

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)  
Высшая школа электроники и компьютерных наук  
Кафедра «Инфокоммуникационные технологии»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой ИКТ, д.т.н.  
\_\_\_\_\_ С.Н. Даровских  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020г.

Модель адаптивной антенной решетки телекоммуникационной системы

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ– Д.11.03.02.2020.223.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы,  
доцент  
\_\_\_\_\_ В.С. Спицын  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы,  
студент группы КЭ-411  
\_\_\_\_\_ Е.В. Малоземова  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролер  
\_\_\_\_\_ В.Д. Спицына  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Челябинск 2020

## РЕФЕРАТ

Малоземова Е.В. Модель адаптивной антенной решетки телекоммуникационной системы. – Челябинск: ЮУрГУ, ВШЭКН, 2020, 48 с. – Библиографический список – 8 наим., 2 листа приложений формата А1.

В данной выпускной квалификационной работе была получена модель адаптивной антенной решетки телекоммуникационной системы.

Также в работе приведены характеристические особенности адаптивных антенн и адаптивных антенных решёток.

В качестве исследуемой модели была выбранная фазированная антенная решетка, построенная на основе излучателей Вивальди.

Телекоммуникационную систему сузили до стандарта пятого поколения.

В работе указан процесс моделирования антенной решётки с итоговым получением диаграмм направленностей в разных плоскостях.

Проект реализован с применением таких программ, как Microsoft Word, MatLab R2015b, CST STUDIO SUITE со встроенными Antenna Magus и CST Microwave Studio.

					<i>ЮУрГУ– Д.11.03.02.2020.223.00 ПЗ ВКР</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Малоземова</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Спицын В.С.</i>				3	48
<i>Н. Контр.</i>		<i>Спицына В.Д.</i>			<i>ЮУрГУ Инфокоммуникационные технологии</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Даровских</i>					

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 Теоретические данные об адаптивных антеннах .....	10
1.1 Общие сведения об адаптивных антеннах .....	10
1.2 Структурная схема адаптивной антенны .....	11
1.3 Структурная схема адаптивной антенной решётки .....	12
1.4 Характеристики адаптивных антенных решёток .....	12
1.5 Основы построения ААР для телекоммуникационной системы .....	15
1.6 Особенности построения ФАР .....	18
2 Технические характеристики 5G .....	20
3 Параметры излучателя и общие сведения о расчёте .....	25
3.1 Выбор типа излучателя .....	25
3.2 Расчёт излучателя .....	26
3.3 Расчёт геометрических параметров антенны .....	28
3.4 Создание модели излучателя .....	33
3.5 ДН излучателя .....	38
4 Модель ФАР .....	42
4.1 ДН ФАР .....	42
5 Результаты исследования модели .....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	48

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- 1G – first generation (первое поколение мобильной связи);
- 2G – second generation (второе поколение мобильной связи);
- 3G – third generation (третье поколение мобильной связи);
- 3GPP – third generation partnership project (консорциум, разрабатывающий спецификации для мобильной связи);
- 4G – fourth generation (четвертое поколение мобильной связи);
- 5G – fifth generation (пятое поколение мобильной связи);
- AMPS – advanced mobile phone service (аналоговый стандарт сотовой связи);
- CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio;
- IEEE – стандарт Института инженеров электротехники и электроники;
- MIMO – multiple input multiple output (множественные входы множественный выходы);
- PIM – passive intermodulation (пассивная интермодуляция);
- PTFE – политетрафторэтилен;
- UMTS – universal mobile telecommunications system (универсальная мобильная телекоммуникационная система);
- АА – адаптивные антенны;
- ААР – адаптивная антенная решётка;
- АОС – адаптивная обработка сигналов;
- АР – антенная решётка;
- АС – абонентская станция;
- АФР – амплитудно-фазовое распределение;
- БС – базовая станция;
- ВК – весовые коэффициенты;
- ВКР – всемирная конференция радиосвязи;
- ДН – диаграмма направленности;
- ДОС – диаграмообразующее устройство;
- КНД – коэффициент направленного действия;

КСВ – коэффициент стоячей волны;  
КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению;  
МСЭ – международный союз электросвязи;  
РЭС – радиоэлектронные средства;  
СВЧ – сверхвысокие частоты;  
СПО – сигнально-помеховая обстановка;  
УИС – устройство измерения сигналов;  
УРАУ – устройство реализации алгоритма управления;  
УФОС – устройство формирования опорного сигнала;  
ФАР – фазированная антенная решётка;  
ХН – характеристика направленности;  
ЭМС – электромагнитная совместимость.

## ВВЕДЕНИЕ

На протяжении десятилетий человечество ищет пути реализации единого информационного пространства, чтобы независимо от времени и нахождения в пространстве индивидум мог воспользоваться необходимыми ему услугами связи. Поэтому именно средства радиосвязи нуждаются в постоянном совершенствовании потому, как они могут стать единственной возможностью для обмена информацией.

Однако невозможно не заметить, что в среднем за 3–5 лет происходит полная смена поколений радиосвязи. Постоянное совершенствование систем радиосвязи самых разнообразных типов говорит об актуальности использования беспроводных технологий.

Со временем в процессе развития технологий возникающих проблем становится всё больше, каждая из которых имеет свой масштаб. К таким проблемам относят электромагнитную совместимость (ЭМС) средств и систем радиосвязи, подходящее использование частотных ресурсов для различных радиослужб, увеличение пропускной способности радиосистем при сокращении доступного диапазона частот и так далее. К более частным трудностям относятся, например, борьба с многолучёвостью распространения, возможность управления мощностью излучения абонентских станций (АС) и др.

Такие возникающие сложности для радиосвязи можно продолжать, но ключевой остается проблема контроля помехоустойчивости принимаемого сигнала в состоянии увеличения пропускной способности и количества радиосредств. И уже на протяжении десятилетий решением этой задачи является усовершенствование средств и способов формирования и обработки сигналов.

Устройство обработки сигналов является частью радиоприёмника (см. рисунок 1.1), выделяющее полезный сигнал  $u_s(t)$ , в состав которого входит сообщение  $s(t)$ , из общего ассорти сигналов, помех  $u_n(t)$  и шумов  $n(t)$ . Такое устройство настолько хорошо, насколько принятое сообщение  $s^*(t)$  будет соответствовать передаваемому  $s(t)$ . Поэтому от средств обработки необходимо восполнение отрицательных черт канала связи.



УФС – устройство формирования сигнала; ПРД – передатчик;  
 УОС – устройство обработки сигналов; ПРМ – приёмник

Рисунок 1.1 – Структурная схема канала связи

Из-за частых перемещений абонентских станций, не редких изменений мест базовых станций (БС), а также из-за особенностей радиосистем сигнально-помеховая обстановка (СПО) не однозначна для каждого случая, как и параметры помех. С такой проблемой может справиться адаптивная обработка сигналов, которая подстраивается под характеристики конкретного момента.

Именно адаптивная обработка сигналов (АОС) помогает обойти все вышеупомянутые проблемы применения беспроводных технологий, разрабатывая более совершенные методы.

Приём с помощью Rake-приёмников, разделение сигналов по технологии ММО, а также адаптивный разнесенный прием можно отнести к средствам обработки сигналов. Упомянем об адаптивном управлении частотным ресурсом и использовании направленных свойств антенн, применяемые в оборудовании фиксированного радиодоступа. В случае, если требуется разделение сигналов в одной частоте пускается в ход адаптивная подстройка поляризационных свойств антенн. Стоит отметить применение совместно с направленными антеннами адаптивных временных корректоров лишь для борьбы с многолучевыми помехами. Однако, увеличение количества антенн и осложнение методов обработки информации остаются основными.

Более подробно стоит отметить использование АОС среди разных поколений радиосвязи. С возможностью подавления мешающих сигналов существенно увеличивается польза адаптивной обработки сигналов. В системах подвижной и фиксированной связи третьего – пятого поколений (3G, 4G, 5G) могут эксплуатироваться адаптивные антенны (с английского «smart antennas» – интеллектуальные

антенны), которые позволяют, к примеру, уменьшить влияние многолучевого распространения сигналов, повысить обслуживаемую зону БС, снизить мощность, излучаемую от абонентских и базовых станций, увеличить пропускную способность каналов управления и трафика и др. Эти и другие положительные характеристики АОС при оптимальном приеме полезных и подавлении мешающих сигналов реализуются с помощью передающих фазированных антенных решёток (ФАР) и приемных адаптивных антенных решёток (ААР).

Стоит отметить, что в системах стандарта IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ad практикуют аналогичные технологии для повышения помехоустойчивости и ёмкости.

ААР с алгоритмами адаптации применяются в стандартах связи третьего и четвертого поколений, например, UMTS.

В отношении систем четвертого и пятого поколений радиосвязи процессы адаптации уже связаны со всеми уровнями, включая физический уровень РЭС и даже выбор сети связи, наиболее подходящей к условиям в данный момент времени.

Опираясь на исследования различных исследовательских групп по всему миру, уже известны примеры использования адаптивной обработки сигналов по классическим методикам. В системах связи первого поколения, в частности AMPS, стало возможным увеличение зоны обслуживания одной базовой станции, тем самым сократив количество БС на единицу площади. Такой эффект стал возможен путем эксплуатации адаптивных антенных решёток, а именно автосопровождением максимума диаграммы направленности (ДН) антенны БС за источником сигнала. Аналогично в стандарте NMT-450 применялось автосопровождение главным лучом ДН антенны активной АС для совершенствования излучаемой мощности в десятки раз.

Улучшения устройств обработки сигналов возникают в качестве основного стремления к изменениям на физическом уровне. Собственно, по этой причине имеем смену некогерентной аналоговой обработки, соответствующей поколению 1G, на когерентную цифровую обработку, соответствующей поколению 2G. Далее для следующих поколений, включая 3G, не исключено применение сигналов без



фильтрации. При этом стоит заметить, что в системах связи третьего поколения достижимо использование адаптивных устройств обработки. Для 4G и 5G поколений скорость обмена информацией выше, а также возможность использовать частотный ресурс повторно. Из таких данных следует, что с развитием технологий радиосвязи наиболее увереннее будут применяться адаптивная обработка сигналов самыми разнообразными способами ровно как привязка к конкретной территории адаптивное управление частотно-временными ресурсами.

Подметим еще одно преимущество адаптивных систем обработки – сокращение влияния мешающих сигналов, попадающих в диапазоне рабочих частот. То есть практически полностью решается проблема электромагнитной совместимости, а именно появляется возможность использовать один диапазон частот для различных систем связи в общей зоне обслуживания. Вследствие этого сужаются нормы частотно-территориального разнесения систем в несколько десятков раз. В применении к фиксированным спутниковым и наземным службам уже знакомы примеры решения задач разнесения.

Таким образом, использование устройств обработки сигналов, а также средств временной, пространственной и поляризационной обработок стало важным при обеспечении требуемых ЭМС и помехоустойчивости радиоэлектронных средств (РЭС) в границах допустимых излучений.

Эксплуатация адаптивных антенных решёток делает возможным увеличение пропускной способности и устойчивости связи со случайным множественным доступом с кодовым разделением путём захвата одного из полезных сигналов. Такие методы доступа эффективны на 20–30 % за счет использования AAR, потому их можно сравнить с протоколами детерминированного доступа.

Необходимость определения пространственных координат источников излучений решается применением пространственного и поляризационного фильтров в конструкции AAR. Методами сверхразрешения реально достичь высокой точности.

В итоге, в областях применения радиосвязи использование AAR на физическом уровне воздействует на качественное функционирование элементов систем связи.

## 1 Теоретические данные об адаптивных антеннах

### 1.1 Общие сведения об адаптивных антеннах

Целью адаптивных антенн (АА) можно назвать ослабление помех с практически полным их подавлением путем регулирования формы характеристики направленности (ХН). Управление ХН адаптивной антенны возможно лишь с изменением амплитудно-фазового распределения (АФР) поля в апертуре антенны. Определить оптимальный АФР можно сравнительно простыми методами, но лишь при известном распределении сигналов в пространстве. А в условиях априорной неопределенности СПО управление АФР возможно при помощи процессора с использованием минимальной информации о сигналах и их источниках.

Совокупность сведений для работы АА, включающих в себя данные о частотных поляризационных, временных, пространственных параметрах сигналов и помех, называют опорным сигналом. С формированием минимумов ХН в направлении помеховых источников повышается отношение сигнала к помехам+шум. Поэтому, с учетом всех факторов форма ХН подстраивается к конкретной СПО. Эффективность АА увеличивается с тем, насколько хорошо подавляются помехи, т.е. или при не одинаковых углах приёма полезных сигналов и помех, или при различии их поляризационных характеристик.

Совокупность адаптивного процессора для автоизменения АФР с многоэлементной антенной называется адаптивной антенной.

