

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396.677

БУСЕЛ
Михаил Олегович

**СИНТЕЗ КОНФОРМНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК
С ЗАДАНЫМ УРОВНЕМ КРОССПОЛЯРИЗАЦИОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Минск 2019

Научная работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь».

Научный руководитель

Калинин Александр Александрович,
кандидат технических наук, доцент, начальник
сектора НПООО «ОКБ ТСП»

Официальные оппоненты:

Юрцев Олег Анатольевич, доктор
технических наук, профессор, профессор
кафедры информационных радиотехнологий
учреждения образования «Белорусский
государственный университет информатики и
радиоэлектроники», заслуженный деятель
науки и техники БССР

Бобков Юрий Юрьевич, кандидат
технических наук, доцент, ведущий научный
сотрудник ОАО «КБ РАДАР» - управляющая
компания холдинга «Системы радиолокации»

Оппонирующая организация

Государственное учреждение «Научно-
исследовательский институт Вооруженных
Сил Республики Беларусь»

Защита диссертации состоится 6 июня 2019 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел.: 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « » мая 2019 г.

**И.о. ученого секретаря
совета по защите диссертаций Д 02.15.02
доктор технических наук, профессор**

А.А. Борискевич

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в составе радиоэлектронных систем различного назначения все чаще находят применение конформные антенные решетки (КАР), такие как цилиндрические, конические, сферические и другие, расположенные на телах более сложной формы. Конформные антенные решетки представляют собой системы излучателей, расположенных на выпуклой поверхности. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с плоскими и линейными антенными решетками, основным из которых является возможность широкоугольного (до 360°) сканирования лучом неизменных ширины и формы в азимутальной и (или) угломестной плоскостях. Однако в поле их излучения помимо составляющей основной поляризации присутствует паразитная (кроссполяризационная) составляющая. В связи с этим может наблюдаться ряд негативных явлений: снижение коэффициента усиления антенны, уменьшение мощности излучения на основной поляризации поля, снижение помехозащищенности радиотехнических систем и ряд других. В целях уменьшения влияния этих негативных факторов, а в ряде случаев и их полного устранения необходимо предусматривать возможность управления поляризацией отдельных излучателей КАР. Для этого необходимо выполнять анализ и управление поляризационной структурой поля излучения ее элементов. В связи с этим задача анализа и синтеза КАР с заданным уровнем кроссполяризационного излучения является весьма актуальной.

Работа посвящена снижению уровня кроссполяризационного излучения путем разработки метода синтеза КАР по заданным требованиям к векторной комплексной диаграмме направленности (ВКДН) за счет учета поляризационных свойств ее излучающих элементов. Синтез подразумевает расчет такого амплитудно-фазового распределения (АФР) токов в раскрытие антенны, которое обеспечивает формирование ВКДН с заданными свойствами или близкой к ней по некоторому или определенному критерию. Вопрос построения конкретной конструкции КАР, воспроизводящей требуемое АФР, составляет предмет отдельных исследований и в работе не рассматривается.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации включена в утвержденные планы научной работы УО «Военная академия Республики Беларусь» и соответствует Перечню перспективных направлений диссертационных исследований Вооруженных Сил в области разработки методов синтеза, анализа, моделирования и проектирования систем и устройств. Содержание диссертационной работы соответствует пунктам: 5.10, 5.11 и 13 Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг.; 7.2 и 9.1 приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг.

Материалы диссертации использованы в НИР «Математическая модель цилиндрической антенной решетки с учетом поляризационных свойств излучателей» (шифр «Поляризация»), утвержденной начальником УО «ВА РБ» от 28.04.2017 г. №266/67-17.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы – исследование характеристик конформных антенных решеток и разработка метода снижения уровня их кроссполяризационного излучения.

Задачи исследования:

1. Обосновать необходимость оценки поляризационных свойств конформных антенных решеток и их элементов в процессе проектирования.
2. Разработать математическую модель излучателя конформной антенной решетки с заданными значениями параметров поляризации.
3. Разработать математическую модель конформной антенной решетки с учетом поляризационных свойств излучателей, позволяющую анализировать две взаимно ортогональные составляющие поля излучения всей решетки.
4. Разработать метод синтеза конформных антенных решеток, позволяющий сформировать требуемую векторную (амплитудную и поляризационную) диаграмму направленности с заданным уровнем кроссполяризационного излучения.
5. Определить возможности разработанного метода синтеза на основе численного моделирования конформных антенных решеток по требованиям к двум взаимно ортогональным компонентам поля излучения.

Объект исследования – конформные антенные решетки.

Предмет исследования – методы решения задачи синтеза конформных антенных решеток с заданным уровнем кроссполяризационного излучения.

Выбор объекта и предмета исследования обусловлен актуальностью разработки радиотехнических систем с конформными антенными решетками, обладающими рядом полезных свойств, отсутствующих у линейных и плоских излучающих систем.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель излучателя конформной антенной решетки с заданными значениями параметров поляризации, *позволяющая*:

- рассчитывать две взаимно ортогональные составляющие поля излучения одиночного элемента конформной антенной решетки;
- управлять параметрами поляризации одиночного излучателя конформной антенной решетки;
- рассчитывать поле излучения элемента решетки при заданной ориентации его в пространстве.

2. Разработана математическая модель конформной антенной решетки с учетом поляризационных свойств излучателей, на основе которой

произведены расчеты кроссполяризационных диаграмм направленности трех типов антенных решеток:

- минус 22 дБ для сферической антенной решетки;
- минус 23 дБ для цилиндрической антенной решетки;
- минус 28 дБ для конической антенной решетки.

3. Разработан метод синтеза конформных антенных решеток на основе математической модели излучателя конформной антенной решетки с заданными значениями параметров поляризации, позволяющий реализовать требования к кроссовой диаграмме направленности. Для реализации заданного уровня кроссполяризационного излучения в конформных антенных решетках необходимо использовать излучатели с двумя взаимно ортогональными входами (основным и компенсационным). Анализ результатов численного моделирования на основе разработанного метода синтеза показал, что уровень кроссполяризационного излучения в направлении главного лепестка диаграммы направленности снижен не менее чем на 25 дБ для сферической и цилиндрической антенных решеток и не менее чем на 17 дБ для конической решетки в сравнении с антенными решетками, имеющими равномерное амплитудное распределение и фазовое распределение, учитывающее кривизну конформной поверхности при незначительном искажении диаграммы направленности по основной компоненте поля излучения.

4. Впервые получены результаты сравнительного анализа кроссовой составляющей поля излучения на примере сферических антенных решеток, синтезированных различными методами:

- без задания требований к поляризационным свойствам и составленным из излучателей с одним входом;
- предложенным методом с заданием требований к поляризационным свойствам и составленным из излучателей с двумя взаимно ортогональными (основным и компенсационным) входами;
- предложенным методом с заданием требований к поляризационным свойствам и составленным из излучателей с двумя взаимно ортогональными (основным и компенсационным) входами, но с отключенным компенсационным входом.

Проведенный анализ показал, что только использование разработанного метода синтеза, учитывающего поляризационные свойства излучателей, обеспечивает выполнение требований к заданному уровню кроссполяризационного излучения.

5. Впервые проведен расчет двух взаимно ортогональных компонент поля излучения сферических антенных решеток на основании разработанного метода синтеза. Анализ результатов позволил сделать следующие выводы относительно возможностей разработанного метода синтеза:

- возможность расчета уровней кроссполяризационных составляющих поля излучения с уровнями -30 , -35 , -40 дБ;
- возможность расчета ширины главного лепестка диаграммы направленности по основной компоненте поля излучения в двух плоскостях $2\theta_{0,5} = 2\varphi_{0,5} = 5^\circ(10^\circ \text{ и } 15^\circ)$;

– уровни бокового излучения антенны на основной компоненте поля превышают не более чем на 2 дБ заданные значения.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод синтеза конформной антенной решетки с заданным уровнем кроссполяризационного излучения, основанный на математической модели излучателя конформной антенной решетки с заданными значениями параметров поляризации, отличающийся от известных методов возможностью синтезировать конформные антенные решетки с заданным размещением излучателей (при выполнении условия единственности главного максимума) с учетом поляризационных свойств излучателей, позволяющий проводить расчет амплитудно-фазового распределения тока в пределах заданной активной области конформной антенной решетки по требованиям к двум взаимно ортогональным компонентам поля излучения решетки, обеспечивающий снижение уровня кроссполяризационного излучения в направлении главного лепестка не менее чем на 25 дБ для сферической и цилиндрической антенных решеток, не менее чем на 17 дБ для конической решетки в сравнении с антенными решетками, имеющими равномерное амплитудное распределение и фазовое распределение, учитывающее кривизну конформной поверхности.

