

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**Юзвик Денис Андреевич**

ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В  
ЗАДАННЫХ ОБЛАСТЯХ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Специальность 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Степанов Максим Андреевич

Новосибирск – 2024

## Содержание

Содержание .....	2
Введение .....	5
1. Особенности формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства при помощи линейных антенных решеток .....	14
1.1 Критерии качества зоны повышенной напряженности электрического поля .....	19
1.2 Интерференция и формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля .....	20
1.3 Конфигурации антенных систем для формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданных областях пространства.....	23
1.4 Аналитические выражения для расчета смещения максимума напряженности электрического поля, относительно точки фокусировки .....	33
1.5 Постановка цели и задач исследования .....	39
1.6 Выводы по первому разделу .....	40
2. Формирование максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства сфокусированной линейной антенной решеткой .....	42
2.1 Компенсация смещения точки максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки.....	43
2.2 Формирование максимума напряженности электрического поля в заданной точке с применением нескольких антенных решеток .....	49
2.2.1 Использование двух параллельных одномерных антенных решеток, для обеспечения максимума напряженности электрического поля в одной заданной точке пространства .....	49

2.2.2 Две параллельные антенные решетки, разнесенные на разное расстояние от точки фокуса .....	57
2.2.2.1 Компенсация смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля для двух параллельных антенных решеток, разнесенных на разное расстояние от точки фокуса.....	64
2.2.3 Две ортогональные антенные решетки, сфокусированные в одну точку, равноудаленную от них .....	69
2.2.3.1 Компенсация смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля для двух ортогональных антенных решеток, сфокусированных в одну точку, равноудаленную от них .....	81
2.2.4 Две ортогональные антенные решетки, сфокусированные в одну точку, расположенную на разном расстоянии от них.....	85
2.2.5 Четыре антенные решетки, сфокусированные в одну точку.....	91
2.3 Выводы по второму разделу .....	95
3. Формирование нескольких зон повышенной напряженности электрического поля в заданных областях пространства.....	98
3.1 Математическая модель .....	98
3.2 Упрощенный способ расчета амплитуд и начальных фаз .....	104
3.3. Проверка теоретических результатов электродинамическим моделированием .....	109
3.4. Выводы по третьему разделу .....	121
4. Экспериментальная апробация теоретических результатов .....	123
4.1 Программное обеспечение расчета амплитуд напряженности электрического поля .....	124
4.2 Разработка макета сфокусированной антенной решетки и экспериментальная апробация теоретических результатов .....	130

4.3.1 Фокусировка антенной решетки в заданную точку.....	134
4.3.2 Результаты экспериментальной апробации алгоритма позиционирования максимума амплитуды напряженности в заданной точке пространства .....	138
4.4 Выводы по четвертому разделу .....	140
Заключение .....	142
Список сокращений .....	145
Список литературы .....	146
Приложение А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ .....	162
Приложение Б. Акты о внедрении результатов диссертационного исследования.....	163
Приложение В. Патент на изобретение .....	165
Приложение Г. Патент на изобретение.....	166

## Введение

### Актуальность темы исследования

В современном мире происходит цифровизация экономики [1-6], что, в следствии, ведет к увеличению абонентов беспроводных телекоммуникационных сетей. В качестве абонентов могут выступать электронные устройства, например телевизоры, персональные компьютеры, мобильные телефоны и прочие устройства для интернета вещей. С ростом экономики будет расти количество абонентов беспроводных телекоммуникационных сетей. Большое количество абонентов создаст плотную среду с конкурирующими друг с другом устройств. Устройства, которые функционируют в одном частотном диапазоне, создают помехи друг другу, что приводит к снижению скорости передачи информации в канале передачи данных [7-11]. На практике эффект снижения скорости передачи информации, вызванный большой плотностью абонентов беспроводных телекоммуникационных сетей, можно наблюдать в сетях Wi-Fi расположенных во многоквартирных домах, где в каждой квартире находится своя точка доступа. Также такой эффект имеет место во время проведения концертов и прочих массовых мероприятий, т.к. на единицу площади находится большое количество людей, имеющих с собой смартфон.

Возможности по частотному и временному разделению каналов передачи данных в настоящее время близки к своему исчерпанию [12-25]. Абоненты беспроводных телекоммуникационных сетей, например, такие как устройства интернета вещей, расположены в разных точках пространства. Пространственная разнесённость таких устройств открывает пути пространственного разделения этих устройств. В примитивном виде это может быть формирование максимума диаграммы направленности антенной решетки в сторону абонента, что повысит уровень сигнала для антенны абонента и создаст минимум помех для окружающих устройств.

Помимо вышеописанного, известны способы фокусировки антенных решеток на конечное расстояние [26-49]. Фокусировка антенных решеток в этих способах заключается в обеспечении синфазного сложения волн от каждого излучателя антенной решетки в требуемой точке пространства. Как правило рассматривается одна точка фокусировки и не ставится задача по формированию требуемых паттернов электрического поля в пространстве.

Большой вклад в научное исследование антенных решеток и их фокусировки сделали такие ученые как Роберт Хансен (R.C. Hansen), Филиппов В.С., Пономарев Л.И., Гринев А.Ю. Основные усилия в исследованиях ученых были приложены на исследование способов проектирования антенных решеток. Фокусировка антенных решеток на конечное расстояние также рассматривалась авторами в своих работах, но не уделялось внимание положению максимума амплитуды напряженности электрического поля.

Как было сказано выше, известна классическая задача по фокусировке линейных антенных решеток в заданную точку пространства, при которой наблюдается повышение амплитуды напряженности электрического поля в окрестностях точки фокуса [26-31], что объясняется синфазным сложением электромагнитных волн от элементов антенной решетки. Очевидно, что повышение напряженности электрического поля в заданной точке может быть использовано при фокусировке беспроводных сетей передачи данных для повышения отношения сигнал/шум в требуемой области. В научных работах множества авторов можно заметить, что максимум амплитуды напряженности электрического поля всегда смещен в сторону антенной решетки, что связывается со снижением интенсивности электрического поля с ростом расстояния, но взаимосвязь величины смещения и параметров сфокусированной антенной решетки практически не изучены [50-53]. Следовательно, возникает понимание, что задачи по фокусировке антенной

решетки и формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства необходимо разделять.

Для линейных антенных решеток отсутствуют способы, обеспечивающие позиционирование зоны высокой напряженности электрического поля в заданной области пространства. Также очевидно, что обеспечение одной зоны высокой напряженности электрического поля зачастую является недостаточным для пространственной селекции устройств, работающих в беспроводных телекоммуникационных сетях. Что определяет **цель настоящей работы** – для сетей беспроводной передачи данных предложить метод, обеспечивающий позиционирование нескольких пучностей электромагнитного поля в заданной области пространства.

#### **Основные задачи работы:**

1. Для линейных антенных решеток, сфокусированных на конечное расстояние, установить взаимосвязь между их размерами и величиной смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля от точки фокусировки.
2. Установить взаимосвязь между линейными размерами антенной решетки, фокусным расстоянием и размерами формируемой зоны повышенной напряженности электрического поля.
3. Оценить возможности формирования зоны высокой напряженности электрического поля, используя несколько одинаковых линейных антенных решеток.
4. Разработать математический аппарат, позволяющий рассчитывать амплитуды и начальные фазы сигналов, подводимых к парциальным излучателям антенной решетки, позволяющий обеспечить требуемое распределение электрического поля в пределах заданной области пространства.

5. Разработать макет сфокусированной антенной решетки и провести с его помощью экспериментальную апробацию полученных теоретических результатов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Применение итерационного алгоритма увеличения фокусного расстояния позволяет сфокусировать линейную антенную решетку на такое расстояние, при котором смещенный относительно точки фокуса максимум напряженности электрического поля окажется в требуемом местоположении и приводит к расширению зоны высокой напряженности электрического поля.

2. Фокусировка в заданную точку конфигураций из двух параллельных, двух перпендикулярных или четырех антенных решеток приводит к формированию каждой решеткой пучности напряженности электрического поля, смещенной относительно точки фокусировки, местоположением которых можно управлять независимо друг от друга.

3. Расположение антенн по периметру области и излучение ими сигналов с амплитудами и фазами, определенными путем решения системы уравнений, связывающей комплексные амплитуды излучающих сигналов и напряженность электрического поля в требуемых точках, позволяет формировать несколько зон повышенной напряженности электрического поля в пределах области.

### **Научная новизна работы**

1. Установлена связь между размерами сфокусированной линейной антенной решетки, фокусным расстоянием и размерами формируемой зоны повышенной напряженности электрического поля, а также величиной ее смещения относительно точки фокусировки.

2. Оценена возможность формирования максимума напряженности электрического поля с помощью конфигурации из двух параллельных, двух перпендикулярных и четырех сфокусированных в одну точку антенных

решеток. Для каждой из конфигураций определены размеры и местоположение зон высокой напряженности электрического поля.

3. Предложен способ, позволяющий формировать в заданной области пространства несколько максимумов амплитуды напряженности электрического поля с помощью излучающей системы, антенны которой расположены по периметру этой области.

### **Теоретическая значимость**

Получены соотношения, определяющие взаимосвязь между комплексными амплитудами сигналов, излучаемыми антеннами и местоположением пучностей электромагнитного поля в пределах области, ограниченной антеннами.

### **Практическая значимость**

Полученные результаты практически значимы, потому что могут использоваться при решении задач проектирования беспроводных телекоммуникационных сетей, обеспечивающих зону покрытия заданной формы.

1. Результаты диссертационного исследования по теоретическому исследованию влияния количества и местоположения элементов антенной решетки на формируемое ей распределение напряженности электрического поля внедрены на ООО «Предприятие «ЭЛТЕКС». Эти исследования были использованы при разработке антенных решеток беспроводных точек доступа.

2. Результаты диссертационного исследования по теоретическому исследованию возможностей управляемого позиционирования зоны высокой напряженности электрического поля антеннами, сфокусированными в заданную точку пространства были внедрены на АО «ЗАСЛОН». Они были использованы при разработке программного обеспечения имитатора (в части управления его излучающей системой).

Результаты внедрения подтверждены двумя актами о внедрении (Приложение Б).

3. Предложен алгоритм, позволяющий обеспечивать максимум амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства с помощью линейной антенной решетки, сфокусированной на конечное расстояние.

4. Разработана антенная конфигурация, позволяющая обеспечить несколько зон высокой амплитуды напряженности электрического поля в заданной области пространства, что позволит сформировать зону покрытия сети беспроводной передачи данных непосредственно в окрестностях расположения абонентов.

5. Разработано программное обеспечение для расчета распределения амплитуды напряженности электрического поля в заданной области пространства и макет сфокусированной антенной решетки, позволяющий провести экспериментальную апробацию результатов.

### **Методология исследования**

При проведении исследований использовалась теория антенных решеток, геометрической оптики и линейной алгебры. Численное моделирование зависимостей амплитуды напряженности электрического поля от расстояния и обработка результатов экспериментов осуществлялись в программной среде MatLab. Электродинамическое моделирование осуществлялось в программной среде CST Microwave Studio.

### **Личный вклад**

Все основные теоретические и практические результаты диссертации получены автором лично. Автором выполнены: обработка и обобщение полученных результатов, выбор методологии исследования, выполнен вывод аналитических соотношений, математическое и электродинамическое

моделирование. Из 15 опубликованных работ 14 работ опубликованы в соавторстве. В работах, опубликованных в соавторстве, результаты, связанные с темой диссертационного исследования, получены автором лично.

### **Достоверность и обоснованность теоретических результатов**

Обеспечивается строгостью математического аппарата и подтверждением результатами численного и электродинамического моделирования, совпадением с результатами экспериментов.

### **Апробация работы**

Материалы диссертационного исследования докладывались на следующих конференциях.

«Наука. Промышленность. Оборона.»: 2020, 2021, 2022 годы; «International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE)»: 2020 год; «Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE)»: 2021 год; «International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)»: 2022 год; International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): 2022; 2023; 2024 годы.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 2 статьи в журналах входящих в перечень ВАК. 2 статьи в других рецензируемых научных журналах. 2 статьи в научных журналах, входящих в международные библиографические системы Scopus или Web of Science. 6 публикаций в изданиях, входящих в международные библиографические системы Scopus или Web of Science. 3 публикации в других научных изданиях. Зарегистрировано одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Получено два патента РФ на изобретение.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, библиографического списка из 121 источника. Диссертация изложена на 166 страницах текста. Работа содержит 57 рисунков и 22 таблицы.

## **Содержание работы**

**В первом разделе** выполнен обзор исследований по решаемым задачам, сформулированы основные задачи работы и выбраны способы их решения.

Исследована связь между линейными размерами антенной решетки и величиной смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля в сторону антенной решетки относительно точки фокусировки. Получено семейство зависимостей, которое было аппроксимировано полиномом двух переменных, для аналитических расчетов величины смещения максимума напряженности электрического поля на основании заданных линейных размеров и фокусного расстояния.

Оценена связь размеров зоны повышенной напряженности электрического поля относительно линейных размеров антенной решетки и фокусного расстояния.

Обосновано, что задача фокусировки антенных решеток и задача обеспечения максимума амплитуды напряженности электрического поля – две разные задачи.

**Второй раздел** посвящен исследованию способов точного позиционирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в требуемой точке пространства.

Предложен алгоритм компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля.

Рассмотрены антенные конфигурации, состоящие из нескольких одинаковых линейных антенных решеток, сфокусированные в одну точку пространства. При выполнении ряда условий возможно обеспечить максимум амплитуды напряженности электрического поля в точке фокусировки. Достоверность полученных результатов подтверждена с помощью численного эксперимента.

**Третий раздел** направлен на исследование антенной конфигурации, позволяющей обеспечить несколько максимумов амплитуды напряженности электрического поля в пространстве.

Разработан математический аппарат позволяющий проводить расчет амплитуд и начальных фаз сигналов, подводимых к каждому парциальному излучателю антенной решетки.

Предложенная конфигурация и математический аппарат позволяют формировать в заданном пространстве несколько максимумов или минимумов амплитуды напряженности электрического поля.

Математический аппарат был доработан для исключения математических операций, не влияющих на финальный результат.

Достоверность результатов подтверждена с помощью электродинамического моделирования и численного эксперимента.

**Четвертый раздел** посвящен описанию разработанной программы, считающей амплитуды напряженности электрического поля (паттерны) по заданной конфигурации антенных решеток и параметров сигналов. И описанию эксперимента с использованием макета антенной решетки, состоящей из трех излучателей.

**В заключении** перечислены основные результаты работы.

**В приложении** приведено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, акты о внедрении основных результатов работ, патенты на изобретения.

## **1. Особенности формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства при помощи линейных антенных решеток**

В современном мире с растущей экономикой происходит цифровизация многих сфер общественной жизни. Количество абонентов беспроводных телекоммуникационных сетей велико и стремительно растет. К ним относятся смартфоны, телевизоры, персональные компьютеры, устройства интернета вещей и др. Число таких абонентов будет неуклонно расти. Таким образом формируется плотная среда с большим количеством конкурирующих устройств. Следствием этого является увеличение плотности сетей систем передачи данных. Устройства, функционирующие в одном частотном диапазоне, создают помехи друг другу. Помехи снижают пропускную способность канала передачи данных [7]. Возможности по частотной и временной селекции, разделению их по каналам передачи данных в настоящее время близки к своему исчерпанию [12-25]. Вместе с тем устройства-абоненты беспроводных сетей, как правило, пространственно разнесены. Это открывает дополнительные пути по их пространственной селекции. В простейшем случае, формируя максимум диаграммы направленности антенны базовой станции в направлении абонента, можно существенно увеличить уровень сигнала и пропускную способность канала, не создавая помехи окружающим устройствам. Известны способы фокусирования антенных решеток на конечное расстояние [26-49]. При этом, как правило, рассматривают одну точку фокусировки, в которой сохраняется диаграмма направленности антенны и не ставят задачу формирования заданного распределения напряженности электромагнитного поля в пространстве.

В настоящее время разворачиваются сети 5G и разрабатывается технология 6G [14-24, 54-57]. Для повышения пропускной способности в таких сетях может быть использована пространственная селекция устройств

за счет обеспечения максимумов амплитуды напряженности электрического поля в требуемых областях пространства.

Для осуществления пространственной селекции устройств-абонентов необходимо разработать способы формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в требуемой точке пространства. И установить факторы, влияющие на размеры зоны повышенной напряженности электрического поля в ее окрестности.

Основываясь на вышеописанном, составлен обзор способов формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке при помощи сфокусированных линейных антенных решеток. В классическом понимании решение задачи фокусировки антенной решетки приводит к росту напряженности электрического поля в окрестностях точки синфазного сложения волн [32, 58-60]. В настоящее время известно множество работ, описывающих антенные решетки сфокусированные в заданную область пространства [26-49].

Фокусировка электромагнитного поля применяется при лечении опухолей в мышечных тканях и других медицинских применений [61-69]. Для фокусировки в одной точке были изучены линзовые антенны [70-81]. Фокусировка электромагнитного поля в одной точке пространства может применяться во множестве задач, такие как: испытания на электромагнитную совместимость, медицина, геология, военные и ядерные исследования [58, 73-79]. В медицине фокусировка применяется в томографии [80-83].

Например, в работе [32] рассматривается способ оптимального проектирования сфокусированных антенных решеток. Предложен алгоритм расчета амплитуд и фаз сигналов, подводимых к парциальным излучателям антенной решетки. В работах [32, 84-86] границы зоны фокусировки определяются по уровню -3 дБ относительно точки с максимальной интенсивностью. В работах [32, 51, 52, 86] приведены зависимости амплитуды

напряженности электрического поля от расстояния для различных фокусных расстояний. Анализируя эти зависимости заметно, что максимум амплитуды напряженности электрического поля смещен в сторону антенной решетки, относительно точки фокусировки (точки синфазного сложения волн). Можно отметить, что смещение максимума амплитуды напряженности электрического поля относительно точки фокусировки в работе [32] никак не прокомментировано. Также не оценены размеры зоны повышенной напряженности электрического поля, что открывает дорогу для последующих исследований.

В работе [35] рассматривается проектирование широкополосных сфокусированных печатных антенных решеток. Рассматривается соотношение, позволяющее рассчитывать начальные фазы сигналов, для обеспечения фокусировки антенной решетки в заданной точке пространства. Моделирование в работе выполнено в среде электродинамического моделирования Ansys HFSS и приведены зависимости амплитуды напряженности электрического поля и фазовый портрет для сфокусированной антенной решетки. Приведенный фазовый портрет демонстрирует синфазное сложение электромагнитных волн точно в заданной точке фокусировки. Но максимум амплитуды напряженности электрического поля в данной работе, как и в работе [32], смещен в сторону антенной решетки относительно точки синфазного сложения волн. Смещение максимума амплитуды напряженности в сторону антенной решетки в работе не прокомментировано, вместе с тем, оставлены без внимания размеры зоны повышенной напряженности электрического поля и критерии для определения зоны повышенной напряженности. Положительным результатом в работе считается обеспечение синфазного сложения волн в заданной точке пространства.

В работе [58] рассматривается классический случай фокусировки линейной эквидистантной антенной решетки, сфокусированной на конечное расстояние. В отличие от работ, рассмотренных в двух предыдущих абзацах,

здесь используется антенная решетка с гораздо большими линейными размерами и состоящая из 47 парциальных излучателей. В работе установлено, что антенная решетка с такими параметрами может обеспечить максимум амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства, которая совпадает с точкой синфазного сложения электромагнитных волн. Также приведена зависимость размеров фокальной области от числа излучателей. Стоит отметить, что в работе не рассмотрено влияние расстояния между излучателями на характеристики формируемого распределения электрического поля вдоль фокальной оси и не проведено исследование, направленное на установления влияния количества излучателей на характеристики формируемого распределения электрического поля.

В схожей работе [84] рассматривается фокусировка антенной решетки 8 x 8 элементов. Приведенные в работе результаты демонстрируют фокусировку поля в заданную область пространства. Границы зоны повышенной напряженности в работе оцениваются по уровню -3 дБ. В работе оценены размеры зоны повышенной напряженности, но не описана связь между параметрами антеннами и размерами этой зоны. Также на приведенных в работе графиках видна несимметричность зоны повышенной напряженности относительно точки фокусировки. На приведенных графиках заметно смещение максимума мощности в сторону антенной решетки относительно заданной точки фокусировки. Смещение максимума мощности относительно точки фокусировки в работе не было прокомментировано.

В работе [87] рассматривается возможность фокусировки антенной решетки в нескольких областях пространства. В работе рассматривается печатная антенная решетка. В работе для конкретной рассматриваемой антенной решетки даны количественные оценки размеров зоны повышенной напряженности, разнице уровней напряженности между двумя максимумами напряженности электрического поля. Но в работе не исследовано влияние параметров антенны на размеры зоны повышенной напряженности.

В работе [51] рассматриваются свойства антенн в ближней зоне поля. Приведены зависимости нормированных значений интенсивности электрического поля от расстояния. Отмечено смещение максимума напряженности электрического поля в сторону антенной решетки. Также в работе замечено увеличение зоны повышенной напряженности электрического поля с увеличением фокусного расстояния. Однако эти явления подробно в работе не рассмотрены.

В работе [52] рассматриваются характеристики сфокусированных антенных решеток. В работе не рассматривают размеры зоны повышенной напряженности и не определены критерии по определению этой зоны. В работе приведены зависимости напряженности поля для сфокусированных антенных решеток. На представленных зависимостях можно заметить, что точка фокусировки и точка максимума напряженности поля не совпадают, автор [52] отмечает, что это связано с эффектом снижения интенсивности электромагнитной волны. Также автор отмечает, что при увеличении фокусного расстояния величина смещения максимума напряженности поля увеличивается.

Таким образом, складывается следующая ситуация. Перспективным направлением селекции абонентов сетей беспроводной передачи данных является формирование зон высокой напряженности электрического поля в их окрестности. Очевидным путем решения этой задачи является фокусировка излучения в заданную точку. Исследования показывают не совпадение местоположения точки синфазного сложения излученных волн и максимумом зоны высокой напряженности. Однако количественные оценки для разных соотношений размера антенны и фокусного расстояния этого смещения отсутствуют.

Кроме того, не рассмотрены факторы, влияющие на размеры зоны повышенной напряженности, формируемой в окрестности точки максимума амплитуды напряженности электрического поля.

## 1.1 Критерии качества зоны повышенной напряженности электрического поля

При решении задачи пространственной селекции устройств, функционирующих в беспроводных сетях необходимо концентрировать электрическое поле в областях в окрестности расположения абонентских устройств. Для этого необходимо сформировать критерии качества совмещения зоны повышенной напряженности электрического поля с требуемым положением.

Критерии качества совмещения зоны повышенной напряженности электрического поля являются важным условием [32, 84, 85, 86, 88, 89], на основании которых можно проводить оценку получаемых распределений электрического поля в пространстве. Рассмотрим следующие критерии:

- Размер зоны повышенной напряженности. Геометрический размер зоны повышенной напряженности электрического поля по уровню -3 дБ (уровень половинной мощности) (см. рисунок 1.1).

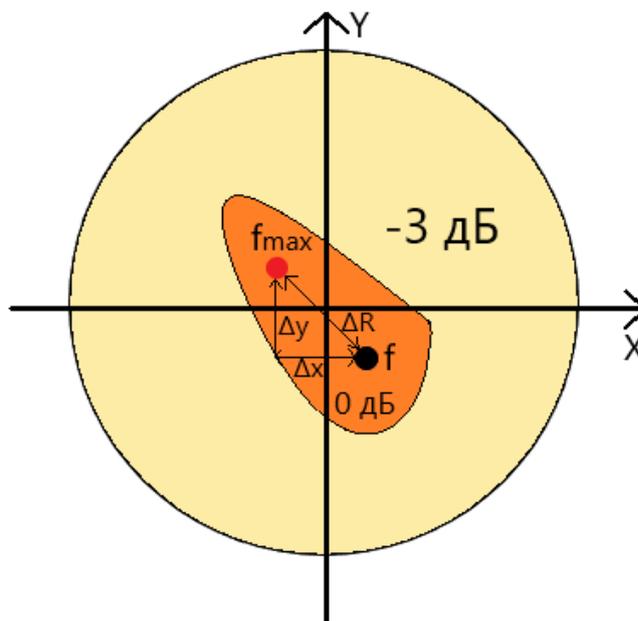


Рисунок 1.1 – Определение размеров зоны повышенной напряженности по уровню -3 дБ

Как показано на рисунке 1.1, зона повышенной напряженности электрического поля (оранжевая фигура), уровень сигнала в точке ее максимума принят за 0 дБ. Отходя от этой точки уровень сигнала уменьшается, в местах, где уровень сигнала равен или меньше -3 дБ начинается желтая фигура, она не считается зоной повышенной напряженности электрического поля. Зона повышенной напряженности электрического поля может иметь форму сложной фигуры, центр которой не обязательно будет иметь максимальное значение напряженности электромагнитного поля.

- Точность позиционирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданных координатах (см. рисунок 1.1). Определяет, насколько точно максимум амплитуды напряженности электрического поля совпадает с заданными координатами  $(\Delta x; \Delta y; \Delta z)$ .

## **1.2 Интерференция и формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля**

Увеличение амплитуды напряженности электрического поля в пространстве окрестности точки синфазного сложения является следствием физического явления – интерференции. Интерференцией называют взаимодействие нескольких когерентных электромагнитных волн. Когерентностью в данном случае называют случай, когда разность фаз между несколькими электромагнитными волнами постоянна во времени, т.е. взаимодействующие электромагнитные волны имеют равную частоту (длину волны).

Традиционно формулируемая задача фокусировки излучения антенной решетки в заданную точку предполагает обеспечение синфазности в этой точке электромагнитных волн, сформированных элементами решетки.

Рассмотрим изменение амплитуды напряженности электрического поля в зависимости от дальности до антенной решетки. Электромагнитная волна характеризуется плотностью потока мощности, которая, усредненная по промежутку времени, называется интенсивностью электромагнитного излучения [90]:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{dP}{dS} dt = \frac{1}{T} \int_0^T |\vec{\Pi}(t)| dt, \quad (1.1)$$

где  $0...T$  – промежуток времени усреднения;  $dS$  – площадь, через которую переносится энергия;  $P$  – мощность электромагнитной волны;  $|\vec{\Pi}(t)|$  – модуль вектора Пойнтинга. Поток мощности, исходящий от источника, можно представить в виде некоторого количества линий, которые выходят из него, а количество линий будет зависеть от излучаемой мощности источника (см. рисунок 1.2) [90-93]. В свободном пространстве  $\varepsilon_r = 1$ ;  $\mu_r = 1$  и без учета потерь в среде количество линий потока от источника не зависит от расстояния от источника. Чем дальше от источника линии потока мощности, тем через большую площадь поверхности они проходят, которая связана с площадью сферы ( $S_{сф} = 4\pi r^2$ ).

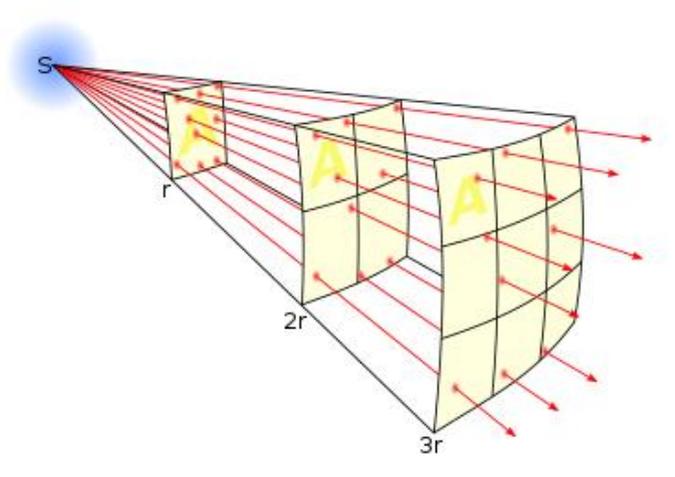


Рисунок 1.2 – Схематичное представление потока мощности от источника излучения

Учитывая, что амплитуда и мощность связаны между собой соотношением  $A = \sqrt{P \cdot Z}$ , где  $P$  – мощность,  $Z$  – волновое сопротивление среды, то становится ясно, что в дальней зоне мощность с ростом расстояния снижается в  $r^{-2}$  раз, тогда амплитуда будет снижаться в  $r^{-1}$  раз.

Таким образом, можно записать выражение, связывающее амплитуду напряженности электрического поля и расстояние до антенной решетки (без учета фазы):

$$A(r) = A_0 \cdot r^{-q}, \quad (1.2)$$

где  $A_0$  – начальное (в точке излучения) значение амплитуды напряженности электрического поля. Известно, что в случае антенной техники, амплитуда напряженности электрического поля снижается в  $r^{-q}$  раз, в ближней зоне  $q = 2$ , в дальней зоне  $q = 1$  [13, 94].

На рисунке 1.3 схематически изображено представление зоны максимума амплитуды напряженности электрического поля, для сфокусированной в заданную точку антенной решетки. Ожидается, что максимальное значение амплитуды напряженности электрического поля будет точно в заданной точке фокуса, т.е. в точке, где излучение от всех элементов антенной решетки сложится синфазно. В литературе [29, 30] приводят подобные изображения для больших антенных решеток с количеством излучающих элементов в несколько десятков.

Однако телекоммуникационные устройства как правило имеют в своем составе антенные решетки малых размеров. Количество излучающих элементов, входящих в их состав, редко превышает десяток [95-101].

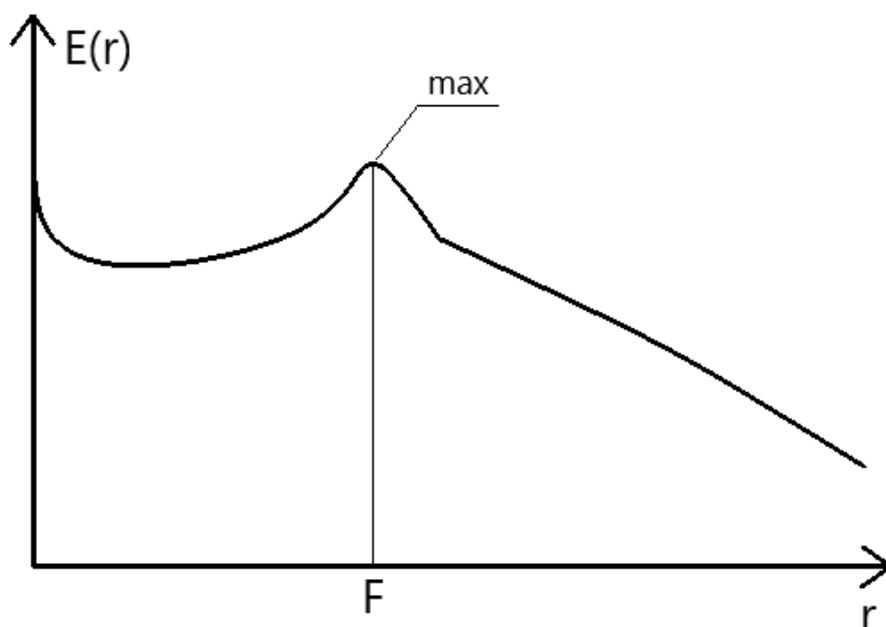


Рисунок 1.3 – Схематическое изображение зоны максимума амплитуды напряженности электрического поля, для сфокусированной в заданной точке пространства антенной решетки

### **1.3 Конфигурации антенных систем для формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданных областях пространства**

Проведем оценку зависимости амплитуды напряженности электрического поля от расстояния до антенной решетки малого размера. Расчет выполним для антенной решетки, сфокусированной на бесконечность (начальные фазы сигналов, подводимых ко всем излучателям, равны друг другу) и сфокусированной в заданную точку пространства. Количество элементов рассматриваемой антенной решетки  $N = 5$ , расстояние между излучателями 60 мм ( $\frac{d}{\lambda} = 0.5$ ). Расчет проведем с учетом эффекта снижения интенсивности напряженности электрического поля в зависимости от дальности до антенной решетки и без него. На рисунке 1.4 представлены зависимости нормированной к своему максимальному значению амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для антенной решетки,

сфокусированной на бесконечность (сплошная линия с учетом эффекта снижения интенсивности  $q = 1$ ; пунктирная линия без учета эффекта снижения интенсивности  $q = 0$ ). Из рисунка 1.4 видно, что, как и ожидалось, при  $q = 0$  в дальней зоне амплитуда напряженности электрического поля не меняется с расстоянием от антенной решетки.

Для удобства работы с графиками во всей работе будем проводить нормирование к амплитуде излучаемого антенной решеткой сигнала

$$E_N(r) = \frac{E(r)}{E(0)}.$$

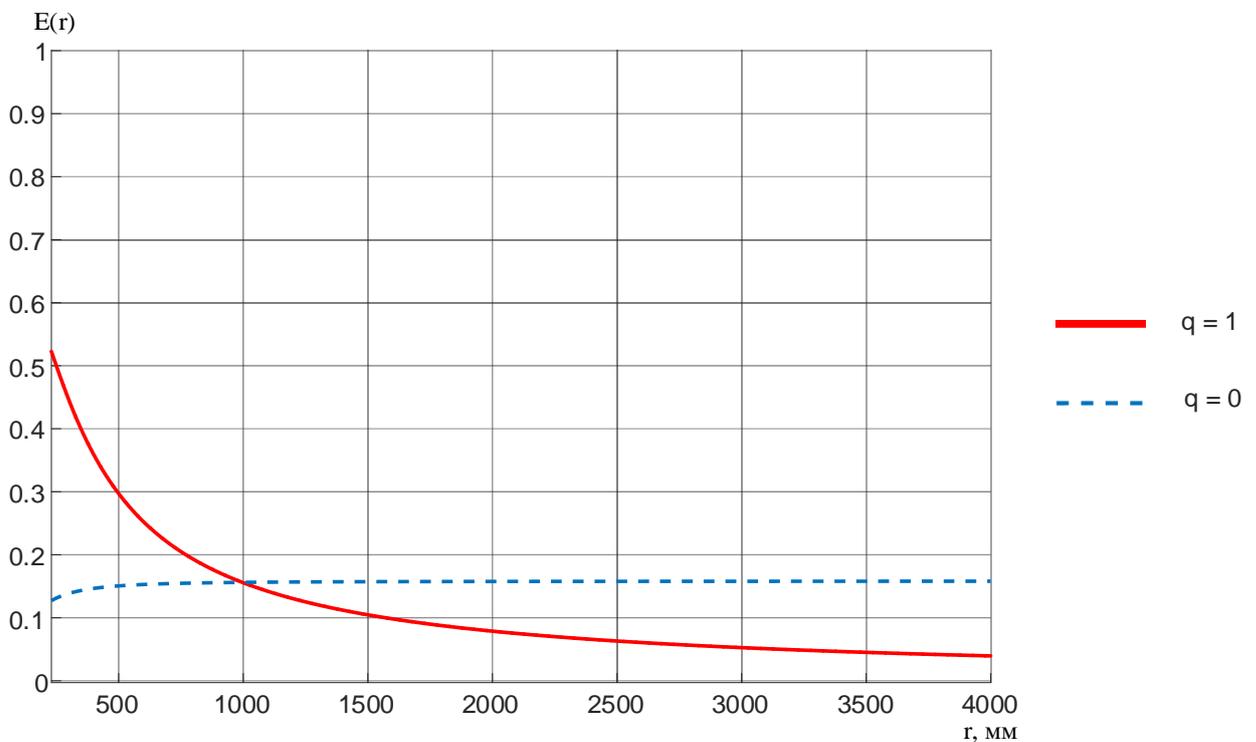


Рисунок 1.4 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния, для антенной решетки, сфокусированной на бесконечность

Для фокусировки антенной решетки в заданную точку необходимо рассчитать по выражению (1.3) расстояние между каждым антенным излучателем и точкой фокусировки.

$$R_n = \sqrt{F^2 + (n - N/2)^2 d^2} - F, \quad (1.3)$$

где  $F$  – расстояние между геометрическим центром антенной решетки и точкой в пространстве, в которой необходимо обеспечить приход сигналов синфазно (точка фокусировки);  $n$  – номер излучателя;  $d$  – расстояние между излучателями;  $N$  – количество излучателей антенной решетки.

Исходя из рассчитанного расстояния, по выражению (1.4) определяются начальные фазы сигналов [58].

$$\phi_n = R_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (1.4)$$

Проведем расчет зависимости амплитуды напряженности от расстояния до антенной решетки, сфокусированной на конечное расстояние. Расчет, как и прежде, проведем с учетом эффекта снижения интенсивности напряженности электрического поля от расстояния и без него. Фокусное расстояние 800 мм. Результат расчета приведен на рисунке 1.5.

На рисунке 1.5 видно, что для  $q=1$  явно выраженного максимума амплитуды напряженности электрического поля в окрестностях точки фокусировки нет. Это объясняется снижением интенсивности с ростом дальности от решетки. Амплитуда напряженности электрического поля обратно пропорциональна расстоянию от антенной решетки. При  $q=0$  и прочих равных условиях, наблюдается максимум напряженности электрического поля точно в заданной точке фокусировки. При этом сравнивая фазовые портреты для случая с наличием эффекта интенсивности (рисунок 1.6, а) и для случая без его учета (рисунок 1.6, б), мы наблюдаем, что электромагнитные волны приходят синфазно точно в координаты фокусировки (800 мм). В точке фокусировки амплитуда напряженности электрического поля для антенной решетки, сфокусированной на

бесконечность меньше на 0.17 дБ, по сравнению с антенной решеткой, сфокусированной на конечное расстояние.

Фактически, фокусировка в рассматриваемую точку для такой антенной решетки не дает выигрыша в величине напряженности в сравнении с антенной решеткой, сфокусированной на бесконечность.

