

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

Н.Г. Чернышов

подпись

инициалы, фамилия

« ____ » _____ 2020 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему:

Многолучевая цилиндрическая фазированная антенная решетка системы метеорологического радиомониторинга

по направлению подготовки

11.03.02, Инфокоммуникационные технологии и системы связи

код, наименование направления подготовки

Профиль

Системы радиосвязи и радиодоступа

наименование профиля

Автор работы

Группа БИТ-41

подпись, дата

М.А. Кудряшов

инициалы, фамилия

Обозначение работы

ТГТУ

Обозначение документа

ТГТУ

ТЛ

Руководитель работы

подпись, дата

О.А. Белоусов

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

О.А. Белоусов

инициалы, фамилия

Тамбов 2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

Н.Г. Чернышов
подпись инициалы, фамилия

« » 20 г.

ЗАДАНИЕ НА БАКАЛАВРСКУЮ РАБОТУ

по направлению подготовки

11.03.02, Инфокоммуникационные технологии и системы связи

код, наименование направления подготовки

Профиль

Системы радиосвязи и радиодоступа

наименование профиля

Тема Многолучевая цилиндрическая фазированная антенная решетка системы метеорологического радио мониторинга

формулировка темы работы по приказу

утверждена приказом № 52/3-08 от «

24» марта 2020г.

Автор работы

М.А. Кудряшов

Группа БИТ-41

инициалы, фамилия

Обозначение работы

ТГТУ

Обозначение документа

ТГТУ

ТЛ

Срок представления работы к защите «30» июня 20 20 г.

Исходные данные для проектирования (исследования)

Центр

частота - 1687 МГц; коэффициент усиления АР - >12 дБи, коэффициент стоячей волны < 1,5.

Перечень подлежащих разработке вопросов:

Введение;

1 Обзор литературы и постановка задачи исследования;

2 Выбор и анализ одиночного излучателя для антенной решетки;

3 Проектирование и синтез антенной решетки;

Заключение

Список используемых источников;

Приложения: Приложение А

АННОТАЦИЯ

Бакалаврская работа на тему «Многолучевая цилиндрическая фазированная антенная решетка системы метеорологического радиомониторинга» выполнена студентом кафедры КРЭМС, группы БИТ-41, Кудряшовым М.А. под руководством к.т.н., доц. Белоусова О.А. Бакалаврская работа представлена к защите в 2020 году.

В ходе выполнения бакалаврской работы была построена цилиндрическая антенная решетка на основе квадрифилярных излучателей, для работы в комплексе метеорологических радиолокационных станций.

Бакалаврская работа выполнена в соответствии с ГОСТ 7.32-2001 «Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».

Объем пояснительной записки	- 64 с.
Количество рисунков	- 32
Количество таблиц	- 1

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	7
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	8
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 Обзор литературы и постановка задачи исследования.....	13
1.1 Метеорологические станции.....	13
1.2 Особенности радиозондирования.....	14
1.3 Обзор существующих аналогов в области радиолокационных комплексов.....	19
1.4 Постановка цели исследования.....	27
2 Анализ и синтез излучателей на основе спиральных структур в составе антенных систем метеорологических РЛС.....	28
2.1 Описание спиральных излучателей.....	28
2.1.1 Цилиндрический спиральный излучатель.....	29
2.1.2 Конический спиральный излучатель.....	30
2.1.3 Плоский спиральный излучатель.....	31
2.1.4 Квадрифилярный спиральный излучатель.....	32
2.2 Анализ электродинамических характеристик КСА.....	33
2.3 Описание и анализ антенной решетки для метеорологической станции.....	36
2.3.1 Классификация антенных решеток.....	36
2.3.2 Анализ цилиндрической ФАР.....	40

3 Результаты моделирования и экспериментальных исследований антенных систем метеорологических РЛС.....	46
3.1 Построение феноменологической модели КСА.....	46
3.2 Построение феноменологической модели цилиндрической АР.....	57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	62
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	63

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

При подготовке бакалаврской работы использовались следующие нормативные документы:

ГОСТ 2.104-68 – ЕСКД. Основные надписи;

ГОСТ 2.105-95 – ЕСКД. Общие требования к текстовым документам

ГОСТ 2.106-96 – ЕСКД. Текстовые документы;

ГОСТ 2.304-81 – ЕСКД. Шрифты чертежные;

ГОСТ 2.605-68 – ЕСКД. Плакаты учебно-технические. Общие технические требования;

ГОСТ 7.32-91 – Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления;

ГОСТ 19.701-90 – ЕСПД. Условные обозначения и правила выполнения;

СТП ТГТУ 07-97. – Проекты (работы). Дипломные и курсовые. Правила оформления.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

РЛС - радиолокационная станция

УВД - управление воздушным движением

ВГО - верхняя граница облачности

КСА - квадрифилярная спиральная антенна

АР - антенная решетка

АФАР - активная фазированная антенная решетка

КФАР - кольцевая фазированная антенная решетка

ДН - диаграмма направленности

КСВ - коэффициент стоячей волны

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое использование метеорологических станций, предназначенных для мониторинга параметров атмосферы, требует применение эффективных и малогабаритных радиолокационных станций. Данные станции существуют в большом количестве, но они, как правило имеют большие габариты за счет антенной системы, и не обладают той скоростью приема метеорологической информации, которая требуется в сложных метеоусловиях.

Для того чтобы более оперативно проводить мониторинг радиозондов или иметь множество каналов для приема информации, в их основе используются антенные системы, на основе антенных решёток с механическим приводом. Это является их недостатком, так как скорость переключения и скорость формирования необходимой диаграммы направленности напрямую зависит от скорости движения механического привода. Так же при этом точность позиционирования становится недостаточно высокой. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо использовать эффективные антенные системы, в частности цифровые фазированные антенные решетки с электрическим сканированием луча.

Целью квалификационной работы является создание подходящей антенной решетки с электрическим сканированием луча, работающей на частоте 1680 МГц (± 10), которая позволит расширить функционал РЛС, а именно: увеличить пропускную способность за счет многолучевости антенной системы, уменьшить время развертки данной системы, возможность работы в многоканальном режиме с несколькими зондами

одновременно, а так же прирост показателей дальности и высоты связи с зондом, по сравнению с существующими аналогами.

Материалы по данной теме были опубликованы в следующих изданиях:

- Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-технической конференции, посвященной Дню образования войск связи «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией» (24-25 октября 2018 года). «Особенности построения цилиндрической фазированной антенной решетки на основе квадрифилярного излучателя для метеорологической радиолокационной станции».

- Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-технической конференции, посвященной Дню образования войск связи «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией» (24-25 октября 2018 года). «Синтез сверхширокополосных излучателей различной апертуры для высокоскоростных беспроводных систем передачи данных».

- Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-технической конференции, посвященной Дню образования войск связи «Современное состояние и перспективы развития систем связи и

радиотехнического обеспечения в управлении авиацией» (23-24 октября 2019 года). «Синтез квадрифилярной антенны на основе спиральных излучателей, работающих в резонансном режиме для радиолокационной станции метеоразведки».

- Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-технической конференции, посвященной Дню образования войск связи «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией» (23-24 октября 2019 года). «Построение феноменологической модели полуволновой и четвертьволновой квадрифилярной спиральной антенны с многопроводными спиральными излучателями».

- Научное издание «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития». «Синтез структуры антенной решетки с электрическим сканированием луча на основе излучателей круговой поляризации для радиолокационной метеостанции».

- Научное издание «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития». «Анализ апертурного излучателя для систем высокоскоростного беспроводного широкополосного доступа E-диапазона».

- Научное издание «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития». «Синтез антенной решетки для систем высокоскоростного беспроводного широкополосного доступа E-диапазона».

- Научное издание «Энергосбережение и эффективность в технических системах». «Синтез квадрифилярных излучателей различных структур для радиолокационной метеорологической станции».

В первой главе представлены общие сведения о радиолокационных станциях метеорологической разведки, радиозондах, используемых на данных станциях.

Во второй главе произведен анализ объекта управления (антенной решетки), построенного на базе квадрифилярного спирального излучателя. рассмотрены основные типы фазированных антенных решеток, выбрана форма моделируемой антенной решетки. Так же в данной главе был произведен выбор основного типа излучателя и рассмотрены основные методы расчета физических и электродинамических характеристик квадрифилярного спирального излучателя.

В третьей главе было произведено моделирование работы как одной антенны, так и всей АР. А также получены основные характеристики разработанной антенной решетки.

Бакалаврская работа выполнена в соответствии с ГОСТ 7.32-2001 «Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления». Настоящий стандарт устанавливает общие требования к структуре и правилам оформления научных и технических отчетов, а также правила для тех случаев, когда единая процедура оформления будет содействовать обмену информацией, совершенствуя обработку отчета в информационной системе.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Метеорологические станции

Метеорологическая станция – это учреждение, обладающее метеоплощадкой, на которой расположены специальные приборы для метеорологических измерений, которое транслирует собранные данные в Гидрометцентр. Как правило, метеорологические станции обладают следующим оборудованием:

- термометр – прибор для измерения температуры воздуха;
- барометр – прибор для измерения атмосферного давления;
- гигрометр – прибор для измерения влажности воздуха;
- анеморумбометр – прибор для измерения скорости и направления ветра;
- осадкомер – используется для измерения осадков;
- плювиограф – прибор для фиксации жидких осадков в теплое время года;
- термограф – для непрерывной фиксации температуры воздуха;
- гигрограф – прибор для продолжительной фиксации влажности воздуха.

Метеорологические станции разделяются на следующие виды:

1. Дорожная метеорологическая станция. В данных станциях используют датчики температуры поверхности и температуры на глубине, а также GPRS модуль, предназначенный для передачи информации в инфоцентры. Для информирования водителей о погодных условиях используются специальные табло, расположенные на дороге. На данных табло

выведена информация о состоянии дороги, температуре окружающей среды, а так же в случае угрозы на табло выводятся предупреждения об опасности погодных условий.

2. Лесная метеорологическая станция. Данная станция собирает климатические данные, которые могут повлиять на предотвращение лесных пожаров. На них установлено специальное оборудование, которое фиксирует влажность коры дерева, влажность почвы, температуру на различных уровнях высоты в лесу, после чего происходит обработка данных с последующим моделированием карты пожарной активности. Данные метеостанции позволяют контролировать угрозы лесных пожаров, либо если пожар уже начался, то помогают минимизировать риск распространения пламени.

3. Гидрологические метеорологические станции. Ведут наблюдение за состоянием погодных условий океанов, рек, морей.

4. Аэрологические метеорологические станции. Принимают сигналы радиозонда, что позволяет измерить скорость ветра, температуру, давление и влажность в атмосфере до высоты 30—40 км. Эти данные используются для прогнозов погоды и изучения атмосферы.

Для более производительного контроля над погодными условиями используются радиолокационные метеорологические станции. Они работают в тандеме с метеорологическими радиозондами. Для расчётов прогнозов погоды как синоптическими, так и гидродинамическими методами используются данные о текущем состоянии атмосферы и различные прогностические модели. Текущее состояние атмосферы определяется на основе различных видов наблюдений, в том числе наземных, воздушных, морских и

спутниковых. При этом ключевую роль играют данные радиозондирования атмосферы.

1.2 Особенности радиозондирования

Радиозондирование представляет наиболее точные результаты непосредственных контактных измерений термодинамических параметров атмосферы на высотах от уровня земли до 35-40 км.

Эти данные содержат информацию о вертикальных профилях температуры, влажности, скорости и направлении ветра, а также о давлении воздуха на заданных уровнях.[13]

Для получения информации в атмосферу выпускаются в свободный полёт небольшие лёгкие измерительные приборы (метеозонды).

Метеорологический радиозонд (метеозонд) представляет собой аэростат, предназначенный для изучения атмосферы. Как правило он состоит из резиновой оболочки, которая наполнена газом, а также подвешенного к оболочке пластикового контейнера. Внутри контейнера, в основном, располагаются такие приборы как барометр, термометр, гигрометр и др. Современные радиозонды позволяют получить данные о следующих климатических и погодных условиях: давление воздуха, высоту, географическое положение (широта, долгота), температуру, влажность, характеристика ветра, интенсивность космических лучей, концентрацию озона и аэрозолей. Так же внутри контейнера находятся передатчик с антенной, для возможности последующей передачи полученной информации и GPS-модуль. GPS-модуль позволяет отслеживать траекторию следования радиозонда, что в свою очередь даёт возможность

получить информацию о скорости ветра, используя систему позиционирования.

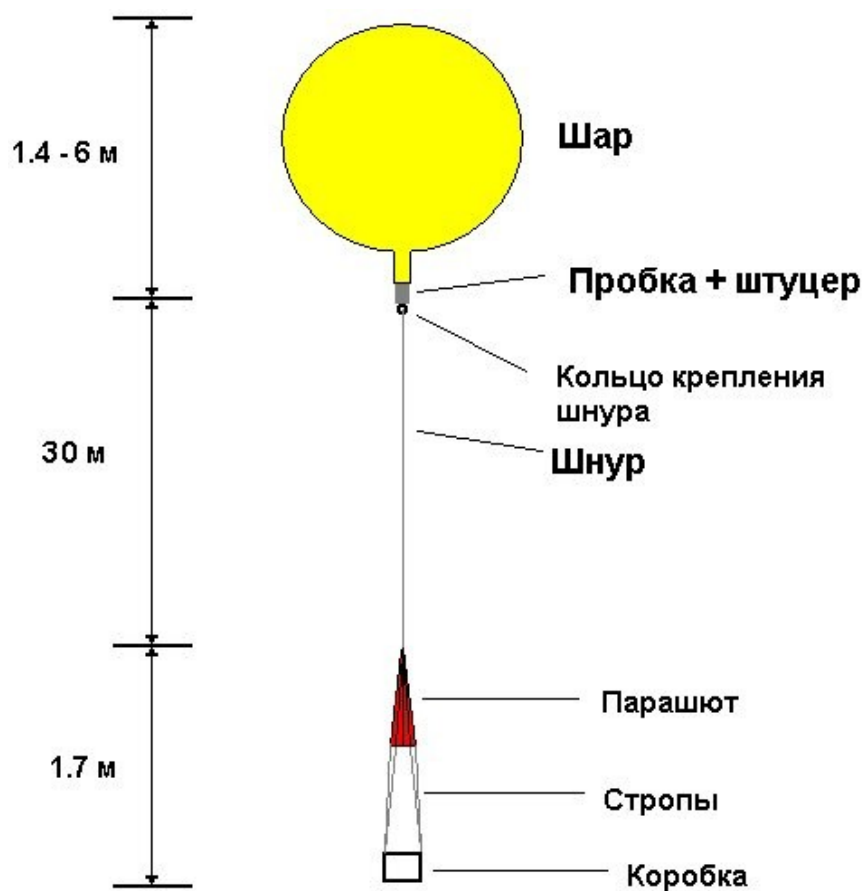


Рисунок 1.1 - строение метеозонда

Во всем мире установлено точное время запуска радиозондов. Их запускают ежедневно в 00:00 и 12:00 мирового времени одновременно по всей планете. В основном запуск радиозонда происходит со специальной площадки, однако иногда радиозонды могут сбрасываться с самолетов, для изучения определенных погодных условий. По достижению определенной высоты, которая является критической для радиозонда, его оболочка лопаается и радиозонд неконтролируемо падает вниз, после чего его поиски не ведутся.

Пути передачи информации с радиозонда могут быть различными, для этого в составе аппаратного комплекса

радиозонда присутствует не только антенна с передатчиком, но также GSM трекер. GSM трекер даёт возможность отсылать полученную информацию напрямую на мобильный телефон посредством SMS-сообщения. Однако, данный тип передачи информации скорее исключение, чем правило. В основном радиозонды передают информацию напрямую в информационные центры, которые оснащены специальными компьютерами, которые сохраняют всю информацию о состоянии климатических и погодных условий в реальном времени. Отсылается информация по специальному радиоканалу. Как правило радиозонды работают на специально выделенных радиочастотах 403 МГц, 1680 МГц и 1780 МГц с возможностью подстройки частоты в пределах ± 10 МГц.

