

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И.Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Тургунбаева Динара Ералыкызы

Исследование и разработка активной широкополосной магнитной антенны

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Специальность 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации  
*Шифр и наименование специальности*

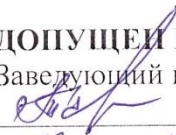
Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И.Сатпаева

Институт автоматике и информационных технологии

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующий кафедрой ЭТиКТ  
 Таштай Е.Т.  
«23» 05 2022 г.

### ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование и разработка активной широкополосной магнитной антенны»

по специальности 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Выполнил



Тургунбаева Д.Е.

Рецензент

Ассоц.профессор АУЭС им.Даукеева  
доктор PhD

 Сагындикова А.Ж.  
«23» 05 2022 г.

Научный руководитель  
маг.техн.наук, тьютор

 Байкенова Г.М.  
«21» 05 2022 г.

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И.Сатпаева

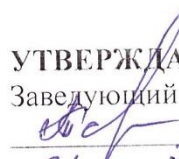
Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

5B071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ЭТиКТ

 Ташбай Е.Т.

«21» XII 2021 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Тургунбаева Динара Ералыкызы

Тема: « Исследование и разработка активной широкополосной магнитной антенны».

Утверждена приказом Ректора Университета №489-П/О от «24» декабря 2022 года.

Срок сдачи законченной работы «15» мая 2022 г.

Исходные данные к дипломной работе:

- 1) Схема оптической линии связи;
- 2) Основные характеристики и структурная схема DDWDM - мультиплексоров;

Краткое содержание к дипломной работе:

- а) Краткий обзор DDWDM технологии;
- б) Методы типового расположения DDWDM - мультиплексоров;
- в) Расчет длины регенерационного участка.
- г) Расчет регенерационного участка по затуханию;
- д) Расчет затухания.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): представлены 10-15 слайдов презентации работы.

Список литературы: 1. Иванов В.И. Волоконно-оптические системы передачи, 2011; 2. Складов О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи.-СПб.: «Лань», 2010; 3.

URL:[https://ftp.utcluj.ro/pub/users/cemil/DDWDM/DDWDM\\_Intro/16\\_5311757.pdf](https://ftp.utcluj.ro/pub/users/cemil/DDWDM/DDWDM_Intro/16_5311757.pdf)

(дата обращения 19.05.2020). 4.

URL: [https://www.tutorialspoint.com/optical\\_networks/optical\\_networks\\_DWDM\\_technology.htm](https://www.tutorialspoint.com/optical_networks/optical_networks_DWDM_technology.htm) (дата обращения 20.05.2020)

5. URL: <https://www.globalspec.com/reference/21551/160210/chapter-4-2-ddWDM-network-topologies-review> (дата обращения 05.04.2020)

6. URL: <https://www.fiberlabs.com/glossary/about-DWDM/> (дата обращения 01.05.2020)


### ГРАФИК

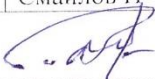
подготовки дипломной работы (проекта)

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Теоретическая часть	10.01.2022-20.01.2022	Отчет – не менее 5-10 стр и 1-2 слайда
Основная часть	20.01.2022-10.03.2022.	Отчет не менее 5-10 стр , 1-2.
Расчетная часть	11.03.2022-28.04.2022.	Отчет не менее 10 стр . 3-5 слайдов 5
Заключение	01.04.2022-10.05.2022	Отчет не менее 1 стр , 10 слайд

### Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Доктор PhD, асоц проф. Смайлов Н	20.05.2022	

Научный руководитель  Байкенова Г.М.

Задание принял к исполнению обучающийся  Тургунбаева Д.Ш.

Дата 01 05 2022 г.

### АННОТАЦИЯ

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Тургунбаева Динара Ералықызы

5B071900- Радиотехника, электроника және телекоммуникация

**Тема Исследование и разработка активной широкополосной магнитной антенны**

На сегодняшний день магнитные антенны играют важную роль в приеме радиоволн в радиопеленгации, радионавигации и особенно широко в малогабаритных радиовещательных приёмниках. Поэтому использование активной широкополосной магнитной антенны носит актуальный характер.

Приведены основные понятия магнитной антенны, Аналитический обзор активных магнитных антенн, характеристики магнитных антенн, принцип построения активных магнитных антенн.

Сделаны расчеты параметров активной широкополосной магнитной антенны.

Общие требования к составлению, изложению, оформлению и содержанию текстовых и графических материалов работы выполнены в соответствии с ГОСТ.

Дипломная работа выполнена на оценку 95/А/«отлично», а дипломант, Тургунбаева Динара Ералықызы достойна степени бакалавра специальности 5B071900-Радиотехника, электроника и телекоммуникации.

**Рецензент**  
доктор PhD, ассоциированный профессор  
Алматынского университета энергетики  
и связи имени Г. Даукеева  
А.Ж.Сагындикова  
«23» 2022 ж.





Отзыв руководителя

Дипломной работы

Тургунбаева Динара Ералыкызы

5B071900- Радиотехника, электроника және телекоммуникация

**Тема Исследование и разработка активной широкополосной магнитной антенны**

Видов антенн множество. Их можно классифицировать по конструкции или по принципу действия, например. В последнем случае выделяют электрические и магнитные антенны. Первые управляются электрической составляющей электромагнитного поля (далее ЭМП), а вторые, соответственно, магнитной.

Вид антенн, реагирующих на магнитную составляющую поля, нашел широкое применение в любых видах промышленности из-за небольших габаритов и приемно-передающих свойств. Их конструкция чаще всего действительно очень проста и представляет собой антенну-штырь (часто используется как антенна для авто), имеющую небольшие размеры по сравнению, например, с логарифмическими антеннами.

Последний вид антенн часто встречается в жилых домах, где они обеспечивают телевизионное вещание.

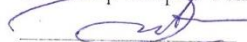
Сделаны модель и анализ магнитных антенн.

Общие требования к составлению, изложению, оформлению и содержанию текстовых и графических материалов работы выполнены в соответствии с ГОСТ

Дипломная работа выполнена на оценку 95/А/«отлично», а дипломант, Тургунбаева Динара Ералыкызы степени бакалавра специальности 5B071900- Радиотехника, электроника и телекоммуникации.

**Научный руководитель**

Тьютор каф. ЭТиКТ

 Г.М.Байкенова

« 20 » 05 2022 ж.

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Тургунбаева Динара Ералықызы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Исследование и разработка активной широкополосной магнитной антенны

**Научный руководитель:** Гулжан Байкенова

**Коэффициент Подобия 1:** 12.5

**Коэффициент Подобия 2:** 4.1

**Микропробелы:** 22

**Знаки из других алфавитов:** 14

**Интервалы:** 61

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2022-05-20

*Дата*

*Заведующий кафедрой*



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті  
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагияттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

**Автор: Тургунбасва Динара Ералықызы**

**Тақырыбы: Исследование и разработка активной широкополосной магнитной антенны**

**Жетекшісі: Гулжан Байкенова**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 12.5**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 4.1**

**Дәйексөз (35): 0.8**

**Әріптерді ауыстыру: 14**

**Аралықтар: 61**

**Шағын кеңістіктер: 22**

**Ақ белгілер: 0**

**Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :**

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

**Негіздеме:**

2022-05-20

Күні

Кафедра меңгерушісі





## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Тургунбаева Динара Ералыкызы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Исследование и разработка активной широкополосной магнитной антенны

**Научный руководитель:** Гулжан Байкенова

**Коэффициент Подобия 1:** 12.5

**Коэффициент Подобия 2:** 4.1

**Микропробелы:** 22

**Знаки из других алфавитов:** 14

**Интервалы:** 61

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

2022-05-20

*Дата*



Сүңғат Марксұлы

*проверяющий эксперт*

## АННОТАЦИЯ

Цель дипломной работы исследование и разработка активной широкополосной активной магнитной антенны.

Объектом исследования является активная широкополосная активная магнитная антенна.

Приведены основные понятия магнитной антенны, Аналитический обзор активных магнитных антенн, характеристики магнитных антенн, принцип построения активных магнитных антенн.

Сделаны расчеты параметров активной широкополосной магнитной антенны.

## АҢДАТПА

Дипломдық жұмыстың мақсаты белсенді кең жолақты белсенді магниттік антеннаны зерттеу және дамыту болып табылады.

Зерттеу объектісі белсенді кең жолақты белсенді магниттік антенна болып табылады.

Магниттік антенна туралы негізгі түсініктер, белсенді магниттік антенналарға аналитикалық шолу, магниттік антенналардың сипаттамалары, белсенді магниттік антенналарды құру принципі берілген.

Белсенді кең жолақты магниттік антеннаның параметрлері есептеледі.

## **ANNOTATION**

The purpose of the thesis is to study and develop an active broadband active magnetic antenna.

The object of study is an active broadband active magnetic antenna.

Basic concepts of magnetic antennas, analytical review of active magnetic antennas, characteristics of magnetic antennas, the principle of construction of active magnetic antennas.

The parameters of the active broadband magnetic antenna are calculated.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Анализ активной широкополосной магнитной антенны	10
1.1 Основные понятия магнитной антенны	10
1.2 Аналитический обзор активных магнитных антенн	13
1.3 Характеристики магнитных антенн	21
1.4 Постановка задачи исследования	23
2 Реализация и выбор элементов активной широкополосной магнитной антенны	24
2.1 Принцип построения активных магнитных антенн	24
2.2 Широкополосная активная магнитная антенна с конструктивным разделением поддиапазонов	25
2.3 Широкополосная активная магнитная антенна с режимной регулировкой частоты согласования	27
2.4 Системы АРЧ в АМА	31
3 Расчет параметров активной широкополосной магнитной антенны	32
3.1 Постановка задачи расчета основных параметров	32
3.2 Процесс адаптивной фильтрации	37
3.3 Моделирование и анализ магнитных антенн	40
Заключение	52
Список использованной литературы	53



## **ВВЕДЕНИЕ**

Целью исследования является исследование и разработка активной широкополосной магнитной антенны, главным достоинством которых является невосприимчивость к электрическим помехам.

Задача работы заключается в проведении анализа активной широкополосной магнитной антенны, с целью построения схем реализаций активной широкополосной магнитной антенны, с последующим выбором оборудования и оценка основных параметров активных магнитных антенн расчетным путем.

Актуальность работы заключается в том, что появляется возможность понимания природы магнитных антенн, которые нашли широкое применение в любых видах промышленности из-за небольших габаритов и приемно-передающих свойств. На сегодняшний день магнитные антенны играют важную роль в приеме радиоволн в радиопеленгации, радионавигации и особенно широко в малогабаритных радиовещательных приёмниках. Поэтому использование активной широкополосной магнитной антенны носит актуальный характер.

# **1 Анализ активной широкополосной магнитной антенны**

## **1.1 Основные понятия магнитной антенны**

Сигнал, содержащий полезную информацию, можно создать с помощью генератора. Его мощность можно увеличить с помощью усилителя и передать на значительное расстояние другому корреспонденту. Передачу сигнала осуществляет антенна.

Антенна – устройство, осуществляющее преобразование электромагнитной волны в электрический сигнал на определенной частоте в тракте приема, а также обратное преобразование в тракте передачи.

Видов антенн множество. Их можно классифицировать по конструкции или по принципу действия, например. В последнем случае выделяют электрические и магнитные антенны. Первые управляются электрической составляющей электромагнитного поля (далее ЭМП), а вторые, соответственно, магнитной.

Вид антенн, реагирующих на магнитную составляющую поля, нашел широкое применение в любых видах промышленности из-за небольших габаритов и приемно-передающих свойств. Их конструкция чаще всего действительно очень проста и представляет собой антенну-штырь (часто используется как антенна для авто), имеющую небольшие размеры по сравнению, например, с логарифмическими антеннами.

Последний вид антенн часто встречается в жилых домах, где они обеспечивают телевизионное вещание.

Главное достоинство магнитных антенн – невосприимчивость к электрическим помехам. Последний факт позволяет применять их в любых городах, где есть высокая концентрация электрических сигналов.

Стоит заметить, что процесс радиосвязи принципиально невозможен без использования радиоволн и, следовательно, без таких устройств, которые обеспечивали бы их излучение и прием. Эти функции выполняют антенны.

В любой радиолинии всегда есть передающая и приемная станции, связь между которыми осуществляется с помощью электромагнитных волн.

В процессе организации связи, звукового и телевизионного вещания широко применяются радиосредства, обеспечивающие излучение и прием радиоволн.

Упрощенная структурная схема радиолинии представлена на рис. 1.1.

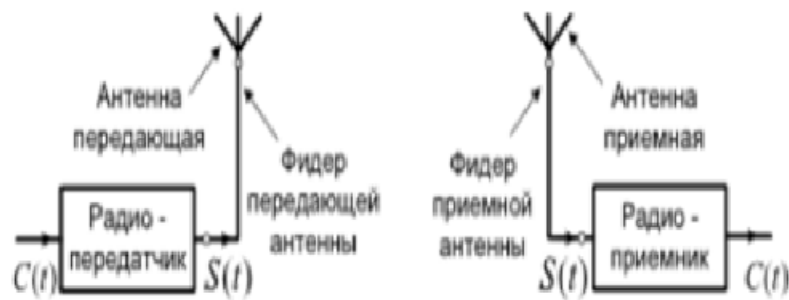


Рисунок 1.1 - Схема радиоприемной и передающей антенн

Элементами схемы являются: радиопередатчик, фидер передающей антенны, передающая антенна, приемная антенна, фидер приемной антенны и радиоприемник.

Передающая антенна — это устройство, преобразующее подводенную фидером энергию высокой частоты, выработанную передатчиком, в энергию электромагнитных волн и обеспечивающее излучение в заданном направлении.

Приемная антенна — это устройство, улавливающее и преобразующее энергию проходящих свободных электромагнитных волн в энергию направляемых электромагнитных волн, которые передаются фидером в радиоприемник. Такая антенна служит для приема электромагнитных волн.

Фидер — это электрическая цепь и вспомогательные устройства (на рис. 1.1 не показаны), с помощью которых энергия радиочастотного сигнала подводится от радиопередатчика к антенне или от антенны к радиоприемнику.

Рассмотрим работу линии радиосвязи (рис.1.1). Исходный (первичный) сигнал электросвязи  $C(t)$ , отображающий передаваемое сообщение, поступает на вход передатчика. В передатчике происходит его преобразование в радиочастотный сигнал  $S(t)$ . Этот сигнал с помощью фидера подводится к передающей антенне. (1)

Часть энергии радиоволн, излученных передающей антенной, достигает приемной антенны и возбуждает в ней слабый радиочастотный сигнал  $S(t)$ . Этот сигнал по фидеру приемной антенны подается на вход приемника, где происходит его обработка и формирование копии исходного сигнала электросвязи  $C(t)$ . В фидерах радиочастотные сигналы распространяются в виде направляемых электромагнитных волн, которые связаны с зарядами и токами. В открытом пространстве излученные электромагнитные волны становятся свободными — радиоволнами.

Таким образом, на передающей стороне линии радиосвязи передающая антенна преобразует связанные электромагнитные волны в свободные электромагнитные волны (радиоволны), а на приемной стороне линии радиосвязи происходит обратный процесс: приемная антенна преобразует радиоволны в связанные электромагнитные волны, которые по фидеру подаются на вход радиоприемника

Современные средства радиосвязи, в том числе портативные, работают в столь широкой полосе радиочастот, что принятое деление на диапазоны (ДКМВ, КВ, УКВ, ДМВ и т. д.) становится все более условным. В связи с этим появилась острая потребность в широкополосных и сверхширокополосных антеннах, которые при

разумных габаритах могли бы обеспечивать достаточное усиление в рабочей полосе частот.

Среди зарубежных производителей средств радиосвязи наибольших успехов в разработке широкополосных антенн добились TRIVAL ANTENE (Словения), HARRIS (США), Hascall-Denke (США), Shakespeare (США), RACAL ANTENNAS LTD (Великобритания), SOJOT (Финляндия), COMROD (Норвегия). При этом необходимо отметить, что производителей, как и моделей таких антенн, становится все больше, и технические характеристики продолжают совершенствоваться.

По электрическим параметрам, в частности по полосам рабочих частот антенн, сформировались некоторые «нормы», связанные с характеристиками самих средств связи. Так, основная часть современных профессиональных портативных радиостанций работает в полосе частот 30–512 МГц.

Вместе с тем характеристики антенн, работающих во всем указанном диапазоне, еще не достигли того уровня, когда одна антенна имеет соотношение размеров и коэффициента усиления, свойственное узкополосным антеннам. Поэтому производители выпускают обычно линейку антенн с различными габаритами и, соответственно, с различным коэффициентом усиления. В подтверждение сказанного можно привести еще и тот факт, что в модельных рядах всех вышеперечисленных фирм присутствуют антенны с более узкими полосами частот, также уже устоявшимися.

Это, как правило, 30–108 и 100–512 МГц. Естественно, что более узкополосные модели имеют лучшие электрические параметры по сравнению с широкополосными.