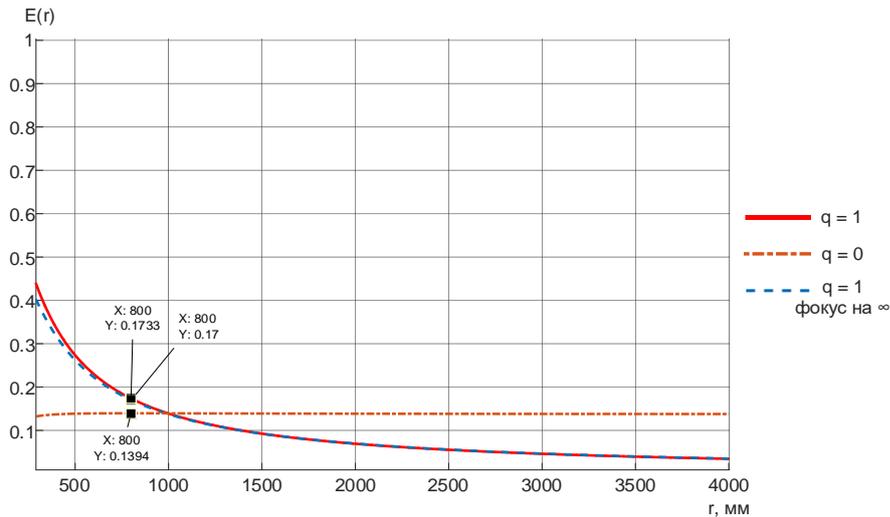


Рисунок 1.5 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния, для антенной решетки, сфокусированной на расстоянии 800

мм

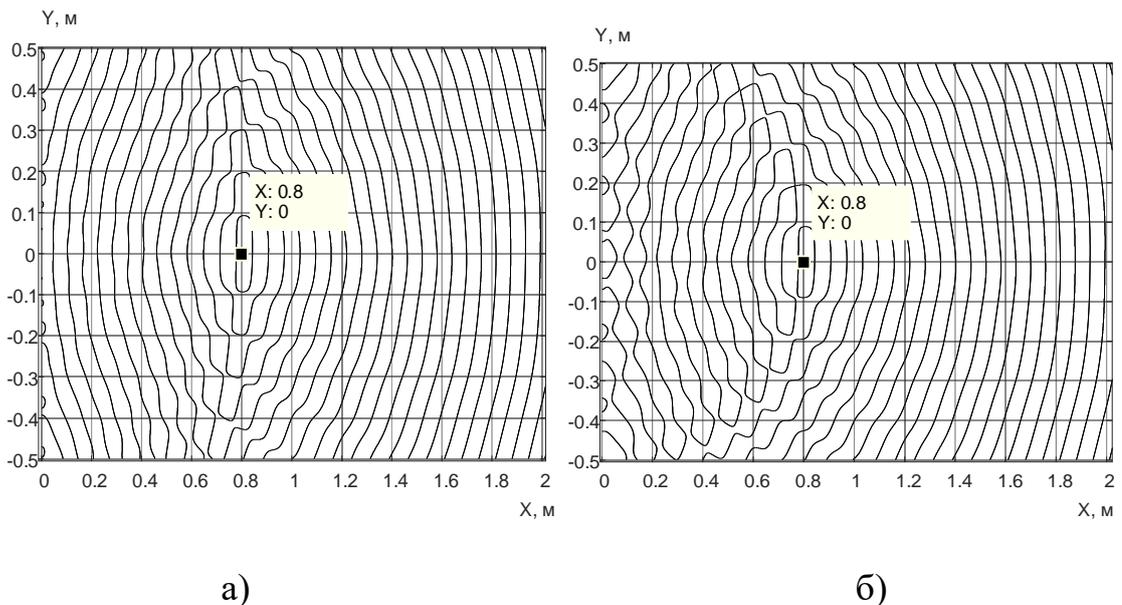


Рисунок 1.6 – Фазовый портрет для антенной решетки, сфокусированной на расстояние 800 мм. а)  $q = 1$ ; б)  $q = 0$ .

Известны способы фокусировки одномерных антенных решеток в заданную точку [31, 33, 36, 39, 58, 102, 103], в них получают ожидаемый нами результат – наблюдается максимум напряженности электрического поля. Однако в рассмотренных способах используются антенные решетки с большим количеством излучателей.

На рисунке 1.7 представлена зависимость амплитуды напряженности электромагнитной волны от расстояния, для большой антенной решетки ( $N = 50$ ), сфокусированной на бесконечность. На том же рисунке представлены зависимости амплитуды напряженности электромагнитной волны от расстояния, для той же антенной решетки, сфокусированной на расстоянии 3000 мм, с наличием эффекта снижения интенсивности ( $q=1$ ) и без учета его ( $q=0$ ).

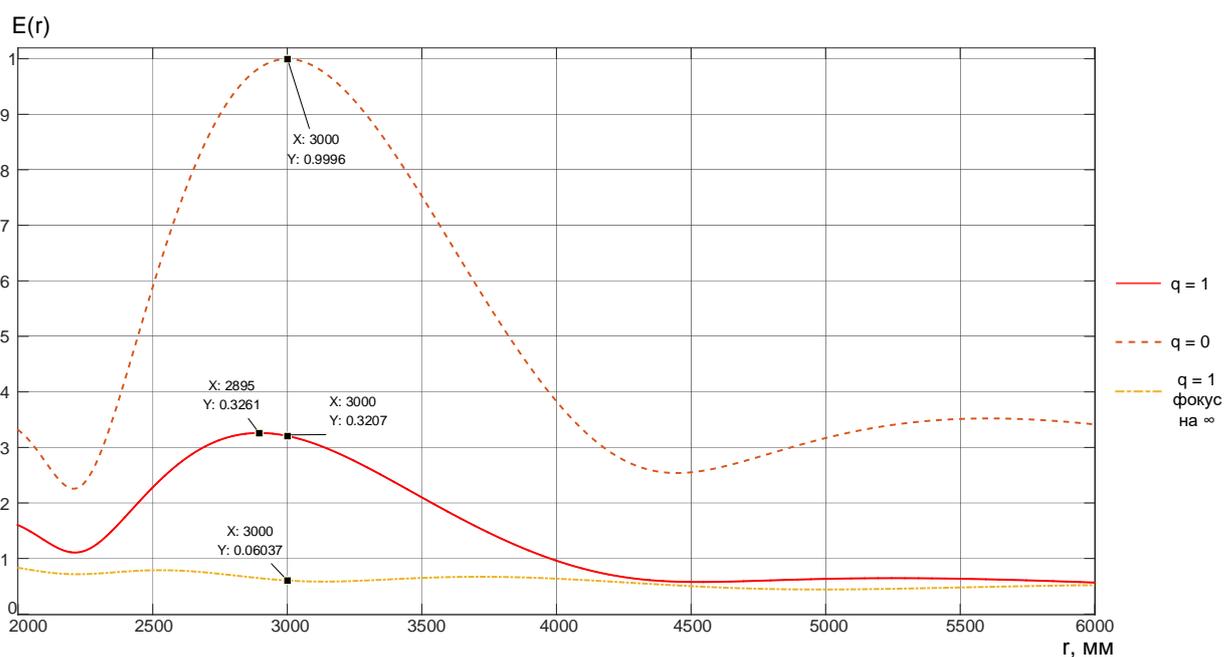


Рисунок 1.7 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния.  $N = 50$

Исходя из результатов расчетов, показанных на рисунке 1.7, видно, что при фокусировке больших антенных решеток наблюдается максимум напряженности электрического поля. Однако, местоположение этого

максимума не совпадает с точкой фокусировки. Он оказывается смещен от точки фокуса в сторону антенной решетки. Объясняется это снижением интенсивности с изменением расстояния. Фактически, смещение максимума напряженности происходит из-за противоборства двух физических явлений. С одной стороны, по мере приближения к точке фокуса фазы электромагнитных волн, излученных элементами антенной решетки, сближаются, что приводит к росту суммарной напряженности. С другой стороны, наблюдается спад напряженности из-за множителя  $1/r$ . Схематично это проиллюстрировано на рисунке 1.8. Очевидно, что чем больше элементов в антенной решетке, тем сильнее первый процесс – максимум напряженности электрического поля в этом случае будет ближе к точке фокусировки (точке синфазного сложения).

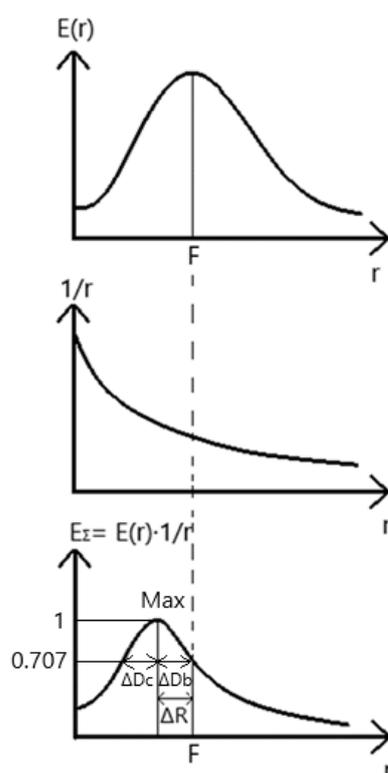


Рисунок 1.8 – К пояснению смещения максимума напряженности электрического поля относительно точки фокусировки

Для того, чтобы оценить влияние размеров антенной решетки на смещение максимума амплитуды напряженности электрического поля,

проведем расчет двух зависимостей для антенных решеток, параметры которых представлены в таблице 1.1.

1. Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для антенных решеток имеющих разное количество излучателей, но равные линейные размеры (антенные решетки 1 – 3 в таблице 1.1). Результат представлен на рисунке 1.9.

2. Зависимость амплитуды напряженности электрического поля для антенных решеток имеющих разное количество излучателей, но постоянный шаг между излучателями (антенные решетки 4 – 6 в таблице 1.1).–Результат представлен на рисунке 1.10.

Во всех расчетах полагалось, что точка фокусировки расположена на расстоянии 800 мм от антенной решетки и мощности, излучаемые всеми антенными решетками равны между собой.

Таблица 1.1

Параметры рассматриваемых антенных решеток

№	N	d
1	10	$\lambda/2$
2	5	$\lambda$
3	3	$3\lambda/2$
4	12	$\lambda/2$
5	15	$\lambda/2$
6	20	$\lambda/2$

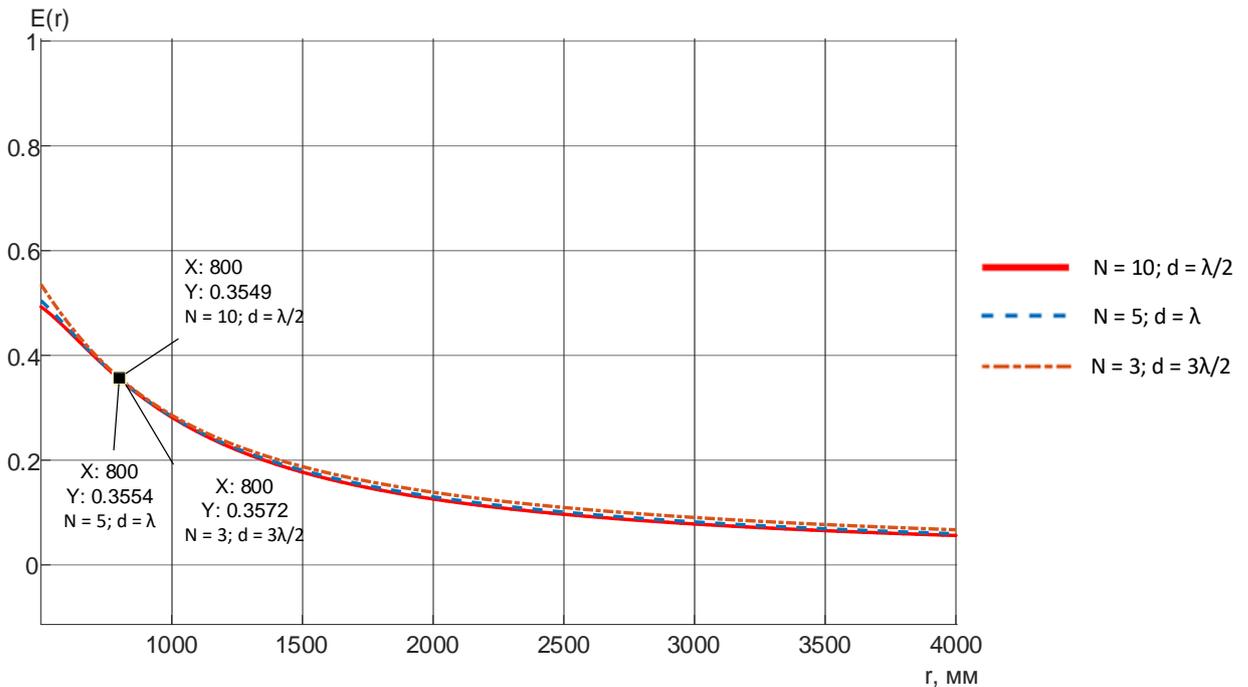


Рисунок 1.9 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля, для антенных решеток, имеющих равные линейные размеры

Исходя из результатов, показанных на рисунке 1.9, понятно, что зависимость амплитуды напряженности электрического поля от дальности до антенной решетки практически не отличается для антенных решеток, имеющих разное количество излучателей, но равный линейный размер (мощности, излучаемые каждой из трех антенных решеток равны между собой). В точке фокуса во всех трех случаях формируется одинаковое значение напряженности электрического поля. Стоит отметить, что антенная решетка, содержащая большее количество излучающих элементов, обеспечивает больший градиент амплитуды напряженности электрического поля в точке фокусировки. В целом, можно утверждать, что уровень напряженности в точке фокуса определяется размером антенной решетки и не зависит от количества излучателей в ней.

Это утверждение не сложно подтвердить аналитически. Для антенной решетки, состоящей из  $N$  излучателей, амплитуда суммарного сигнала в точке фокусировки определяется выражением:

$$A_{\Sigma} = \left| \sum_{n=1}^N \frac{1}{r_n} \cdot A_n \cdot e^{j\phi_n} \right| \quad (1.5)$$

где  $r_n$  - расстояние от  $n$ -того излучателя антенной решетки до точки фокусировки;  $A_n$  - амплитуда сигнала, излучаемого  $n$ -тым элементом антенной решетки;  $\phi_n$  - фаза в точке фокусировки сигнала, излученного  $n$ -тым элементом антенной решетки.

С учетом того, что в точке наблюдения сигналы всех элементов антенной решетки складываются синфазно ( $\phi_n = \phi$ ), а так же принимая излучаемую мощность постоянной при любом количестве элементов антенной решетки ( $A_n^2 = \frac{1}{N}$ ) выражение (1.5) можно записать в следующем виде:

$$A_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{r_n} e^{j\phi} \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{1}{r_n^2}} \quad (1.6)$$

В выражении (1.6) под корнем стоит среднее значение величины, обратной квадрату расстояния от элемента антенной решетки до точки фокуса. величины  $\frac{1}{r^2}$ . Не сложно убедиться, что при фиксированной длине эквидистантной антенной решетки ( $L = N \cdot d = const$ ), расчет по выражению (1.6) будет давать постоянное значение для любых сочетаний  $N$  и  $d$ .

Оценим максимальную величину  $A_{\Sigma}$ . При заданном фокусном расстоянии величина  $A_{\Sigma}$  определяется размером антенной решетки. При возрастании размера антенной решетки среднее расстояние до ее элементов увеличивается. Как следует из (1.6), это приведет к снижению амплитуды напряженности электрического поля в точке фокусировки. Можно записать не строгое неравенство, определяющее максимальную амплитуду напряженности электрического поля в точке фокусировки для сфокусированных линейных антенных решеток:

$$A_{\Sigma} \leq \frac{1}{F} \quad (1.7)$$

Знак равенства в (1.7) справедлив для антенной решетки, состоящей из одного излучателя. При этом среднее расстояние до элемента антенной решетки равно фокусному расстоянию. Это означает, что напряженность электрического поля, формируемая сфокусированной антенной решеткой, будет всегда меньше напряженности, формируемой одиночным излучателем, при равных излучаемых мощностях.

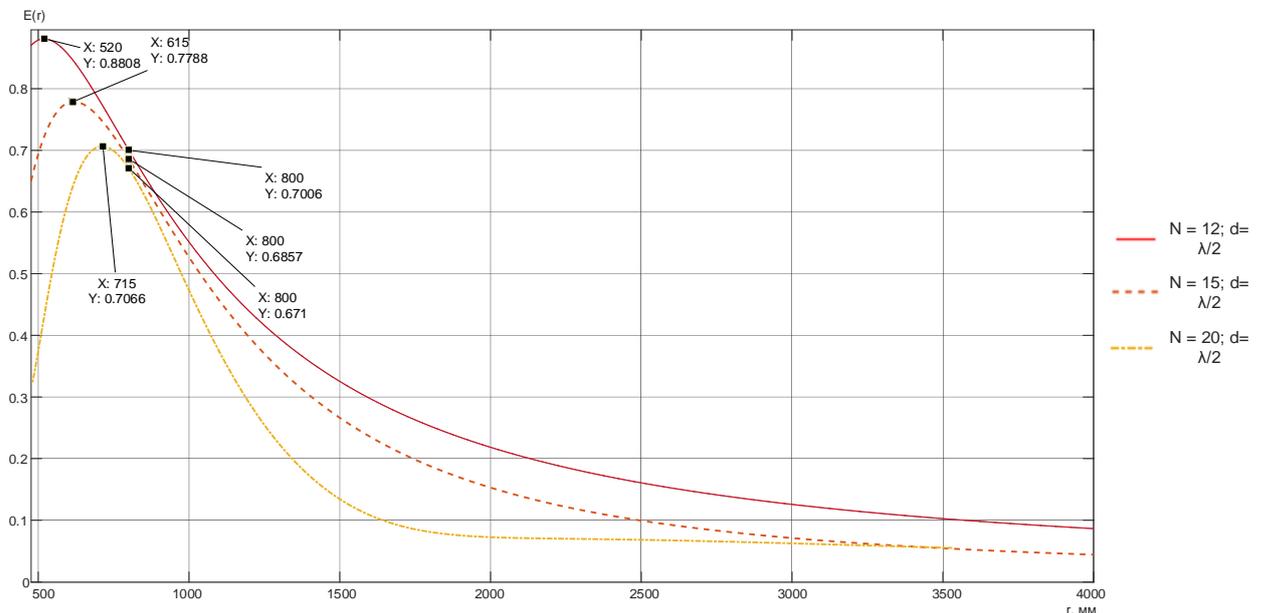


Рисунок 1.10 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля, для антенных решеток, имеющих разные линейные размеры

Исходя из результатов, показанных на рисунке 1.10, можно заметить:

1. При фокусировке линейной антенной решетки в заданную точку, максимум амплитуды напряженности электрического поля формируется не в точке синфазного сложения волн, излученных элементами антенной решетки (точка фокусировки), а смещен в сторону к антенной решетке.

2. Чем больше размер антенной решетки, тем меньше смещение максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки при фиксированном ее положении.

3. Задачи по фокусировке линейной антенной решетки и обеспечение максимума амплитуды напряженности электрического поля необходимо разделять.

#### **1.4 Аналитические выражения для расчета смещения максимума напряженности электрического поля, относительно точки фокусировки**

Для того, чтобы найти связь между величиной смещения точки максимума амплитуды напряженности электрического поля  $\Delta R$  относительно точки синфазного сложения электромагнитных волн проведем расчет зависимости амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для антенных решеток с разным отношением линейных размеров к фокусному расстоянию. Количество излучателей в антенной решетке примем равным  $N = 10$ , линейные размеры антенных решеток будем изменять путем изменения расстояния между парциальными излучателями. В расчетах ограничимся отношением линейных размеров к фокусному расстоянию  $L/F$  от 0.25 до 2. Для обеспечения отношений линейных размеров к фокусному расстоянию диапазон отношений расстояния между излучателями к длине волны будет от 0.20 до 10. Расчеты проведем для следующих фокусных расстояний: 500 мм, 1000 мм, 2000 мм, 3000 мм.

Результат расчета величины смещения точки ( $\Delta R$ ), в которой расположен максимум напряженности электрического поля от точки синфазного сложения электромагнитных волн, представлен на рисунке 1.11. Из рисунка видно, что при увеличении размера антенной решетки относительно фокусного расстояния величина ошибки позиционирования максимума напряженности электрического поля снижается. Для малых фокусных расстояний величина ошибки позиционирования максимума выше.

Это объясняется более быстрым спадом напряженности электрического поля вблизи антенной решетки.

Для совмещения максимума напряженности электрического поля и точке фокусировки линейной антенной решетки требуется антенная решетка размером, значительно превышающим фокусное расстояние. Так, из рисунка 1.11 видно, что даже для обеспечения ошибки позиционирования в 10 % от величины фокусного расстояния требуется антенная решетка, размер которой будет больше фокусного расстояния.

Важно отметить, что полученные зависимости не зависят от количества излучателей, составляющих антенную решетку, а определяются только размером антенной решетки, т.е. разнесом ее крайних излучателей.

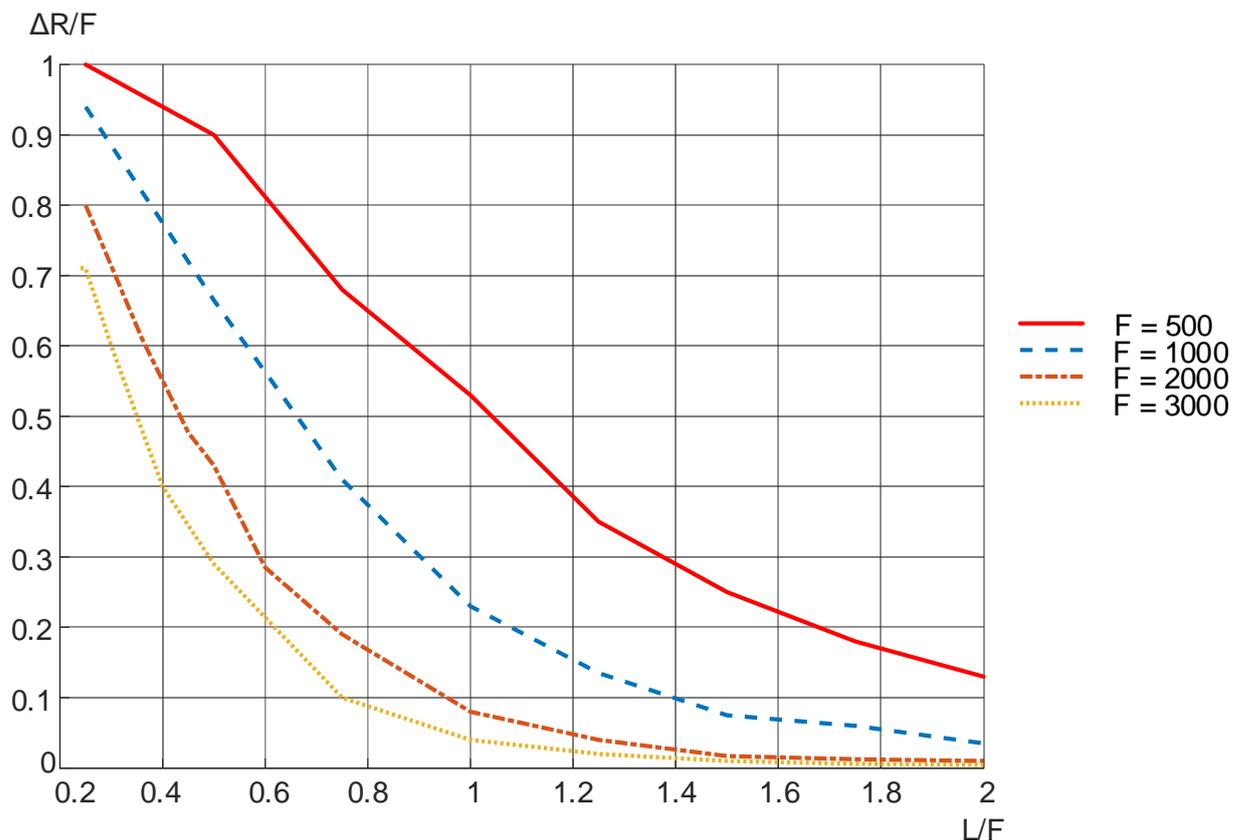


Рисунок 1.11 – Зависимость величины смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля от линейных размеров антенной решетки

Выполним аппроксимацию зависимостей, представленных на рисунке 1.11. Для этого рассмотрим семейство зависимостей, определяющих величину нормированного к фокусному расстоянию смещения максимума напряженности электрического поля от точки синфазного сложения ( $\Delta R / F$ ) как функцию двух переменных: линейного размера антенной решетки ( $L / F$ ) и расстояния от антенной решетки до точки ее фокусировки ( $F$ ). Аппроксимация выполнена с использованием степенного полинома двух переменных относительно  $F$  и  $L/F$ . Коэффициенты полинома определены методом наименьших квадратов и приведены сведены в таблице 1.2.

Ограничимся степенным полиномом третьей степени.

$$\frac{\Delta R}{F}(x, z) = a_1 x^3 + a_2 x^2 z + a_3 x^2 + a_4 x z^2 + a_5 x z + a_6 x + a_7 z^3 + a_8 z^2 + a_9 z + a_{10} \quad (1.8)$$

где  $x = \frac{L}{F}$  - переменная, определяющая отношение линейных размеров антенной решетки к фокусному расстоянию;  $a_i$  - коэффициенты аппроксимирующего полинома,  $z = F$  - переменная, определяющая фокусное расстояние.

Таблица 1.2.

Коэффициенты аппроксимирующего полинома

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
-0.18421	$9.1928 \cdot 10^{-5}$	0.84448	$-4.7901 \cdot 10^{-9}$	-0.00010107
$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
-1.6828	$-5.136 \cdot 10^{-11}$	$3.4927 \cdot 10^{-7}$	0.00082625	1.8332

Для антенных решеток, которые использовались для получения зависимостей с рисунка 1.11, оценим размеры зоны, в пределах которой

формируется высокая напряженность электрического поля. С учетом того, что зависимости, изображенные на рисунке 1.10 не симметричны относительно точки максимума, размер этой зоны будет различным в сторону ближе к антенной решетке и дальше от нее. Обозначим расстояние от точки максимума до точки с уровнем -3 дБ относительно максимума, в сторону антенной решетки как  $\Delta D_c$ , а величину расстояния от точки максимума до уровня -3 дБ относительно максимума, в противоположную от антенной решетки сторону как  $\Delta D_b$  (рисунок 1.8). Семейство зависимостей для  $\Delta D_c$  и  $\Delta D_b$  от размера антенной решетки, нормированного к фокусному расстоянию, показаны на рисунках 1.12 и 1.13 соответственно.

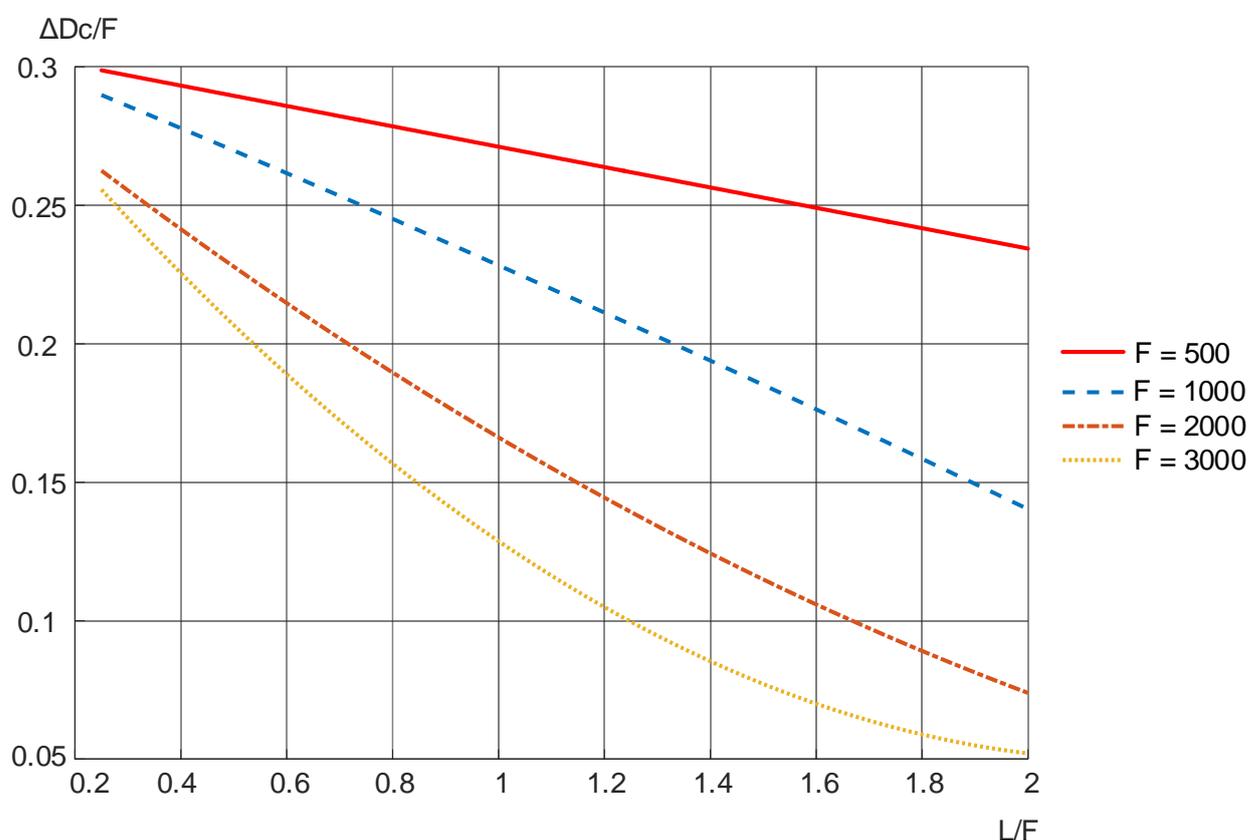


Рисунок 1.12 – Зависимость расстояний  $\Delta D_c$  для различных отношений  $L/F$

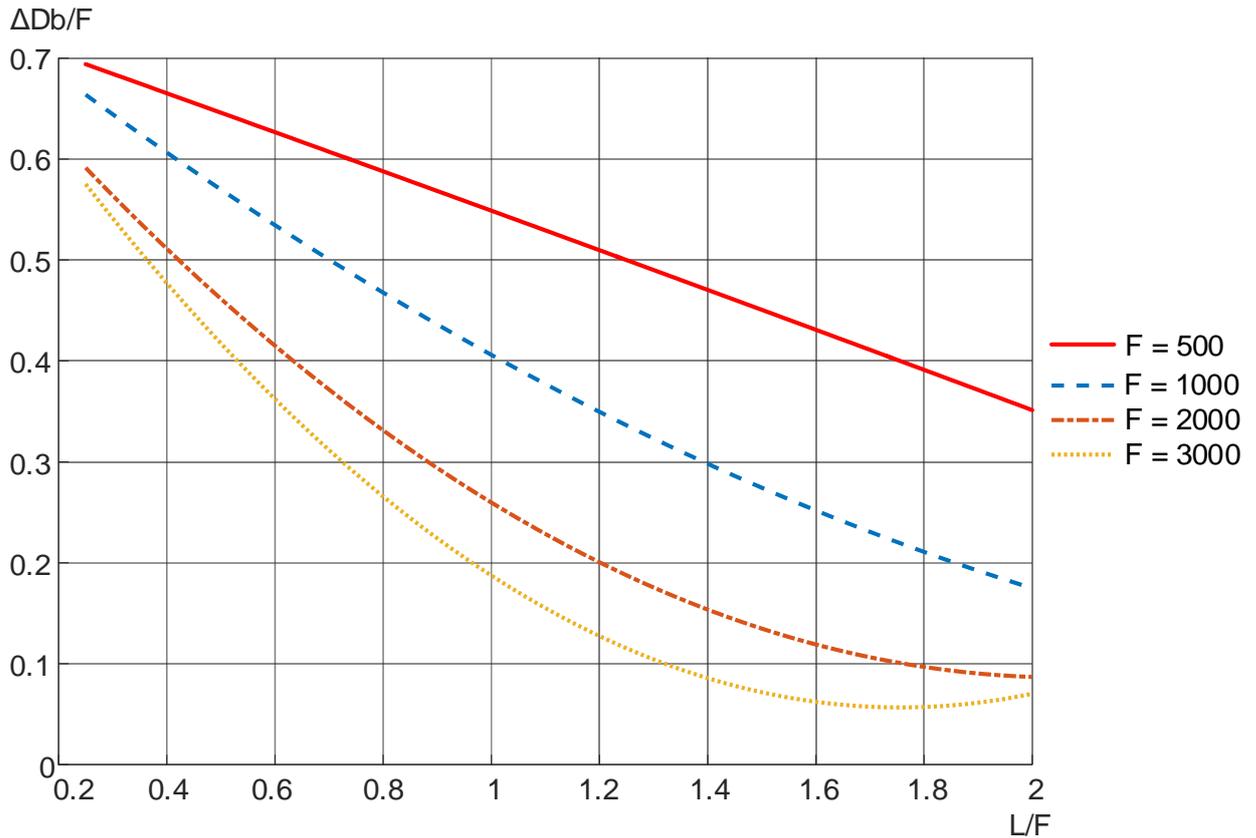


Рисунок 1.13 – Зависимость расстояний  $\Delta D_b$  для различных отношений  $L/F$

По аналогии с величиной смещения максимума напряженности электрического поля от точки синфазного сложения проведем аппроксимацию зависимостей  $\Delta D_c$  и  $\Delta D_b$  с помощью двумерного полинома третьей степени (1.8). Обозначения для переменных  $x$  и  $z$  остаются неизменными. Коэффициенты аппроксимирующих полиномов для расчета  $\Delta D_c/F$  и  $\Delta D_b/F$  приведены в таблицах 1.3 и 1.4 соответственно.

Таблица 1.3.

Коэффициенты аппроксимирующего полинома  $\Delta D_c/F$

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
-0.034667	$3.3685 \cdot 10^{-5}$	0.13226	$2.5668 \cdot 10^{-8}$	-0.00020194
$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
-0.15487	$-1.1267 \cdot 10^{-11}$	$4.6397 \cdot 10^{-8}$	$-2.112 \cdot 10^{-5}$	0.40969

Коэффициенты аппроксимирующего полинома  $\Delta D_b/F$ 

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
0.019333	$7.4344 \cdot 10^{-5}$	-0.13552	$4.1628 \cdot 10^{-8}$	-0.00033989
$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
0.14646	$-3.008 \cdot 10^{-11}$	$1.5884 \cdot 10^{-7}$	0.00025321	0.70614

## Выводы.

1. Получены аналитические выражения, позволяющие определить величину смещения максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки линейной антенной решетки и размер зоны высокой напряженности при заданном размере антенной решетки.
2. В окрестности точки максимума напряженности электрического поля формируется зона, в пределах которой напряженность снижается от максимального значения. Она всегда вытянута в сторону от антенной решетки ( $\Delta D_c < \Delta D_b$ ). Ее размеры по уровню -3 дБ зависят от линейных размеров антенной решетки и фокусного расстояния. При фиксированном фокусном расстоянии, увеличение линейного размера антенной решетки, приводит к уменьшению размера этой зоны.
3. Смещение максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки тем сильнее, чем меньше отношение размера антенной решетки к фокусному расстоянию. Для антенной решетки большого размера (кратно превышающего величину фокусного расстояния) смещение не превышает единиц процентов от фокусного расстояния.

### 1.5 Постановка цели и задач исследования

Таким образом, можно утверждать, что в вопросах формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства существует ряд актуальных и не решенных задач.

Основная проблема заключается в том, что точка синфазного сложения электромагнитных волн и точка максимума амплитуды электрического поля – это две разные пространственно разнесенные точки. В литературе не рассмотрены способы позиционирования максимума амплитуды электрического поля в заданную точку пространства. Практически не изучены способы формирования нескольких зон высокой амплитуды напряженности электрического поля в заданной области пространства.

**Цель диссертационного исследования** для сетей беспроводной передачи данных предложить метод, обеспечивающий позиционирование нескольких зон высокой напряженности электрического поля в заданной области пространства.

Исходя из вышесказанного сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Для линейных антенных решеток, сфокусированных на конечное расстояние, установить взаимосвязь между их размерами и величиной смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля от точки фокусировки.
2. Установить взаимосвязь между линейными размерами антенной решетки, фокусным расстоянием и размерами формируемой зоны повышенной напряженности электрического поля.
3. Оценить возможности формирования зоны высокой напряженности электрического поля, используя несколько одинаковых линейных антенных решеток.

4. Разработать математический аппарат, позволяющий рассчитывать амплитуды и начальные фазы сигналов, подводимых к парциальным излучателям антенной решетки, позволяющий обеспечить требуемое распределение электрического поля в пределах заданной области пространства.
5. Разработать макет сфокусированной антенной решетки и провести с его помощью экспериментальную апробацию полученных теоретических результатов.

### 1.6 Выводы по первому разделу

1. Установлено, что координаты максимума амплитуды электрического поля не совпадают с координатами точки синфазного сложения электромагнитных волн. Максимум напряженности электрического поля всегда смещен в направлении к антенной решетке относительно точки синфазного сложения электромагнитных волн. Это явление обусловлено снижением амплитуды напряженности электрического поля при удалении от источника излучения. Точнее в силу того, что скорость снижения амплитуды напряженности электрического поля при удалении от антенной решетки оказывается выше скорости ее нарастания за счет сближения фаз электромагнитных волн, излученных каждым из элементов антенной решетки.

2. Так как местоположение точки синфазного сложения (точки фокусировки) и максимума напряженности электрического поля не совпадает, целесообразно выделить три различные задачи: фокусировка электромагнитного излучения в заданной точке пространства; обеспечения максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства; обеспечения минимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства. Решение каждой из этих задач требует различного амплитудно-фазового распределения поля по апертуре излучающей антенны.

3. Установлено, что величина смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля зависит от линейных размеров антенной решетки.

4. Сформулированы критерии качества концентрации электрического поля в заданной области пространства.

5. Сформулирована цель и основные задачи диссертационного исследования.

## **2. Формирование максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства сфокусированной линейной антенной решеткой**

В разделе 1 показано, что для линейных антенных решеток, сфокусированных на конечное расстояние, местоположение точки, в которой наблюдается максимальная напряженность электрического поля, не совпадает с местоположением точки синфазного сложения электромагнитных волн от элементов антенной решетки. Таким образом, обеспечить максимум напряженности электрического поля в требуемой точке пространства путем фокусировки излучения антенной решетки в эту точку невозможно. Для линейных антенных решеток способы, обеспечивающие позиционирование максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства, не рассмотрены в литературе. Это определяет **цель настоящего раздела** – обосновать возможность позиционирования максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства с помощью сфокусированных на конечное расстояние линейных антенных решеток.

Для достижения указанной цели решены следующие **задачи**:

1. Предложить алгоритм компенсации смещения точки максимума напряженности электрического поля от требуемой точки.
2. Рассмотреть возможность формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства, с помощью нескольких линейных антенных решеток.

## 2.1 Компенсация смещения точки максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки

На основании результатов, которые были получены в предыдущем разделе, возникает задача по компенсации величины смещения точки  $\Delta R$ , в которой расположен максимум напряженности электрического поля от требуемой точки. Ее решению посвящен настоящий подраздел.

Для этого предлагается фокусировать антенную решетку на более дальнее расстояние, чем то, где требуется обеспечить максимум напряженности электрического поля. Новое фокусное расстояние подбирается таким, чтобы смещенный относительно него максимум напряженности электрического поля попадал в точку с требуемыми координатами. Компенсацию смещения предлагается проводить итерационным способом, пошагово увеличивая фокусное расстояние для антенной решетки. Важно помнить, что согласно зависимостям, приведенных на рисунках 1.12 и 1.13, размер зоны в окрестностях максимума напряженности электрического поля по уровню -3 дБ будет увеличиваться в след за увеличением фокусного расстояния.

Итерационный алгоритм, обеспечивающий позиционирование максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства содержит следующие шаги.

1. Задать геометрический размер антенны, координаты точки, в которой требуется сформировать максимум напряженности электрического поля и допустимую погрешность по координатам формирования максимума амплитуды напряженности.

2. Для заданного размера антенны и координат точки максимума напряженности электрического поля по выражению (1.8) рассчитать величину смещения максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки ( $\Delta R$ ).

3. Увеличить фокусное расстояние антенной решетки на полученное значение смещения  $F_i = F_{i-1} + \Delta R$ , где  $\Delta R$  - смещение максимума напряженности электрического поля относительно точки его требуемого положения,  $F_i$  - фокусное расстояние на  $i$ -том шаге;  $F_{i-1}$  - фокусное расстояние на предыдущем шаге алгоритма.

4. Повторять действия по пунктам 2 – 4 до тех пор, пока величина смещения координаты максимума напряженности электрического поля от требуемой точки максимума напряженности электрического поля превышает целевое значение.

Рассмотрим пример реализации алгоритма компенсации смещения точки максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки. Пусть требуется с помощью антенной решетки с параметрами  $N = 20$  расстоянием между излучателями 60 мм ( $\frac{d}{\lambda} = 0.5$ ) обеспечить максимум напряженности электрического поля на расстоянии  $F = 1000$  мм от антенной решетки. Целевое значение погрешности смещения максимума напряженности электрического поля зададим равным 2%. Выполняя операции по предложенному итерационному алгоритму, установить максимум амплитуды напряженности электрического поля для заданных исходных данных удалось, задав фокусное расстояние  $F = 1210$  мм. На рисунке 2.1 продемонстрированы три зависимости амплитуды напряженности электрического поля от дальности, полученные на разных шагах итерационного алгоритма.