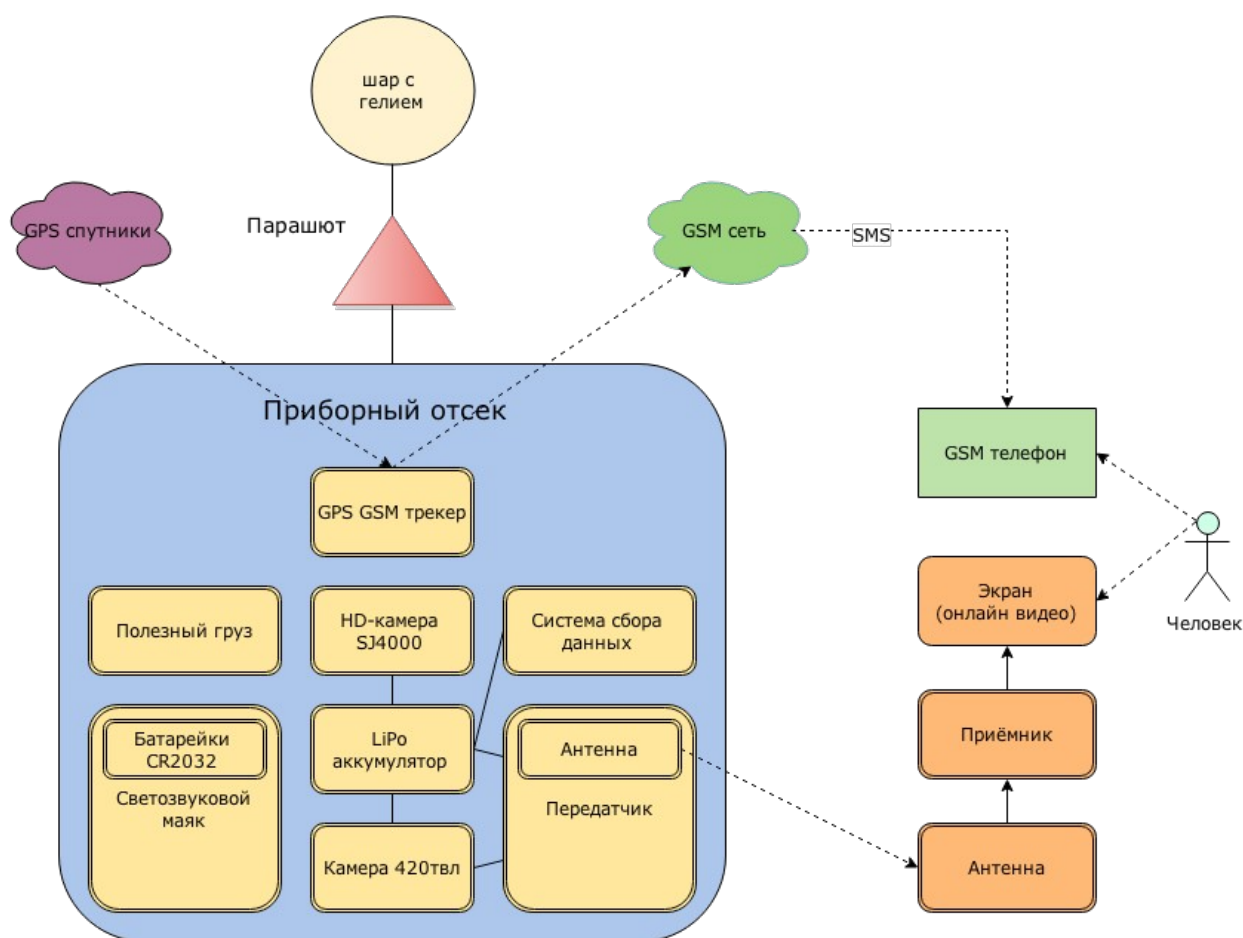


Рисунок 1.2 – схема работы радиозонда

1.2.1 Обзор используемых в России радиозондов

В настоящее время на аэрологической сети Росгидромета используются следующие типы радиозондов:

1. Радиозонд МРЗ-3А (рабочая частота 1780 МГц) / МРЗ-3АТ (рабочая частота 1680 МГц)
2. Радиозонд МРЗ-3А*(рабочая частота 1780 МГц) / МРЗ-3А*(рабочая частота 1680 МГц)
3. Радиозонд сетевой АК2-01А (рабочая частота 1780 МГц) / АК2-01М (рабочая частота 1680 МГц)
4. Радиозонд повышенной точности АК2-02АО (рабочая частота 1780 МГц) / АК2-02МО (рабочая частота 1680 МГц)
5. Радиозонд повышенной точности РФ-95 (рабочая частота 1780 МГц)

С помощью данных радиозондов измеряются вертикальные профили температуры и относительной влажности воздуха, а также параметров ветра от уровня земли до высот 30 до 35 км. Их технические и некоторые метрологические характеристики представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, все представленные типы отечественных радиозондов утверждены Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии как типы СИ с одинаковыми метрологическими характеристиками (МХ) у всех сетевых радиозондов и соответственно у обоих типов радиозондов повышенной точности (всё для нормальных условий).

Таблица 1.1 - технические и метрологические характеристики радиозондов

Характеристика	МРЗ-3А	МРЗ-3А*	АК2-01 сетевое	АК2-02 (повышенной)	РФ-95

			й	точности	
Наличие сертификата	+	+	+	+	+
Тип датчика температуры	ММТ-1	ММТ-1	ММТ-1	СТ81103 С5-3435	
Основная погрешность, °С	1,8	1,8	1,8	1,0	1,0
Альбедо покрытия	0,8	0,88	0,88	0,88	
Постоянная времени датчика температуры, с, на высоте 0-30 км	8-36	8-36	8-36	2-16	
Тип датчика влажности	СДД	Н1Н-4000	Н1Н-4000	Н1Н-4000	Хьюми кап
Основная погрешность датчика влажности, %	15	7	7	7	7
Постоянная времени датчика влажности, с, на высоте:					
0-2 км	3			6	
3-5 км	60			25	
6-8 км	100			60	
9-10 км	180			95	
11-12 км	300				

К точности радиозондовых измерений предъявляются весьма высокие и разноплановые требования. Наиболее полные требования к точности измерений при радиозондировании атмосферы сформулированы Всемирной метеорологической организацией (ВМО).

1.3 Обзор существующих аналогов в области радиолокационных комплексов

Для того чтобы напрямую работать с радиозондами на метеорологических станциях используют радиолокационные комплексы. Принцип действия всех радиолокационных станций основан на использовании отражения электромагнитных волн объектами наблюдения. Данное явление называется радиоэхо, и для того, чтобы обнаружить это явление в конструкции каждого метеорологического радиолокатора обязательно имеются направленно и согласованно действующие радиопередатчик и высокочувствительный радиоприемник.

Потребителями метеорологической радиолокационной информации, в первую очередь - карт метеоявлений, ВГО, интенсивности и накопленных осадков, являются оперативные службы Росгидромета, авиационные метеорологи и службы УВД, коммунального и транспортного управления и др. Позже были разработаны другие отечественные автоматизированные системы радиолокационных метеонаблюдений - «Метеоячейка», «АСУ-МРЛ», «Мерком», «Антиград».

После внедрения автоматизации радиолокационных метеорологических наблюдений и перехода на использование в конструкции ДМРЛ твердотельных модуляторов, цифровых приемников и когерентной обработки сигналов следующим

значительным шагом стало внедрение поляризационных методов.[6]

Объединение метеорологических радиолокаторов в сеть позволяет во многих случаях компенсировать ограничения радиолокационного метода метеонаблюдений: ослабление радиоизлучения в осадках, блокировка радиоизлучения естественными (рельеф, растительность) и искусственными (здания и сооружения) препятствиями в отдельных секторах, азимутальные направления с помехами, снижение разрешающей способности радиолокатора за счет расширения луча и увеличение высоты луча за счет кривизны Земли на больших дальностях.

Сегодня метеорологические радиолокационные сети созданы во всех развитых странах: в США сеть NEXRAD объединяет 156 доплеровских поляризационных радиолокаторов S-диапазона WSR-88D, в Европе в рамках международного проекта OPERA объединяются около 180 радиолокаторов различных производителей, работающих по разным программам наблюдений. Часть из них является доплеровскими и поляризационными. В Китае, Японии, Австралии радиолокаторы также объединены в национальные сети. Как правило, для объединения радиолокационной информации используются первичные данные наблюдений.

Основной выходной информацией радиолокационных метеорологических наблюдений является информация о местоположении, внутренней структуре, метеорологических характеристиках (тип метеоявления, интенсивность и фаза выпадающих осадков, верхней границе облачности, доплеровской скорости) полей облачности и осадков, а также наблюдения их

перемещений и эволюции, дающая возможность сверхкраткосрочного (до 1-3 часов) прогноза погоды.

Современные метеорологические радиолокаторы решают следующие важные задачи:

- идентификация и оценка интенсивности метеорологических явлений, связанных с облачностью и осадками, информационное обеспечение сверхкраткосрочного прогноза погоды,

- обеспечение р/л информацией численных моделей прогноза погоды для их инициализации и верификации.

Традиционно, в радиометеорологии используются три частотных диапазона длин волн: X (3,2 см), C (5,3 см) и S (10 см). Диапазон S используется в условиях интенсивных осадков, т.к. он наименее подвержен ослаблению в осадках, однако, для обеспечения ширины луча 1° приходится использовать антенны диаметром 9 м. Диапазон X почти не используется для оперативных наблюдений, так как испытывает сильное (примерно в 100 раз по сравнению с S-диапазоном) затухание в осадках, но позволяет использовать относительно малые антенны - 2 м для формирования луча шириной 1° .

В нашей стране диапазон 3,2 см традиционно широко использовался в метеорадиолокаторах серии МРЛ. В МРЛ-5 с антенной диаметром 4,5 м использование для зондирования излучения X-диапазона обеспечивает ширину луча $0,5^\circ$ что особенно эффективно в зимних условиях с низкой облачностью.

Частотный диапазон C (длина волны 5,3 см) является разумным компромиссом в радиометеорологии между размерами антенны и ослаблением в осадках. В радиолокаторе ДМРЛ-С антенна диаметром 4,3 м обеспечивает ширину луча $0,95^\circ$.

Дальность радиолокационных наблюдений сегодня определяется не столько возможностями техники (метеопотенциалы однопольных радиолокаторов различных производителей примерно равны), сколько решаемыми задачами и естественными ограничениями. Радиолокационный луч, выпущенный под нулевым углом места, из-за кривизны Земли на дальностях свыше 100 км отрывается от поверхности Земли на более чем 600 м. На дальностях более 250 км радиолокатор может обнаруживать только верхушки мощных облаков и использоваться для раннего штормоповещения.

Обзорные метеолокаторы (например, сеть NEXRAD в США) имеют луч шириной 1° , и проводят наблюдения на большой территории (до 460 км по дальности) в цикле наблюдений длительностью от 4,5 до 10 минут в зависимости от выбранного режима, который выбирает дежурный специалист регионального офиса Национальной метеослужбы. Обзорные метеорологические радиолокаторы в США, Индии, странах Юго-Восточной Азии проводят р/л наблюдения на океанском побережье с целью раннего обнаружения тропических циклонов.

Из недостатков системы NEXRAD можно отметить:

- недостаточный функционал в горной местности;
- отсутствие возможности зафиксировать образование дождя на низких высотах;
- сложность опознавания ледяных и смешанных осадков;
- уменьшение охвата сканирования территории в зимнее время года;
- некоторые перебои в приеме информации во время экстремальных ситуаций.

Технические характеристики МРЛ NEXRAD:

- Диаметр параболического отражателя антенны 8,54 м;

- Коэффициент усиления антенны 44,5 дБ;
- Ширина луча 1°;
- Вертикальный диапазон углов от -1° до $+60^\circ$;
- Уровень боковых лепестков менее 26 дБ;
- Частота сканирования 30° в секунду по азимуту и углу места;
- Используемая поляризация: линейная, горизонтальная;
- Диапазон рабочих частот передатчика 2700-3000 МГц;
- Максимальное значение пиковой мощности импульса 475 кВт;
- Длина импульса 1,57 — 4,57 мкс;
- Динамический диапазон приёмника 93 дБ;
- Промежуточная частота приёмника 57,6 МГц

Специализированные доплеровские радиолокаторы TDWR С-диапазона (США, Гонконг, Китай) устанавливаются в аэропортах для обнаружения опасных микропорывов и сдвигов ветра на малых высотах и имеют более узкий луч 0.5° и радиальное разрешение 150 м. Высокое пространственное разрешение (по углу) обеспечивается на дальностях до ~ 90 км от места установки из-за естественного уширения и подъема луча над поверхностью земли с расстоянием.

Кроме того, радиоизлучение на длине волны 5 см (С-диапазон) испытывает заметное ослабление в осадках по сравнению с 10-см диапазоном у радиолокаторов NEXRAD.

В отличие от обзорных, радиолокаторы TDWR используют более сложную модель сканирования: непрерывное круговое под низким углом места антенны, а в случае обнаружение радиоэха выше порога - быстрое секторное сканирование под 1-2 углами места для обнаружения зон порывов и сдвигов.

В передвижных метеорологических радиолокаторах, где ограничены размеры антенны (авиационных, автомобильных), для зондирования используют длину волны 3,2 см.



Рисунок 1.3 – Метеорологический радиолокатор TDWR

Тактико-технические характеристики МРЛ TDWR:

- рабочий диапазон частот – 5,5-5,65 ГГц;
- частота повторения импульсов 300 Гц, 1200-1700 Гц;
- длительность импульса 1,1 мкс;
- мощность передатчика в импульсе 250 кВт;
- инструментальная дальность 460 км;
- ширина ДН 0,55°;
- скорость вращения антенны 5 об/мин;
- среднее время наработки на отказ 1500 ч.

Таким образом, используемые в разных странах метеорологические радиолокаторы различаются не только

используемой длиной волны. МРЛ производят наблюдения в разных режимах с разной длительностью циклов. Для метеорологической обработки данных наблюдений используется различное программное обеспечение, отличающееся выходными продуктами. Также отличаются выбор углов и программы сканирования облачной атмосферы.

В нашей стране, наиболее часто используемым является радиолокатор МАРЛ-А, используемый на территории Гидрометцентра.

Малогабаритный микроэлектронный аэрологический радиолокатор (МАРЛ-А) предназначен для работы в составе малогабаритной системы сетевого аэрологического зондирования. Выпускаемый в свободный полет на газонаполненной оболочке он выполняет следующие функции: слежение за угловыми координатами и дальностью выпущенного в свободный полет радиозонда; прием телеметрической информации от радиозонда о метеорологических параметрах атмосферы (температура, влажность, давление) в точке полета радиозонда; вычисление скорости и направления ветра в точке полета радиозонда; формирование стандартных аэрологических телеграмм.



Рисунок 1.4 – аэрологический радиолокатор МАРЛ-А

В состав МАРЛ-А входят собственно радиолокатор с активной фазированной антенной решеткой, изображенный на [фотографии](#), и обслуживающая ПЭВМ с программным обеспечением. В конструкции МАРЛ-А до предела облегчена механическая часть, остались только одноосный привод грубого механического перемещения по азимуту и датчик угла поворота в азимутальной плоскости. Управление диаграммой направленности (ДН) осуществляется подачей соответствующего цифрового кода на фазированную антенную решетку, который устанавливает необходимые сдвиги фаз между отдельными диполями антенной решетки. Синтезатор частоты и синхронизатор обеспечивают подстройку рабочей частоты МАРЛ-А к рабочей частоте радиозонда, а также блокирование входа приемника на время действия зондирующего импульса.[7]

Технические данные МАРЛ-А:

Дальность автоматического сопровождения зонда от 100 метров до 250 километров.

В качестве антенны используется адаптивная фазированная антенная решетка. Пределы поворота диаграммы направленности антенны:

- в горизонтальной плоскости ± 360 градусов (механический поворот) и электронное сканирование в секторе ± 25 градусов;
- в вертикальной плоскости электронное сканирование в секторе от -10 градусов до $+100$ градусов.

Максимальная скорость механического поворота антенной решетки 60 град/с.

Ширина диаграммы направленности:

- в горизонтальной плоскости не более 9 градусов;
- в вертикальной плоскости не более 6 градусов.

Среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности измерения координат в режиме автосопровождения при электронном сканировании луча по азимуту и углу места – 1,1 градус, по дальности 35 метров.

Изделие обеспечивает в режиме передачи уровень импульсной эквивалентной изотропно излучаемой мощности не менее 25×10^3 Вт в направлении излучения по нормали к плоскости раскрыва антенны, длительность импульса излучения 1 мкс.

Показатель качества на прием G/T не менее 2 дБ/К по нормали к плоскости раскрыва антенной решетки.

1.4 Постановка цели исследования

Так как существующие антенные системы не могут обеспечить полноценную работу в многоканальном режиме с несколькими радиозондами одновременно, а также обладают

большими массогабаритными показателями, то главной задачей является модернизация таких антенных систем с целью устранения данных недостатков.

Целью квалификационной работы является: создание антенной решетки, которая позволит существенно модернизировать существующие радиолокационные метеорологические станции, работающей на частоте 1687 МГц.

Основные задачи исследования:

- разработать математическую и компьютерную модели квадрифилярного спирального излучателя;

- разработать математическую и компьютерную модели антенной решетки на базе квадрифилярного спирального излучателя;

Разрабатываемая антенная система должна отвечать современным стандартам, применяемым на метеорологических радиолокационных станциях, иметь подходящие электродинамические показатели, что позволит эффективно использовать её в подобных комплексах, а также должна обладать высокой надежностью.

2 АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНЫХ СТРУКТУР В СОСТАВЕ АНТЕННЫХ СИСТЕМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РЛС

2.1 Описание спиральных излучателей

Для выполнения задачи, определяемой целью данной работы, будем использовать излучатель с круговой поляризацией. Это позволит более эффективно работать с радиозондами, так как для связи с зондом нам не обязательно будет знать его точное местоположение. Линейная же поляризация в данном случае не подходит, так как её преимущества не могут быть раскрыты в полной мере из-за многолучевого распространения сигнала и возможных многократных переотражениях. В нашем же случае сигнал с круговой поляризацией, вне зависимости от угла между зондом и антенной системой, всегда будет попадать на антенну. Тем самым, используя круговую поляризацию мы сможем защититься от переотраженных сигналов.

Следуя вышеизложенным выводам, выберем для потенциальной антенной системы излучатель с круговой поляризацией. Самым распространенным излучателем с данным типом поляризации является спиральный излучатель.

Спиральный излучатель представляет собой спираль из провода, либо из металлической трубки. Один конец спирали соединяется с проводником коаксиального кабеля. Наружная оболочка кабеля соединена с рефлектором, диаметр которого равняется λ . Существует несколько разновидностей спиральных излучателей: цилиндрические, конические, плоские, квадрифилярные, сферические и др.

Выделим главные преимущества и недостатки спиральных излучателей.

К преимуществам можно отнести:

1. возможность получения поля с круговой поляризацией;
2. высокая диапазонность по направленным свойствам, входному сопротивлению и поляризационным свойствам;
3. относительная простота конструкции;
4. активный характер входного сопротивления.

Из недостатков спиральных излучателей можно выделить:

1. сравнительно большой уровень боковых лепестков;
2. большие габаритные показатели при большой длине волны;

3. трудности формирования узкой диаграммы направленности (менее 25°) при помощи одной спирали.