2. Результаты численного моделирования конформных антенных решеток с заданным уровнем кроссполяризационной компоненты по требованиям к двум взаимно ортогональным компонентам поля излучения, синтезированных на основе разработанного метода, позволили получить новые, не описанные в литературе закономерности:

– особенности влияния амплитудно-фазового распределения возбуждения на уровень кроссполяризационного излучения конформных антенных решеток трех типов: сферической, цилиндрической, конической;

– особенности влияния ширины главного лепестка и уровня бокового излучения на основной составляющей поляризации, уровня кроссполяризационного излучения на значения параметров синтезированной диаграммы направленности.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты диссертационного исследования получены автором самостоятельно. Соавторами основных работ являются кандидат технических наук, доцент А. А. Калинин, кандидат технических наук, доцент А. Г. Романович, осуществлявшие определение целей, постановку задач и обсуждение полученных результатов. Соавторами научно-исследовательской работы являлись кандидат технических наук Нефедов Д.С., Осадчий И.А. и Кудерко В.В. с которыми проводился подбор литературы, а также обсуждались полученные результаты. Личный вклад диссертанта заключается:

– в разработке математической модели излучателя конформной антенной решетки с заданными значениями параметров поляризации;

- в разработке метода синтеза конформных антенных решеток, учитывающего поляризационные свойства излучающих элементов в ее составе и снижающего за счет этого уровень кроссполаризационного излучения решетки;
- в получении результатов численных исследований конформных решеток.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Теоретические и практические результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XVII, XVIII Республиканских научных конференциях студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (Гомель, ГГУ им. Ф.Скорины, 2014–2015 гг.); V, VI Международных научно-практических молодежных конференциях «Научные стремления» (Минск, ООО «Лаборатория интеллекта и Центр молодежных инноваций», 2014–2015 гг.); VIII, IX Международных специализированных научных конференциях «Проблемы повышения эффективности образовательного процесса на базе информационных технологий» (Минск, БГУИР, 2015–2016 гг.); Международной военно-научной конференции учреждения образования «Военная академия Республика Беларусь» «Актуальные проблемы военной науки и практики в современных условиях и пути их решения» (Минск, 23–24 апреля 2015 г.); V Международной научно-практической конференции авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республика Беларусь» «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации» (Минск, 14–15 мая 2015 г.).

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 8 статей, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 2,9 авторского листа; 7 публикаций в сборниках тезисов докладов научных конференций, а также 1 НИР.

Структура и объем диссертации

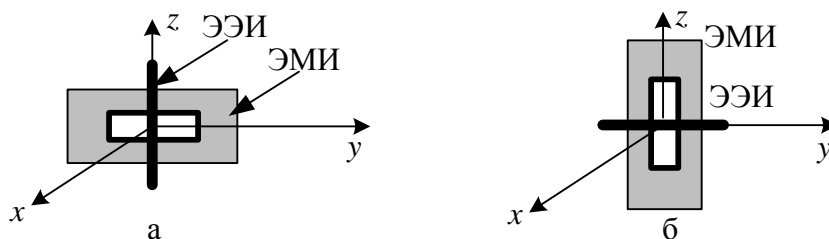
Диссертационная работа состоит из перечня сокращений, введения, общей характеристики работы, основной части из четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

Полный объем диссертационной работы составляет 169 страниц, из них 71 рисунок и 3 таблицы занимают 48 страниц, 2 приложения – 3 страницы, список использованных источников из 135 наименований – 11 страниц, список публикаций автора из 16 наименований – 2 страницы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

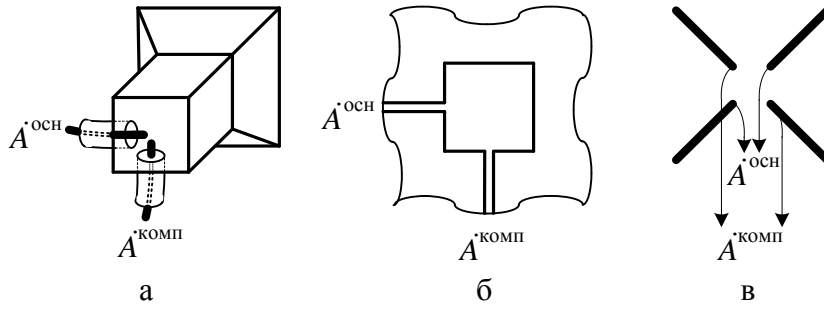
В первой главе диссертации приводится обзор общих сведений о КАР. Анализ поляризационных свойств выпуклых антенных решеток показал необходимость учета поляризационных свойств как одиночного излучателя, так и всей решетки. На основании понятия поляризационного вектора описаны две взаимно ортогональные компоненты поля: основная и кроссполяризационная (паразитная). Описаны три способа выбора основной и кроссполяризационной компонент поляризационного вектора в соответствии с тремя правилами Людвига. Показаны способы представления поляризации электромагнитных волн. Проведен анализ методов синтеза антенных решеток и выявлен круг вопросов, требующих дополнительных исследований. Показано, что одним из наиболее актуальных и перспективных направлений развития теории и техники антенн в настоящее время является разработка и построение КАР с заданным уровнем кроссполяризационного излучения. Одним из возможных путей достижения этой цели является учет поляризационных свойств излучателей путем разработки математической модели элемента КАР с заданными значениями параметров поляризации.

Во второй главе диссертации разработана математическая модель излучателя КАР с заданными значениями параметров поляризации. В качестве модели излучателя использовались две пары взаимно ортогональных элементарных электрических и магнитных излучателей (ЭЭИ и ЭМИ). Две пары элементарных излучателей образовали два элемента Гюйгенса (ЭГ) с линейной вертикальной и линейной горизонтальной поляризацией. Образованная на основе двух ЭГ модель излучателя соответствует третьему правилу Людвига по определению основной и кроссполяризационной компонент поля. Основным преимуществом третьего правила относительно первых двух является то, что оно наиболее близко соответствует случаю взаимного перехода основной поляризации в паразитную и, наоборот, при соответствующем вращении на 90° основного источника. Общий вид модели излучателя показан на рисунке 1, а возможные примеры реализации излучателей, имеющих два взаимно ортогональных входа (излучатель, имеющий два входа) [7], приведены на рисунке 2.



а – вертикальная поляризация; б – горизонтальная поляризация

Рисунок 1. – Модель элемента Гюйгенса в виде совокупности элементарных электрических и магнитных излучателей



а – рупорный; б – микрополосковый; в – турникетный над проводящей поверхностью
Рисунок 2. – Примеры реализации излучателя с заданными значениями параметров поляризации

Как видно из рисунка 1, поле излучения излучателя формируется двумя совмещенными ЭГ с взаимно ортогональными плоскостями поляризации (вертикальной и горизонтальной). Амплитуды и фазы возбуждения этих ЭГ будут определять поляризацию результирующего поля:

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = \dot{W}^B \vec{E}^B(\theta, \varphi) + \dot{W}^\Gamma \vec{E}^\Gamma(\theta, \varphi), \quad (1)$$

где \dot{W}^B (\dot{W}^Γ), $\vec{E}^B(\theta, \varphi)$ ($\vec{E}^\Gamma(\theta, \varphi)$) – комплексные весовые коэффициенты и векторы напряженности электрического поля вертикально (горизонтально) поляризованных ЭГ. Таким образом, такой излучатель должен иметь два входа, обеспечивающих излучение двух взаимно ортогональных волн линейной поляризации.