Простейшая магнитная антенна в своем составе имеет:

- сердечник;
- катушку индуктивности;
- каркас катушки.

На сердечник надевается каркас, а на каркас наматывается катушка индуктивности.

Сердечник такой антенны изготавливается из магнитного материала. Чаще всего из феррита, обладающего хорошими магнитными свойствами, о которых будет рассказано далее.

Обмотка выполняется из проводящего материала вроде меди, а каркас, наоборот, изготавливается из изоляционного материала, чтобы исключить ненужные контакты витков катушки и сердечника.

На самом деле получается, что магнитная антенна – типичный дроссель, знакомый каждому радиолюбителю или человеку, имеющему даже косвенное отношение к электронике.

## **1.2 Аналитический обзор активных магнитных антенн**

Активными антеннами в радиотехнике принято называть устройства, объединяющее собственно антенну и активные элементы усиления, преобразования

или генерации сигналов. Объединённые функции таких устройств (прием или передача радиоволн и усиление, преобразование или генерация сигналов введенными в антенну АЭ (активный элемент)) не реализуются обычным последовательным соединением ряда функционально законченных узлов, а обеспечиваются электрически единым устройством. Разделение АА (активная антенна) на пассивную и активную части невозможно из-за интегрального характера устройства. Это отличает, например, АУ (антенна-усилитель) от антенны, соединенной с антенным (предварительным) усилителем, когда выход антенны и вход усилителя согласованы с волновым сопротивлением линии передачи и могут быть соединены линией передачи любой длины. АА выполняется в виде одного блока. В общем случае это нелинейное и невзаимное устройство.

Интеграция антенны и АЭ позволяет уменьшить размеры антенн, расширить полосу пропускания электрически коротких антенн, улучшить чувствительность приемных систем (КПД передающих систем), осуществить электронную перестройку антенн (например, управлять диаграммами направленности), осуществить эффективное симметрирование при соединении симметричной антенны с несимметричной линией передачи, улучшить электромагнитную совместимость радиосистем. Во многих случаях АА позволяют реализовать одновременно несколько указанных преимуществ, причем выигрыш, например в габаритах АА, может достигать нескольких десятков по сравнению с пассивными аналогами при сохранении или даже улучшении электрических характеристик (полосы пропускания, чувствительности и т.д.). Преимущества АА обусловили быстрое развитие этого нового направления антенной техники у нас в стране и за рубежом.

Прежде всего отметим, что интегрируемый с «собственной антенной» АЭ (многополюсник) может и не быть активным в строгом значении этого слова, т.е. потребляющим энергию от внешнего источника. Например, в АД (антенна-детектор) диоды могут не требовать источника питания. Поэтому термин «активная антенна», широко распространенная в технической литературе, все же не следует считать наиболее общим. Наиболее общим следует признать термин «интегральная антенна». Очевидно, что если в интегральной антенне интегрируемый с «собственной антенной» многополюсник является активным, т.е. потребляющим энергию, то и устройство следует называть АА.

В интегральных (активных антеннах) под «собственной антенной» понимают ту часть устройства, которая непосредственно обеспечивает прием или (и) излучение радиоволн. При этом необходимо иметь в виду, что в общем случае собственно антенна может включать в себя части интегрируемого многополюсника (например, выводы и корпус транзистора), а распределение токов (напряжений) в собственно антенне может определяться и свойствами интегрируемого многополюсника. Встречающееся в литературе условное выделение из АА пассивной части можно использовать для обозначения собственно антенны и части электронной схемы АА. В целом интегральная антенна представляет собой устройство, осуществляющее прием или (и) излучение радиоволн и содержащее интегрированный многополюсник.



Основной задачей интеграции антенн и АЭ является обеспечение оптимальных связей между ними для достижения той или иной цели. С этой точки зрения, АА представляется, на первый взгляд, давно известным соединением антенны с первым каскадом радиосредства. К устройствам такого типа можно отнести даже устройство для приема электромагнитных волн А.С.Попова.

Об интеграции антенн и АЭ говорилось еще в 30-х годах, однако уровень развития радиотехники не позволял тогда ее реализовать. В дальнейшем был выбран путь отдельного проектирования антенн и усилительных каскадов приемных и передающих устройств. В последнее десятилетие исследователи вновь вернулись к идеям интеграции на более высоком уровне, что было обусловлено развитием техники антенн и УЭ (усилительный элемент). Первые же эксперименты показали, что целенаправленное совместное проектирование «собственно антенны» и объединенного с ней АЭ снимает многие ограничения на размеры антенн, полосу пропускания и другие характеристики, т.е. такие ограничения, которые появлялись и принимались как неизбежные при размещении антенн и АЭ и отдельном проектировании.

Методы анализа и современной теории пассивных антенн и каскадов приемопередатчиков можно использовать и для АА, однако многие результаты анализа, а также основные понятия и термины качественно различны. Например, если в технике пассивных антенн существует такое классическое понятие, как «антенна резонансных размеров», то в технике АА это понятие несет в себе другой смысл. Термины «резонансный» и «нерезонансный» в технике АА применяются для обозначения других понятий по сравнению с техникой пассивных антенн. Так, под резонансной АУ понимают такую, в которой осуществляется согласование (по мощности, по коэффициенту шума) между «собственно антенной» и УЭ, а под нерезонансной – АУ, в которой осуществляется постоянное в широкой полосе частот деления напряжения на входе УЭ.

Классификация активных антенн.

Варианты структур АА представлены на рисунке 1.1 АЭ АА может быть интегрирован в устройстве по схеме двух-, трех- или четырехполюсника. Включение по схеме двухполюсника имеет место при использовании, например, диодов или конверторов, отрицательного сопротивления, преобразующих реактивное сопротивление  $X_a$ , подключенное к свободной паре (рис. 2.1,а) полюсов в отрицательное сопротивление на паре полюсов, подключенных к собственно антенне. Наиболее распространена структура, показанная на рис. 2.1,б. На ее основе реализованы существенное уменьшение размеров АУ, повышение чувствительности приемных систем и т.д.

Классификацию АА проводят по функциональному назначению, структурным признакам и целевому назначению интеграции (малогобаритные, широкополосные, с управляемой диаграммой направленности и т.п.). наибольший интерес представляет классификация АА по функциональному назначению и по структурным признакам.

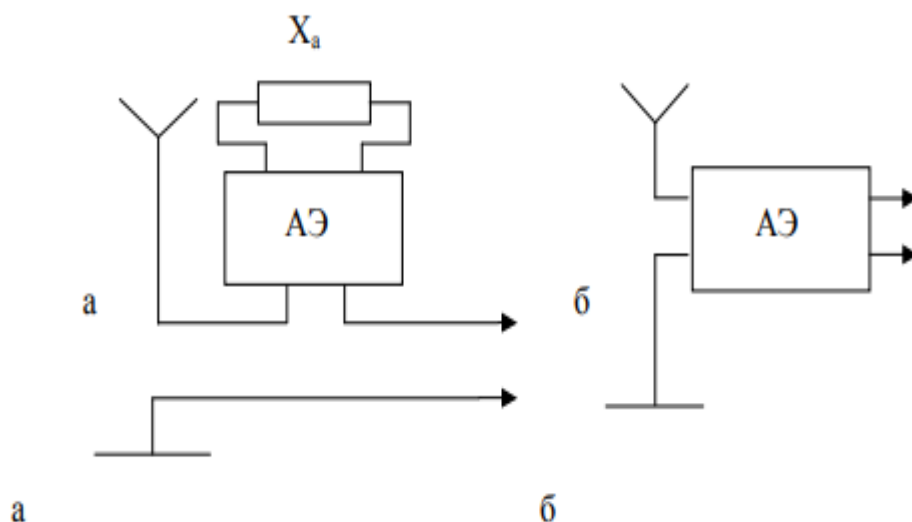


Рисунок 1.1 - Структуры активной антенны

По функциональному назначению АА подразделяют на три типа (рис. 2.2): приемные, передающие и приемно-передающие. Активные приемно-передающие антенны можно создавать на основе АА двух первых типов.

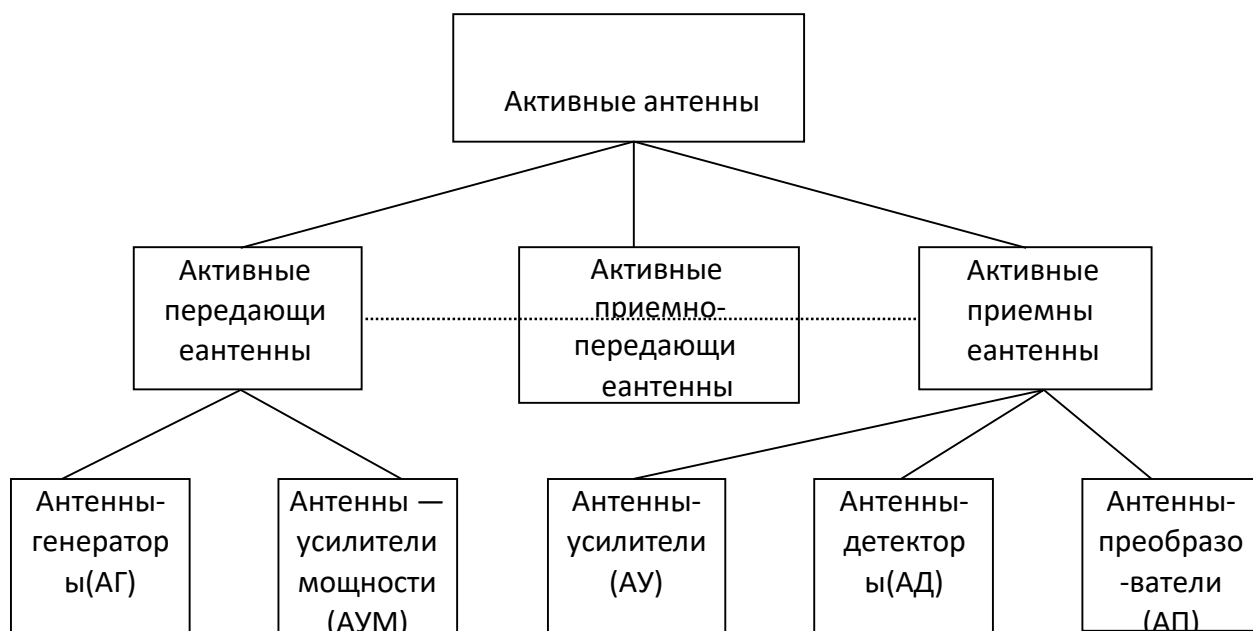


Рисунок 2.2 - Классификация активных антенн

Активные передающие антенны делят на АГ (антенна-генератор) и АУМ (антенна-усилитель мощности). В АГ осуществляется генерация и излучение, в АУМ – усиление мощности сигнала, поступающего в устройство от автономного генератора (передатчика), и излучение. Активная часть передающих АА может включать каскады умножения частоты сигнала.

Активные приемные антенны делят на АУ (антенна-усилитель), АД (антенна-детектор) и АП (антенна-преобразователь). Помимо приема радиоволн такие

антенны осуществляют соответственно усиление, детектирование сигнала, преобразование частоты сигнала. АП могут содержать как смеситель и гетеродин, так и только смеситель, когда гетеродин является автономным.

Классификация АА по структурным признакам иллюстрируется на рис. 2.1 и в общем виде была рассмотрена выше. Ее целесообразно дополнить с точки зрения степени интеграции АЭ в АА. Можно выделить АА с вынесенным и внесенным (встроенным) АЭ. АА с внесенным АЭ можно представить структурой, в которой токи (напряжения) такой антенны определяются и свойствами АЭ.

К АА с вынесенным АЭ нельзя отнести широко известную комбинацию антенны с предварительным (антенным) усилителем, так как в этом случае не воплощается принцип интеграции, присущий АА. Действительно, в комбинации антенна и предварительный усилитель независимо друг от друга согласуются с волновым сопротивлением линии передачи (фидера), соединяющий их, и предварительный усилитель может быть включен поэтому на любом расстоянии от антенны (необязательно непосредственно за антенной) и их разнесение в принципе не нарушает работоспособность комбинации антенна-предварительный усилитель. Однако в случае выполнения подобного устройства конструктивно единым блоком неизбежно использование при определении его параметров методов техники АА.

Классификация АУ представлена на рис. 2.3. Они являются наиболее распространенными в настоящее время типом АА. Большинство исследователей и разработчиков АА занимается именно техникой АУ. Это объясняется тем, что для антенн и усилительных приборов особенно эффективно осуществляется преимущества интеграции.

В диапазонах ДВ, СВ, КВ и частично УКВ целью интеграции являются, как правило, уменьшение размеров антенн и обеспечение широкой (несколько октав) полосы пропускания. Эта цель достигается интеграцией собственно антенны с высокоомным по входу УЭ (например полевым транзистором) таким образом, чтобы создать широкополосный делитель напряжения, который образуется из емкости собственно антенны и малой емкости входа УЭ. При такой интеграции УЭ в АУ работает не в оптимальном режиме (по усилению, по шумовым характеристикам). С повышением частоты нерезонансные АУ малоэффективны по сравнению с резонансными из-за неоптимального согласования, когда шумы внешнего пространства невелики, а также из-за трудностей осуществления в более высоких диапазонах частот широкополосного деления. В резонансных АУ осуществляется оптимальное согласование УЭ с собственно антенной для обеспечения максимального отношения сигнал/шум в приемной системе.

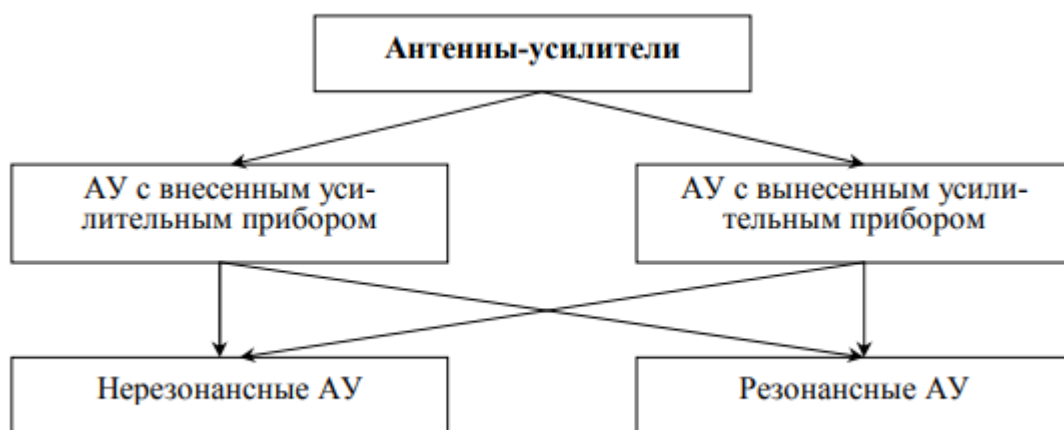


Рисунок 1.3 - Классификация АУ

В диапазонах СМВ, ДМВ и частично МВ, для которых разрабатывают обычно резонансные АУ, как правило, нет необходимости существенно уменьшить размеры собственно антенны, а целью интеграции является улучшение чувствительности приемных систем.

Полоса пропускания АУ может быть значительно шире, чем полоса пропускания их пассивных аналогов.

Что касается вопросов проектирования МА и усиления сигналов, поступающих с МА, то они неразрывно связаны между собой рядом параметров. Во-первых, это реальная чувствительность, которая определяется действующей высотой антенны и шумами усилителя. Во-вторых, это АЧХ, которая формируется и МА, и усилителем. В-третьих, это динамический диапазон, поскольку нелинейные искажения усилителя зависят от уровня сигнала на входе, т.е. от действующей высоты пассивной антенны и т.д.

Поэтому устройство, представляющее собой сочетание пассивной МА и усилителя сигналов МА, рассматривается далее как единое целое и называется активной магнитной антенной.

Обобщенная шумовая схема активной магнитной антенны

В практике теории цепей для оценки и анализа шумовых характеристик УЭ широкое распространение получило понятие коэффициента шума. Однако в случае устройств с чисто реактивным источником сигнала, как известно, коэффициент шума не имеет смысла. В связи с этим для анализа шумов в АМА следует пользоваться отношением сигнал/шум, которое не зависит от характера внутреннего сопротивления источника сигнала.

Обобщенная шумовая схема АМА показана на рис. 1.1,а, где  $C1$  и  $C2$  — корректирующие конденсаторы;  $ZГ$  — внутреннее сопротивление МА;  $eН$  — ЭДС, наводимая в МА;  $eш$  и  $iш$  — шумовые и в общем случае коррелированные источники напряжения и тока УРЧ. Для частот  $\omega \ll \omega\alpha$ , где  $\omega\alpha$  — граничная частота транзистора, шумовую схему АМА и анализ ее шумовых характеристик можно

значительно упростить, если считать источники тока и напряжения на рис. 3.1,а некоррелированными.