Возможность применения спиральных антенн так же многогранна, они применяются и как самостоятельные излучатели, и как облучатели линзовых и зеркальных антенн, как возбуждители волноводных и рупорных антенн, а так же их можно применять как элементы фазированной антенной решетки.[4]

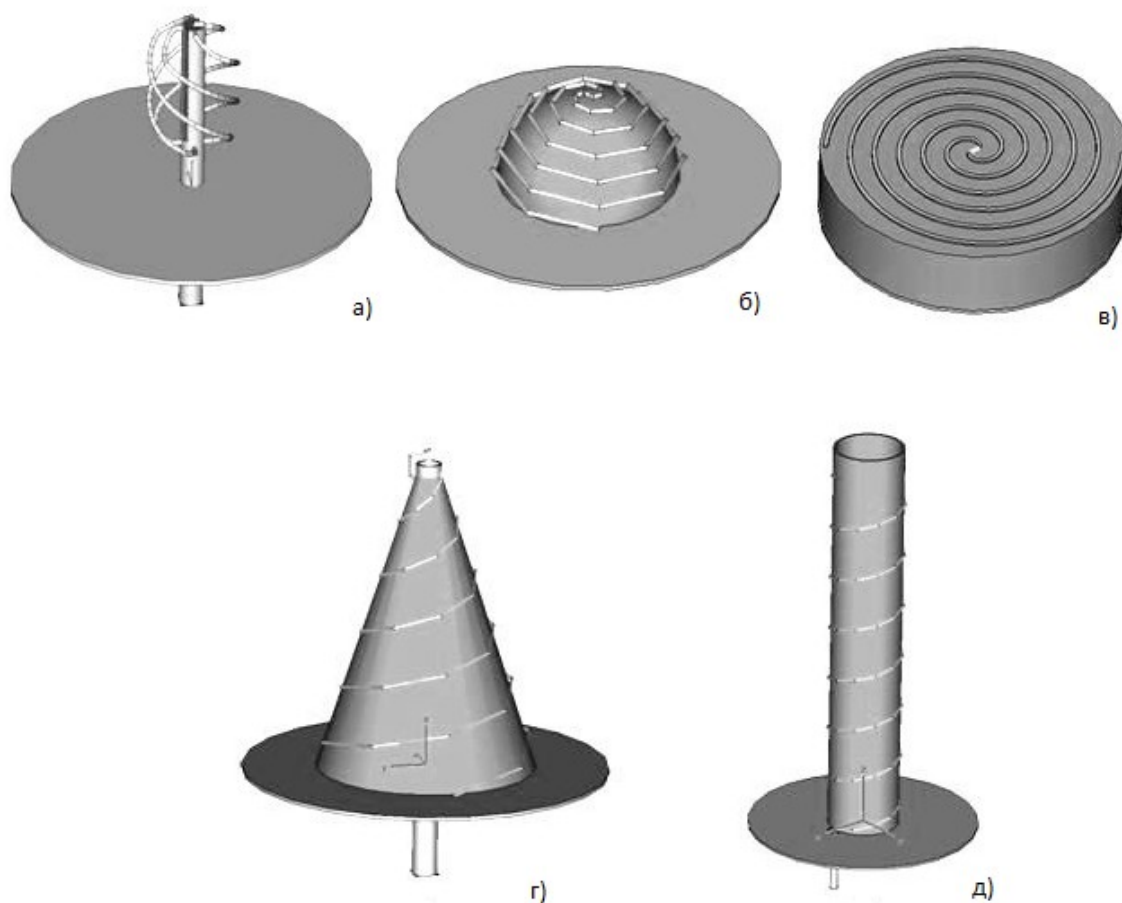


Рисунок 2.1 – модель: а) квадрилинейного излучателя; б) спирального излучателя на сфере; в) плоского спирального излучателя; г) конического излучателя; д) цилиндрического излучателя

Для дальнейшего выбора излучателя вкратце рассмотрим виды спиральных излучателей.

2.1.1 Цилиндрический спиральный излучатель

Данный излучатель является самым распространенным видом спиральных излучателей. Для его дальнейшего рассмотрения приведем основные обозначения: l – осевая длина спирали; D_0 – диаметр; L – длина витка; S – шаг намотки; N –

число витков; α – угол намотки. Стоит отметить, что данные обозначения будут использованы только для описания непосредственно цилиндрического спирального излучателя.

Между заданными параметрами спирали существуют следующие отношения:

$$L^2 = (\pi D_0)^2 + S^2; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{S}{\pi D_0}. \quad (1)$$

В том случае, когда диаметр спирали мал ($\frac{L}{\lambda} \ll 1$), антенна излучает максимально в плоскости, нормальной к оси спирали. В этом случае в плоскости наблюдается ненаправленное излучение.

При $\frac{L}{\lambda} \approx 1$ антенна излучает максимально вдоль оси. Это режим осевого излучения.

Если в дальнейшем увеличивать размер спирали, то диаграмма направленности принимает воронкообразную форму.

Наибольший практический интерес представляет режим осевого излучения. Данный режим характеризуется рядом особенностей: вдоль провода спирали распространяется бегущая волна тока; поле на оси антенны имеет поляризацию, близкую к круговой; входное сопротивление антенны почти чисто активное, антенна обладает высокой диапазонностью.

Приведем несколько эмпирических формул для описания основных параметров цилиндрического спирального излучателя.

Ширина диаграммы направленности по половинной мощности:

$$2\theta_{0,5P}^0 = \frac{52}{\frac{L}{\lambda} \sqrt{\frac{NS}{\lambda}}}. \quad (2)$$

Коэффициент направленного действия:

$$D = 7,5 \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 N \frac{S}{\lambda}. \quad (3)$$

Входное сопротивление излучателя:

$$R_{\text{вх}} = 140 \frac{L}{\lambda}, \text{ Ом.} \quad (4)$$

Вышеизложенные формулы применимы, в основном, к спиральным излучателям, у которых число витков меньше трех, угол намотки находится в пределах 12-16°, а диаметр спирали меняется от 0,7 до 1,2.

В основном в данных излучателя число витков не превышает 7-8. В этом случае ширина диаграммы направленности составляет примерно 30-40°. Если целью стоит получение более узкой диаграммы направленности, то для этого применяют синфазную решетку из спиральных излучателей. Данные решетки из спиральных излучателей для слежения за искусственными спутниками Земли.

2.1.2 Конический спиральный излучатель

Данный тип спиральных излучателей характеризуется более высокими диапазонными свойствами, по сравнению с цилиндрическими излучателями. Объясняется это тем, что на рабочей волне часть витков спирали, для которых $\frac{L}{\lambda} \approx 1$, работают в режиме осевого излучения. Оставшаяся же часть витков осевого излучения не создает и искажает диаграмму направленности. При изменении λ рабочая область, которую составляют те самые витки, работающие в осевом режиме, перемещается вдоль спирали и в диапазоне волн, в пределах которого данная область не выходит за границы спирали, такой излучатель работает в режиме осевого излучения. Однако стоит заметить, что осевое излучение создается лишь некоторой частью витков излучателя, то при одинаковом числе витков формируется диаграмма направленности, ширина которой несколько больше, чем у цилиндрического спирального излучателя.

2.1.3 Плоский спиральный излучатель

Существует два вида плоских спиральных антенн – арифметическая и равноугольная.

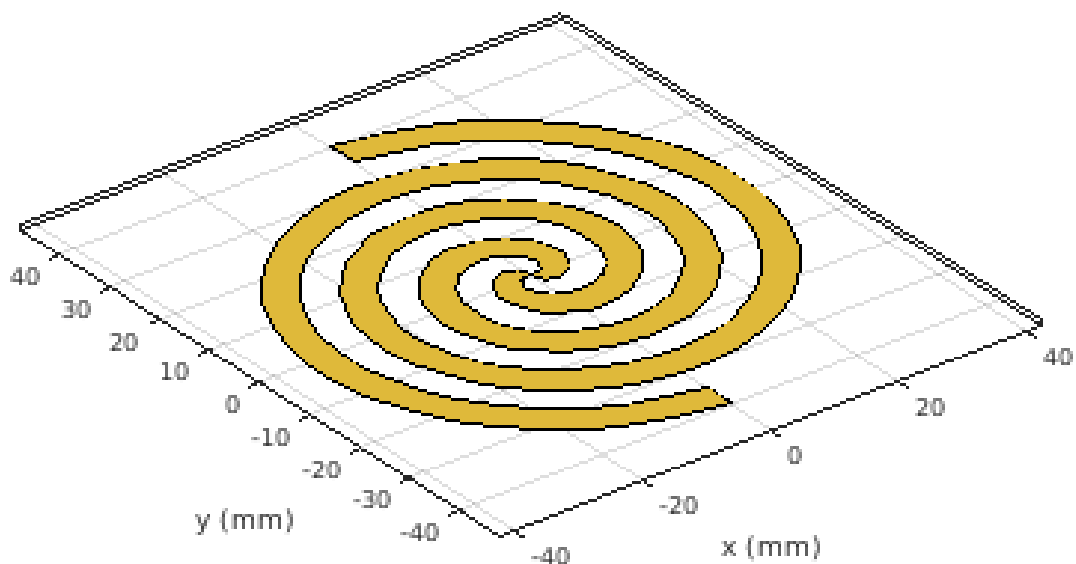


Рисунок 2.2 – арифметическая спиральная антенна

Арифметическая или же архимедова спираль описана в полярных координатах ρ , φ уравнением

$$\rho = a\varphi + b, \quad (5)$$

где a и b являются константами.

Равноугольная, либо логарифмическая, спираль описывается уравнением

$$\rho = be^{a\varphi} \quad (6)$$

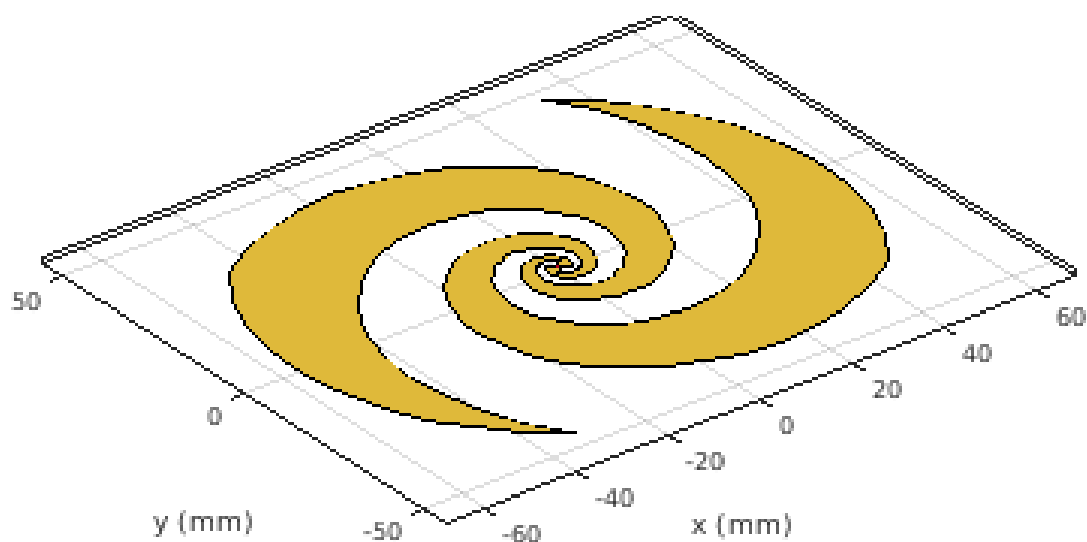


Рисунок 2.3 – равноугольная спиральная антенна

Свое название равноугольный спиральный излучатель получил вследствие того, что касательная, которая проводится к спирали в любой точке, образует с радиусом-вектором постоянный угол для данной спирали.

Данная антенна имеет достаточно простое конструктивное строение. Спираль можно вырезать из металлического листа. Данный вид излучателей может быть однозаходным, двухзаходным, либо же многозаходным. На рисунках 2 и 3 представлены двухзаходные арифметические и равноугольные спиральные излучатели. Для того, чтобы получить двухзаходный излучатель используются две одинаковые ленты, при этом соблюдая условие, что одна лента должна быть повернута на 180° относительно другой. Для работы в осевом режиме ветви спирали обязательно должны возбуждаться в противофазе.

В свободном пространстве плоский спиральный излучатель излучает одновременно в обе стороны. В том случае, когда важно получить однонаправленное излучение ленточная спираль размещается на одной стороне диэлектрической пластины, металлизированной с другой стороны. Вторым вариантом является расположение спирали в раскрыве металлического резонатора.

Плоские антенны также имеют круговую поляризацию из-за того, что по спирали распространяется бегущая волна тока. В случае отклонения от осевого направления круговая поляризация переходит в эллиптическую. Равноугольный спиральный излучатель является достаточно диапазонным излучателем, но его изготовление является технически сложным. Арифметическую же спираль сделать проще, однако она является менее диапазонным излучателем.[4]

2.1.4 Квадрифилярный спиральный излучатель

Квадрифилярный спиральный излучатель является вариантом многозаходной спиральной антенны.

Данный вид излучателей очень хорошо известен в антенной технике. Их применяют в различных радиоэлектронных системах, используя как антенны круговой поляризации, которые имеют относительно малые массогабаритные показатели. Так же данная антенна обеспечивает направленное одностороннее излучение.

Квадрифилярный спиральный излучатель представляет собой антенную систему, состоящую из четырех излучателей, сдвинутых друг относительно друга на 90 градусов. Каждый из этих излучателей представляет собой металлический проводник, который изогнут вдоль спиральной линии. На основании данной антенны имеются элементы питания, которые возбуждают

излучатели. Напряжение на элементах питания антенны формируется с помощью специальной схемы питания.[1]

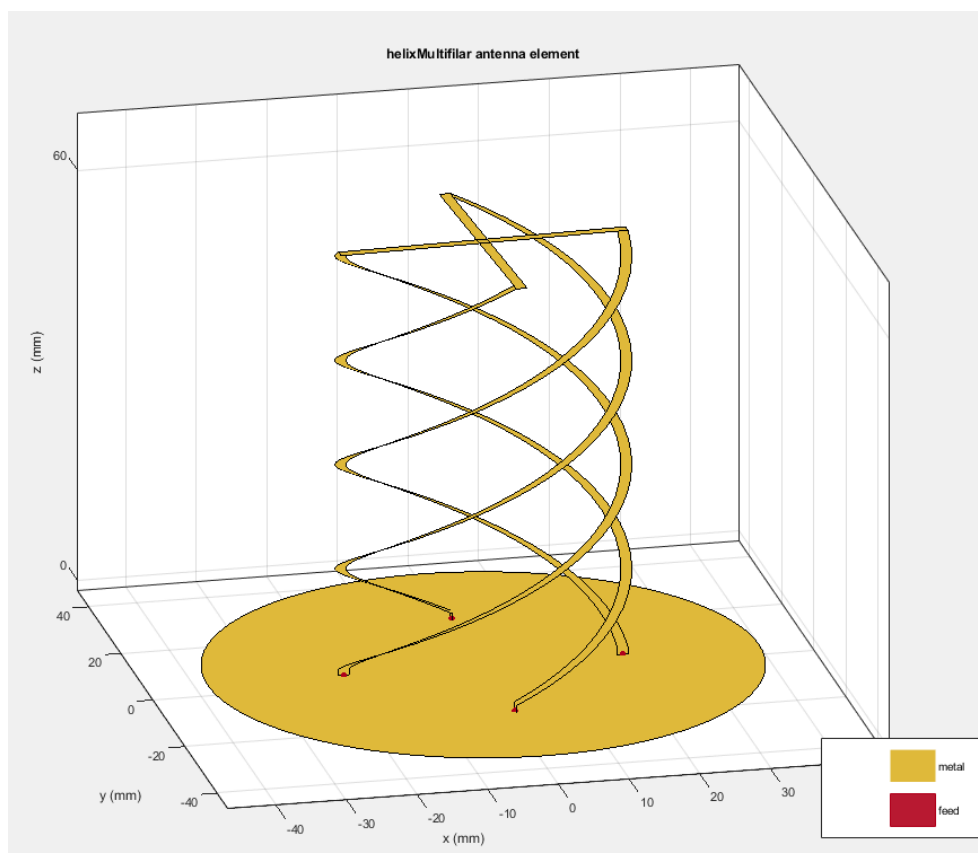


Рисунок 2.4 – модель КСА в программном пакете Matlab

Для того, чтобы данная антенна излучала с круговой поляризацией напряжения должны формироваться с одинаковыми амплитудами, но сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90° . На рисунке 4 показана модель простейшей квадрифилярной спиральной антенны, образованной ленточными проводниками. Такие КСА имеют свободные параметры, к которым можно отнести α – угол намотки и диаметр D . Для управлением характеристик излучения антенны, такими как диаграмма направленности и коэффициент эллиптичности достаточно менять данные параметры. Так же к свободным параметрам можно отнести диаметр проводника d , если он имеет круглую форму сечения, либо ширину w , когда в качестве проводника используется металлическая лента, однако данные параметры не столь существенно влияют на характеристики квадрифилярного спирального излучателя, вследствие чего данные параметры можно не брать во внимание.

Для решения задачи, поставленной в начале работы, будем производить синтез именно квадрифилярного спирального излучателя. Так как он обладает достаточно хорошей направленностью и относительно малыми габаритами, что

позволит синтезировать достаточно эффективную антенную систему на основе данного излучателя.

2.2 Анализ электродинамических характеристик КСА

Для дальнейшего анализа и моделирования КСА сначала опишем излучатель в аналитическом виде.

Коэффициент поляризации можно рассчитать через следующее выражение

$$p = \sqrt{\frac{m^2 \cos^2 \vartheta - m \sin 2\vartheta \cos \tau + \sin^2 \vartheta}{m^2 \sin^2 \vartheta + m \sin 2\vartheta \cos \tau + \cos^2 \vartheta}}, \quad (7)$$

где $m = |E_\varphi|/|E_\theta|$, $\tau = \arg E_\varphi - \arg E_\theta$, $\operatorname{tg} 2\vartheta = \cos \tau \cdot 2m/(1 - m^2)$

ϑ – угол преимущественной поляризации.

Далее описаны фазовые характеристики излучателя. Под данным термином подразумевается величина

$$\Phi(\theta, \varphi) = \Psi(0, 0) - \Psi(\theta, \varphi), \quad (8)$$

где $\Psi(\theta, \varphi)$ – фаза поля спирали в некоторой точке дальней зоны, имеющей координаты R_0, θ, φ , $\Psi(0, 0)$ – фаза поля спирали в точке с координатами $R_0, 0, 0$.