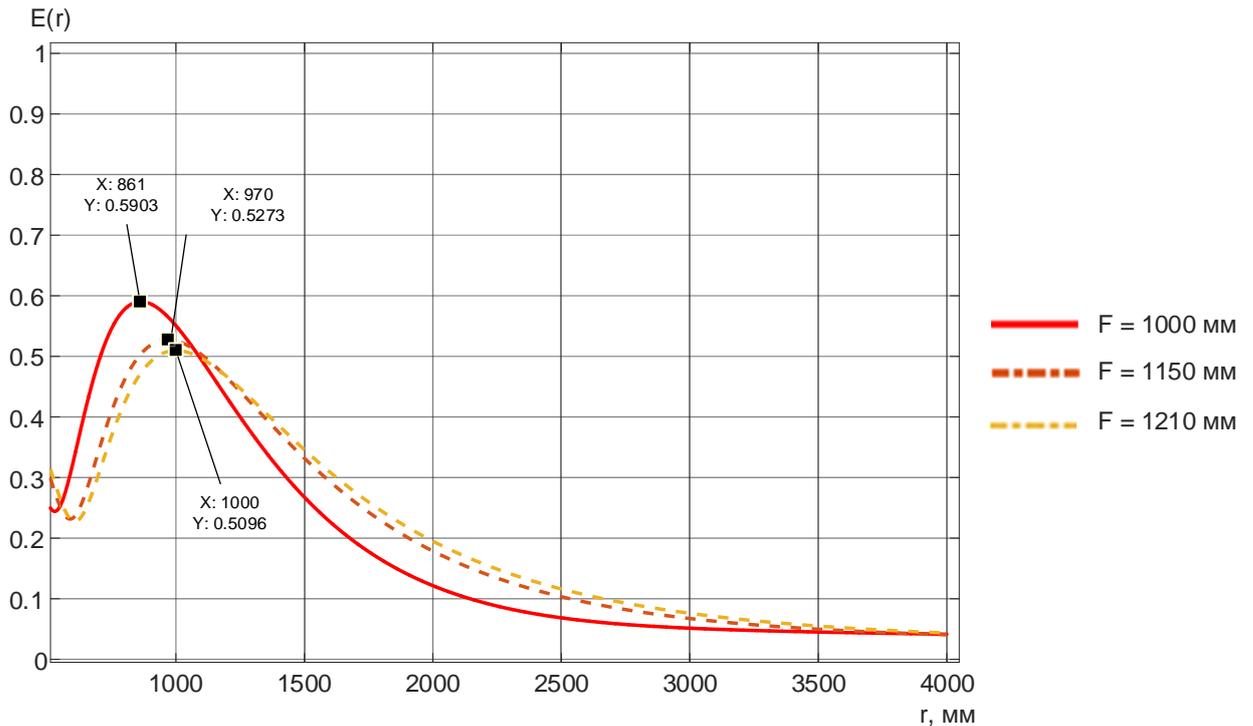


Рисунок 2.1 – Зависимости амплитуды напряженности электрического поля от дальности, полученные на разных шагах итерационного алгоритма

На рисунке 2.1 заметно, что, как и ожидалось, увеличение фокусного расстояния приводит к расширению зоны повышенной напряженности электрического поля. Размер зоны в окрестности максимума амплитуды напряженности электрического поля по уровню  $-3$  дБ для фокусного расстояния  $F = 1000$  мм составляет  $\Delta D_c = 210$  мм и  $\Delta D_b = 361$  мм, а для фокусного расстояния  $F = 1210$  мм  $\Delta D_c = 254$  мм и  $\Delta D_b = 476$  мм. Размер зоны в окрестности максимума амплитуды напряженности электрического поля по уровню  $-3$  дБ вырос на 159 мм. Основные характеристики зоны окрестности максимума на всех шагах алгоритма представлены в таблице 2.1.

Основные характеристики зоны окрестности максимума амплитуды напряженности электрического поля

F, мм	$\Delta R$ , мм	$D_c$ , мм	$D_b$ , мм	$\Delta D = \Delta D_c + \Delta D_b$ , мм
1000	130	210	361	571
1150	30	249	433	682
1210	0	254	476	730

Для более наглядной демонстрации расширения зоны в окрестностях максимума амплитуды напряженности электрического поля при росте фокусного расстояния, рассмотрим еще один случай формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства. Параметры антенны относительно прошлого эксперимента остались без изменений. Расстояние, от антенны до точки, где должна обеспечиваться максимальная напряженность электрического поля, составляет 2000 мм. Отношение  $L/F = 0.6$ . Целевое значение погрешности установления координаты максимума амплитуды напряженности 2%. На рисунке 2.2 представлены зависимости, полученные на разных шагах итерационного алгоритма.

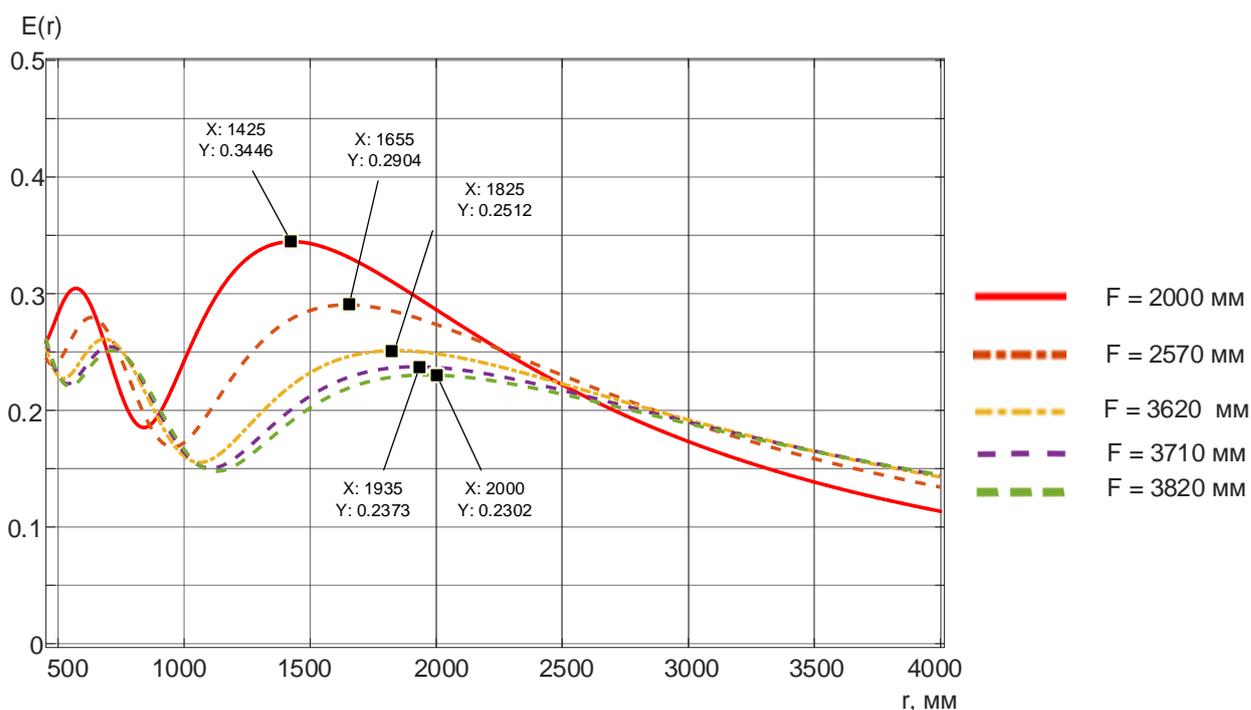


Рисунок 2.2 – Зависимости амплитуды напряженности электрического поля от дальности, полученные на разных шагах итерационного алгоритма. По зависимостям, показанным на рисунке 2.2, можно видеть, что обеспечить максимум в заданной точке удалось только при  $F = 3820$  мм. Амплитуда напряженности электрического поля в сравнении с между точками максимума в координатах  $X = 1425$  и  $X = 2000$  снизилась на 3.5 дБ. Размер зоны в окрестности максимума для фокусного расстояния  $F = 2000$  мм по уровню -3 дБ составляет  $\Delta D_c = 422$  мм и  $\Delta D_b = 893$  мм, а для фокусного расстояния  $F = 3820$  мм  $\Delta D_c = 731$  мм и  $\Delta D_b = 1544$  мм, т.е. размер зоны повышенной напряженности электрического поля по уровню -3 дБ вырос на 960 мм, то есть почти в два раза относительно размера на первом шаге. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.2.

Нельзя не отметить, что позиционирование максимума напряженности электрического поля в заданную точку привело в конечном счете к снижению амплитуды напряженности электрического поля. Это объясняется тем, что зона повышенной напряженности стала шире. Энергия оказалась «размазанной» по большей области пространства. Вместе с тем, без

компенсации смещения (кривая для  $F=2000$  на рисунке 2.2), рассматриваемая точка попадает на край формируемой зоны повышенной напряженности электрического поля. Применительно беспроводным сетям передачи данных это означало бы не корректную пространственную селекцию абонентов.

Таблица 2.2

Основные характеристики зоны максимума амплитуды напряженности электрического поля

$F$ , мм	$\Delta R$ , мм	$D_c$ , мм	$D_b$ , мм	$\Delta D = \Delta D_c + \Delta D_b$ , мм
2000	575	422	893	1315
2570	345	535	1141	1676
3620	175	576	1450	2026
3710	65	675	1500	2175
3820	0	731	1544	2275

Выводы.

1. Формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданных координатах пространства возможно за счет фокусировки антенной решетки на большее расстояние. Координаты этой новой точки могут быть определены предложенным итерационным алгоритмом.
2. Фокусировка антенной решетки на более дальнее расстояние приводит к снижению напряженности электрического поля в требуемой точке и расширению зоны повышенной напряженности электрического поля в окрестностях этой точки. Эти два эффекта выражены тем сильнее, чем большую величину смещения точки максимальной амплитуды напряженности электрического поля от требуемого местоположения необходимо компенсировать.

## **2.2 Формирование максимума напряженности электрического поля в заданной точке с применением нескольких антенных решеток**

Формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля с использованием одной одномерной антенной решетки приводит к тому, что происходит смещение максимума напряженности электрического поля в сторону антенной решетки. При компенсации этого смещения за счет фокусировки антенной решетки в более дальней точке происходит снижение напряженности электрического поля в требуемой точке и расширение зоны повышенной напряженности электрического поля в окрестностях этой точки. Для компенсации этих недостатков рассмотрим случай использования двух одномерных решеток для обеспечения максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства.

Очевидными являются следующие конфигурации антенных решеток относительно точки максимума напряженности электрического поля.

1. Антенные решетки параллельны друг другу и равноудалены от точки фокусировки (рис. 2.3).
2. Антенные решетки параллельны друг другу и разнесены на разные расстояния от точки фокусировки (рис. 2.6).
3. Антенные решетки ортогональны друг другу и равноудалены от точки фокусировки (рис. 2.11).
4. Антенные решетки ортогональны друг другу и разнесены на разные расстояния от точки фокусировки (рис. 2.17).

### **2.2.1 Использование двух параллельных одномерных антенных решеток, для обеспечения максимума напряженности электрического поля в одной заданной точке пространства**

На рисунке 2.3 представлена конфигурация двух одинаковых антенных решеток, расположенных друг напротив друга, сфокусированных в одну точку, равноудаленную от каждой из антенных решеток.

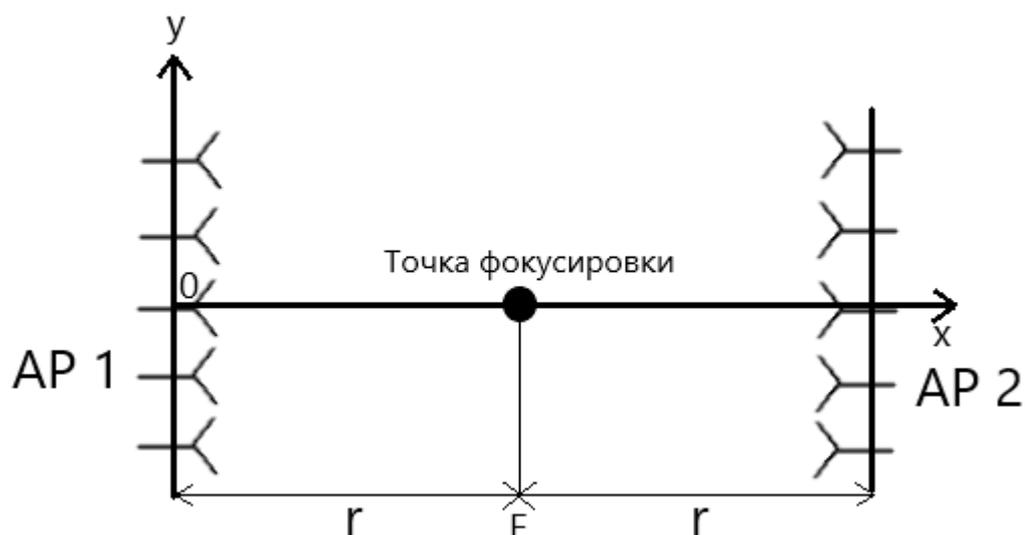


Рисунок 2.3 – Конфигурация двух антенных решеток, расположенных друг напротив друга, сфокусированных в одну точку

Спадающее по интенсивности излучение от обеих антенных решеток (рисунок 1.10) можно представить как два независимых фактора. Обозначим зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния до первой и второй антенных решеток как  $E_1(r)$  и  $E_2(r)$  соответственно. Каждая антенная решетка сформирует максимум амплитуды напряженности электрического поля, который будет смещен относительно точки синфазного сложения электромагнитных волн  $\Delta R$  в сторону соответствующей антенной решетки. Эту величину можно рассчитать, пользуясь степенным полиномом (1.8) и коэффициентами, приведенными в таблице 1.2 или пользуясь рисунком 1.11. Как говорилось ранее, в окрестностях точки максимума напряженности электрического поля формируется зона повышенной напряженности электрического поля. От каждой антенной решетки эти зоны будут пересекаться в точке, имеющий некоторый уровень напряженности электрического поля, определяемый расстоянием до точки фокусировки и размерами антенной решетки. Возможно три случая: зоны пересекнутся по уровню ниже -3 дБ от максимума; зоны пересекнутся по уровню -3 дБ от максимума; зоны пересекнутся по уровню выше -3 дБ от максимума. Рассмотрим эти случаи подробнее.

В случае, если зоны повышенной напряженности электрического поля пересекутся в точке с напряженностью менее -3 дБ относительно точек максимума напряженности электрического поля, то в месте пересечения будет «провал» по суммарной напряженности электрического поля (рисунок 2.4, кривая а). Будет наблюдаться два максимума напряженности электрического поля равноотстоящих от требуемой точки. Расстояние от требуемой точки до этих максимумов можно рассчитать по выражению (1.8) с использованием коэффициентов из таблицы 1.2.

Если зоны повышенной напряженности электрического поля пересекутся по уровню -3 дБ, то в окрестности точки пересечения сформируется «плато» уровня напряженности электрического поля. Уровень «плато» совпадает с уровнями в точках максимума напряженности электрического поля для каждой антенной решетки (если рассматривать зависимости амплитуды напряженности электрического поля для каждой из антенных решеток по отдельности) (рисунок 2.4, кривая б). Размер «плато» зависит от смещения максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки и размеров  $D_{b1}$  и  $D_{b2}$  – размеров зоны повышенной напряженности электрического поля по уровню -3 дБ в сторону от формирующей антенной решетки. При этом должно выполняться условие  $\Delta D_b = \Delta R$ , т.е. размер зоны повышенной напряженности должен быть равен смещению максимума амплитуды напряженности относительно точки синфазного сложения волн. Общий размер «плато» по уровню -3 дБ от максимального значения определяется выражением:

$$\Delta D_{\Sigma} = \Delta D_{c1} + \Delta D_{b1} + \Delta D_{b2} + \Delta D_{c2} \quad (2.1)$$

В случае, если зоны повышенной напряженности электрического поля пересекутся по уровню более -3 дБ, то образуется максимум, по уровню превышающем точки максимума амплитуды напряженности электрического поля от каждой антенной решетки в отдельности (рисунок 2.4, кривая в).

При этом, очевидно, должно выполняться условие  $\Delta D_b > \Delta R$ , т.е. размер зоны повышенной напряженности должен быть больше смещения максимума амплитуды напряженности относительно точки синфазного сложения волн.

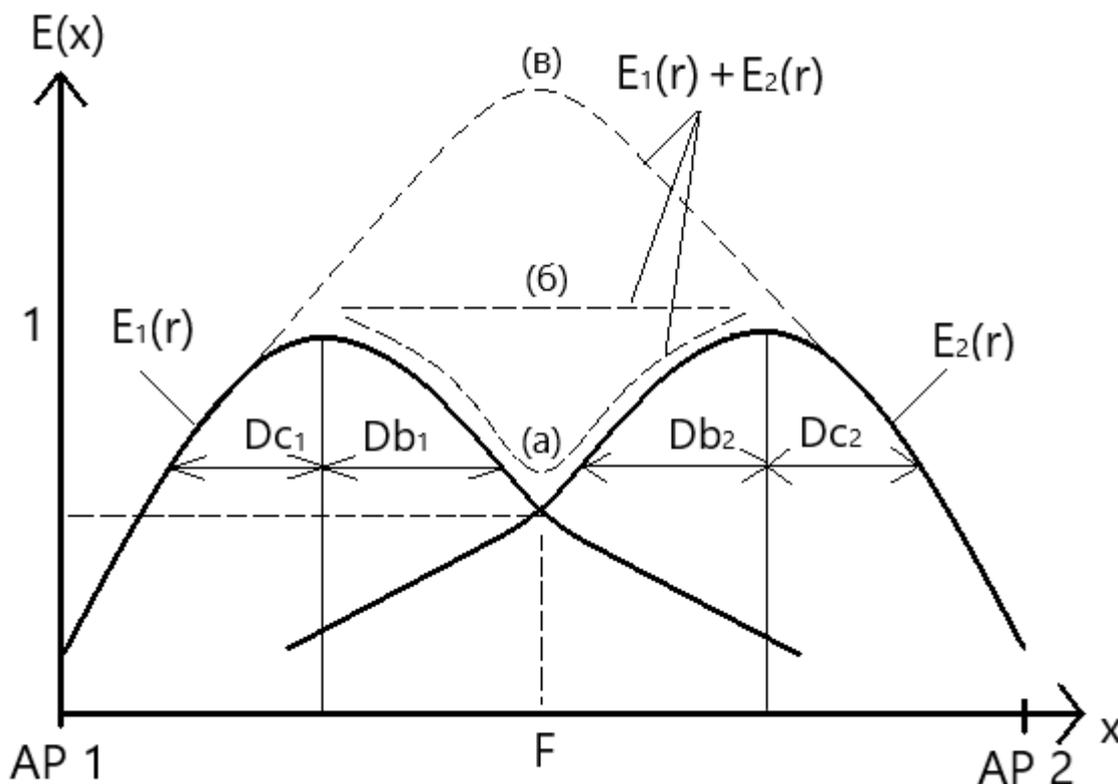


Рисунок 2.4 – Схематичное представление зависимости амплитуды напряженности электрического поля, для двух параллельных антенных решеток, равноудаленных от точки фокусировки.

Подтвердим выдвинутые предположения математическим моделированием. Для этого рассмотрим конфигурации, соответствующие трем ранее описанным случаям.

Проведем расчет зависимости амплитуды напряженности электрического поля от расстояния, для двух антенных решеток, расположенных напротив друг друга на расстоянии 4000 мм и сфокусированных на 2000 мм. Рассмотрим пары, сформированные четырьмя антенными решетками следующих размеров:

1.  $N = 12, d = \lambda/2;$

2.  $N = 15, d = \lambda/2;$
3.  $N = 20, d = \lambda/2;$
4.  $N = 30, d = \lambda/2.$

Амплитуды сигналов для всех излучающих элементов обеих антенны решеток равны между собой, для каждой из решеток фазы излучаемых сигналов определялись по соотношению (1.4). Смещение точки максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки и размер зоны высокой напряженности электрического поля для всех рассматриваемых антенных решеток приведены в таблице 2.3. Из таблицы 2.3 видно следующее. Антенные решетки 1 и 2 соответствуют случаю пересечения напряженностей электрического поля по уровню ниже -3 дБ от максимума. Использование антенных решеток 3 обеспечивает пересечение напряженностей электрического поля по уровню примерно -3 дБ от максимума и должно приводить к образованию «плато» протяженностью порядка 2200 мм. Максимум напряженности электрического поля при этом будет формироваться в требуемой точке. Для антенной решетки 4 происходит сложение напряженностей электрического поля, формируемых каждой из антенных решеток, по уровню выше -3 дБ. При этом максимум напряженности электрического поля будет установлен точно в требуемой координате, в окрестности которой будет сформирована зона высокой напряженности электрического поля размером 1156 мм. Результаты расчетов показаны на рисунке 2.5 (а). На рисунке 2.5 (б) представлена трехмерная зависимость амплитуды напряженности электрического поля для двух параллельных антенных решеток с  $N = 15$ .

Как можно наблюдать из рисунка 2.5 (б) координаты максимумов амплитуды напряженности электрического поля численно близки к результатам, показанным на рисунке 2.5 (а). Также на рисунке 2.5 (б) можно заметить чередование максимумов и минимумов напряженности электрического поля это связано с эффектом стоячей волны – интерференцией

электромагнитных волн, которые распространяются в противоположном направлении. Уравнение, описывающее стоящую волну, которая сформирована двумя волнами, имеющими равную амплитуду и частоту, можно записать в виде:

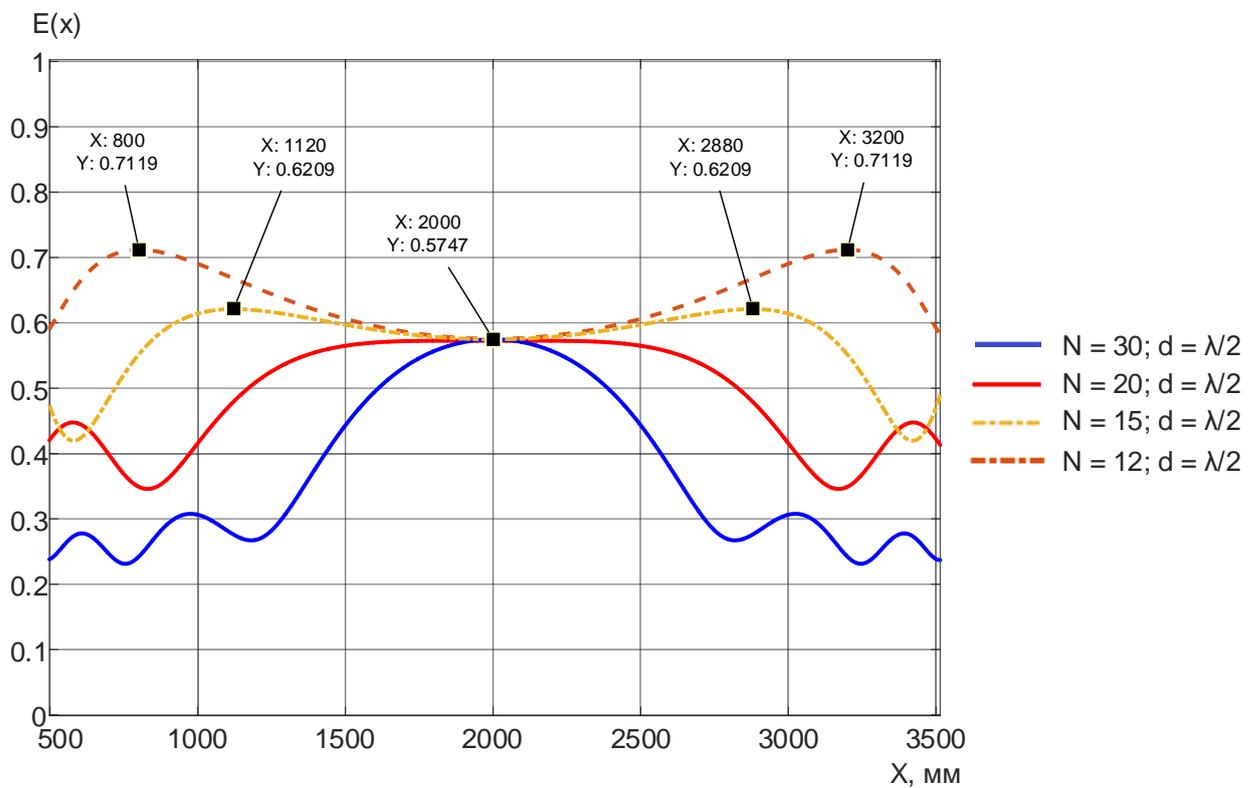
$$A(x,t) = A_0 \cos(\beta x - \varphi_0) \cos(\omega t), \quad (2.2)$$

где  $A_0$  – амплитуда,  $\beta$  – коэффициент фазы,  $\omega$  – круговая частота,  $x$  – координата расстояния,  $\varphi_0$  – разность начальных фаз колебаний. Из (2.2) видно, что расположение максимумов амплитуды напряженности электрического поля будут зависеть от значений разности начальных фаз  $\varphi_0$ . Это приведет к тому, что положение пучностей будет связано с заданными координатами фокусировки. Также стоит отметить, что чередование максимумов и минимумов стоящей волны будет происходить за половину периода колебаний  $\frac{T}{2}$ , где  $T = \frac{1}{f}$ .

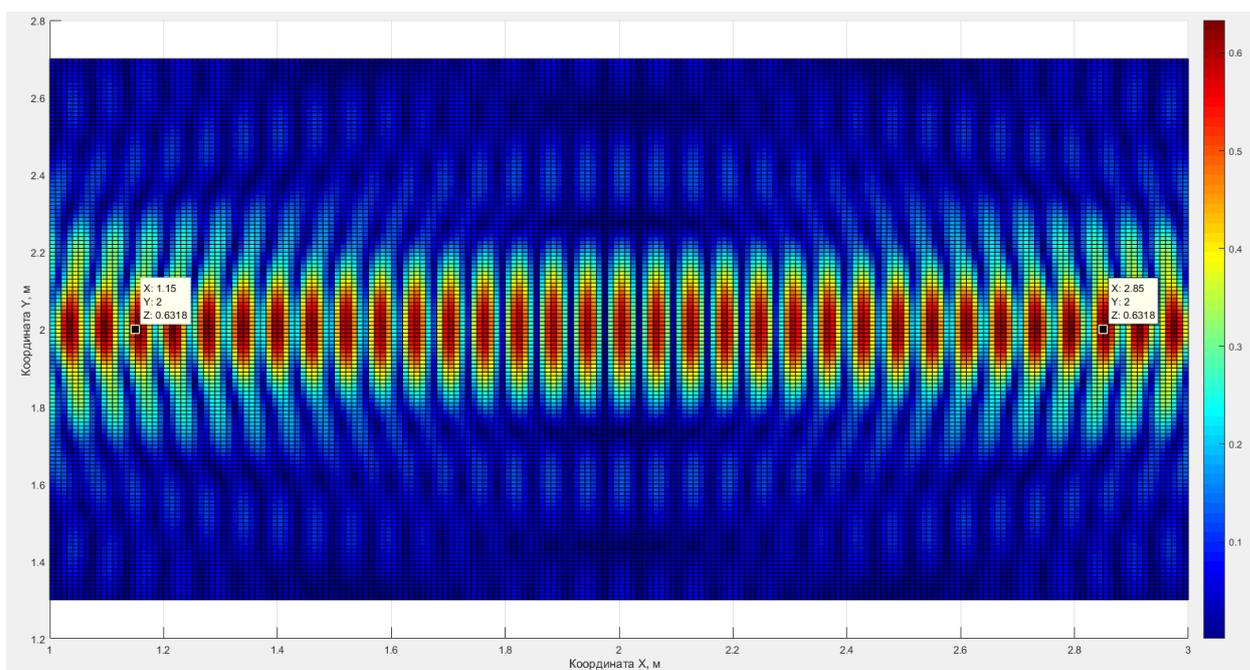
Участки стоячей волны с наибольшей амплитудой напряженности электрического поля называются пучностями стоячей волны. Участки с минимальной амплитудой напряженности электрического поля называются узлами стоячей волны. Расстояние между пучностями стоячей волны равно половине длины волны  $\lambda / 2$  [104], расстояние между узлами стоячей волны тоже равно  $\lambda / 2$ . Местоположение максимумов (пучностей) будет зависеть от начальной фазы сигналов, излучаемого антеннами. Это связано с тем, что пучности образуются за счет синфазного сложения электромагнитных волн, соответственно изменение начальной фазы изменит местоположение пучностей. Результаты, показанные на рисунке 2.5 (б) не противоречат теории, описывающей стоячие волны [104].

## Характеристики используемых антенных решеток

№	N	L, м	$D_c$ , мм	$D_b$ , мм	$\Delta R$ , мм
1	12	0.72	646	930	1230.4
2	15	0.9	589.8	867.6	918
3	20	1.2	507.2	766.6	574.2
4	30	1.8	377.8	578.2	230.4



a)



б)

Рисунок 2.5 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния, для двух антенных решеток, расположенных напротив друг друга. а) двумерное семейство зависимостей; б) трехмерная зависимость для  $N = 15$ .

Анализируя результаты, представленные в таблице 2.3, а также на рисунке 2.5 становится ясно, что на формирование единого максимума в заданной точке влияет только размер  $\Delta D_b$  – размер зоны, по уровню -3 дБ, повышенной напряженности электрического поля в противоположную от антенной решетки сторону. Другими словами, размер  $\Delta D_b$  – это размер зоны повышенной напряженности электрического поля от точки максимума напряженности электрического поля в направлении точки синфазного сложения электромагнитных волн. Таким образом при решении задачи формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства размер  $\Delta D_c$  – размер зоны, по уровню -3 дБ, повышенной напряженности электрического поля от точки максимума в сторону антенной решетки не влияет на формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства.

Отсутствие влияния размера  $\Delta D_c$  на формирование максимума напряженности электрического поля объясняется тем, что эта зона не участвует в пересечении с аналогичной зоной у второй антенной решетки из-за своего расположения в сторону антенной решетки. Следовательно, для решения поставленной задачи достаточно знать только параметр  $\Delta D_b$ .

Вторым важным параметром в решении задачи обеспечения максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства является параметр смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля  $\Delta R$  в сторону антенной решетки. На основании полученных данных для того, чтобы образовался «провал» по значениям амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства достаточно того, чтобы зоны повышенной напряженности электрического поля пересеклись в требуемой точке по уровню меньше, чем -3 дБ. Этому случаю удовлетворяет условие  $\Delta D_b < \Delta R$ , что подтверждается результатам для антенных решеток  $N = 12$  и  $N = 15$ . Для того, чтобы образовалось «плато» в окрестностях точки пересечения, для этого достаточно того, чтобы зоны повышенной напряженности пересеклись по уровню -3 дБ. Для этого случая удовлетворяет условие  $\Delta D_b = \Delta R$ , что наблюдается для антенной решетки  $N = 20$ . Для того чтобы образовался один максимум амплитуды напряженности электрического поля, необходимо, чтобы зоны повышенной напряженности электрического поля пересекались по уровню большему, чем -3 дБ. Для этого случая удовлетворяет условие  $\Delta D_b > \Delta R$ , это наблюдается для антенной решетки  $N = 30$ .

### **2.2.2 Две параллельные антенные решетки, разнесенные на разное расстояние от точки фокуса**

На рисунке 2.6 представлена конфигурация двух антенных решеток, расположенных друг напротив друга, сфокусированных в одну точку и удаленных на разное расстояние от нее.

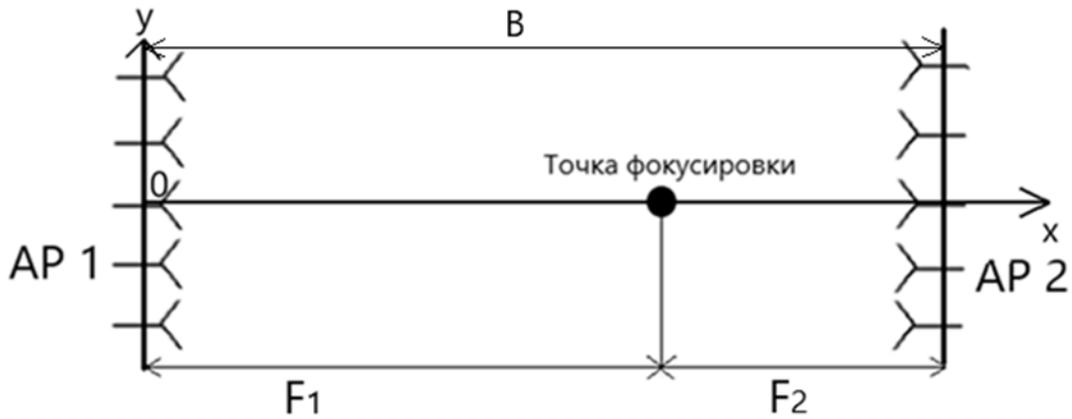


Рисунок 2.6 – Конфигурация двух антенных решеток, расположенных друг напротив друга, сфокусированных в одну точку и удаленных на разное расстояние от точки фокусировки

Спадающее по интенсивности излучение от двух антенных решеток рассмотрим, как два независимых явления. Для первой (AP 1) и второй (AP 2) антенной решетки обозначим зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния как  $E_1(r)$  и  $E_2(r)$  соответственно. Каждая антенная решетка будет формировать свой максимум амплитуды напряженности электрического поля.

Из рисунка 1.11 и выражения (1.8) известно, что величина смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля  $\Delta R$  относительно точки синфазного сложения волн зависит от отношения линейных размеров антенной решетки к фокусному расстоянию  $L/F$ . Очевидно, что антенные решетки, сфокусированные в одну точку пространства, но разнесенные от нее на разное расстояние будут иметь различное фокусное расстояние. Следовательно, величина смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля для AP 1 и AP 2 будет различная.

Стоит отметить, что согласно зависимостям, показанных на рисунках 1.12 и 1.13, размер зоны повышенной напряженности электрического поля в окрестностях точки максимума амплитуды напряженности электрического

поля тоже зависит от отношения линейных размеров антенной решетки к фокусному расстоянию  $L/F$ .

Таким образом для AP 1 и AP 2 будет отличаться не только величина смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля, но и размеры зоны повышенной напряженности электрического поля в окрестностях точки максимума. Можно предположить, что при различных конфигурациях антенных решеток возможны следующие варианты:

1. Формирование двух максимумов амплитуды напряженности электрического поля в непосредственной близости к антенным решеткам. При этом размеры зон повышенной напряженности электрического поля из-за различных отношений  $L/F$  могут быть различные.

2. Формирование одного максимума амплитуды напряженности электрического поля, смещенного в сторону одной из антенных решеток.

3. Образование протяженной зоны максимума амплитуды напряженности электрического поля, аналога «плато» из раздела 2.2.1.

4. Обеспечение максимума амплитуды напряженности электрического поля точно в заданных координатах.

Для антенных решеток, рассматриваемых в разделе 2.2.1 и антенной решетки с  $N = 40$  и  $d = \lambda/2$ , расположенных друг напротив друга на расстоянии  $B = 4000$  мм, проведем расчет зависимости амплитуды напряженности электрического поля от координаты. Первая антенная решетка (AP 1) сфокусирована на расстояние  $F_1 = 3000$  мм, вторая антенная решетка (AP 2) сфокусирована на расстояние  $F_2 = 1000$  мм. Уровни мощности, излучаемые антенными решетками, равны между собой. Результаты расчетов представлены на рисунке 2.7.

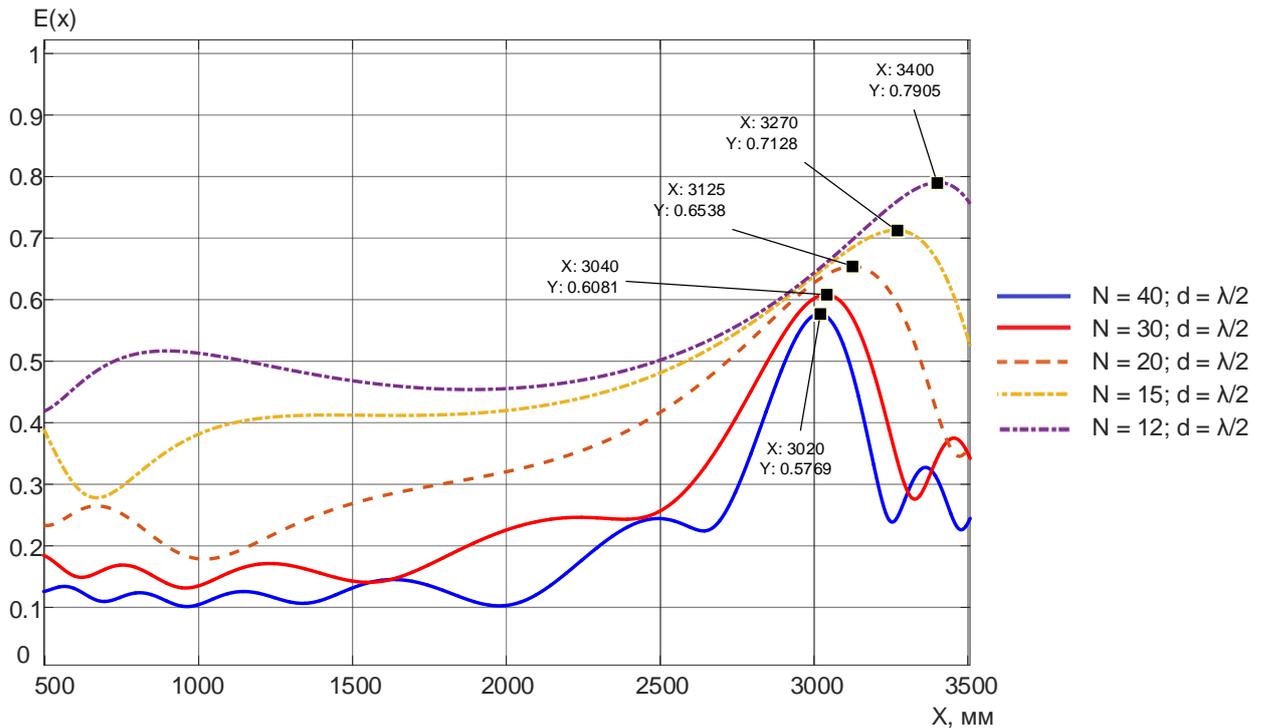


Рисунок 2.7 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от координаты для двух антенных решеток, расположенных на разном расстоянии от точки фокусировки. Уровни излучаемой мощности равны между антенными решетками.

Результаты, показанные на рисунке 2.7 демонстрируют смещение максимума амплитуды напряженности электрического поля в сторону ближайшей (АР 2) антенной решетки. Это происходит в силу того, что дальняя антенная решетка (АР 1) слабо влияет на формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства, т.к. за счет большего фокусного расстояния энергия «размазывается» в пространстве. Это подтверждается зависимостями амплитуды напряженности электрического поля от координаты для обеих антенных решеток для  $N = 20$ ,  $d = \lambda/2$ , изображенными на рисунке 2.8.