Процесс адаптации включает в себя изменение параметров элементов антенно-фидерного тракта, воздействующих на АФР поля в раскрыве. Полученная из различных источников информация и данные осуществляют это самое управление. Главной целью должно быть достижение экстремума заданного показателя качества.

Одним из способов управления можно выделить изменение комплексных коэффициентов передачи каналов отдельных элементов антенной решётки (АР).

Комплексные коэффициенты передачи содержат в себе коэффициенты передачи амплитуды и фазовые сдвиги каждого из каналов. Эти коэффициенты принято

называть весовыми коэффициентами (ВК).

## 1.2 Структурная схема адаптивной антенны

На рисунке 1.2 представлена обобщенная структурная схема АА, состоящей из  $N$  элементов.

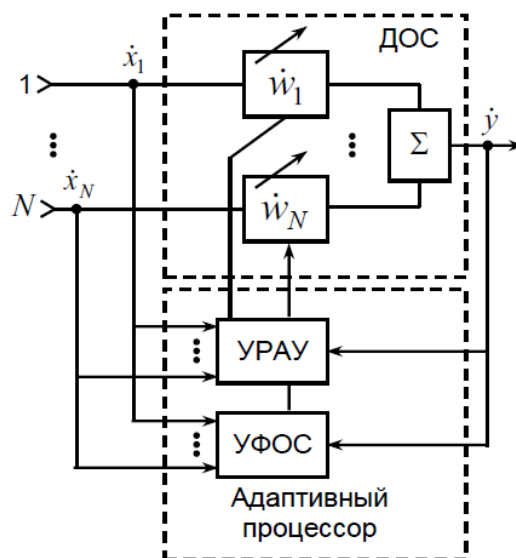


Рисунок 1.2 – Обобщенная структурная схема  $N$ -элементной адаптивной антенны

Адаптивный процессор выполняет подстройку ВК в каналах диаграммообразующей схемы (ДООС) и состоит из устройства реализации алгоритма управления (УРАУ) и устройства формирования опорного сигнала (УФОС).

Принцип работы АА следующий. На выходе каждого антенного элемента получается комплексный сигнал  $x_N$ , где  $N$  – номер элемента. Этот сигнал перемножается с соответствующим весовым коэффициентом  $w_N$  в канале ДООС и далее поступает на сумматор, который выводит результирующий сигнал  $y$ .

Для работы процессора в УФОС формируется опорный сигнал с использованием априорных данных или непосредственно сигналов  $x_N$  и  $y$ , которые присутствуют на входе антенны. По вложенному в процессор алгоритму производится обработка этих данных и создаются управляющие воздействия на ВК. До тех пор, пока выходной сигнал не достигнет заданного критерия, ВК будут подстраиваться, в чем заключается процесс адаптации. Такой процесс обеспечивается алгоритмом управления процессора.

С применением различных методов теории оптимизации возможно добиться заданного критерия качества. Но лишь один способ может лежать в основе алгоритма адаптации. Таким образом, для реальной антенны структурная схема, изображённая на рисунке 1.2, в праве не иметь в наличии какие-либо связи.

### 1.3 Структурная схема адаптивной антенной решётки

Адаптивной антенной решёткой называют многоэлементную систему приемных антенн, которая в ДН формирует «нули» или «провалы» в направлении прихода помех в соответствии со СПО.

Из-за того, что адаптивная антенна представляет собой совокупность антенных решёток и систем обработки сигналов, структурная схема ААР имеет сходства со структурной схемой АА.

На рисунке 1.3 представлена обобщенная структурная схема ААР, состоящая из ДОС и адаптивного процессора.

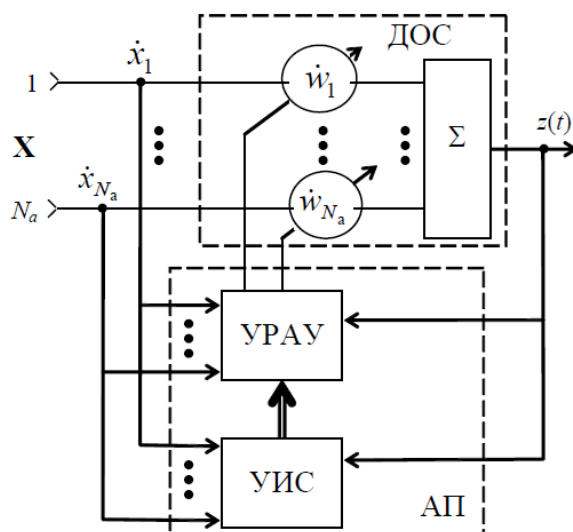


Рисунок 1.3 – Обобщенная структурная схема адаптивной антенной решётки

В отличие от структурной схемы АА адаптивный процессор состоит из УРАУ и устройства измерения параметров сигналов (УИС), но процесс работы не сильно различается.

### 1.4 Характеристики адаптивных антенных решёток

Характеристики ААР объединяют в себе особенности как АР, так и систем об-

работки. Расчет этих показателей АА и является результатом моделирования, который необходимо выполнить по теме работы.

Рассмотрим основные характеристики АА [2].

а) Нормированная ХН по напряженности поля  $F(k)$  и по мощности определяется

$$F^2(k) = F(k)F^*(k) = |F(k)|^2,$$

где  $F(k)$  – характеристика направленности АА;

$F^*(k)$  – комплексно-сопряжённая ХН АА.

б) Коэффициент подавления помех  $K_{\Pi}$  показывает, во сколько отношение мощностей помехи к шуму уменьшилось в результате адаптации:

$$K_{\Pi} = \frac{P_{\Pi}/P_{\text{ш}}}{P_{\Pi\text{а}}/P_{\text{ш\text{а}}}}, \quad (1.1)$$

где  $P_{\Pi}$  и  $P_{\Pi\text{а}}$  – мощность помех на выходе АА до и после процесса адаптации;

$P_{\text{ш}}$  и  $P_{\text{ш\text{а}}}$  – мощность шума на выходе АА до и после процесса адаптации.

в) Коэффициент выигрыша  $K_{\text{с}}$  показывает, во сколько в результате адаптации увеличилось отношение мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех и шумов:

$$K_{\text{с}} = \frac{P_{\text{с\text{а}}}/(P_{\text{ш\text{а}}}+P_{\Pi\text{а}})}{P_{\text{с}}/(P_{\text{ш}}+P_{\Pi})}, \quad (1.2)$$

где  $P_{\text{с}}$  и  $P_{\text{с\text{а}}}$  – мощность полезного сигнала на выходе АА до и после адаптации;

$P_{\text{ш}}$  и  $P_{\text{ш\text{а}}}$  – мощность шума на выходе АА до и после адаптации;

$P_{\Pi}$  и  $P_{\Pi\text{а}}$  – мощность помех на выходе АА до и после адаптации.

г) Эффективный коэффициент направленного действия (КНД) АА в заданном направлении:

$$D_{\text{а}}(k_0) = \frac{4\pi|k_0|^2}{\int_{\infty} |F(k)|^2 p(k) dk}, \quad (1.3)$$

где  $k_0$  – волновой вектор, определяющий заданное направление;

$p(k)$  – весовой коэффициент, определяющий пространственное распределение плотности потока мощности внешних источников излучения относительно изотропного поля внешних шумов.

д) Коэффициент запаса  $K_3$ :

$$K_3 = D_a(k_c) - D_{a \min}, \quad (1.4)$$

где  $D_a(k_c)$  – эффективный КНД АА в направлении полезного сигнала;

$D_{a \min}$  – минимальный допустимый эффективный КНД АА в том же направлении;

- е) Область радиосвязи  $\Omega_p$  – пространственная область, в которой КНД АА превышает заданное минимальное значение  $D_{a \min}$ .
- ж) Число степеней свободы  $M_0$  – количество управляемых ВК.
- з) Число подавляемых помех (определяется особенностями алгоритма и антенны). Максимально возможное число подавляемых помех на единицу меньше числа степеней свободы, т.е.  $M_0 - 1$ .
- и) Полоса рабочих частот – диапазон частот, в котором достигается значение коэффициента подавления помех  $K_{\Pi}$  или заданная эффективность  $K_c$ .
- к) Степень адаптации антенной решётки  $m_0$  – отношение общего числа антенных элементов  $N$  к числу степеней свободы, т.е.  $m_0 = N/M_0$ .
- л) Область потерь  $\Omega_{\Pi}$  – пространственная область, в которой после адаптации уровень КНД  $D_a(\Omega_{\Pi})$  меньше указанного минимального значения  $D_{a \min}$ .
- м) Кривая обучения – зависимость показателя качества АА от времени в процессе адаптации.
- н) Время адаптации – промежуток времени, в течение которого достигнуто указанное значение показателя качества.
- о) Число итераций – количество дискретных изменений вектора ВК в процессе адаптации, необходимое для приобретения указанного значения показателя качества.
- п) Число операций – количество элементарных математических операций, которые совершаются над массивами данных в соответствии с алгоритмом адаптации для приобретения указанного показателя качества.

Разберем некоторые особенности вышеперечисленных характеристик ААР в

процессе адаптации.

Если межэлементное расстояние превышает  $\lambda/2$ , то формирование минимумов ХН станет происходить не только в направлении прихода помехи, но и в других направлениях.

Если в ХН возникают дополнительные нули, то при совмещении одного из них с направлением полезного сигнала существенно снизится отношение сигнал/шум, что недопустимо. Поэтому расстояние между элементами не более  $\lambda/2$ .

### 1.5 Основы построения ААР для телекоммуникационной системы

Из большого множества адаптивных антенных решёток более подробно рассмотрим фазированные антенные решётки. Для удобства построения модели АР телекоммуникационной системы сузим до моделирования АР для стандарта пятого поколения.

ФАР – это система излучателей, фаза и амплитуда токов в которых подбирается так, что в силу интерференции излученных ими волн суммарное излучение формируется в виде остронаправленного луча. Направление и форма луча могут изменяться за счет подбора АФР токов в излучателях [6].

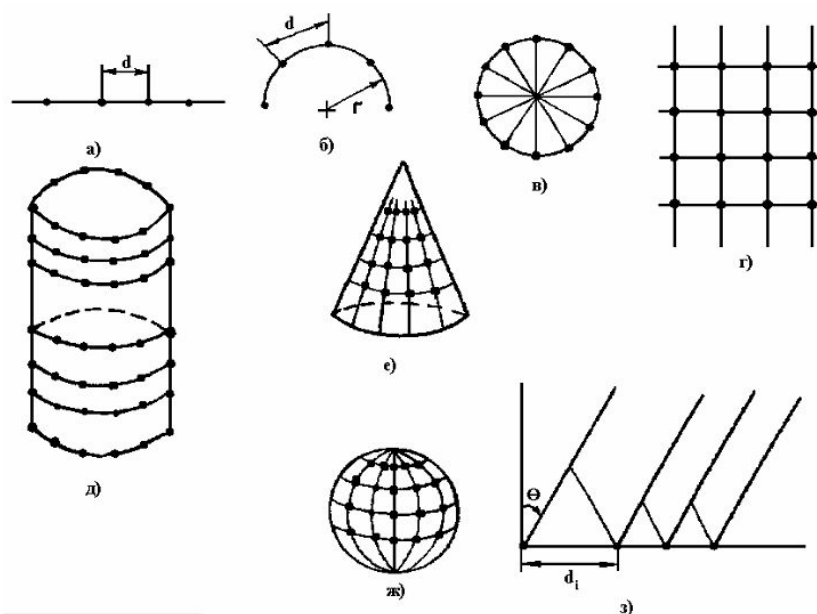
Конструкции, формы и размеры современных ФАР очень разнообразны и определяются как используемыми составными элементами, так и характером их расположения. В качестве составных элементов решётки выступают излучатели, ДН которых определяет сектор сканирования ФАР. В фокусе с быстрым широкоугольным качанием луча обычно используются слабонаправленные излучатели, например, симметричные и асимметричные вибраторы, часто с одним или более отражателями (к примеру, в виде общих для всех зеркальных проекторов); открытые концы радиоволноводов, рупорные, щелевые, спиральные, логопериодические, диэлектрические стержневые и др. антенны. Иногда из множества малых ФАР образуются крупногабаритные. Последние фокусируются на направлении главного луча по всей длине ФАР. В некоторых случаях, когда

допустимо медленное отклонение луча, в качестве излучателей используют антенны с механическим поворотом. В таких случаях расхождение луча под большой угол осуществляют через поворот всех антенн и фазирования излучаемых волн. Также можно выполнить быстрое качание луча ФАР в пределах фазирования ДН этих антенн.

По причине достижения требуемого пространственного сектора сканирования и необходимой формы ДН различают несколько вариантов взаимного расположения элементов:

- а) вдоль линии (прямой или дуги);
- б) по поверхности (плоской, цилиндрической, сферической);
- в) в заданном объёме.