Поле антенны в дальней зоне через θ -ю и φ -ю компоненты описывается:

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = \vec{\theta}_0 (\dot{W}^B \dot{E}_\theta^B(\theta, \varphi) + \dot{W}^\Gamma \dot{E}_\theta^\Gamma(\theta, \varphi)) + \vec{\varphi}_0 (\dot{W}^B \dot{E}_\varphi^B(\theta, \varphi) + \dot{W}^\Gamma \dot{E}_\varphi^\Gamma(\theta, \varphi)), \quad (2)$$

где $\dot{E}_\theta^B(\theta, \varphi)$ ($\dot{E}_\theta^\Gamma(\theta, \varphi)$) и $\dot{E}_\varphi^B(\theta, \varphi)$ ($\dot{E}_\varphi^\Gamma(\theta, \varphi)$) – проекции векторов напряженности электрического поля вертикально (горизонтально) поляризованных ЭГ на θ -ю и φ -ю компоненты соответственно.

Выражения для ЭГ с вертикальной линейной поляризацией, состоящего из ЭЭИ и ЭМИ, имеют вид:

$$\vec{E}^{\text{ЭЭИ}} = \vec{\theta}_0 (-\sin \alpha'_0 \cos \theta \cos \varphi - \cos \alpha'_0 \sin \theta) + \vec{\varphi}_0 (\sin \alpha'_0 \sin \varphi); \quad (3)$$

$$\vec{E}^{\text{ЭМИ}} = \vec{\theta}_0 \cos \varphi - \vec{\varphi}_0 (\cos \theta \sin \varphi), \quad (4)$$

где $\vec{\theta}_0$ и $\vec{\varphi}_0$ – орты сферической системы координат.

Для ЭГ с горизонтальной линейной поляризацией, имеющего в своем составе ЭМИ и ЭЭИ, выражения описываются:

$$\vec{E}^{\text{ЭМИ}} = \vec{\theta}_0 (\sin \alpha'_0 \sin \varphi) + \vec{\varphi}_0 (-\sin \alpha'_0 \cos \theta \cos \varphi - \cos \alpha'_0 \sin \theta); \quad (5)$$

$$\vec{E}^{\text{ЭЭИ}} = -\vec{\theta}_0 (\cos \theta \sin \varphi) + \vec{\varphi}_0 \cos \varphi. \quad (6)$$

Использование описанной выше модели излучателя позволило разработать математическую модель КАР обеспечивающей расчет поляризационных параметров поля излучения за счет учета поляризационных свойств ее элементов.

Для конформных решеток трех типов – цилиндрической, конической и сферической – проведено математическое моделирование (рисунок 3).

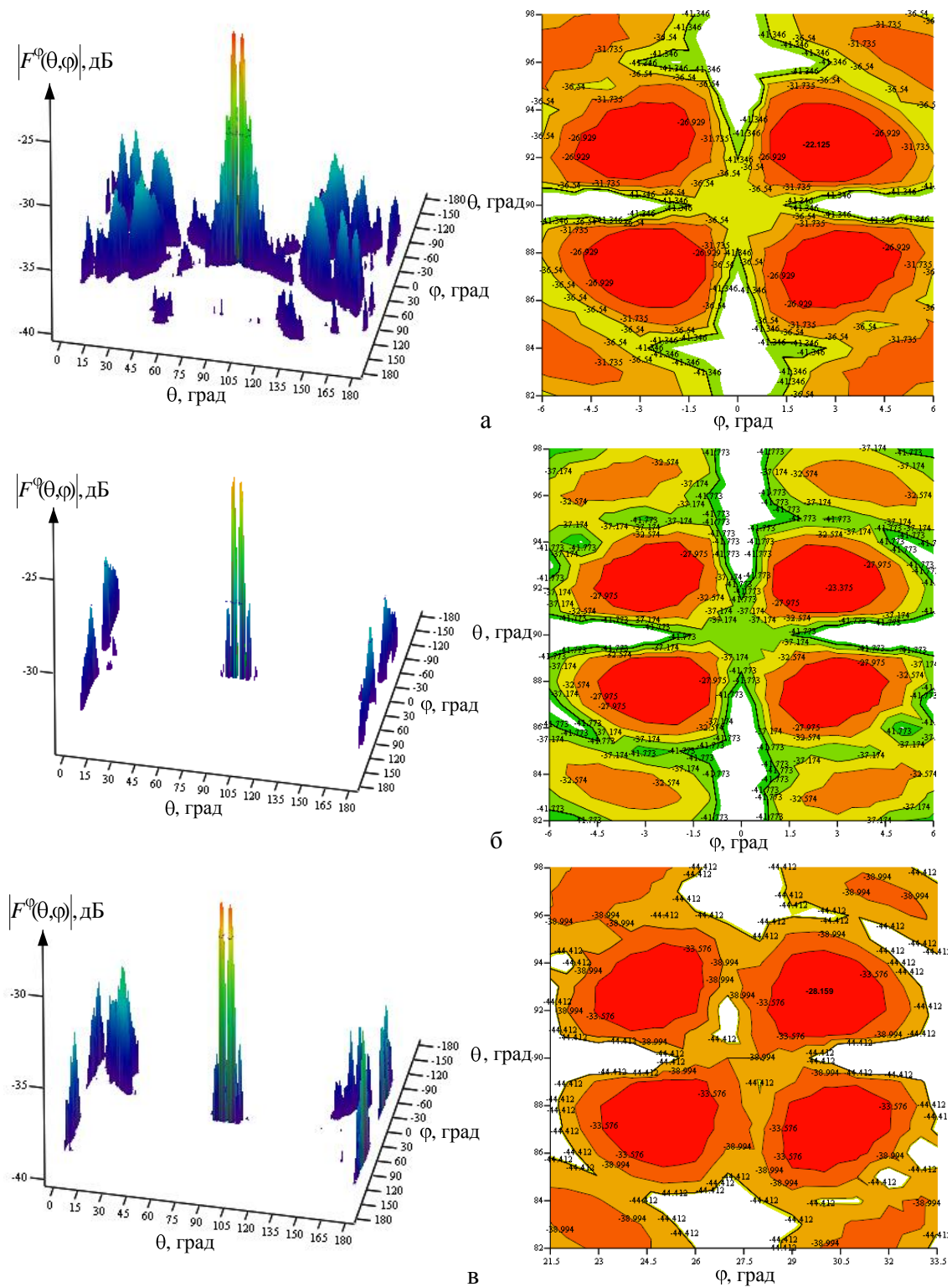


Рисунок 3. – Кроссполяризационные диаграммы направленности при равномерном амплитудном распределении и фазовом распределении, компенсирующем набеги фаз, с учетом кривизны поверхности антенных решеток

В качестве амплитудного распределения использовалось равномерное, а фазового – распределение, компенсирующее набеги фазы с учетом кривизны поверхности. Элементом решетки являлся излучатель апертурного типа [2, 4] с линейной вертикальной поляризацией. В исследуемых КАР использовалось квазигексагональное размещение излучающих элементов ($\Delta l \approx 0,6 \lambda$). Для

случая сферической антенной решетки (КАР) ее радиус выбран $R = 9\lambda$. В свою очередь, цилиндрическая и коническая антенные решетки имели следующие конструктивные параметры: одинаковые высоты $H = 18\lambda$, а радиусы соответственно $R = 9\lambda$ и $R_M = 5\lambda$, $R_B = 14\lambda$. Общее количество излучающих элементов антенных решеток незначительно различалось и составило: для сферической решетки – $N = 913$; для цилиндрической – $N = 847$; для конической – $N = 824$. При этом во всех КАР задавалась одинаковая активная область (телесный угол), ограниченная углами $2\theta_{\text{обл}} = 130^\circ$ и $2\varphi_{\text{обл}} = 130^\circ$.

Достоверность математической модели КАР с учетом поляризационных свойств подтверждается рисунком 3 а, который с графической точностью воспроизводит рисунок, представленный в монографии Л. Джефсона и П. Персона «Теория и проектирование конформных антенных решеток». Кроссполяризационная составляющая КАР, описанная в монографии, имеет уровень -21 дБ.