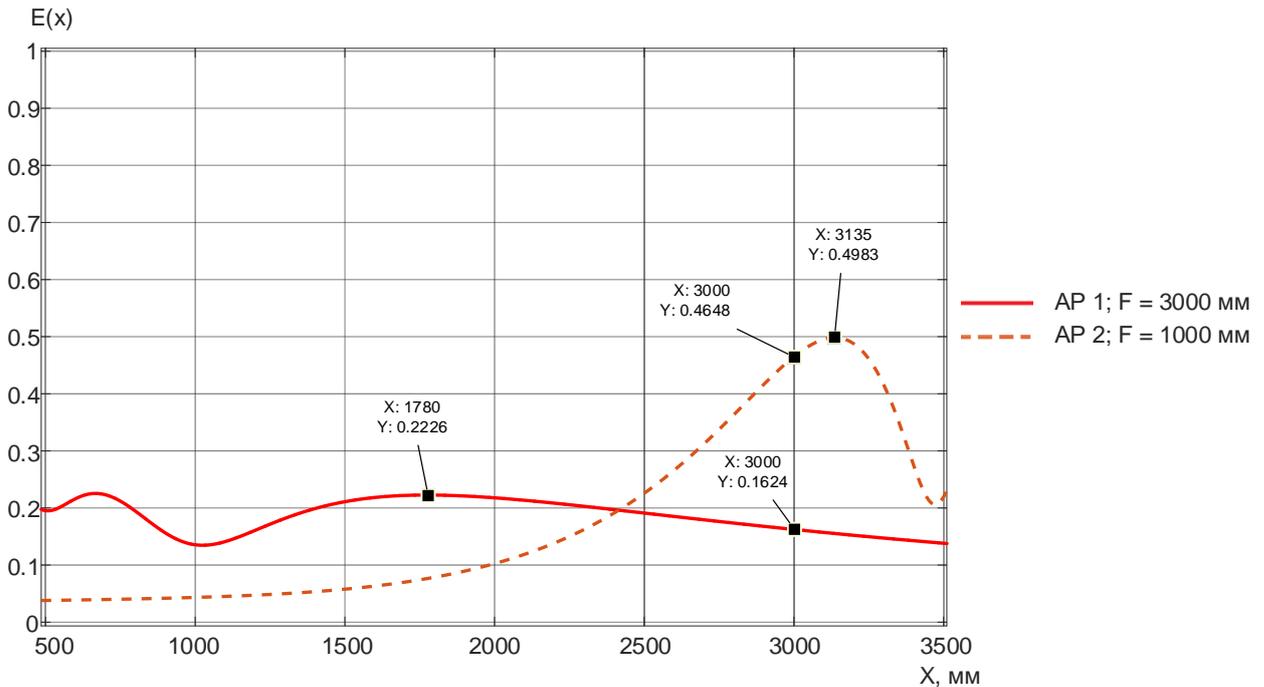


Рисунок 2.8 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для обеих антенных решеток по отдельности.  $N = 20$ .

Результаты, показанные на рисунке 2.8 подтверждают предположение, что дальняя антенная решетка (AP 1) слабо участвует в формировании максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства и обеспечивает максимум напряженности в точке с координатами 1780 мм. Таким образом, основываясь на рисунке 1.11 и выражении (1.8), можно утверждать, что чем меньше отношение  $L/F$  для дальней антенной решетки, тем меньше ее влияние на формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства. Это связано с тем, что чем меньше отношении  $L/F$ , тем больше величина смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля относительно точки синфазного сложения волн.

Для оценки эффективности использования двух антенных решеток с разным фокусным расстоянием сравним величину смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля, показанную на рисунке 2.7, с величиной смещения максимума амплитуды напряженности электрического

поля, формируемого одной антенной решеткой (АР 2) с фокусным расстоянием  $F = 1000$  мм. Результаты численного моделирования показаны на рисунке 2.9. Величины смещения сведены в таблице 2.4.

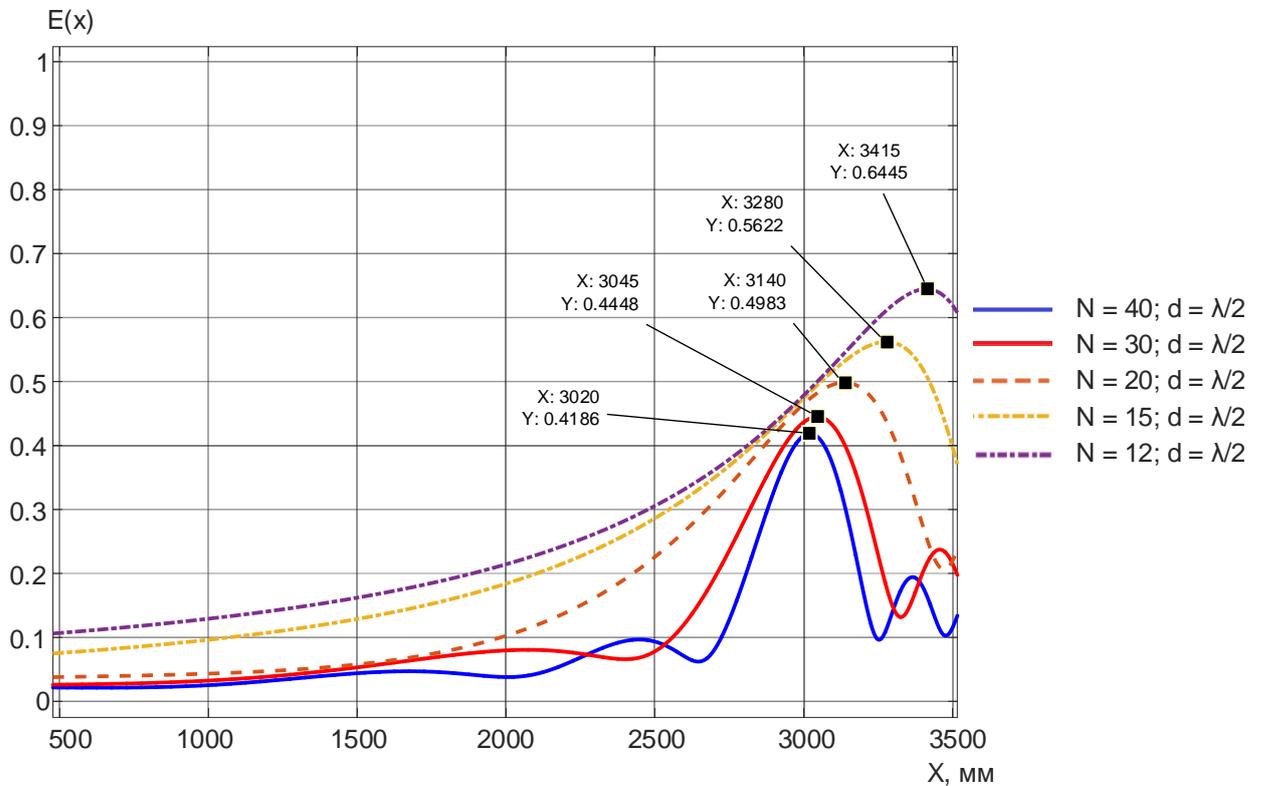


Рисунок 2.9 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля для АР 2;  $F = 1000$  мм.

Таблица 2.4

Величины смещения максимума  $\Delta R$  для АР 1 + АР 2 и АР 2.

$N$	$\Delta R$ , мм (АР 1; $F = 3000$ мм + АР 2; $F = 1000$ мм)	$\Delta R$ , мм (АР 2; $F = 1000$ мм)
12	400	415
15	270	280
20	125	140
30	40	45
40	20	20

Анализируя результаты, показанные в таблице 2.4, влияние антенной решетки с большим фокусным расстоянием (АР 1;  $F = 3000$  мм) на величину смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля составляет от 0 до 15 мм. Таким образом можно утверждать, что антенная решетка с большим фокусным расстоянием слабо влияет на точность позиционирования максимума амплитуды напряженности электрического поля.

В таблицах 2.5 и 2.6 сведены рассчитанные по (1.8) параметры для  $F = 1000$  мм (АР 2) и  $F = 3000$  мм (АР 1) соответственно.

Таблица 2.5

Рассчитанные величины для антенной решетки 2 (АР 2) с  $F = 1000$  мм

N	L/F	$D_c$ , мм	$D_b$ , мм	$\Delta R$ , мм
12	0.72	258.4	447.9	415
15	0.9	234.8	409.6	280
20	1.2	205.4	344.8	140
30	1.8	163.1	223	45
40	2.4	105.6	132.2	20

Таблица 2.6

Рассчитанные величины для антенной решетки 1 (АР 1) с  $F = 3000$  мм

N	L/F	$D_c$ , мм	$D_b$ , мм	$\Delta R$ , мм
12	0.24	1036.5	1348.5	2160
15	0.3	962.4	1268.1	1800
20	0.4	848.7	1139.1	1200
30	0.6	655.2	901.2	500
40	0.8	502.5	692.7	210

Анализируя значения из таблицы 2.5 и 2.6, а также рисунки 2.7 и 2.9, можно заметить, что антенная решетка с фокусным расстоянием  $F = 3000$  мм вносит меньший вклад в формирование максимума амплитуды напряженности в координатах  $X = 3000$  мм, чем антенная решетка, с фокусным расстоянием  $F = 1000$  мм, сфокусированная в ту же точку пространства.

Таким образом становится очевидно, что каждая антенная решетка формирует максимум амплитуды напряженности электрического поля в разных точках пространства, расположенных не симметрично по разные стороны относительно требуемого положения.

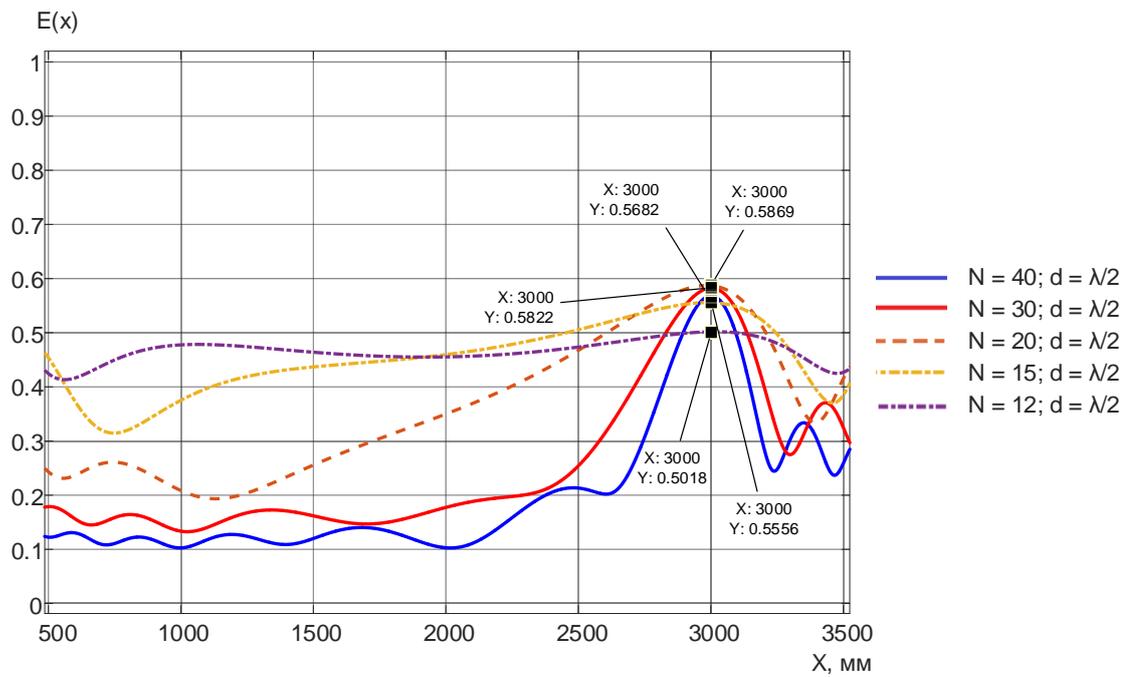
### **2.2.2.1 Компенсация смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля для двух параллельных антенных решеток, разнесенных на разное расстояние от точки фокуса**

Как показано в подразделе 2.1 настоящей работы, возможно обеспечить максимум амплитуды напряженности электрического поля в точно заданной точке пространства. Для этого необходимо сфокусировать антенную решетку на большее расстояние. Применим итерационный алгоритм компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля к рассматриваемой задаче для всех рассматриваемых антенных решеток с целевым значением погрешности установления координаты максимума амплитуды напряженности 2 %.

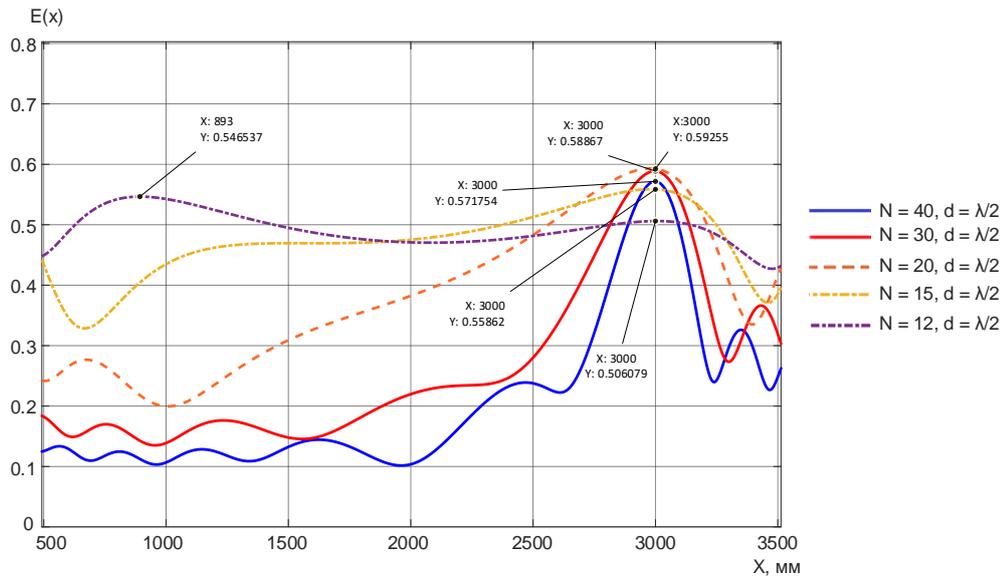
Новые фокусные расстояния ( $F_n$ ) после выполнения шагов алгоритма компенсации смещения максимума напряженности электрического поля для обеих антенных решеток, сведены в таблицу 2.7. Зависимости амплитуды напряженности от расстояния показаны на рисунке 2.10.

Фокусные расстояния после применения итерационного алгоритма.

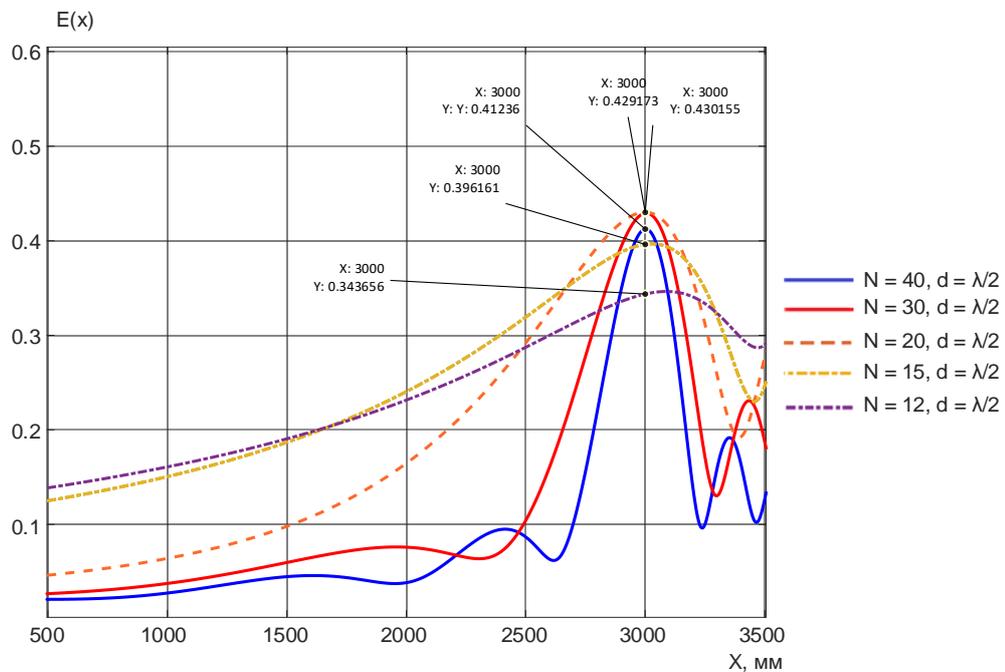
N	AP 1 ( $F_0 = 3000$ мм)	AP 2 ( $F_0 = 1000$ мм)
	$F_n$ , мм	$F_n$ , мм
12	9000	5000
15	4800	1700
20	4200	1200
30	3500	1045
40	3200	1020



a)



б)



в)

Рисунок 2.10 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля после применения алгоритма компенсации. а) компенсация применена для обеих АР. б) компенсация применена только для АР 2. в) только АР 2 с компенсацией смещения.

Анализируя результаты, показанные на рисунках 2.7, 2.9 и 2.10, размеры зон повышенной напряженности были сведены в таблицу 2.8. Анализируя

зависимости, показанные на этих рисунках и размеры зон повышенной напряженности становится понятно, что наименьшие размеры зоны повышенной напряженности обеспечивает использование АР 2 без компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля. Далее увеличение размеров зон повышенной напряженности идет в следующем порядке: АР 2 с компенсацией смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля; АР 1 + АР 2 без компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля; АР 1 + АР 2 с компенсацией смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля; АР 1 + АР 2 с компенсацией смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля только для АР 2.

Дополнительно стоит отметить, что при компенсации только АР 2 для антенной решетки с малыми линейными размерами образуется два максимума амплитуды напряженности электрического поля (см. рисунок 2.10 (б) для  $N = 12$ ), здесь мы наблюдаем максимум амплитуды напряженности электрического поля формируемый АР 1 в координате  $X = 893$  мм и максимум амплитуды напряженности формируемый АР 2 в координате  $X = 3000$  мм. Это связано с малым отношением  $L/F$  для АР 1 и отсутствием компенсации смещения максимума.

При компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля для обеих антенных решеток (см. рисунок 2.10 (а)), может образоваться вытянутая зона повышенной напряженности «плато» ( $N = 12$ ), для антенных решеток с большими линейными размерами наблюдается вытягивание зоны повышенной напряженности в сторону АР 1, двух выраженных максимумов для данного случая не наблюдается.

При использовании только АР 2 и компенсации ее смещения (рисунок 2.10 (в)) мы наблюдаем увеличение размеров зоны повышенной

напряженности по сравнению со случаем использования AP 2 без компенсации смещения (рисунок 2.9).

Сравнивая случаи AP 1 + AP 2 без компенсации смещения (см. рисунок 2.7) и с компенсацией смещения для обеих решеток (см. рисунок 2.10 (а)) можно отметить, что для случая с компенсацией помимо обеспечения максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданных координатах пространства, присутствует вытягивание зоны повышенной напряженности в сторону AP 1. Это можно использовать для случаев, когда необходимо увеличить область с высоким уровнем сигнала.

Таблица 2.8

## Сравнение зон повышенной напряженности

N	AP 1 + AP 2 без компенсаци и (рис 2.7)		AP 2 без компенсаци и (рис. 2.9)		AP 2 с компенсацие й (рис. 2.10 (в))		AP 1 + AP 2 с компенсацие й (рис. 2.10 (а))		AP 1 + AP 2. Компенсаци я AP 2. (рис. 2.10 (б))	
	D <sub>c</sub> , мм	D <sub>b</sub> , мм	D <sub>c</sub> , мм	D <sub>b</sub> , мм	D <sub>c</sub> , мм	D <sub>b</sub> , мм	D <sub>c</sub> , мм	D <sub>b</sub> , мм	D <sub>c</sub> , мм	D <sub>b</sub> , мм
1 2	258	647	219	467	476	887	1000	3000	1000	3000
1 5	250	670	220	456	358	727	401	1923	401	2128
2 0	247	496	209	361	258	463	290	694	289	782
3 0	183	268	158	211	169	219	194	275	192	291
4 0	141	183	123	145	126	147	147	180	146	189

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что наибольшее влияние на формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства оказывает ближняя антенная решетка (АР 2).

Таким образом можно утверждать:

1. При использовании двух параллельных антенных решеток, находящихся на разном расстоянии от точки фокуса, для обеспечения максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства, достаточно компенсировать смещения максимума только для ближайшей антенной решетки (АР 2).
2. Для увеличения размеров зоны повышенной напряженности электрического поля необходимо компенсировать смещение дальней антенной решетки (АР 1).

### **2.2.3 Две ортогональные антенные решетки, сфокусированные в одну точку, равноудаленную от них**

Схематичное представление конфигурации антенных решеток показано на рисунке 2.11. Антенные решетки расположены ортогонально друг другу. Расстояние до точки фокуса от первой антенной решетки  $F_x$ , от второй -  $F_y$ ,  $F_x = F_y$ . Антенные решетки АР 1 и АР 2 имеют равные линейные размеры, количество элементов и шаг между элементами. АР 1 и АР 2 работают на одной частоте.

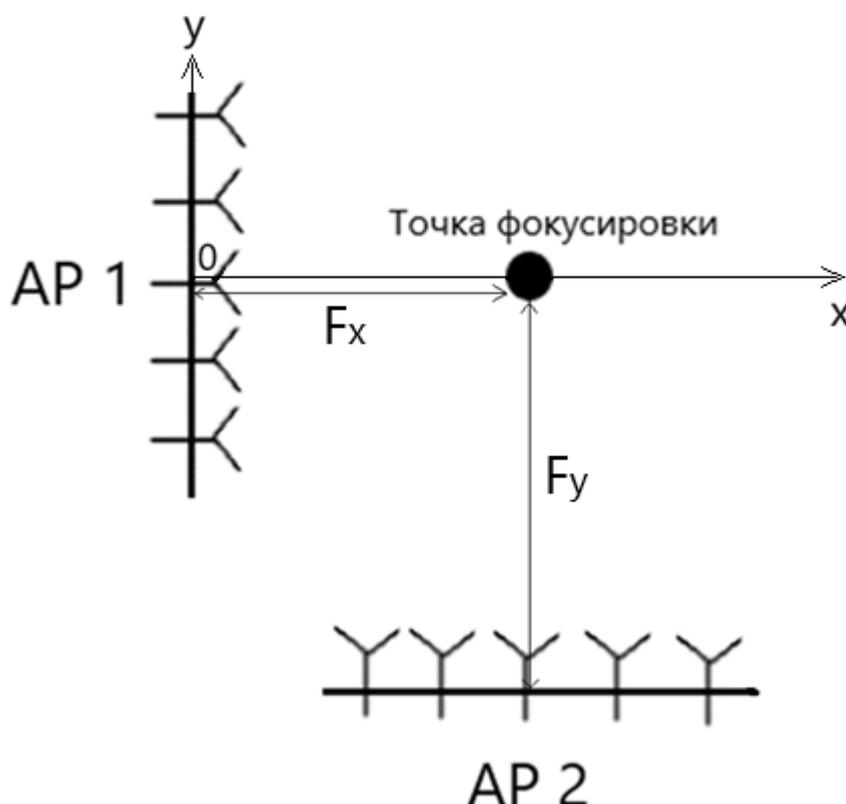


Рисунок 2.11 – Конфигурация двух ортогонально расположенных антенных решеток

Рассмотрим случай, когда обе антенные решетки сфокусированы в точку, где требуется обеспечить максимум напряженности электрического поля.

Каждая из антенных решеток из-за эффекта снижения интенсивности обеспечит максимум амплитуды напряженности электрического поля не в заданной точке фокусировки, а в точке, более близкой к антенной решетке ( $F_{x_{\max}}$  и  $F_{y_{\max}}$  – первый и второй максимум). За счет пересечения диаграмм направленности антенных решеток в точке фокусировки ожидается образование третьего максимума ( $F_{0_{\max}}$ ) амплитуды напряженности электрического поля. Схематичное представление этого явления представлено на рисунке 2.12.

Таким образом, рассматриваемая конфигурация антенных решеток будет формировать три точки высокой напряженности электрического поля.

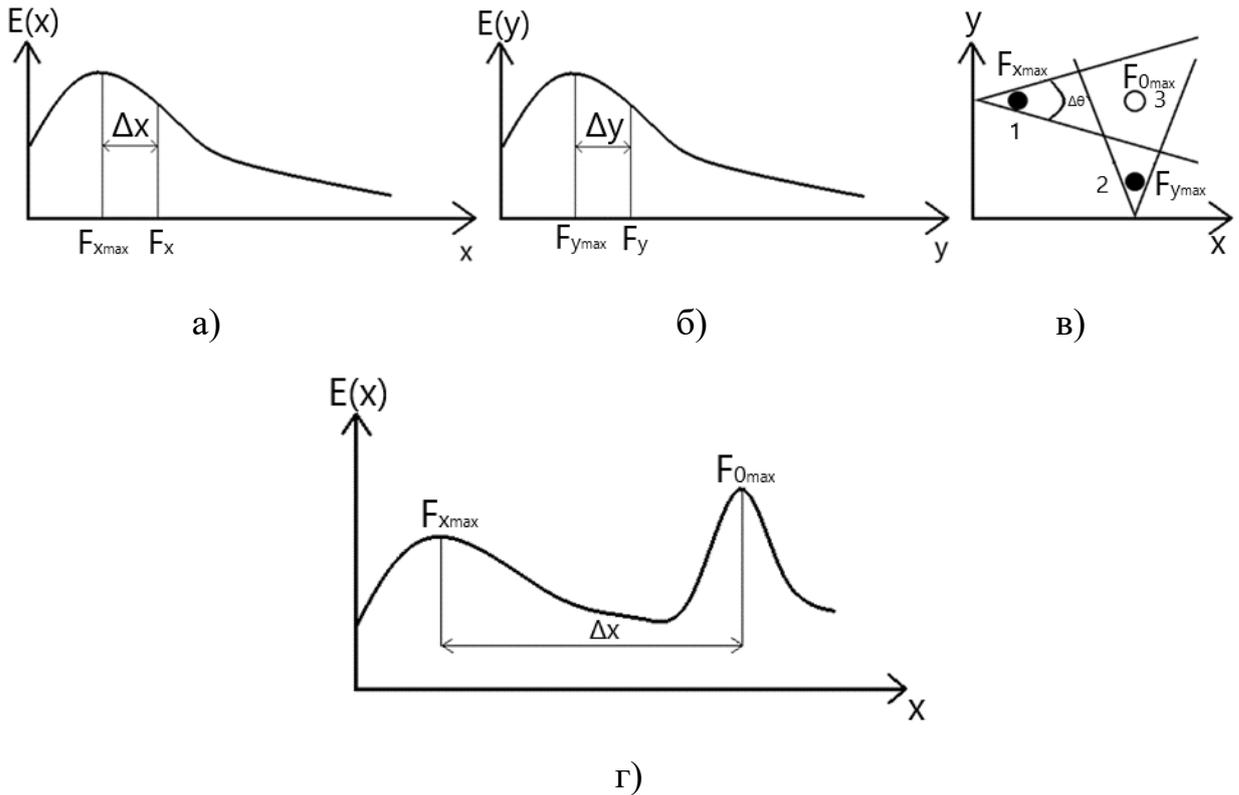


Рисунок 2.12 – Иллюстрация влияния антенных решеток на формирование максимума напряженности электрического поля для двух равноудаленных от нее ортогональных антенных решеток. а) зависимость для АР 1; б) зависимость для АР 2; в) формирование третьего максимума за счет пересечения ДН; г) зависимость для АР 1 с учетом влияния ортогональной АР 2

На рисунке 2.12 схематически изображен процесс формирования максимумов амплитуды напряженности электрического поля для двух ортогонально расположенных антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства. На рисунке 2.12 (а, б) представлены зависимости амплитуды напряженности электрического поля для каждой из двух антенных решеток без учета влияния соседней антенной решетки. Демонстрируется уже известное смещение максимума амплитуды напряженности электрического поля относительно точки синфазного сложения волн, т.е. каждая антенная решетка формирует смещенный в свою сторону максимум амплитуды напряженности электрического поля. На рисунке 2.12 (в) показан принцип

формирования третьего максимума амплитуды напряженности электрического поля за счет пересечения диаграмм направленности антенных решеток. В точке фокусировки электромагнитные волны, излучаемые антенными решетками, суммируются, приходя синфазно. Размер третьей зоны повышенной напряженности зависит от ширины главного лепестка диаграммы направленности антенных решеток. На рисунке 2.12 (г) показана схематичная зависимость амплитуды напряженности электрического поля вдоль оси «х». На рисунке видно, что будет формироваться смещенный в сторону антенной решетки максимум амплитуды напряженности электрического поля, который происходит из-за влияния эффекта снижения интенсивности электромагнитной волны с ростом расстояния и более подробно рассмотренный в предыдущих частях настоящей работы. И будет формироваться максимум амплитуды напряженности электрического поля в заданных координатах фокусировки антенных решеток за счет пересечения диаграммы направленности, за счет сложения сигналов от двух антенных решеток. Ожидается, что уровень амплитуды напряженности электрического поля в первом и втором максимуме может быть ниже, чем уровень напряженности в третьем максимуме.

Размер зоны повышенной напряженности электрического поля, в окрестностях третьего максимума амплитуды напряженности электрического поля ( $F_{0max}$ ), будет определяться обеими антенными решетками вдоль осей «х» и «у» и будет зависеть от размеров антенной решетки, фокусного расстояния и ширины диаграммы направленности антенной решетки. На рисунке 2.13 изображено схематичное представление влияния ширины диаграммы направленности на размер зоны повышенной напряженности электрического поля.

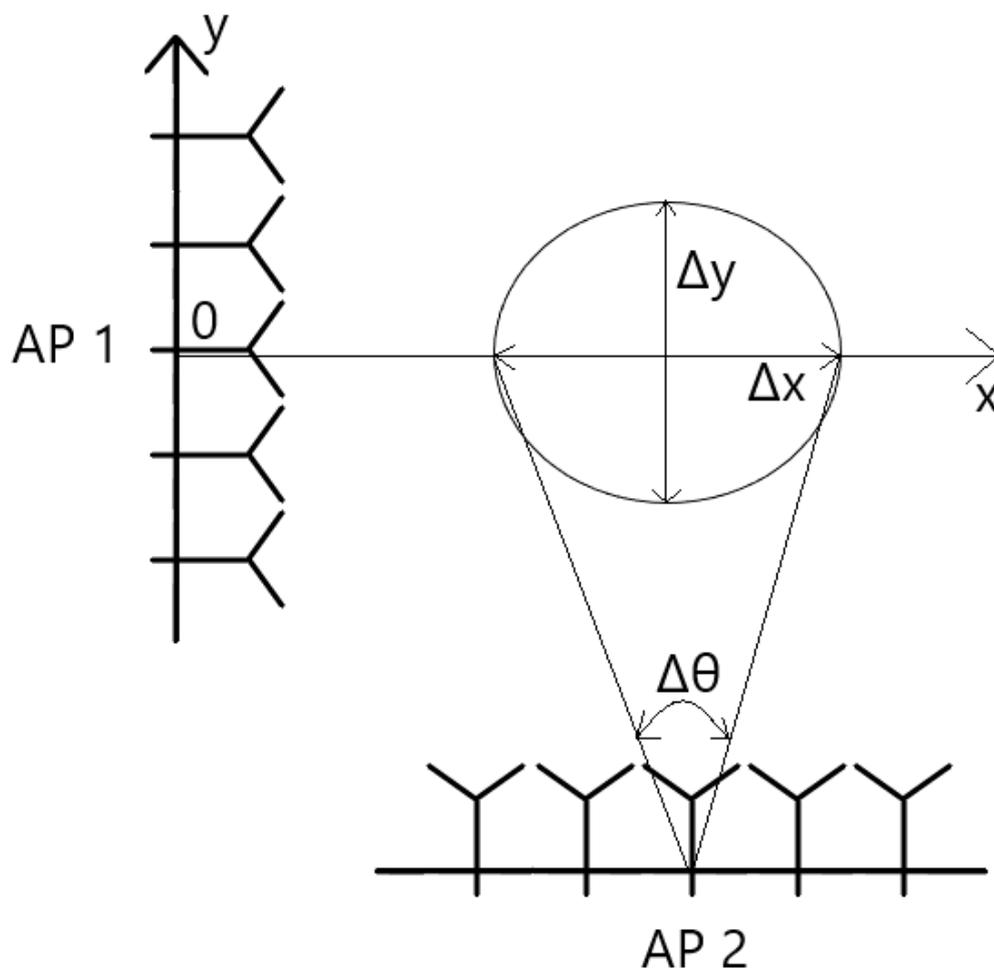


Рисунок 2.13 – Схематичное представление влияния диаграммы направленности на размеры зоны повышенной напряженности электрического поля

При равномерном распределении поля по апертуре антенны ширину главного лепестка диаграммы направленности по уровню -3 дБ, можно оценить по следующему выражению [105]:

$$\Delta\theta = 51^\circ \frac{\lambda}{L}, \quad (2.3)$$

где  $L$  – линейный размер антенной решетки.

Тогда размер зоны повышенной напряженности вдоль оси “x”, формируемый AP 2. Для этого можно воспользоваться выражением:

$$\Delta x = 2 \cdot F \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\Delta \theta}{2} \right), \quad (2.4)$$

где  $F$  – фокусное расстояние,  $\Delta \theta$  – ширина главного лепестка диаграммы направленности.

Аналогичным образом по соотношениям (1) и (2) определяется размер области вдоль оси «у», определяемый АР 1. Очевидно, в этом случае в указанные выражения подставляются параметры АР 1.

Очевидно, что размеры зоны повышенной напряженности, формируемые двумя ортогональными антенными решетками, сфокусированные в одну точку пространства, будут отличаться от размеров зоны повышенной напряженности, формируемых одной антенной решеткой. Это связано с интерференцией излучения обеих антенных решеток. Чтобы подтвердить утверждение, нормируем напряженность электрического поля, формируемую двумя антенными решетками к напряженности электрического поля в точке синфазного сложения волн. Очевидно, что в таком случае в точке фокусировки напряженность поля будет равна 0 дБ или 1 относительная единица (ОЕ). Тогда уровень напряженности электрического поля, формируемый одной антенной решеткой в этой точке будет составлять -6 дБ (0.5 ОЕ). Следовательно, становится очевидно, что уровень напряженности электрического поля на границах главного лепестка диаграммы направленности по уровню -3 дБ составит -9 дБ (0.355 ОЕ).

Следующим шагом, к вычислениям добавим излучение второй антенной решетки и вычислим значение напряженности электрического поля в точке на границе главного лепестка диаграммы направленности по уровню -3 дБ: 0.355 ОЕ (-9 дБ) + 0.5 ОЕ (-6 дБ) = 0.856 ОЕ (-1.35 дБ). Из результата вычислений становится понятно, что с учетом влияния излучения от второй антенной решетки размер зоны повышенной напряженности не ограничивается шириной главного лепестка диаграммы направленности по уровню -3 дБ.

Путем вычислений было установлено, что ширина главного лепестка диаграммы направленности антенной решетки, по которому ограничиваются размеры зоны повышенной напряженности, должна составлять  $-13.7$  дБ ( $0.207$  ОЕ):

Это не сложно подтвердить следующим образом – возьмем нормированный уровень напряженности электрического поля, создаваемый первой антенной решеткой, который составляет  $0.5$  ОЕ ( $-6$  дБ) и прибавим к нему уровень напряженности электрического поля второй антенной решеткой по уровню  $-13.7$  дБ, что в относительных единицах составит  $0.207$  ОЕ. В результате получится  $0.708$  ОЕ или напряженность по уровню  $-3$  дБ относительно точки синфазного сложения волн. Схематичное представление описанных выше тезисов представлено на рисунке 2.14.