На рисунке 1.4 схематически показаны возможные расположения элементов.



а) линейная; б) дуговая; в) кольцевая; г) плоская; д) цилиндрическая;  
 е) коническая; ж) сферическая; з) неэквидистантная  
 Рисунок 1.4 – Геометрия расположения элементов АР

Иногда форма излучающей поверхности фазированной антенной решётки представляет собой отверстие, определяемое конфигурацией объекта, на котором установлена ФАР. Фазированная антенная решётка с формой апертуры, похожей на форму объекта, иногда называют конформными. Распространены плоские



ФАР, у которых луч может сканировать от направления нормали к апертуре (как в синфазной антенне) до направления вдоль апертуры (как в антенне бегущей волны). КНД плоской ФАР уменьшается при отклонении луча от нормали к отверстию. Для обеспечения широкоугольного сканирования используют фары с непланарными отверстиями или системы плоских фар, ориентированных в разные стороны. Сканирование в этих системах осуществляется путем возбуждения соответственно ориентированных излучателей и их фазирования.

По характеру распределения излучателей в апертуре различают эквидистантные и неэквидистантные ФАР. В равноудаленных решётках расстояния между соседними элементами одинаковы по всему отверстию. В таких ФАР излучатели чаще всего располагаются в узлах прямоугольной или треугольной решетки, как на рисунке 1.5.

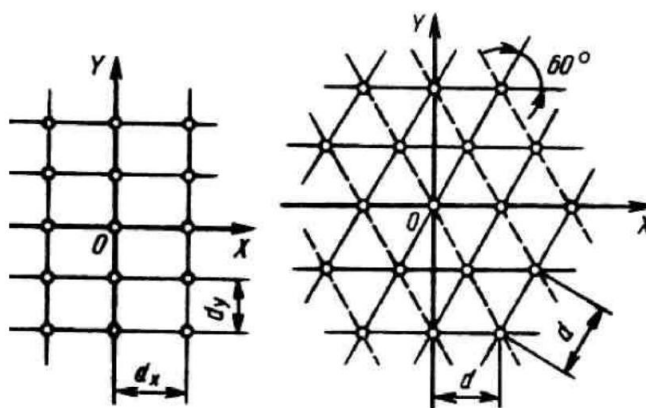


Рисунок 1.5 – Геометрия расположения излучателей

В равноудаленных ФАР расстояния между излучателями часто выбирают меньше рабочей длины волны, что позволяет формировать в секторе сканирования пучок с одним главным лепестком и низким уровнем боковых лепестков. Однако для формирования узкого пучка необходимо использовать большое количество элементов. В неэквидистантных ФАР элементы располагаются на неравных расстояниях друг от друга. В таких антенных решётках даже при большом расстоянии между соседними излучателями можно избежать паразитных лучей и получить ДН с одним главным лепестком. В случае больших отверстий это позволяет формировать очень узкий пучок с относительно

небольшим количеством элементов. Но такие неэквидистантные ФАР с большим расрывом с малым количеством излучателей имеют более высокий уровень боковых лепестков и, следовательно, более низкий коэффициент усиления по направленности, чем ФАР с большим количеством элементов. В неэквидистантных ФАР с малыми расстояниями между излучателями при равной мощности волн, излучаемых отдельными элементами, можно получить ДН с более низким уровнем боковых лепестков, чем в равноудаленных ФАР с таким же отверстием и таким же числом элементов.

### 1.6 Особенности построения ФАР

Возбуждение излучателей ФАР может происходить как при помощи фидерных линий, так и свободным распронением волн. Фидерные тракты возбуждения иногда содержат сложные электрические устройства, такие как ДЭС, которые обеспечивают возбуждение всех излучателей от нескольких входов. Поэтому в пространстве создаются соответствующие этим входам одновременно сканирующие лучи (многолучевые ФАР). Многолучевые квазиоптические ФАР состоят из нескольких облучателей с соответствующим лучем для каждого. Вышеупомянутые ФАР иногда называют пассивными.

В результате непосредственного взаимодействия излучателей между собой характеристики ФАР при качании луча изменяются. Для борьбы с вредными последствиями взаимного влияния излучателей в ФАР иногда применяют специальные методы компенсации взаимной элементной связи.

Как и антенны, ФАР имеют те же характеристики, такие как:

- а) диаграмма направленности;
- б) уровень боковых лепестков (УБЛ);
- в) коэффициент направленного действия (КНД);
- г) коэффициент усиления;
- д) излучаемая мощность;
- е) частотные свойства и др.

Для полной оценки характеристик антенной решётки создается ее математическая модель, которая описывает связь между наиболее существенными воздействиями на ФАР и ее реакциями на эти воздействия. В результате моделирования формируется структура системы и выбираются ее основные элементы. Далее следует оптимизация структуры ФАР, заключающаяся в сравнении разных вариантов этой структуры по какому-либо критерию и выбору варианта, который наиболее точно отвечает этому критерию. Эффективным средством повышения качества проектирования АР и уменьшения сроков ее реализации является использование вычислительных программ, реализующих алгоритмы моделирования различных ее узлов. В данной работе была применен пакет программных компонентов CST Microwave Studio.

## 2 Технические характеристики 5G

С течением времени увеличились запросы пользователей по использованию беспроводных технологий. Более 70 % населения планеты пользуются мобильной связью. Из них большинство пользуются доступом в сеть Интернет. Уже не секрет, что пользователи Интернета используют видео, для которого необходимы хорошее качество связи и высокая скорость передачи данных. По прогнозам в будущем количество вещей будет так или иначе подключены к сети с возможным обменом информации.

Стандарт 4G до сих пор удовлетворяет многим требованиям пользователей и распространен повсюду. Потому по миру также продолжается строительство сетей четвертого поколения. Но тем не менее уже приходит время внедрять новый стандарт связи, для которого собраны самые совершенные разработки с точки зрения коммуникаций и ИТ. Над данным стандартом еще продолжают разработки консорциумом 3GPP. На рисунке 3.1 можно увидеть различия от 1G до 5G. На сегодня остается вопрос: когда состоится полный запуск сетей 5G. Известно, что в начале 20-х годов планируется введение.



Рисунок 3.1 – Сравнение поколений сотовой связи

На рисунке 3.2 показаны сервисы и технологии, требующие 5G.



Рисунок 3.2 – Сервисы и технологии, требующие 5G

### Преимущества 5G:

#### а) Сверхвысокая скорость

Средняя скорость передачи возрастёт до 1 Гб/с из-за чего пользователям откроются большие возможности такие, как использование VR- и AR-технологий, взаимодействие с видео в формате 4K и т.д.

#### б) Увеличенное количество подключений

На 1 км<sup>2</sup> количество подключений возрастет до миллиона по причине полноценного применения интернета вещей и ни один из пользователей сети не будет ограничен другими.

#### в) Сокращение задержки и быстрый отклик

Низкая задержка до 1 мс позволит развиваться мощным роботизированным индустриям и реализовать проекты человечества, для которых важным качеством работы является скорость реагирования: телемедицина, дистанционное управление беспилотными автомобилями, тактильный интернет и другое.

#### г) Высокая энергоэффективность

С повышенной нагрузкой на устройства будут возникать повышенные риски для критических сервисов. Поэтому энергоэффективность рассматривается как основное требование.

#### д) Мобильность

На сегодняшний день в Китае и Японии смогли реализовать скорость движения до 500 км/с, а значит, 4G с ограничением до 200 км/с уже не

справляется. В этой части на пятое поколение связи возлагают большие преимущества при высоких скоростях.

Требования потребителей формируют развитие услуг мобильной связи на широкополосной основе. По оценкам, в период 2020–2030 годов ожидаемое увеличение объема трафика составит от 10 до 100 раз, а рост числа объектов и услуг, а также спрос на улучшение количества и пользовательского опыта потребуют инновационных решений. Число подключенных устройств в интернете, как ожидается, достигнет 50 миллиардов в любое время, начиная с 2025 года.

Ожидается, что ИМТ-2020 (название, используемое в международном союзе электросвязи (МСЭ) для стандартов 5G) будет продолжаться разрабатываться начиная с 2020 года, причем эксперименты 5G и предварительно коммерциализированные мероприятия уже ведутся для оказания помощи в оценке технологий кандидатов и частоты, которые могут быть использованы для этой цели. Первая полномасштабная коммерческая реализация систем 5G, как ожидается, начнется вскоре после окончательного принятия спецификаций ИМТ-2020.

МСЭ играет центральную роль в управлении радиочастотным спектром и разработке соответствующих стандартов в мире для ИМТ-2020. МСЭ работает в направлении стабильных международных правил, достаточного спектра и стандартов для ИМТ-2020 и основной сети, чтобы обеспечить успешное развертывание 5G на региональном и международном уровнях. На Всемирной конференции радиосвязи МСЭ 2019 года (ВКР–19) глобальные акционеры пришли к консенсусу относительно определения другого спектра для ИМТ-2020.

5G намерена ускорить достижение всех существующих целей в области развития, исходя из разумной и нулевой потребности в энергии.

### *Развитие сетей 5G в мире*

В середине ноября 2019 года больница Бирмингемского университета впервые начала использовать сети 5G для диагностического пульта дистанционного управления. Новые возможности медицинского центра были

продемонстрированы на публичной выставке, во время которой использовался манекен, находящийся в машине скорой помощи, пока врач находился на станции.

Важный шаг в развитии технологий 5G был сделан в Швейцарии 31 октября 2019 года. В этот день была успешно выполнена первая активация беспроводной передачи данных через динамический диапазон спектра в сети 5G. Об этом было объявлено 15 ноября 2019 года компанией Qualcomm in the technology, которая участвовала в этом мероприятии вместе с Ericsson и Swisscom.

24 октября 2019 года было объявлено, что в Казахстане запущена первая коммерческая сеть пятого поколения (5G). Её в Нур-Султан развернул «Казахтелеком».

9 июля 2019 года Huawei объявила о технологическом эксперименте iFIT с 5G компанией Beijing Unicom. Решение iFIT увеличивает скорость восстановления после сбоя, позволяя Unicom построить интеллектуальную транспортную сеть 5G, используя такие функции, как уровень измерения потока на миллисекундном уровне, сеть мониторинга качества во времени с соглашениями об уровне обслуживания и второй уровень местоположения, который трудно обнаружить.

В середине января 2020 года Китай запустил спутник 5G связи Yinhe-1 на низкую орбиту Земли.

Компании ABB и Ericsson вместе со швейцарским оператором связи впервые продемонстрировали в качестве мобильных сетевых технологий пятого поколения простое и эффективное управление роботами на расстоянии в режиме реального времени.

14 июня 2019 года появились прогнозы, что к концу 2024 года по всему миру ожидается 1,9 миллиона абонентских подключений к сети 5G. Эта цифра составляет на 400 миллионов подключений, или 27 % выше прогноза, приведенного в ежегодном отчете, опубликованном Ericsson в ноябре 2018 года.

Также Ericsson обновил данные, что 45% мирового населения будет жить в зоне покрытия 5G к концу 2024 года. В то же время этот характер может возрасти

до 65% за счет использования технологии частотного обмена, которая позволяет развернуть LTE.

В мае 2020 года Huawei и China Mobile Communications запустили станцию 5G с Эвереста, установив мировой рекорд по высоте базовой станции над уровнем моря.

22 мая 2020 года было объявлено, что компания А1 запустила сеть 5G Standalone. Это первая полноценная сеть 5G в Беларуси, построенная на основе автономной архитектуры.

### *Развитие сетей 5G в России*

В Минкомсвязи было отмечено, что для миллиметрового диапазона было установлено более 10 ГГц. Гармонизация диапазона 4,8 ... 4,99 ГГц ускорит работу над стандартной сетью IMT-2020.

В России ресурс 4,8-4,99 ГГц имеет минимальную загрузку от государственных систем, что позволяет поддерживать преобразование спектра для стандарта сети пятого поколения.

В конце ноября 2019 года крупнейшие российские операторы мобильной связи провели тестирование сетей 5G в диапазонах 25,25–27,5 ГГц и 4,9 ГГц. Однако эти полосы могут быть использованы только в качестве расширения 3,4–3,8 ГГц, о чем ранее предупреждали медиакомпании.

Дефицит частот было предположено решить проблему отключением WiMAX и вывода спутниковых станций из крупных городов. В то же время эту же связь используют и спецслужбы.

В начале февраля 2020 года стало известно сотрудничество компании «Глобалинформсервис» (ГИС) и концерна «Созвездие» для совместной разработки оборудования для сетей 5G.