Приведем обобщенную шумовую схему АМА к виду, представленному на рис. 3.1,б [5]. Здесь

$$e'_H = \frac{e_H \frac{1}{pC_2}}{Z_\Gamma + \frac{1}{pC_1} + \frac{1}{pC_2}}, \quad Z'_\Gamma = \frac{\frac{1}{pC_2} \left( Z_\Gamma + \frac{1}{pC_1} \right)}{Z_\Gamma + \frac{1}{pC_1} + \frac{1}{pC_2}}. \quad (1.1)$$

На основании последних выражений можно записать для модулей  $e'_H$  и  $Z'_\Gamma$ :

$$|e'_H| = \frac{e_H}{\sqrt{\frac{\omega^2}{\omega_2^2} \frac{1}{Q_2^2} + \left( \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_2^2} + 1 \right)^2}},$$

$$|Z'_\Gamma| = |Z_\Gamma| \frac{\sqrt{\left( \frac{\omega_1^2}{\omega^2} - 1 \right)^2 + \frac{\omega_1^2}{\omega^2} \frac{1}{Q_1^2}}}{\sqrt{\frac{\omega^2}{\omega_2^2} \frac{1}{Q_2^2} + \left( \frac{\omega_1^2 - \omega^2}{\omega_2^2} + 1 \right)^2}}, \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \omega_1^2 &= 1 / (L_A C_1); \\ \omega_2^2 &= 1 / (L_A C_2); \\ Q_1 &= \omega_1 L_A / R; \\ Q_2 &= \omega_2 L_A / R; \\ Z_\Gamma &= R + j\omega L_A; \end{aligned} \quad \text{где} \quad (1.3)$$

$L_A$  и  $R$  — индуктивная и активная составляющие внутреннего сопротивления МА.

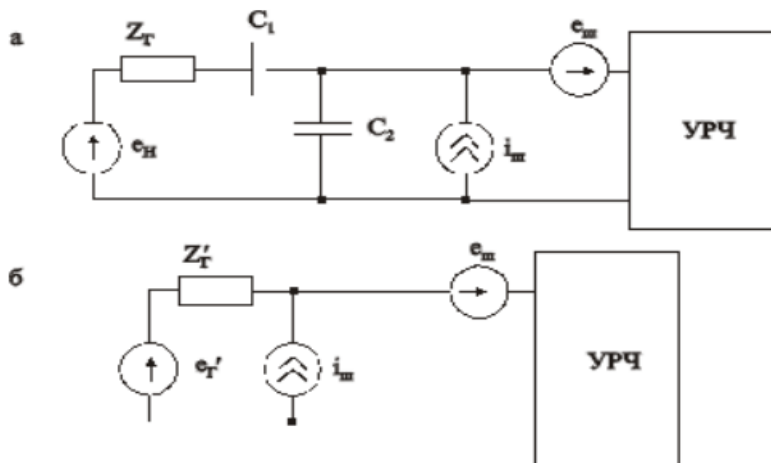




Рисунок 1.4 – Эквивалентная шумовая схема исходной (а) и преобразованное (б) АМА

Напряжение шумов, приведенное к источнику сигнала, равно

$$u_{\text{ш}} = \sqrt{e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 |Z'_{\Gamma}|^2}, \quad (1.4)$$

а отношение напряжения сигнала к напряжению шумов (отношение сигнал/шум)

$$B = \frac{e'_{\text{H}}}{\sqrt{e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 |Z'_{\Gamma}|^2}}. \quad (1.5)$$

Максимизация отношения сигнал/шум (3.4) обеспечивается соответствующим выбором параметров АМА. Возможны следующие варианты построения АМА: нерезонансный, с последовательным резонансом, с параллельным резонансом и с комбинацией последовательного и параллельного резонансов [5].

Реальный процесс радиоприема гораздо сложнее — это связано с тем, что перед радиоприемником стоит задача о выделении полезного радиосигнала в условиях действия помех различного происхождения. Почти вся энергия радиоволн, излученных передающей антенной, поглощается средой, в которой она распространяется, а также различными препятствиями и помехами. Приемной антенне удастся уловить из окружающей среды крайне малую часть той энергии, которая излучена передающей антенной. Тем не менее, в правильно спроектированной радиолинии энергии, принятой антенной, вполне достаточно для качественной работы приемного устройства ([4]). При анализе антенны для описания поля ее излучения чаще всего используется сферическая система координат (рис. 1.2) ([6]), и когда это удобно – с привязкой к декартовой системе XYZ. Положение точки в сферической системе определяется тремя числами: - радиус-вектором  $r$ ; - углами  $\phi$  и  $\theta$ .

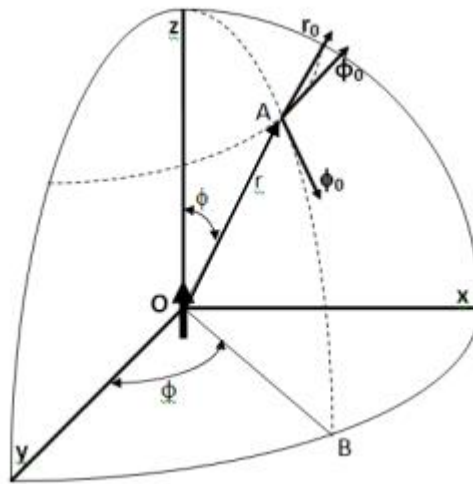


Рисунок 1.5 - Сферическая система координат

На рисунке 1.5 показано определение координаты произвольной точки А. Обе системы координат имеют общий центр – точку О. Радиус-вектор  $r$  соединяет точки А и О, а зенитный угол  $\phi$  определяется углом между осью  $z$  и  $r$ . На рисунке показана проекция радиус-вектора  $r$  на плоскость  $ХОУ$  - прямая  $ОВ$ . Величина угла  $\phi_0$  определяется углом между осью  $y$  и этой проекцией.

Векторы напряженности электрического поля  $E$  и магнитного поля  $H$  в сферической системе координат задаются тремя проекциями на единичные орты  $r_0$ ,  $\phi_0$  и  $\varphi_0$ . Вектор  $E$ , например, записывается следующим образом

$$E = r_0 E_r + \phi_0 E_\phi + \varphi_0 E_\varphi \quad (1.6)$$

При анализе симметричного вибратора принято ориентировать его вдоль оси  $z$ . Тогда поле излучения на расстоянии  $r \gg \lambda$  описывается всего лишь двумя проекциями:

$$E = \phi_0 E_\phi; H = \varphi_0 H_\varphi \quad (1.7)$$

Область пространства, для которой выполнены условия  $r \gg \lambda$ , называется волновой зоной [5].

Требования к техническим характеристикам антенн вытекают из назначения радиосистемы, условий размещения, режима работы, допустимых затрат и т.д. Реализуемость необходимых направленных свойств, энергетических, частотных, помехозащищенности и других характеристик антенн во многом зависит от рабочего диапазона волн [6].

К антеннам современных радиосистем предъявляется много требований, среди которых решающее значение имеют следующие два. Первое требование: направленность действия, т. е. распределение электромагнитной мощности в пространстве (или реакция на приходящее электромагнитное поле при радиоприеме). В одних случаях требуется концентрировать излучение или осуществлять

радиоприем в пределах достаточно узкого углового сектора, в других желательно обеспечить равномерность действия антенны по всем направлениям. Второе требование: излучение или прием должны сопровождаться минимальными потерями электромагнитной мощности на нагрев элементов антенны. Таким образом, характеристики антенны определяют ряд основных параметров всей радиосистемы [7].

Тип конструкции антенны зависит от диапазона частот, в котором она должна будет работать. Чтобы эффективно излучать энергию, антенна должна иметь размеры, близкие к длине рабочей длины волны. В таком случае принимаемый сигнал будет максимален [8].

### 1.3 Характеристики магнитных антенн

Сопротивление потерь антенны формально представляет собой коэффициент, зная который можно определить мощность потерь в антенне по обычной формуле электротехники:

$$R_{\text{пот}} = I^2 R_{\text{пот}} \quad (1.8)$$

Та часть мощности, которая не рассеялась в тепло на сопротивлении потерь в рамке, все же излучается в эфир. На основе некоторых специфических измерений можно определить эту излученную мощность  $R_{\text{изл}}$ . Вот через эту, излучаемую в эфир мощность, и выражают через сопротивление излучения антенны.

$$R_{\text{изл}} = R_{\text{изл}} / I^2 \quad (1.9)$$

где  $I$  - действующее значение тока в антенне.

Итак, можно сказать, что сопротивление излучения антенны формально представляет собой коэффициент, зная который можно определить мощность излучения антенны по обычной формуле электротехники:

$$R_{\text{изл}} = I^2 R_{\text{изл}} \quad (1.10)$$

Такое определение сопротивления излучения антенны приведено в литературе [5], и оно, на мой взгляд, наиболее верно выражает суть  $R_{\text{изл}}$ . Понятие «сопротивление излучения» было введено М. В. Шулейкиным (1884- 1939), выдающимся советским исследователем антенн и распространения радиоволн.

Заметим, что приведенные выше формулы справедливы для проволочных антенн с равномерным распределением тока в полотне антенны, каковыми и являются магнитные рамки.

Коэффициент полезного действия магнитной рамки.

Итак, в нашей эквивалентной схеме, к генератору подключено последовательно два сопротивления, на одном из них мощность генератора теряется, а на другом выделяется мощность, идущая на излучение в эфир. Руководствуясь этой схемой, можно найти коэффициент полезного действия антенны. КПД, через сопротивление потерь и сопротивление излучения антенны выражается как:

$$\text{КПД} = (R_{\text{изл}} / (R_{\text{изл}} + R_{\text{пот}})) * 100\% \quad (1.11)$$

Значения сопротивления потерь и сопротивление излучения антенны зависят от размеров антенны, от ее размещения в пространстве, от материалов, используемых для конструкции антенны. В радиолюбительских условиях точно определить эти величины экспериментальным путем достаточно сложно, так, как для этого необходимо проделать множество специфических измерений и использовать специальное дорогостоящее измерительное оборудование. Однако, сопротивление потерь и сопротивление излучения магнитных рамок вполне можно определить при помощи программ расчета антенн.

Программы расчета антенн в моделировании магнитных рамок

В настоящее время радиолюбитель имеет возможность использовать компьютерные программы расчета антенн для моделирования магнитных рамок. Эти программы могут определить сопротивление потерь и сопротивление излучения, нарисовать диаграмму направленности магнитной рамки, рассчитать емкость конденсатора, необходимую для настройки рамки на определенную частоту работы антенны.

Мной были проделаны расчеты магнитных рамочных антенн с использованием таких известных и надежных программ как MMANA (на основе MININEC) и NECWin Plus (на основе NEC-2), а затем полученные результаты были сравнены с теми, что выдали упрощенные специализированные программы, предназначенных для расчета магнитных рамок. Это программа Magnetic Loop Antenna Calculator v.1.6, KI6GD, и Magloop4, G4FGQ. Программа KI6GD позволяет произвести расчет параметров магнитной рамки в свободном пространстве, а программа G4FGQ позволяет произвести расчет параметров магнитной рамки расположенной на заданной высоте от земли, причем параметры земли можно задать.

Было выяснено, что все эти программы для рамок, расположенных в свободном пространстве выдают примерно одинаковые значения сопротивления потерь и сопротивления излучения. Данные по емкости конденсатора все программы выдают несколько отличающиеся друг от друга, но это в данном случае не столь существенно, так, как при конструировании реальной магнитной рамочной антенны емкость конденсатора все равно нуждается в подстройке, и не равна точно емкости, рассчитанной программно. При расчете различными программами параметров рамочных антенн, расположенных над землей, их параметры, уже начинали заметно отличаться друг от друга, однако, это отличие было не настолько большим, и для радиолюбительской практики для расчета магнитных рамок можно использовать любую из этих программ.

## **1.4 Постановка задачи исследования**

Работа посвящена исследованию и разработке активной широкополосной магнитной антенне.

Необходимо разработать схемы реализации активной широкополосной магнитной антенны.

Провести выбор элементов широкополосной магнитной антенны.

Провести расчеты параметров активной магнитной антенны. Определить расчетные коэффициенты, сделать анализ полученных результатов расчета.

## 2 Реализация и выбор элементов активной широкополосной магнитной антенны

### 2.1 Принцип построения активных магнитных антенн

Наиболее перспективными с точки зрения помехозащищенности являются устройства с параллельной отрицательной обратной связью, реализующее на входе усилителя точку с нулевым потенциалом относительно общего провода (виртуальную землю) и обладающие низким входным сопротивлением. Применением обратной отрицательной связи в активной магнитной антенне позволяет дополнительно получить равномерную амплитудно-частотную характеристику в широкой полосе частот. Функциональная схема резонансной АМА (активная магнитная антенна) с параллельной отрицательной обратной связью представлена на рис. 4.1,а(15). На рис. 4.1,б,в представлены простейшие варианты ее реализации на биполярных транзисторах, включенных по схеме с общей базой(ОБ) и общим эмиттером(ОЭ).

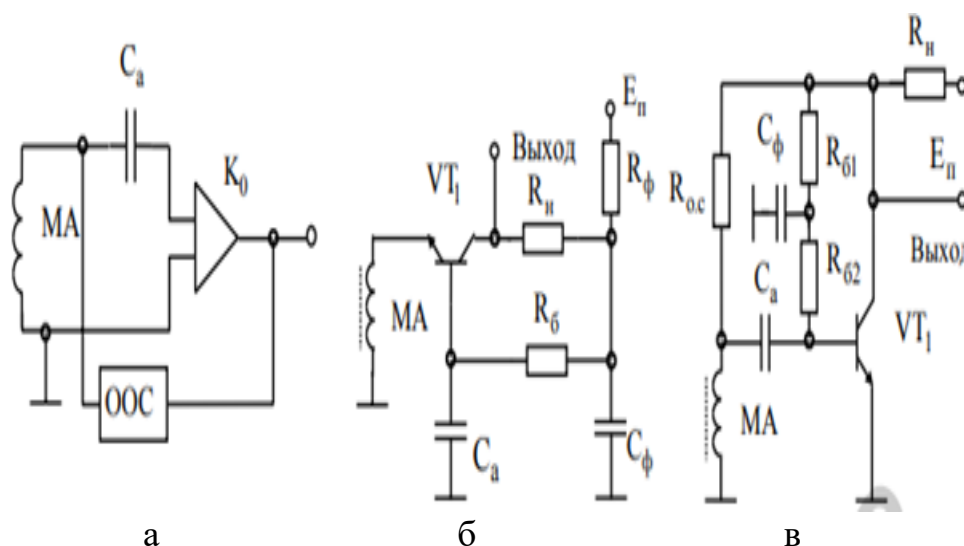


Рисунок 2.1 - Структурная схема АМА (а) и варианты АМА: схема с ОБ (б) и ОЭ (в)

Практические схемные реализации АМА могут отличаться типом применяемых на входе транзисторов (полевой или биполярный), способом выполнения входного каскада (несимметричный или симметричный-дифференциальный), способом разбиения на поддиапазоны (коммутация ферритовой антенны или изменение  $R_{г}$  транзистора). Однако при этом можно выделить присущие всем вариантам следующие основные принципы, использованные с целью получения предельных параметров:

- отсутствие во входном каскаде местных обратных связей по переменному току;
- наличие общей параллельной отрицательной обратной связи;
- максимизация глубины отрицательной обратной связи;

- применение малошумящих усилительных элементов.

Примеры однодиапазонных АМА с многокаскадным УРС (усилитель радиосигналов) представлены на рис. 4.2.