Если рассматривать фазовую характеристику с учетом только одной резонирующей гармоники, то получается

$$\Phi(\theta, \varphi) \approx [\gamma_0(\theta) - \gamma_0(0)]\pi N + \varphi + \Phi_0(\theta), \quad (9)$$

$$\Phi(\theta, \varphi) \approx [\gamma_0(\theta) - \gamma_0(0)]\pi N + \varphi,$$

где

$$\Phi_0(\theta) = \arctg[2\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta]_1(k \sin \theta) / J_0(k \sin \theta). \quad (10)$$

Тогда, зная, что $\gamma_0(\theta) = [\beta \alpha - k \alpha \cos \theta] \operatorname{tg} \alpha$ из (10) получаем следующее

$$\Phi(\theta, \varphi) \approx \frac{k L_z (1 - \cos \theta)}{2} + \varphi + \Phi_0, \quad (11)$$

$$\Phi(\theta, \varphi) \approx \frac{k L_z (1 - \cos \theta)}{2} + \varphi,$$

где L_z – осевая длина излучателя.

Описанное выше выражение (11) описывает изменение фазы поля на сфере с центром в начале координат, что фактически является точкой возбуждения излучателя. Следуя вышеизложенному выводу, получается, что $\Phi(\theta, \varphi)$ показывает зависимость начальной фазы тока на входе спирали от направления на источник электромагнитного поля. Выражение

(11) позволяет проанализировать зависимость фазы на входе спирали от углов θ, φ , от геометрических параметров спирали и длины волны.

Коэффициент направленного действия для целого числа витков N можно описать следующим выражением

$$D \approx \frac{8[\gamma_0^2(0)+1]\sin^2[\pi N \gamma_0(0)] \text{kat} g^\alpha}{[\gamma_0^2(0)-1]^2 J_0^2(k a \sin 60^\circ) [\gamma_0^2(60^\circ)+0,25] B \pi N}, \quad (12)$$

$$\text{где } B = \left\{ \text{Si} \left[2\pi N x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) \right] - \sin^2 \left[\pi N x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) \right] / \pi N x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) \right\},$$

$$x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) = \gamma_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) - 1.$$

Входное сопротивление для целого количества N описывается выражением

$$R_{\text{вх}} \approx \frac{240(kr)^2 \sin^2[\pi N \gamma_0(0)]}{D[\gamma_0^2(0)-1]^2} \left(\frac{J_0}{J_{\text{вх}}} \right)^2, \quad (13)$$

где D - коэффициент направленного действия, который можно рассчитать по выражению (12). [3]

Чтобы облегчить процесс расчета диаграммы направленности примем наш излучатель за плоскую прямолинейную эквидистантную равноамплитудную антенную решетку, так как используются 4 идентичных спиральных излучателя на одинаковом расстоянии друг от друга. В таком случае для получения результирующей диаграммы направленности воспользуемся теоремой перемножения диаграмм направленности. Тогда результирующая ДН примет вид

$$F(\theta, \varphi) = f_1(\theta, \varphi) f_c(\theta, \varphi), \quad (14)$$

где $f_1(\theta, \varphi)$ - результирующая диаграмма направленности одного излучателя; $f_c(\theta, \varphi)$ - множитель антенной решетки.

Векторная ДН излучателя имеет вид

$$f_1(\theta, \varphi) = J_0(ka \cdot \sin \theta) \cdot \cos \theta, \quad (15)$$

где J_0 - функция Бесселя нулевого порядка; k - волновое число свободного пространства; a - радиус спирали.

Для определения множителя антенной решетки примем N_x и N_y за число излучателей в столбцах и рядах соответственно. Так же примем D_x и D_y за расстояние между соседними излучателями по осям OX и OY . θ_x и θ_y являются углами, отсчитываемыми от

точки наблюдения от осей OX и OY . Затем примем каждый столбец излучателей за линейную антенную решетку. Тогда множитель такой антенной решетки можно записать как

$$F_{Cx}(\theta_x) = \frac{\sin\left[\frac{N_x}{2}(kd_x \cos\theta_x - \alpha_x)\right]}{N_x \sin\left[\frac{1}{2}(kd_x \cos\theta_x - \alpha_x)\right]}, \quad (16)$$

В таком случае произведя эквивалентную замену каждого столбца плоской антенной решетки на излучатель с собственной ДН, которая совпадает с (9), мы получим линейную антенную решетку, которая будет ориентирована вдоль оси OY . Затем воспользовавшись теоремой о перемножении диаграмм направленности мы получим

$$F_C(\theta_x, \theta_y) = F_O(\theta_x)F_{Cy}(\theta_y), \quad (17)$$

где $F_O(\theta_x)$ - ДН излучателя; $F_{Cy}(\theta_y)$ - множитель антенной решетки, состоящей из излучателей. В таком случае $F_{Cy}(\theta_y)$ имеет вид

$$F_{Cy}(\theta_y) = \frac{\sin\left[\frac{N_y}{2}(kd_y \cos\theta_y - \alpha_y)\right]}{N_y \sin\left[\frac{1}{2}(kd_y \cos\theta_y - \alpha_y)\right]}, \quad (18)$$

Далее введем обозначение обобщенных угловых координат

$$U_x = kd_x \cos\theta_x - \alpha_x; \quad U_y = kd_y \cos\theta_y - \alpha_y. \quad (19)$$

Подставив (19) в (16) и (18) определим множитель плоской антенной решетки

$$F_C(U_x, U_y) = \frac{\sin\left(\frac{N_x}{2}U_x\right) \sin\left(\frac{N_y}{2}U_y\right)}{N_x \sin\left(\frac{1}{2}U_x\right) N_y \sin\left(\frac{1}{2}U_y\right)}, \quad (20)$$

Однако необходимо учитывать то, множитель антенной решетки в сферической системе координат не является функцией углов θ_x и θ_y . В таком случае необходимо определить связь между углами θ_x и θ_y и углами θ и φ . Если учесть, что $\cos\theta_x$ и $\cos\theta_y$ являются проекциями единичного вектора \vec{e}_0 , который ориентирован в направлении осей OX и OY , то получим

$$e_x^0 = \sin\theta_x; \quad e_y^0 = \sin\theta_y. \quad (21)$$

Тогда, учитывая взаимосвязь между сферической и прямоугольной системами координат, можно выразить проекции единичного вектора \vec{e}_0 через углы θ и φ :

$$e_x^0 = \sin\theta \cos\varphi; \quad e_y^0 = \sin\theta \sin\varphi. \quad (22)$$

Тогда, учитывая все вышесказанное, получаем выражение для множителя антенной решетки в сферической системе координат

$$F_C(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{N_x}{2} k d_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x\right)}{N_x \sin\left(\frac{1}{2}(k d_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x)\right)} \frac{\sin\left(\frac{N_y}{2} k d_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y\right)}{N_y \sin\left(\frac{1}{2}(k d_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y)\right)}, \quad (23)$$

Теперь, определив множитель антенной решетки, и подставив выражения (22) и (23) в выражение (14), получаем результирующую диаграмму направленности квадрифилярного спирального излучателя[2]

$$F(\theta, \varphi) = (J_0(ka \cdot \sin\theta) \cdot \cos\theta) \times \frac{\sin\left(\frac{N_x}{2} k d_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x\right)}{N_x \sin\left(\frac{1}{2}(k d_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x)\right)} \frac{\sin\left(\frac{N_y}{2} k d_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y\right)}{N_y \sin\left(\frac{1}{2}(k d_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y)\right)}, \quad (24)$$

В качестве излучателя для анализа антенной решетки будем использовать квадрифилярный излучатель, который удовлетворяет требованиям, изложенным выше.

2.3 Описание и анализ антенной решетки для метеорологической станции

Для определения вида и формы антенной решетки проведем анализ существующих антенных решеток. Определим её геометрические размеры, количество излучателей, вид амплитудно-фазового распределения.

2.3.1 Классификация антенных решеток

Антенные решётки могут быть классифицированы по следующим основным признакам:

- 1) Геометрия расположения излучателей в пространстве:
 - линейные
 - дуговые
 - кольцевые
 - плоские
 - с прямоугольной сеткой размещения
 - с косоугольной сеткой размещения
 - выпуклые
 - цилиндрические
 - конические
 - сферические
 - пространственные
- 2) Способ возбуждения:
 - с последовательным питанием

- с параллельным питанием
- с комбинированным (последовательно-параллельным)
- с пространственным (оптическим, «эфирным») способом возбуждения

3) Закономерность размещения излучающих элементов в самой решётке

- эквидистантное размещение
- неэквидистантное размещение

4) Способ обработки сигнала

5) Амплитудо-фазовое распределение токов (поля) по решётке

6) Тип излучателей

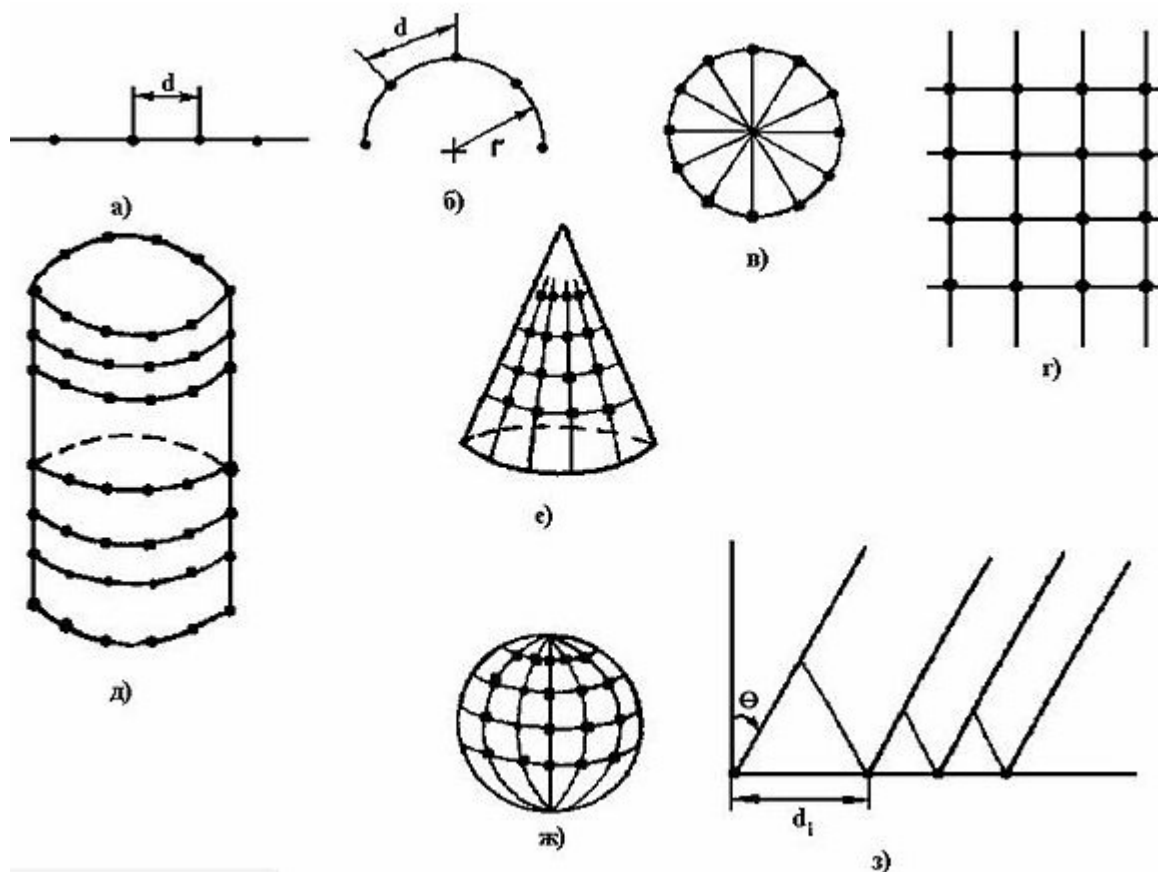


Рисунок 2.5 - Классификация антенных решёток; а) линейная; б) дуговая; в) кольцевая; г) плоская; д) цилиндрическая; е) коническая; ж) сферическая; з) неэквидистантная

Производя литературный обзор по данной тематике, подавляющее большинство антенных систем для РЛС, в том числе и для метео РЛС, базируются на антенных решетках с фазовым распределением – фазированных антенных решетках, которые в свою очередь обладают достаточно высокими

электродинамическими характеристиками, высокой помехозащищенностью, малым уровнем боковых лепестков и возможностью электрического сканирования луча, что является немаловажным при мониторинге одного или множества радиозондов. Рассмотрим работу таких ФАР.

Фазированная антенная решетка (ФАР) – это решетка, в которой изменяя амплитудно-фазовое распределение токов или полей возбуждения токов, можно управлять шириной диаграммы направленности или направлением излучения.

Формы, размеры и конструкции современных ФАР весьма разнообразны; их разнообразие определяется как типом используемых излучателей, так и характером их расположения. Сектор сканирования ФАР определяется ДН её излучателей. В ФАР с быстрым широкоугольным качанием луча обычно используются слабонаправленные излучатели: симметричные и несимметричные вибраторы, часто с одним или несколькими рефлекторами (например, в виде общего для всей ФАР зеркала); открытые концы радиоволноводов, щелевые, рупорные, спиральные, диэлектрические стержневые, логопериодические и др. антенны. Иногда большие по размерам ФАР составляют из отдельных малых ФАР (модулей); ДН последних ориентируется в направлении основного луча всей ФАР. В ряде случаев, например когда допустимо медленное отклонение луча, в качестве излучателей используют остронаправленные антенны с механическим поворотом (например, т. н. полноповоротные зеркальные); в таких ФАР отклонение луча на большой угол выполняют посредством поворота всех антенн и фазирования излучаемых ими волн; фазирование этих антенн позволяет также осуществлять в пределах их ДН быстрое качание луча ФАР.

В зависимости от требуемой формы ДН и необходимого пространственного сектора сканирования в ФАР применяют различное взаимное расположение элементов:

вдоль линии (прямой или дуги);

по поверхности (например, плоской — в т. н. плоских ФАР; цилиндрической; сферической)

в заданном объёме (объёмные ФАР).

Иногда форма излучающей поверхности ФАР — [раскрыва](#), определяется конфигурацией объекта, на котором устанавливается ФАР. ФАР с формой раскрыва, подобной форме

объекта, иногда называются конформными. Широко распространены плоские ФАР; в них луч может сканировать от направления нормали к раскрыву (как в синфазной антенне) до направления вдоль раскрыва (как в антенне бегущей волны). Коэффициент направленного действия (КНД) плоской ФАР при отклонении луча от нормали к раскрыву уменьшается. Для обеспечения широкоугольного сканирования (в больших пространственных углах — вплоть до 4 стерадиан без заметного снижения КНД используют ФАР с неплоским (например, сферическим) раскрывом или системы плоских ФАР, ориентированных в различных направлениях. Сканирование в этих системах осуществляется посредством возбуждения соответственно ориентированных излучателей и их фазирования.

По характеру распределения излучателей в раскрыве различают эквидистантные и неэквидистантные ФАР. В эквидистантных ФАР расстояния между соседними элементами одинаковы по всему раскрыву. В плоских эквидистантных ФАР излучатели чаще всего располагают в узлах прямоугольной решётки (прямоугольное расположение) или в узлах треугольной сетки (гексагональное расположение). Расстояния между излучателями в эквидистантных ФАР обычно выбирают достаточно малыми (часто меньше рабочей длины волны), что позволяет формировать в секторе сканирования ДН с одним главным лепестком (без побочных дифракционных максимумов — т. н. паразитных лучей) и низким уровнем боковых лепестков; однако для формирования узкого луча (то есть в ФАР с большим раскрывом) необходимо использовать большое число элементов. В неэквидистантных ФАР элементы располагают на неодинаковых расстояниях друг от друга (расстояние может быть, например, случайной величиной). В таких ФАР даже при больших расстояниях между соседними излучателями можно избежать образования паразитных лучей и получать ДН с одним главным лепестком. Это позволяет в случае больших раскрывов сформировать очень узкий луч при сравнительно небольшом числе элементов; однако такие неэквидистантные ФАР с большим раскрывом при малом числе излучателей имеют более высокий уровень боковых лепестков и, соответственно, более низкий КНД, чем ФАР с большим числом элементов. В неэквидистантных ФАР с малыми расстояниями между

излучателями при равных мощностях волн, излучаемых отдельными элементами, можно получать (в результате неравномерного распределения плотности излучения в раскрыве антенны) ДН с более низким уровнем боковых лепестков, чем в эквидистантных ФАР с таким же раскрывом и таким же числом элементов.

В качестве излучателей ФАР могут выступать:

1. ненаправленные;
2. слабонаправленные;
3. направленные антенны.

Примером использования слабонаправленных излучателей можно назвать антенны базовых станций [GSM](#) стандарта, где в качестве излучателей используются [патч-антенны](#). В качестве излучателей антенн [LTE](#) стандарта используются диполи и монополи.

В качестве интересного примера использования направленных антенн в конфигурации антенных решеток можно назвать проект [Allen Telescope Array](#), использующий в качестве элементов антенной решетки [зеркальные антенны](#) для целей [радиотелескопии](#).

По способу изменения фазовых сдвигов различают ФАР:

1. с [электромеханическим](#) сканированием, осуществляемым, например, посредством изменения геометрической формы возбуждающего радиоволновода;

2. [частотным](#) сканированием, основанным на использовании зависимости фазовых сдвигов от частоты, например за счёт длины фидера между соседними излучателями или дисперсии волн в радиоволноводе;

3. с электрическим сканированием, реализуемым при помощи [фазосдвигающих цепей](#) или [фазовращателей](#), управляемых электрическими сигналами с плавным (непрерывным) или ступенчатым ([дискретным](#)) изменением фазовых сдвигов;

4. со сканированием, основанным на принципах радиофотоники (например, на основе применения [волоконной брэгговской решётки](#)).

Наибольшими возможностями обладают ФАР с электрическим сканированием. Они обеспечивают создание разнообразных фазовых сдвигов по всему раскрыву и

значительную скорость изменения этих сдвигов при сравнительно небольших потерях мощности. На СВЧ в современных ФАР широко используют [ферритовые](#) и [полупроводниковые](#) фазовращатели (с быстродействием порядка микросекунд и потерями мощности ~ 20 %). Управление работой фазовращателей осуществляется при помощи быстродействующей электронной системы, которая в простейших случаях управляет группами элементов (например, строками и столбцами в плоских ФАР с прямоугольным расположением излучателей), а в наиболее сложных — каждым фазовращателем в отдельности. Качание луча в пространстве может производиться как по заранее заданному закону, так и по программе, вырабатываемой в ходе работы всего радиоустройства, в которое входит ФАР.

