

Компьютерное моделирование и анализ характеристик приема и рассеяния сигналов щелевыми антенными решетками мобильных радиоэлектронных комплексов

С. Н. Разиньков¹, e-mail: razinkovsergey@rambler.ru,

Д. Н. Борисов², e-mail: borisov@sc.vsu.ru,

А. В. Богословский¹, e-mail: bogosandrej@yandex.ru

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А.

Гагарина» (г. Воронеж)

² Воронежский государственный университет

Аннотация. *С использованием компьютерной программы электродинамического моделирования CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio исследованы характеристики приема и рассеяния сигналов щелевыми антенными решетками мобильных радиоэлектронных комплексов. Проведен анализ диаграмм направленности и рассеяния решеток прямоугольных щелей на несущих металлизированных и диэлектрических поверхностях малогабаритных носителей. Исследованы закономерности изменения показателей пространственно-частотной избирательности приема и вторичного излучения сигналов при различных параметрах конструкций решеток, формах и отражательных свойствах несущих поверхностей.*

Ключевые слова: *Мобильный радиоэлектронный комплекс, щелевая антенная решетка, диаграмма направленности, диаграмма обратного рассеяния, компьютерная программа электродинамического моделирования.*

Введение

Основные направления совершенствования радиоэлектронных комплексов связаны с созданием образцов, подлежащих размещению на малогабаритных носителях воздушного базирования. Такие комплексы обладают высокими показателями мобильности, шириной зон действия, обусловленной дальностью прямой видимости при подъеме над земной поверхностью [1], и малыми эксплуатационными затратами вследствие отсутствия необходимости применения с аэродромов.

Ввиду ограничений на массогабаритные характеристики целевых нагрузок воздушных объектов традиционные технологии, используемые для повышения отношения сигнал-шум в каналах приемных устройств

на малошумящих усилителях со схемами согласования приемных структур на сосредоточенных элементах с коммутационными p - i - n диодами [2, 3], не позволяют достичь уровней, требуемых для реализации оптимальных алгоритмов обработки сигналов.

Поэтому важнейшим компонентом работ по созданию мобильных радиоэлектронных комплексов является разработка приемоизлучающих структур, обеспечивающих избирательный прием и усиление сигналов, а также пространственно-частотную селекцию помех. Поиск технических решений по выполнению эффективного приема сигналов проводится при ограничениях на интенсивность их вторичного излучения, нарушающего электромагнитную совместимость бортовых радиоэлектронных средств и являющегося причиной появления демаскирующих признаков [4, 5] для обнаружения комплексов системами контроля воздушного пространства.

Характеристики приема и рассеяния сигналов могут быть найдены по результатам электродинамического моделирования с применением компьютерных программ численного решения краевых задач и расчета компонентов электромагнитного поля [6, 7].

В предлагаемой работе с использованием компьютерной программы электродинамического моделирования CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio [6] проведен анализ диаграмм направленности (ДН) и рассеяния (ДР) антенных решеток прямоугольных щелей на плоских экранах из идеально проводящего и диэлектрического материала. Выбор щелевых решеток обусловлен формами элементов, встраиваемыми в корпуса, что позволяет сохранить характеристики мобильности носителей при размещении нагрузок на их бортах.

Цель работы – исследование закономерностей изменения ДН и ДОР приемоизлучающих структур при различных параметрах конструкций, формах и электрофизических свойствах несущих поверхностей.

1. Теоретические основы компьютерного моделирования приемоизлучающих структур радиоэлектронных комплексов

Концепция моделирования приемоизлучающих структур [6, 7] для радиоэлектронных комплексов с применением программы CST MWS базируется на сеточной дискретизации поверхностей при представлении корпусов носителей проводящими и диэлектрическими фрагментами гексагональной и тетрагональной формы.

Теоретические основы моделирования заключаются в следующем.