### 3 Параметры излучателя и общие сведения о расчёте

#### 3.1 Выбор типа излучателя

Излучатель является основной элементной составляющей антенной системы БС, который должен удовлетворять основным требованиям:

- а) требуемая диапазонность;
- б) ДН необходимой ширины в горизонтальной плоскости;
- в) минимальные размеры с достаточной механической прочностью креплений.

В соответствии с последним критерием был выбран излучатель Вивальди, представляющий собой диэлектрическую подложку с нанесенным слоем металлизации в форме раскрыва на одной стороне.

На рисунке 3.1 показан вид антенны Вивальди с функциональными зонами.

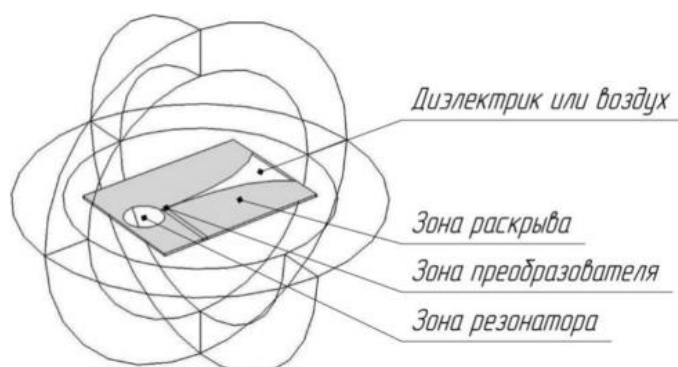
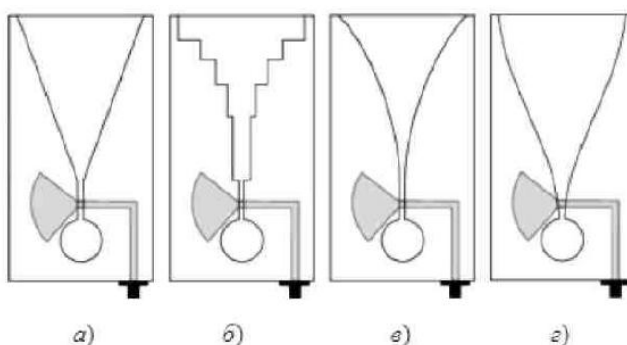


Рисунок 3.1 – Излучатель Вивальди

На практике применяются различные формы раскрывов (см. рисунок 3.2).



- а) линейная; б) ступенчатая; в) экспоненциальная; г) Клопфестена

Рисунок 3.2 – Формы раскрывов антенны Вивальди

Кроме малых размеров к микрополосковым излучателям также предъявляется

требование согласования по входу во всем диапазоне рабочих частот. В идеале излучающий элемент должен быть полностью согласован с источником возбуждения в заданной полосе рабочих частот. Рассогласование приводит к снижению усиления реальной антенны. Таким образом, стоит уделить внимание вопросы оптимизации коэффициента отражения.

### 3.2 Расчёт излучателя

Для моделирования элемента типа «Вивальди» будем использовать диэлектрик фирмы ARLON.

Слоистые материалы Arlon с пассивной интермодуляцией (PIM) представляет собой серию тканых армированных стекловолокном тефлоновых (PTFE) композитных материалов, предназначенных для использования в качестве печатных ламинатов. Они были разработаны для уменьшения вклада базового ламината в потери и искажения пассивной интермодуляции в готовых микроволновых конструкциях, например, антеннах и фильтрах.

Это сокращение является результатом оптимизации границы раздела между медью и ламинатом, в частности, контроля морфологии и обработки поверхности меди, а также конструкции и обработки ламината. В результате получился ряд материалов, демонстрирующих снижение PIM до 20 дБ как при микрополосковых испытаниях, так и в готовых антеннах по сравнению со стандартными ламинатами. Типичные значения, достигаемые с использованием ламинатов PIM с пониженным содержанием арлона, составляют -155 дБ или выше.

Из серии диэлектриков Arlon AD300 более подходящим выбираем AD PIM 300, характеристики которого приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики Arlon AD300

Наименование	AD PIM 300
Производитель	Arlon
$f_{min}$ , ГГц	4
Толщина основания, мкм	787,4
Относительная разрешающая способность	2,2

Arlon AD300 – это коммерческий ламинатный материал СВЧ и РЧ третьего поколения, разработанный с низкими диэлектрическими потерями, низкой стоимостью и отличными характеристиками. Этот композитный материал с армированным керамическим покрытием из армированного стекловолокна PTFE построен на экономически выгодной конструкции с уникальным химическим составом и обработкой, чтобы предложить разработчикам радиочастотных и микроволновых технологий преимущество в улучшении электрических и механических характеристик без дополнительных затрат, традиционно связанных с более высокой производительностью. AD300 обеспечивает значительное улучшение стоимости и производительности по сравнению с другими традиционными ламинатами из фторполимерного стекла.

AD300 идеально подходит для антенн базовых станций и усилителей мощности базовых станций, где критически важны низкие потери и PIM. Другие ключевые характеристики включают низкое влагопоглощение, самый низкий в классе TCEr и очень низкое STE<sub>huz</sub>, высокую прочность на отслаивание меди, а также хорошую размерную и термическую стабильность. Его диэлектрическая постоянная и более жесткий допуск желательны для достижения высокой эффективности антенны и большой полосы пропускания, а также обеспечивают небольшую степень миниатюризации, которая имеет решающее значение для ограничений размера некоторых конструкций антенн. Его самый низкий в своем классе TCEr помогает конструкциям антенн поддерживать высокий коэффициент усиления и характеристики антенны в более широких диапазонах рабочих температур, сводя к минимуму сдвиг резонансной частоты и уменьшение полосы пропускания при колебаниях температуры.

Расчет излучателя Вивальди сложен без применения пакетных программ, используемых для моделирования СВЧ устройств и антенн. По нижеприведенной методике возможно рассчитать лишь приблизительно. Эта методика [4] заключается в следующем:

- определить длину излучателя как антенну бегущей волны и максимальное значение длины щели в соответствии с характеристиками направленности.
- отобразить форму раскрытия излучателя.
- провести аппроксимацию щели.
- после рассчитать ДН одного элемента, образующих антенну вивальди.
- получить поля излучений каждого элемента антенной системы излучателя после аппроксимации.
- суммируя эти единичные поля, получить поле, излучающее от всей системы.
- по методу расчёта ДН антенной решетки вычислить ДН исследуемой антенной системы излучателей вивальди.
- с учетом взаимодействий составляющих решётки, т.е. излучателей, определить характеристики полученной системы.

### 3.3 Расчёт геометрических параметров антенны

Из большого разнообразия видов ФАР более распространены плоские и линейные. Из них большинство плоских ФАР состоит из одинаковых излучателей, находящихся в узлах координатной сетки.

Предполагается, что ДН излучателя не отличается от ДН изолированного излучателя. Возбуждение излучателей при остронаправленном излучении гарантирует синфазное сложение полей в указанном направлении и зависит от координат излучателя в решётке:

$$\Phi_{nq}(\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}}) = -k \cdot (x_{nq} \cdot \cos(\varphi_{\text{гл}}) + y_{nq} \cdot \sin(\varphi_{\text{гл}})) \cdot \sin(\theta_{\text{гл}}), \quad (3.1)$$

где  $k$  – волновое число;

$x_{nq}, y_{nq}$  – координаты излучателей;

$\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}}$  – углы сферической системы координат, определяющие направление главного луча в пространстве.

Предположив, что решётка состоит из идентичных излучателей, характеристика направленности  $f(\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}})$  представляется в виде произведения

характеристики направленности изолированного излучателя  $F(\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}})$  на множитель решётки  $F_e(\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}})$ :

$$f(\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}}) = F(\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}}) \cdot F_e(\theta_{\text{гл}}, \varphi_{\text{гл}}). \quad (3.2)$$

Амплитудное распределение отбирается из уровня боковых лепестков (УБЛ), воспользовавшись таблицей 3.2 [5].

Таблица 3.2 – Характеристики излучения при различных законах распределения поля для антенн с непрерывным распределением излучателей

		Амплитудное распределение		Диаграмма направленности (u)			
1		2		3			
$\xi = \frac{2x}{L}; u = \left(\frac{kL}{2}\right) \sin \theta$ (прямоуг.)	1		$\sin u/u$				
	$1 - (1 - \Delta) \cdot \xi^2$		при $\frac{3}{2 + \Delta} \left[ \Delta \frac{\sin u}{u} - 2(1 - \Delta) \frac{\cos u}{u^2} + 2(1 - \Delta) \frac{\sin u}{u^2} \right]$ $v = \frac{5}{38 + 4\Delta + 3\Delta^2} (2 + \Delta)^2$				
	$\Delta + (1 - \Delta) \cos \frac{\pi \xi}{2}$		при $\left[ (1 - \Delta) \frac{2}{\pi} + \Delta \right]^{-1} \left[ \Delta \frac{\sin u}{u} + \frac{\pi}{2} (1 - \Delta) \frac{\cos u}{\pi^2/4 - u^2} \right]$ $v = \left[ (1 - \Delta) \frac{2}{\pi} + \Delta \right]^2 \left[ \frac{(1 - \Delta)^2}{2} + \frac{4}{\pi} (1 - \Delta) + \Delta^2 \right]^{-1}$				
$\Delta$	n	$2\theta_{0,5}$ , град	$2\theta_0$ , град	Огибающая боковых лепестков ДН $F_{or}(u)$		УБЛ, дБ	КИП, $\nu$
4	5	6	7	8		9	10
–		$50,8 \frac{\lambda}{L}$	$114,8 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{1}{u}$		-13,3	1
0,5		$55,6 \frac{\lambda}{L}$	$113,2 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{0,6}{u}$		-17,1	0,97
0,316		$57,3 \frac{\lambda}{L}$	$141 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{0,409}{u}$		-19	0,935
0,1		$62,5 \frac{\lambda}{L}$	$156 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{0,143}{u}$		-21	0,872

Продолжение таблицы 3.2

$\Delta$	n	$2\theta_{0,5}$ , град	$2\theta_0$ , град	Огибающая боковых лепестков ДН $F_{or}(u)$	УБЛ, дБ	КИП, $\nu$
4	5	6	7	8	9	10
0		$65,9 \frac{\lambda}{L}$	$163,8 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{3}{u^2}$	-21,3	0,833
0,5		$55,6 \frac{\lambda}{L}$	$132 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{0,611}{u}$	-17,6	0,966
0,316		$58,4 \frac{\lambda}{L}$	$144 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{0,42}{u}$	-20	0,935
0,1		$63 \frac{\lambda}{L}$	$162 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{0,149}{u}$	-22,4	0,874

В нашем случае УБЛ=-13,5 дБ.

По таблице 3.2 наиболее подходит распределение:

$$1 - (1 - \Delta) \cdot \xi^2. \quad (3.3)$$

Для выбранного амплитудного распределения заданы следующие параметры:

$$\xi = \frac{2x}{L}, \quad (3.4)$$

$$u = \left(\frac{kL}{2}\right) \sin \theta, \quad (3.5)$$

$$F = \frac{3}{2+\Delta} \left[ \Delta \frac{\sin u}{u} - 2(1 - \Delta) \frac{\cos u}{u^2} + 2(1 - \Delta) \frac{\sin u}{u^2} \right], \quad (3.6)$$

при

$$\nu = \frac{5}{3} \frac{(2+\Delta)^2}{8+4\Delta+3\Delta^2}, \quad (3.7)$$

где  $\Delta = 0$ ,

$$2\theta_{0,5} = 50,8 \frac{\lambda}{L}, \quad (3.8)$$

$$2\theta_0 = 114,8 \frac{\lambda}{L}, \quad (3.9)$$

$$F_{or} = \frac{1}{u}, \quad (3.10)$$

$$\text{УБЛ} = 13,3 \text{ дБ},$$

$$\nu (\text{КИП}) = 1.$$

В соответствии с формулой 3.8 рассчитаем размер апертуры:

$$L = 50,8 \frac{\lambda}{2\theta_{0,5}}. \quad (3.11)$$

Так как ведём расчёт на два частотных диапазона, то

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{300 \cdot 10^6}{4,47 \cdot 10^9} = 0,067 \text{ м}, \quad (3.12)$$

$$\lambda_2 = \frac{c}{f_2} = \frac{300 \cdot 10^6}{6,175 \cdot 10^9} = 0,0486 \text{ м}, \quad (3.13)$$

Тогда для каждого диапазона размер апертуры равен:

$$L_1 = 50,8 \cdot \frac{0,067}{6} = 0,567 \text{ м}, \quad (3.14)$$

$$L_2 = 50,8 \cdot \frac{0,0486}{6} = 0,412 \text{ м}, \quad (3.15)$$

Найдем расстояние между излучателями:

$$d = \frac{\lambda}{2}, \quad (3.16)$$

$$d_1 = \frac{0,067}{2} = 0,0335 \text{ м}, \quad (3.17)$$

$$d_2 = \frac{0,0486}{2} = 0,0243 \text{ м}, \quad (3.18)$$

По формуле 3.19 вычислим минимальное количество излучателей.

$$N = \frac{L}{d}, \quad (3.19)$$

$$N_1 = \frac{0,567}{0,0335} = 16,9 \approx 17, \quad (3.20)$$

$$N_2 = \frac{0,412}{0,0243} = 16,9 \approx 17, \quad (3.21)$$

Теперь можно найти мощности, подводимые к каждому излучателю.

$$A(x) = 1 - (1 - \Delta) \cdot \xi^2, \quad (3.22)$$

$$\xi = \frac{2x}{L}, \quad (3.23)$$

где  $x$  – вектор координат:

$$x = nd - \frac{L}{2}, \quad (3.24)$$

где  $n$  – порядковый номер излучателя;

$d$  – расстояние между излучателями;

$L$  – размер апертуры.