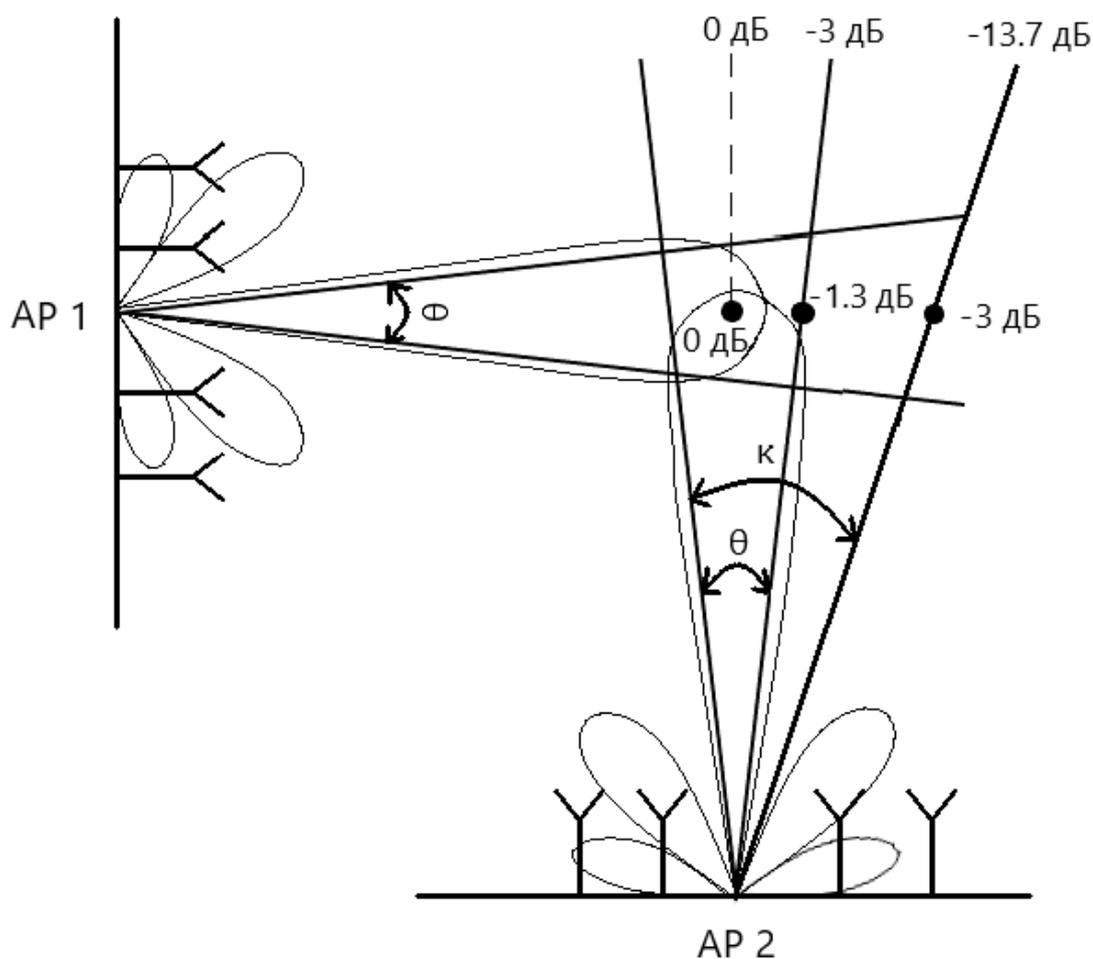


Рисунок 2.14 – Уровни напряженности электрического поля с учетом излучения от второй антенной решетки

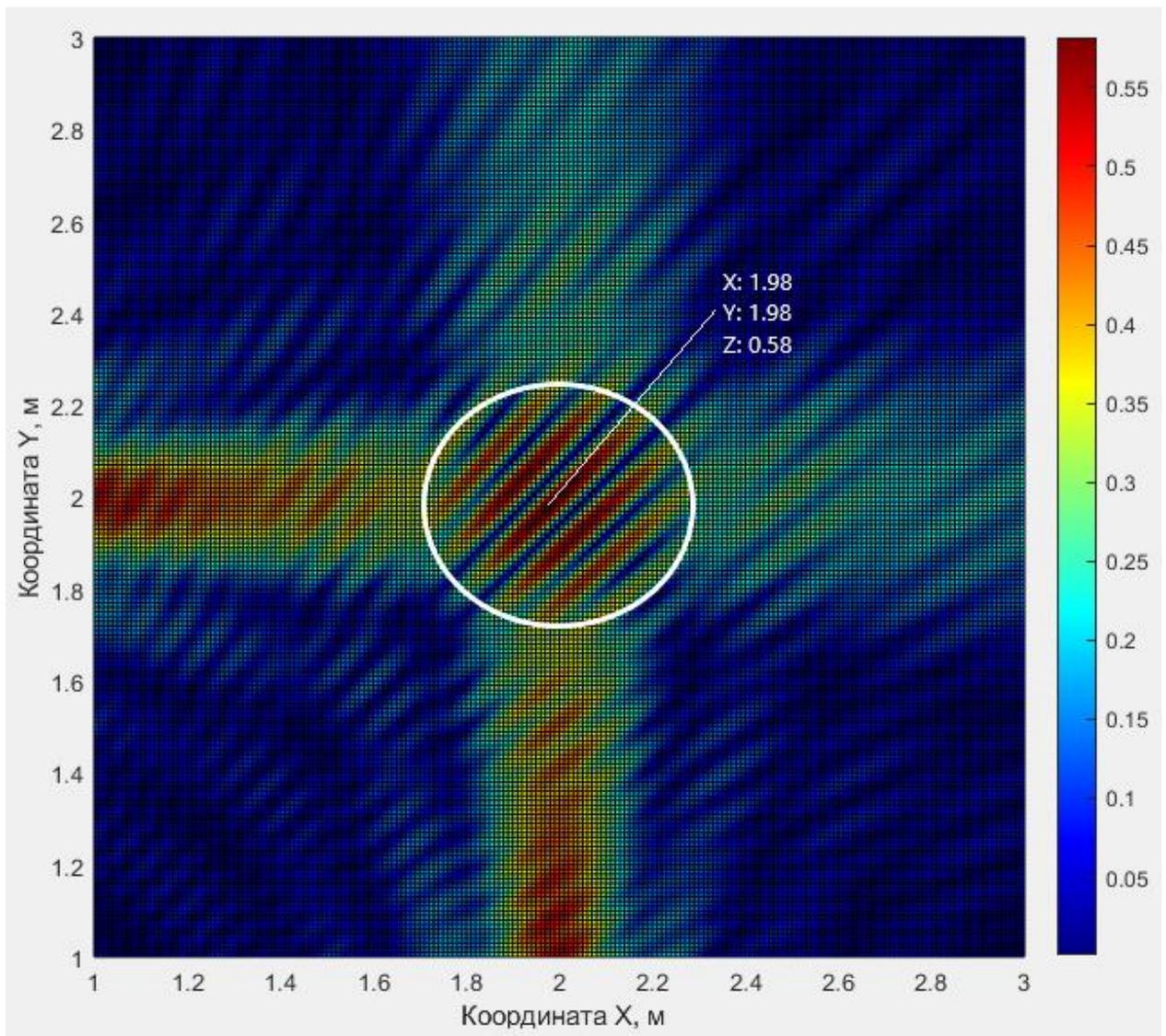
Следовательно, становится очевидно, что размер зоны повышенной напряженности по уровню -3 дБ для двух одинаковых ортогональных друг другу антенных решеток необходимо вычислять для ширины главного лепестка диаграммы направленности антенной решетки по уровню -13.7 дБ. Для вычисления можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\Delta\theta = 93^\circ \frac{\lambda}{L}, \quad (2.5)$$

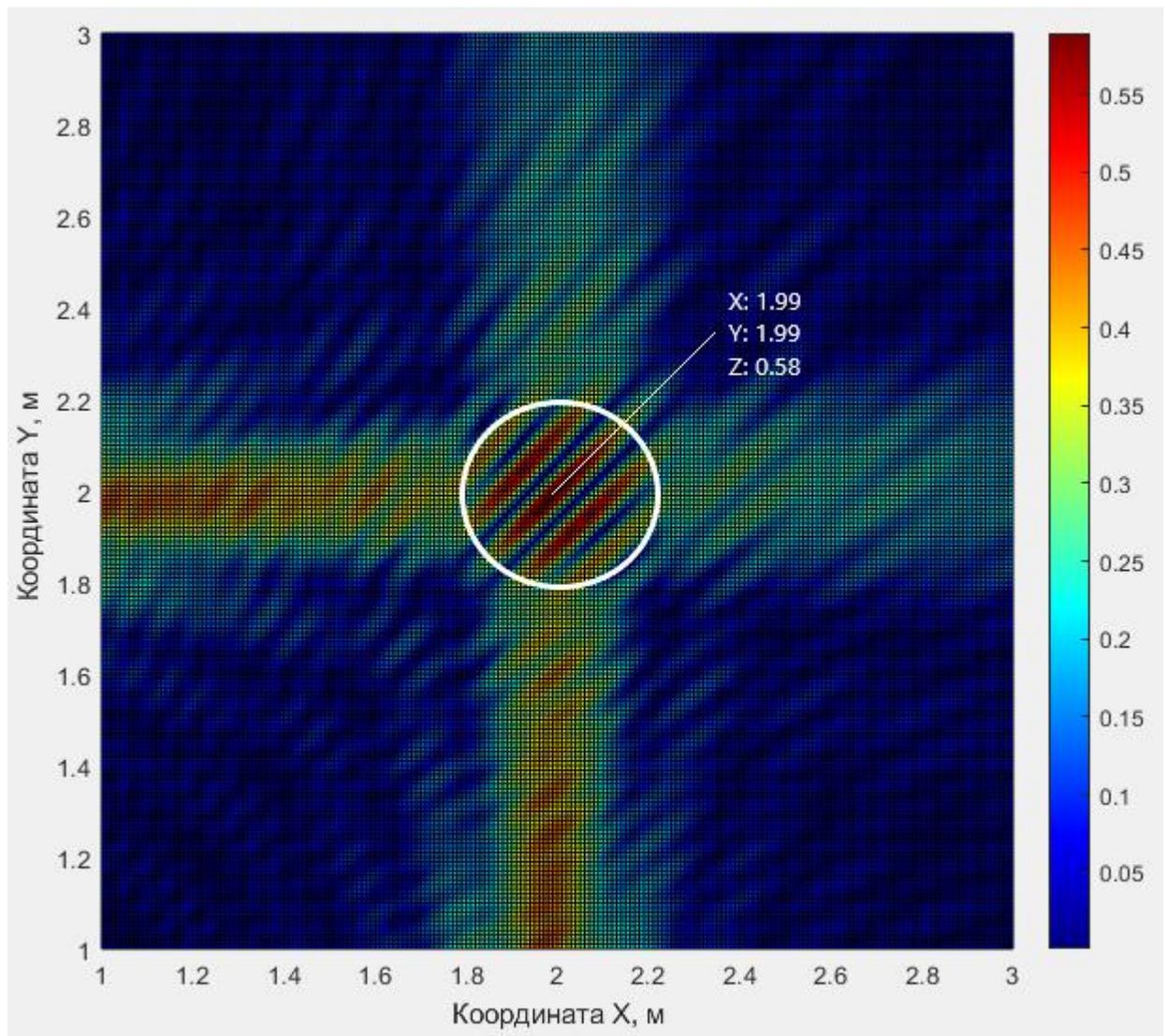
Полученное по выражению (2.5) значение подставляется в выражение (2.4) для вычисления размеров зоны повышенной напряженности по уровню -3 дБ.

Для антенных решеток, рассматриваемых в подразделе 2.2.1, проведем расчет зависимости амплитуды напряженности электрического поля от координат для двух антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства и расположенных ортогонально относительно друг друга. Точка фокусировки, будет на расстоянии 2000 мм для обеих антенных решеток. Результаты расчетов представлены на рисунке 2.15. На рисунке 2.16 представлено схематичное представление влияющих параметров на формирование максимума.

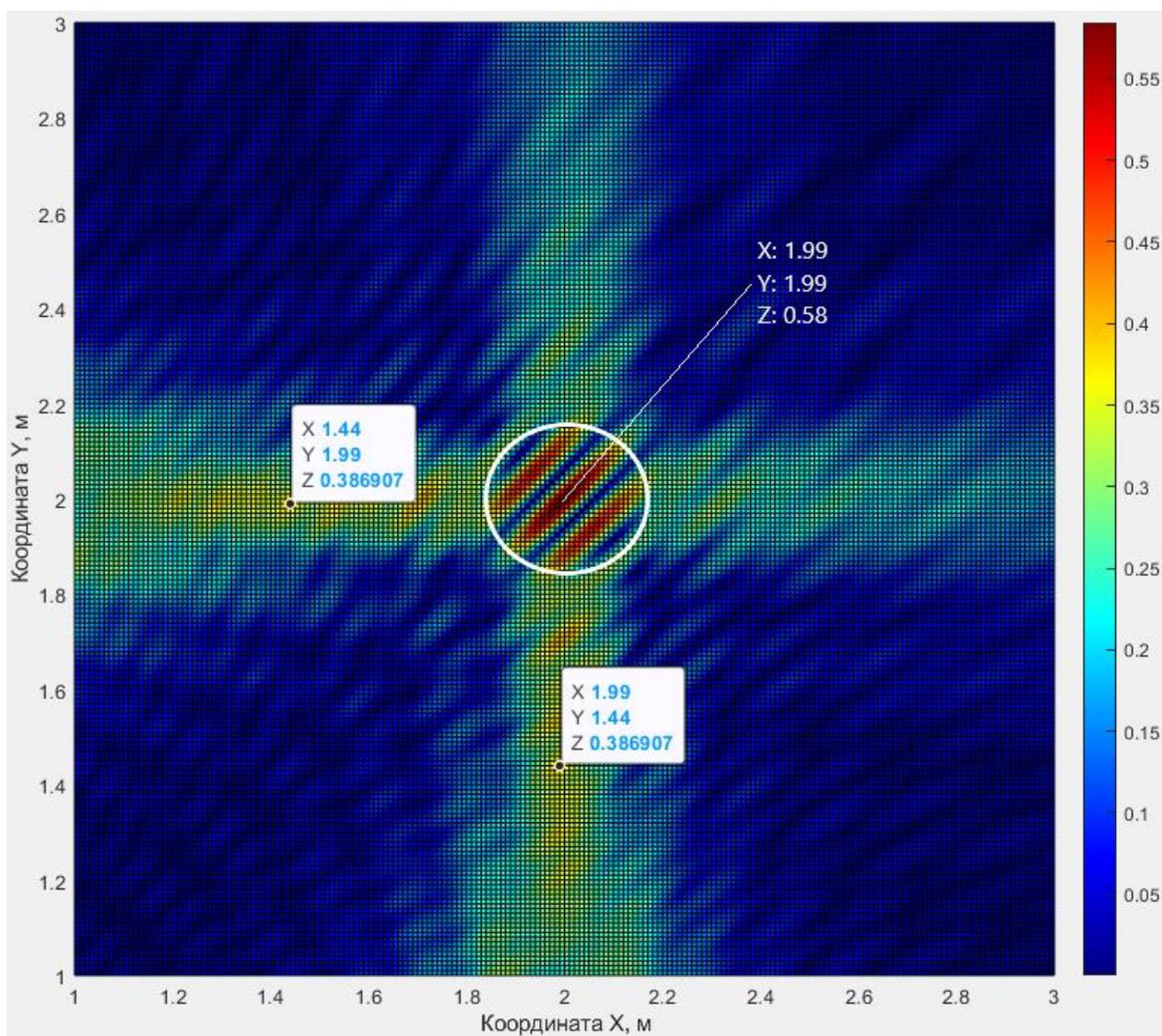
Размеры зоны повышенной напряженности, полученные в результате моделирования, численно близки с полученными теоретически.



a)



б)



в)

Рисунок 2.15 – Трехмерная зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для двух ортогонально расположенных антенных решеток. а)  $N = 12$ ; б)  $N = 15$ ; в)  $N = 20$ .

Оценим теоретически  $(\Delta R_{T,X}; \Delta R_{T,Y})$  по выражению (1.8) и рисунку 1.11 и получим в результате моделирования  $(\Delta R_{M,X}; \Delta R_{M,Y})$  величины смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля относительно максимумов, формируемых антенными решетками по отдельности  $(F_{x_{\max}}$  и  $F_{y_{\max}})$ , результаты сведены в таблицу 2.9.

Таблица 2.9

Теоретическое смещение максимума амплитуды напряженности и результат моделирования

N	$\Delta R_{T,X}$ , мм	$\Delta R_{T,Y}$ , мм	$\Delta R_{M,X}$ , мм	$\Delta R_{M,Y}$ , мм
20	574.2	574.2	560	560
15	918	918	840	840
12	1230.4	1230.4	1210	1210

По таблице 2.9 легко заметить, что величины смещения максимума амплитуды напряженности, рассчитанные по выражению (1.8), и полученные в результате моделирования совпадают.

В таблице 2.10 сведены размеры зоны повышенной напряженности в окрестностях третьего максимума ( $F_{0max}$ ) для рассматриваемых антенных решеток полученные в результате моделирования ( $\Delta D$ ) и рассчитанные для AP 2 вдоль оси "x" ( $\Delta D_x$ ) по выражению (2.3 и 2.4).

Таблица 2.10

Размеры зоны повышенной напряженности электрического поля

N	$\Delta D$ , мм	$\Delta D_x$ , мм	$\Delta \theta$ , град.
20	310	325	5.1
15	430	434	6.8
12	540	544	8.5

На рисунке 2.15 представлены зависимости амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для двух ортогонально расположенных антенных решеток. Чередование максимумов и минимумов амплитуды напряженности электрического поля связано с интерференцией двух электромагнитных волн и объяснено в подразделе 2.2.1.

По данным, показанным на рисунке 2.15, можно заметить, что максимум амплитуды напряженности электрического поля незначительно диагонально

смещен относительно требуемой точки максимума (точки синфазного сложения волн), величина смещения по отношению к фокусному расстоянию не превышает доли процента. Размеры зоны повышенной напряженности в окрестностях третьего максимума амплитуды напряженности  $F_{0\max}$  зависят от размеров диаграммы направленности АР 2. Необходимо отметить, что величины смещения первого и второго максимумов амплитуды напряженности электрического поля ( $F_{x\max}$  и  $F_{y\max}$ ) в ортогональной конфигурации антенных решеток зависят от линейных размеров антенной решетки, и совпадают с теоретическими результатами из подраздела 1.4.

Таким образом, для двух взаимно ортогональных антенных решеток, обеспечивающих максимум напряженности в заданной точке пространства, имеем следующее.

1. Формируется три отдельные зоны высокой напряженности электрического поля. Формирование двух зон определяется смещением максимума напряженности электрического поля относительно точки фокусировки. Третья зона формируется в окрестностях требуемой точки за счет пересечения главных лепестков диаграмм направленности двух антенных решеток.

2. Очевидным шагом является совмещение трех зон повышенной напряженности.

### **2.2.3.1 Компенсация смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля для двух ортогональных антенных решеток, сфокусированных в одну точку, равноудаленную от них**

В предыдущем подразделе установлено, что при использовании двух ортогональных антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства, формируется три зоны высокой амплитуды напряженности электрического поля. Третий максимум формируется в заданной точке пространства, за счет пересечения диаграмм направленности антенных

решеток. Первый и второй максимумы смещены в сторону соответствующих антенных решеток, формирующих их. Целью этого подраздела является компенсация смещения двух зон высокой напряженности относительно заданной точки пространства.

Применим итерационный алгоритм компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля, который был рассмотрен в подразделе 2.1 настоящей работы. Компенсацию смещения выполним для конфигурации  $N = 20$ . После выполнения шагов итерационного алгоритма компенсации для антенной решетки ( $N=20$ ) обе антенные решетки необходимо сфокусировать на расстояние  $F_x=F_y=3900$  мм. Трехмерная зависимость амплитуды напряженности электрического поля от координаты для скомпенсированного случая представлены на рисунке 2.16.

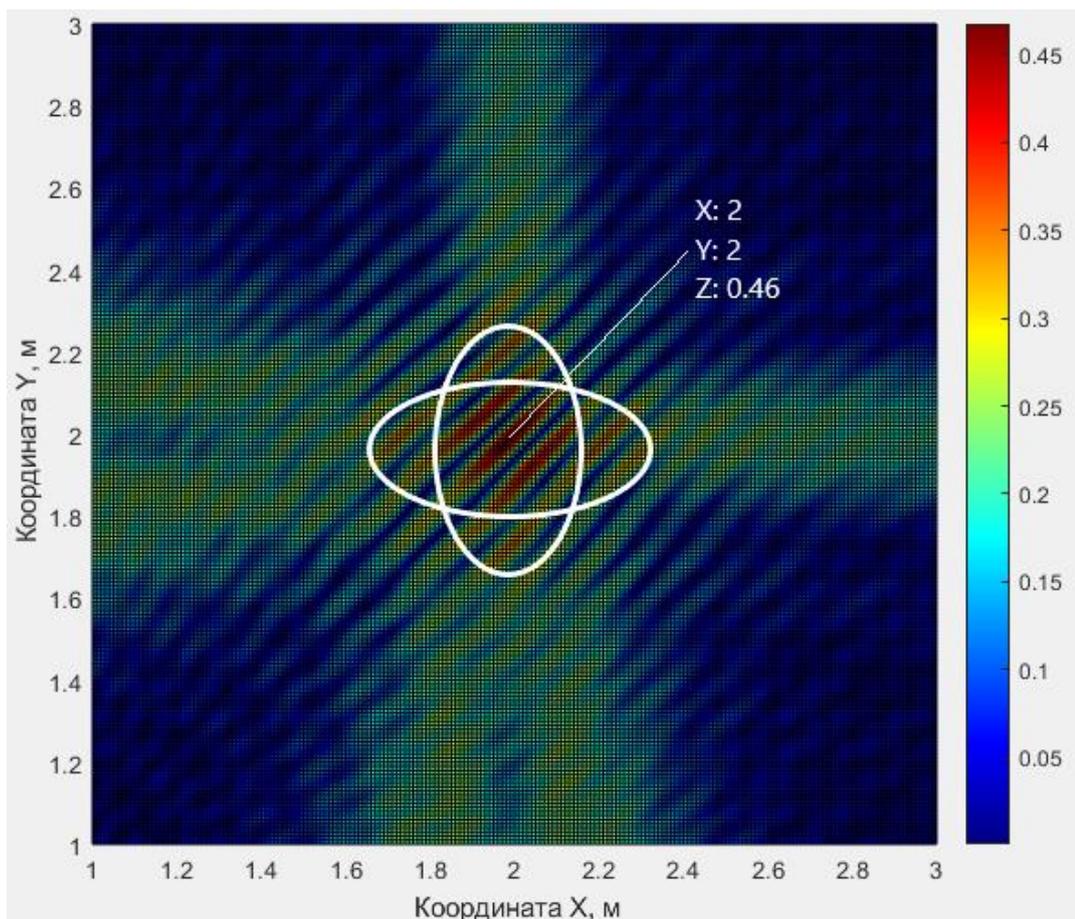


Рисунок 2.16 – Трехмерная зависимость амплитуды напряженности электрического поля для скомпенсированного случая

Сравнивая результаты, показанные на рисунке 2.16 и 2.15 (в) можно заметить, что при компенсации смещения антенной решетки исчезли первый и второй максимумы амплитуды напряженности электрического поля в непосредственной близости антенных решеток ( $F_{x_{\max}}$  и  $F_{y_{\max}}$ ), остался только третий максимум амплитуды напряженности электрического поля ( $F_{0_{\max}}$ ). В точках, в которых находился первый и второй максимум после компенсации сформировались минимумы напряженности электрического поля. Стоит отметить, что напряженность поля в точке максимума для скомпенсированного случая ниже, чем для случая без применения компенсации: до компенсации величина напряженности третьего максимума составляла 0.58, после компенсации – 0.46; т.е. значение напряженности снизилось более чем на 20%.

Снижение напряженности электрического поля в точке максимума после компенсации связана с тем, что после компенсации смещения размер зоны повышенной напряженности электрического поля по уровню -3 дБ увеличился. Площадь зоны повышенной напряженности можно рассчитать, как площадь эллипса для этого воспользуемся известными соотношениями для расчета [106]:

$$S = \pi \cdot a \cdot b, \quad (2.6)$$

где  $a$  и  $b$  – это размеры большой и малой полуосей эллипса соответственно.

Из рисунка 2.16 видно, что зона повышенной напряженности после компенсации представляет пересечение двух эллипсов, следовательно площадь двух одинаковых пересекающихся эллипсов будет иметь вид [106]:

$$S_{\text{общ}} = 2 \cdot S - (4 \cdot a \cdot b \cdot \arctg(\frac{b}{a})) \quad (2.7)$$

Площадь зоны повышенной напряженности до компенсации (рисунок 2.15 (в)) 0.075 м<sup>2</sup>. Тогда как после компенсации (рисунок 2.16) площадь зоны повышенной напряженности составила 0.125 м<sup>2</sup>: площадь зоны повышенной

напряженности вычислялась как сумма площадей двух эллипсов, общая площадь пересекающихся эллипсов учитывалась единожды; т.е. площадь зоны повышенной напряженности после компенсации увеличилась более, чем в 1.5 раза. Увеличение площади зоны повышенной напряженности связано с тем, что при увеличении фокусного расстояния энергия распределяется в большем диапазоне координат, формируя большую зону повышенной напряженности электрического поля (см. рисунки 2.1 и 2.2), следствием этого является снижения уровня напряженности электрического поля в требуемой точке максимума. Также при компенсации смещения первого и второго максимума амплитуды напряженности электрического в точке образования третьего максимума не обеспечивается синфазное сложение волн от элементов антенной решетки в точке максимума, что тоже влияет на итоговое значение напряженности электрического поля.

Для всех рассмотренных антенных решеток площади зоны повышенной напряженности без компенсации и после ее применения приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11

## Площадь зоны повышенной напряженности

N	Площадь без компенсации смещения, м <sup>2</sup>	Размеры полуосей эллипса до компенсации смещения		Площадь после компенсации смещения, м <sup>2</sup>	Размеры полуосей эллипса после компенсации смещения	
		a, м	b, м		a, м	b, м
20	0.075	0.155	0.155	0.125	0.275	0.09
15	0.145	0.215	0.215	0.253	0.39	0.13
12	0.229	0.270	0.270	0.374	0.47	0.16

Из вышеописанного следует, что при использовании двух антенных решеток, ортогонально расположенных друг относительно друга, можно обеспечить формирование трех максимумов амплитуды напряженности электрического поля. Это может быть полезно при селекции беспроводных телекоммуникационных устройств, которые пространственно разнесены. Применение компенсационного алгоритма позволяет управлять положением первого и второго максимума напряженности электрического поля вдоль оси «х» для АР 1 (первый максимум) и вдоль оси «у» для АР 2 (второй максимум). Таким образом возможно формирование конфигурации электрического поля, в которой третий максимум статично расположен в заданной точке пространства, а положения первого и второго максимумов можно изменять вдоль оси «х» и «у» соответственно.

#### **2.2.4 Две ортогональные антенные решетки, сфокусированные в одну точку, расположенную на разном расстоянии от них**

Рассмотрим случай, когда две взаимно ортогональные антенные решетки расположены на разном расстоянии от точки фокусировки.

Схематичное представление конфигурации антенных решеток показано на рисунке 2.17. Антенные решетки расположены ортогонально друг другу. Как и в предыдущем подразделе, расстояние до точки фокуса от первой антенной решетки  $F_x$ , от второй -  $F_y$ .

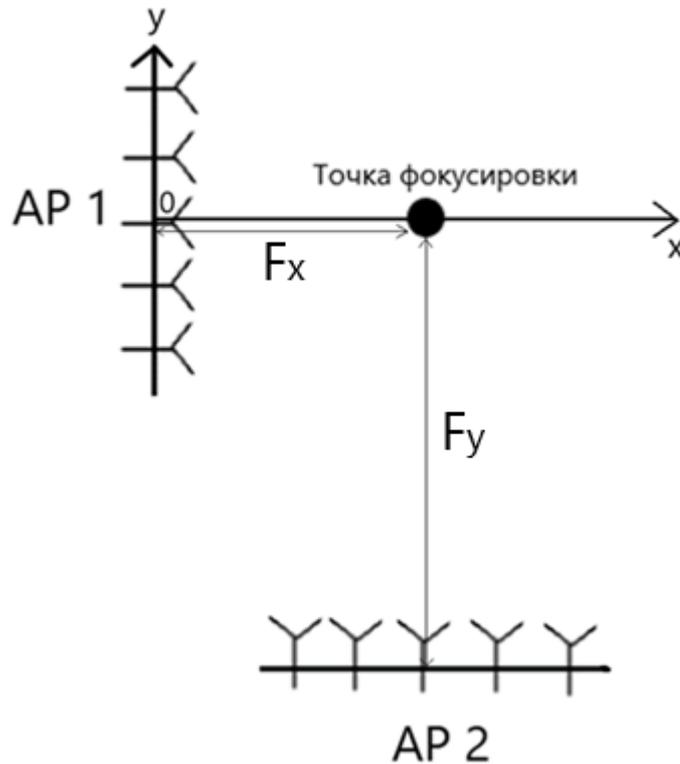


Рисунок 2.17 – Конфигурация двух ортогонально расположенных антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства, находящихся на разном удалении от нее

Поведение конфигурации ожидается схожим с ортогональной конфигурацией, равноудаленной от точки фокусировки. Однако смещение максимумов напряженности электрического поля будет разным в направлении разных антенных решеток ( $F_{x_{\max}}$  и  $F_{y_{\max}}$ ). Это связано с разным отношением  $L/F$ , так как величина смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля зависит не только от линейных размеров антенной решетки, но и от величины фокусного расстояния. По зависимостям, показанным на рисунке 1.11 понятно, что при равных линейных размерах, антенная решетка, имеющая большее фокусное расстояние имеет большую величину смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля  $\Delta R$ , а также большую протяженность зоны повышенной напряженности электрического поля в противоположную от антенной решетки сторону  $\Delta D_b$ .

Подтвердим выдвинутые предположения математическим моделированием. Проведем расчет конфигурации для следующих условий.

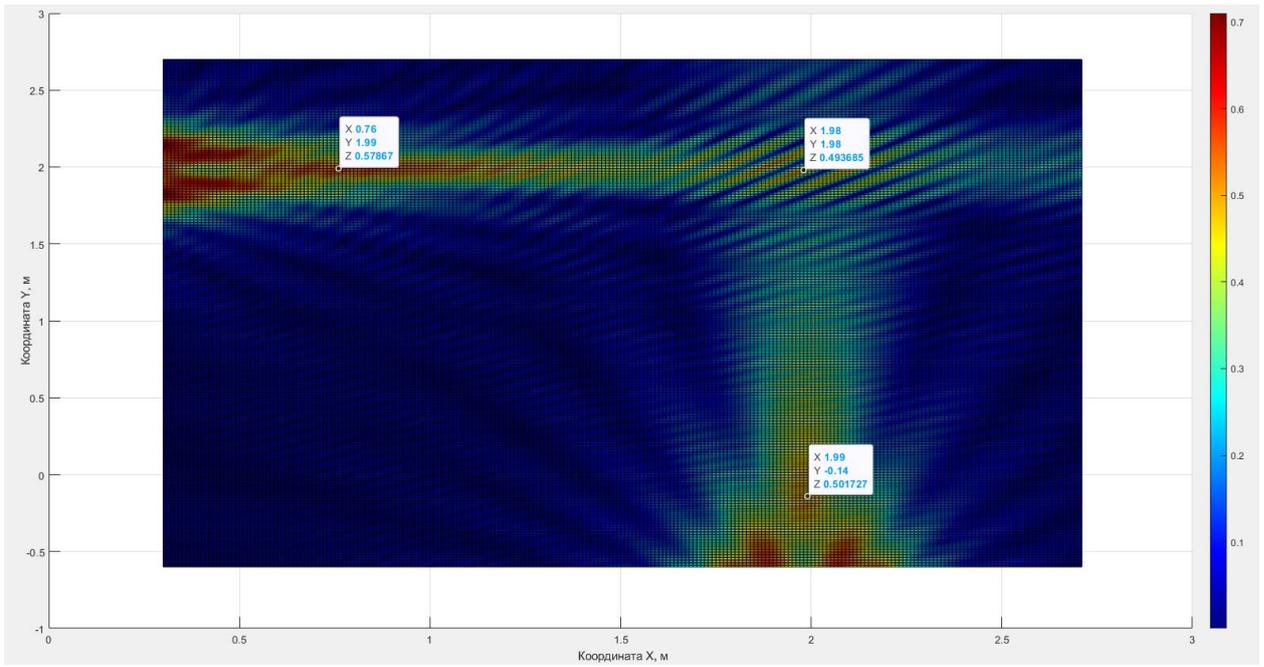
Для антенных решеток, рассматриваемых в подразделе 2.2.3, проведем расчеты. Конфигурация антенн и ориентация осей системы координат соответствует рисунку 2.17. Точка фокуса расположена на расстоянии  $F_x = 2000$  мм от первой антенной решетки и  $F_y = 3000$  мм от второй. Результаты расчетов показаны на рисунке 2.18. Фазы сигналов, излучаемых элементами антенных решеток определялись по соотношениям (1.3), (1.4). В таблице 2.12 приведены теоретические и полученные в результате моделирования смещения максимума амплитуды напряженности.

Таблица 2.12

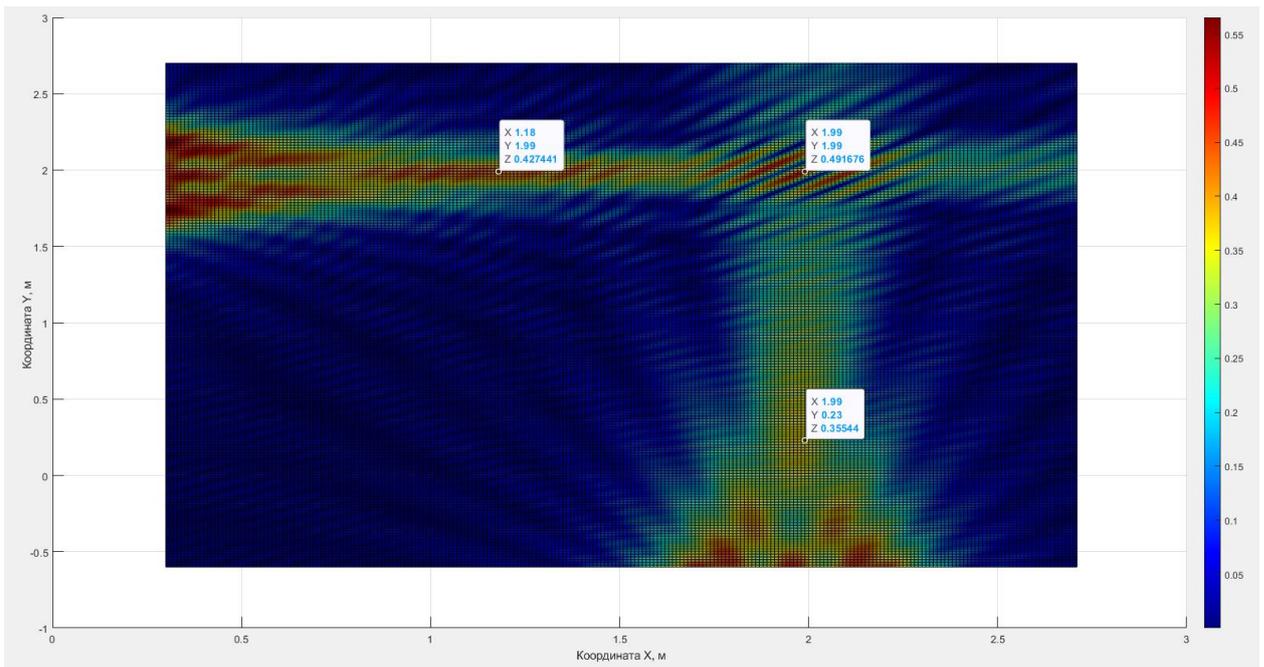
Теоретическое и рассчитанное смещение максимума амплитуды напряженности

N	$\Delta R_{T,X}$	$\Delta R_{T,Y}$	$\Delta R_{M,X}$	$\Delta R_{M,Y}$
20	574.2	1230	520	1300
15	918	1800	820	1770
12	1230.4	2130	1240	2140

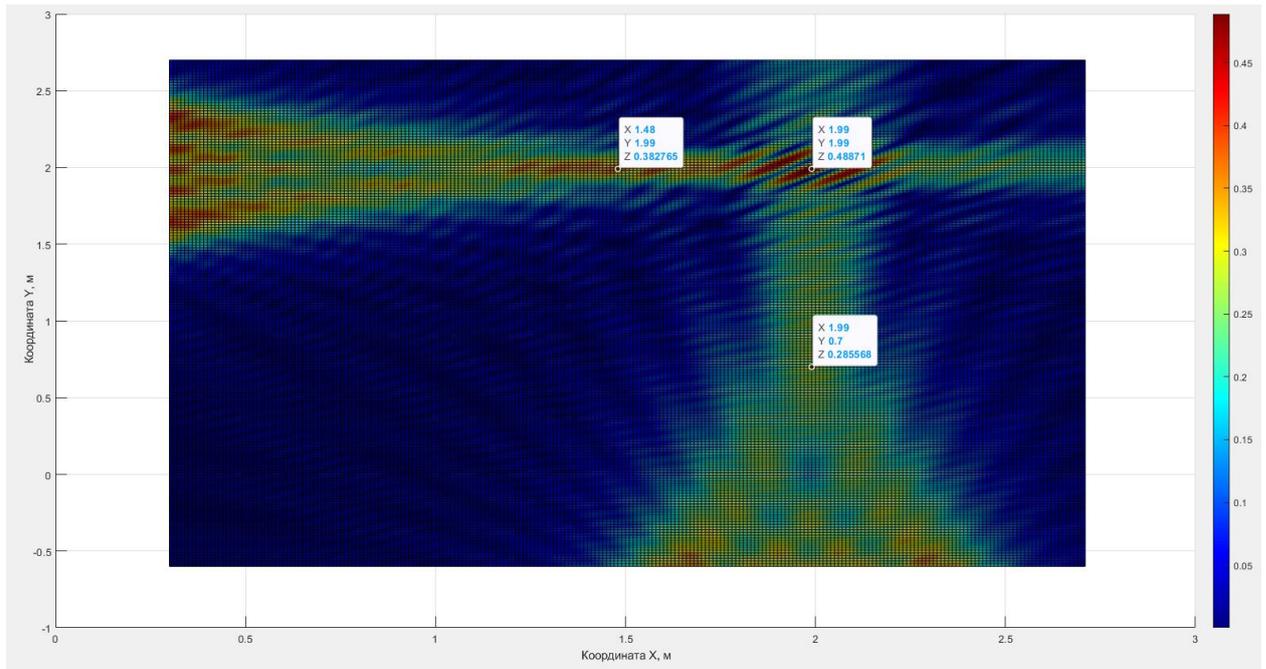
По таблице 2.12 легко заметить, что теоретические результаты смещения максимума амплитуды напряженности и полученные в результате моделирования близки друг к другу. Величины смещения первого и второго максимума амплитуды напряженности незначительно отличаются от результатов для равноудаленной ортогональной конфигурации – это связано с влиянием боковых лепестков антенной решетки на зависимость амплитуды напряженности.



a)



б)



в)

Рисунок 2.18 – Трехмерная зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния. а)  $N = 12$ ; б)  $N = 15$ ; в)  $N = 20$

Из рисунка 2.18, что точка третьего максимума амплитуды напряженности электрического поля незначительно смещена в сторону антенных решеток, величина смещения по отношению к фокусному расстоянию не превышает доли процента. Также можно заметить, что для АР 2 (дальней) размеры зоны повышенной напряженности более вытянуты вдоль оси «у». Это связано с большим фокусным расстоянием, что приводит к «размазыванию» энергии в пространстве.

По сравнению с равноудаленной от точки фокусировки ортогональной конфигурацией. Конфигурация, разнесенная на разное расстояние от точки фокусировки, обеспечивает меньший уровень напряженности электрического поля в точке третьего максимума ( $F_{0\max}$ ). Первая и вторая точки максимума ( $F_{x\max}$  и  $F_{y\max}$ ) в непосредственной близости от антенных решеток имеют величину смещения, относительно точки фокусировки, численно близкую с теоретической (см. таблицу 2.12). Амплитуда напряженности электрического

поля в точке третьего максимума ( $F_{0\max}$ ) ниже, чем для случая с равноудаленными от точки фокусировки антенными решетками. Это связано с тем, что АР 2 расположена от точки фокусировки дальше, что ведет к большему снижению напряженности поля.

Использование ортогонально расположенных антенных решеток позволяет обеспечить три точки максимума амплитуды напряженности электрического поля. Одна из них будет в точке фокусировки или в непосредственной близости от нее – третий максимум амплитуды напряженности ( $F_{0\max}$ ) и две смещенные в сторону антенных решеток – первый и второй максимум амплитуды напряженности ( $F_{x\max}$  и  $F_{y\max}$ ).

С особенностями ортогональных конфигураций можно работать следующим образом:

1. Использовать антенные решетки с большим отношением  $L/F$  – это приведет к меньшему смещению первого и второго максимумов амплитуды напряженности в сторону антенной решетки.
2. Фокусировать антенные решетки на большее расстояние с помощью итерационного алгоритма компенсации. Это позволит либо совместить все три максимума амплитуды напряженности в одной области пространства. Либо позволит управлять расположением первого и второго максимума амплитуды напряженности и обеспечить их позиционирование в требуемые точки пространства.

Использование двух линейных антенных решеток, в параллельных и ортогональных конфигурациях, для решения задачи обеспечения максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства показали, что возможно обеспечить максимум напряженности электрического поля в заданной точке пространства. Но при большом фокусном расстоянии энергия «размазывается» в пространстве, что негативно скажется на решении задачи пространственной селекции устройств-абонентов

беспроводных телекоммуникационных сетей. Также при параллельном размещении антенных решеток управлять напряженностью электрического поля возможно только вдоль одной оси. При ортогональной конфигурации антенных решеток можно получить три максимума амплитуды напряженности и управлять положением первого и второго максимума. Предполагается, что, используя конфигурацию из четырех антенных решеток, получится получить больше точек максимума амплитуды напряженности и позволит управлять расположением этих точек максимума.

### 2.2.5 Четыре антенные решетки, сфокусированные в одну точку

Рассмотрим конфигурацию, состоящую из четырех антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства. Схематичное представление конфигурации антенных решеток показано на рисунке 2.19.