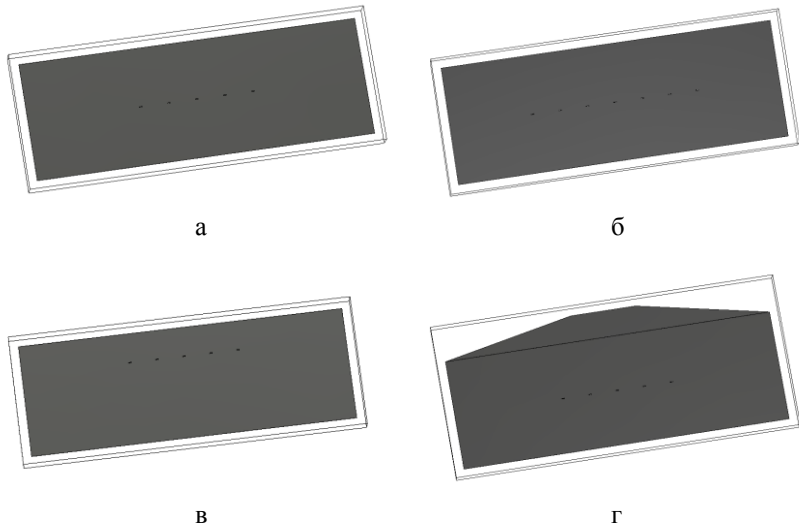
1. Расчет токов структуры проводится методом моментов Method of Moments при активации встроенного вычислителя Integral Equation Solver для преобразования математически некорректных интегральных уравнений краевой задачи [5, 8] в системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно массива комплексных амплитуд токов решетки и экрана.

2. Компоненты принимаемого (рассеиваемого) поля находятся в виде асимптотических оценок его распределения в дальней зоне объекта по массивам комплексных амплитуд токов антенных элементов и участков несущей поверхности, удовлетворяющих решению краевых задач. Для идеально проводящих носителей постановка краевых задач выполняется при граничных условиях РВА – Perfect Boundary Approximation [5, 6]. Вследствие представления поверхностных токов и полей в самосогласованной форме [5, 6, 8] достигается потенциально высокая точность их восстановления при аппроксимации значениями в точках дискретизации области определения. Поиск решения в точках дискретизации поверхности структуры, а не объема занимаемого ею пространства позволяет в значительной мере сократить вычислительные затраты на обращение матричного оператора сформированной СЛАУ, что обеспечивает нахождение рациональных параметров структур при вариации значений в серии расчетов.

2. Результаты анализа приемоизлучающих структур мобильных радиоэлектронных комплексов с применением компьютерной программы электродинамического моделирования

Расчет ДН и ДОР щелевых антенных решеток на плоских экранах, выполненных из идеально проводящего и диэлектрического материала, осуществлялся на персональной ЭВМ с процессором Intel Core i7-10700K и модулем памяти DDR4 объемом 32 Гб.

Вид несущих поверхностей и варианты расположения решеток представлены на рис. 1.



а – идеально проводящая поверхность с решеткой из $N=5$ элементов, б – идеально проводящая поверхность с решеткой из $N=7$ элементов; в – поверхность из диэлектрика (полипиррола) с решеткой из $N=5$ элементов, г – крыло трапецидальной формы с решеткой из $N=5$ элементов

Рис. 1. Вид щелевых антенных решеток на плоских экранах

На рис. 2 приведены ДН щелевых антенных решеток из $N=5$ (а) и $N=7$ (б) элементов, расположенных с нормированным шагом $d/\lambda = 0,25$, где λ – длина волны, на равном удалении от граней идеально проводящего экрана с относительными значениями длины $L/\lambda = 38$ и ширины $a/\lambda = 4,3$.

На рис. 3 представлены ДН решеток аналогичной конструкции, размещенные на экране из полимерного композитного материала на основе полипиррола, способного поглощать электромагнитное излучение в диапазоне частот с коэффициентом перекрытия более 4.

Из сравнения результатов, приведенных на рис. 2 и 3, следует, что при замене идеально проводящей поверхности на диэлектрический экран ДН решеток приближаются к формам, характерным для однородного изотропного пространства, при более высоких (на 4,5...4,8 дБ) средних уровнях боковых лепестков. Увеличение числа антенных элементов с $N=5$ до $N=7$ обуславливает сужение главных лучей при

одновременном уменьшении дальних боковых лепестков ДН решеток, приводящем к повышению их коэффициентов направленного действия (КНД) на 1,3 дБ.