В третьей главе разработан метод синтеза КАР с заданным уровнем кроссполяризационного излучения (далее – метод 1) [6]. Требуемая ВКДН антенной решетки включает требования к комплексной ДН (на фазовую ДН требования не предъявлялись):

$$\vec{F}_{\text{ТР}}(\theta, \varphi) = \dot{F}_{\text{ТР}}(\theta, \varphi) \vec{p}_{\text{ТР}}(\theta, \varphi), \quad (7)$$

где $\dot{F}_{\text{ТР}}(\theta, \varphi)$ ($\vec{p}_{\text{ТР}}(\theta, \varphi)$) – требуемые комплексная и поляризационная ДН КАР.

Для наглядности будем рассматривать КАР с линейной вертикальной поляризацией. Введем коэффициент $K^{\text{КРОСС}}(\theta, \varphi)$, характеризующий отношение между двумя взаимно ортогональными компонентами поля:

$$\vec{p}_{\text{ТР}}(\theta, \varphi) = \vec{\theta}_0 + K^{\text{КРОСС}}(\theta, \varphi) \vec{\varphi}_0, \quad (8)$$

где θ -я – основная компонента, φ -я – кроссполяризационная компонента.

Векторная комплексная ДН КАР описывается следующим выражением:

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \dot{A}_n \vec{F}_{1n}(\theta, \varphi) e^{i O_n(\theta, \varphi)}, \quad (9)$$

где $\dot{A}_n = \dot{A}_n^{\text{B}} + \dot{A}_n^{\text{Г}}$ – амплитуда и фаза возбуждения вертикального и горизонтального входов n -го излучателя;

$\vec{F}_{1n}(\theta, \varphi)$ – ВКДН n -го излучателя, которая имеет следующий вид [2, 4]:

$$\vec{F}_{1n}(\theta, \varphi) = \dot{F}_{1\theta n}(\theta, \varphi) \vec{\theta}_0 + \dot{F}_{1\varphi n}(\theta, \varphi) \vec{\varphi}_0, \quad (10)$$

где $\dot{F}_{1\theta n}(\theta, \varphi)$ ($\dot{F}_{1\varphi n}(\theta, \varphi)$) – ДН n -го излучателя по θ -й (φ -й) компонентам поля:

$$\dot{F}_{1\theta n}(\theta, \varphi) = \dot{A}_n^{\text{B}} p_n^\theta(\theta, \varphi) F_{1\theta n}^{\text{B}}(\theta, \varphi) + \dot{A}_n^{\text{Г}} p_n^\varphi(\theta, \varphi) F_{1\theta n}^{\text{Г}}(\theta, \varphi); \quad (11)$$

$$\dot{F}_{1\varphi n}(\theta, \varphi) = \dot{A}_n^{\text{B}} p_n^\theta(\theta, \varphi) F_{1\varphi n}^{\text{B}}(\theta, \varphi) + \dot{A}_n^{\text{Г}} p_n^\varphi(\theta, \varphi) F_{1\varphi n}^{\text{Г}}(\theta, \varphi), \quad (12)$$

где $p_n^\theta(\theta, \varphi)$ ($p_n^\varphi(\theta, \varphi)$) – проекции поляризационного вектора n -го излучателя на θ -ю (φ -ю) компоненты соответственно.

Выражения (11), (12) в матричном виде записываются следующим образом:

$$[1 \quad K^{\text{KPOCC}}(\theta, \varphi)] = [p_n^\theta(\theta, \varphi) \quad p_n^\varphi(\theta, \varphi)] \begin{bmatrix} F_{10n}^B(\theta, \varphi) & F_{1\varphi n}^B(\theta, \varphi) \\ F_{10n}^\Gamma(\theta, \varphi) & F_{1\varphi n}^\Gamma(\theta, \varphi) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Коэффициенты $p_n^\theta(\theta, \varphi)$ и $p_n^\varphi(\theta, \varphi)$ имеют вид:

$$p_n^\theta(\theta, \varphi) = \frac{F_{1\varphi n}^B(\theta, \varphi)}{F_{1\varphi n}^B(\theta, \varphi) F_{10n}^\Gamma(\theta, \varphi) - F_{10n}^\Gamma(\theta, \varphi) F_{1\varphi n}^B(\theta, \varphi)} - \frac{K^{\text{KPOCC}}(\theta, \varphi) F_{10n}^B(\theta, \varphi)}{F_{1\varphi n}^B(\theta, \varphi) F_{10n}^\Gamma(\theta, \varphi) - F_{10n}^\Gamma(\theta, \varphi) F_{1\varphi n}^B(\theta, \varphi)}; \quad (14)$$

$$p_n^\varphi(\theta, \varphi) = \frac{K^{\text{KPOCC}}(\theta, \varphi) F_{10n}^B(\theta, \varphi)}{F_{1\varphi n}^B(\theta, \varphi) F_{10n}^\Gamma(\theta, \varphi) - F_{10n}^\Gamma(\theta, \varphi) F_{1\varphi n}^B(\theta, \varphi)} - \frac{F_{1\varphi n}^B(\theta, \varphi)}{F_{1\varphi n}^B(\theta, \varphi) F_{10n}^\Gamma(\theta, \varphi) - F_{10n}^\Gamma(\theta, \varphi) F_{1\varphi n}^B(\theta, \varphi)}. \quad (15)$$

По аналогии с методом парциальных диаграмм АФР в раскрытие КАР представлено в виде разложения в ряд Фурье [3, 5, 6]:

$$\dot{A}_n^B = \sum_{s=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \{ \dot{a}_{l,s}^B S_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] + \dot{b}_{l,s}^B C_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] \}; \quad (16)$$

$$\dot{A}_n^\Gamma = \sum_{s=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \{ \dot{a}_{l,s}^\Gamma S_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] + \dot{b}_{l,s}^\Gamma C_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] \}, \quad (17)$$

где $\dot{a}_{l,s}^B$ ($\dot{a}_{l,s}^\Gamma$) и $\dot{b}_{l,s}^B$ ($\dot{b}_{l,s}^\Gamma$) – комплексные коэффициенты разложения для
 вертикального (горизонтального) входа;
 $S_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] = \sin[l(\theta_n - \theta_0)] \sin[s(\varphi_n - \varphi_0)]$,
 $C_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] = \cos[l(\theta_n - \theta_0)] \cos[s(\varphi_n - \varphi_0)]$ – функции разложения [3, 5, 6].

После подстановки (16) и (17) в (15) и некоторых преобразований получено выражение для синтезированной ВКДН КАР:

$$\vec{F}_{\text{TP}}(\theta, \varphi) = \sum_{s=0}^S \sum_{l=0}^L \{ (\dot{a}_{l,s}^B + \dot{a}_{l,s}^\Gamma) (\dot{Z}_{l,s}^B(\theta, \varphi) + \dot{Z}_{l,s}^\Gamma(\theta, \varphi)) + (\dot{b}_{l,s}^B + \dot{b}_{l,s}^\Gamma) (\dot{Z}_{l,s}^B(\theta, \varphi) + \dot{Z}_{l,s}^\Gamma(\theta, \varphi)) \}, \quad (18)$$

где $\dot{Z}_{l,s}^B(\theta, \varphi)$ ($\dot{Z}_{l,s}^\Gamma(\theta, \varphi)$), $\dot{Z}_{l,s}^B(\theta, \varphi)$ ($\dot{Z}_{l,s}^\Gamma(\theta, \varphi)$) – базисные функции для вертикального (горизонтального) входа излучателя:

$$\dot{Z}_{l,s}^B(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ F_{10n}^B(\theta, \varphi) (p_n^\theta(\theta, \varphi) + p_n^\varphi(\theta, \varphi)) S_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \}; \quad (19)$$

$$\dot{Z}_{l,s}^B(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ F_{10n}^B(\theta, \varphi) (p_n^\theta(\theta, \varphi) + p_n^\varphi(\theta, \varphi)) C_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \}; \quad (20)$$

$$\dot{Z}_{l,s}^\Gamma(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ F_{10n}^\Gamma(\theta, \varphi) (p_n^\theta(\theta, \varphi) + p_n^\varphi(\theta, \varphi)) S_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \}; \quad (21)$$

$$\dot{Z}_{l,s}^\Gamma(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ F_{10n}^\Gamma(\theta, \varphi) (p_n^\theta(\theta, \varphi) + p_n^\varphi(\theta, \varphi)) C_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \}. \quad (22)$$

Как видно из выражения (18), суть предлагаемого метода заключается в представлении заданной ДН в виде разложения в ряд Фурье по системе

базисных функций $\dot{Z}_{l,s}^B(\theta, \varphi)$ ($\dot{Z}_{l,s}^\Gamma(\theta, \varphi)$), $\dot{Z}_{c,l,s}^B(\theta, \varphi)$ ($\dot{Z}_{c,l,s}^\Gamma(\theta, \varphi)$), нахождении комплексных коэффициентов $\dot{a}_{l,s}^B$ ($\dot{a}_{l,s}^\Gamma$) и $\dot{b}_{l,s}^B$ ($\dot{b}_{l,s}^\Gamma$) с дальнейшей подстановкой их в формулы (16 и 17) для расчета комплексных амплитуд возбуждения излучателей КАР.