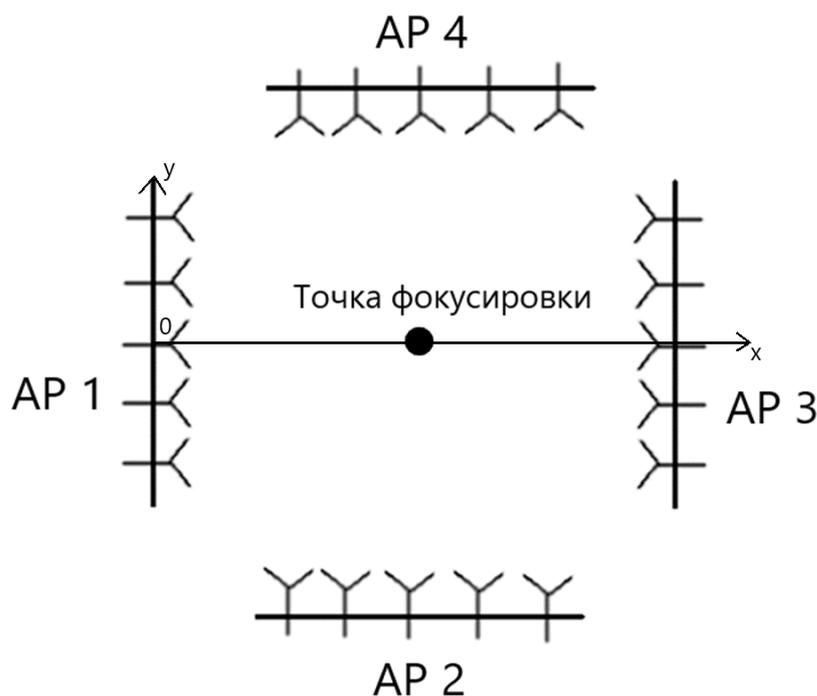


Рисунок 2.19 – Конфигурация четырех антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства

Конфигурацию, показанную на рисунке 2.19, можно представить как две ортогональные конфигурации (АР 1 + АР 2 и АР 3 + АР 4), либо как две параллельные конфигурации (АР 1 + АР 3 и АР 2 + АР 4), на итоговый

результат это не повлияет. Одна ортогональная конфигурация позволит формировать один максимум напряженности электрического поля в требуемой точке пространства (третий максимум) и также будет формировать два максимума амплитуды напряженности (первый и второй максимум), смещенные в сторону антенных решеток. Величина смещения будет зависеть от фокусного расстояния и линейных размеров антенных решеток. Таким образом, использование конфигурации, состоящей из четырех антенных решеток, позволит обеспечить пять точек максимума амплитуды напряженности электрического поля в пространстве.

На рисунке 2.20 изображено схематичное представление механизма образования пяти точек максимума амплитуды напряженности электрического поля.

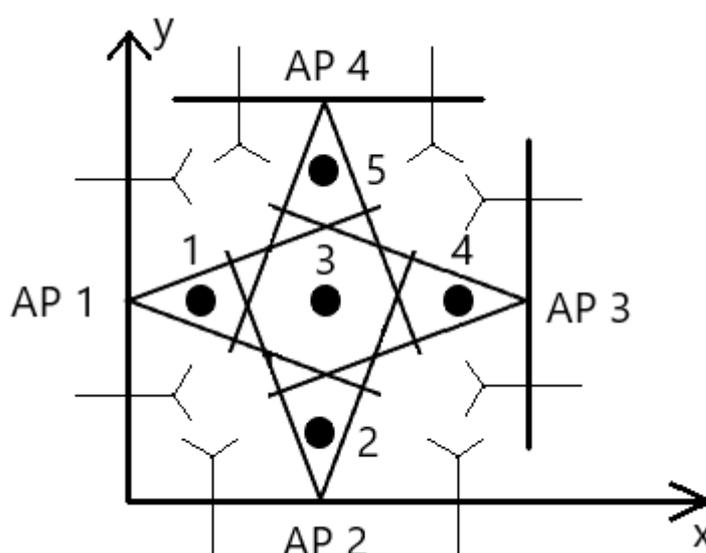
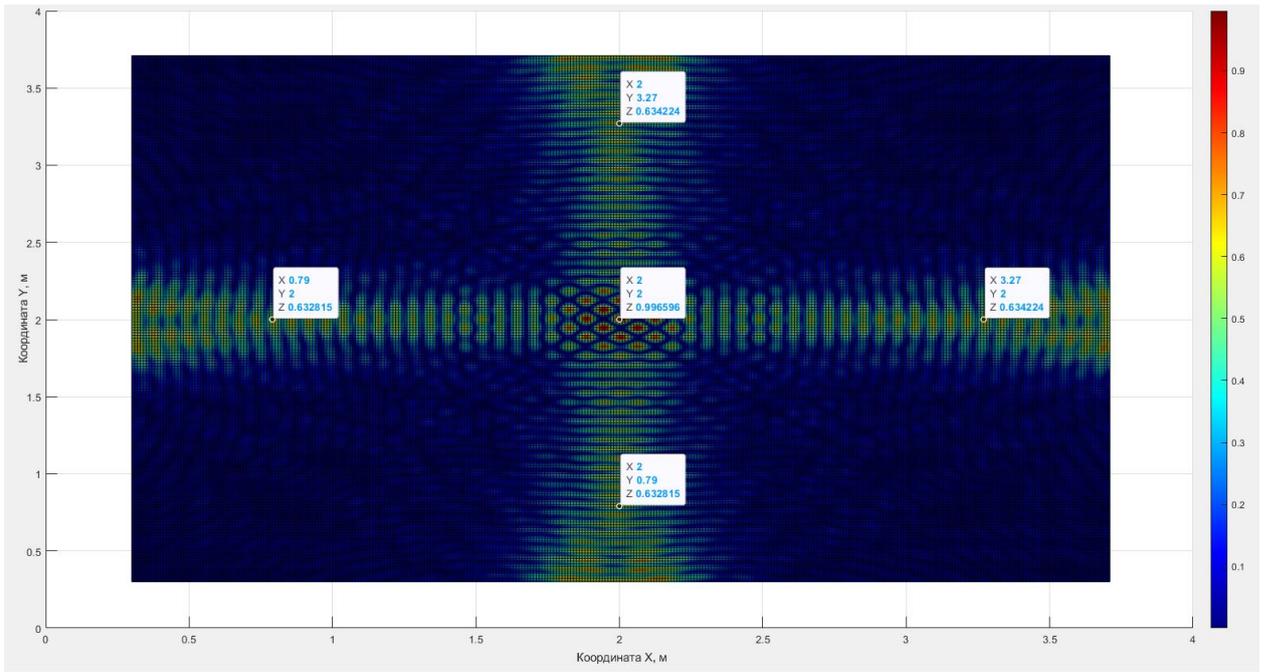
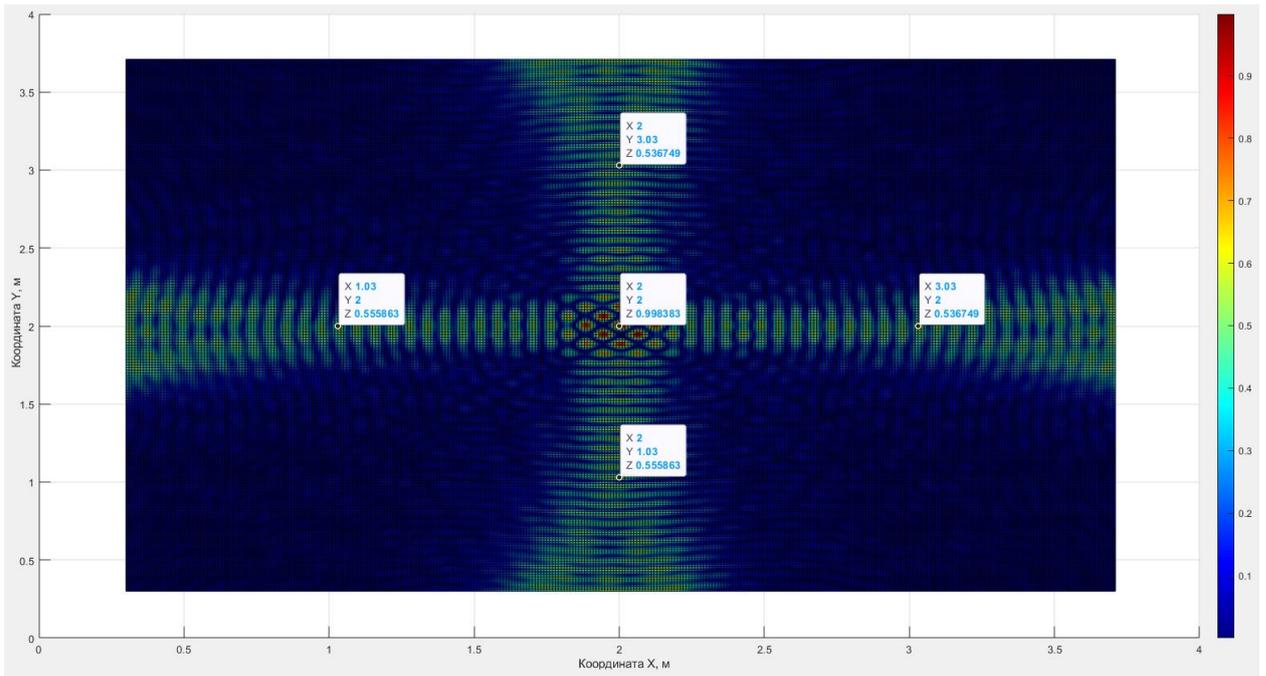


Рисунок 2.20 – Схематичное представление механизма формирования нескольких точек максимума

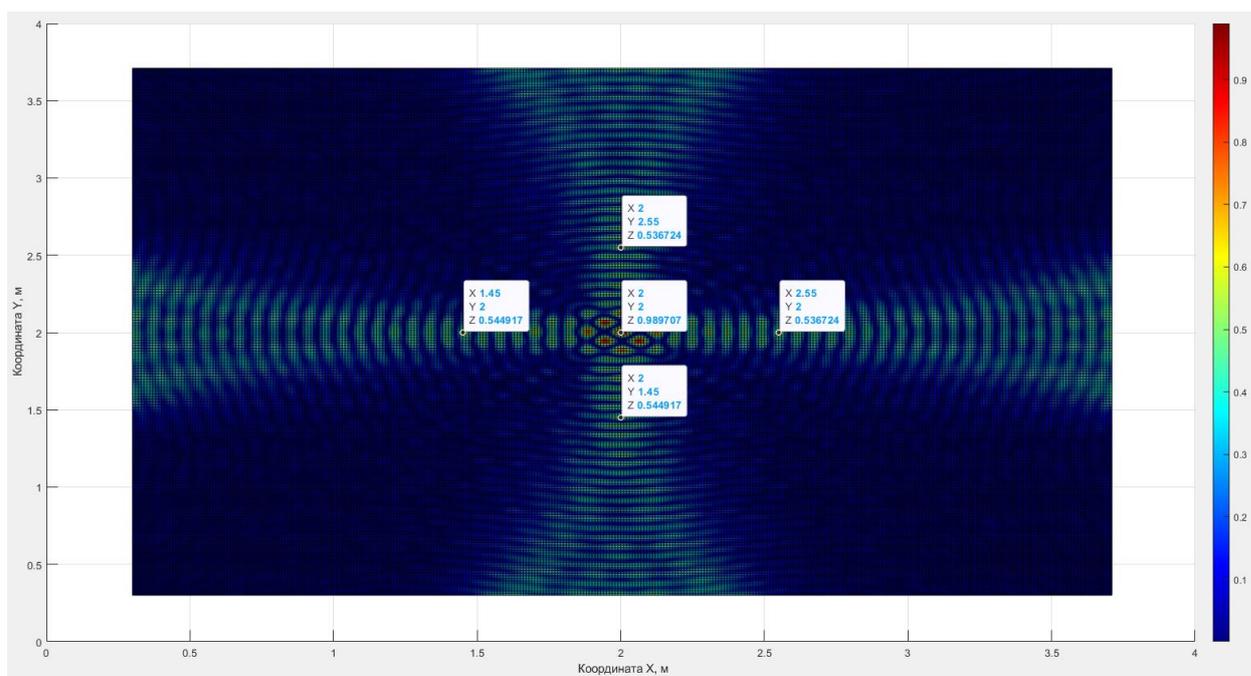
Для рассмотренных в подразделе 2.2.4 антенных решеток проведем расчет зависимости амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для четырех антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства. Точка фокусировки, будет на расстоянии 2000 мм для каждой антенной решетки. Трехмерные зависимости представлены на рисунке 2.21.



a)



б)



в)

Рисунок 2.21 – Трехмерные зависимости амплитуды напряжённости электрического поля. а)  $N = 12$ ; б)  $N = 15$ ; в)  $N = 20$ .

На рисунке 2.21 представлена зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для четырех антенных решеток. Как можно видеть из рисунка 2.21 – точка максимума амплитуды напряженности находится в заданных координатах и совпадает с точкой фокусировки (синфазного сложения волн), и зона повышенной напряженности электрического поля имеет гораздо меньшие размеры по сравнению с ортогональной конфигурацией, параллельной конфигурацией антенных решеток и одиночной антенной решеткой. Также из результатов видно, что формируется пять максимумов амплитуды напряженности электрического поля. Третий максимум образовался в точке синфазного сложения электромагнитных волн за счет пересечения диаграмм направленности антенных решеток. И четыре максимума (первый, второй, четвертый и пятый) образовались в непосредственной близости к антенным решеткам, величина смещения максимумов относительно точки синфазного сложения волн связана с линейными размерами антенной решетки и фокусного расстояния, и

положения этих максимумов совпали с теоретическими результатами, приведенными в подразделе 1.4.

Из выше написанного становится понятно, что конфигурация из четырех антенных решеток может обеспечить несколько точек максимума амплитуды напряженности электрического поля, управляя фокусным расстоянием антенной решетки можно управлять количеством точек максимума амплитуды напряженности электрического поля. Это открывает возможности по обеспечению нескольких точек в пространстве с высокой напряженностью электрического поля с целью обеспечения пространственной селекции устройств, функционирующих в беспроводных телекоммуникационных сетях.

### **2.3 Выводы по второму разделу**

1. Предложен алгоритм, обеспечивающий позиционирование максимума напряженности электрического поля в заданной точке, с помощью линейной сфокусированной на конечное расстояние антенной решетки. При этом фокусировка антенной решетки осуществляется на расстояние, превышающее дальность до требуемой точки расположения максимума напряженности электрического поля. Оценены размеры формируемой при этом зоны повышенной напряженности электрического поля.
2. Установлено, что при использовании двух параллельных антенных решеток, расположенных на одинаковом расстоянии от точки фокусировки, в зависимости от отношения линейных размеров к фокусному расстоянию ( $L/F$ ), в распределении напряженности электрического поля возможно формирование двух максимумов, протяженного плато или одиночного компактного максимума. Для малых величин отношения  $L/F$  формируется два максимума амплитуды напряженности электрического поля, смещенные от требуемой точки обеспечения максимума в сторону антенных решеток. Если зоны повышенной напряженности от обеих антенных решеток пересекаются

друг с другом, формируется протяженная зона высокой напряженности – «плато». В иных случаях формируется один максимум амплитуды напряженности электрического поля.

3. При использовании двух параллельных антенных решеток, расположенных на разном расстоянии от точки фокусировки – наибольший вклад в формирование максимума амплитуды напряженности в заданной точке вносит ближайшая антенная решетка.
4. При использовании расположенных ортогонально друг другу антенных решеток, формируется три максимума амплитуды напряженности электрического поля. Третий максимум образуется в точке синфазного сложения волн, за счет пересечения диаграмм направленности антенных решеток. Первый и второй максимумы амплитуды напряженности электрического поля формируются в непосредственной близости каждой из антенных решеток. Это связано со смещением максимума амплитуды напряженности электрического поля из-за снижения интенсивности электромагнитной волны. Если смещение амплитуды напряженности электрического поля компенсировать, то можно обеспечить одну точку максимума в заданных координатах пространства. Либо управляя фокусным расстоянием возможно управлять положением первого и второго максимума вдоль оси «х» и «у» соответственно.
5. Использование четырех антенных решеток, сфокусированных в одну точку, обеспечивает максимум амплитуды напряженности электрического поля в заданных координатах. А также дополнительно четыре максимума амплитуды напряженности электрического поля, смещенные в сторону каждой из антенных решеток. Таким образом очевидно, что, управляя фокусным расстоянием антенных решеток можно управлять количеством точек максимума амплитуды

напряженности электрического поля и управлять положением точек максимума в пространстве.

### **3. Формирование нескольких зон повышенной напряженности электрического поля в заданных областях пространства**

В предыдущих разделах работы рассмотрен метод формирования одного максимума амплитуды напряженности электрического поля в пространстве. Очевидно, что для пространственной селекции устройств, работающих в беспроводных телекоммуникационных сетях, одной зоны повышенной напряженности недостаточно – необходимо формировать несколько зон повышенной напряженности электрического поля. Это определяет **цель настоящего раздела** – обосновать возможность формирования нескольких зон повышенной напряженности электрического поля в пространстве, используя сфокусированные антенные решетки.

Для достижения указанной цели решены следующие **задачи**:

1. Разработать математическую модель, определяющую взаимосвязь амплитуд и начальных фазы сигналов, подводимых к парциальным антенным излучателям и формируемым распределением амплитуды напряженности электрического поля.

2. На основе разработанной математической модели предложить способ определения амплитуд и фаз сигналов, подводимых к парциальным антеннам, обеспечивающих заданное распределение амплитуды напряженности электрического поля в рассматриваемой области пространства.

3. Подтвердить теоретические наработки при помощи системы электродинамического моделирования.

#### **3.1 Математическая модель**

Рассмотрим прямоугольное помещение, на стенах которого расположены излучающие антенны. На рисунке 3.1 представлен пример рассматриваемого помещения с антеннами, вид сверху. В помещении, показанном на рисунке 1, имеется  $N$  – точек передачи (излучающие антенны), расположенных эквидистантно по периметру помещения,  $M$  – точек приема

(приемные антенны абонентских устройств сети беспроводной передачи данных), расположенных в пределах помещения. Начало правой декартовой прямоугольной системы координат расположим в центре помещения. Оси координат  $oX$  и  $oY$  ориентируем параллельно стенам помещения. Ось  $oZ$  направлена вверх. Теоретических ограничений на количество точек приема не накладывается.

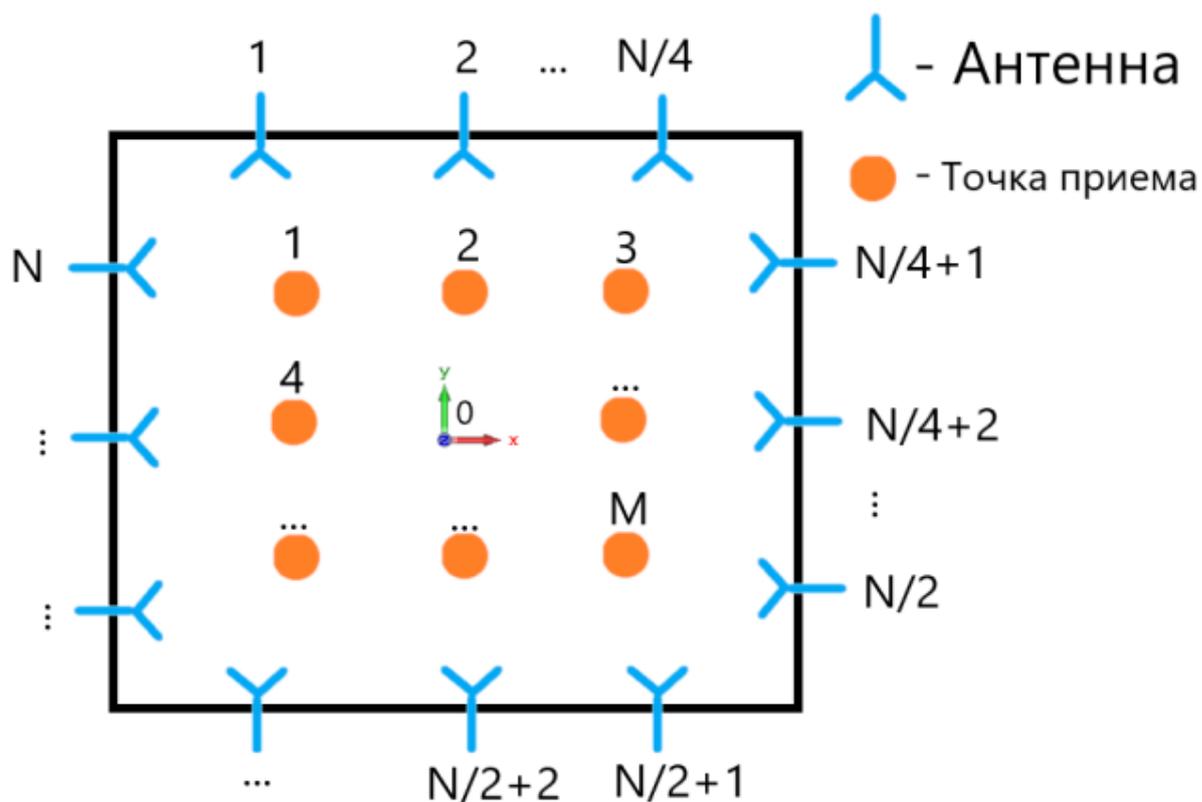


Рисунок 3.1 – Рассматриваемая конфигурация антенн в помещении

Предположим, что, управляя амплитудами и фазами сигналов, подводимыми к антеннам, расположенным по периметру помещения, можно задавать зоны максимумов и минимумов электрического поля. Обозначим комплексные амплитуды излучаемых сигналов:

$$\dot{a}_n = a_n \cdot e^{j\phi_n}, \quad (3.1)$$

где:  $a_n$  – амплитуда сигнала, излучаемого из  $n$ -той точки;  $\phi_n$  – начальная фаза сигнала, излучаемого из  $n$ -той точки;  $j$  – мнимая единица.

Комплексная амплитуда сигнала в точках приема:

$$\dot{b}_m = b_m \cdot e^{j\psi_m}, \quad (3.2)$$

где:  $b_m$  – амплитуда сигнала в  $m$ -той точке;  $\psi_m$  – фаза сигнала в  $m$ -той точке.

Совокупность комплексных амплитуд излучаемых и принимаемых в точках приема образуют вектор излучаемых сигналов  $[\dot{A}]$  и вектор принимаемых сигналов  $[\dot{B}]$  соответственно.

Помещение, показанное на рисунке 3.1, можно представить в виде абстрактного многополюсника СВЧ с  $N + M$  входами. При этом точкам, из которых излучаются электромагнитные волны (антенны по периметру помещения на рис. 3.1), соответствуют входы многополюсника с номерами 1 по  $N$ . Точки приема соответствуют входам многополюсника с номерами от  $N+1$  по  $N + M$ . Схематичное представление системы в виде абстрактного многополюсника показано на рисунке 3.2. Фактически, введенный абстрактный многополюсник характеризует среду распространения электромагнитных волн в рассматриваемом помещении.

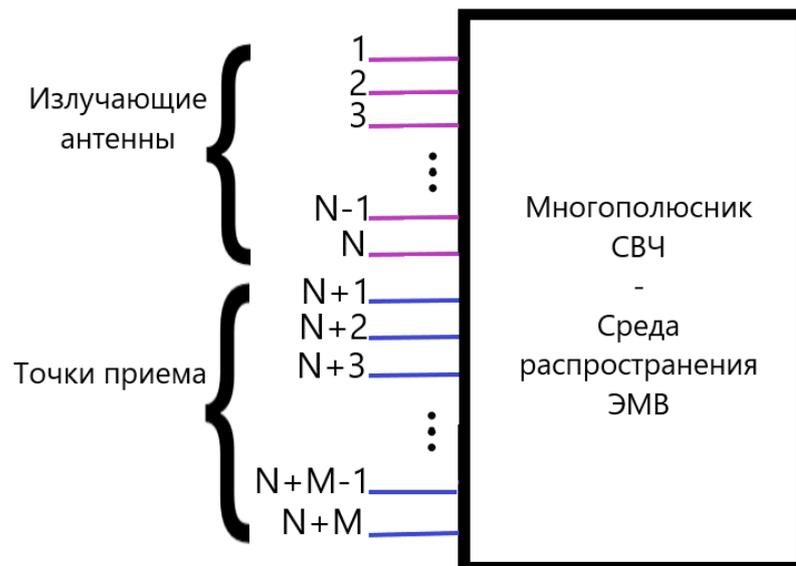


Рисунок 3.2 – Схематичное представление антенной системы в виде абстрактного многополюсника

Такой подход позволяет задачу определения параметров излучаемых сигналов, обеспечивающих формирование зон повышенной напряженности излучения беспроводных сетей передачи данных в заданных областях помещения, рассматривать как задачу определения входных сигналов многополюсника при заданных его выходных сигналах. С учетом линейности среды распространения запишем характеристическое уравнение многополюсника на основе матрицы рассеяния [58, 107, 108]:

$$[\dot{Y}] = [\dot{S}] \cdot [\dot{X}], \quad (3.3)$$

где:  $[\dot{Y}]$  – вектор-столбец, составленный из комплексных амплитуд выходных электромагнитных волн многополюсника (вектор отраженных (рассеянных) электромагнитных волн) размерностью  $[N+M$  строк;  $1$  столбцов];  $[\dot{X}]$  – вектор-столбец, составленный из комплексных амплитуд входных (излучаемых) электромагнитных волн (вектор падающих электромагнитных волн) размерностью  $[N+M$  строк;  $1$  столбцов];  $[\dot{S}]$  – характеристическая матрица многополюсника (матрица рассеяния) размерностью  $[N+M$  строк;  $N+M$  столбцов].

Рассмотрим характеристическую матрицу и вектора падающих и рассеянных волн.

Вектор комплексных выходных сигналов  $[\dot{Y}]$  определяет результирующую напряженность электрического поля в каждой из рассматриваемых точек, показанных на рисунке 1. Первые  $N$  элементов вектора  $[\dot{Y}]$  характеризуют результирующую напряженность поля в точках расположения излучателей. Так как фокусировать излучение требуется внутри помещения, а не на его стенах (см. рис. 3.1), можно наложить условие равенства нулю рассеянных волн в этих точках. Следующие  $M$  элементов – комплексные амплитуды напряженности электрического поля в точках приема. Их величины определяются требуемыми амплитудами и фазами

напряженности поля в каждой из  $M$  приемных точек ( $\dot{b}_m$ ). С учетом этого, вектор-столбец выходных электромагнитных волн будет иметь следующий вид:

$$[\dot{Y}] = [\dot{y}_1 = 0; \dots; \dot{y}_N = 0; \dot{y}_{N+1} = \dot{b}_1; \dots; \dot{y}_{N+M} = \dot{b}_M]^T. \quad (3.4)$$

Вектор-столбец излучаемых электромагнитных волн  $[\dot{X}]$  так же составлен из двух частей. Элементы с 1 по  $N$  представляют собой комплексные амплитуды электромагнитных волн, падающих на соответствующие входы абстрактного многополюсника. Фактически, это комплексные амплитуды электромагнитных волн, излучаемых в помещение. Элементы с  $N+1$  по  $N+M$  являются комплексными амплитудами электромагнитных волн, излучаемых из точек приема. Очевидно, что они равны нулю. С учетом этого вектор-столбец комплексных амплитуд излучаемых электромагнитных волн имеет вид:

$$[\dot{X}] = [\dot{x}_1 = \dot{a}_1; \dots; \dot{x}_N = \dot{a}_N; \dot{x}_{N+1} = 0; \dots; \dot{x}_{N+M} = 0]^T. \quad (3.5)$$

Рассмотрим характеристическую матрицу  $[\dot{S}]$  абстрактного многополюсника – матрицу рассеяния. В общем виде для многополюсника с  $N+M$  входами ее можно записать:

$$[\dot{S}] = \begin{bmatrix} \dot{s}_{1,1} & \dots & \dot{s}_{1,N} & \dot{s}_{1,N+1} & \dots & \dot{s}_{1,N+M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{s}_{N,1} & \dots & \dot{s}_{N,N} & \dot{s}_{N,N+1} & \dots & \dot{s}_{N,N+M} \\ \dot{s}_{N+1,1} & \dots & \dot{s}_{N+1,N} & \dot{s}_{N+1,N+1} & \dots & \dot{s}_{N+1,N+M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{s}_{N+M,1} & \dots & \dot{s}_{N+M,N} & \dot{s}_{N+M,N+1} & \dots & \dot{s}_{N+M,N+M} \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Для матрицы рассеяния ее диагональные элементы определяют коэффициенты отражения от каждого из входов. Применительно к рассматриваемой задаче формирования зон повышенной напряженности

излучения в заданных точках, диагональные элементы характеристической матрицы будут определяться качеством согласования антенны, расположенной в соответствующей номеру элемента точке излучения с питающим трактом.

Вне диагональные элементы характеристической матрицы являются комплексными коэффициентами передачи между соответствующими входами многополюсника. С учетом того, что абстрактный многополюсник представляет собой среду распространения электромагнитных волн между всеми точками рассматриваемой на рис. 3.1 конфигурации, можно записать выражение, определяющее вне диагональные элементы характеристической матрицы (без учета переотражений электромагнитных волн внутри помещения):

$$\dot{s}_{i,k} = g_{i,k} \cdot g_{k,i} \cdot r_{i,k}^{-q} \cdot \exp(-j \cdot \beta \cdot r_{i,k}), \quad (3.7)$$

где  $r_{i,k}$  - расстояние от точки, соответствующей  $i$ -тому входу многополюсника до точки, соответствующей  $k$ -тому входу многополюсника;

$\beta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$  - коэффициент фазы;  $g_{i,k}$  - элементы матрицы, содержащей

коэффициенты усиления по полю антенны, установленной в точке, соответствующей входу  $k$  в направлении точки, соответствующей входу  $i$ ;

сомножитель  $r_{i,k}^{-q}$  определяет уменьшение амплитуды напряженности электромагнитной волны при распространении от точки, соответствующей входу многополюсника  $i$  к точке, соответствующей входу многополюсника  $k$ .

. При фокусировке электромагнитного поля в ближней зоне  $q = 2$ , в дальней -  $q = 1$ .

С учетом введенной на рис. 3.1 системы координат, расстояние между каждой из рассматриваемых точек можно определить:

$$r_{i,k} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}, \quad (3.8)$$

где  $(x_i, y_i, z_i)$  - декартовы координаты  $i$ -той точки.

Таким образом, в выражении (3.3), связывающем входные и выходные воздействия, определен вектор комплексных амплитуд выходных электромагнитных волн  $[\dot{Y}]$  и характеристическая матрица рассеяния  $[\dot{S}]$ . Искомым является вектор комплексных амплитуд излучаемых электромагнитных волн  $[\dot{X}]$ , при котором обеспечивается требуемое распределение напряженности электрического поля в пределах помещения. Выражение (3.3) является матричной формой записи системы линейных уравнений. Решая ее любым известным образом, можно определить вектор  $[\dot{X}]$ .

### 3.2 Упрощенный способ расчета амплитуд и начальных фаз

Оперируя матрицами с большим количеством элементов, можно столкнуться с тем, что система не сможет в режиме реального времени менять распределение электромагнитного поля, либо требования к ее вычислительным ресурсам будут колоссальны.

Как было сказано в разделе 3.1 пространство помещения представляется в виде абстрактного многополюсника, его характеристическая матрица определяется выражением (3.6). Характеристическую матрицу абстрактного многополюсника можно разделить на четыре подматрицы:

$$[\dot{S}] = \begin{bmatrix} [\dot{S}_{TT}] & [\dot{S}_{TR}] \\ [\dot{S}_{RT}] & [\dot{S}_{RR}] \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

где  $[\dot{S}_{TT}]$  – подматрица, определяющая коэффициенты передачи от одной точки излучения к другой точке излучения (подматрица взаимных коэффициентов передачи), размерностью  $[N \text{ строк}; N \text{ столбцов}]$ ;  $[\dot{S}_{TR}]$  –

подматрица, определяющая коэффициенты передачи от точки приема к точке излучения (подматрица обратных коэффициентов передачи), размерностью  $[N$  строк;  $M$  столбцов];  $[\dot{S}_{RT}]$  – подматрица определяющая, коэффициенты передачи от точки излучения к точке приема (подматрица прямых коэффициентов передачи), размерностью  $[M$  строк;  $N$  столбцов];  $[\dot{S}_{RR}]$  – подматрица, определяющая коэффициенты передачи от точки приема к другой точке приема (подматрица взаимных коэффициентов передачи), размерностью  $[M$  строк;  $M$  столбцов]. Иллюстрация разбиения на подматрицы представлена на рисунке 3.3.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} \mathbf{[\dot{S}_{TT}]} \\ \mathbf{[\dot{S}_{TR}]} \end{array} \\
 \mathbf{[\dot{S}]} = \begin{array}{|c|c|} \hline \begin{array}{|c|c|c|} \hline \dot{s}_{1,1} & \dots & \dot{s}_{1,N} \\ \hline \dots & \dots & \dots \\ \hline \dot{s}_{N,1} & \dots & \dot{s}_{N,N} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline \dot{s}_{1,N+1} & \dots & \dot{s}_{1,N+M} \\ \hline \dots & \dots & \dots \\ \hline \dot{s}_{N,N+1} & \dots & \dot{s}_{N,N+M} \\ \hline \end{array} \\ \hline \begin{array}{|c|c|c|} \hline \dot{s}_{N+1,1} & \dots & \dot{s}_{N+1,N} \\ \hline \dots & \dots & \dots \\ \hline \dot{s}_{N+M,1} & \dots & \dot{s}_{N+M,N} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline \dot{s}_{N+1,N+1} & \dots & \dot{s}_{N+1,N+M} \\ \hline \dots & \dots & \dots \\ \hline \dot{s}_{N+M,N+1} & \dots & \dot{s}_{N+M,N+M} \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\
 \begin{array}{c} \mathbf{[\dot{S}_{RT}]} \\ \mathbf{[\dot{S}_{RR}]} \end{array}
 \end{array}$$

Рисунок 3.3 – Разбиение характеристической матрицы на подматрицы

Схематичное представление роли подматриц представлено на рисунке 3.4.

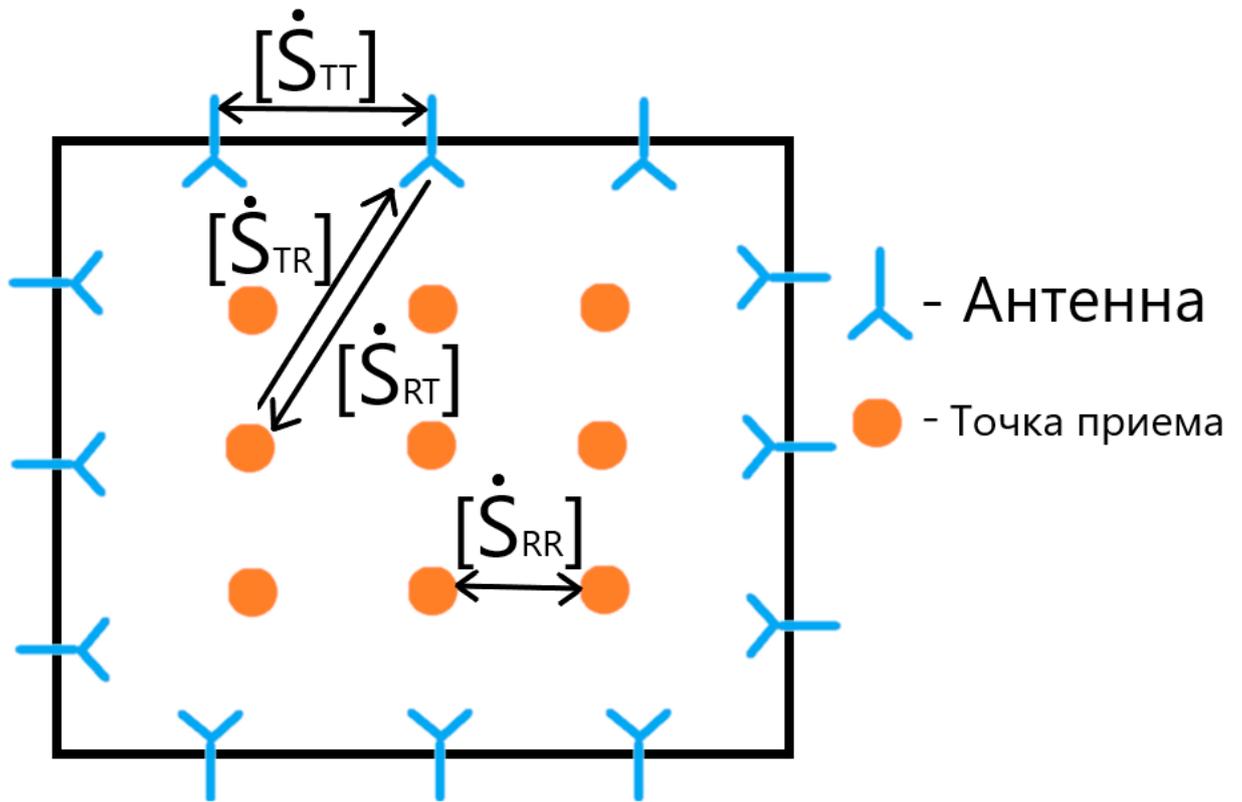


Рисунок 3.4 – Схематичное представление роли подматриц

Рассмотрим подматрицы. Для подматрицы  $[\dot{S}_{TT}]$  диагональные элементы являются коэффициентами отражения от входа излучающей антенны. Недиagonальные элементы являются комплексными коэффициентами передачи между соответствующими передающими входами многополосника (излучающими антеннами):

$$[\dot{S}_{TT}] = \begin{bmatrix} \dot{s}_{1,1} & \cdots & \dot{s}_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{s}_{N,1} & \cdots & \dot{s}_{N,N} \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

Элементами подматрицы  $[\dot{S}_{TR}]$  являются комплексные коэффициенты передачи от точек приема к точке излучения:

$$[\dot{S}_{TR}] = \begin{bmatrix} \dot{s}_{1,N+1} & \cdots & \dot{s}_{1,N+M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{s}_{N,N+1} & \cdots & \dot{s}_{N,N+M} \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

где:  $\dot{s}_{N,N+M}$  – коэффициент передачи от точки приема с номером  $N+M$  к точке излучения с номером  $N$ . Подматрица  $[\dot{S}_{TR}]$  состоит только из коэффициентов передачи.

Все элементы подматрицы  $[\dot{S}_{RT}]$  являются коэффициентами передачи от точки передачи к точке приема:

$$[\dot{S}_{RT}] = \begin{bmatrix} \dot{s}_{N+1,1} & \cdots & \dot{s}_{N+1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{s}_{N+M,1} & \cdots & \dot{s}_{N+M,N} \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

где  $\dot{s}_{N+M,N}$  – коэффициент передачи от точки передачи  $N$  к точке приема  $N+M$ . Подматрица  $[\dot{S}_{RT}]$  состоит только из коэффициентов передачи от точки передачи к точке приема.

Диагональные элементы подматрицы  $[\dot{S}_{RR}]$  являются коэффициентами отражения от входа приемной антенны, внедиагональные – коэффициенты передачи от одной точки приема к другой точке приема:

$$[\dot{S}_{RR}] = \begin{bmatrix} \dot{s}_{N+1,N+1} & \cdots & \dot{s}_{N+1,N+M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{s}_{N+M,N+1} & \cdots & \dot{s}_{N+M,N+M} \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

где  $\dot{s}_{N+i,N+k}$  – коэффициент передачи от точки приема  $N+k$  к точке приема  $N+i$ .