В соответствии с частотными диапазонами составили таблицы 3.3 и 3.4, где получили зависимости подводимой мощности к координате каждого излучателя.

Таблица 3.3 – Значения мощностей для каждого излучателя при 4,47 ГГц

$n$	$x$	$\xi$	$A(x)$
0	-0,25	-0,8818	0,2224
1	-0,2165	-0,7637	0,4168
2	-0,183	-0,6455	0,5833
3	-0,1495	-0,5273	0,7219
4	-0,116	-0,4092	0,8326
5	-0,0825	-0,2910	0,9153
6	-0,049	-0,1728	0,9701

Продолжение таблицы 3.3

$n$	$x$	$\xi$	$A(x)$
7	-0,0155	-0,0547	0,9970
8	0,018	0,0635	0,9960
9	0,0515	0,1817	0,9670
10	0,085	0,2998	0,9101
11	0,1185	0,4180	0,8253
12	0,152	0,5362	0,7125
13	0,1855	0,6543	0,5719
14	0,219	0,7725	0,4033
15	0,2525	0,8907	0,2067
16	0,286	1,0088	-0,0177

Таблица 3.4 – Значения мощностей для каждого излучателя при 6,175 ГГц

$n$	$x$	$\xi$	$A(x)$
0	-0,1817	-0,8820	0,2220
1	-0,1574	-0,7641	0,4162
2	-0,1331	-0,6461	0,5825
3	-0,1088	-0,5282	0,7211
4	-0,0845	-0,4102	0,8317
5	-0,0602	-0,2922	0,9146
6	-0,0359	-0,1743	0,9696
7	-0,0116	-0,0563	0,9968
8	0,0127	0,0617	0,9962
9	0,037	0,1796	0,9677
10	0,0613	0,2976	0,9115
11	0,0856	0,4155	0,8273
12	0,1099	0,5335	0,7154
13	0,1342	0,6515	0,5756
14	0,1585	0,7694	0,4080
15	0,1828	0,8874	0,2126
16	0,2071	1,0053	-0,0107

Для наглядности полученных расчётов сопоставим обе зависимости на рисунке 3.1.



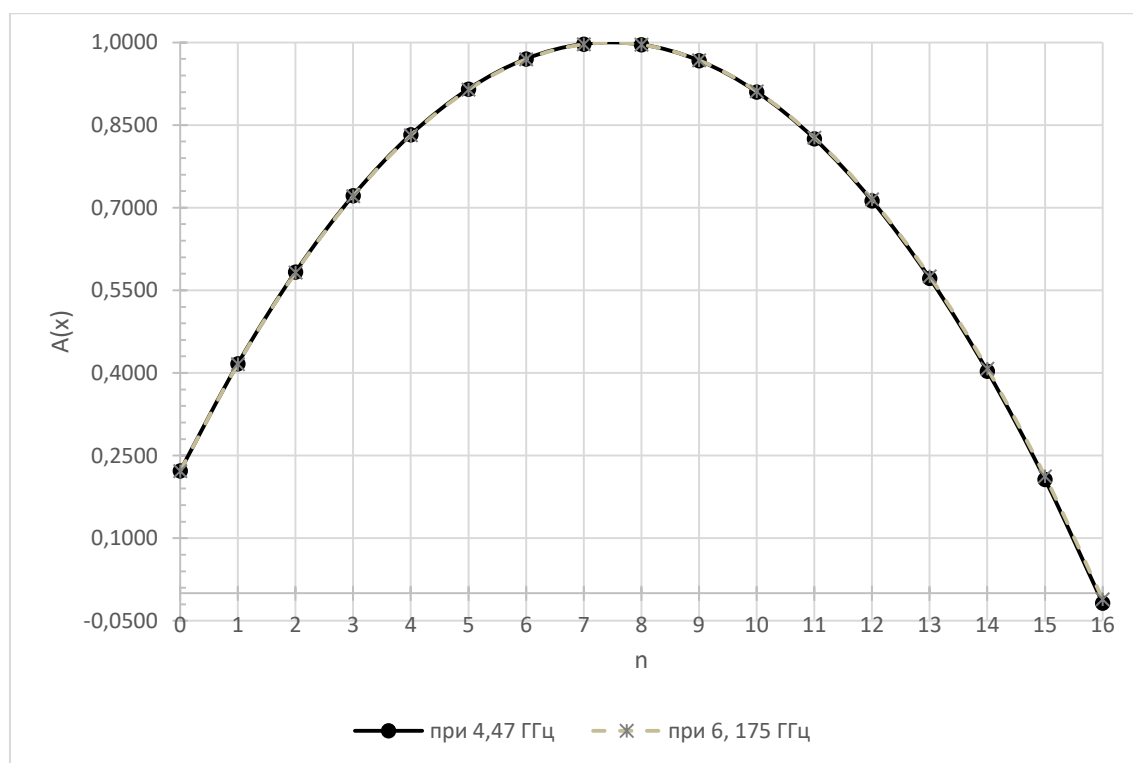


Рисунок 3.1 – Зависимость подводимой мощности к порядковому номеру излучателя для двух диапазонов частот

### 3.4 Создание модели излучателя

Для создания модели излучателя Вивальди воспользовались программной средой CST Microwave Studio (CST MWS) совместно с Antenna Magus, которые являются основными пакетами для проектирования антенн CST STUDIO SUITE.

CST MWS предназначена для быстрого и точного численного моделирования высокочастотных устройств (антенны, фильтры, силовые пары, плоские и многослойные структуры), а также анализа целостности сигнала и проблем электромагнитной совместимости по времени и частоте с использованием прямоугольной или тетраэдральной сеток разбиения. Среди возможностей программы можно выделить вычислители во временной и частотной областях, инструменты для проведения планарного 3D-моделирования и синтеза планарных фильтров и параметров резонансных фильтров. Данная программа полностью интегрирована в систему CST Studio Suite, что не создает трудностей в работе.

Антенна Magus предназначена для проектирования и визуализации различных

типов антенн, содержит в себе обширную базу данных различных антенн, из которой правильная модель может быть выбрана и экспортирована в CST STUDIO SUITE, где выполняется работа.

В данной работе излучатель Вивальди представляет собой трехслойную структуру, которая подробно представлена на рисунке 3.2.

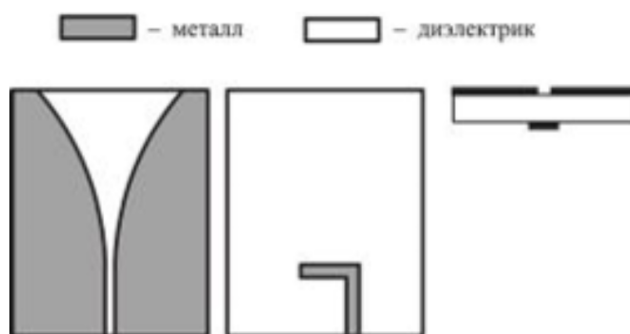


Рисунок 3.2 – Структура излучателя Вивальди

Нижний слой состоит из элементов излучателя. Средний слой – диэлектрическая подложка. Верхний слой представляет собой металлизацию в форме раскрыва антенны.

В отличие от большинства сверхвысокочастотных печатных плат для излучателя Вивальди наилучшим вариантом питания будет волоконно-щелевая линия. Но стоит учитывать, что переход между этой линией и антенной должен иметь малые потери и размеры. В этом случае применяется параллельно полосковая линия, которая делает возможным отсутствие согласующего отверстия. Также важное условие – длина перехода лежит в пределах  $3 \dots 5\lambda$  во избежание появления неоднородностей.

При моделировании антенны учитываем факторы:

- направленность антенны зависит от её длины;
- ширину апертуры оставляют минимально необходимой из-за своей незначительности;
- нижняя частота зависит от размеров антенны и крутизны экспоненты.

Компьютерное моделирование излучателя Вивальди начинаем с определения размеров через программу Antenna Magus. Полученные данные занесены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Размеры излучателя

Наименование	Обозначение	Значение
высота факела	Hf, мм	41,22
длина факела	Lf, мм	78,7
высота проводника	Hc, мм	52,46
диаметр полости	Dc, мм	5,576
длина микрополоскового соединителя	Lmc, мм	5,576
ширина микрополоскового соединения	Wmc, мм	$690,6 \cdot 10^{-3}$
расстояние от полости до центра микрополоскового соединителя	Smc, мм	$345,3 \cdot 10^{-3}$
длина конической микрополосковой линии	Lmt, мм	12,05
ширина микрополосковой линии	Wmt, мм	1,979
	Ls, мм	$690,6 \cdot 10^{-3}$
ширина щелевой раковины	Ws, мм	$268,8 \cdot 10^{-3}$
радиус микрополосковой заглушки	Rs, мм	4,372
начальный угол микрополосковой заглушки	$\theta_s$ , градусы	90°
угол микрополосковой заглушки	$\theta$ , градусы	80°
высота подложки	Hs, мм	$787,4 \cdot 10^{-3}$
диэлектрическая проницаемость	$\epsilon_r$	3
коэффициент касания подложки	$tg \delta$	0
фактор, определяющий скорость открытия вспышки	Ft, нс	40
координата	X, мм	91,09
координата	Y, мм	52,46
координата	Z, мм	$787,4 \cdot 10^{-3}$

По полученным конструкционным характеристикам строим модель излучателя Вивальди в программе CST MWS со следующими параметрами подложки:

- диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 2,2$ ;
- размер  $52,46 \times 91,09$  мм;

- толщина 0,787 мм.

На рисунке 3.3 видим полученную модель излучателя Вивальди.

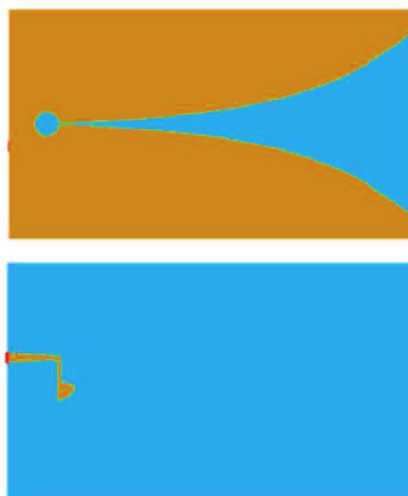


Рисунок 3.3 – Модель излучателя Вивальди

Для обеспечения согласования определяем размеры порта через встроенную функцию, окно которой показана на рисунке 3.4.

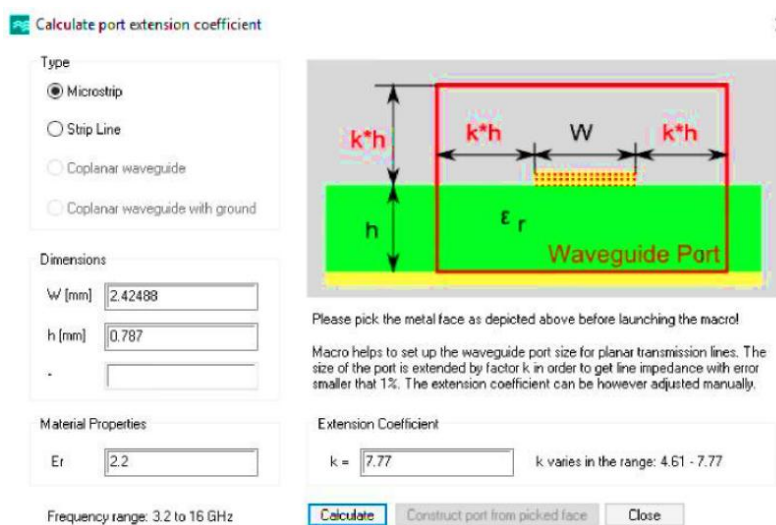


Рисунок 3.4 – Калькулятор расширения порта

Для определения работоспособности полученной антенны воспользуемся основными характеристиками:

- коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН);
- коэффициент отражения;
- диаграмма направленности;
- входное напряжение.