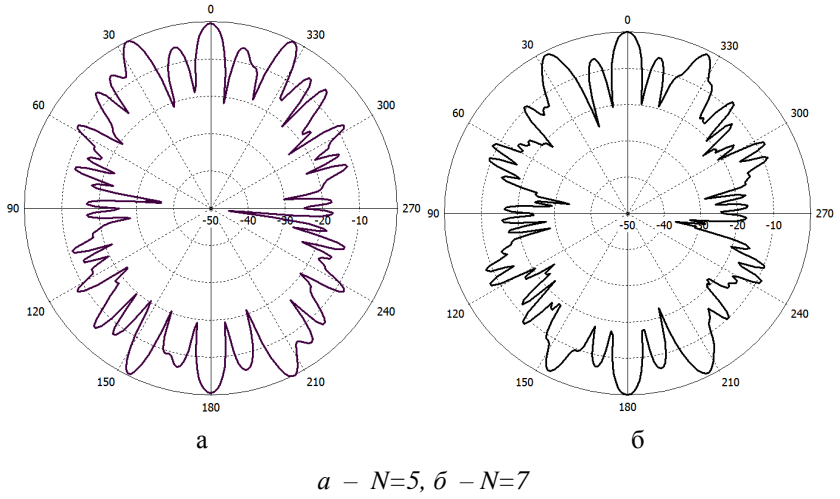


Рис. 2. ДН щелевых решеток на идеально проводящем экране

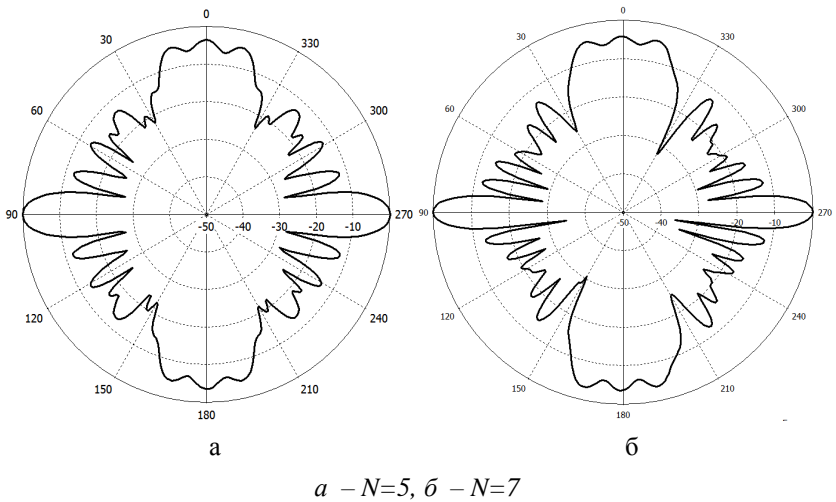
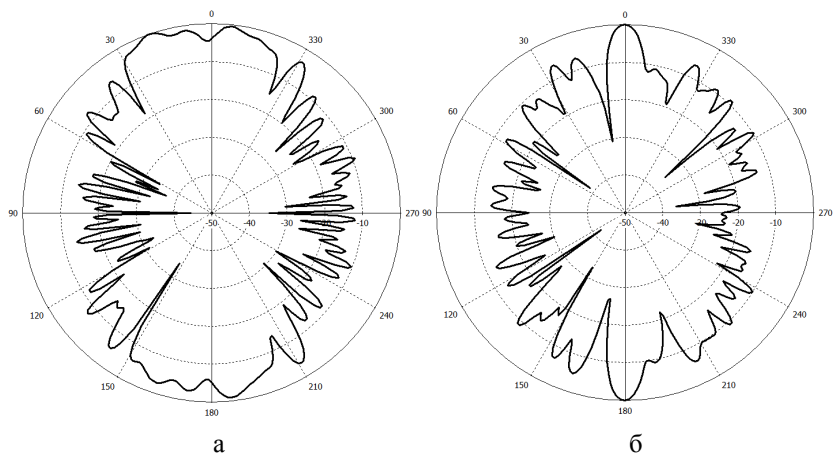


Рис. 3. ДН щелевых решеток на экране из полимерного композитного материала

На рис. 4 изображены ДН решеток из $N=5$ элементов с указанным выше нормированным шагом, расположенных на прямоугольном идеально проводящем экране при смещении относительно его центральной продольной оси на $\Delta/\lambda = 1$ (а) и поверхности трапецидальной формы при уменьшении ширины с $a/\lambda = 4,3$ в центре до $a/\lambda = 2,6$ на краях.