Запишем выражение для вычисления  $k$ -того элемента вектор-столбца выходных (в точках приема) электромагнитных волн с использованием полной характеристической матрицы:

$$\dot{y}_k = \underbrace{\dot{s}_{k,1} \cdot \dot{x}_1 + \dot{s}_{k,2} \cdot \dot{x}_2 + \dots + \dot{s}_{k,N} \cdot \dot{x}_N}_{[\dot{S}_{TR}], k > N} + \underbrace{\dot{s}_{k,N+1} \cdot \dot{x}_{N+1} + \dot{s}_{k,N+2} \cdot \dot{x}_{N+2} + \dots + \dot{s}_{k,N+M} \cdot \dot{x}_{N+M}}_{[\dot{S}_{RR}], k > N} \quad (3.14)$$

Напомним:

1. Элементы вектор-столбца излучаемых электромагнитных волн  $[\dot{X}]$  с 1 по  $N$  определяют комплексные амплитуды сигналов, подводимых к передающим антеннам. Элементы с  $N+1$  до  $N+M$  соответствуют комплексным амплитудам излучаемых из точек приема. Очевидно, что точки приема ничего не излучают и элементы с  $N+1$  до  $N+M$  равны нулю.  $\dot{x}_j = 0, k \in [N+1; N+M]$ .
2. Элементы вектор-столбца выходных электромагнитных волн  $[\dot{Y}]$  с 1 по  $N$  равны нулю, потому что в рамках рассматриваемой задачи требуется фокусировать электромагнитное поле внутри пространства помещения, а не на него стенах. Элементы с  $N+1$  до  $N+M$  принимают значения от нуля до единицы. Их значение определяется требуемым распределением поля в помещении.

Основываясь на вышеизложенном и выражении (3.14), запишем влияние на вычисления каждой из четырех подматриц (3.9):

- Подматрица  $[\dot{S}_{RR}]$ , содержащая коэффициенты передачи от одной точки приема к другой точке приема, не влияет на итоговое амплитудно-фазовое распределение. Это объясняется тем, что точки приема не излучают сигнал. В выражении (3.14) элементы  $\dot{x}_1 \dots \dot{x}_N = 0$ .
- Подматрица  $[\dot{S}_{TR}]$ , содержащая коэффициенты передачи от точек приема к точкам передачи, удовлетворяет условиям  $[\dot{S}_{TR}] = [\dot{S}_{RT}]^T$ . Элементы вектор столбца  $[\dot{Y}]$  с 1 по  $N$  равны нулю, значит элементы подматрицы  $[\dot{S}_{TR}]$  не влияют на итоговое амплитудно-фазовое распределение.
- Подматрица  $[\dot{S}_{TT}]$ , диагональные элементы которой являются коэффициентами отражения от входа соответствующих антенн, а недиагональные элементы являются коэффициентами передачи между

излучающими антеннами. Ее можно приравнять нулю, если мы обеспечим качественное согласование с питающим трактом, а диаграммы направленности будут иметь такой вид, что будут обеспечивать высокую развязку с соседними антеннами. Кроме того, элементы вектор столбца  $[\dot{Y}]$  с 1 по  $N$  равны нулю, таким образом элементы подматрицы  $[\dot{S}_{TT}]$  не влияют на итоговое амплитудно-фазовое распределение.

Следовательно, на величину напряженности в точке приема влияние оказывать будет только подматрица прямых коэффициентов передачи  $[\dot{S}_{RT}]$ . Тогда выражение для многополюсника, в виде которого мы представляем среду распространения волн, можно записать в следующем виде:

$$[\dot{B}] = [\dot{S}_{RT}] \cdot [\dot{A}] \quad (3.15)$$

Выражение (3.15) для удобства восприятия можно записать в виде системы линейных алгебраических уравнений, содержащей  $M$  уравнений и  $N$  неизвестных (комплексные амплитуды излучаемых сигналов  $\dot{a}_n$ ):

$$\begin{cases} \dot{b}_1 = \dot{s}_{RT_{1,1}} \cdot \dot{a}_1 + \dot{s}_{RT_{1,2}} \cdot \dot{a}_2 + \dots + \dot{s}_{RT_{1,n}} \cdot \dot{a}_n \\ \dot{b}_2 = \dot{s}_{RT_{2,1}} \cdot \dot{a}_1 + \dot{s}_{RT_{2,2}} \cdot \dot{a}_2 + \dots + \dot{s}_{RT_{2,n}} \cdot \dot{a}_n \\ \vdots \\ \dot{b}_m = \dot{s}_{RT_{m,1}} \cdot \dot{a}_1 + \dot{s}_{RT_{m,2}} \cdot \dot{a}_2 + \dots + \dot{s}_{RT_{m,n}} \cdot \dot{a}_n \end{cases} \quad (3.16)$$

Получившуюся систему линейных алгебраических уравнений можно решать любым известным методом, например методом Гаусса, Крамера и т.д. [107].

### 3.3. Проверка теоретических результатов электродинамическим моделированием

Для проверки теоретических результатов в среде электродинамического моделирования CST Microwave Studio построена модель прямоугольного пространства, имеющего размеры 840 x 840 мм, содержащего 56 печатных

антенн, по 14 антенн на каждой стенке (см. рисунок 3.5). А также была построена модель прямоугольного пространства с размерами 420 x 420 мм, где содержится 28 антенн, по 7 антенн на каждой стене (см. рисунок 3.6). Антенны рассчитаны на центральную частоту 2.5 ГГц [58, 108-114]. Материал подложки для антенны (Дифмолен-2) имеет относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r = 2.33$ . Толщина подложки составляет 2.1 мм. Диаметр излучающего элемента 46 мм. Коэффициент направленного действия антенны составляет 7.09 дБ. График зависимости коэффициента отражения S1.1 от частоты, для антенны представлен на рисунке 3.7, и показывает, что антенна имеет хорошее согласование на частоте 2.5 ГГц. В качестве критерия выбора плотности антенных излучателей является обеспечение минимально возможного уровня боковых лепестков. Количество антенных излучателей в антенной решетке влияет на точность фокусировки и размер области фокусировки по уровню -3 дБ. А расстояние между излучателями влияет на наличие дифракционных лепестков, расстояние между излучателями выбиралось по критерию минимума дифракционных лепестков.

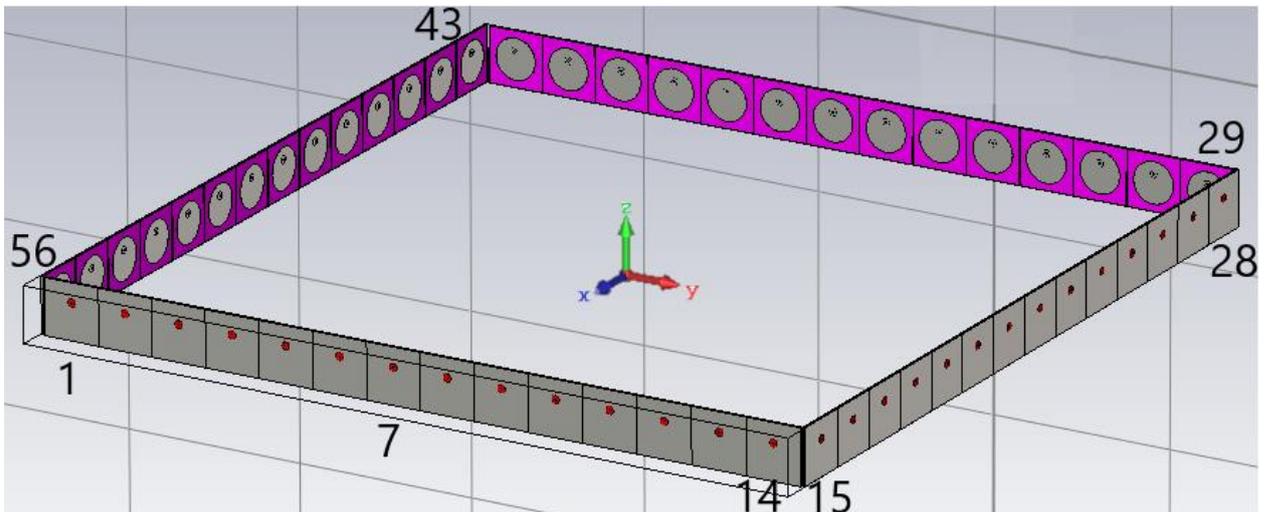


Рисунок 3.5 – Модель пространства с 56 антеннами

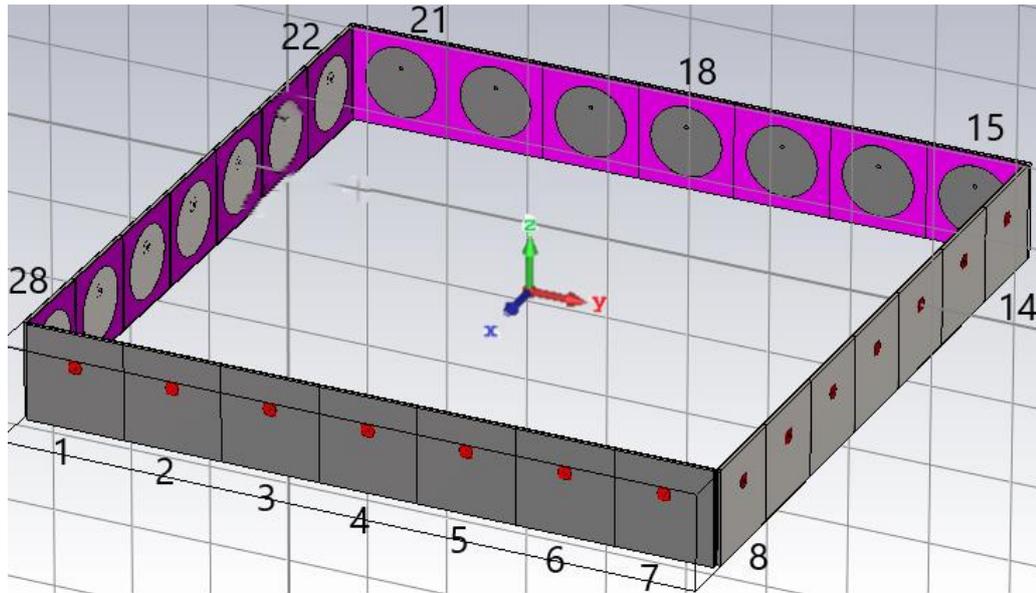


Рисунок 3.6 – Модель пространства с 28 антеннами

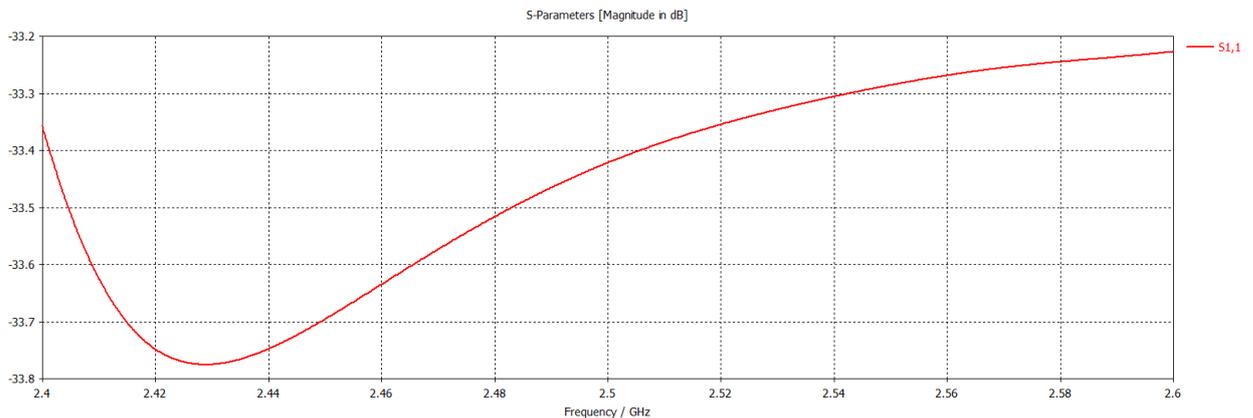


Рисунок 3.7 – Коэффициент отражения используемой печатной антенны

Для модели, содержащей 56 антенн, зададим 9 точек приема внутри пространства построенной модели, с шагом 200 мм, равноудаленных друг от друга. Таким образом общее количество точек излучения и приема равно 65. Зададим максимум поля в 4 точках приема. В остальных точках зададим минимум поля. Ожидается получить распределение электрического поля в пространстве, с областями максимумов в углах помещения (см. рисунок 3.8).

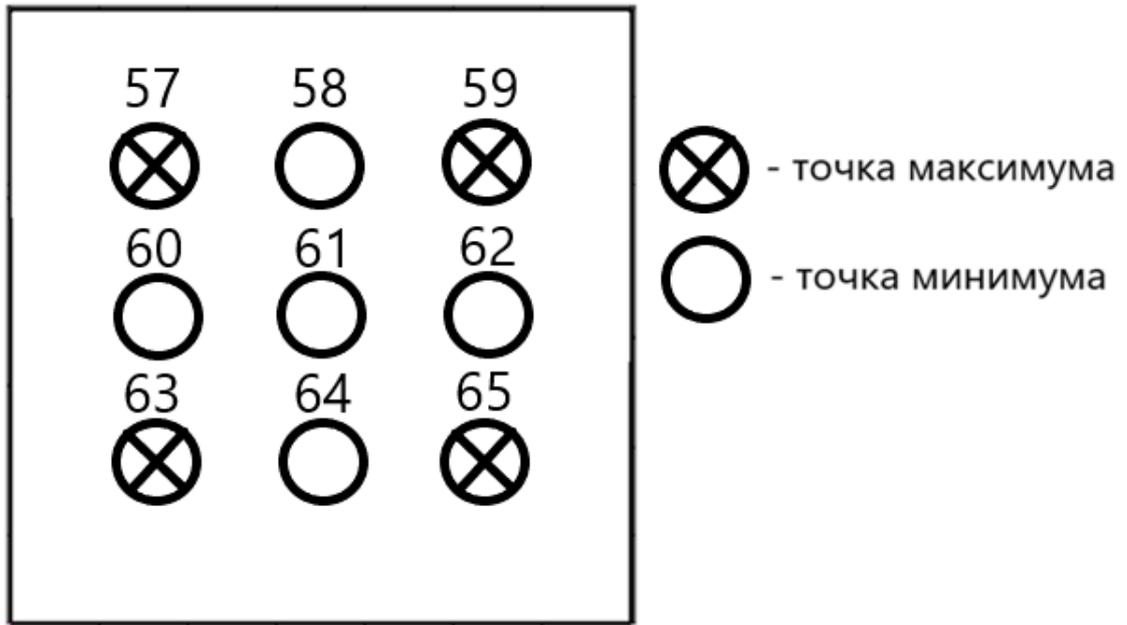


Рисунок 3.8 – Желаемое распределение амплитуды напряженности электрического поля в помещении

Тогда вектор-столбец комплексных амплитуд выходных электромагнитных волн  $[\dot{Y}]$  имеет вид:

$$[\dot{Y}] = [\dot{y}_1 = 0; \dots; \dot{y}_N = 0; \dot{y}_{N+1} = 1; \dots; \dot{y}_{N+M} = 1]^T, \quad (3.17)$$

Все элементы равны нулю, кроме элементов под номерами 57, 59, 63, 65 – они равны единице.

Расчитав элементы характеристической матрицы  $[\dot{S}]$  размерностью  $[65 \times 65]$  по выражению (3.7), и решив системы уравнений (3.3) и (3.15) методом Гаусса [106], получено распределение амплитуд и начальных фаз излучаемых сигналов. Оно приведено в таблице 3.1. Расчет по обоим выражениям дает одинаковые результаты. Отличие выражения (3.3) и (3.15) заключается в том, что в выражении (3.15) используется усеченный вариант характеристической матрицы многополюсника, таким образом проводя расчет по этому выражению выполняется меньшее количество математических операций.

Распределение амплитуд и фаз для формирования заданного поля

Номер антенны	Амплитуда	Фаза, град.	Номер антенны	Амплитуда	Фаза, град.
1	0.2646	145.87	29	0.2646	145.87
2	0.2569	52.76	30	0.2569	52.76
3	0.3257	2.43	31	0.3257	2.43
4	0.5511	-44.58	32	0.5511	-44.58
5	0.3647	-54.36	33	0.3647	-54.36
6	0.3671	14.3	34	0.3671	14.3
7	0.4207	165.79	35	0.4207	165.79
8	0.4207	165.79	36	0.4207	165.79
9	0.3671	14.3	37	0.3671	14.3
10	0.3647	-54.36	38	0.3647	-54.36
11	0.5511	-44.58	39	0.5511	-44.58
12	0.3257	2.43	40	0.3257	2.43
13	0.2569	52.76	41	0.2569	52.76
14	0.2646	145.87	42	0.2646	145.87
15	0.2646	145.87	43	0.2646	145.87
16	0.2569	52.76	44	0.2569	52.76
17	0.3257	2.43	45	0.3257	2.43
18	0.5511	-44.58	46	0.5511	-44.58
19	0.3647	-54.36	47	0.3647	-54.36
20	0.3671	14.3	48	0.3671	14.3
21	0.4207	165.79	49	0.4207	165.79
22	0.4207	165.79	50	0.4207	165.79
23	0.3671	14.3	51	0.3671	14.3
24	0.3647	-54.36	52	0.3647	-54.36

25	0.5511	-44.58	53	0.5511	-44.58
26	0.3257	2.43	54	0.3257	2.43
27	0.2569	52.76	55	0.2569	52.76
28	0.2646	145.87	56	0.2646	145.87

Полученные значения амплитуд и фаз, установлены для антенн с соответствующими номерами, в модели (см. рисунок 3.5). В результате электродинамического моделирования, получено распределение амплитуды напряженности электрического поля в пространстве помещения (см. рисунок 3.9).

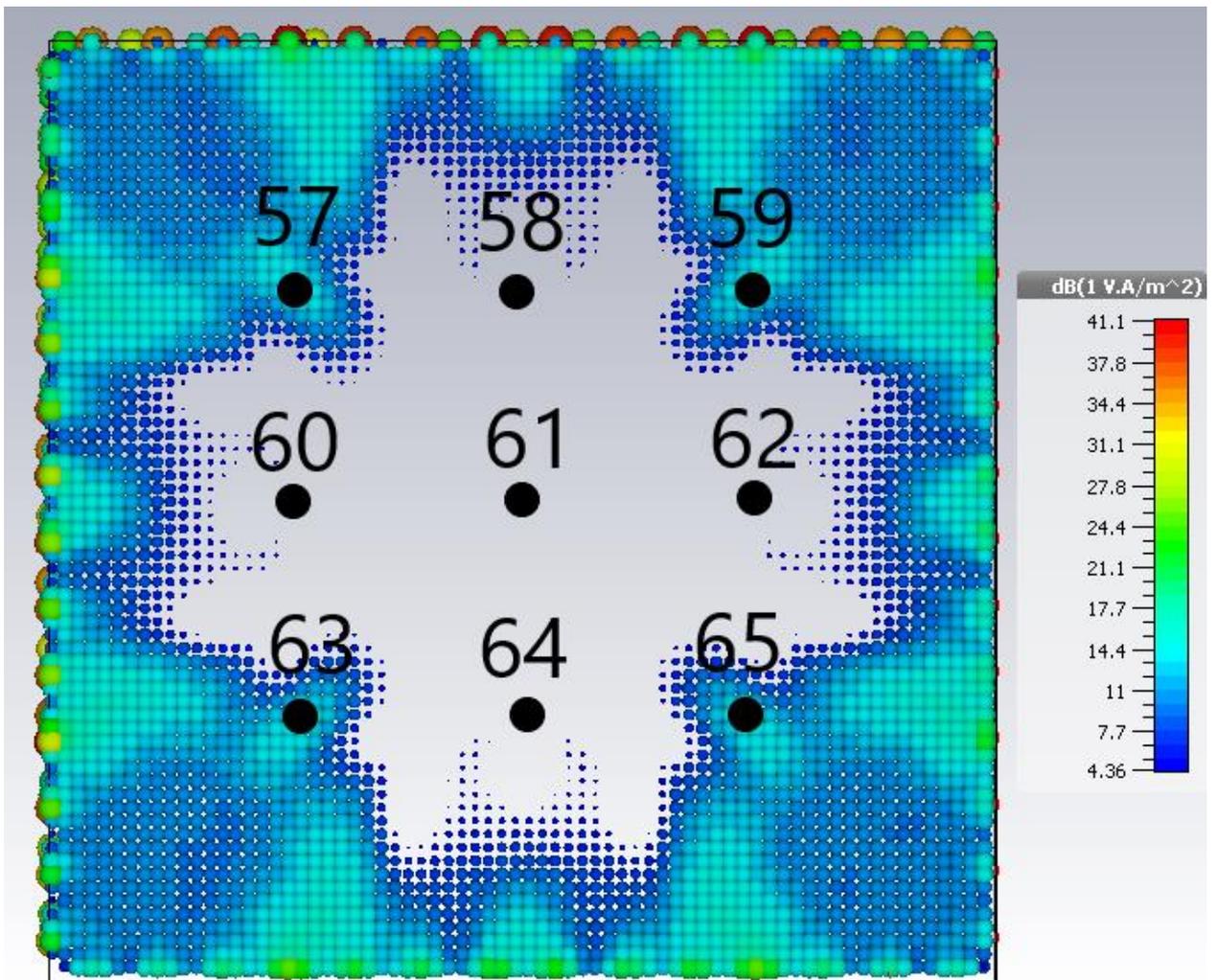


Рисунок 3.9 – Распределение электрического поля

Из рисунка 3.9 можно наблюдать, что вокруг точек фокусировки (максимума) образовались максимумы электрического поля, напоминающие по форме эллипс. Размер области максимума электрического поля можно определять по уровню -3 дБ относительно значения амплитуды напряженности электрического поля в заданных координатах фокусировки.

Уровни напряженности электрического поля в рассматриваемых точках пространства представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2.

## Уровни напряженности электрического поля

Номер точки	Уровень напряженности, дБ
57	20,7
58	-0,7
59	20,7
60	-3
61	-17
62	-4
63	20,7
64	2
65	20,7

Для модели, содержащей 28 антенн, зададим 9 точек приема внутри пространства построенной модели, с шагом 150 мм, равноудаленных друг от друга. Таким образом общее количество точек излучения и приема равно 37. Зададим три конфигурации электрического поля. Первая конфигурация будет иметь максимумы в углах помещения (см. рисунок 3.10, а), вторая конфигурация по своему виду будет напоминать латинскую букву «L» (см. рисунок 3.10, б) и третья конфигурация поля будет напоминать латинскую букву «Y» (см. рисунок 3.10, в).

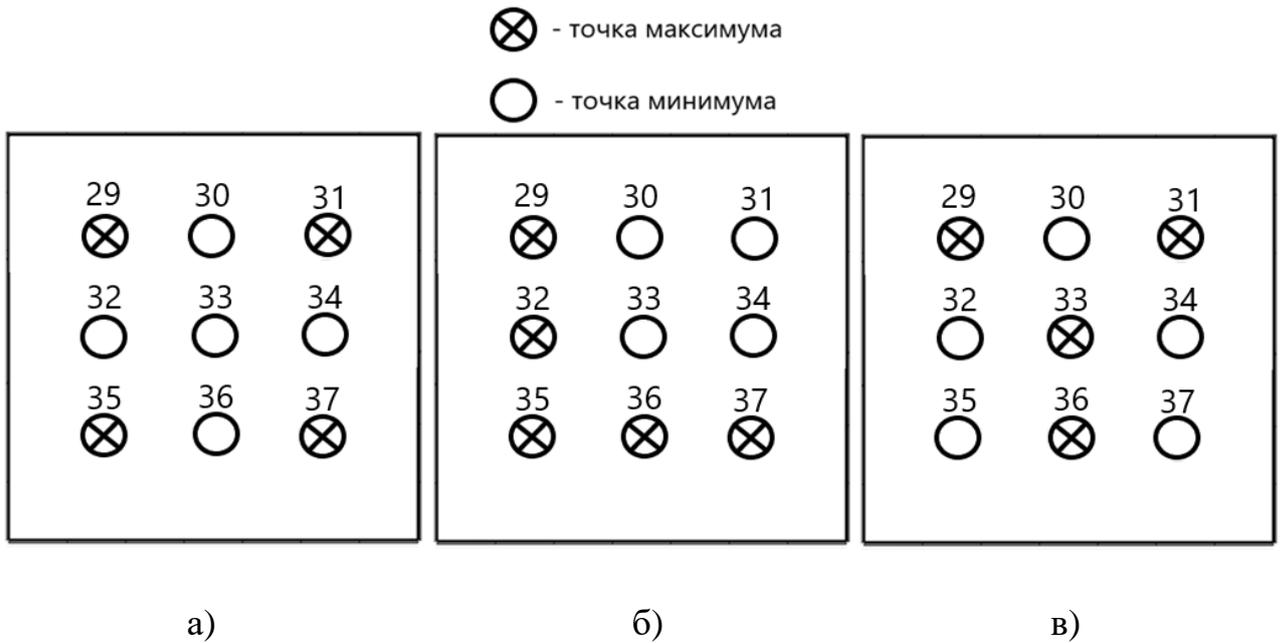


Рисунок 3.10 – Желаемые распределения амплитуды напряженности электрического поля в помещении

Рассчитав элементы характеристической матрицы  $[\dot{S}]$  размерностью  $[37 \times 37]$  по выражению (3.7), и решив системы уравнений (3.3) и (3.15) методом Гаусса [106], получено распределение амплитуд и фаз излучаемых сигналов. Оно приведено в таблице 3.3.

Таблица 3.3.

Распределение амплитуд и фаз для формирования заданного поля

Распределение поля рис. 3.10, а (максимум в углах помещения)			Распределение поля рис. 3.10, б (буква «L»)		Распределение поля рис. 3.10, в (буква «Y»)	
Номер антенны	Амплитуда	Фаза, град.	Амплитуда	Фаза, град.	Амплитуда	Фаза, град.
1	0.1	-134.35	0.5031	-150.41	0.04	175.41
2	0.07	27.64	0.3375	-161.95	0.21	-48.61
3	0.19	144.12	0.4375	-73.15	0.18	-174.45
4	0.21	-80.62	0.6462	165.33	0.13	82.66

5	0.19	144.12	0.4025	-82.96	0.18	-174.45
6	0.07	27.64	0.3418	-165.58	0.21	-48.61
7	0.1	-134.35	0.4888	-157.3	0.04	175.41
8	0.1	-134.35	0.4377	-154.14	0.07	-135.45
9	0.07	27.64	0.4364	-152.38	0.07	-73.25
10	0.19	144.12	0.2147	-29.96	0.19	167.92
11	0.21	-80.62	0.1142	95.32	0.2	-89.7
12	0.19	144.12	0.0233	-62.4	0.14	144.5
13	0.07	27.64	0.0275	30.01	0.03	28.76
14	0.1	-134.35	0.0221	27.85	0.12	-170.32
15	0.1	-134.35	0.0221	27.85	0.19	-165.03
16	0.07	27.64	0.0275	30.01	0.21	43.47
17	0.19	144.12	0.0233	-62.4	0.2	151.93
18	0.21	-80.62	0.1142	95.32	0.29	-101.14
19	0.19	144.12	0.2147	-29.96	0.2	151.93
20	0.07	27.64	0.4364	-152.38	0.21	43.47
21	0.1	-134.35	0.4377	-154.14	0.19	-165.03
22	0.1	-134.35	0.4888	157.3	0.12	-170.32
23	0.07	27.64	0.3418	-165.58	0.03	28.76
24	0.19	144.12	0.4025	-82.96	0.14	144.5
25	0.21	-80.62	0.6462	165.33	0.2	-89.7
26	0.19	144.12	0.4375	-73.15	0.19	167.92
27	0.07	27.64	0.3375	-161.95	0.07	-73.25
28	0.1	-134.35	0.5031	-150.41	0.07	-135.45

Полученные значения амплитуд и фаз, установлены для антенн с соответствующими номерами, в модели (см. рисунок 3.6). В результате электродинамического моделирования, получено распределение амплитуды напряженности электрического поля в пространстве помещения (см. рисунки 3.11, 3.12 и 3.13).

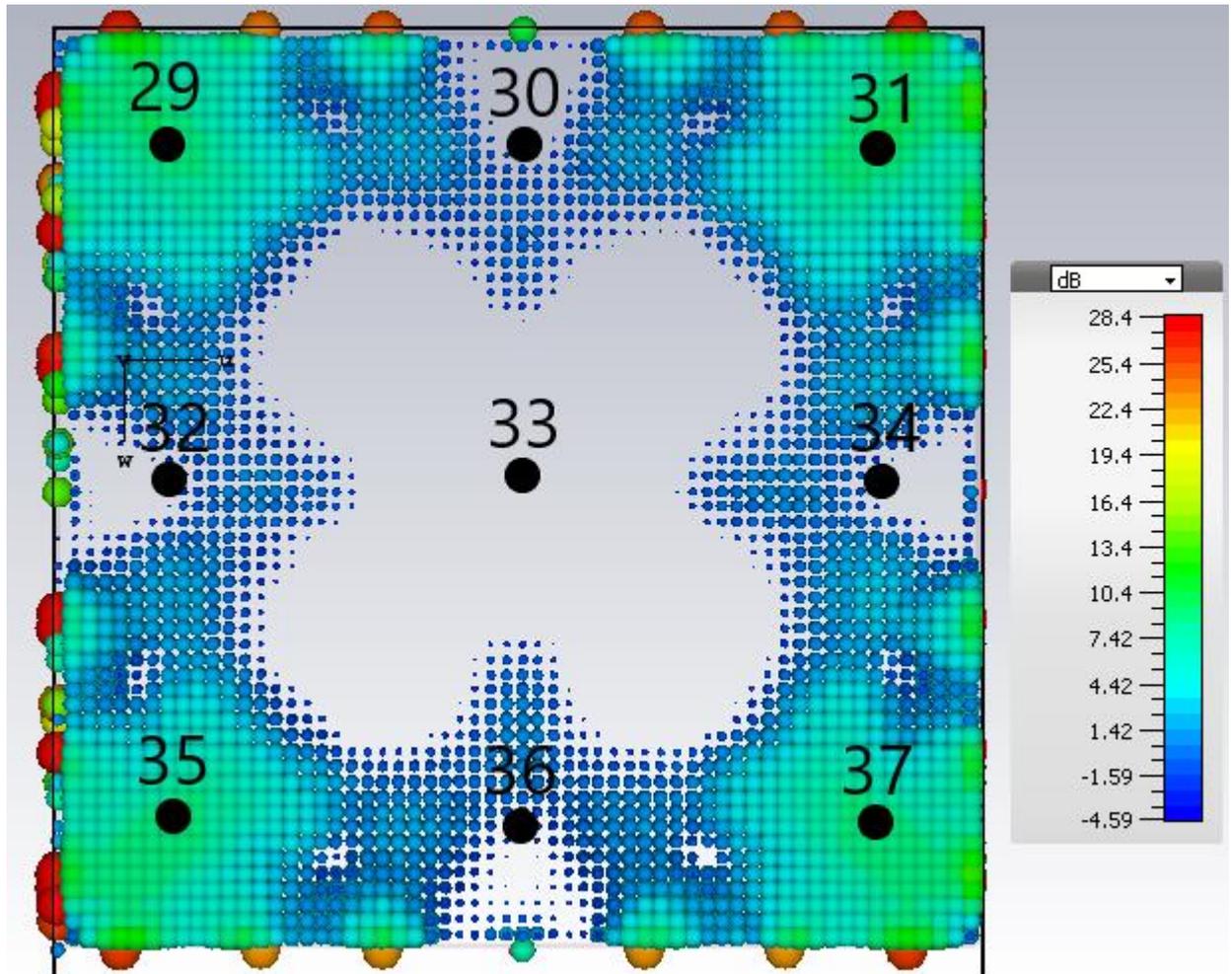


Рисунок 3.11 – Распределение электрического поля. Максимумы в углах.

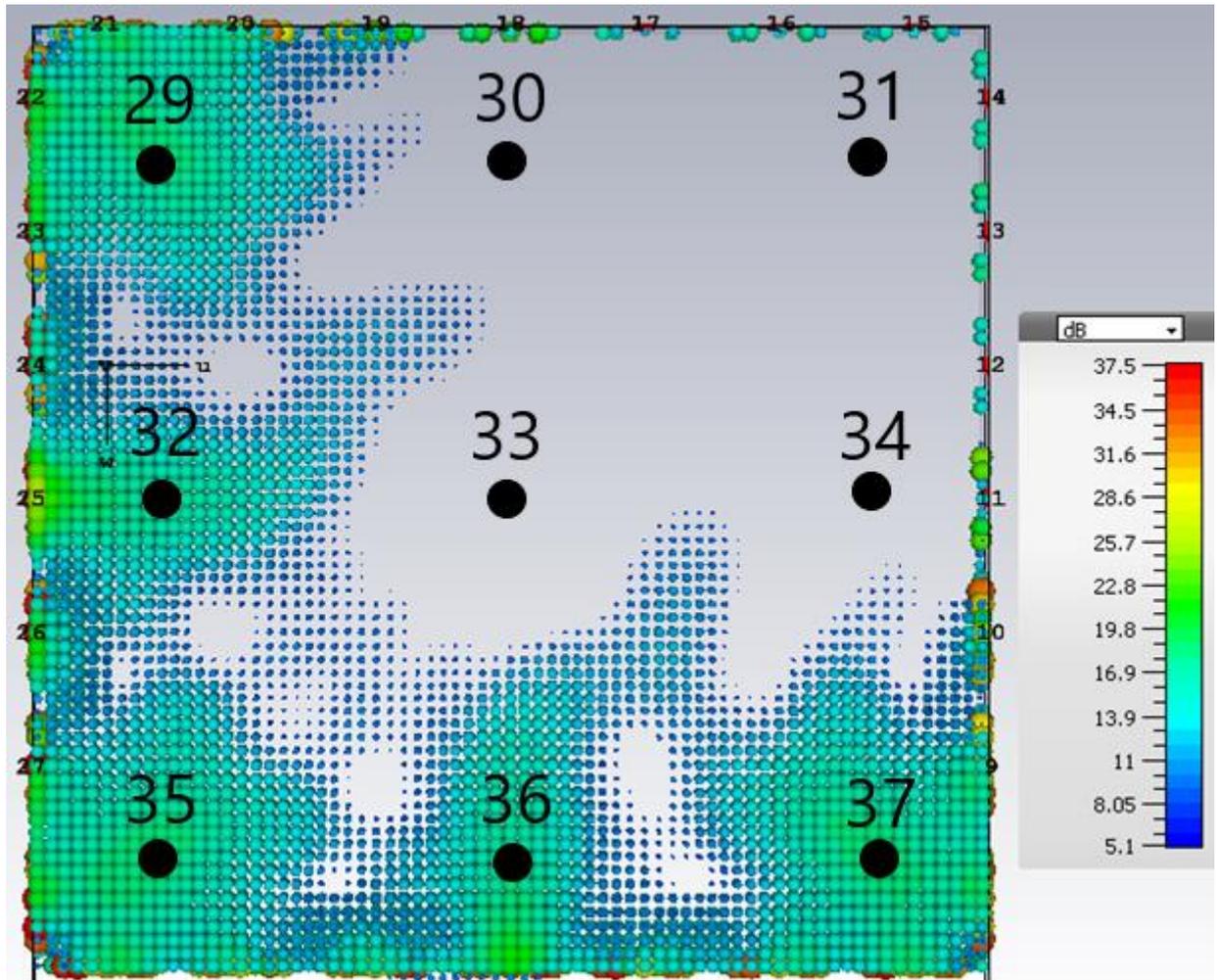


Рисунок 3.12 – Распределение электрического поля. В виде буквы «L».

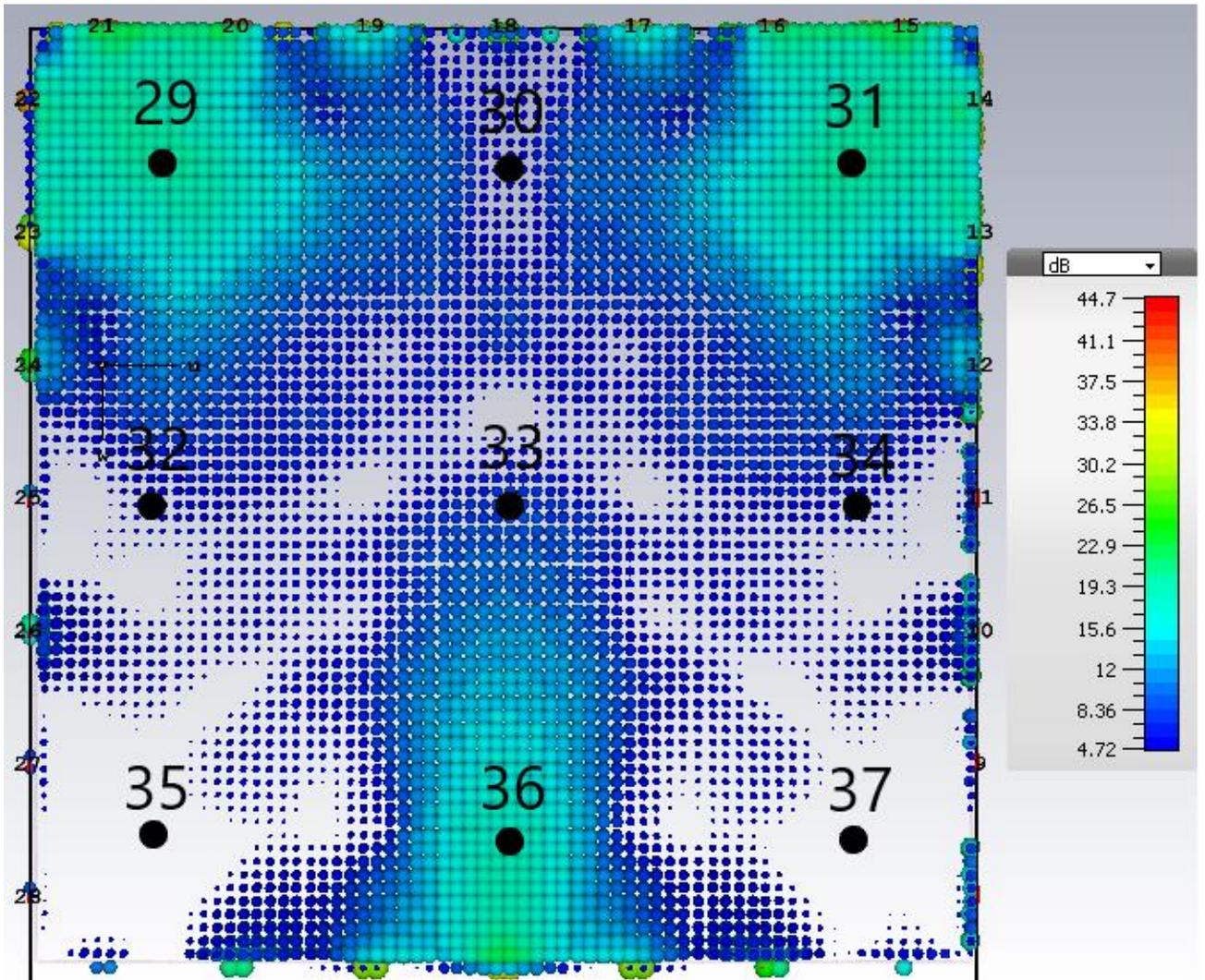


Рисунок 3.13 – Распределение электрического поля. В виде буквы «Y».

На рисунке 3.13 в точке под номером 33 амплитуда напряженности электрического поля ниже относительно других точек фокусировки, это связано с тем, что с ростом расстояния от излучателя уменьшается интенсивность электромагнитной волны, но напряженность в этой точке выше, чем в точках минимума.

Уровни напряженности электрического поля в рассматриваемых точках пространства представлены в таблице 3.4.