Построение модели велось в границах от 4 до 8 ГГц, но с акцентом для двух

диапазонов, в которых предполагается использование 5G:

4,44 – 4,5 ГГц

5,925 – 6,425 ГГц.

Уровень согласования антенны определяется по соотношению  $|S_{11}| \leq 0,25$ . Для каждого диапазона частот это условие выполняется, что видно на рисунке 3.5.

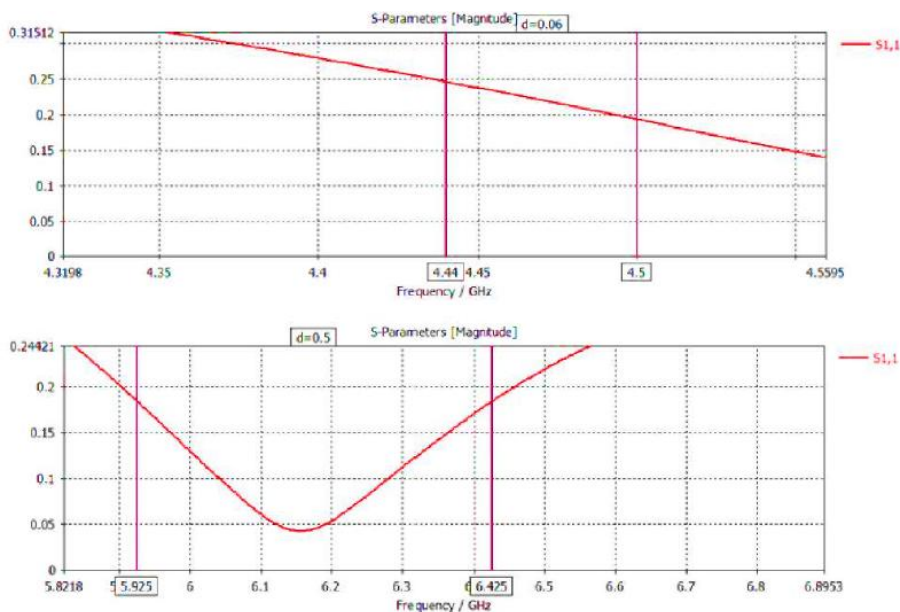


Рисунок 3.5 – Коэффициент отражения

КСВН излучателя Вивальди не превышает значения 2 для каждого диапазона (рисунок 3.6).

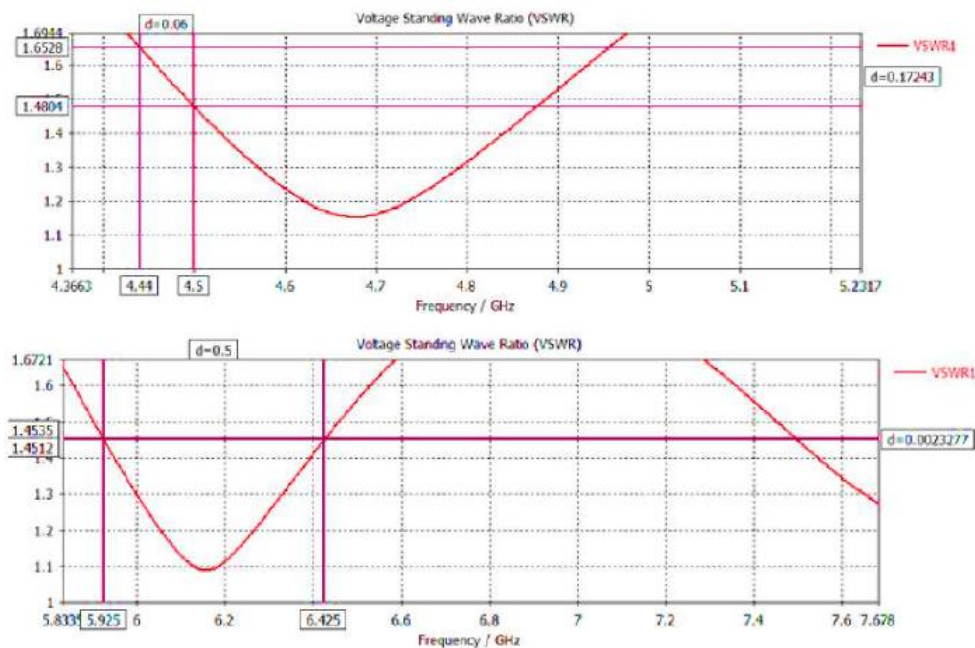


Рисунок 3.6 – Коэффициент стоячей волны по напряжению

При моделировании использовали порт со входным импедансом равным 50 Ом. Величина входного импеданса показана на рисунке 3.7, а именно около 48,7 Ом.

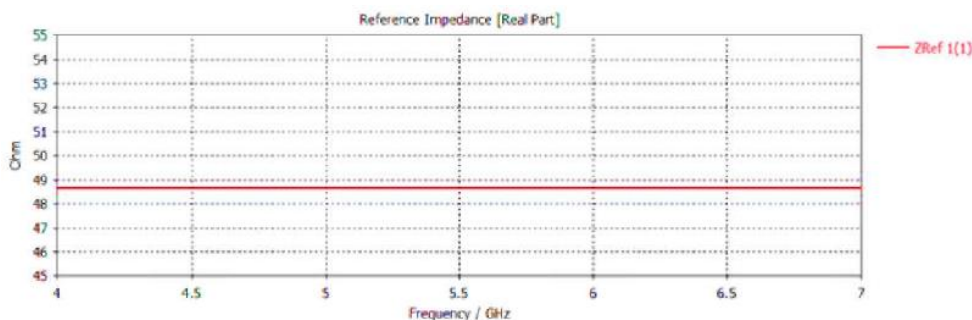


Рисунок 3.7 – Входной импеданс излучателя

### 3.5 ДН излучателя

После получения согласования получили ДН для двух диапазонов частот:

$$f_0 = \frac{f_{min} + f_{max}}{2} \quad (3.25)$$

$$f_{01} = \frac{(4,44 + 4,5) \cdot 10^9}{2} = 4,47 \text{ ГГц} \quad (3.26)$$

$$f_{02} = \frac{(5,925 + 6,425) \cdot 10^9}{2} = 6,175 \text{ ГГц} \quad (3.27)$$

На рисунках 3.8 и 3.9 показаны графики в формате 3D.

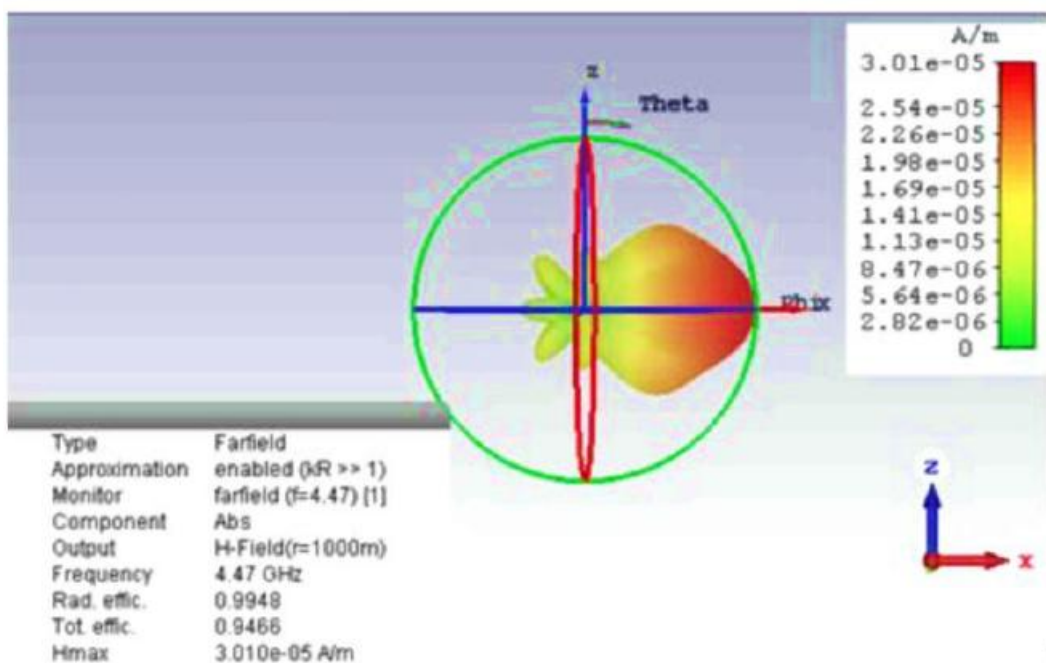
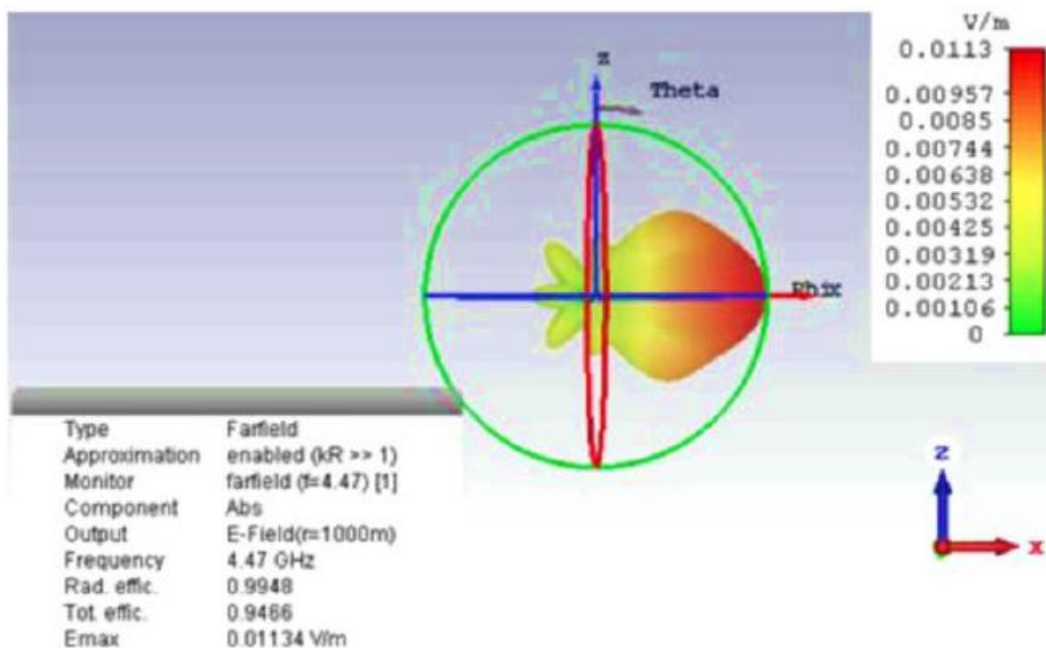


