов;

- оценка эффективности приема и вторичного излучения сигналов АР на несущих поверхностях, соответствующих фрагментам корпусов БЛА.

В настоящее время в контексте решения первой из указанных задач разработаны основы анализа идеально проводящих круглых цилиндров резонансных размеров, являющихся базовыми компонентами АР вибраторного типа, и методы решения их краевых задач при разложении поверхностных токов в ряды пространственных гармоник. Плотности поверхностных токов представляются в виде векторов продольных и азимутальных компонент. Распределение токов находится путем суммирования бесконечных рядов Фурье с весовыми коэффициентами азимутальных гармоник, численные значения которых определяются как суммы последовательностей базисных функций краевой задачи [3, 7]. Построены модели рассеяния электромагнитных волн, возбуждаемых элементарными электрическими (магнитными) диполями, на цилиндрах конечной длины. Исследованы направленные свойства элементарных излучателей, расположенных вблизи боковых и торцевых поверхностей цилиндров [3, 6].

Однако область применения указанных результатов ограничена условием монохроматического приближения возбуждающего поля, при котором токи объектов представляются гармоническими колебаниями с циклическими частотами несущих при отсутствии переходных процессов их формирования [7, 8]. Данное ограничение не позволяет исследовать закономерности возбуждения цилиндров импульсными излучениями; распределения поверхностных токов объектов являются нестационарными, что определяет необходимость анализа их изменений

не только в различных точках пространства, но и в различные моменты времени с учетом длительности возбуждающих воздействий [7].

Кроме того, известные методы применимы для анализа объектов больших электрических размеров, где для токов 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 приеме широкополосного (сверхширокополосного) сигнала электрические размеры антенных элементов, определяемые для текущей частоты его спектра [3], принадлежат не только квазиоптической, но и резонансной области [3, 6], в которой исключается их представление протяженными объектами;

- постановка задач нестационарного возбуждения антенных элементов выполнена при контроле условия Зоммерфельда для поля излучения на бесконечности [3] и условия обращения в нуль поля на нулевой частоте спектра; для исследования АР требуется применять граничные условия на поверхностях элементов для суперпозиции их полей в интересах учета электромагнитного взаимодействия через вторичное излучение.

В этой связи в работе предлагаются:

- метод электродинамического анализа компонентов приемных структур АР, возбуждаемых импульсными волновыми процессами. В отличие ранее известных, базирующихся на поиске решений векторных краевых задач в виде бесконечных рядов пространственных гармоник стационарных поверхностных токов [3, 6, 7], он основан на нахождении пространственно-временного распределения гармоник токов в виде произведения последовательностей пространственных и временных базисных функций;

- электродинамические модели решеток электрических вибраторов. В отличие от ранее известных моделей, предназначенных для расчета характеристик антенных систем, возбуждаемых монохроматическими волновыми процессами, в предлагаемых моделях устанавливаются зависимости пространственно-временного распределения токов от угло-временного распределения возбуждающих полей через операторы краевых задач в режиме приема импульсных радиосигналов.

В рамках решения второй задачи анализа с использованием метода интегральных уравнений построены модели антенн на проводящих и диэлектрических экранах и обоснованы способы обеспечения заданных направленных свойств за счет выбора профиля и электрофизических параметров несущих поверхностей.

Однако полученные методические результаты не используются для исследования АР ввиду отсутствия электромагнитных связей между элементами через поля вторичного излучения.

Для устранения отмеченного недостатка в работе предлагаются новые электродинамические модели АР для комплексов мониторинга на БЛА.

В отличие от известных моделей, разработанных для исследования АР в однородном изотропном пространстве, комплексные амплитуды токов антенных элементов находятся путем вычисления их значений при граничных условиях для электрического поля в свободном пространстве [3] и умножения на дифракционные коэффициенты несущих экранов [7]. В результате устанавливается взаимосвязь ДН АР с электрическими размерами несущих поверхностей, что позволяет учитывать эффекты экранирования рабочих секторов углов при размещении на БЛА. В отличие антенных систем на экранах квазиоптических и оптических электрических размеров, анализ которых в приближении физической оптики заключается в расчете токов приемных 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 связи в решетках через поля вторичного излучения.