Таким образом, разработанный метод предполагает использование в составе КАР элементов с двумя входами (основным и компенсационным), излучающих волны с взаимно ортогональной линейной поляризацией [7]. В дальнейшем будем их называть основным входом и компенсационным.

Работоспособность предложенного метода была проверена путем синтеза и последующего моделирования, описанных в главе 2 конформных антенных решеток трех типов с линейной вертикальной поляризацией.

На рисунке 4 изображены плоскостные кроссполяризационные ДН: кривая 1 – требуемая ДН, кривая 2 – ДН синтезированной решетки, кривая 3 – ДН при равномерном амплитудном распределении и фазовом распределении, учитывающем кривизну поверхности при возбуждении только одного входа n -го излучателя. Показано, что разработанный метод синтеза позволяет снизить для сферической и цилиндрической антенных решеток уровень кроссполяризационного излучения не менее чем на 25 дБ, для конической антенной решетки - не менее чем на 17 дБ. Представленные результаты показывают, что предложенный метод инвариантен к форме конформных поверхностей, представленных в данной главе.

Амплитудное распределение в раскрыве САР для основных и компенсационных входов излучателей, рассчитанное с помощью разработанного метода, представлено на рисунке 5.

Приведенные выше результаты исследования работоспособности предложенного метода основывались на моделировании КАР с линейной вертикальной поляризацией в качестве основной. Ниже приводятся результаты моделирования САР для линейной горизонтальной поляризации. В качестве элементов решетки использовались апертурные излучатели с одним (основным) входом и с двумя взаимно ортогональными (основным и компенсационным) входами [7].

Амплитудное распределение возбуждения основных входов излучателей, представленное на рисунке 5 а, имеет плавно спадающую форму, что свидетельствует об участии практически всех излучателей активной зоны решетки в формировании заданной ДН САР. При этом наибольший вклад в поле излучения будут вносить излучатели, расположенные в центре активной зоны решетки. Излучатели, находящиеся на краях активной области САР, наряду с излучением по основной компоненте будут излучать и кроссполяризационную компоненту. По мере удаления излучателей от центра решетки будет возрастать их вклад в кроссполяризационное излучение, поскольку именно в этих направлениях в ДН САР наблюдаются максимумы кроссполяризационных лепестков. Для таких излучателей возрастает амплитуда возбуждения компенсационного входа, что и демонстрирует амплитудное распределение, представленное на рисунке 5 б.