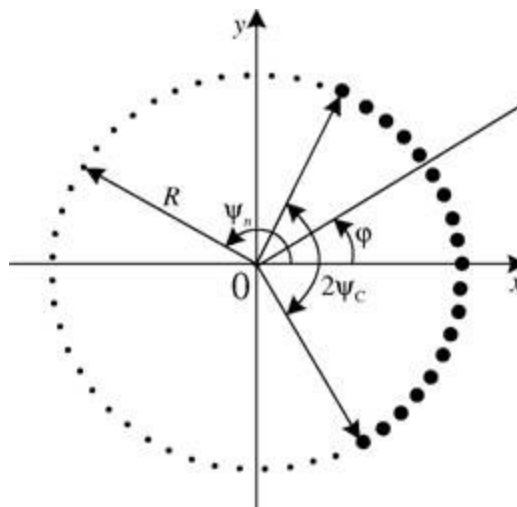
Помехозащищённость системы зависит от [уровня боковых лепестков](#) антенны и возможности подстройки (адаптации) его по помеховой обстановке. Антенная решётка — необходимое звено для создания такого динамического пространственно-временного фильтра, или просто для уменьшения [УБЛ](#). Одной из важнейших задач современной бортовой радиоэлектроники является создание комплексированной системы, совмещающей несколько функций, например [радионавигации](#), [РЛС](#), связи и т. д. Возникает необходимость создания антенной решётки с электрическим сканированием с несколькими лучами ([многолучевой](#), [моноимпульсной](#) и т. д.), работающей на различных частотах ([совмещённой](#)) и имеющей различные характеристики.

Основываясь на вышеизложенном, рассмотрим работу такой решетки. Геометрическая структура будет представлять цилиндрическую антенную решетку, которая состоит из N излучателей и M колец, количественное значение которых определяет разрешающую способность системы.

2.3.2 Анализ цилиндрической ФАР

Цилиндрическая антенная решетка - это система излучателей, размещенных на цилиндрической поверхности. Пространственная ориентация излучателей такова, что

направление максимума ДН каждого из них совпадает с направлением радиуса соответствующей антенной решетки в месте расположения излучателя.



Основные достоинства выпуклых кольцевых АР:

- возможность широкоугольного (до 360°) сканирования лучом неизменных ширины и формы в азимутальной плоскости (в плоскости дуги). Цилиндрическая АР позволяет также сканировать в угломестной плоскости (до $\pm 50^\circ$);
- слабая по сравнению с плоскими и линейными АР взаимная связь излучателей из-за пространственного разворота их осей;
- конструктивное удобство размещения выпуклых АР на ряде объектов (корпус ракеты, обшивка самолета и др.).

К их недостаткам относятся сложность системы возбуждения излучателей и некоторая избыточность их количества. Чаще всего излучатели выпуклых АР расположены на хорошо проводящей металлической поверхности, из-за экранирующего действия которой в формировании остронаправленного излучения будет участвовать лишь часть излучателей всей решетки, а именно те из них, которые расположены на освещенном (в понимании геометрической

оптики) участке АР относительно направления излучения антенны.

На выпуклых АР можно сформировать несколько лучей и независимо сканировать ими, если создать соответствующее число отдельных излучающих участков. Однако такой режим работы антенны сложен в реализации, требует специальных устройств возбуждения излучателей.

Для формирования узкого луча и широкоугольного электрического сканирования им в пространстве необходима независимая регулировка амплитуды и фазы возбуждения в каждом излучателе решетки.

Известны два способа распределения энергии СВЧ между излучателями цилиндрических и кольцевых ФАР: фидерный и пространственный. При фидерном возбуждении энергию к излучателям подводят с помощью отрезков линии передачи (волноводной, коаксиальной, полосковой и др.) и делителей мощности.

Для формирования луча в заданном направлении θ_0, φ_0 на излучающем участке цилиндрической ФАР необходимо создать такое фазовое распределение, при котором поля, излученные каждым излучателем, складываются в указанном направлении синфазно.

В частности, для кольцевой решетки, расположенной в плоскости $z=0$

$$\Phi_{0,n}(\theta_0 \varphi_0) = -(2\pi\lambda[R\sin\theta_0 \cos(\varphi_0 - \alpha_n)] \pm 2\pi k, \quad (25)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ - целое число.

Требуемая фаза:

$$\Phi_{\text{фаз},n}(\theta_0 \varphi_0) = \Phi_{0,n}(\theta_0 \varphi_0) - \Phi_{0,n}(\theta_0 \varphi_0) + \Phi_{\text{фид},n}(\theta_0 \varphi_0) - \Phi_{\text{фид},n}(\theta_0 \varphi_0) + 2\pi k, \quad (26)$$

Диаграммы направленности кольцевых АР кроме основной поляризационной составляющей излучаемого поля имеют и паразитную (кроссполяризационную) составляющую. Паразитная составляющая отсутствует только тогда, когда АР образована из продольных линеек, а также когда ДН рассматривается в экваториальной плоскости ($\theta = \pi/2$). [1]

Расчет ДН кольцевых решеток существенно усложняется как из-за необходимости учитывать дифракционные явления на поверхности антенны, так и из-за того, что характеристики каждого излучателя решетки должны быть найдены в присутствии всех остальных, т.е. с учетом их взаимодействия. Как и в плоских ФАР, из-за эффекта взаимодействия характеристики отдельных излучателей в составе выпуклой АР (входное сопротивление, ДН, поляризация и др.) могут заметно отличаться от этих же характеристик уединенного излучателя, что может привести к ухудшению ожидаемых электрических характеристик проектируемой АР.

Непосредственный расчет ДН цилиндрических и кольцевых ФАР громоздок, требует применения ЭВМ, и его выполнение оправдано на этапе уточнения характеристик окончательного варианта антенны. На этапе выбора и оценивания вариантов проектируемой ФАР расчеты желательно сократить и упростить без существенного снижения их точности. Для этого вводятся следующие допущения:

- 1) В пределах излучающего участка кольцевая АР с дискретными излучателями заменяется такой же с непрерывным распределением тока $I(\alpha)$, равным реальному амплитудному распределению в точках размещения излучателей, и с достаточно гладким распределением тока между этими точками.

2) Парциальная ДН излучателя и амплитудное распределение на излучающем участке аппроксимируются элементарными функциями.

С учетом сделанных допущений ДН кольцевой решетки в плоскости дуги при формировании луча в направлении $\theta_0 = \pi/2$, $\varphi_0 = 0$ с точностью до нормируемого множителя A

$$F_{\kappa}(\varphi) = A \int_{-\beta}^{\beta} I(\alpha) F_{\alpha}(\varphi) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} R[\cos\varphi - \cos(\varphi - \alpha)]\right] da \quad (27)$$

где $F_{\alpha}(\varphi)$ - ДН в азимутальной плоскости отдельного излучателя с координатой α [1]

Для приближенного вычисления ДН по (31) удобен метод эквивалентного линейного излучателя. Суть его заключается в том, что ДН кольцевой антенны рассчитывают как ДН синфазной линейной антенны, в которой амплитудное распределение соответствует проекции амплитудного распределения по кольцу (в пределах излучающего участка) на линейную антенну длиной $l_{\text{экв}}$, расположенную перпендикулярно направлению формируемого луча. В эквивалентной линейной антенне амплитудное распределение

$$I_{\text{экв}}(y) \approx I\left(\arcsin \frac{y}{R}\right) F\left(\arcsin \frac{y}{R}\right) \frac{1}{\sqrt{R^2 - y^2}} \quad (28)$$

С учетом этого ДН кольцевой антенны в азимутальной плоскости

$$F(\varphi) = A \int_{-y_2}^{y_1} I_{\text{экв}}(y) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} y \sin\varphi\right] dy, \quad (29)$$

где $y_1 = y_2 = R \sin\beta$

Область допустимых углов φ , в пределах которых можно рассчитывать ДН по (33) с погрешностью, не превышающей нескольких процентов, определяется неравенством

$$|\varphi| \leq \arccos \left[1 - \frac{\lambda}{4R(1 - \cos\beta)} \right], \quad (30)$$

Максимальный КНД кольцевой решетки

$$D_{k\max} \approx D_{И} \sum_{n=-N_1}^{N_1} F_{0,n}^2(\varphi_0), \quad (31)$$

где $D_{И}$ - КНД излучателя в максимуме его ДН; $F_{0,n}$ - значение ДН излучателя с координатой $\varphi = \alpha_n$ в направлении $\varphi = \varphi_0$.

В свою очередь, в важном для практики случае разделяющегося по координатам z и α амплитудном распределении тока $|I_{m,n}| = |I_{m,0}| |I_{n,0}|$ ДН цилиндрической ФАР можно представить как произведение ДН кольцевой АР, лежащей в плоскости $z = 0$, на множитель линейной системы $f_z(\theta)$ излучателей, расположенных на образующей цилиндра[1]:

$$F(\theta, \varphi) = F_k(\theta, \varphi) f_z(\theta) \quad (32)$$

где

$$F_k(\theta, \varphi) = \frac{\sum_{n=-N_1}^{N_1} |I_{0,n}| F_{0,n}(\theta, \varphi) \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} R [\sin\theta_0 \cos(\varphi_0 - \alpha_n) - \sin\theta \cos(\varphi - \alpha_n)]\right\}}{\sum_{n=-N_1}^{N_1} |I_{0,n}| F_{0,n}(\theta_0, \varphi_0)}, \quad (33)$$

$$f_z(\theta) = \frac{\sum_{m=-M_1}^{M_1} |I_{m,0}| \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} z_m (\cos\theta_0 - \cos\theta)\right]}{\sum_{m=-M_1}^{M_1} |I_{m,0}|}. \quad (34)$$

На основе полученных математических моделей КСА и АР мы можем провести их компьютерное моделирование.

Синтез компьютерной модели АР будет осуществляться посредством специализированных программных пакетов,

которые позволят реализовать все необходимые операции для формирования антенной решетки заданных размеров.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АНТЕННЫХ СИСТЕМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РЛС

Для построения компьютерной модели АР сначала необходимо смоделировать одиночный излучатель из которого будет состоять конечная ФАР.

3.1 Построение феноменологической модели КСА

Для того чтобы оптимизировать процесс подбора излучателя для антенной системы, входящего в антенную решетку, будем использовать метод построения феноменологических моделей.

Использование метода построения феноменологических моделей позволит синтезировать сложные антенные системы и комплексы без использования методов натурального моделирования и без построения физических моделей, так как этот подход показывает максимально приближенные к реальной физической модели результаты, в которых расхождение с физической моделью составляет менее пяти процентов. В свою очередь благодаря использованию предлагаемого метода, можно оперативно синтезировать антенные структуры, которые будут иметь хорошую повторяемость и линейность электродинамических характеристик при трансформации феноменологических моделей в физические. На основе вышеизложенного подхода будет синтезирована и антенная решетка для комплекса метеорологического обеспечения.

Для более вариативной выборки будет синтезировано несколько моделей квадрифилярных излучателей. По итогу, для использования в антенной решетке, будет выбран излучатель с наиболее оптимальными электродинамическими характеристиками.[8-10]

Используя математическую модель квадрифилярного излучателя, основанную на выражениях (7) – (24), получим первую модель – замкнутую четырехпортовую четвертьволновую

КСА. Её 3D-модель и диаграмму направленности, смоделированных в программных средах Altair FEKO и Matlab, можно увидеть на рисунках 3.1–3.4 соответственно.

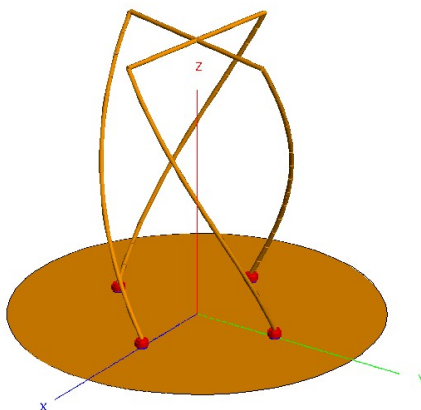


Рисунок 3.1 – 3D-модель замкнутой четвертьволновой КСА в программной среде Altair FEKO

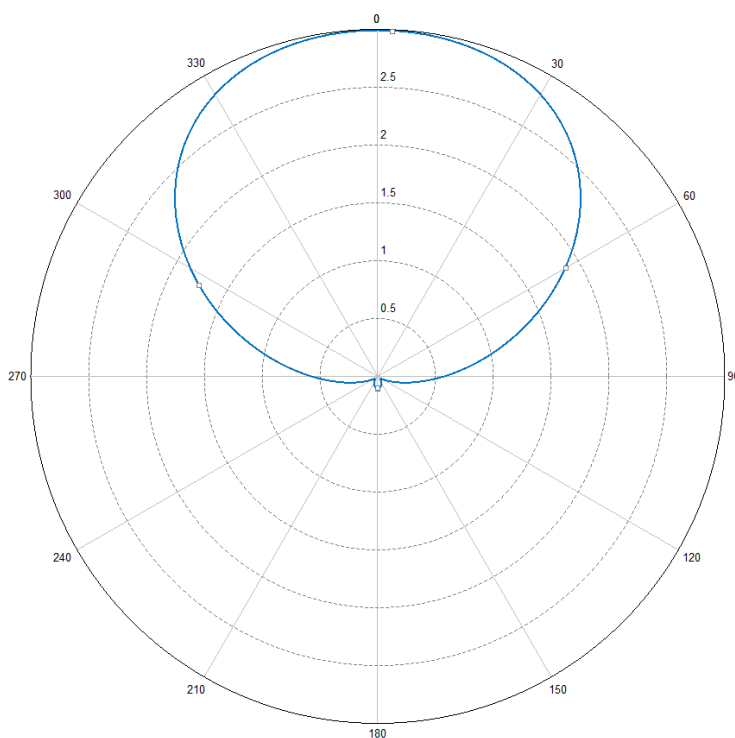


Рисунок 3.2 – диаграмма направленности КСА в программной среде Altair FEKO

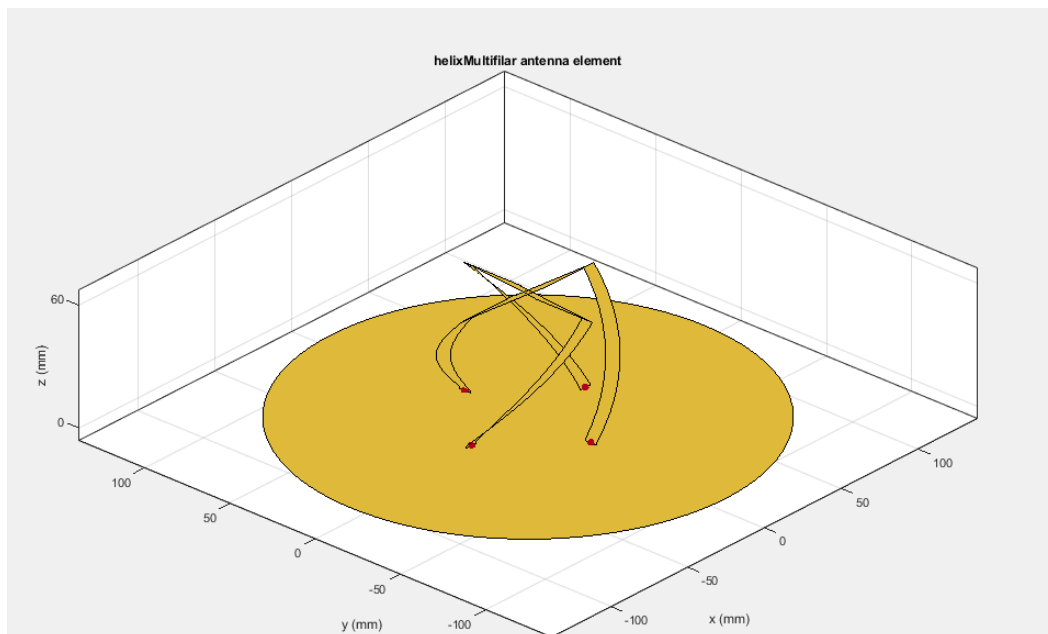


Рисунок 3.3 – 3D-модель замкнутой четвертьволновой КСА в программной среде Matlab

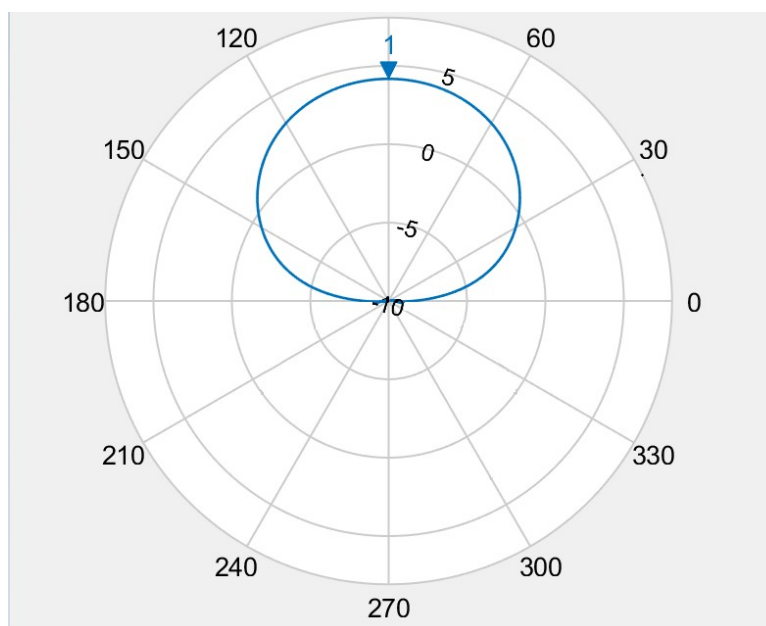


Рисунок 3.4 – диаграмма направленности КСА в программной среде Matlab

Более подробно все характеристики данного излучателя в программной среде Altair FEKO можно рассмотреть на рисунках 3.5–3.9.