## **2. Задачи синтеза антенных решеток для беспилотных комплексов мониторинга со сниженной радиолокационной заметностью**

Синтез АР беспилотных комплексов мониторинга со сниженной радиолокационной заметностью выполняется в интересах получения максимальными КНД и минимальными ЭПР при требуемых формах ДН.

При синтезе решеток применяются следующие критерии [6, 9]:

а) с минимизацией среднеквадратического отклонения (СКО) ДН от заданной формы;

б) с минимизацией СКО квадрата ДН от требуемой формы.

При использовании первого из указанных критериев достигается достаточно точное восстановление искомой ДН решетки, и ввиду того, что главный луч ДН имеет требуемую форму, минимизируются потери КНД. Однако КНД АР убывает пропорционально ширине ДН во второй степени, поскольку при приближении формы ДН к заданному виду накладываются ограничения не только на амплитуды, но и фазы токов антенных элементов [9].

Для второго критерия имеет место линейная зависимость снижения КНД по мере расширения главного луча ДН решетки, ввиду того, что

ограничения устанавливаются только для абсолютных значений токов антенных элементов [9].

Общий недостаток критериев заключается в следующем:

- нахождение токов АР сводится к решению математически некорректных задач [10] методами нелинейного программирования с применением неформализованных процедур регуляризации [11];

- при малых электрических размерах, характерных для АР целевых нагрузок БЛА мониторинга, формирование нулей в направлениях локальных экстремумов ДН в секторах ближних боковых лепестков сопровождается повышением уровня дальних боковых лепестков [12, 13], что способствует ухудшению пространственной избирательности и помехозащищенности приемника. Подавление среднего уровня боковых лепестков ДН за счет увеличения числа нулей сопровождается потерями КНД, приводящими к уменьшению эквивалентной чувствительности бортовой аппаратуры [12].

В работе представлен метод синтеза АР с максимальными КНД и минимальными ЭПР, достижимыми при требуемых формах ДН, для устройств с совместными и отдельными диаграммообразующими устройствами (ДООУ) в суммарных и разностных приемных каналах [14], базирующийся на достижении требуемых уровней ДН на множестве направлений без минимизации среднего уровня боковых лепестков.

Фиксация значений ДН для определенных угловых положений при отсутствии требований к форме боковых лепестков [12, 13] приводит к снижению потерь КНД антенной системы [9, 14]. Вместо одиночного неопределенного множителя Лагранжа, минимизирующего интеграл от квадрата разности искомой и требуемой ДН решетки, вычисляются множители Лагранжа [9] на множестве направлений и дискретных значений частот в полосе рабочих частот приемника.

Расчет распределения токов с параметрами в виде неопределенных множителей Лагранжа критерий основан на решении системы линейных уравнений с частичным обращением матрицы [10], элементами которой являются парциальные диаграммы антенных элементов. Как показано в [12], токи, удовлетворяющие используемому критерию, обеспечивают совпадение ДН АР в области главного луча с формами, достижимыми при применении критериев с минимизацией СКО ДН и ее квадрата от заданного вида. При последовательной коррекции распределения токов путем последовательного создания нулей ДН в направлениях локальных экстремумов формируются секторные провалы, позволяющие снизить средний уровень боковых лепестков, как и при использовании критерия синтеза с минимизацией СКО ДН от установленной формы.

Синтез решеток с нулями ДН, формируемыми с применением

совместных и отдельных ДОО, в отличие от известных методов, где выполнялся контроль смещения равносигнальных направлений [15], базируется 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.