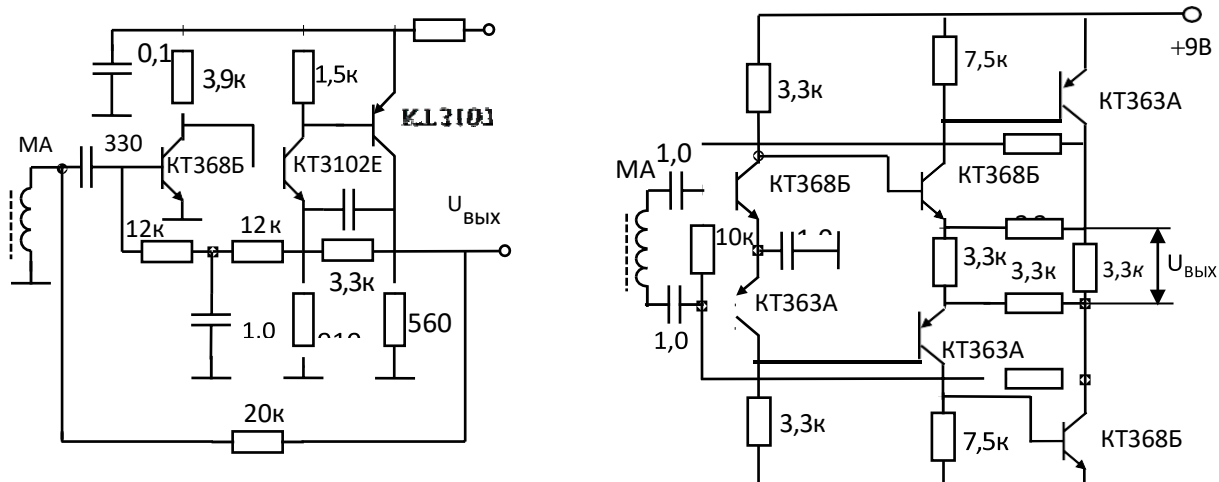


Рисунок 2.2 - АМА с многокаскадным (а) и дифференциальным (б) УРС

## 2.2 Широкополосная активная магнитная антенна с конструктивным разделением поддиапазонов

АМА с отдельными входными каскадами в диапазонах ДВ (148,5-285 кГц) (длинные волны) и СВ (525-1607 кГц) (средние волны) представлена на рис. 4.3. Для получения предельных значений реальной чувствительности в каждом частотном поддиапазоне были использованы транзисторы с минимальными значениями шумовой температуры  $T_{ш}$  в сочетании с применением последовательного колебательного контура во входной цепи и включением согласующего трансформатора для уменьшения шумов резисторов обратной связи. С этой целью в устройстве применена коммутация входных транзисторов, сигналы на которые поступают от индивидуальных ферритовых антенн.

В диапазоне ДВ использованы полевой транзистор КП303В и ферритовая антенна с индуктивностью  $L_3 = 30$  мГн, при этом величина емкости  $C_2$  выбрана из условия максимизации реальной чувствительности на границах диапазона ДВ. В диапазоне СВ использованы биполярный транзистор КТ368Б и ферритовая антенна с индуктивностью  $L_1 = 300$  мкГн, величина емкости  $C_1$  удовлетворяет условию максимизации реальной чувствительности на границах диапазона СВ. Ферритовые антенны выполнены на стандартных стержнях Н400  $l_c = 100$  мм,  $d_c = 8$  мм, при этом обмотки содержат: МА1 – 80 ( $L_1$ ) и 15 ( $L_2$ ) витков, МА2 – 800 ( $L_3$ ) и 15 ( $L_4$ ) витков, катушки связи (вторичные обмотки согласующих трансформаторов-антенн) равномерно намотаны поверх распределенной по всему стержню первичной обмотки.

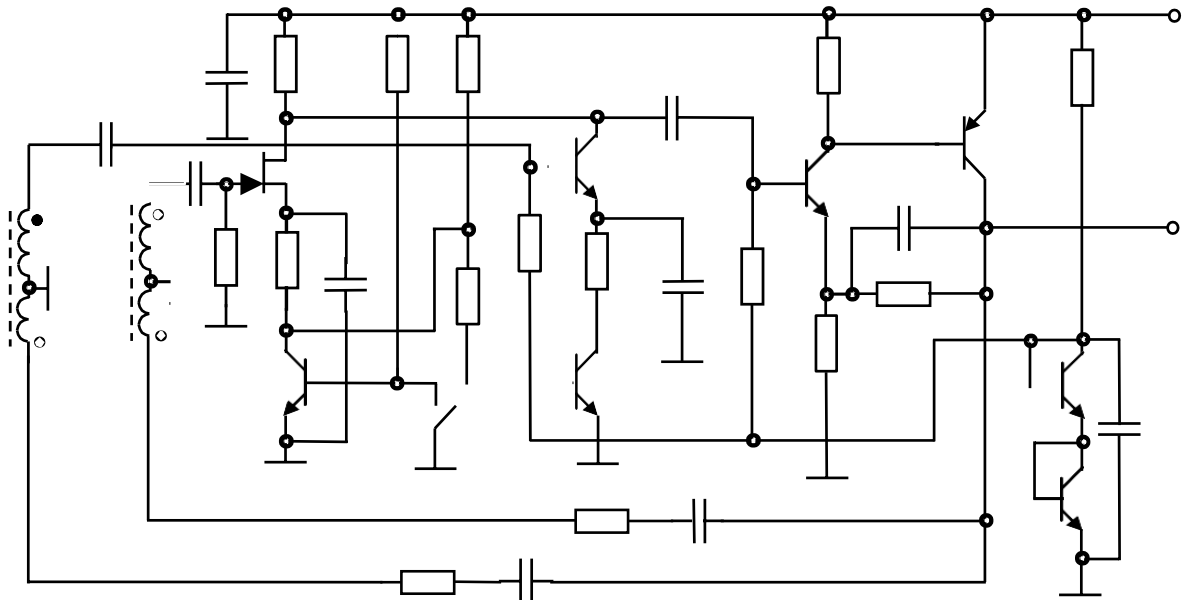


Рисунок 2.3 - Двухдиапазонная АМА

Результаты экспериментальных исследований электрических параметров АМА, следующие: реальная чувствительность устройства в диапазоне ДВ – 0,85 мВ/м при  $u_{вых} = 100$  мкВ, в диапазоне СВ – 0,9 мВ/м при  $u_{вых} = 100$  мкВ.

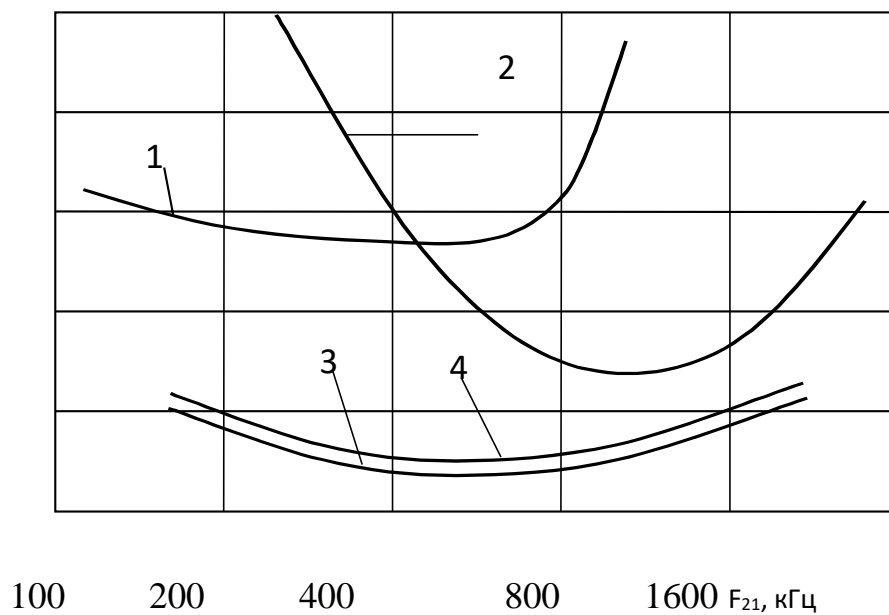


Рисунок 2.4 –Графики экспериментальных исследований нелинейных характеристик АМА



На рис. 4.4 представлены результаты экспериментальных измерений величины интермодуляционного продукта 3-го порядка  $U_{21}$  при двухсигнальном воздействии (кривые 1 и 2), при этом уровни интермодуляционных составляющих на выходе устройства составляли  $U_1 = U_2 = 300$  мВ, что соответствует величине ДДЗ (динамический диапазон) = 100 дБ. Составление частот интермодуляционных составляющих и продукта интермодуляции –  $(2F_1 - F_2) = F_{21}$ ,  $(F_2 - F_1) = dF$ ,  $(F_1 - F_{21}) = dF$ , где величина  $dF = 25-50$  кГц.

### 2.3 Широкополосная активная магнитная антенна с режимной регулировкой частоты согласования

Использование отдельных ферритовых антенн для диапазонов ДВ и СВ в схеме АМА на рис. 4.3 предназначено для изменения частоты  $\omega_n$  и сопротивления источника сигнала  $Z_g$ , что приводит к повышению реальной чувствительности за счет улучшения условий шумового согласования источника сигнала и АЭ входного каскада. Однако такой способ при большом числе поддиапазонов приводит к значительному усложнению тракта. Используемые же на практике приемы, направленные на изменение внутреннего сопротивления за счет коммутации числа витков ферритовой антенны, недостаточно эффективны из-за внесения дополнительных источников шума при их коммутации активными элементами.

Существует альтернативный метод, обеспечивающий выполнение условий согласования при заданном значении внутреннего сопротивления источника сигнала за счет изменения оптимального шумового сопротивления транзистора  $R_{г.опт}$ .

Сущность метода заключается в выборе режима по постоянному току эмиттера  $I_э$  транзистора (16). В этом случае происходит изменение составляющих шумового тока  $i_{ш}$  и шумового напряжения  $e_{ш}$ , определяющих оптимальное шумовое сопротивление источника сигнала

$$R_{г.опт} = \frac{e_{ш}}{i_{ш}} = \sqrt{r_{ш}/g_{ш}}, \quad (2.1)$$

где  $r_{ш}$  и  $g_{ш}$  – эквивалентные шумовые сопротивление и проводимость транзистора;

$$\begin{aligned} r_{ш} &= r_b + 0,5r_e, \\ g_{ш} &= 1/(2r_e\beta_0), \end{aligned} \quad (2.2)$$

где  $\beta_0$  – коэффициент передачи по току схемы с общим эмиттером;

$r_b$  – омическое сопротивление базы транзистора;

$r_e = \varphi_T/I_э$  – диффузионное сопротивление эмиттерного перехода;

$\varphi_T = 0,026$  В – температурный потенциал.

Подставляя эти выражения, получим:

$$R_{г.опт} = \sqrt{\frac{2\varphi_T\beta_0r_b}{I_э}} + \left(\frac{\varphi_T}{I_э}\right)^2\beta_0 \quad (2.3)$$

Таким образом, рассматриваемый способ режимного согласования заключается в выборе значения тока  $I_3$ . Этот способ привлекателен тем, что в отличие от дискретного изменения значения внутреннего сопротивления источника сигнала здесь возможно плавное изменение шумового сопротивления  $R_{г.опт}$  при неизменных параметрах источника сигнала.

Недостаток режимного способа согласования заключается в изменении усилительной способности транзисторов, в частности, в изменении крутизны транзистора  $S_0$ , так как:

$$S_0 = \beta_0 / (r_b + r_e(1 + \beta_0)), \quad (2.4)$$

откуда при  $\beta_0 \gg 1$  и  $r_b \ll r_e$  получим

$$S_0 = I_3 / \varphi_T. \quad (2.5)$$

Изменение крутизны  $S_0$ , вызванное, например, уменьшением тока  $I_3$ , приводит к прямо пропорциональному уменьшению коэффициента передачи каскада  $K_0 = S_0 R_{н}$  (см. рис. 4.5), что может неблагоприятно сказаться на таких характеристиках, как глубина ООС, коэффициент нелинейных искажений и т.д.

Соотношения нелинейных передаточных функций 1-го, 2-го и 3-го порядков, отражающих нелинейности транзистора соответствующих порядков, не зависят от величины тока эмиттера:

$$\begin{aligned} K_2 / K_1 &= \frac{1}{2\varphi_T}, \\ K_3 / K_1 &= \frac{1}{6\varphi_T^2}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Следовательно, коэффициент передачи  $K = SR_{н}$  определяет глубину обратной связи и уровень нелинейных искажений.

Существуют схемотехнические решения, позволяющие осуществить режимное согласование без изменения коэффициента передачи каскада. Вариант такой АМА с использованием принципа режимной регулировки  $R_{г.опт}$  изображен на рис. 4.6. В устройстве, предназначенном для работы в диапазонах ДВ (148,5-285 кГц) и СВ (525-1607 кГц), реализован метод повышения чувствительности с помощью последовательного резонанса. Значение индуктивности ферритовой антенны  $L_a$  и величина емкости  $C_1$  выбраны из условия максимизации реальной чувствительности в диапазоне ДВ. Для обеспечения этого условия на частоте согласования  $\omega_c$  в диапазоне ДВ выполнено условие равенства  $\omega_c L_a = R_{г.опт}$  при токе  $I_{31}$ , что имеет

место при подаче высокого потенциала на вход управления. Транзистор  $VT_2$  при этом открыт и нагрузкой транзистора  $VT_1$  является резистор  $R_2$ .

Коллекторный ток входного транзистора  $I_k \approx I_3$  равен

$$I_k = \frac{E_{\Pi} - [U_{6.31} + I_{61}(R_3 + R_4) + U_{6.32}]}{R_k}, \quad (2.7)$$

где  $U_{6.31}$  и  $U_{6.32}$  - напряжения между базой и эмиттером транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$ ;

$I_{61}$  - ток базы транзистора  $VT_1$ ;

$E_{\Pi}$  - напряжение источника питания

$R_k$  - коллекторное сопротивление транзистора  $VT_1$ .

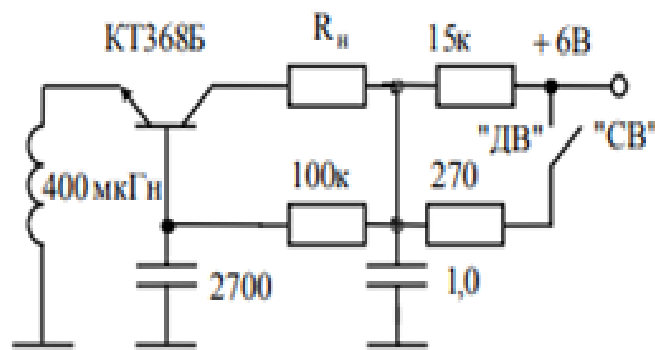


Рисунок 2.5 – АМА с режимной регулировкой частоты согласования

Из выражение (4.6) видно, что резистор  $R_k = R_2$  определяет величину тока  $I_{31}$  с достаточной степенью точности, если принять  $U_{6.31} \approx U_{6.32} = U_{6.3} = \text{const}$ .

В диапазоне СВ необходимое условие согласования  $R_{г.опт}$  и  $Z_{г}$  обеспечивается при подаче на вход управления нулевого потенциала, при этом транзистор  $VT_2$  закрыт, а нагрузкой транзистора  $VT_1$  является последовательное соединение резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , сумма которых и определяет новое значение тока  $I_{32}$ . Величина резистора  $R_1$  выбирается таким образом, чтобы значение  $I_{32}$  удовлетворяло выражению (4.6) для начальной частоты диапазона СВ 525 кГц.

Так как резистор, задающий ток входного каскада, является в устройстве одновременно и его коллекторной нагрузкой, то при изменении значения резистора происходит и изменение коэффициента передачи входного каскада  $K_{01} = S_0 R_k$ , причем это изменение обратно пропорционально величине  $I_3$ . В связи с указанной особенностью представленная схема АМА с режимной регулировкой частоты

согласования обладает свойством постоянства глубины отрицательной обратной связи при изменении тока эмиттера входного каскада. Экспериментальные исследования устройства показали, что реальная чувствительность при отношении сигнал/шум 20 дБ принимает следующие значения: в диапазоне ДВ - 0,9 мВ/м, в диапазоне СВ - 0,6 мВ/м при значении индуктивности  $L_a = 400$  мкГн,  $I_{э1} = 3$  мА,  $I_{э2} = 0,3$  мА,  $E_n = 6$  В, ферритовый стержень Н400 150x8 мм. При это для  $I_{э1} = I_{э2} = 3$  мА ] реальная чувствительность устройства на СВ составляет примерно 0,9 мВ/м, что несомненно говорит об эффективности такого согласования, позволяющего получить выигрыш по чувствительности в 1,5 раза.

На рис 4.4 представлены результаты измерения частотной зависимости продукта интермодуляции 3-го порядка при двухсигнальном воздействии, при этом уровни интермодуляционных составляющих на выходе устройства были равны  $U_1 = U_2 = 200$  мВ. Кривая 3 соответствует току  $I_{э1}$ , кривая 4 – току  $I_{э2}$ . Как видно из зависимостей, изменение тока эмиттера в разработанной АМА практически не приводит к изменению нелинейных параметров. Небольшое отличие зависимостей объясняется изменением режимов по постоянному току остальной части схемы.

## 2.4 Системы АРЧ в АМА

В условиях сложной ЭМО (электромагнитная обстановка) при эксплуатации АМА возможны ситуации, когда мощные поля сигналов помех вызывают в точке приема недопустимые искажения полезных сигналов. Например, это возможно при работе РПУ (радиоприемное устройство) с МА (магнитная антенна) вблизи мощной передающей станции. В таком случае полезной может оказаться система АРЧ.