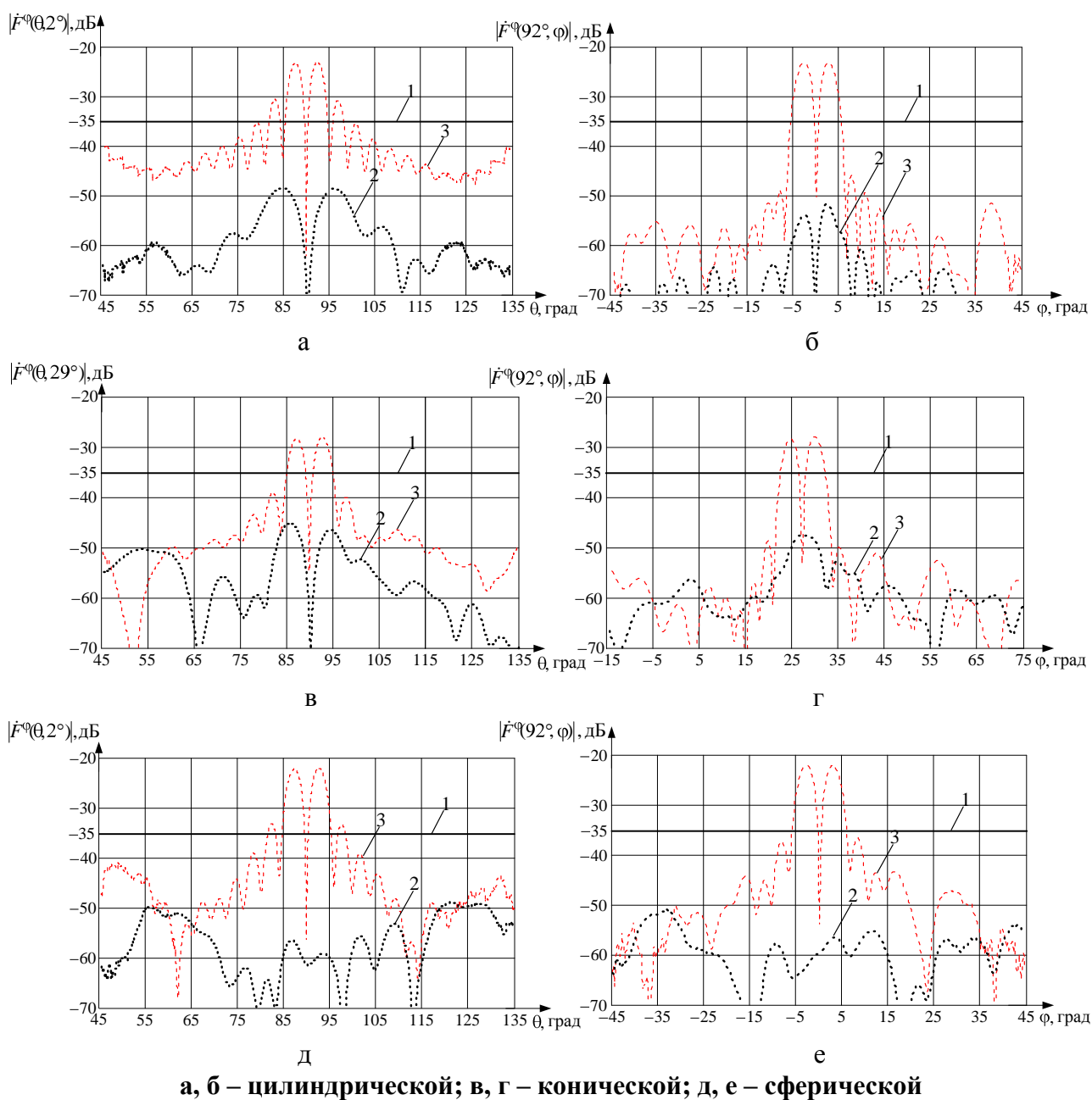


Рисунок 4. – Плоскостные кросспolarизационные диаграммы направленности КАР

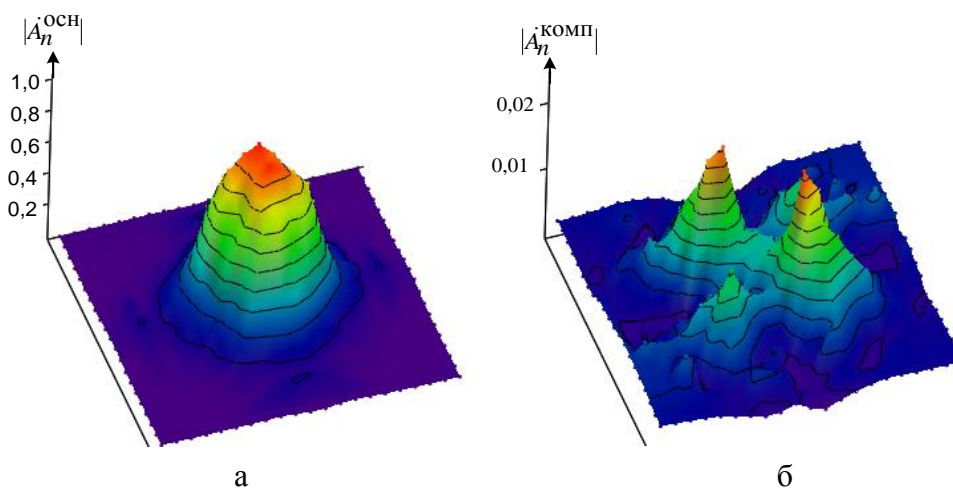
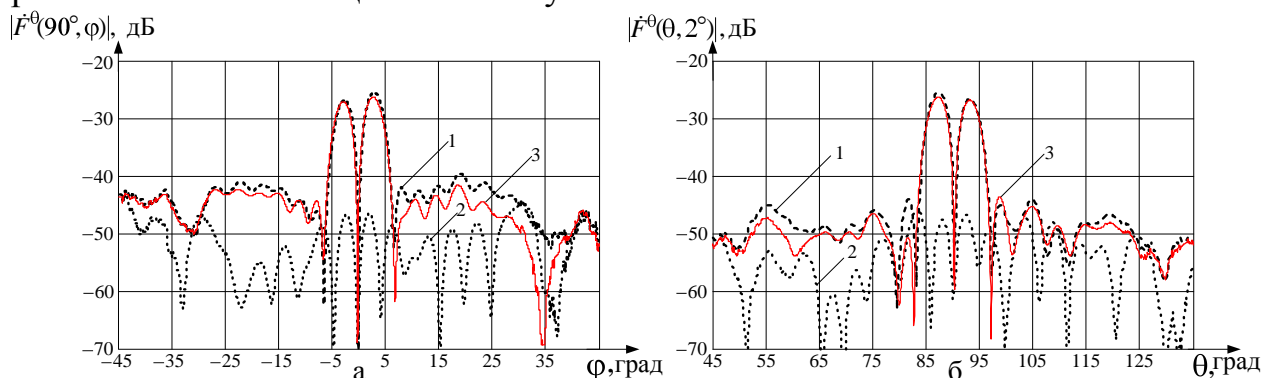


Рисунок 5. – Амплитудное распределение в раскрыве сферической антенной решетки

На рисунке 6 представлены ДН различных САР с линейной горизонтальной поляризацией: кривая 1 – излучатели с одним входом, синтез проводился без учета поляризационных свойств излучателей и без предъявления требований к кроссовой ДН решетки (способ 1) [3, 5]; кривые 2 и 3 – излучатели с двумя входами [7], компенсационный вход использовался (способ 2) и не использовался (способ 3), синтез проводился с учетом поляризационных свойств излучателей и с предъявлением требований к кроссовой ДН [6]. Номера кривых соответствуют номерам способов. Из приведенных на рисунке кривых видно, что только использование предложенного метода синтеза, учитывающего поляризационные свойства излучателей, обеспечивает выполнение требований к заданному уровню кроссовой составляющей поля излучения.

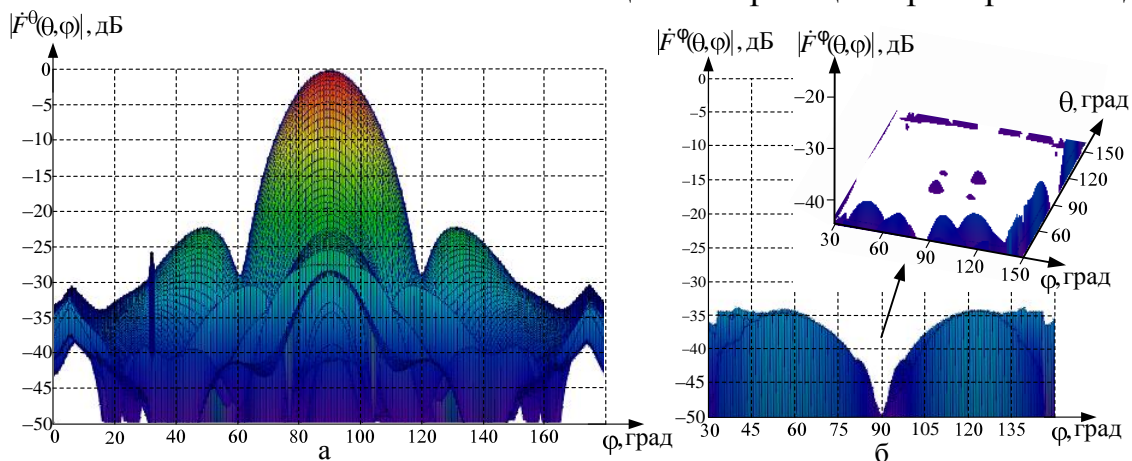


а – плоскость φ ; б – плоскость θ

Рисунок 6. – Плоскостные кроссполяризационные диаграммы направленности сферической антенной решетки

В данной главе также проведено сравнение ДН цилиндрических антенных решеток (ЦАР), синтезированных различными методами. Сравнение выполнялось для ДН по основным и кроссполяризационным компонентам поля излучения.

На рисунке 7 изображены объемные ДН ЦАР для основной и кроссполяризационной компонент поля излучения в проекции на плоскость xOy . Показано, что разработанный метод синтеза позволяет снизить для ЦАР уровень кроссполяризационного излучения не менее чем на 13 дБ, а также уровень боковых лепестков на основной составляющей поляризации примерно на 3 дБ.



а – основная компонента; б – кроссполяризационная компонента

Рисунок 7. – Диаграммы направленности цилиндрической антенной решетки в проекции на плоскость xOy

В четвертой главе проведено моделирование САР с линейной вертикальной поляризацией. Как известно, САР имеет наибольший уровень кроссполяризационной составляющей среди других типов КАР. В то же время сферическая поверхность является наиболее общим случаем выпуклой поверхности и позволяет перейти как к цилиндрической, так и к конической. В качестве требований к параметрам ВКДН САР задавались: ширина главного лепестка и уровень бокового излучения на основной составляющей поля решетки, уровень кроссполяризационного излучения.

Проведенные исследования показали, что требования по уровню кроссполяризационной компоненты выполнены полностью для значений: -30 , -35 , -40 дБ. Требования по ширине главного лепестка: 5 , 10 , 15° также выполнены полностью [8]. Однако уровень бокового излучения на основной составляющей поля излучения несколько превышает заданное значение, что объясняется неравномерностью размещения излучателей на сферической поверхности, ошибками округления и рядом других.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведенный анализ литературы по теории и конструкциям выпуклых антенных решеток показал возрастание уровня кроссполяризационного излучения из-за различной ориентации элементов решеток в пространстве. В связи с этим возникает необходимость разработки метода синтеза КАР с заданным уровнем кроссполяризационного излучения. Одним из путей понижения уровня кроссовой составляющей является учет поляризационных свойств излучателей. В работе обосновывается необходимость разработки математической модели излучателя КАР [2, 4, 6, 7, 11].

2. Разработана математическая модель излучателя КАР с заданными значениями параметров поляризации, *позволяющая*:

- рассчитывать две взаимно ортогональные составляющие поля излучения одиночного элемента КАР;
- задавать вид и параметры поляризации одиночного излучателя КАР;
- рассчитывать поле излучения элемента решетки при заданной ориентации его в пространстве;
- выполнять расчеты по сравнительно простым аналитическим выражениям [2, 4, 11].

3. Проверка адекватности предложенной математической модели излучателя выполнялась путем проведения моделирования при различных значениях коэффициента эллиптичности и угла наклона плоскости поляризации. В качестве критерия было выбрано соответствие результирующей ДН излучателя, описываемой двумя взаимно ортогональными компонентами поля, ДН классического элемента Гюйгенса. Как показало моделирование, результирующая ДН предложенного излучателя не зависит ни от угла наклона плоскости поляризации, ни от коэффициента эллиптичности, а ее параметры и форма полностью совпадают с параметрами и формой ДН элемента Гюйгенса [2, 4].

4. На основании предложенной модели излучателя разработана

математическая модель КАР с учетом поляризационных свойств ее элементов. Впервые разработана модель КАР, позволяющая рассчитывать две взаимно ортогональные составляющие поля решетки [6, 10, 12–14].