### **Заключение**

Таким образом, проведен обзор методов электродинамического анализа и синтеза решеток для беспилотных комплексов мониторинга со сниженной радиолокационной заметностью.

Разработаны модели и метод анализа АР, позволяющие исследовать их базовые компоненты и конструкции в целом с установлением взаимосвязей параметров с характеристиками приема и рассеяния сигналов. Предложены критерии и метод синтеза АР с максимальными КНД и минимальными ЭПР при установлении ограничений на формы ДН с использованием аппарата неопределенных множителей Лагранжа.

Показано, что предпочтительным для получения заданной формы ДН с минимизацией потерь КНД АР является критерий, базирующийся на контроле соответствия формируемой и требуемой ДН на множестве фиксированных направлений.

Оценены возможности применения методов анализа и синтеза АР для обоснования технических путей построения средств мониторинга на БЛА с заданными показателями эффективности выполнения задач и защищенности от систем контроля воздушного пространства.

### **Список литературы**

1. Радзиевский, В. Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки / В. Г. Радзиевский, А. А. Сирота. – М. : Радиотехника, 2004. – 432 с.
2. Ананьин, Э. В. Методы снижения радиолокационной заметности / Э. В. Ананьин, Р. П. Ваксман, Ю. М. Патраков // Зарубежная радиоэлектроника. – 1994. – № 4/5. – С. 5-21.
3. Неганов, В. А. 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.
4. Меньшаков, Ю. К. Теоретические основы технических разведок / Ю. К. Меньшаков. – М. : МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008. – 536 с.
5. Разинькова, О. Э. Двухэтапный синтез антенной решетки с заданной диаграммой направленности и минимальной эффективной

площадью рассеяния / О.Э. Разинькова // Воздушно-космические силы: теория и практика. – 2021. – № 18. – С. 108-119.

6. Неганов, В. А. Современная теория и практические применения антенн / В. А. Неганов, Д. П. Табаков, Г. П. Яровой ; под ред. В. А. Неганова. – М. : Радиотехника, 2009. – 720 с.

7. Тимошенко, А. В. Современное состояние и задачи совершенствования методических основ построения антенных решеток беспилотных радиотехнических комплексов / А. В. Тимошенко, С. Н. Разиньков, О. Э. Разинькова и др. // Воздушно-космические силы: теория и практика. – 2020. – № 14. – С. 63-83.

8. Разинькова, О. Э. Модели идеальных проводников с осевой симметрией во внешнем нестационарном электромагнитном поле / О. Э. Разинькова // Воздушно-космические силы: теория и практика. – 2021. – № 18. – С. 120-131.

9. Кашин, В. А. Методы фазового синтеза антенных решеток / В. А. Кашин // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1997. – № 1. – С. 47-60.

10. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1986. – 288с.

11. Неганов, В. А. Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В. А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с.

12. Разиньков, С. Н. Синтез нулей диаграмм направленности резонансных и диапазонных антенных решеток с максимальными коэффициентами направленного действия / С. Н. Разиньков, А. В. Богословский, М. Ю. Лукин // Радиотехника. – 2017. – № 12. – С. 44-51.

13. Разиньков, С. Н. Направленные свойства решеток вибраторов, возбуждаемых сверхширокополосными квазирадиосигналами / С. Н. Разиньков // Радиотехника. – 2008. – № 6. – С. 97-101.

14. Попова, О. Э. Коэффициенты усиления решеток сверхширокополосных вибраторов, возбуждаемых радиосигналами с прямоугольной и гауссовской огибающими / О. Э. Попова, С. Н. Разиньков // Нелинейный мир. – 2008. – Т. 6. – № 11-12. – С. 718-726.

15. Мануилов, Б. Д. Оптимизация векторных диаграмм направленности моноимпульсных антенных решеток с совместным формированием лучей / Б. Д. Мануилов, П. Н. Башлы // Антенны. – 2004. – № 2 (81). – С. 51-58.