В АМА, представленной на рис. 4.7,а, при превышении уровня группового сигнала на выходе детектора 1 выше некоторой допустимой величины срабатывает компаратор 2 и последовательно с обмоткой антенны  $L_{ма}$  с помощью ключа Кл.1 подключается дополнительная экранированная катушка индуктивности  $L_{доп}$ . Действующая высота МА уменьшается, и динамический диапазон АМА расширяется в сторону более сильных сигналов. В данной схеме происходит изменение глубины ООС, что не всегда приемлемо с точки зрения устойчивости к возбуждению УРС (узловая радиорелейная станция). В варианте АМА, представленной на рис. 4.7,б, в исходном состоянии ключ Кл.1 замкнут, а Кл.2 разомкнут, что обеспечивается наличием инвертора 3. При срабатывании компаратора 2 ключ Кл.1 размыкается, а ключ Кл.2 замыкается. Действующая высота МА уменьшается, как и в предыдущем случае, а глубина ООС при соответствующем выборе величины дополнительной индуктивности остается неизменной.

## 3 Расчет параметров активной широкополосной магнитной антенны

### 3.1 Постановка задачи расчета основных параметров

Исходные данные к расчету:

- диапазон волн (148,5-285 кГц (ДВ));
- реальная чувствительность не хуже 0,5 мВ/м;
- максимальная напряженность поля 3В/м;
- выходное напряжение при напряженности поля, равной реальной чувствительности, 100 мкВ.

2. В результате расчета необходимо определить следующее:

- тип усилительного элемента и его характеристики Тш, Rгонт;

- параметры пассивной МА:  $l_c, d_c, \mu_A, L_A, n, n_A, h_d$ ;

- параметры цепи ООС Roc;
- параметры цепи согласования C1, C2;
- параметры АМА hдАМА; Ерп.

3. Выбор типа усилительного элемента.

Из табл. 3.1 видно, что указанная в здании реальная чувствительность по полю может быть получена при использовании в диапазоне ДВ полевого транзистора. Выбираем транзистор типа КП303В.

4. Выбор ферритового сердечника магнитной антенны.

Учитывая рекомендации, сделанные в разделе 1.2, для увеличения действующей высоты антенны выбираем для диапазона ДВ ферритовый сердечник марки 2000НН. Геометрические размеры:  $d_c = 10$  мм,  $l_c = 200$  мм.

5. Выбор варианта согласования.

Для достижения наивысшей реальности чувствительности АМА выбираем вариант с последовательным резонансом.

6. Определение эффективной магнитной проницаемости магнитной антенны.

Из графиков, приведенных на рис. 1.2, получаем для  $(l_c / d_c) = 20$ :

$$\mu_{Amax} = 177,6.$$

7. Коэффициент перекрытия диапазона по частоте:

$$K_g = \omega_b / \omega_n = 285 / 148,5 = 1,92.$$

8. Параметр a:  $a = -(1 + K_g^2) / K_g^2 = -(1 + 1,92^2) / 1,92^2 = -1,27.$

9. Параметр d:

Анализируя график функции  $d(K_g)$ , при  $K_g = 1.92$  находим  $d = 0,888.$

10. Параметр b:

$$b = \frac{d^2}{\sqrt{2d^2 + a}} = \frac{0,888^2}{\sqrt{2 \cdot 0,888^2 - 1,27}} = 1,41.$$

11. Нормированный параметр D:

$$D_3 = d \sqrt{\frac{\sqrt{2d^2 + a}}{d^4 + a + 1}} = 0,888 \sqrt{\frac{\sqrt{2 \cdot 0,888^2 - 1,27}}{0,888^4 - 1,27 + 1}} = 1,115.$$

12. Частота последовательного резонанса:

$$f_1 = f_H / d = 148,5 / 0,888 = 166,85 \text{ Гц.}$$

13. Частота шумового согласования:

$$f_c = f_H / b = 148,5 / 1,41 = 105,32.$$

14. Индуктивность МА:

$$L_a - R_r \cdot b / 2\pi f = 12700 \cdot 1,41 / 2 \cdot 3,14 \cdot 148,5 \cdot 10^{-3} = 19200 \text{ мкГн}$$

15. Расчет действующей высоты МА.

Расчет проводим для нижней частоты диапазона  $f_H$ , считая  $dc = dk$ :

$$h_d = h_{dmax} \varphi(X, Y),$$

Откуда при равномерном распределении витков катушки по всей длине ферритового стержня  $\varphi(X, Y) = 1$ , считая  $lc = lk$ ,  $hd = hmax$

16. Расчет емкости корректирующих конденсаторов.

В выбранном варианте согласования  $C2 = 0$ , а

Принимаем  $C1 = 47$  пФ.

17. Коэффициент передачи  $T(0)$  на частоте шумового согласования.

Коэффициент транзистора КП303В  $T_{ш} = 7,5^\circ \text{ К}$  при  $R_{гопт} = 12700 \text{ Ом}$ , значение  $\Delta f$  принимаем равным  $10 \text{ кГц}$ , тогда

$$T_{(0)} = \frac{u_{\text{вых}}}{30 \sqrt{4kT_{ш} R_{гопт} \Delta f}} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{30 \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 7,5 \cdot 12700 \cdot 10 \cdot 10^3}} = 14,54.$$

18. Коэффициент трансформации.

$$n = 20 \frac{T}{T_{ш} T_{(0)}} = 20 \frac{293}{7,5 \cdot 14,54} = 53,74.$$

Принимаем  $n=54$ .

19. Резистор обратной связи.

Учитывая, что  $T(0) = ROC(0) / R_{Гопт}$ , а  $ROC = ROC(0) / n$ , получим

$$R_{OC} = \frac{T_{(0)} R_{Гопт}}{n} = \frac{14,54 \cdot 12700}{54} = 3420 \text{ Ом.}$$

Принимаем  $ROC = 3,5 \text{ кОм}$ .

20. Коэффициент передачи  $T_n$  на нижней частоте диапазона. Так как  $T_n = T(n)/n$ , то

$$T_n = \frac{R_{OC}}{Z_{Г(n)}} = \frac{R_{OC}}{Z_{Г}} n = \frac{3500}{2 \cdot 3,14 \cdot 148,5 \cdot 10^3 \cdot 19200 \cdot 10^{-6}} 54 = 10,56.$$

21. Количество витков магнитной антенны.

Рассчитываем параметр  $q$  по [9]:

$$S_p = \pi d_k^2 / 4 = 3,14(10 \cdot 10^{-3})^2 / 4 = 78,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Тогда

$$n_A = q \sqrt{L_A} = 1,938 \sqrt{19200} = 269.$$

22. Реальная чувствительность АМА.

Рассчитываем площадь витка антенны:

$$S_p = \pi d_k^2 / 4 = 3,14(10 \cdot 10^{-3})^2 / 4 = 78,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Рассчитываем значение параметра  $A$ :

$$A = 10^3 q S_p \mu_A / C = 10^3 \cdot 1,938 \cdot 78,5 \cdot 10^{-6} \cdot 177,6 / (3 \cdot 10^8) = 0,90 \cdot 10^{-7}.$$

Тогда для минимальной частоты диапазона получим:

$$E_{\text{pp}} = \frac{30 \sqrt{4kT_{\text{ш}} \Delta f} D_1}{A \sqrt{\omega} D_3} = \frac{30 \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 7,5 \cdot 10^4} \cdot 0,707}{0,901 \cdot 10^{-7} \sqrt{2 \cdot 3,14 \cdot 148,5 \cdot 10^3} \cdot 1,115} = 0,445 \text{ мВ/м}.$$

23. Действующая высота АМА:

$$h_{\text{дАМА}} = \frac{u_{\text{вых}}}{E_{\text{pp}}} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{0,445 \cdot 10^{-3}} = 0,247 \text{ м}.$$

### 3.2 Процесс адаптивной фильтрации

Пример адаптивной системы представлен на следующем рисунке:

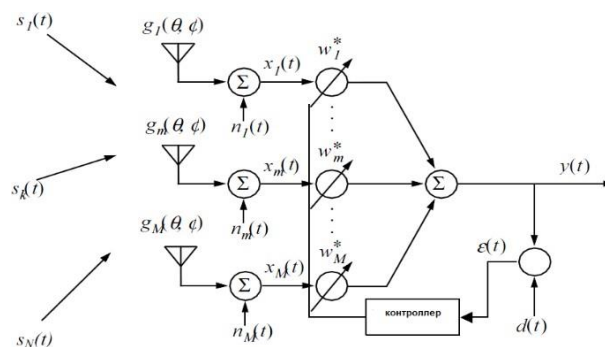


Рисунок 3.1– Метод формирования ДН с помощью подбора соответствующих коэффициентов

В соответствии с представленным рисунком, идея внедрения адаптивных антенных решеток заключается в следующем: антенна на базовой станции заменяется системой из нескольких антенн. Данная замена позволяет формировать диаграмму направленности желаемой формы, т.е. поворачивать главный лепесток диаграммы направленности по направлению желаемого сигнала, а нули диаграммы направленности – по направлению прихода помех. Методы подавления помех или синтез оптимальной ДН с помощью антенных решеток условно представлены на рисунке 4. Форма ДН антенной решетки



определяется значениями весовых коэффициентов, взвешивающих сигналы, принимаемые антеннами. В антенных решетках в качестве весовых коэффициентов используются аттенюаторы (в решетках с амплитудным управлением), фазовращатели (в решетках с фазовым управлением) или комплексные весовые коэффициенты (в решетках с амплитудно-фазовым управлением), реализуемые с помощью последовательно включенных аттенюаторов и фазовращателей. Как правило, в ААР в процессе адаптации изменяются все весовые коэффициенты.

Для работы устройства управления ААР (адаптивного процессора), с помощью которого вычисляются комплексные весовые коэффициенты, в большинстве алгоритмов адаптивной фильтрации оцениваются сигналы, принимаемые антенными элементами, выходной сигнал антенной решетки, а иногда и опорный сигнал. При цифровой обработке сигналы с антенных элементов должны быть усилены, преобразованы по частоте и оцифрованы. Для этого в каждом модуле ААР необходимо размещать приемно-усилительный тракт и аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Для управления системой используется FPGA процессоры (сокр. от field programmable gate array - вентиляционная матрица с эксплуатационным программированием, матричная БИС) на основе DSP (digital signal processor, цифровой сигнальный процессор) чипов.

Процесс адаптивной фильтрации состоит из двух главных операций:

- а) определение угла приема полезного сигнала;
- б) адаптивное формирование диаграммы направленности.

### 3.3 Определение угла приема

Постановка задачи определения угла может быть сформулирована следующим образом. Пусть  $M$  сигналов распространяются в среде со скоростью в направлениях.

Суммарный сигнал воспринимается антенной решеткой из  $N$  элементов, каждый из которых регистрирует электромагнитное поле по предположению с идеальной точностью. Здесь и далее, за исключением случаев, где это будет оговариваться особо, будем считать, что сигнал является широкополосным в пространственно-временном смысле. Это означает, что интервал корреляции комплексной огибающей сигнала (для сигналов без внутриимпульсной модуляции – длительность импульса)

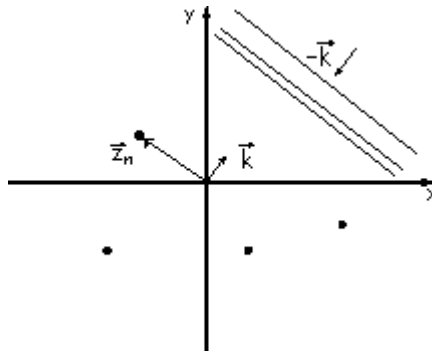


Рисунок 3.2 - Вектор  $\vec{z}_n$  определяет положение n-го элемента относительно начала координат. Показана плоская волна, распространяющаяся к антенной решетке в направлении  $-\vec{k}$

существенно превышает временной интервал между моментами прихода сигнала в наиболее разнесенные точки апертуры приемной антенны. Данное допущение позволяет разделить пространственно-временную обработку сигнала на пространственную и временную, выполняемые в произвольном порядке. Тогда сигнал, измеряемый в пространственной точке  $\vec{z}_n$  расположения n-го элемента, определяется формулой

$$x_n(t) = \sum_{m=1}^M s(t + \frac{1}{c} \vec{z}_n \cdot \vec{k}_m) + n_n(t), \quad (3.1)$$

где  $n_n(t)$  - аддитивный пространственно-белый шум, обусловленный возмущениями в среде распространения, а также собственными шумами элемента, а  $\vec{z}_n \cdot \vec{k}_m$  - скалярное произведение.

Предполагая ИИ находящимся в дальней зоне излучения и выбирая начало координат совпадающим с крайним элементом линейной эквидистантной АР (ЛЭАР), получим, что

$$\vec{z}_n \cdot \vec{k}_m = \frac{2\pi}{\lambda} n d \sin \theta_m, \quad (3.2)$$

где  $\theta_m$  - угол между направлением распространения сигнала  $m$  - го ИИ и нормалью к АР;

$d$  - расстояние между антенными элементами (АЭ);

$n$  - порядковый номер АЭ.

Большая группа адаптивных к данным методов непрерывного анализа использует определение источника излучения по максимумам соответствующих выходных функций. К этой группе должны быть отнесены: метод максимальной энтропии (ММЭ) Берга, метод Кейпона, метод «теплового

шума», метод Борджотти-Лагунаса, метод MUSIC.

Таблица 3.1 – Методы определения угла приема

Методы	Формула
Неадаптивный формирователь луча	$P(\vec{k}) = \vec{E}^H \cdot \vec{R} \cdot \vec{E}$
Кейпон	$P(\theta) = \frac{1}{\vec{E}^H \cdot R^{-1} \cdot \vec{E}}$
«тепловой шум»	$P(\theta) = \frac{1}{\vec{E}^H \cdot R^{-2} \cdot \vec{E}}$
Борджотти-Лагунас	$P(\theta) = \frac{\vec{E}^H \cdot R^{-1} \cdot \vec{E}}{\vec{E}^H \cdot R^{-2} \cdot \vec{E}}$
ММЭ	$P(\theta) = \frac{\vec{I}^H \cdot R^{-1} \cdot \vec{I}}{ \vec{E}^H \cdot R^{-1} \cdot \vec{I} ^2}$

Здесь  $\vec{I}^H = (1 \ 0 \ \dots \ 0)$ , а  $R = \overline{\vec{X}\vec{X}^H}$  - максимально правдоподобная оценка пространственной корреляционной матрицы выходных сигналов элементов АР,  $H$  - символ транспонирования и комплексного сопряжения.  $\vec{E}$  представляет собой вектор, характеризующий идеальную плоскую волну, распространяющуюся в направлении вектора визирования  $\vec{k}$ :

$$E_n = \exp(-j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta), \quad \vec{X} - \text{вектор отсчетов сигнала.}$$

Таким образом, измерение направления на излучающий источник при помощи антенной решетки математически эквивалентно вычислению пространственного спектра и определению положения локальных максимумов этого спектра.

Несмотря на такое многообразие, наиболее популярным среди этой группы является алгоритмы MUSIC. Кроме методов, использующих определение углов приема по локальным максимумам соответствующих выходных функций, популярностью также пользуется алгоритм ESPRIT. Два указанных алгоритма являются доминирующими в этой области, что обусловлено их относительной простотой, высокой реализуемостью и малым количеством ограничивающих факторов, т.е. широкой областью применения.

Метод ESPRIT. Этот метод базируется на том факте, что вектор, определяющий направление прихода  $m$ -го сигнала, имеет один и тот же сдвиг

$$z = \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sin \theta)$$

на каждом элементе ЛЭАР.  
Используя выражение, представим  $N \times M$  матрицу, составленную из сигнальных векторов в виде:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-2} & z_2^{N-2} & \dots & z_M^{N-2} \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_M^{N-1} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Определим две  $(N-1) \times M$  матрицы  $S_0$  и  $S_1$ , состоящие, соответственно, из первых  $(N-1)$  строк матрицы  $S$  и последних  $(N-1)$  строк матрицы  $S$ . Заметим, что  $S_1 = S_0 \cdot \Phi$  и члены диагональной матрицы

$$\Phi = \begin{pmatrix} z_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & z_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & z_M \end{pmatrix}, \quad (3.4)$$

определяют направления прихода сигналов. Ввиду того, что сигнальные векторы в матрице  $S$  захватывают то же подпространство, что и сигнальные собственные векторы корреляционной матрицы  $R$ , существует матрица перехода между базисами, определяемыми этими векторами  $C$ , такая, что  $R_1 = S \cdot C$ .