5. Впервые с помощью разработанной модели КАР с учетом поляризационных свойств ее излучателей получены поляризационные характеристики КАР трех типов: сферической, цилиндрической и конической. Достоверность полученных результатов не противоречит описанным в литературе данным. Наибольший уровень кроссполяризации среди других типов имеет САР (–22 дБ), что объясняется выпуклостью поверхности в двух плоскостях [6].

6. Разработан метод синтеза КАР, позволяющий реализовать требования к кроссовой ДН. В работе показано, что для реализации заданного уровня кроссовой составляющей необходимо использовать излучатели с двумя взаимно ортогональными входами (основным и компенсационным). В этом случае основная ДН КАР практически не искажается. Метод синтеза позволил снизить уровень кроссполяризационного излучения в направлении главного лепестка не менее чем на 25 дБ для сферической и цилиндрической антенных решеток и не менее чем на 17 дБ для конической решетки в сравнении с антенными решетками, имеющими равномерное амплитудное распределение и фазовое распределение, учитывающее кривизну конформной поверхности. Сравнительный анализ ДН ЦАР, синтезированных с использованием различных методов, показал возможность формирования пониженного не менее чем на 13 дБ уровня кроссполяризационного излучения при использовании разработанного автором метода синтеза [6, 7].

7. Впервые получены результаты сравнительного анализа кроссовой составляющей поля излучения на примере САР, синтезированных методами:

- без задания требований к поляризационным свойствам и составленным из излучателей с одним входом;
- предложенным методом с заданием требований к поляризационным свойствам и составленным из излучателей с двумя взаимно ортогональными (основным и компенсационным) входами;
- предложенным методом с заданием требований к поляризационным свойствам и составленным из излучателей с двумя взаимно ортогональными (основным и компенсационным) входами, но с отключенным компенсационным входом.

Представленные результаты показали, что только использование предложенного метода синтеза, учитывающего поляризационные свойства излучателей и двухвходовых излучателей решетки, обеспечивает выполнение требований к заданному уровню кроссполяризационного излучения [7].

8. На основании разработанного метода синтеза впервые проведен расчет двух взаимно ортогональных компонент поля САР. При этом к значениям параметров ДН решетки задавались определенные требования. Анализ результатов позволил сделать следующие выводы:

- достигнутые значения уровней кроссполяризационных составляющих соответствуют заданным значениям –30, –35, –40 дБ;
- достигнутые значения ширины главного лепестка ДН по основной компоненте поля в двух плоскостях $2\theta_{0,5}$ ($2\varphi_{0,5}$) также соответствуют заданным значениям 5, 10 и 15°;

– уровни бокового излучения антенны на основной составляющей поля незначительно превышают заданные значения (не более 2 дБ).

Таким образом, предложенный метод обеспечивает практически полное выполнение требований по кроссовой составляющей поля излучения при незначительном ухудшении параметров ДН на основной поляризации [8].

9. На основании результатов синтеза цилиндрической, конической и сферической антенных решеток сделан вывод о том, что разработанный метод синтеза КАР с заданным уровнем кроссполяризованного излучения является инвариантным к форме поверхности антенных решеток. Он позволяет задавать требования к значениям параметров ДН как на основной, так и на кроссовой поляризации.

Разработанный метод обеспечивает синтез КАР как с линейной вертикальной, так и с линейной горизонтальной поляризацией. Учитывая, что поле эллиптической поляризации, как наиболее обобщенный вид, может быть представлено в виде разложения по двум взаимно ортогональным полям с линейной поляризацией, можно заключить, что разработанный метод может быть применен для синтеза КАР с различными видами поляризации [6, 7].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанная математическая модель излучателя с заданными значениями параметров поляризации позволяет:

– осуществлять формирование тактико-технических требований к перспективным образцам радиолокационных станций по двум взаимно ортогональным составляющим поля;

– проводить численную оценку влияния кроссовой составляющей на характеристики радиолокационных станций, использующих КАР, и оценивать эффективность группировок радиоэлектронных средств.

Применение разработанной математической модели позволит снизить временные и экономические затраты, вызванные настройкой и калибровкой КАР.

Разработанный метод синтеза КАР целесообразно использовать для обеспечения требуемых направленных свойств радиотехнических систем для двух взаимно ортогональных составляющих поля антенной решетки. Метод позволит повысить эффективность решаемых радиотехническими системами задач путем формирования ДН с заданным уровнем кроссполяризованного излучения, а также управлять формой и параметрами ДН на основной поляризации [2, 4, 11].

Практическая значимость результатов подтверждается документами:

– акт о практическом использовании результатов исследования в научно-исследовательской работе «Математическая модель цилиндрической антенной решетки с учетом поляризационных свойств излучателей» выполненной в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь» в интересах командования ВВС и войск ПВО;

– акт о практическом использовании результатов исследования в учебном процессе кафедры радиотехники УО «Военная академия Республики Беларусь».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Бусел, М. О. Результаты численных исследований кольцевых антенных решеток, синтезированных с учетом направленных свойств излучателей / А. Г. Романович, А. А. Калинин, М. О. Бусел // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2013. – № 4 (41). – С. 101–105.

2. Бусел, М. О. Математическая модель излучателя цилиндрической антенной решетки с учетом его поляризационных свойств / А. А. Калинин, М. О. Бусел, А. Г. Романович // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2014. – № 3 (44). – С. 76–85.

3. Бусел, М. О. Синтез конформной антенной решетки с произвольным расположением излучателей / М. О. Бусел, А. А. Калинин, А. Г. Романович // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 2 (51). – С. 87–94.

4. Бусел, М. О. Математическая модель излучателя конформной антенной решетки с учетом его поляризационных свойств / М. О. Бусел, А. А. Калинин, А. Г. Романович // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 30. – С. 86–95.

5. Бусел, М. О. Методика синтеза конформных антенных решеток с произвольным расположением излучателей / М. О. Бусел // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 2 (55). – С. 54–62.

6. Бусел, М. О. Метод синтеза конформной антенной решетки с учетом поляризационных свойств излучателей / М. О. Бусел // Докл. БГУИР. – 2017. – № 5 (107). – С. 5–12.

7. Бусел, М. О. Результаты численных исследований конформных антенных решеток с пониженным уровнем кроссполяризационной составляющей поля / М. О. Бусел, А. А. Калинин, А. Г. Романович // Наука и воен. безопасность. – 2018. – № 1. – С. 50–54.

8. Бусел, М. О. Результаты синтеза диаграмм направленности сферических антенных решеток с пониженным уровнем кроссполяризационной компоненты поля излучения / М. О. Бусел, А. А. Калинин, А. Г. Романович // Докл. БГУИР. – 2019. – № 1 (119). – С. 83–90.

Статьи в сборниках материалов конференций

9. Бусел, М. О. Расчет диаграммы направленности цилиндрической антенной решетки / М. О. Бусел // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XVII Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 24–26 марта 2014 г. : в 2 ч. / Гомел. гос. ун-т ; редкол.: О. М. Демиденко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2014. – Ч. 1. – С. 100–101.

10. Бусел, М. О. Поляризационные составляющие диаграммы направленности цилиндрической антенной решетки / М. О. Бусел // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании,

производстве и научных исследованиях : материалы XVIII Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 23–25 марта 2015 года : в 2 ч. / Гомел. гос. ун-т; редкол.: О. М. Демиденко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2015. – Ч. 1. – С. 72–73.

11. Бусел, М. О. Математическая модель излучателя сферической антенной решетки с учетом его поляризационных свойств / М. О. Бусел, А. А. Калинин // Научные стремления – 2015 : сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. молодеж. конф., Минск, 25–27 марта 2015 г. : в 3 ч. / Центр молодеж. инноваций совместно с ООО «Лаб. интеллекта» ; ред. группа: Ю. М. Сафонова [и др.]. – Минск, 2015. – Ч. 2. – С. 125–126.

12. Бусел, М. О. Учет поляризационных свойств излучателей конформных антенных решеток / М. О. Бусел, А. А. Калинин, А. Г. Романович // Проблемы повышения эффективности образовательного процесса на базе информационных технологий : материалы VIII Междунар. специализир. науч. конф. на воен. фак. в учреждении образования «Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники», Минск, 22 апр. 2015 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2015. – С. 26–28.