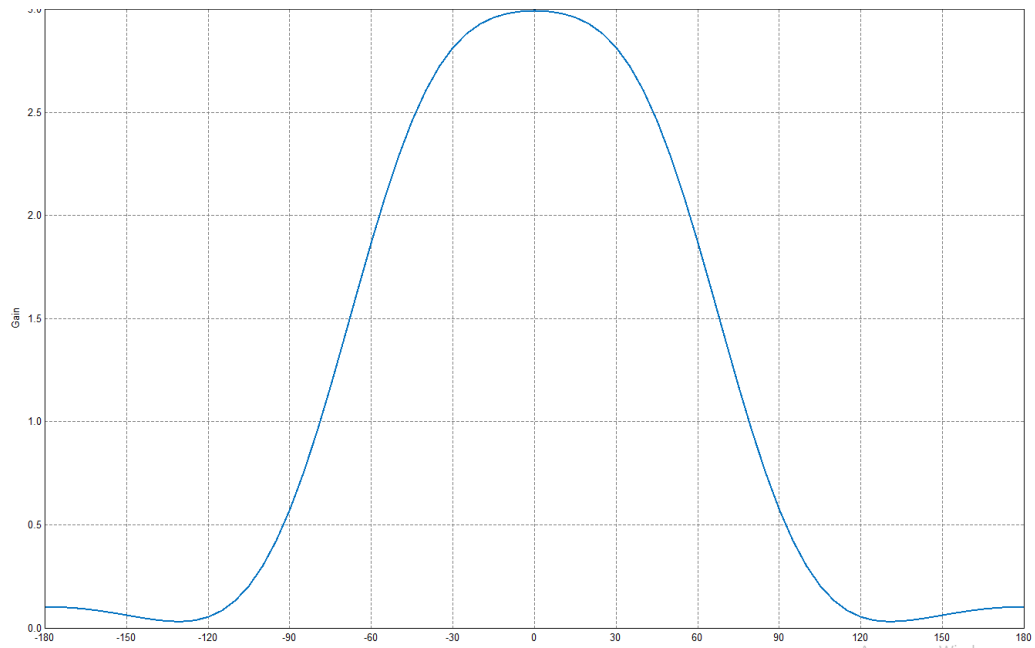


Рисунок 3.5 – ДН замкнутой четвертьволновой КСА в декартовой системе координат

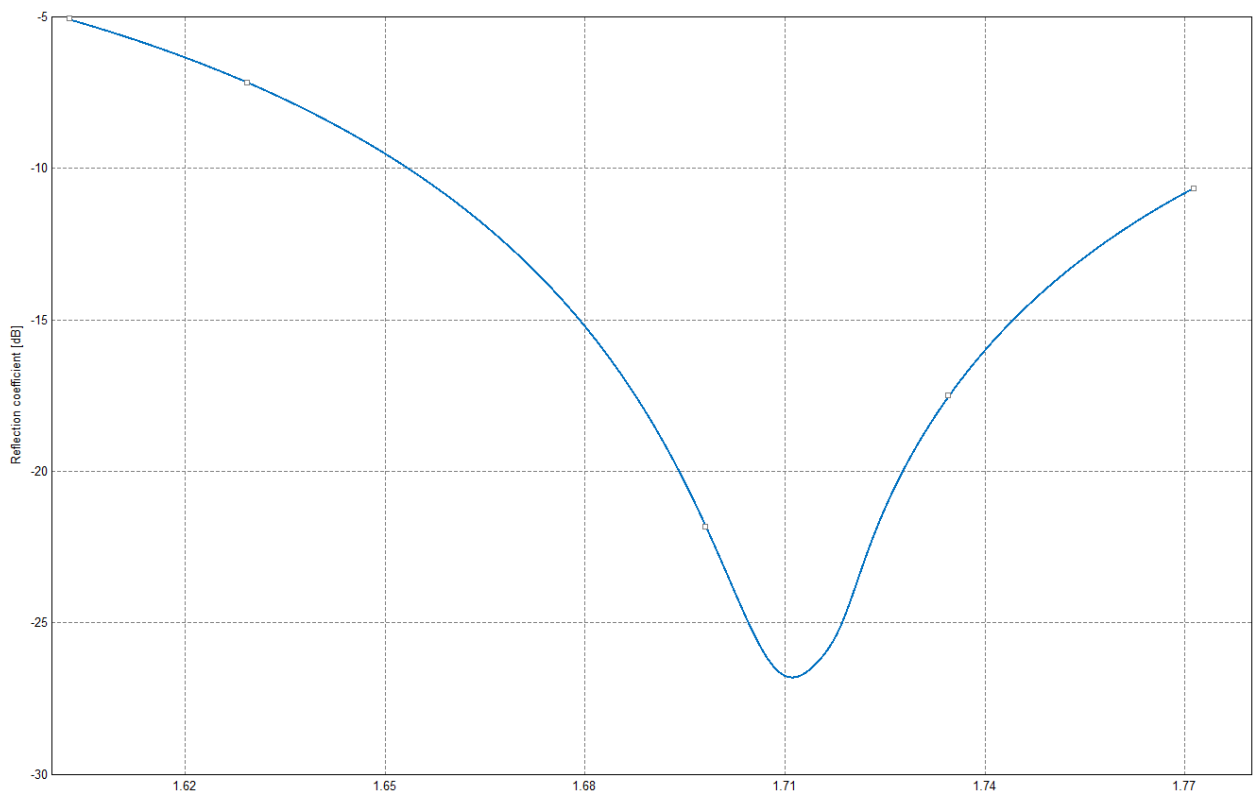


Рисунок 3.6 – Коэффициент отражения замкнутой четвертьволновой КСА

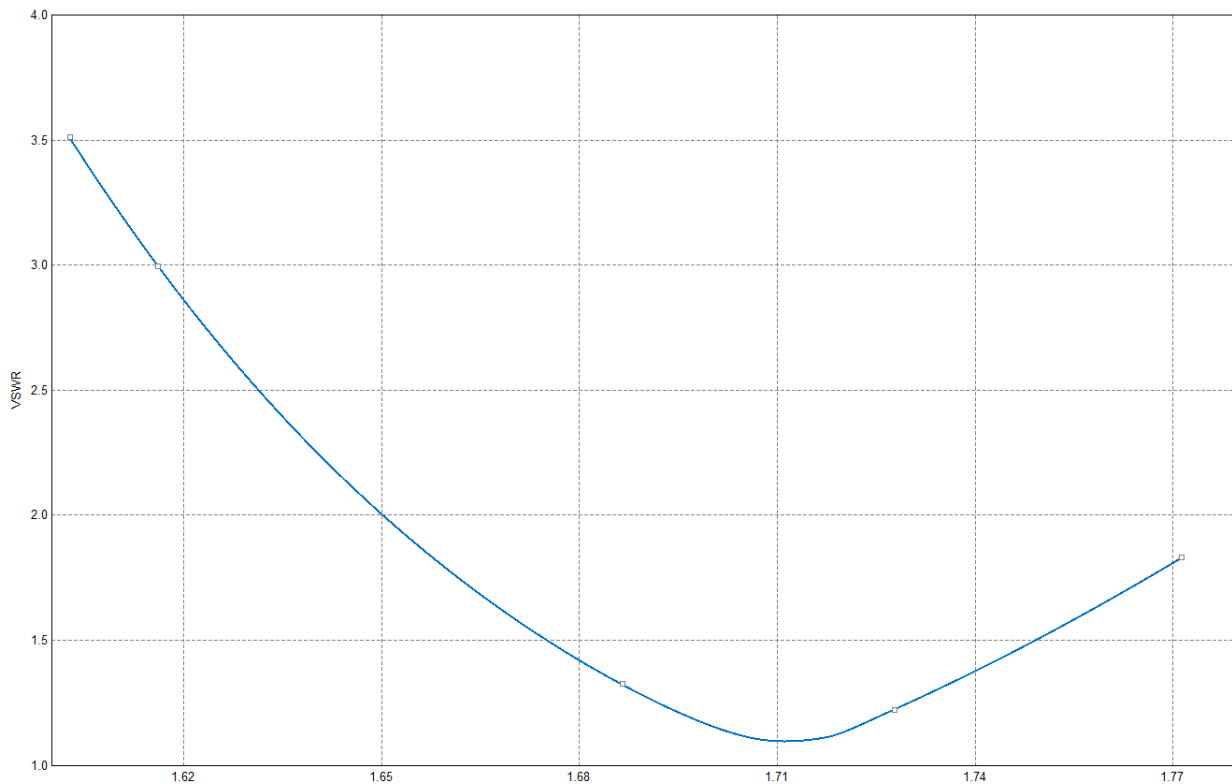


Рисунок 3.7 – Коэффициент стоячей волны замкнутой четвертьволновой КСА

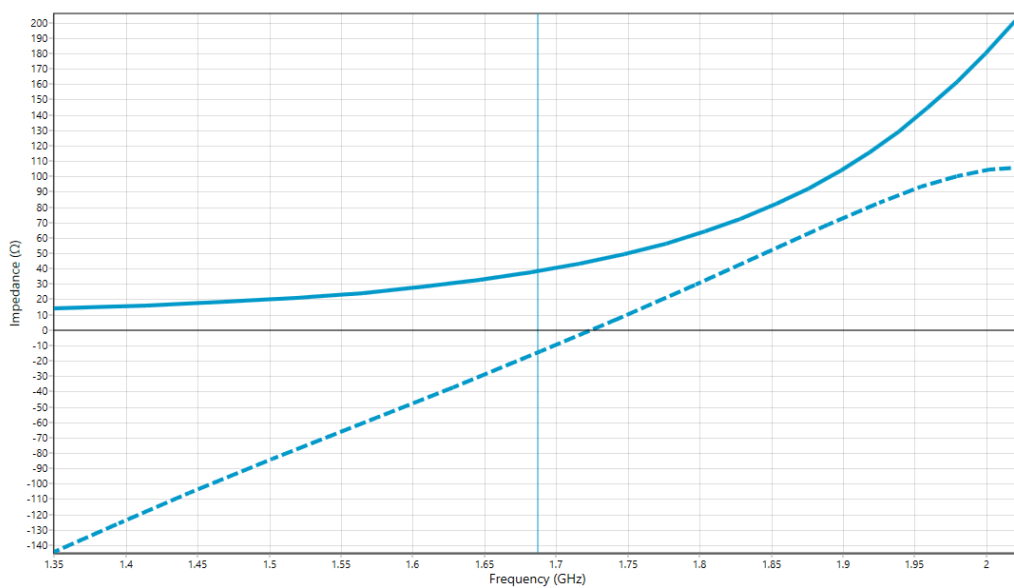


Рисунок 3.8 – волновое сопротивление замкнутой КСА

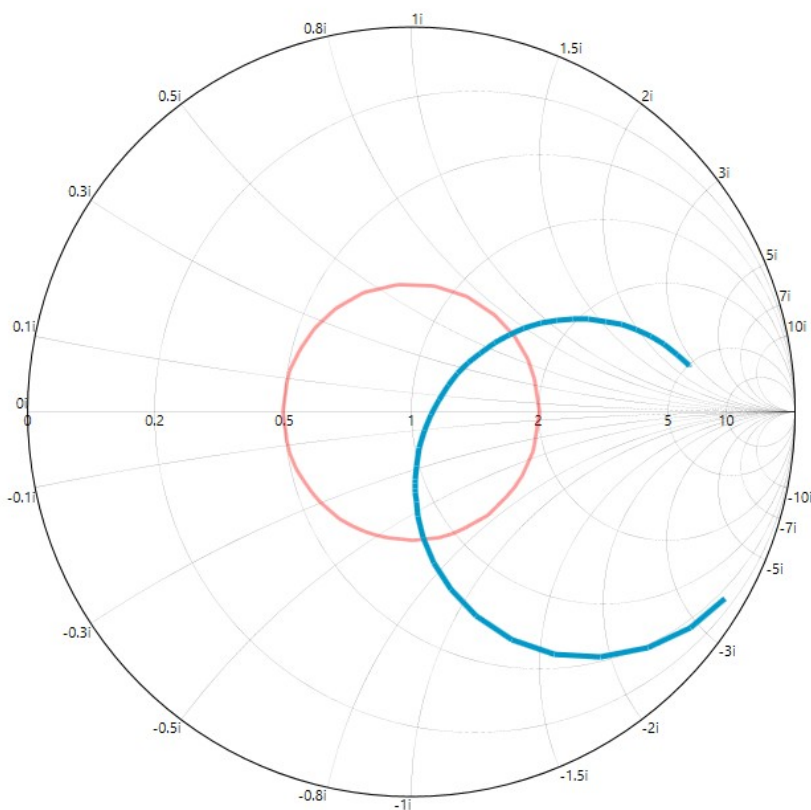


Рисунок 3.9 – сопротивление замкнутой КСА на диаграмме Вольперта – Смита

Данный вариант квадрифилярного излучателя имеет хорошие электродинамические характеристики и отлично подходит для использования в системе антенной решетки.

Следующим вариантом является разомкнутая КСА. Её модель и диаграмма направленности в программных средах Altair FEKO и Matlab представлены на рисунках 3.5–3.8 соответственно.