Определим две  $(N-1) \times M$  матрицы  $R_0$  и  $R_1$ , состоящие, соответственно, из первых  $(N-1)$  строк матрицы  $R_1$  и последних  $(N-1)$  строк матрицы  $R_1$ . Для них из (5) вытекают следующие выражения

$$\begin{aligned} R_0 &= S_0 \cdot C \\ R_1 &= S_1 \cdot C = S_0 \cdot \Phi \cdot C \end{aligned} \quad (3.5)$$

Запишем

$$R_1 \cdot C^{-1} \cdot F^{-1} \cdot C = S_0 \cdot \Phi \cdot C \cdot C^{-1} \cdot \Phi^{-1} \cdot C = S_0 \cdot C = R_0 \quad (3.6)$$

Обозначив

$$\Psi^{-1} = C^{-1} \cdot \Phi^{-1} \cdot C, \quad (3.7)$$

получим, что

$$R_1 = R_0 \cdot \Psi \quad \Psi = C^{-1} \cdot \Phi \cdot C. \quad (3.8)$$

Последнее выражение означает, что  $\Phi$  – это диагональная матрица собственных значений. Таким образом, алгоритм ESPRIT можно описать следующими шагами:

- а) оценить корреляционную матрицу  $R$ ;
- б) найти ее собственные векторы;
- в) определить сигнальные собственные векторы, соответствующие  $M$  наибольшим собственным числам;
- г) определить матрицу  $\hat{U}$ , используя уравнение (8);
- д) найти собственные значения матрицы  $\hat{U}$ ;
- е) определить углы прихода, используя выражение (6).

Метод MUSIC. Метод MUSIC (Multiple Signal Classification, классификация множественных сигналов) является методом последовательного обзора. Этот метод основан на разложении пространственной корреляционной матрицы по собственным векторам и собственным значениям.

Метод MUSIC основан на анализе спектра вида

$$P(\vec{k}) = \frac{1}{\vec{E}^H \cdot \left( \sum_{k=M+1}^R \vec{V}_k \cdot \vec{V}_k^H \right) \cdot \vec{E}} \quad (3.9)$$

В методе EV используется оценка вида

$$P(\vec{k}) = \frac{1}{\vec{E}^H \cdot \left( \sum_{k=M+1}^R \frac{1}{\lambda_k} \vec{V}_k \cdot \vec{V}_k^H \right) \cdot \vec{E}}, \quad (3.10)$$

где  $\vec{V}_k$  – собственные векторы корреляционной матрицы  $R$ .

Представим скалярное произведение собственных векторов и управляющего вектора в виде полинома

$$v_k(z) = \sum_{i=1}^M \vec{V}_k \cdot z^{-(i-1)} \quad (3.11)$$

где  $k=M+1, \dots, N$ , а  $z = \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sin \theta)$  ;

$n$  – номер полинома.

В (4)  $V$  – один из собственных векторов шумового подпространства,  $i$  – номер компоненты  $n$ -го вектора.

### 3.3 Моделирование и анализ магнитных антенн

В этом разделе мы покажем вам, как создавать, визуализировать и анализировать элементы антенны в панели инструментов Antenna Toolbox.

Определим антенный элемент с помощью антенной библиотеки определим спиральную антенну с помощью спирального антенного элемента в библиотеке моделирования и анализа антенны.

```
hx = helix
hx =
helix with properties:
Radius: 0.0220
Width: 1.0000e-03
Turns: 3
Spacing: 0.0350
WindingDirection: 'CCW'
FeedStubHeight: 1.0000e-03
GroundPlaneRadius: 0.0750
Substrate: [1x1 dielectric]
Conductor: [1x1 metal]
Tilt: 0
TiltAxis: [1 0 0]
Load: [1x1 lumpedElement]
```

Покажем строение антенны. Мы используем функцию рендеринга, чтобы увидеть структуру спиральной антенны. Спиральная антенна состоит из спиралевидного проводника в плоскости заземления. Плоскость заземления антенны находится в плоскости X-Y.

```
show(hx)
```

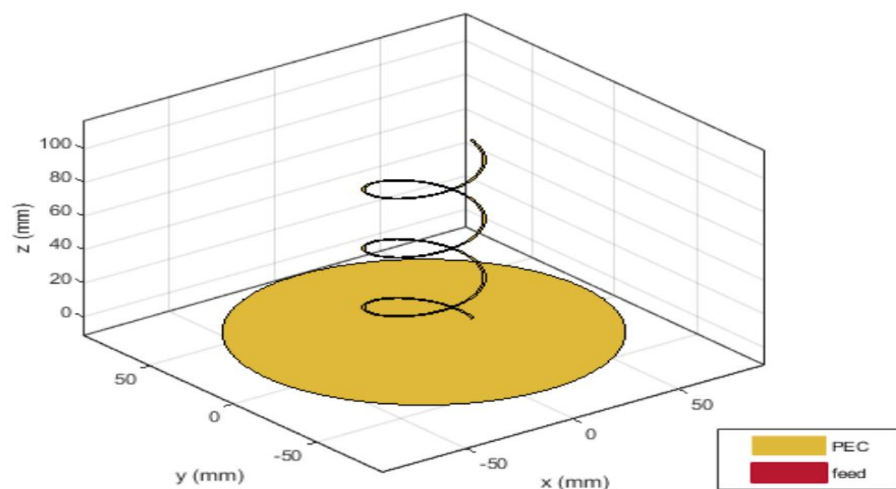


Рисунок 3.1 – Магнитный антенный элемент

Меняем свойства антенны. Изменяем следующие свойства спиральной антенны: радиус =  $28 \times 10^{-3}$ , ширина =  $1,2 \times 10^{-3}$ , количество витков = 4 покажем свойства антенны. Чтобы увидеть изменения в структуре, нужно посмотреть на антенну.

```
hx = helix('Radius',28e-3,'Width',1.2e-3,'Turns',4)
```

```
hx =
```

```
helix with properties:
```

```
Radius: 0.0280
```

```
Width: 0.0012
```

```
Turns: 4
```

```
Spacing: 0.0350
```

```
WindingDirection: 'CCW'
```

```
FeedStubHeight: 1.0000e-03
```

```
GroundPlaneRadius: 0.0750
```

```
Substrate: [1x1 dielectric]
```

```
Conductor: [1x1 metal]
```

```
Tilt: 0
```

```
TiltAxis: [1 0 0]
```

```
Load: [1x1 lumpedElement]
```

```
show(hx)
```

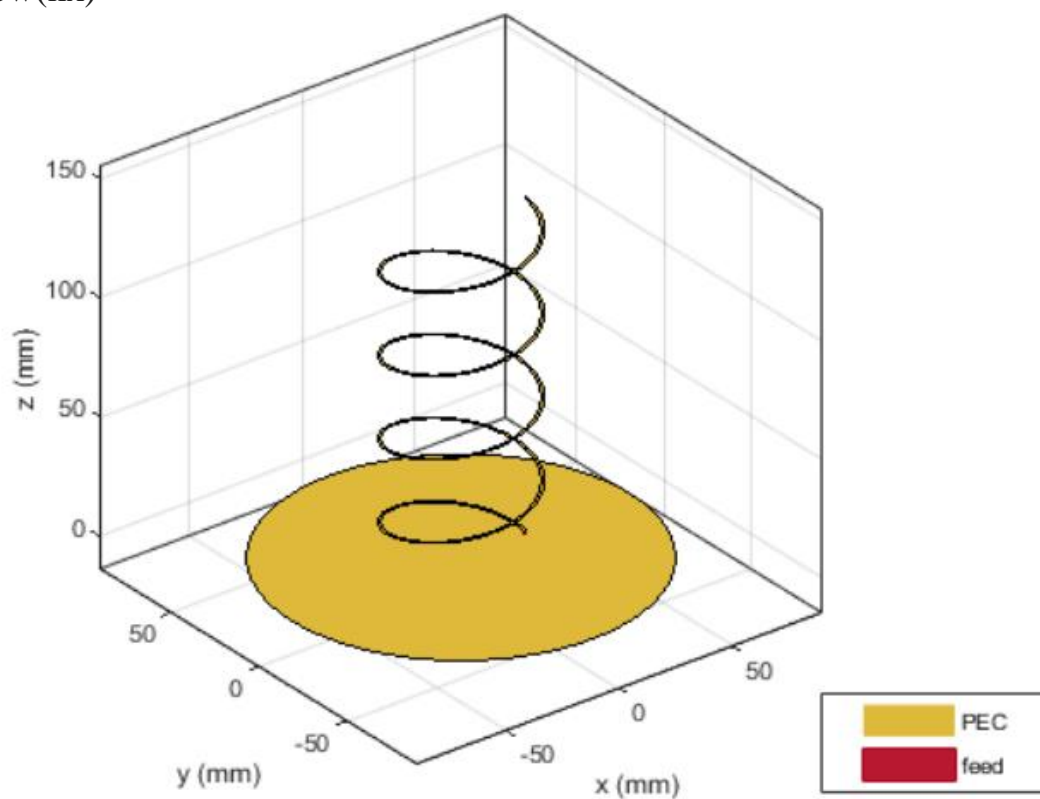


Рисунок 3.2 – Изменение свойств антенны

Составим диаграмму направленности антенны. Для построения диаграммы направленности спиральной антенны используем функцию шаблона. Диаграмма направленности антенны заключается в том, что мощность антенны должна быть распределена пространственно. Шаблон показывает направление или пользу антенны.

```
pattern(hx,1.8e9)
```

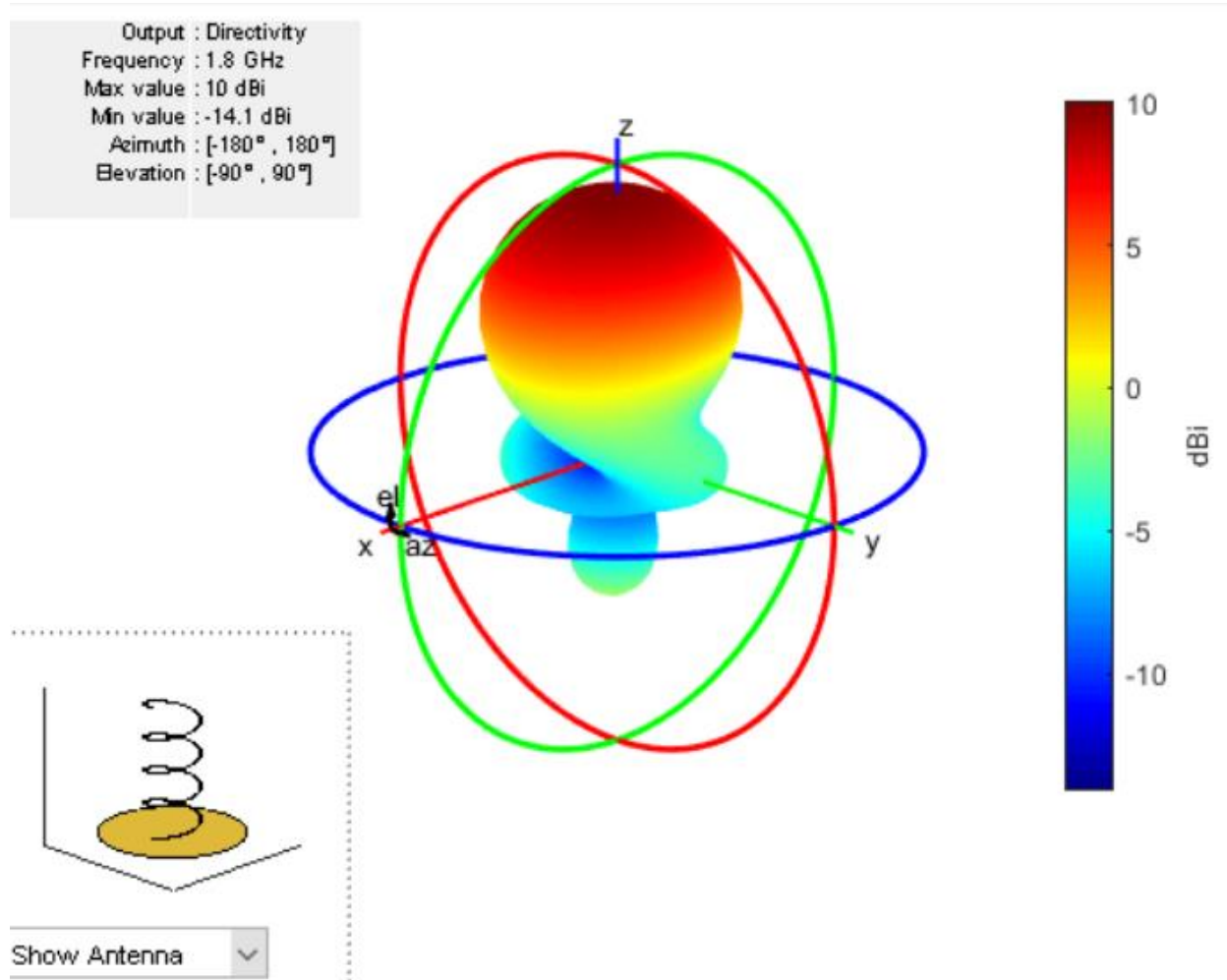


Рисунок 3.3 – Диаграмма направленности антенны

Строим фокусную диаграмму антенны в соответствии с азимутом и углом расположения. Для построения фокусной диаграммы и угла наклона спиральной антенны используем азимутальные функции фокусной диаграммы и высоту фокусной диаграммы. Это двумерная диаграмма антенны с заданной частотой.

```
patternAzimuth(hx,1.8e9)
```