Тезисы докладов

13. Бусел, М. О. Поляризационные составляющие диаграммы направленности сферической антенной решетки / М. О. Бусел, А. А. Калинин // Актуальные проблемы военной науки и практики в современных условиях и пути их решения : тез. докл. междунар. воен.-науч. конф. Воен. акад. Респ. Беларусь, Минск, 23–24 апр. 2015 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2015. – С. 340.

14. Бусел, М. О. Поляризационные составляющие диаграммы направленности конической антенной решетки / М. О. Бусел, А. А. Калинин // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации : V Междунар. науч.-практ. конф. авиац. фак. учреждения образования «Воен. акад. Респ. Беларусь» : сб. тез. докл., Минск, 14–15 мая 2015 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2015. – С. 109–110.

15. Бусел, М. О. Численный синтез сферической антенной решетки с прямоугольным размещением излучателей / М. О. Бусел, А. А. Калинин, А. Г. Романович // Проблемы повышения эффективности образовательного процесса на базе информационных технологий : сб. тез. докл. IX Междунар. специализир. науч. конф., Минск, 22 апр. 2016 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2016. – С. 36–41.

Отчеты о научно-исследовательских работах

16. Математическая модель цилиндрической антенной решетки с учетом поляризационных свойств излучателей : отчет о НИР / Воен. акад. Респ. Беларусь ; рук. Д. С. Нефедов; исполн.: Д. С. Нефедов, М. О. Бусел, И. А. Осадчий, В. В. Кудерко. – Минск, 2017. – 70 с. – Инв. № 3023/17.

РЭЗІЮМЭ**Бусел Міхаіл Алегавіч****Сінтэз канформных антэнных рашотак з зададзеным узроўнем
кроспалярызацыйнага выпраменьвання**

Ключавыя словы: канформная антэнная рашотка, сферычная антэнная рашотка, цыліндрычная антэнная рашотка, канічная антэнная рашотка, палярызацыя, кроспалярызацыя, метады сінтэзу.

Мэта працы: даследаванне характарыстык канформных антэнных рашотак і распрацоўка метаду зніжэння ўзроўню іх кроспалярызацыйнага выпраменьвання.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: метады матэматычнага мадэлявання, метады найменшых квадратаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: у гэтай дысертацыйнай рабоце распрацавана матэматычная мадэль выпраменьвальніка канформнай антэннай рашоткі, якая забяспечвае разлік дзвюх узаемна артаганальных састаўляючых поля. На аснове мадэлі выпраменьвальніка распрацавана матэматычная мадэль канформнай антэннай рашоткі з улікам палярызацыйных уласцівасцей выпраменьвальнікаў. Праведзена мадэляванне антэнных рашотак, размешчаных на канформных паверхнях трох тыпаў: сферычнай, канічнай і цыліндрычнай. Найбольшы ўзровень кроспалярызацыі выпраменьвання мела сферычная антэнная рашотка (-22 дБ), што тлумачыцца выпукласцю паверхні ў дзвюх плоскасцях. Распрацаваны метады сінтэзу канформнай антэннай рашоткі, які дазволіў знізіць узровень кроспалярызацыйнага выпраменьвання ў напрамку галоўнага пялёстка не менш чым на 25 дБ для сферычнай і цыліндрычнай антэнных рашотак і не менш чым на 17 дБ для канічнай рашоткі ў параўнанні з антэннымі рашоткамі, якія маюць раўнамернае амплітуднае размеркаванне і фазовае размеркаванне ўлічвае крывулю канформнай паверхні. Паказана, што метады сінтэзу канформных антэнных рашотак інварыянтны да формы паверхні антэннай рашоткі, а таксама ўлічвае патрабаванні па кросвай дыяграме накіраванасці і не скажае асноўную дыяграму накіраванасці. На аснове таго, што эліптычная палярызацыя можа быць прадстаўлена ў выглядзе раскладання па дзвюх лінейных, у рабоце даследаваны антэнныя рашоткі з вертыкальнай і гарызантальнай лінейнай палярызацыяй.

Ступень выкарыстання: вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы канформных антэнных рашотак з зададзеным узроўнем кроспалярызацыйнага выпраменьвання.

Галіны прымянення: радыёлакацыя, радыёсувязь, радыёнавігацыя.

РЕЗЮМЕ

Бусел Михаил Олегович

Синтез конформных антенных решеток с заданным уровнем кроссполяризационного излучения

Ключевые слова: конформная антенная решетка, сферическая антенная решетка, цилиндрическая антенная решетка, коническая антенная решетка, поляризация, кроссполяризация, метод синтеза.

Цель работы: исследование характеристик конформных антенных решеток и разработка метода снижения уровня их кроссполяризационного излучения.

Методы исследования и использованная аппаратура: методы математического моделирования, метод наименьших квадратов.

Полученные результаты и их новизна: в данной диссертационной работе разработана математическая модель излучателя конформной антенной решетки, обеспечивающая расчет двух взаимно ортогональных составляющих поля. На основании модели излучателя разработана математическая модель конформной антенной решетки с учетом поляризационных свойств излучателей. Проведено моделирование антенных решеток, расположенных на конформных поверхностях трех типов: сферической, конической и цилиндрической. Наибольший уровень кроссового излучения имела сферическая антенная решетка (-22 дБ), что объясняется выпуклостью поверхности в двух плоскостях. Разработан метод синтеза конформной антенной решетки, который позволил снизить уровень кроссполяризационного излучения в направлении главного лепестка не менее чем на 25 дБ для сферической и цилиндрической антенных решеток и не менее чем на 17 дБ для конической решетки в сравнении с антенными решетками, имеющими равномерное амплитудное распределение и фазовое распределение, учитывающее кривизну конформной поверхности. Показано, что метод синтеза конформных антенных решеток инвариантен к форме поверхности антенной решетки, а также учитывает требования по кроссовой диаграмме направленности и не искажает основную диаграмму направленности. На основании того, что эллиптическая поляризация может быть представлена в виде разложения по двум линейным, в работе исследованы антенные решетки с вертикальной и горизонтальной линейной поляризацией.

Степень использования: результаты исследования могут быть использованы при разработке конформных антенных решеток с заданным уровнем кроссполяризационного излучения.

Область применения: радиолокация, радиосвязь, радионавигация.

SUMMARY**Busel Michael Olegovich****Synthesis of conformal arrays with a given level
crosspolarization radiation**

Keywords: conformal antenna array, spherical antenna array, cylindrical antenna array, conical antenna array, polarization, cross polarization, synthesis method.

Purpose of research: study of conformal array characteristics and development of a method to reduce the level of their cross-polarization radiation.

Research methods and equipment: methods of mathematical modeling, least squares method.

The results obtained and their novelty: in this thesis a mathematical model of the radiator of the conformal antenna array is developed, which provides calculation of two mutually orthogonal components of the field. Based on the radiator model, a mathematical model of the conformal antenna array has been developed, taking into account the polarization properties of the emitters. The simulation of antenna arrays, located on the conformal surfaces of three types: spherical, conical and cylindrical, was made. The highest level of cross radiation had a spherical antenna array (-22 dB), which is explained by the convexity of the surface in two planes. The method of synthesis of conformal array, which allowed to reduce the level of cross-polarization radiation in the direction of the main lobe not less than 25 dB for spherical and cylindrical arrays, not less than 17 dB for the conical lattice in comparison with the arrays having a uniform amplitude distribution and phase distribution taking into account the curvature of the conformal surface. It is shown that the method of synthesis of conformal antenna arrays is invariant to the shape of the antenna array surface, and it also takes into account the requirements for the cross-directional pattern and does not distort the basic radiation pattern. On the basis of the fact that the elliptic polarization can be represented in the form of an expansion in two linear, in the work antenna arrays with vertical and horizontal linear polarization are investigated.

Degree of use: the results of the study can be used in the development of conformal arrays with a given level of crosspolarization radiation.

Applications: radiolocation, radio communication, radio navigation.

Бусел Михаил Олегович

**СИНТЕЗ КОНФОРМНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК
С ЗАДАННЫМ УРОВНЕМ КРОССПОЛЯРИЗАЦИОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6