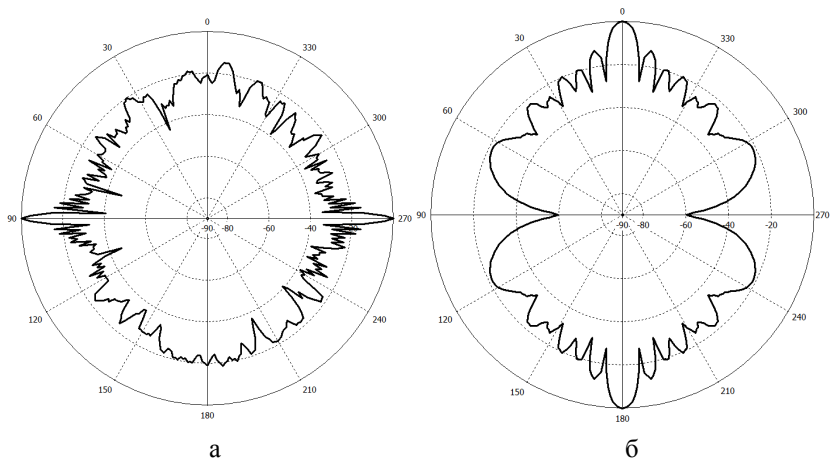


а – прямоугольной формы при смещении от центральной продольной оси, б – трапецидальной формы

Рис. 4. ДН линейных щелевых решеток из $N=5$ элементов, расположенных на крыле БЛА

Из сравнения представленных результатов с ДН решеток, приведенными на рис. 2а, можно утверждать, что изменение местоположения антенных элементов и формы несущей поверхности приводит к появлению асимметрии и увеличению числа и глубины локальных интерференционных экстремумов ДН. Данный эффект обусловлен изменением амплитудно-фазового распределения токов решетки вследствие влияния поверхностных волн, отраженных от кромок несущих экранов. При изменении формы поверхности из диэлектрического материала с высокими показателями прозрачности в радиодиапазоне наблюдаются менее существенные искажения ДН решеток.

На рис. 5 приведены ДР решеток из $N=7$ элементов на поверхности прямоугольной формы с металлизированным покрытием (а) и экране из полимерного материала (б).



а – с металлизированным покрытием, б – из полимерного материала

Рис. 5. ДОР линейных щелевых решеток из $N=7$ элементов, расположенных на крыле БЛА прямоугольной формы

Качественное различие представленных ДР определяется тем, что вторичное излучение решетки на идеально проводящей поверхности нивелируется полем, рассеиваемым на краях экрана, а поток поля, рассеиваемого решеткой на диэлектрической поверхности, в основном формируется за счет отражения электромагнитных волн от раскрывов щелей и антенных нагрузок.

Заключение

На основе электродинамического моделирования с использованием компьютерной программы CST MWS исследованы закономерности приема и рассеяния сигналов щелевыми антенными решетками мобильных радиоэлектронных комплексов. Проведен анализ ДН и ДР прямоугольных щелей на идеально проводящих и диэлектрических поверхностях малогабаритных носителей. Исследованы закономерности изменения показателей пространственно-частотной избирательности приема и вторичного излучения сигналов при различных параметрах конструкции решеток, формах и отражательных свойствах несущих поверхностей.

По результатам анализа установлено, что при замене идеально проводящей поверхности на диэлектрический экран форма ДН решетки приближается к виду, характерному для однородного изотропного пространства, с повышением средних уровней боковых лепестков на 4,5...4,8 дБ. Увеличение числа антенных элементов с $N=5$ до $N=7$ приводит к повышению КНД на 1,3 дБ с уменьшением среднего уровня дальних боковых лепестков ДН.

Полученные результаты составляют методическую основу для нахождения рациональных вариантов конструкций антенных систем в интересах достижения наибольшей эффективности выполнения функциональных задач мобильными радиоэлектронными комплексами при электромагнитной совместимости бортового оборудования и малой степени проявления демаскирующих признаков, содержащихся во вторичном электромагнитном излучении.

Список литературы

1. 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.
2. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник/ Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника. 2007. 874 с.
3. Братчиков, А.Н. Активные фазированные антенные решетки / А.Н. Братчиков, В.И. Васин, О.О. Василенко и др. // Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2004.– 488 с.
4. Анализ вибраторных антенных решеток малозаметных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа / С.Н. Разиньков, А.В. Богословский, Д.Н. Борисов и др. // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. №18. С. 227–236 [Электронный ресурс] Режим доступа: http://академия-ввс.рф/images/data/zhurnal_vks/18-2021/227-236.pdf. Дата обращения 15.12.2022 г.
5. Разиньков С.Н., Богословский А.В., Борисов Д.Н. Сравнительный анализ отражательных свойств цилиндров с полной и частичной металлизацией боковых поверхностей // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. №19. С. 302–310 [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://vva.mil.ru/upload/site21/B7st1fUZlu.pdf>. Дата обращения 15.12.2022 г.
6. Курушин А.А., Пластик А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. – М.: Издательство МЭИ, 2011. – 155 с.
7. Банков С.Е., Пластик А.Н. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ. – М.: СОЛОН-Пресс, 2017. – 316 с.

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