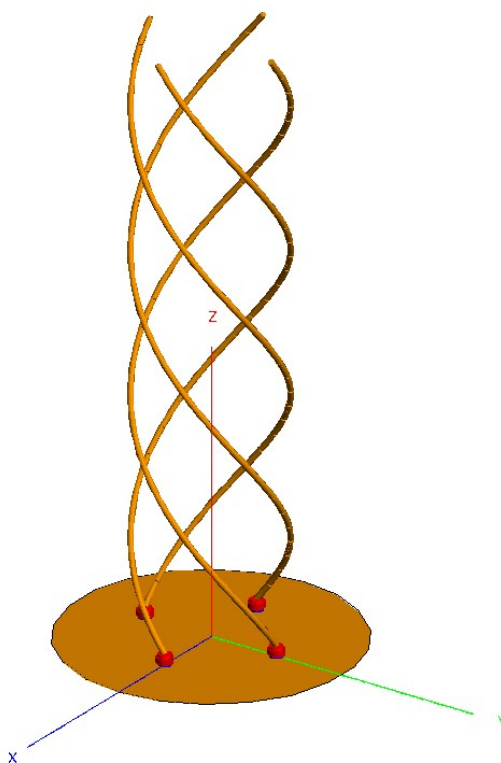


Рисунок 3.10 – 3D-модель разомкнутой КСА в программной среде Altair FEKO

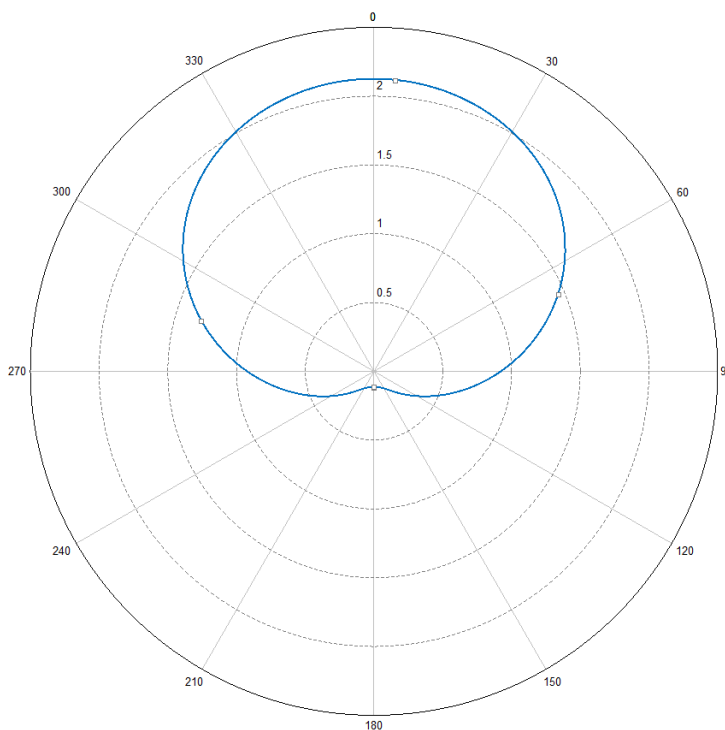


Рисунок 3.11 – диаграмма направленности КСА в программной среде Altair FEKO

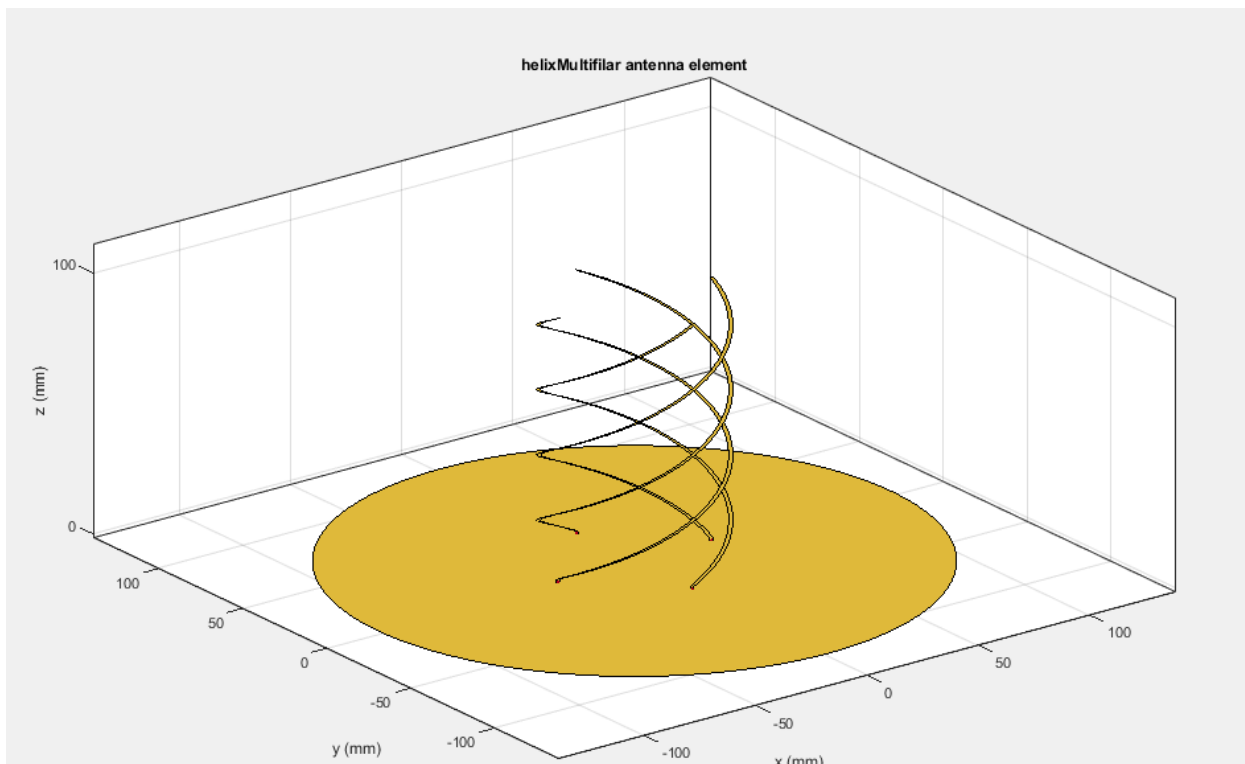


Рисунок 3.12 – 3D-модель разомкнутой КСА в программной среде Matlab

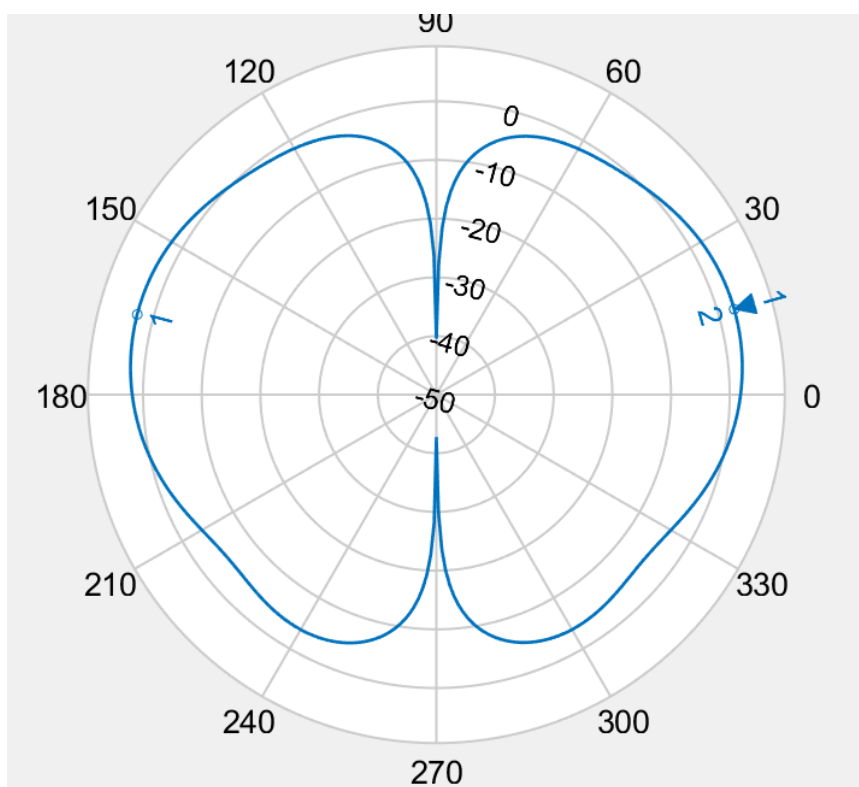


Рисунок 3.13 – диаграмма направленности КСА в программной среде Matlab.

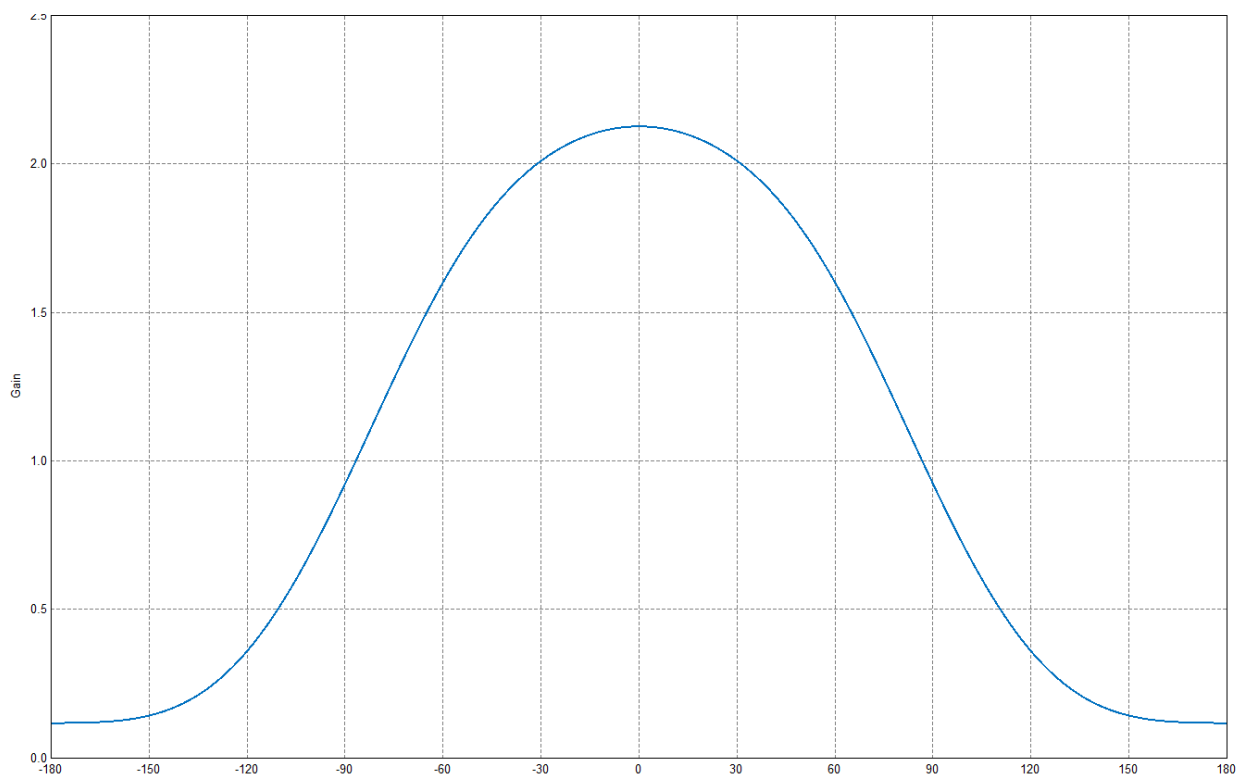


Рисунок 3.14 – диаграмма направленности КСА в декартовой системе координат

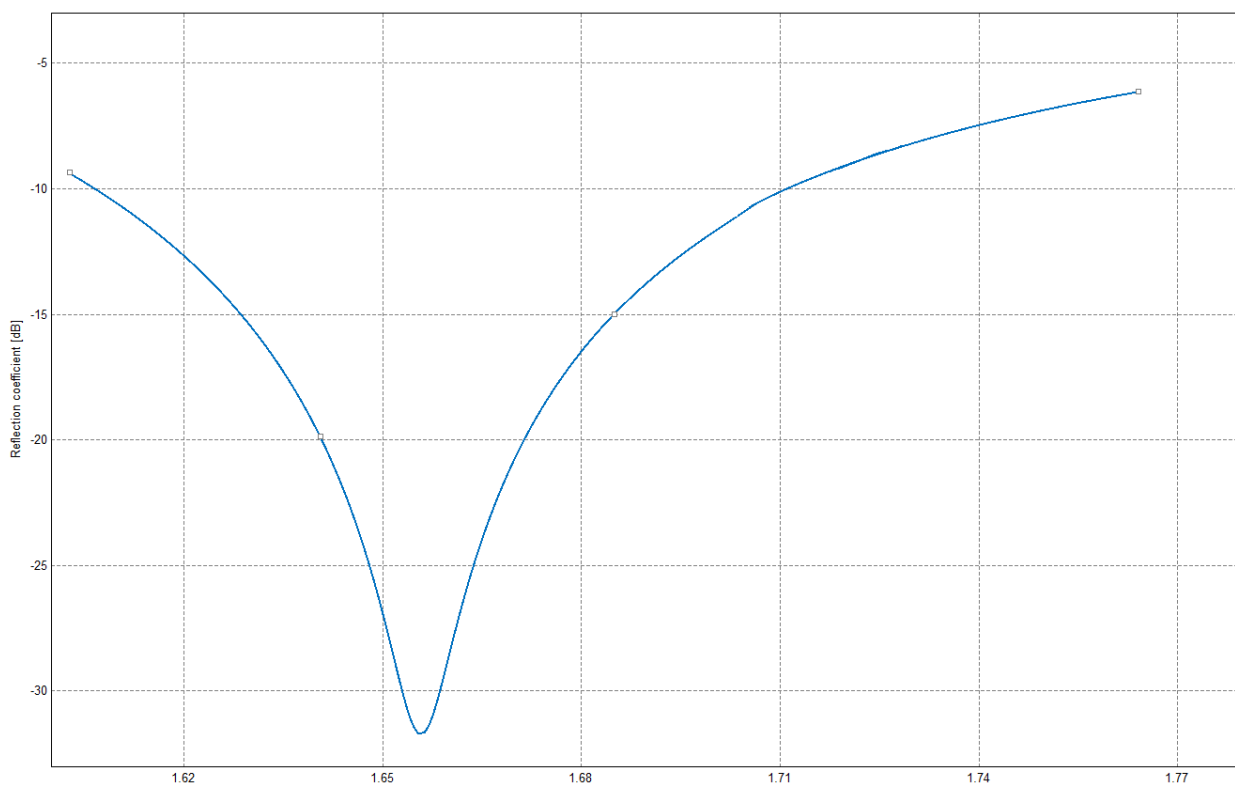


Рисунок 3.15 – Коэффициент отражения разомкнутой КСА

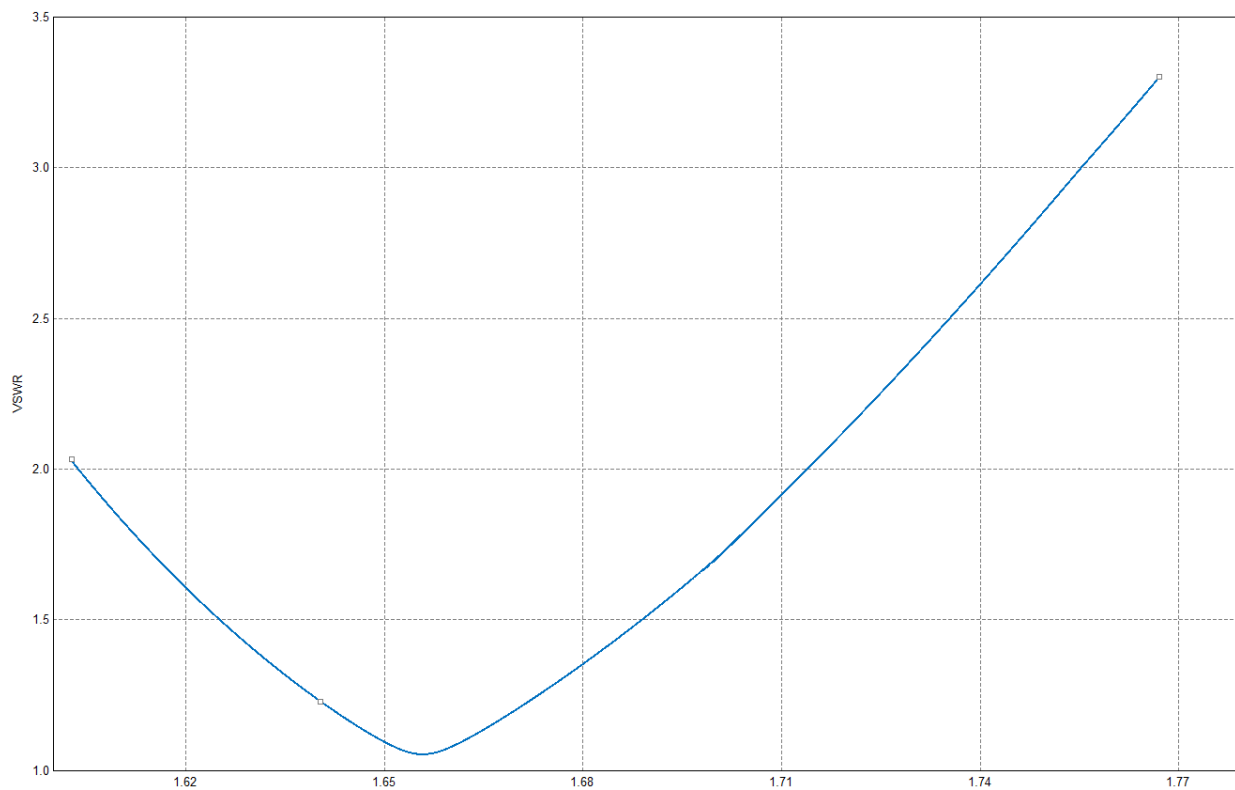


Рисунок 3.16 - Коэффициент стоячей волны разомкнутой КСА

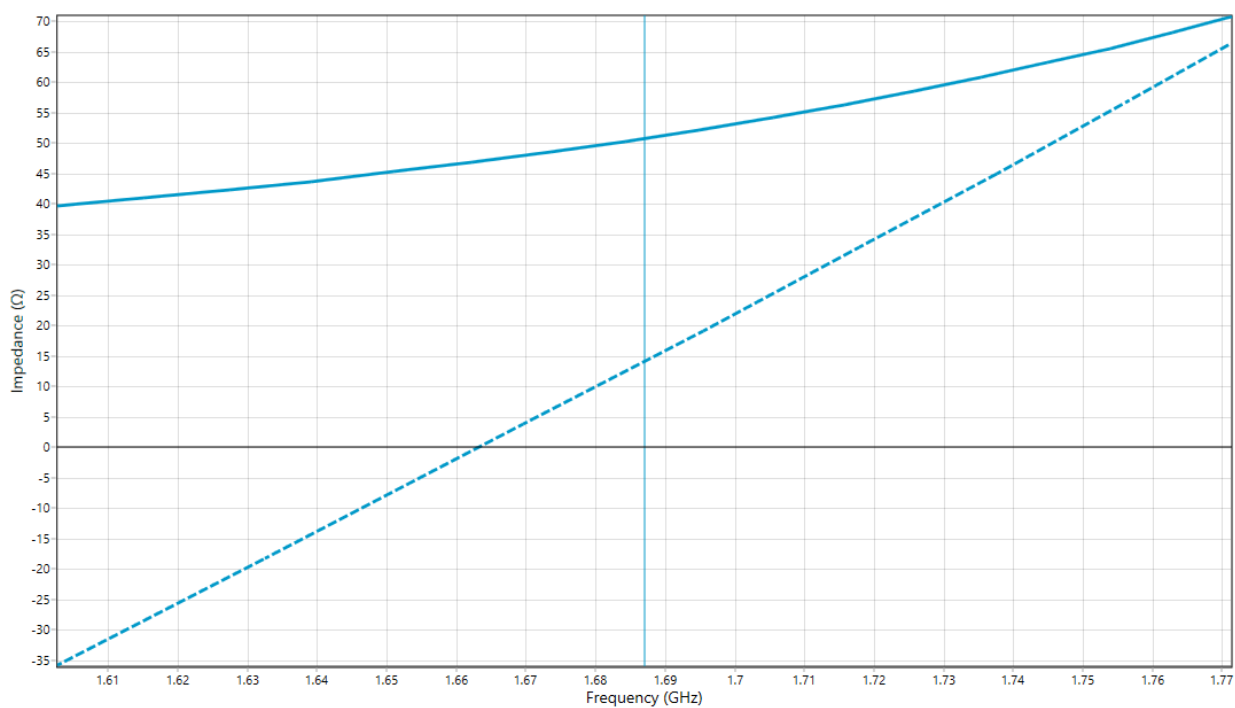


Рисунок 3.17 - волновое сопротивление разомкнутой КСА

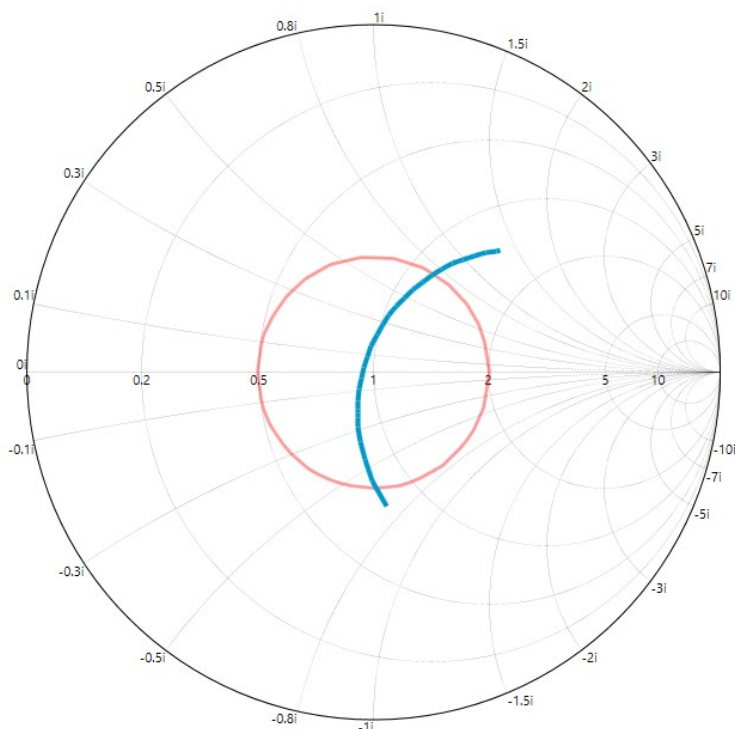


Рисунок 3.18 – сопротивление разомкнутой КСА на диаграмме Вольперта-Смита

Данный излучатель продемонстрировал менее высокие электродинамические показатели по сравнению с предыдущим, однако по результатам моделирования можно сказать, что он так же отлично подходит для использования в антенной решетке.