Рисунок 3.8 – Модель ДН в Е и Н плоскостях на частоте 4,47 ГГц

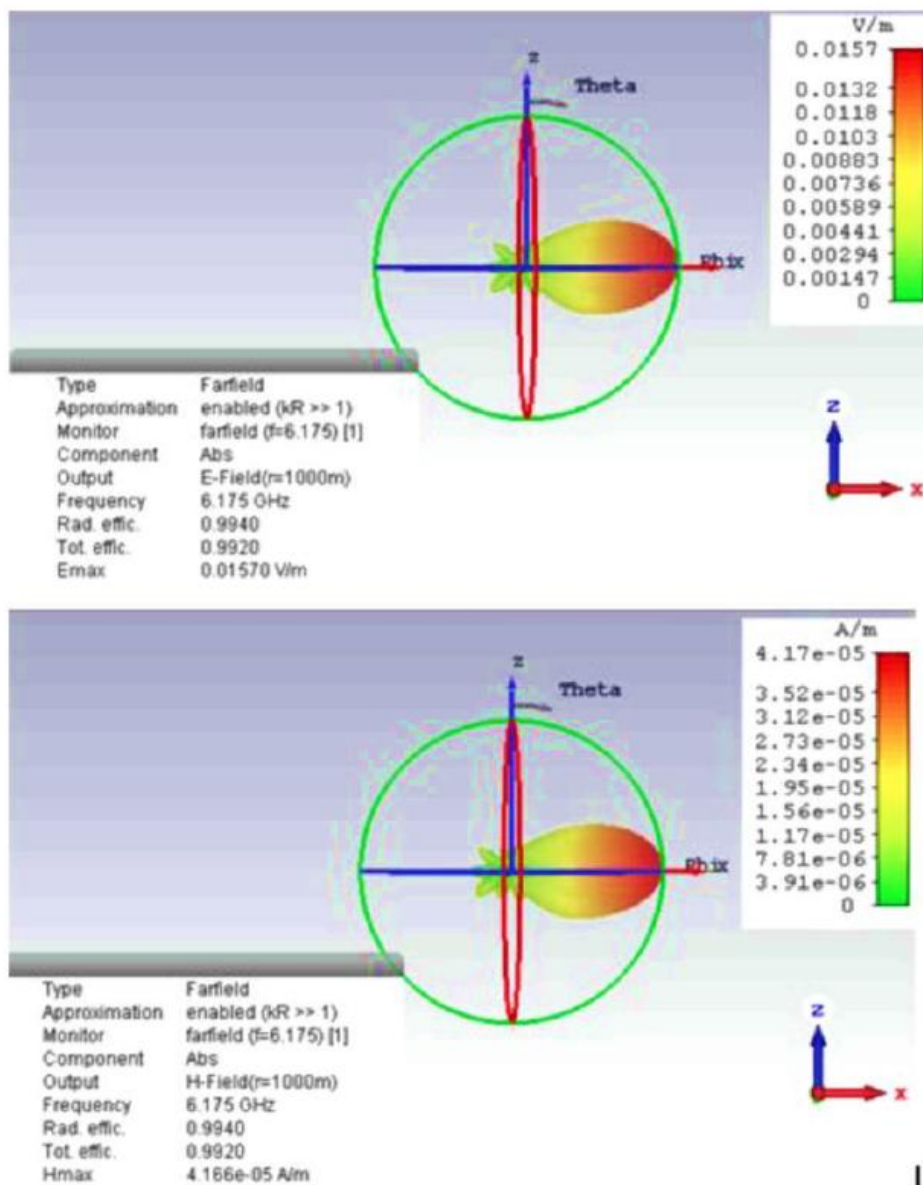


Рисунок 3.9 – Модель ДН в E и H плоскостях на частоте 6,175 ГГц

На рисунках 3.10–3.13 показаны ДН в плоскостях H и E для разных диапазонов. Как результат по графикам видно, что с увеличением частоты уменьшается ширина главного лепестка.

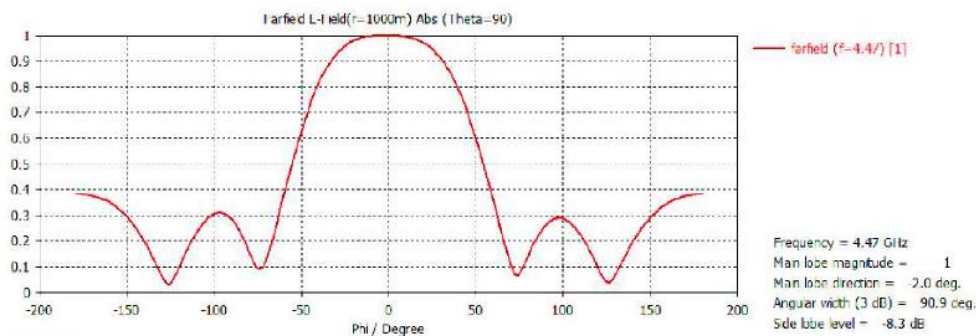


Рисунок 3.10 – ДН излучателя Вивальди в плоскости E на 4,47 ГГц



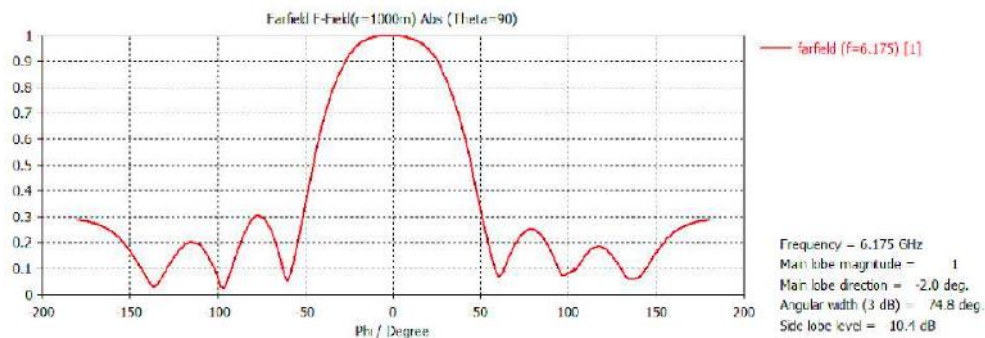


Рисунок 3.11 – ДН излучателя Вивальди в плоскости E на 6,175 ГГц

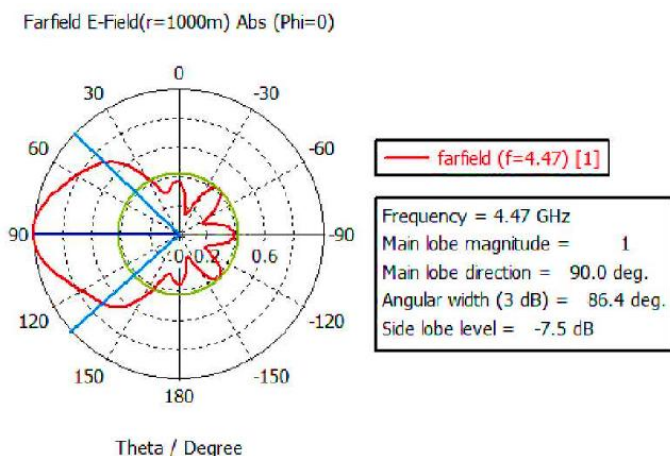


Рисунок 3.12 – ДН излучателя Вивальди в плоскости H на 4,47 ГГц

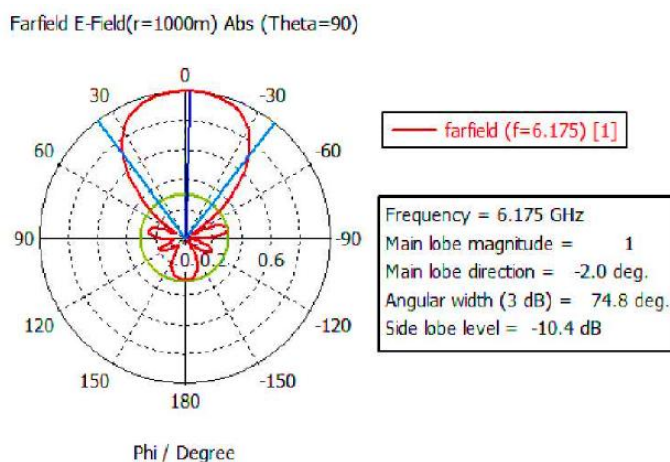


Рисунок 3.13– ДН излучателя Вивальди в плоскости H на 6,175 ГГц

## 4 Модель ФАР

По сравнению с одиночными излучателями АР имеют преимущества, такие как возможность управления ДН и повышение усиления антенны. Также в микрополосковом исполнении АР проста в конструкции и изготовлении и имеет низкую себестоимость. По всему вышеизложенному материалу как теоретической, так и практической частей наибольшим потенциалом обладают антенны Вивальди, поэтому моделирование ААР заключается в сравнительном анализе характеристик одиночных излучателей. В подразделе 4.2 были определены геометрические параметры антенн Вивальди для обоих рассматриваемых диапазонов частот. Так как было высчитано, что необходимо использовать 17 излучателей в ФАР, то в среде моделирования CST MWS выбираем общий вид модели решётки, изображенный на рисунке 5.1. Из всех вариантов различия будут только в расстоянии между излучателями и, следовательно, в общей длине решётки.

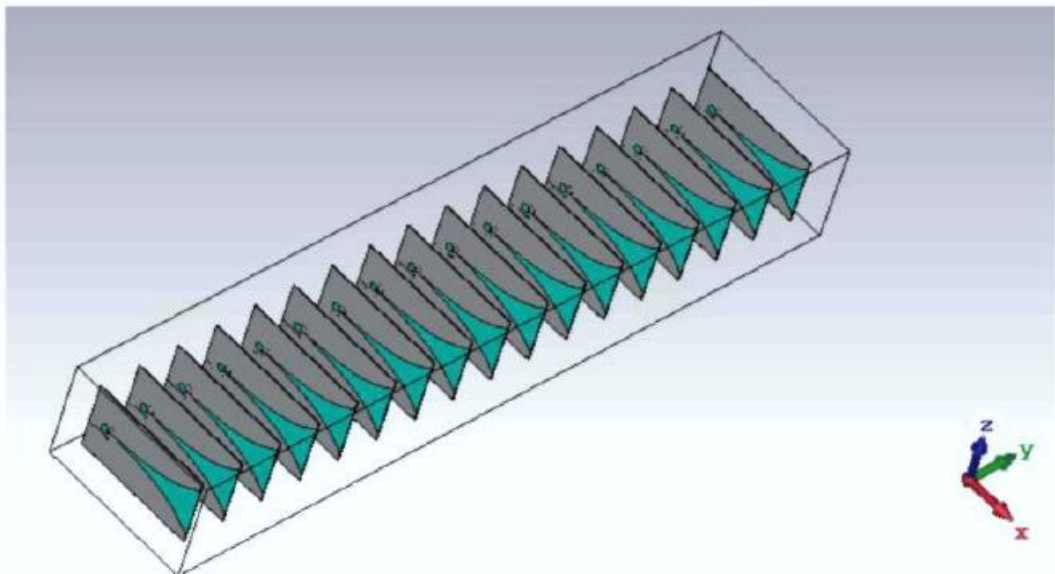


Рисунок 4.1 – Общий вид ФАР

### 4.1 ДН ФАР

В процессе моделирования ФАР были получены ДН антенны и коэффициент усиления. По рисункам 4.2–4.7 можно рассмотреть результаты получения ДН для

двух диапазонов на центральных частотах: 4,47 ГГц и 6,175 ГГц.

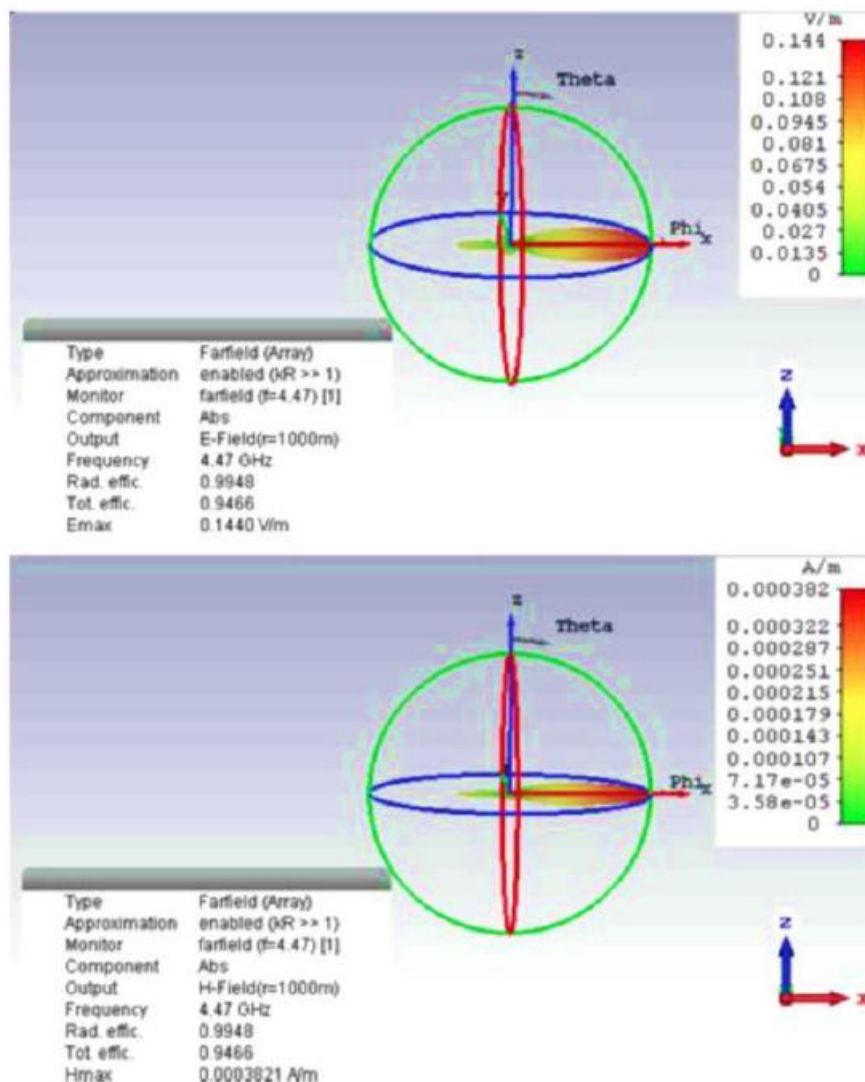


Рисунок 4.2 – ДН антенны в E и H плоскостях на 4,47 ГГц

Farfield (Array) E-Field(r=1000m) Abs (Phi=90)