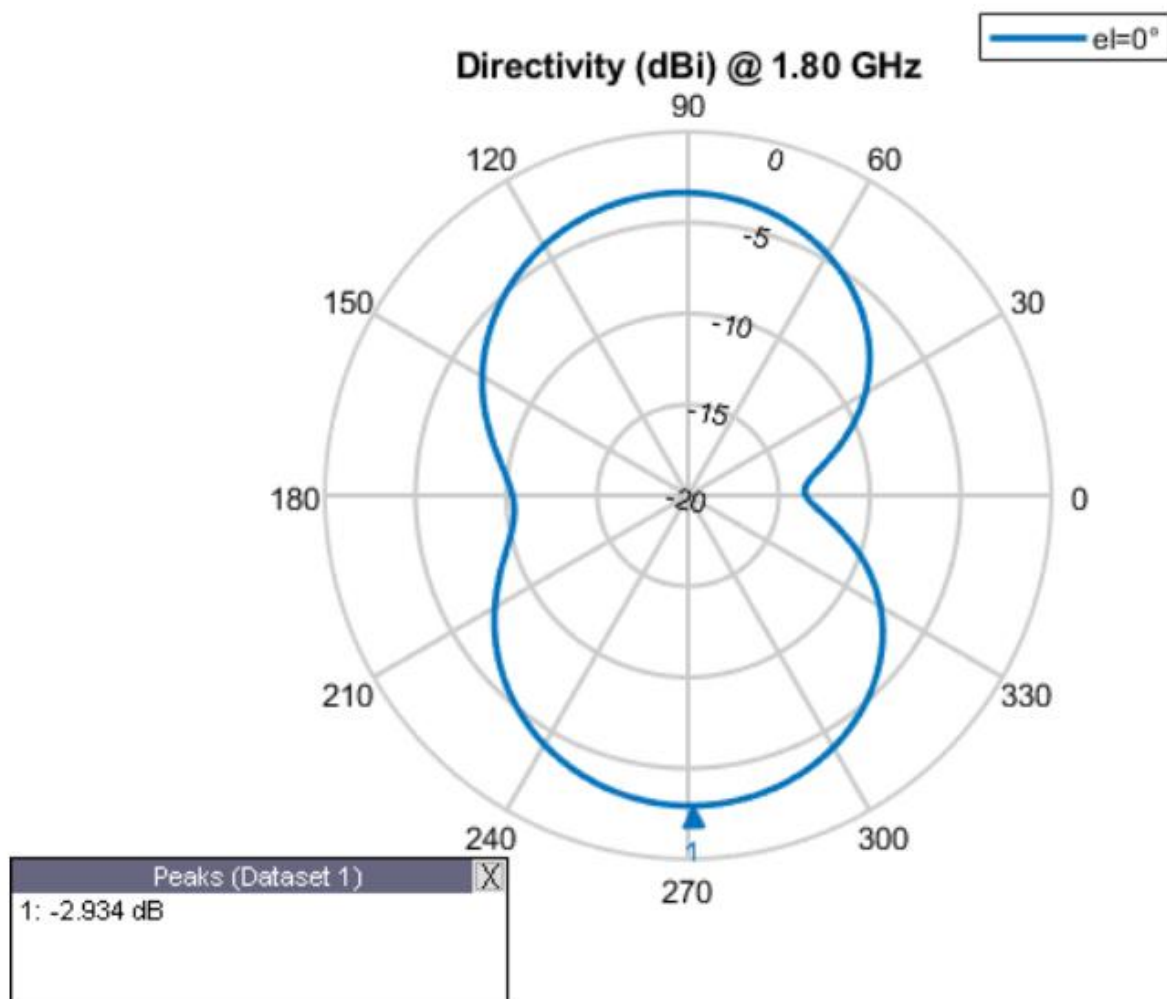


Рисунок 3.4 – Диаграмма направленности антенны по азимуту и углу положения

Figure  
`patternElevation(hx,1.8e9)`

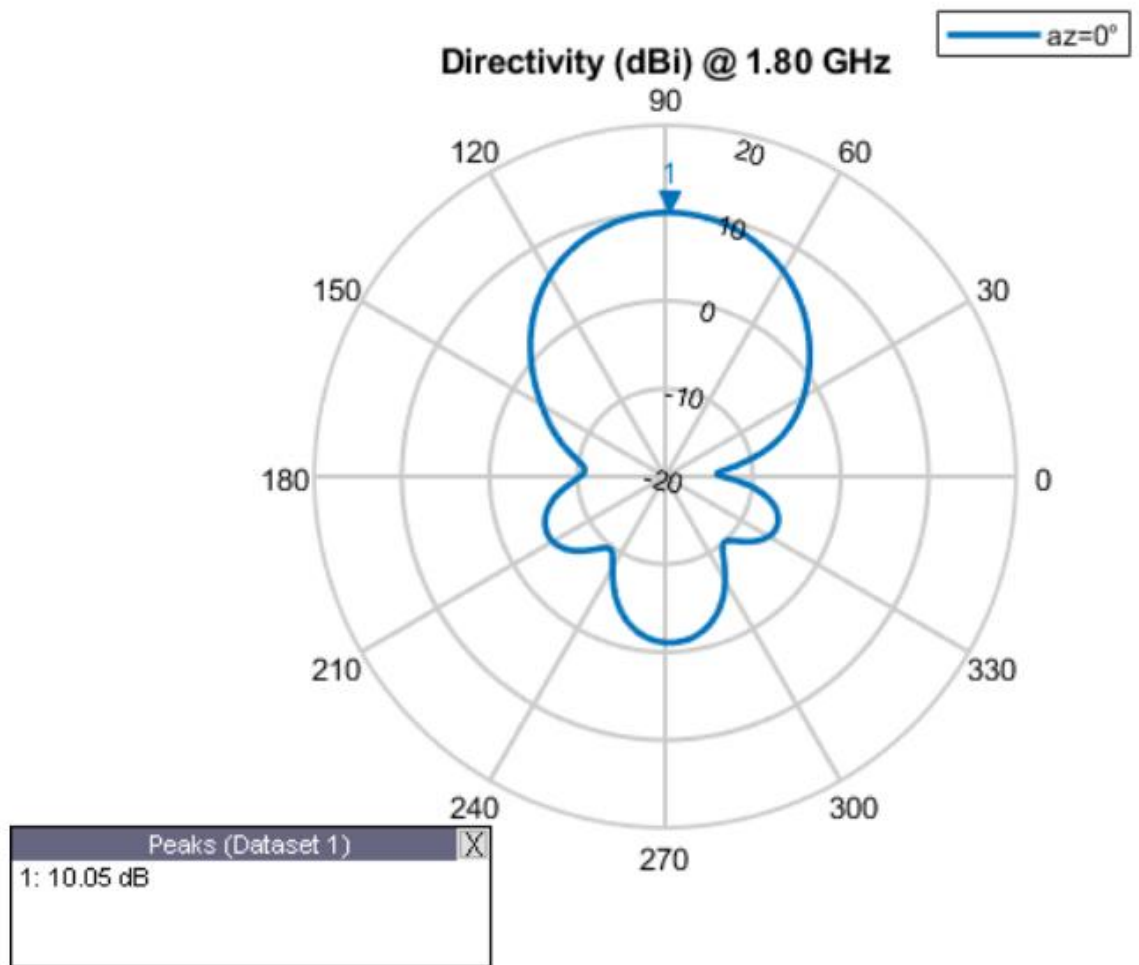


Рисунок 3.5 – Диаграмма направленности антенны по азимуту и углу положения

Рассчитаем направление антенны. Для расчета направления спиральной антенны используем пару именно ориентированных значений на выходе функции шаблона. Фокусировка-это способность антенны генерировать энергию в определенном направлении. Его можно определить как отношение максимальной интенсивности излучения в нужном направлении к средней интенсивности излучения во всех остальных направлениях. Следует обратить внимание на то, что польза и направление антенны измеряются на расстоянии  $100 \cdot \lambda$ .

```
Directivity = pattern(hx,1.8e9,0,90)
Directivity = 10.0444
```

Вычисляем антенные поля. Для расчета ЕН полей спиральной антенны мы используем функцию Fields. Поля ЕН являются компонентами X, Y, Z электрических и магнитных полей антенны. Эти компоненты измеряются на определенной частоте и в определенных точках пространства.

```
[E,H] = ENfields(hx,1.8e9,[0;0;1]);
```

Вводим на график различную поляризацию антенны. Для построения различных диаграмм направленности спиральной антенны используем имя поляризации в функции выборки. Поляризация-это направление электрического поля или электронного поля, антенны. Поляризация классифицируется как эллиптическая, линейная или круглая. В этом примере показана диаграмма направленности спирали с правой круговой поляризацией (RHCP).

```
pattern(hx,1.8e9,'Polarization','RHCP')
```

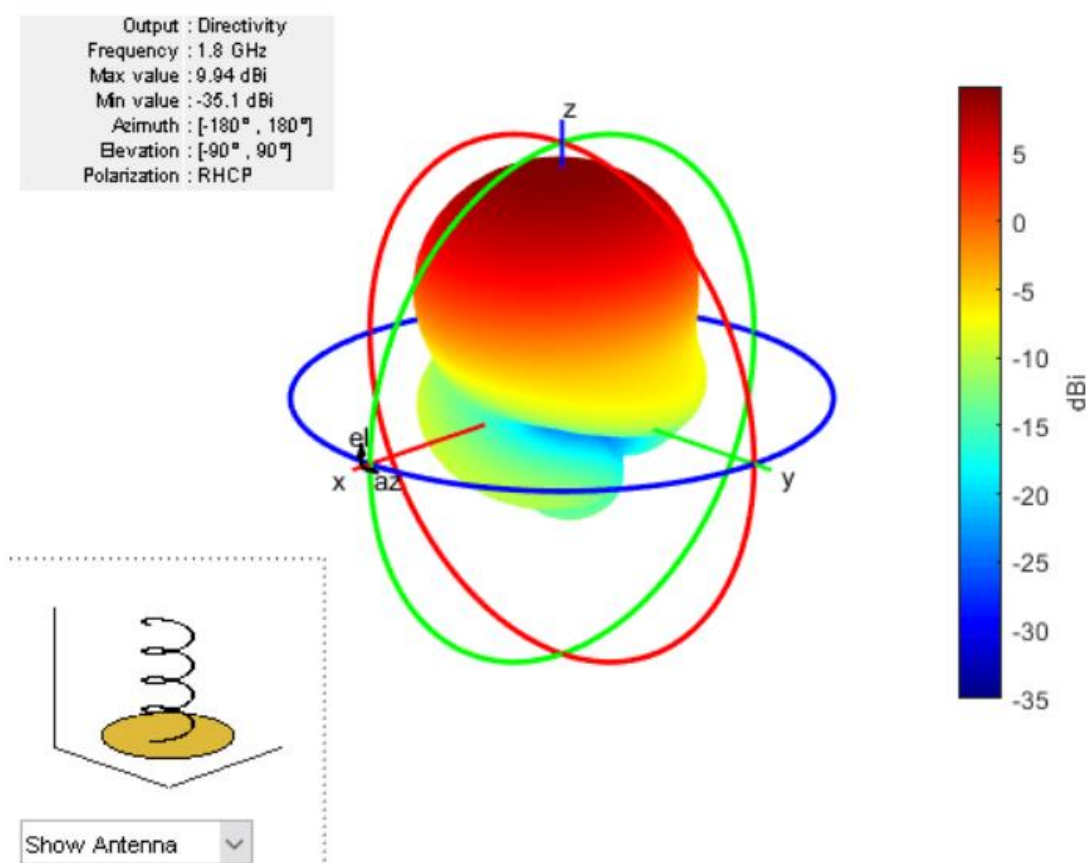


Рисунок 3.6 – График различной поляризации антенны

Расчет осевого отношения магнитной антенны. Для расчета осевого отношения спиральной антенны используем функцию осевого отношения. Отношение осей антенны в заданном направлении (AR) определяет отношение двух ортогональных компонентов поля, испускаемого круговой поляризованной волной. Осевое отношение, равное бесконечности, представляет линейно поляризованные волны. Единица измерения-дБ.

```
ar = axialRatio(hx,1.8e9,20,30)
```

```
ar = 24.4335
```

Расчет ширины антенного луча. Для расчета ширины луча антенны используем функцию ширины луча. Ширина пучка антенны-это угловой размер, охватывающий диаграмму направленности антенны. Угол ширины луча измеряется в плоскости, имеющей направление главного лепестка антенны.

```
[bw, angles] = beamwidth(hx,1.8e9,0,1:1:360)
bw = 57.0000
angles = 1×2
```

60 117

Расчет сопротивления антенны. Для расчета и рисования входного сопротивления спиральной антенны используем функцию импеданса. Входное сопротивление-это отношение напряжения и тока в порту. Сопротивление антенны рассчитывается как отношение фазного напряжения (как было сказано выше, 0° в фазном угле 1 В) и фазного тока в порту.

```
impedance(hx,1.7e9:1e6:2.2e9)
```

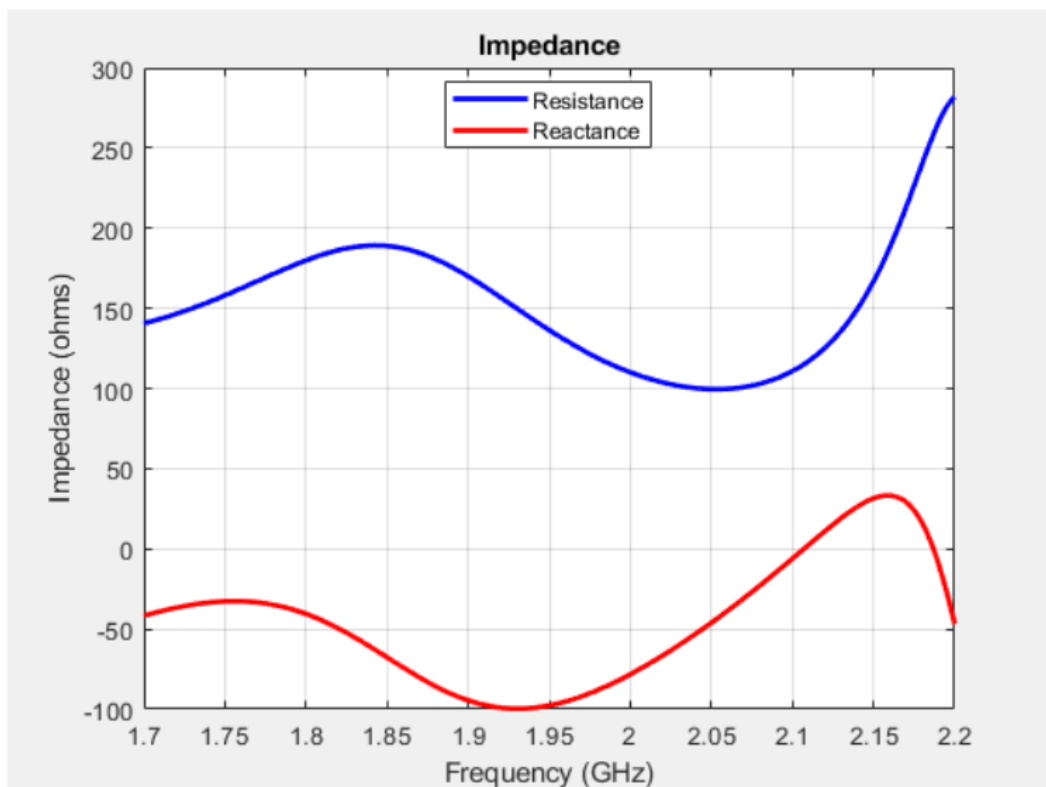


Рисунок 3.7 – График сопротивления антенны

Расчет коэффициента отражения антенны. Для расчета S11 спиральной антенны используем функцию параметра. Коэффициент отражения антенны или s\_1\_1 характеризует относительную долю радиочастотной мощности, отражаемой обратно из-за несоответствия импеданса.

```
S = sparameters(hx,1.7e9:1e6:2.2e9,72)
```

```
S =
```

```
sparameters: S-parameters object
```

```
NumPorts: 1
```

```
Frequencies: [501x1 double]
```

```
Parameters: [1x1x501 double]
```

```
Impedance: 72
```

```
rfparam(obj,i,j) returns S-parameter Sij
```

```
rfplot(S)
```

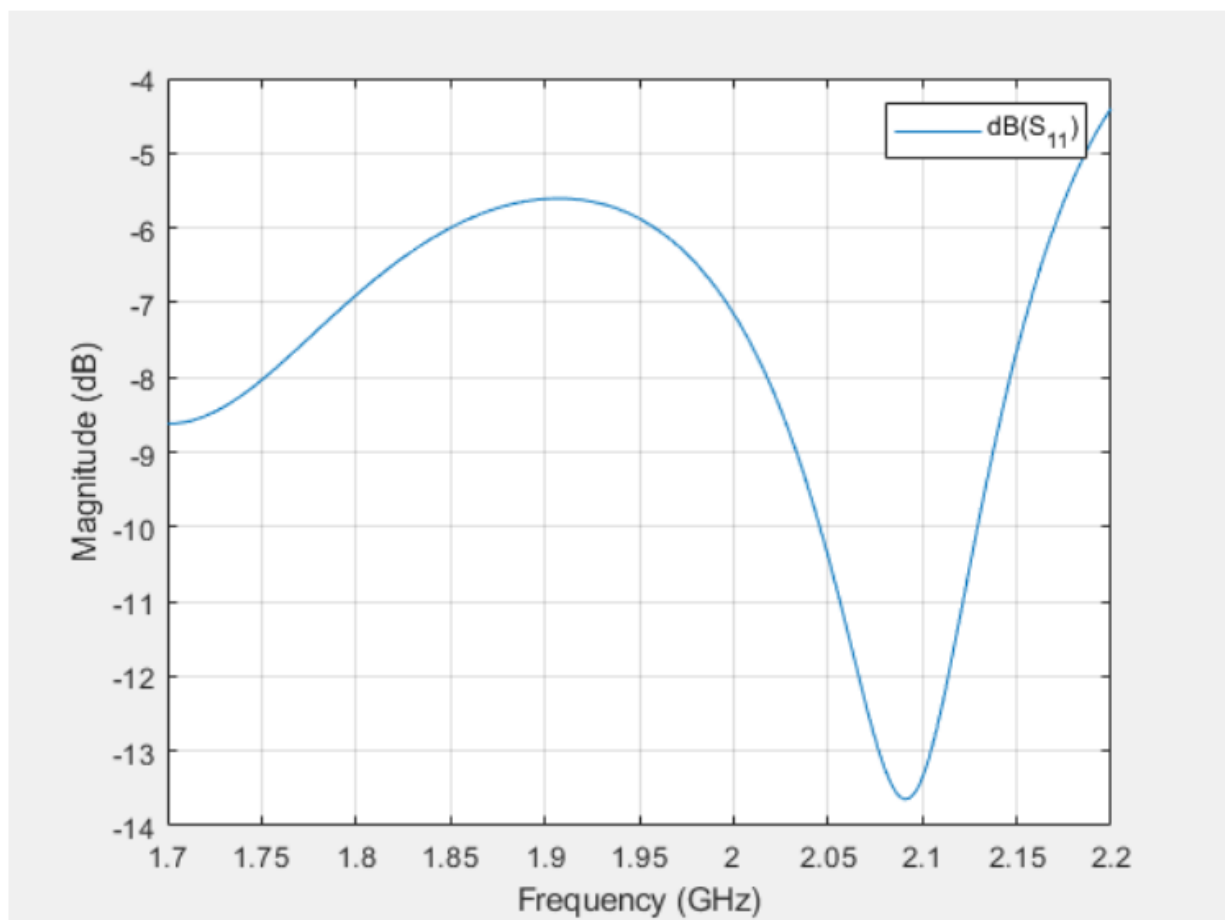


Рисунок 3.8 – График коэффициента отражения антенны

Расчет обратного расхода антенны. Для расчета и построения обратного расхода спиральной антенны используем функцию обратного расхода. Обратная потеря антенны является мерой эффективности передачи энергии от электрической сети к нагрузке, как и антенна. Расчеты отображаются в логарифмическом масштабе.

returnLoss(hx,1.7e9:1e6:2.2e9,72)