Сравнительные показатели электродинамических характеристик (на центральной частоте) смоделированных излучателей приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Показатель	Замкнутая КСА	Разомкнутая КСА
Коэффициент усиления	3 дБи	2.8 дБи
Коэффициент стоячей волны	1.4	1.7
Коэффициент отражения	-20 дБ	-15 дБ

По итогам сравнения, было решено использовать замкнутую четвертьволновую КСА как базовый излучатель для синтеза антенной решетки. Данный излучатель продемонстрировал более высокие показатели в каждой из ключевых электродинамических характеристик в сравнении с разомкнутой КСА.

Так же стоит отметить, что оба излучателя имеют хорошую направленность. Обе антенны обладают симметрией поворота, а так же оба излучателя являются взаимными, так как они не имеют невзаимных сред. Эти факторы позволяют уменьшить число элементов матрицы рассеяния, облегчая процесс моделирования данных излучателей, что являлось одним из ключевых критериев при подборе излучателей для метода феноменологических моделей. [10-12]

3.2 Построение феноменологической модели цилиндрической АР

Опираясь на построенную математическую модель в пункте 2.4, основанную на выражениях (25) — (34) и взяв за основу излучатель, полученный в пункте 3.1, синтезируем антенную решетку, которая может решать задачи современных метеорологических РЛС. Данная антенная решетка состоит из трёх колец, состоящих из восьми излучателей, модель данной решетки показана на рисунке 3.12.

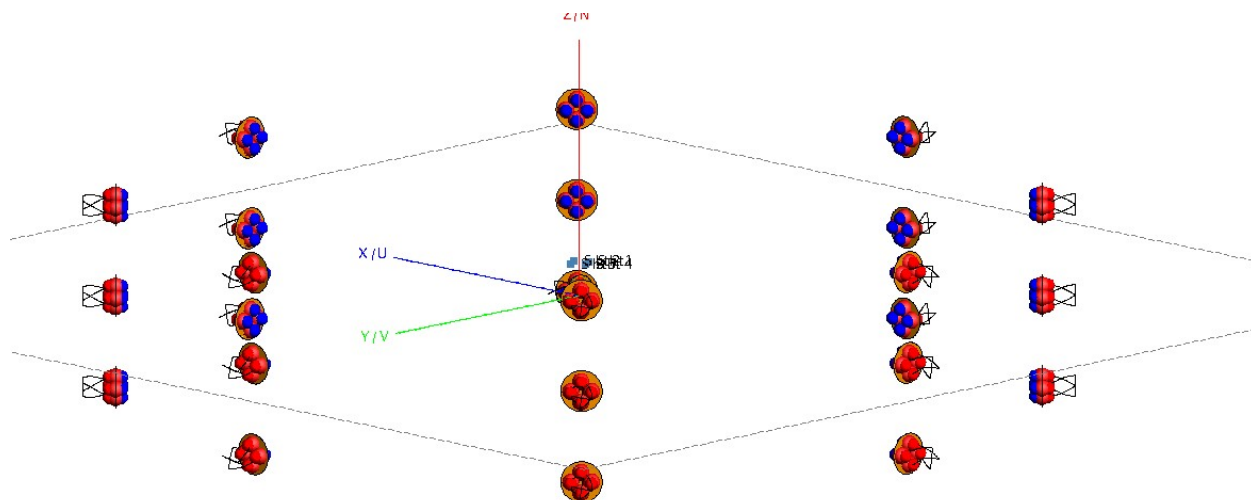


Рисунок 3.19 – 3D-модель цилиндрической AP

Данная антенная решетка обладает коэффициентом усиления порядка 16 дБи, что можно увидеть на её диаграмме направленности на рисунках 3.13 и 3.14.

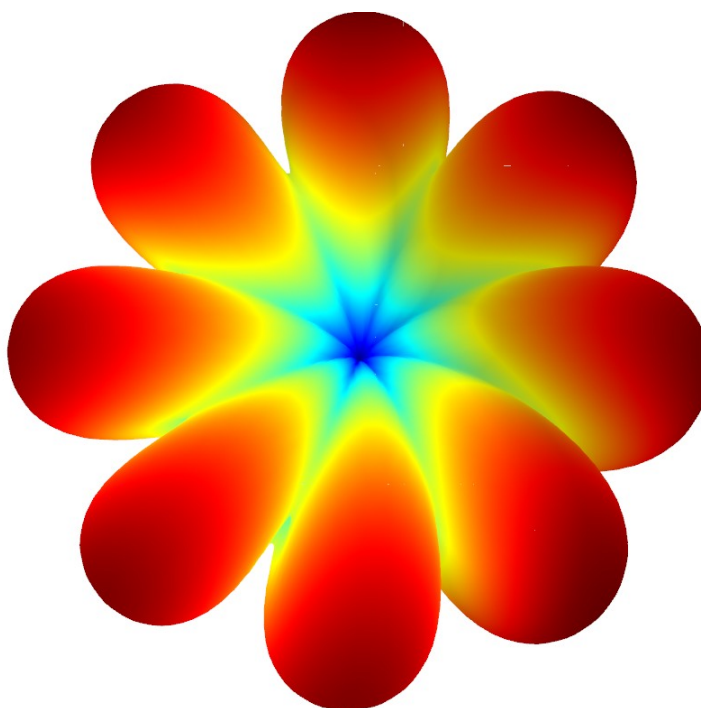


Рисунок 3.20 – 3D-ДН AP

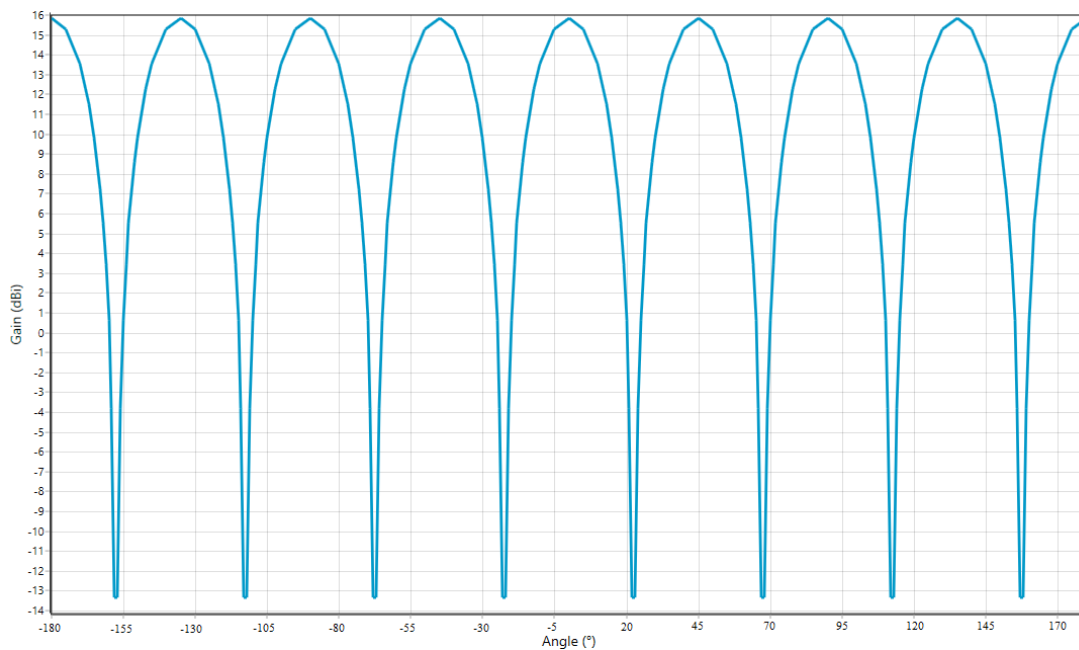


Рисунок 3.21 – ДН АР в декартовой системе координат в плоскости ХУ

Как можно увидеть на рисунках 3.20-3.21, антенная решетка обладает многолучевостью, а именно имеет 8 лучей, которые на пике достигают коэффициента усиления в 16 дБи.

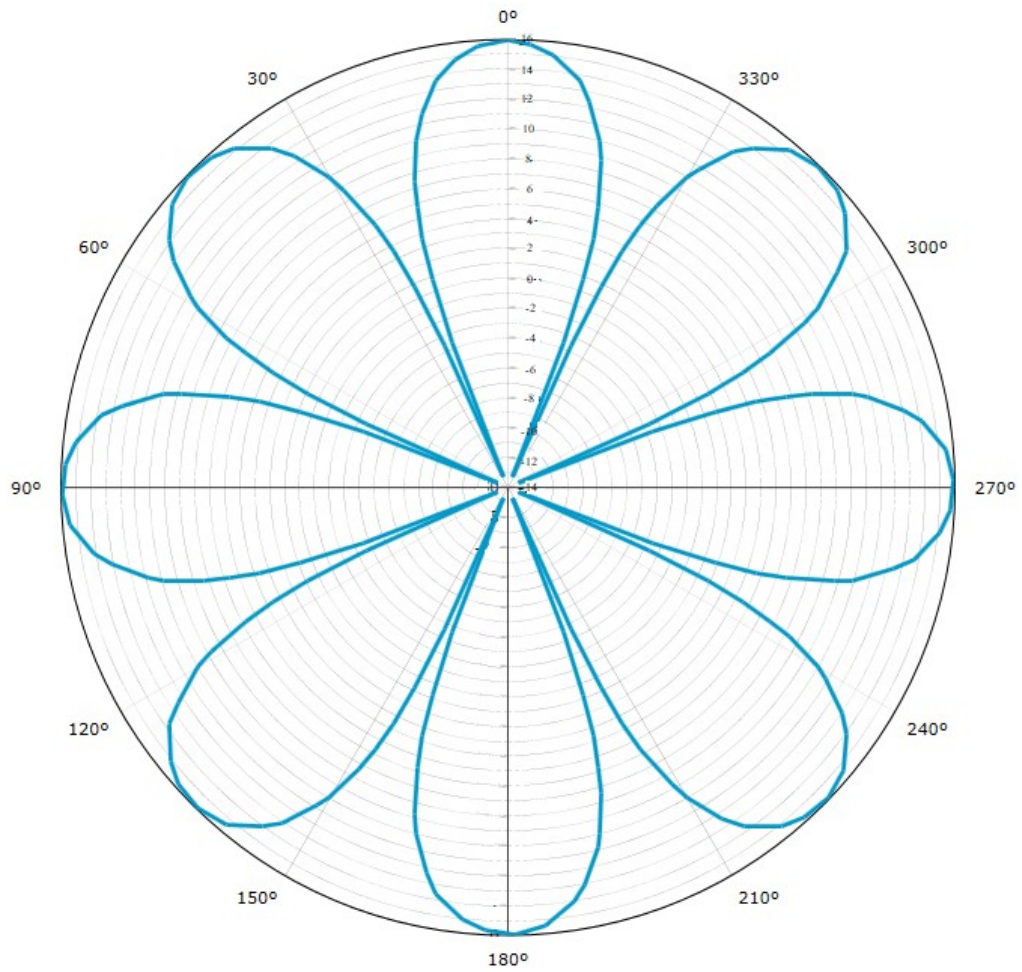


Рисунок 3.22 – ДН АР в полярной системе координат в плоскости
XY

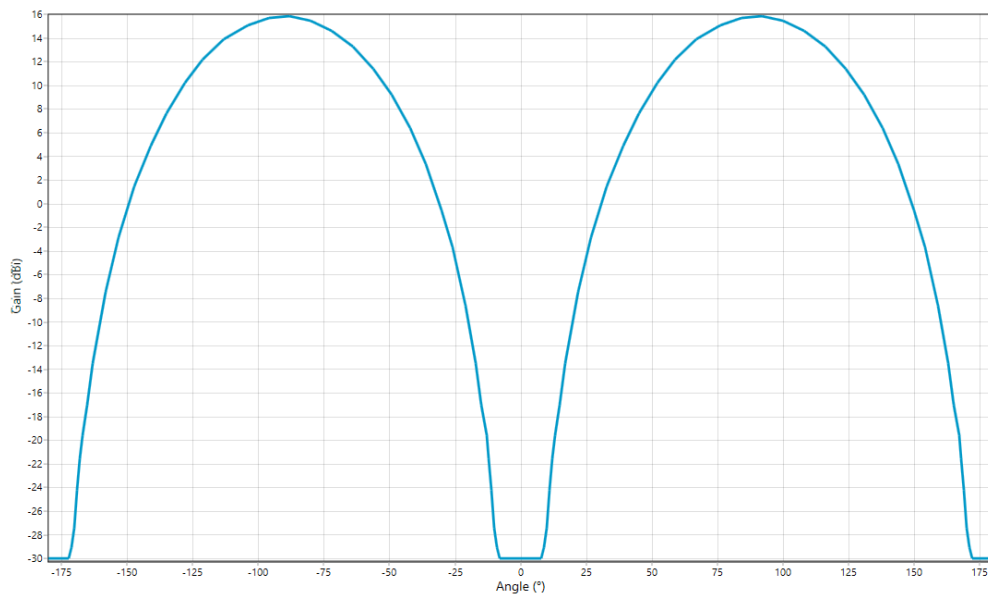


Рисунок 3.23 – ДН АР в полярной системе координат в плоскости
XZ

В результате моделирования АР, можно сделать вывод, что применение такой антенной решетки в комплексах метеорологических РЛС позволит улучшить следующие характеристики аэрологического радиолокатора:

1. электронное сканирование в пределах 360 градусов по азимуту;

2. электронное управление положением луча диаграммы направленности по азимуту и углу места;

3. управление лучом АФАР в вертикальной плоскости осуществляется путем формирования нужного фазового распределения поля в раскрыве антенны;

4. нормаль к решетке образует угол 30° с горизонтом;

5. отклонение луча от нормали в вертикальной плоскости может составлять от минус 50° до 85° (от минус 5° до 120° относительно горизонта);

6. управление лучом АФАР в горизонтальной плоскости выполняется электронное управление путем регулировки фазового распределения поля в раскрыве антенны Сектор электронного поворота луча составляет не менее $\pm 360^\circ$;

7. измерение угловых координат выполняется методом квадрантного сканирования. При этом диаграмма направленности (ДН) АФАР периодически занимает одно из четырех положений: луч отклоняется на половину ширины ДН вверх, влево, вниз, вправо и т.д. Указанные ДН пересекаются вдоль равносигнальной линии. Смещение радиозонда с равносигнальной линии приводит к амплитудной модуляции принятого сигнала с частотой сканирования. Глубина модуляции пропорциональна текущей угловой ошибке, а фаза модуляции

соответствует направлению смещения радиозонда с равносигнальной линии;

8. возможно сопровождение нескольких радиозондов до 25 одновременно;

9. наклонная дальность автоматического (полуавтоматического) сопровождения радиозонда и приема телеметрической информации составляет: минимальная (до пункта выпуска радиозонда) - 35 м; максимальная более 300 000 м.

10. максимальная высота радиозондирования: - для углов места до 70° - 60 000 м; - для углов места от 70° до 90° - 35000 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения бакалаврской работы была разработана фазированная антенная решетка для метеорологических радиолокационных комплексов. Для данной антенной решетки также был спроектирован и разработан излучатель, оценены его электродинамические характеристики, обосновано применение такого типа излучателя. На основе этого излучателя была синтезирована антенная решетка, были проведены расчеты и моделирование антенной решетки, были получены основные электродинамические характеристики, что позволяет судить о том, что данная антенная решетка может быть использована в существующих метеорологических комплексах, и обладает хорошими электродинамическими характеристиками.

Таким образом в результате выполнения данной квалификационной работы была разработана антенная система, позволяющая повысить эффективность работы метеорологических комплексов, путём увеличения территории покрытия, а так же работы в многоканальном режиме с несколькими зондами.

Так же данная антенная система, ввиду своих массогабаритных показателей, а также скорости развертки может использоваться как мобильная установка, что повышает её универсальность и позволяет использовать её не только на гражданских объектах, но и на военных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Д. И. Воскресенского. - 4-е, перераб. и доп. изд. - М.: Радиотехника, 2012. - 744 с.
2. Антенны : учебное пособие / Ю. Т. Зырянов, П. А. Федюнин, О. А. Белоусов [и др.]. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 412 с. — ISBN 978-5-8114-5148-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/133478> (дата обращения: 31.05.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Спиральные антенны / Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. — М.: Сов. Радио, 1974, 224 с.
4. Антенно-фидерные устройства. / Фрадин А.З. — М. Связь, 1977. — 440с.
5. Юдин В.В. Кольцевые антенные решетки: схемно-пространственная мультиплексия и направленное излучение. М.: Радио и связь. 2001 г.
6. Панова Т.А., Панин Б.А., Сулейманов В.И. Моделирование метеорологической рлс с представлением карты радиолокационной отражаемости на экране цветного индикатора. Вопросы радиоэлектроники. 2005. Т. 1. № 1. С. 121-131.
7. Дубовецкий А.З., Кочин А.В. Автоматический поиск радиозонда при проведении аэрологического радиозондирования атмосферы комплексом МАРЛ-А. Естественные и технические науки. 2009. № 1 (39). С. 176-182.

8.M. Caillet, M. Clnet, A. Sharaiha, Y. M. M. Antar, "A broadband folded printed quadrifilar helical antenna employing a novel compact planar feeding circuit", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 7, pp. 2203-2209, Jul. 2010.

9.F. Shi-qiang, F. Shao-jun, L. Kai, W. Zhong-bao, "Printed quadrifilar helix antenna with integrated feed network", Proc. 3rd IEEE Int. Symp. Microwave Antenna Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, pp. 67-69, 2009.

10. Shcherbyna O., Tomai O., Kozhokhina O., Quadrifilar helical antennas with different types of supply lines, Proceedings - 2018 Advances in Wireless and Optical Communications, RTUWO 2018 4. 2018. C. 167-170

11. Y. Letestu, A. Sharaiha, "Multiband printed quadrifilar helical antenna", Electron. Lett., vol. 46, pp. 885-886, 2010.

12. Cochet G., Queffelec P., Laur V., Schuchinsky A.G., Cahill R., Periodic arrays of interwoven quadrifilar spirals on ferrite substrates, Funtai Oyobi Fummatsu Yakin. 2014. T. 61. C. pp. 288-292.

13. Радиозонд // wikipedia.org URL:
<http://ru.wikipedia.org/wiki/Радиозонд>