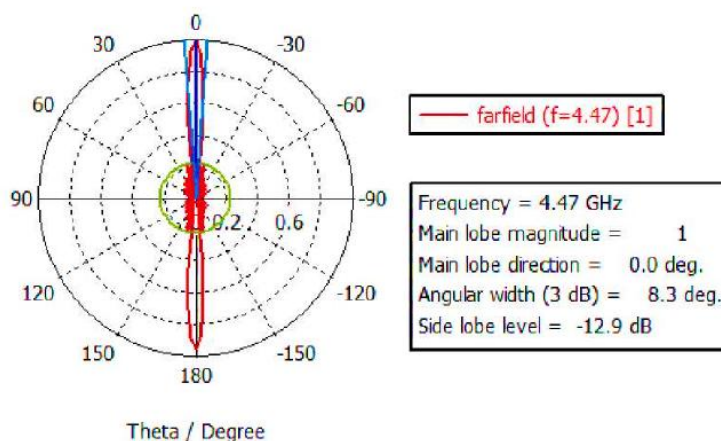


Рисунок 4.3 – ДН антенны в H плоскости на 4,47 ГГц

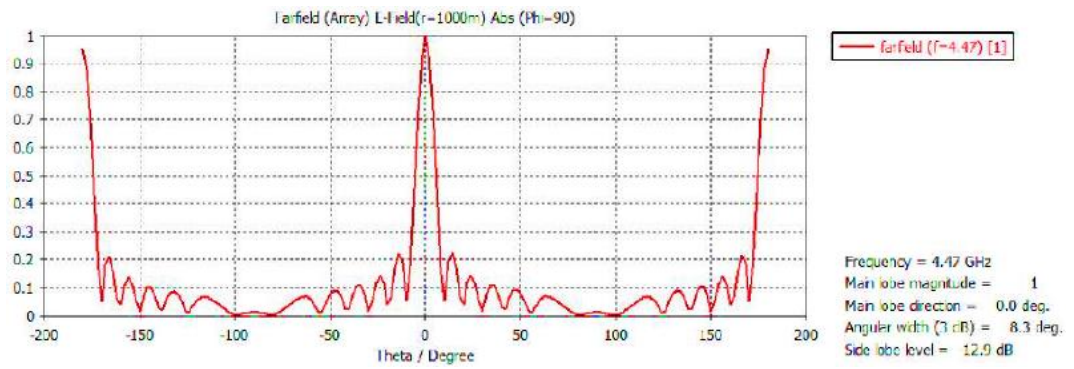


Рисунок 4.4 – ДН антенны в Е плоскости на 4,47 ГГц

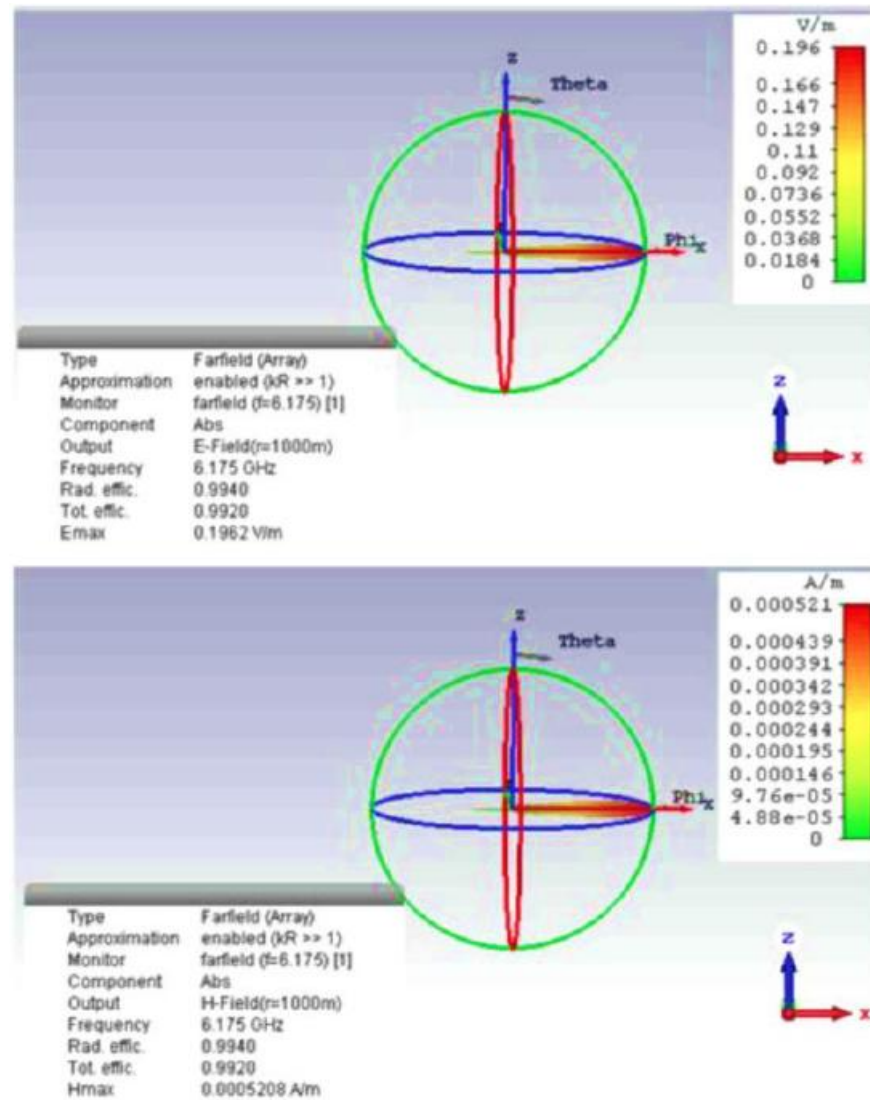


Рисунок 4.5 – ДН антенны в Е и Н плоскостях на 6,175 ГГц

Farfield (Array) E-Field(r=1000m) Abs (Theta=90)

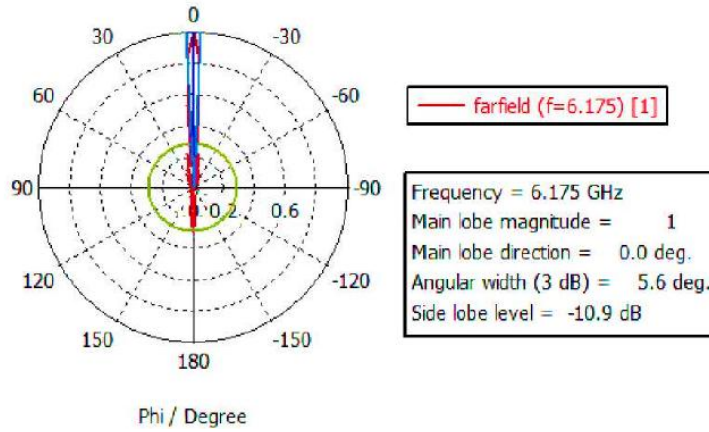


Рисунок 4.6 – ДН антенны в H плоскости на 6,175 ГГц

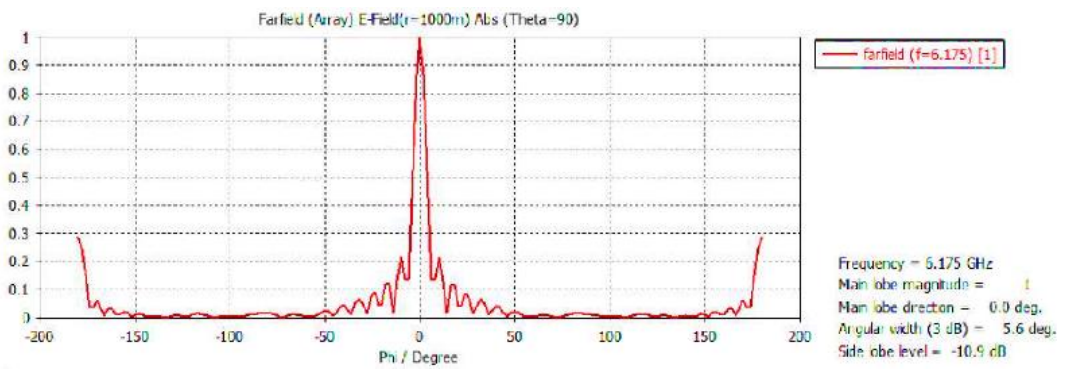


Рисунок 4.7 – ДН антенны в E плоскости на 6,175 ГГц

## 5 Результаты исследования модели

При моделировании антенной решётки было получено сужение ДН антенны, а также пониженный УБЛ. В особенности можно выделить хорошую работу АР на базе излучателя Вивальди с экспоненциальной щелью из-за относительно низких коэффициента стоячей волны и входного сопротивления.

По результатам, полученным в процессе построения модели ФАР на основании излучателе Вивальди, можно сделать вывод, что в настоящее время оптимальным диапазоном частот будет 5,925...6,425 ГГц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе для построения модели адаптивной антенной решётки была выбрана модель фазированной антенной решётки. В качестве телекоммуникационной системы рассматривалась система связи пятого поколения.

В процессе исследования было установлено улучшение показателей КСВ и S-параметров, также замечено сужение главного лепестка и уменьшение УБЛ, что говорит об улучшении характеристик по причине роста частоты.

В силу наличия высокого уровня усиления сигнала на широкой полосе частот, данный тип AP рекомендован к использованию в различных системах связи с сохранением основных характеристик.

В работе проведён анализ ДН AP пятого поколения. Как результат было выведено мнение, что необходима разработка новых антенн для БС пятого поколения для сокращения количества антенн на такой станции в общем.

По обеспечению изменения ширины луча в горизонтальной плоскости рабочих частот связи 5G были определены конструкции излучателей.

С использованием программной среды моделирования был выполнен синтез 17-элементной AP, соответственно, с рассмотрением диаграмм направленностей в разных плоскостях пространства.

В процессе выполнения работы было предложено применять широкополосные антенные решётки из излучателей Вивальди в качестве антенн для БС.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СТО ЮУрГУ 19–2008 Стандарт организации. Выпускная квалификационная научно-исследовательская работа студента. Структура и правила оформления / составители: Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, С.Д. Ваулин, В.Р. Гофман. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 29 с.
2. Адаптивные антенные решётки: учебное пособие: в 2-ух частях. Часть 1 / В.А. Григорьев, С.С. Щесняк, В.Л. Гулюшин, Ю.А. Распаев. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2016. – 179 с.
3. Адаптивные антенные решётки: учебное пособие: в 2-ух частях. Часть 2 / В.А. Григорьев, С.С. Щесняк, В.Л. Гулюшин, Ю.А. Распаев. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2016. – 118 с.
4. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решёток: учеб. пособие для вузов / Филиппов, В.С., Пономарев, Л.И., Гринев, А.Ю. и др.; под ред. Д.И. Воскресенского – 2-е изд., доп и перераб. – М.: Радио и связь, 1994. – 592 с.: ил.
5. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решёток: учеб. пособие для вузов / Д.И. Воскресенский, В.И. Степаненко, В.С. Филиппов и др. под ред. Д.И. Воскресенского. 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2003. – 632 с.: ил.
6. Вендик, О.Г. Фазированная антенная решетка с управляемой формой диаграммы направленности / О.Г. Вендик, С.А. Калинин, Д.С. Козлов // Журнал технической физики. – 2013г. – Т. 83, № 10.
7. Синтез антенной решетки с использованием излучателей Вивальди для систем беспроводного широкополосного доступа / И.Г. Рязанов // Университет им. В.И. Вернадского. – 2013. – № 4(48). – С. 163–167.
8. Amitay, N. Theory and analysis of phased array antennas / N. Amitay, V. Galindo, C.P. Wu. – New York: Wiley-Interscience, 1972. – 443 p.



№ п/п	Формат	Обозначение	Наименование	Колич.
			<u>Текстовые документы.</u>	
1	A4	ЮУрГУ-Д.11.03.02.2020.223.00 ПЗ	Пояснительная записка	48
			<u>Графические материалы.</u>	1
2	A1	ЮУрГУ-Д.11.03.02.2020.223.00 Д1	Результат моделирования излучателя Вивальди	1
3	A1	ЮУрГУ-Д.11.03.02.2020.223.01 Д1	Результат моделирования	1

					ЮУрГУ-Д.11.03.02.2020.223.00 Д4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Разраб.	Малоземова Е.В.				<b>Модель адаптивной антенной решётки телекоммуникационной системы</b>  <b>Ведомость ВКР</b>	Лит.	Лист	Листов		
Провер.	Спицын В.С.					Д		1		
Н. Контр.	Спицына В.Д.									
Утв.	Даровских С.Н.					ЮУрГУ Кафедра ИКТ				