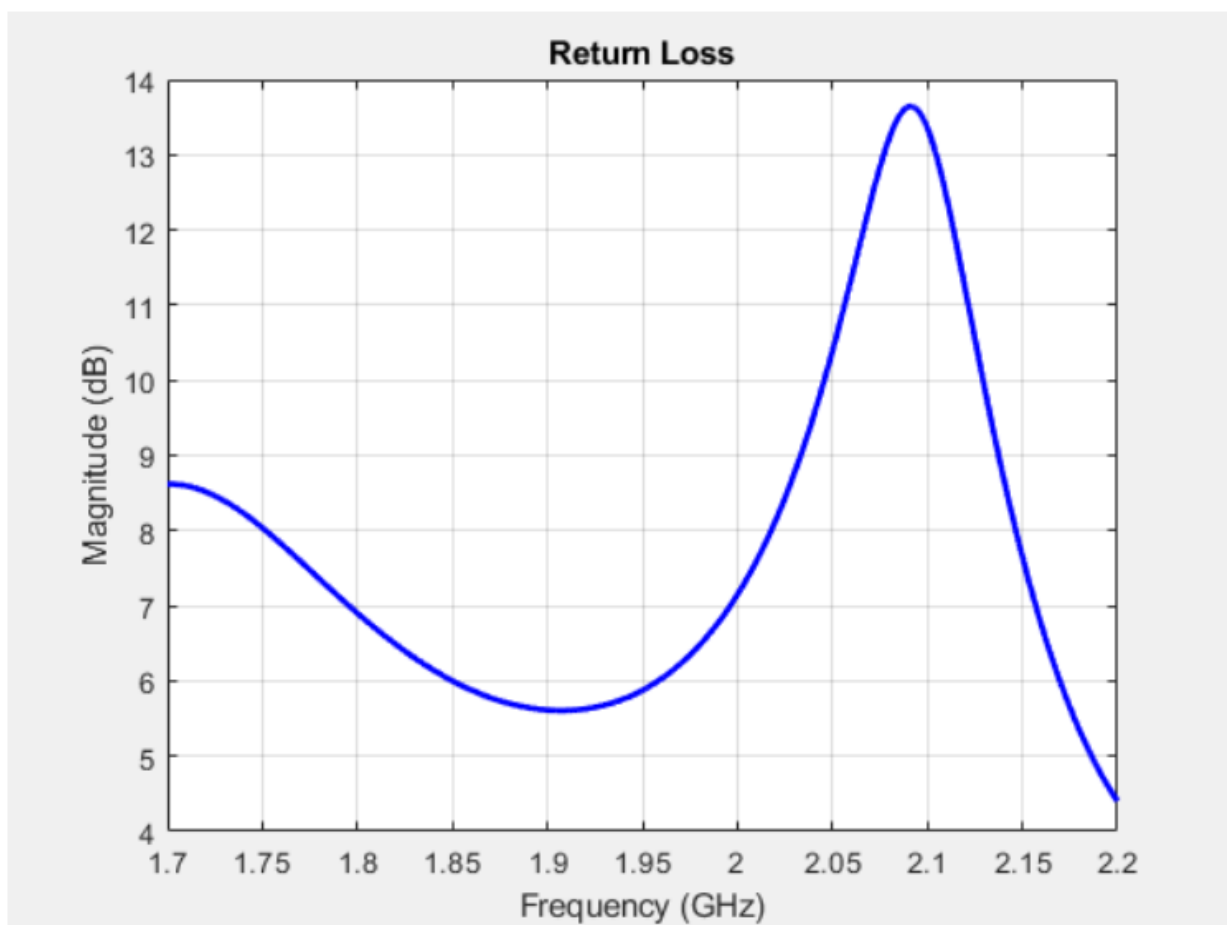


Рисунок 3.9 – График обратного расхода антенны

Расчет коэффициента волны постоянного напряжения антенны. Для расчета и построения VSWR спиральной антенны используем функцию VSWR. Антенна VSWR-это еще одна мера идентификации сопротивления между передающей сетью и антенной.

vswr(hx,1.7e9:1e6:2.2e9,72)

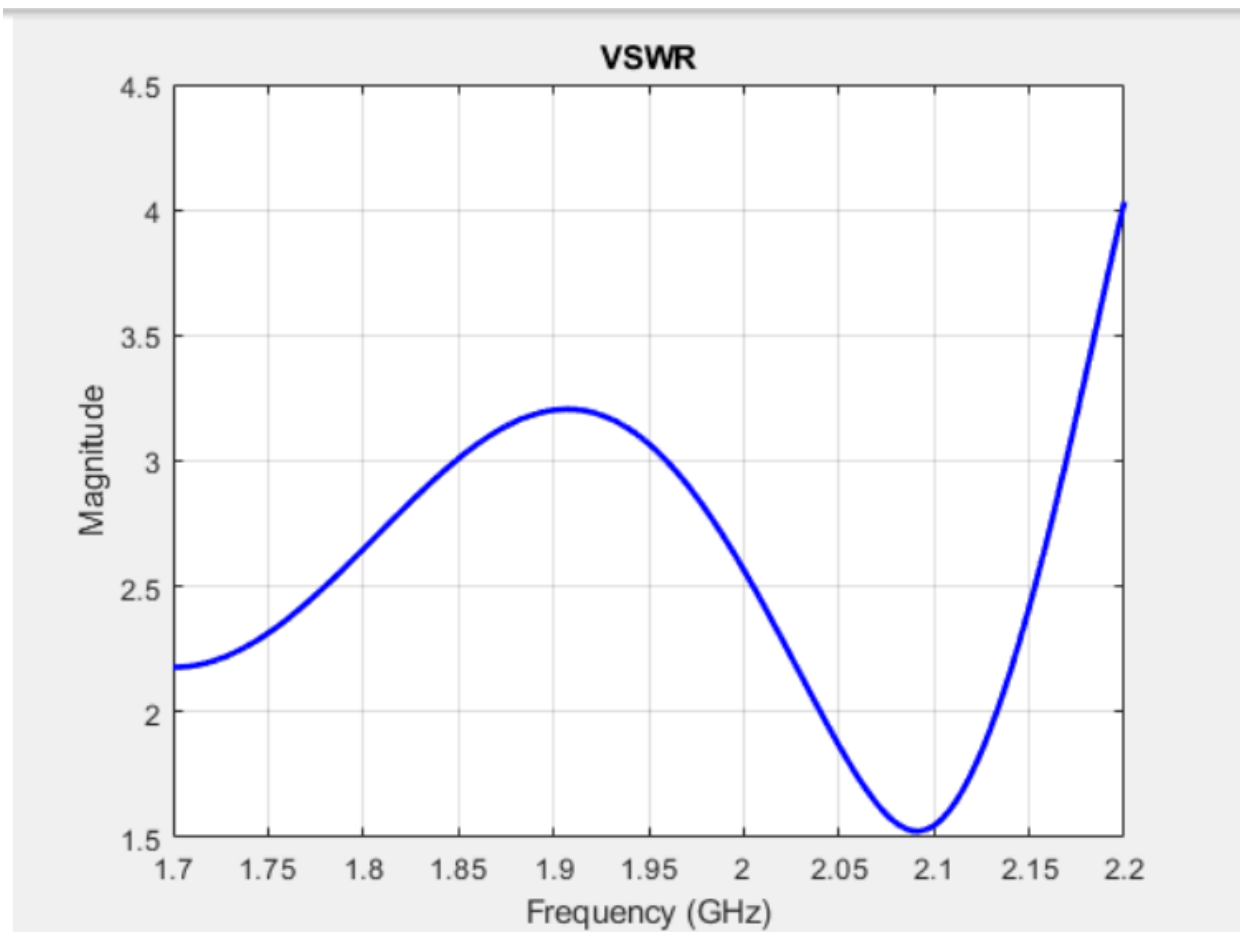


Рисунок 3.10 – Коэффициент постоянной волны напряжения антенны

Расчет распределения тока и заряда антенны. Для расчета распределения заряда спиральной антенны используем функцию зарядки. Распределение заряда-это количество заряда на поверхности антенны при заданной частоте. Для расчета распределения тока спиральной антенны используем функцию тока. Распределение тока-величина тока на поверхности антенны при заданной частоте.

charge(hx,2.01e9)

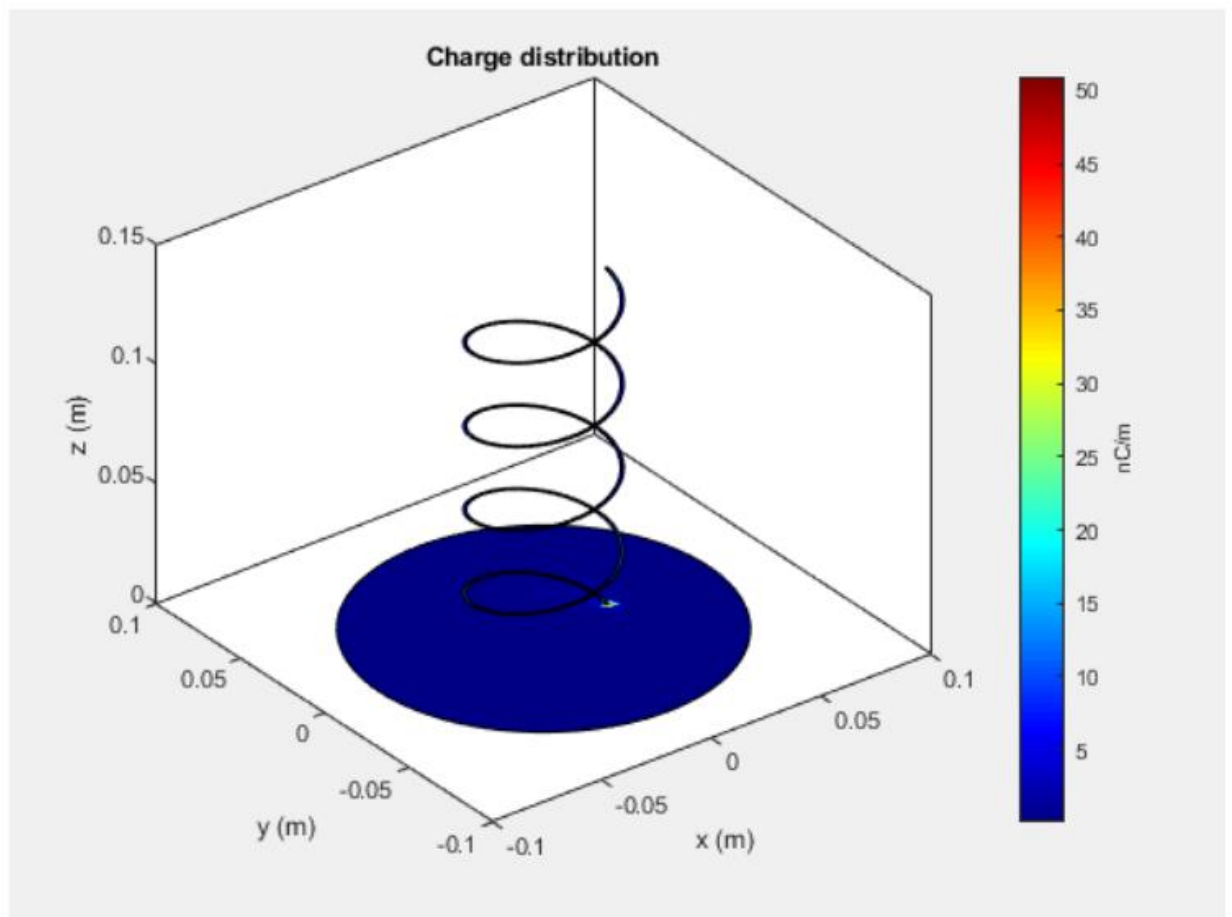


Рисунок 3.11 – График распределения тока и заряда магнитной антенны

figure  
current(hx,2.01e9)

Отображение антенной решетки. Используйте функцию сетки, чтобы создать и показать сетчатую структуру спиральной антенны. сетка используется для выборки поверхности антенны. В этом процессе электромагнитный решатель может обрабатывать геометрию и материал антенны. Основанием для разделения поверхности антенны или формой элемента выбора является треугольник.



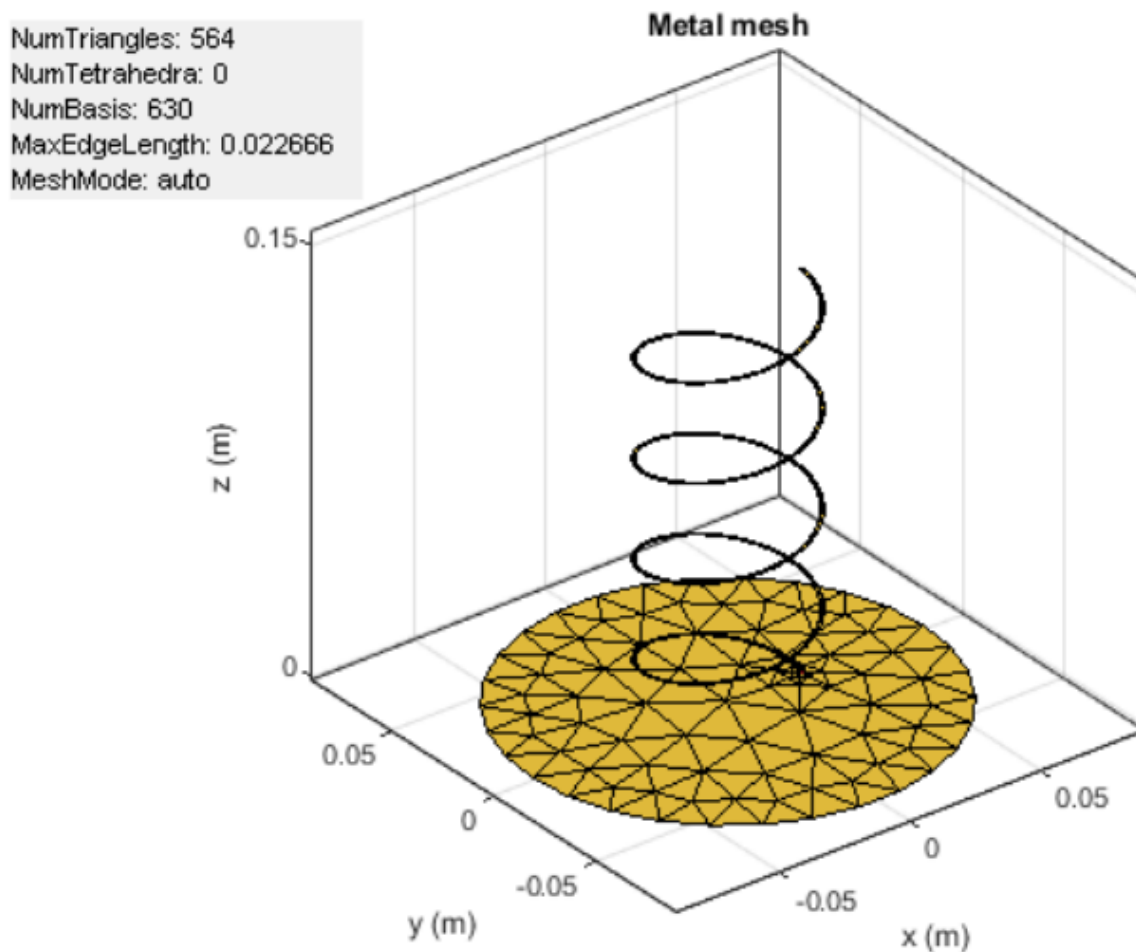


Рисунок 3.11 – Магнитная антенная решетка

Для треугольников указываем максимальную длину ребра под названием "максимальная длина ребра". Эта пара имен-значений вручную связывает спиральную структуру.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Добились целью исследования – исследованы активные широкополосные магнитные антенны, главным достоинством которых является невосприимчивость к электрическим помехам.

Приведены основные понятия магнитной антенны, Аналитический обзор активных магнитных антенн, характеристики магнитных антенн, принцип построения активных магнитных антенн.

Сделаны расчеты параметров активной широкополосной магнитной антенны.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Богданович Б.М. Нелинейные искажения в приёмно-усилительных устройствах. – М.: Связь, 1980. – 280 с.
- 2 Курочкин А.Е. Теоретические основы активных магнитных антенн: Учебно-метод. пособие по дисциплине «Радиоприёмные устройства» для студентов специальности «Радиотехника»: В 2 ч. Ч. 1. Шумовые параметры входных каскадов радиоприёмных устройств с магнитной антенной. – Мн.: БГУИР, 2001. – 50 с.
- 3 Ред Э.Т. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. – М.: Мир, 1990. – 256 с.
- 4 Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения ЭМС радиоэлектронных систем. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
- 5 Дроздов В.В. Любительские КВ-трансиверы. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
- 6 Голубев В.Н. Эффективная избирательность РПУ. – М.: Связь, 1978. – 239 с.
- 7 Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – М.: Энергия, 1977. – 672 с.
- 8 Курочкин А.Е. Теоретические основы активных магнитных антенн. Учебно-методическое пособие по дисциплине «Радиоприёмные устройства». Часть 2. Нелинейные характеристики входных каскадов радиоприёмных устройств с магнитной антенной. Минск, 2003. Стр. 25-35.
- 9 Курочкин А.Е. Теоретические основы активных магнитных антенн. Учебно-методическое пособие по дисциплине «Радиоприёмные устройства». Часть 1. ШУМОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВХОДНЫХ КАСКАДОВ РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ С МАГНИТНОЙ АНТЕННОЙ. Минск, 2003. Стр. 25-35.