## Уровни напряженности электрического поля

Электрическое поле с максимумами в углах (рисунок 3.11)		Электрическое поле в виде буквы «L» (рисунок 3.12)	Электрическое поле в виде буквы «Y» (рисунок 3.13)
Номер точки	Уровень напряженности, дБ	Уровень напряженности, дБ	Уровень напряженности, дБ
29	20,1	22,8	20,5
30	-0,8	2	-1
31	20,2	-3	20,6
32	-3,2	21	-2
33	-18	5	7
34	-4,4	4,8	-1,8
35	20,2	21,2	-4
36	2,2	21,5	25
37	20,4	21,4	-3,9

### 3.4. Выводы по третьему разделу

1. Установлена взаимосвязь между параметрами сигналов (амплитуды и фазы), подводимых к совокупности излучающих антенн, расположенных произвольно в пространстве и формируемым этой совокупностью распределением амплитуды напряженности электрического поля в пределах заданной области пространства.

2. Получена система уравнений, решая которую можно определить амплитуды и фазы сигналов, подводимых к совокупности излучающих антенн и обеспечивающих заданное распределение в пространстве амплитуды напряженности электрического поля.

3. Результаты подтверждены электродинамическим моделированием. Рассмотрено две конфигурации излучающих систем, содержащих 56 и 28 антенн. Для каждой из конфигураций задавались требуемые распределения амплитуды напряженности электрического поля в пространстве, по которым осуществлялся расчет параметров излучаемых сигналов. Полученные путем электродинамического моделирования распределения амплитуды напряженности электрического поля в пространстве во всех случаях соответствовали заданным.

#### 4. Экспериментальная апробация теоретических результатов

В предыдущих разделах рассмотрены способы формирования одного и нескольких максимумов амплитуды напряженности электрического поля в пространстве. Моделирование паттернов электрического поля осуществлялось в системе автоматизированного проектирования CST Microwave Studio. Электродинамический анализ является ресурсоемким процессом, что ведет к большим временным затратам при моделировании паттернов электрического поля. Так, например, расчет паттерна размером 420 на 420 мм для 28 излучающих антенн и 9 точек фокусировки на компьютере с характеристиками 13th Gen Intel Core i7-13700K, MSI GeForce RTX 4060 Ti, 32GB Kingston Fury Beast DDR5 5200MHz занимает 4 часа, а расчет паттерна 840 на 840 мм для 56 излучающих антенн и 9 точек фокусировки занимает 16 часов. Это делает актуальной задачу разработки специализированного программного обеспечения, рассчитывающего распределение амплитуды напряженности электрических полей (паттернов).

Еще одним не рассмотренным вопросом является экспериментальное подтверждение полученных теоретических результатов. Фактически, экспериментальная апробация может включать в себя разработку макета антенной решетки, сфокусированной в заданную точку и измерение распределения напряженности электрического поля в окрестности точки фокусировки.

**Цель настоящего раздела** экспериментально подтвердить полученные теоретические результаты.

Для достижения указанной цели решены следующие **задачи**:

1. Разработать в среде MatLab программное обеспечение, осуществляющее расчет напряженности электрического поля в пределах заданной области для различной геометрической конфигурации излучающих антенн и параметров сигналов, подводимых к ним.

2. Разработать макет сфокусированной антенной решетки и при помощи него провести апробацию полученных теоретических результатов.

#### 4.1 Программное обеспечение расчета амплитуд напряженности электрического поля

Для расчета распределения амплитуды напряженности электрического поля в заданной области пространства необходимо задать координаты каждого парциального излучателя антенных решеток и координаты границ области пространства, в которой проводить расчет.

Для расчета амплитуд напряженности электрического поля в заданной области пространства необходимо ввести систему координат. На рисунке 4.1 показана конфигурация антенных решеток, начало координат находится в левом нижнем углу. Для того, чтобы рассчитывать амплитуды напряженности электрического поля, систему «антенные решетки-пространство» необходимо разбить на сетку с настраиваемым шагом. Величина шага будет определять количество точек (узлов сетки) в пространстве, в которых будет выполняться расчет амплитуд напряженности электрического поля. На рисунке 4.1 представлен фрагмент сетки, на которую разбивается пространство. Узлы сетки – точки, в которых выполняется расчет амплитуд напряженности электрического поля.

Задав шаг разбиения и размеры анализируемой области пространства получим сетку, состоящую из  $Ng$  узлов. Количество узлов сетки определяется выражением:

$$Ng = \frac{(X_{fin} - X_{start})}{\Delta X} + \frac{(Y_{fin} - Y_{start})}{\Delta Y} + \frac{(Z_{fin} - Z_{start})}{\Delta Z}, \quad (4.1)$$

где  $X_{start}, Y_{start}, Z_{start}$  - координаты начала области разбиения,  $X_{fin}, Y_{fin}, Z_{fin}$  - координаты конца области разбиения,  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  - шаг разбиения по соответствующим координатам.

Пронумеруем узлы сетки. Нумерацию осуществим линейно, слева направо снизу вверх. Таким образом, узел сетки с минимальным номером соответствует точке с максимальными координатами по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Для расчета распределения напряженности электрического поля в каждом узле сетки необходимо определить напряженность, создаваемую каждой из  $N$  излучающих антенн. Таким образом для всей анализируемой области пространства необходимо рассчитать  $N \cdot N_g$  значений напряженности. Рассмотрим выражения, позволяющие осуществить этот расчет. С учетом того, что размер анализируемой области существенно превышает длину волны, будем использовать подходы геометрической оптики без учета дифракционных явлений [115-120].

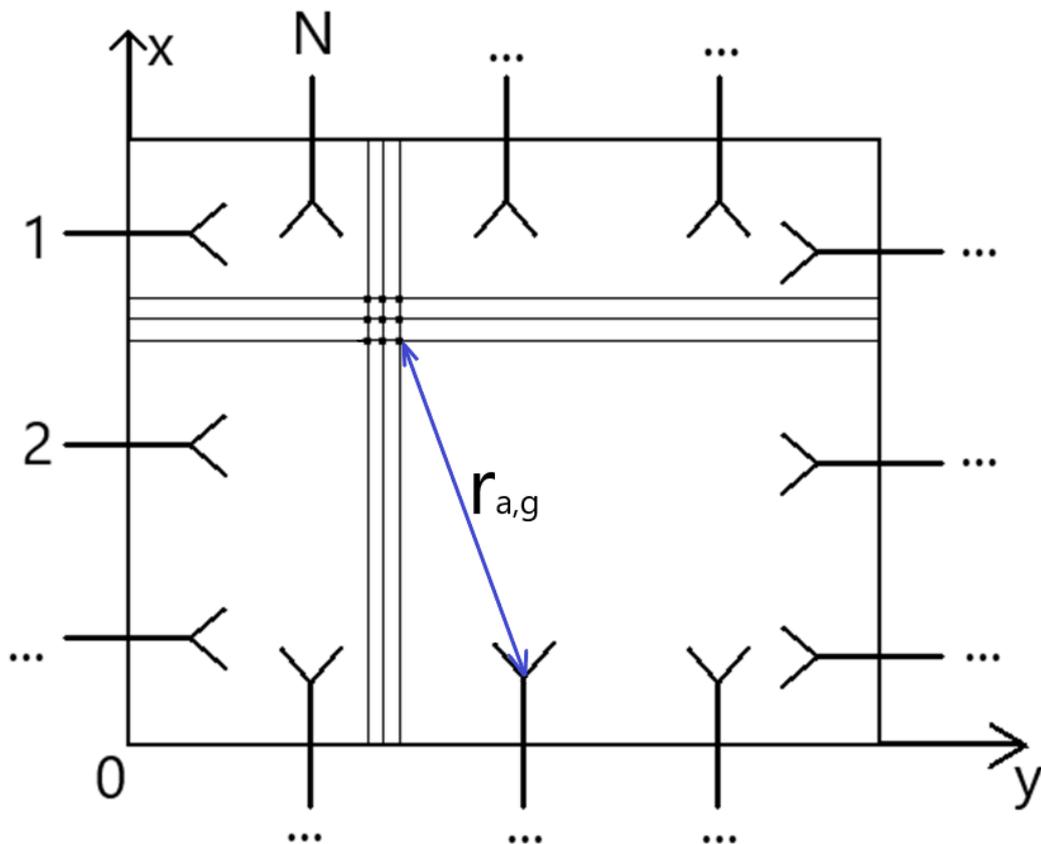


Рисунок 4.1 – Система «антенные решетки-пространство»

Вычислим расстояние между каждым парциальным излучателем и каждым узлом сетки [12, 13]:

$$r_{a,g} = \sqrt{(X_a - x_g)^2 + (Y_a - y_g)^2 + (Z_a - z_g)^2}, \quad (4.2)$$

где  $\{x_g, y_g, z_g\}$  - декартовы координаты узла сетки,  $\{X_a, Y_a, Z_a\}$  - координаты точки излучения (парциальный излучатель антенной решетки),  $g$  – номер узла сетки,  $a$  – номер излучателя.

Зная расстояние между излучателями антенных решеток и каждым узлом сетки, вычислим комплексный коэффициент передачи от каждого излучателя до каждого узла сетки. Для этого воспользуемся выражением:

$$\dot{K}_{a,g} = g_{a,g}(\alpha, \theta) \cdot r_{a,g}^{-q} \cdot \exp(-j \cdot \beta \cdot r_{a,g}), \quad (4.3)$$

где  $g_{a,g}(\alpha, \theta)$  - коэффициент усиления антенны по полю в направлении требуемого узла сетки ( $\alpha$  - азимут,  $\theta$  - угол места),  $r_{a,g}$  - расстояние между точкой излучения и узлом сетки,  $q$  – указывает по какому закону происходит снижение интенсивности электромагнитной волны с ростом расстояния ( $q = 1$  для дальней зоны,  $q = 2$  для ближней зоны,  $q = 0$  гипотетический случай без учета снижения интенсивности),  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$  - коэффициент фазы.

Чтобы рассчитать комплексную амплитуду напряженности электрического поля в произвольном узле сетки, формируемую одним излучателем воспользуемся выражением:

$$\dot{E}_{a,g} = \dot{A}_a \cdot \dot{K}_{a,g}, \quad (4.4)$$

где  $\dot{A}_a = A_a \cdot \exp(j \cdot \phi_a)$  - значение комплексной амплитуды сигнала в точке излучения антенны с номером  $a$ .

Очевидно, что значение амплитуды напряженности электрического поля в каждом узле сетки является суперпозицией волн, приходящих в узел сетки от каждого излучателя антенных решеток. Результирующее значение

амплитуды напряженности электрического поля в узле сетки рассчитывается по следующему выражению:

$$\dot{E}_{\Sigma g} = \sum_{a=0}^{N-1} \dot{A}_a \cdot \dot{K}_{a,g} \quad (4.5)$$

Полученное значение напряженности электрического поля не сложно перевести в децибелы (дБ) или величину мощности. Для этого воспользуемся выражением (4.6) для перевода в дБ и выражением (4.7) для перевода в мощности:

$$A_{dB,g} = 20 \log(|\dot{E}_{\Sigma g}|). \quad (4.6)$$

$$P_g = \frac{|\dot{E}_{\Sigma g}|^2}{Z}, \quad (4.7)$$

где  $Z = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} = 120\pi \approx 377$  Ом – волновое сопротивление свободного пространства.

Соотношения (4.1) – (4.7) легли в основу программного обеспечения для расчета распределения амплитуды напряженности электрического поля [121]. Его интерфейс, показан на рисунке 4.2.

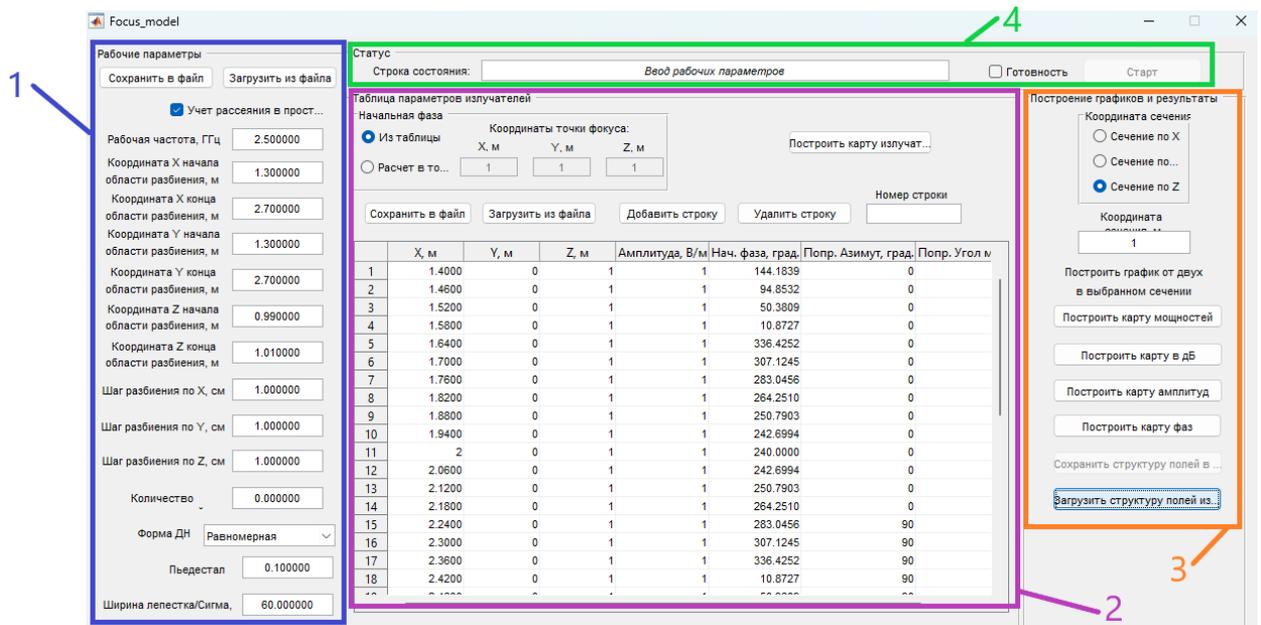


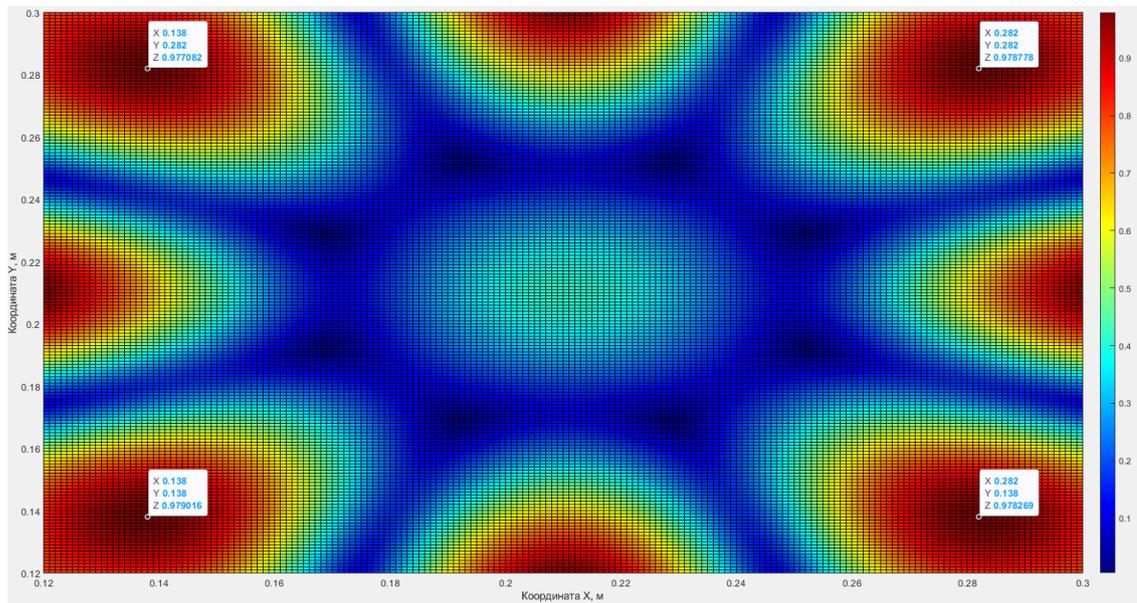
Рисунок 4.2 – Интерфейс разработанного программного обеспечения

Интерфейс программного обеспечения можно разбить на четыре блока:

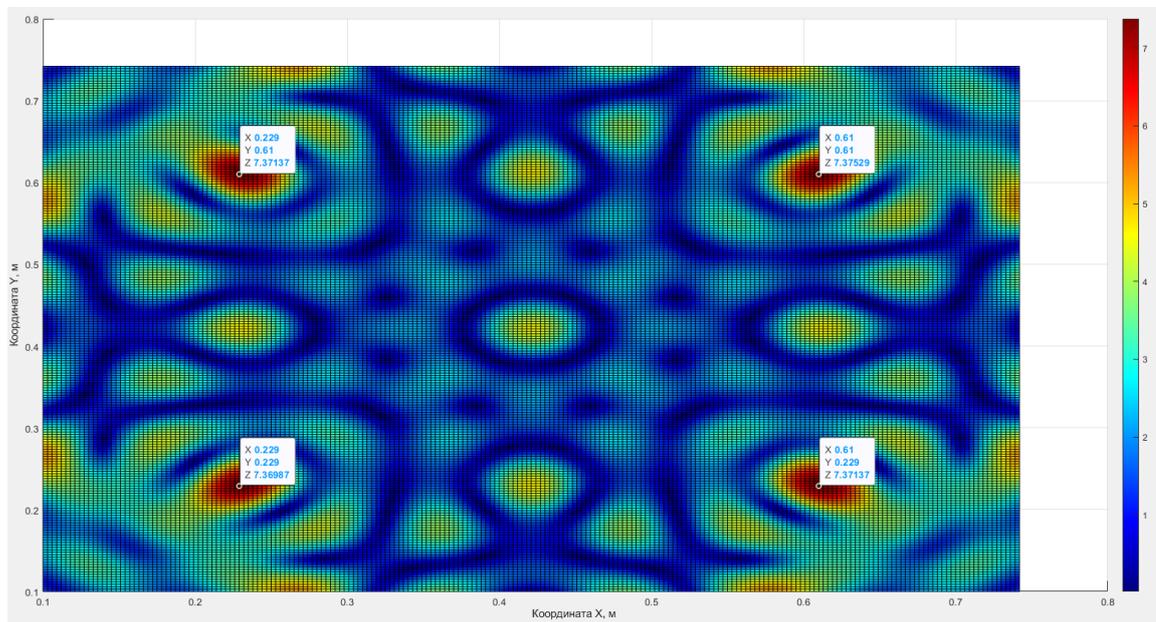
1. Рабочие параметры. В него входят: рабочая частота. Координаты начала и конца областей разбиения пространства. Шаг разбиения на сетку. Параметры диаграммы направленности.
2. Таблица параметров излучателей. В него входит таблица, в которую заносятся координаты излучателей, амплитуды сигналов, начальные фазы сигналов. Также присутствует возможность расчета начальных фаз сигналов задав координаты точки фокусировки.
3. Построение графиков и результаты. В него входят: координаты сечения, вдоль которого выводить результаты, кнопки построения графиков.
4. Статус. Содержит кнопку запуска расчетов и строку состояния расчетов.

Для апробации разработанного программного обеспечения повторим результаты расчетов конфигураций, показанных на рисунках 3.5 (конфигурация, состоящая из 56 антенн) и 3.6 (конфигурация, состоящая из 28 антенн). Проведем расчет паттернов с максимумами в углах помещения.

Амплитуды и начальные фазы сигналов приведены в таблице 3.1 и 3.3 соответственно. Результаты расчетов, единица измерения напряженности в вольтах на метр, представлены на рисунке 4.3.



а)



б)

Рисунок 4.3 – Рассчитанные паттерны электрического поля. а) 28 антенн. Размеры паттерна 420 на 420 мм; б) 56 антенн. Размеры паттерна 820 на 820 мм.

Результаты расчетов паттернов в разработанном программном обеспечении качественно совпадают с результатами, полученными в CST Microwave Studio (см. рисунок 3.11 для 28 антенн и рисунок 3.9 для 56 антенн). Расчет паттерна 420 на 420 мм в CST Microwave Studio занял 4 часа, паттерна 840 на 840 мм – 16 часов. В разработанном программном обеспечении расчеты заняли 10 и 30 секунд соответственно. Таким образом вычисления паттерна 420 на 420 мм в разработанном ПО в 1440 раз быстрее, чем в CST Microwave Studio, для паттерна 840 на 840 мм вычисления в разработанном ПО в 1920 раз быстрее.

#### **4.2 Разработка макета сфокусированной антенной решетки и экспериментальная апробация теоретических результатов**

Для апробации теоретических результатов разработан макет сфокусированной антенной решетки, состоящей из  $N = 3$  излучателей. Рабочая частота стенда  $f = 9501$  МГц. Расстояние между излучателями составляет  $d = 0.21$  м.

На рисунке 4.4 представлена блок схема излучающей части разработанного макета где:  $\Gamma$  – генератор СВЧ сигнала,  $A_1$  и  $A_2$  – регулируемые аттенюаторы с цифровым управлением,  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – управляемые фазовращатели с цифровым управлением, ПК – персональный компьютер, осуществляющий формирование команд управления аттенюаторами и фазовращателями.

Выходной сигнал генератора делится на три сигнала. Один из сигналов, полученный в результате деления, напрямую подводится к излучающей антенне. Два других на пути к излучающим антеннам проходят идентичные каскады, состоящие из аттенюатора и фазовращателя с цифровой регулировкой. Таким образом получаем возможность регулировки комплексного коэффициента передачи в двух каналах. Параметрами сигнала (амплитудой и фазой), подводимого к одной из антенн, управлять нельзя. Вместе с тем такая конфигурация стенда позволяет задать изменения

амплитуд и фаз двух каналов относительно третьего канала. Это позволяет сформировать антенную решетку с управляемым амплитудно-фазовым распределением.

Персональный компьютер используется для управления параметрами аттенюаторов и фазовращателей через СОМ порт.

Расположим излучающие антенны следующим образом. Антенна, коэффициент передачи тракта до которой не регулируется, расположена в центре (антенна с номером 2 на рисунке 4.4). Две другие, параметрами сигналов которых можно управлять, расположим в горизонтальной плоскости эквидистантно относительно антенны с номером 2.

На рисунке 4.5 показана структура приемной части стенда. Она состоит из антенны, закрепленной на подвижной каретке, компьютера управления и анализатора спектра. Управляемая подвижная каретка (УПК) позволяет перемещать приемную антенну вдоль прямой линии. Управление подвижной кареткой осуществляется с помощью персонального компьютера. Сигнал, принятый измерительной антенной, поступает на вход анализатора спектра, с помощью которого осуществляется оценка его уровня.

Излучающая и приемная части стенда располагаются в радиобезэховой камере.

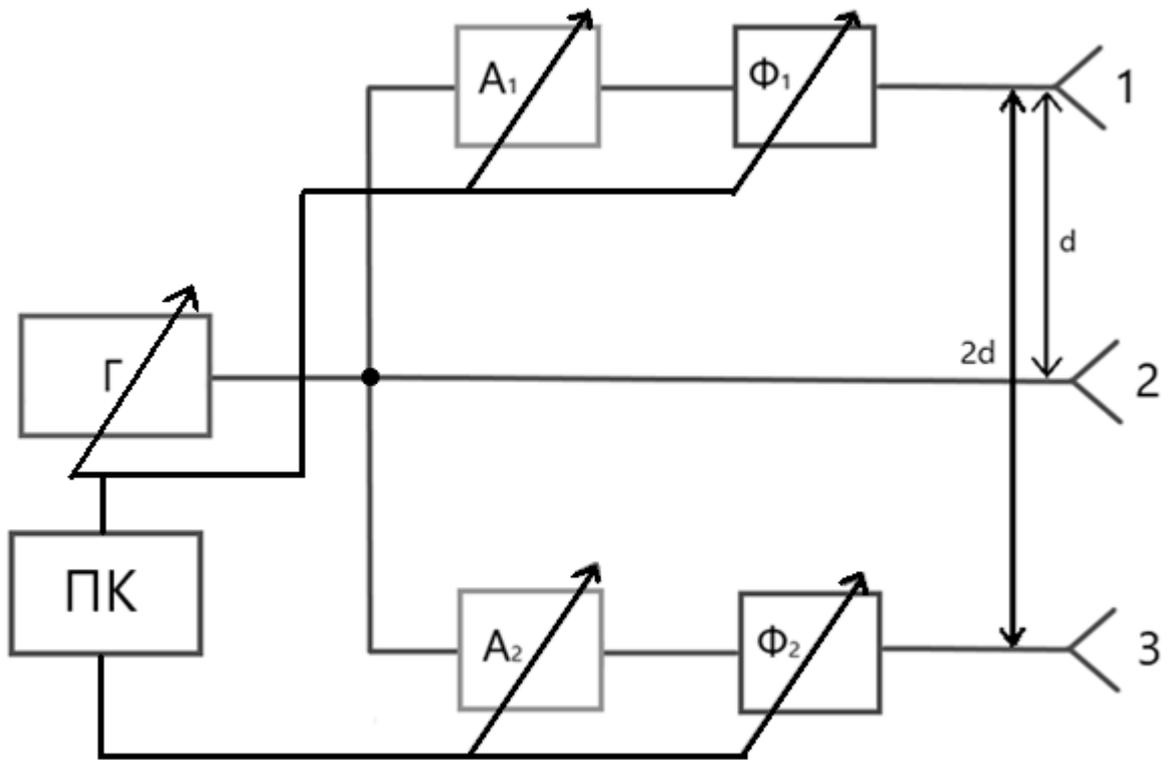


Рисунок 4.4 – Блок схема излучающей части разработанного макета

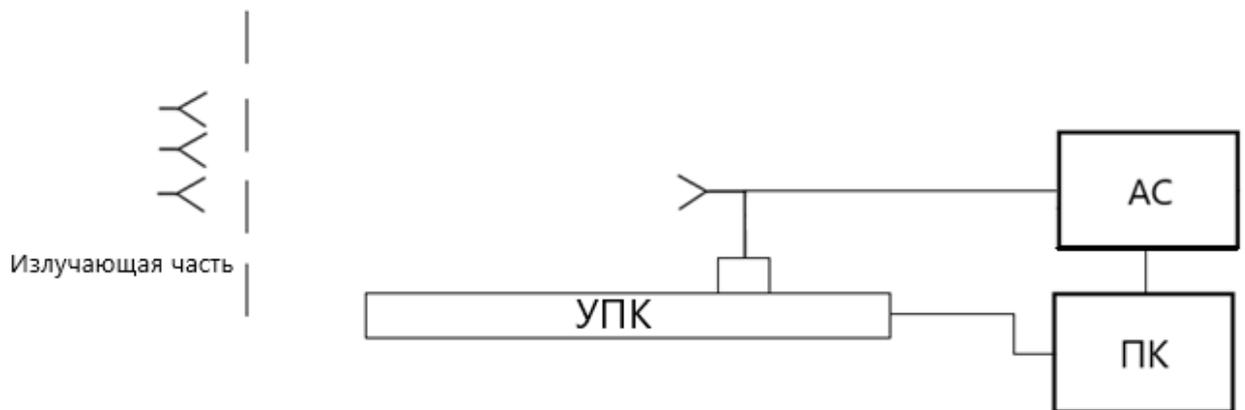
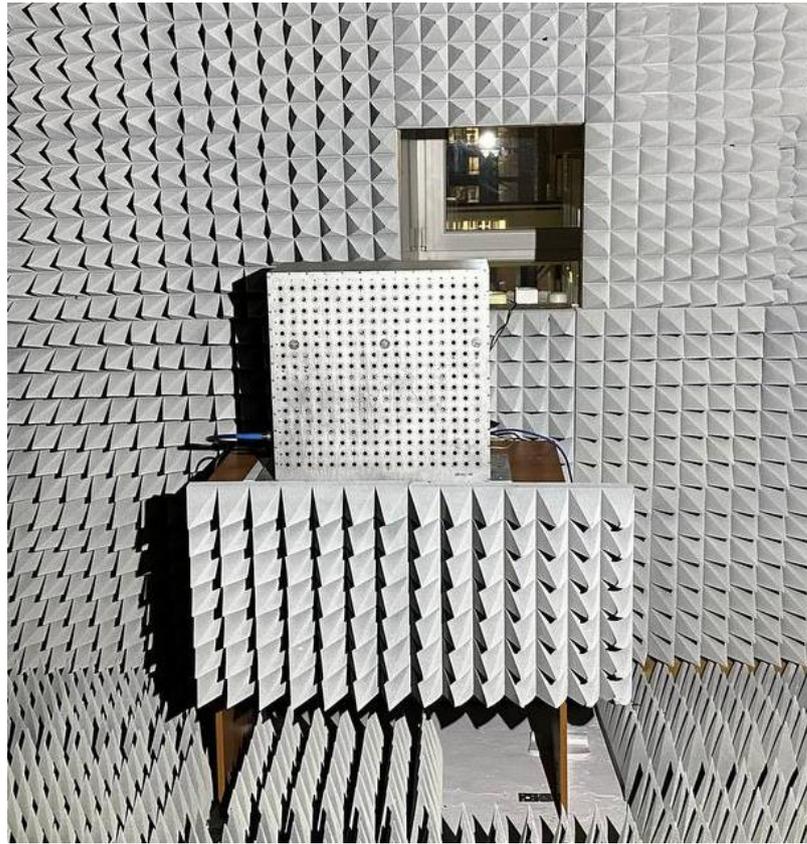
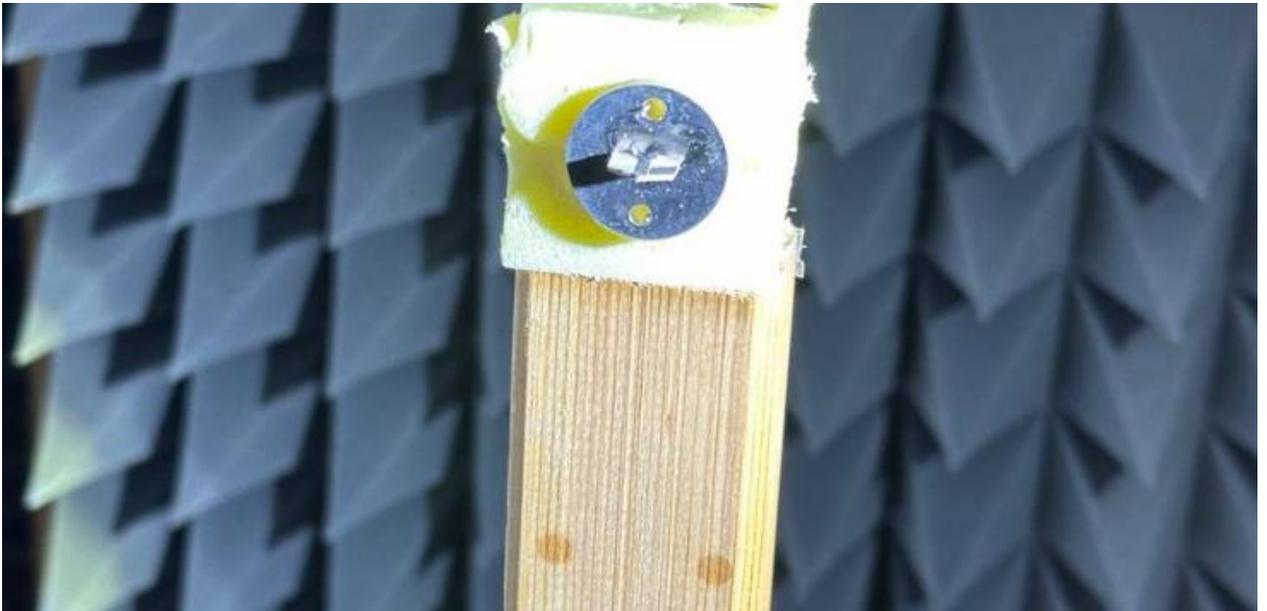


Рисунок 4.5 – Структура приемной части стенда

На рисунке 4.6 изображена фотография разработанного макета сфокусированной антенной решетки.



а)



б)

Рисунок 4.6 – Фотография макета сфокусированной антенной решетки в безэховой камере. а) излучающая часть; б) приемная антенна

### 4.3.1 Фокусировка антенной решетки в заданную точку

Для экспериментальной апробации теоретических результатов выполним теоретический расчет зависимости амплитуды напряженности электрического поля для фокусного расстояния  $F = 1.3$  м. На рисунке 4.7 представлен теоретический расчет зависимости амплитуды напряженности электрического поля от расстояния. Максимум амплитуды напряженности электрического поля находится на расстоянии  $F_{\max} = 1024$  мм, границы зоны повышенной напряженности электрического поля по уровню -3 дБ находятся в координатах  $F_{-3\text{dB}} = 789$  мм; 1553 мм.

Сфокусируем макет антенной решетки на расстояние 1300 мм и выполним измерения амплитуды напряженности электрического поля вдоль фокальной оси. Фазы коэффициентов передачи каналов первого и третьего излучателей при этом равны -3.35 градусов. С помощью разработанного стенда осуществим измерение напряженности электрического поля. Диапазон перемещения измерительной антенны вдоль фокальной оси составляет от 0.7 м до 1.6 м (указаны расстояния от измерительной антенны до излучающей части макета) с шагом 0.05 м. На рисунке 4.7 представлена экспериментально полученная зависимость амплитуды напряженности электрического поля.

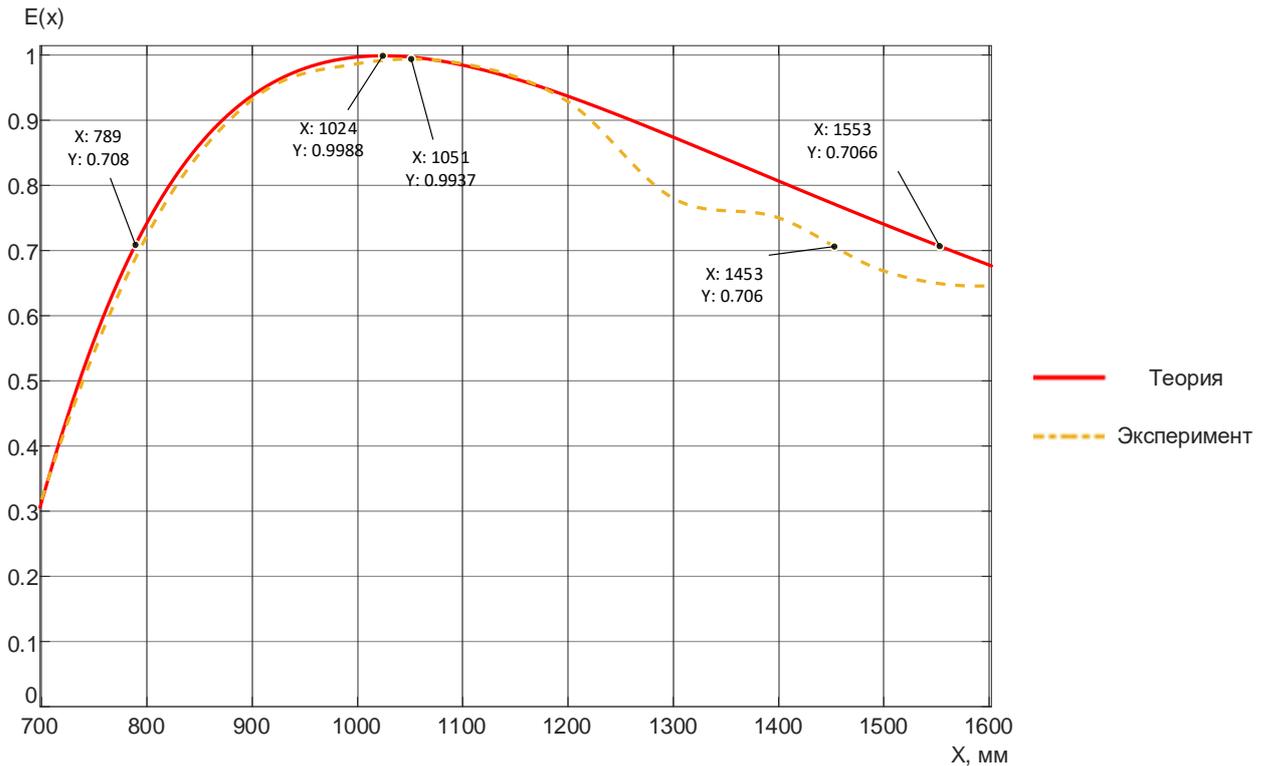


Рисунок 4.7 – Экспериментальная зависимость амплитуды напряженности электрического поля,  $F = 1300$  мм

Анализируя результаты, показанные на рисунке 4.7 можно заметить, что точки максимума амплитуды напряженности электрического поля для эксперимента и теоретического расчета получились близки. Разница между координатами максимума амплитуды напряженности электрического поля для теоретического расчета и эксперимента получилась равной  $\Delta X = 27$  мм.

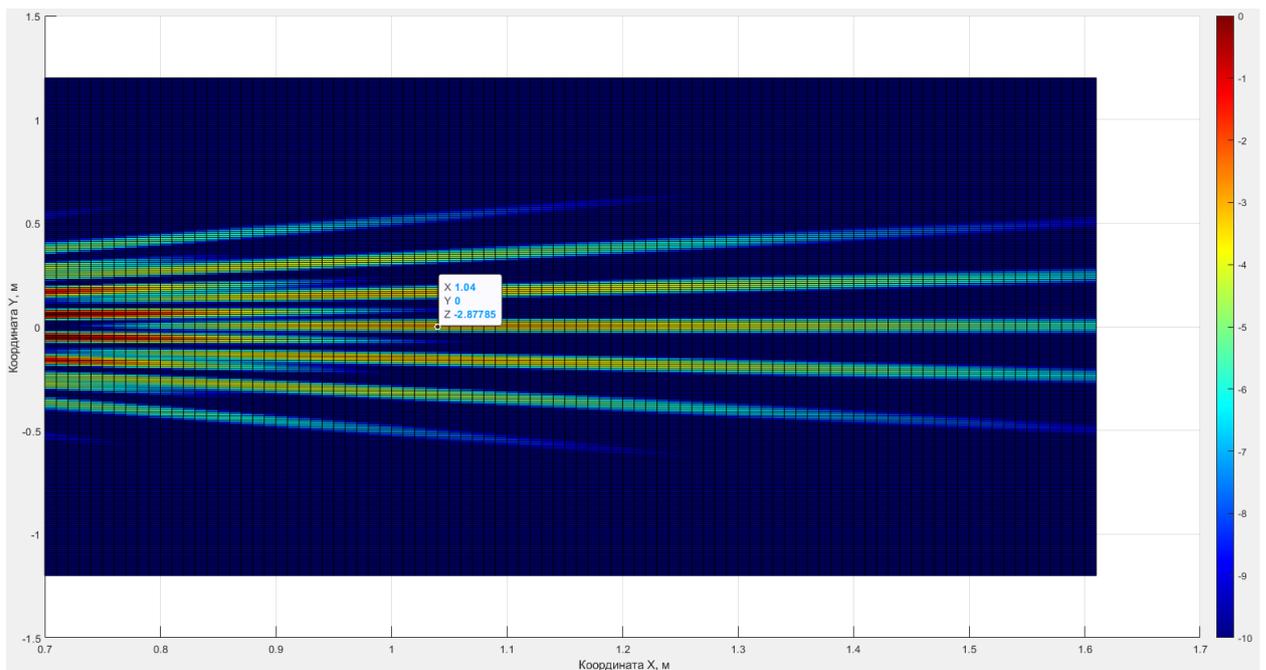
Размеры зоны повышенной напряженности электрического поля по результатам эксперимента незначительно отличаются от полученных в результате теоретических расчетов. В таблице 4.1 сведены размеры зоны повышенной напряженности электрического поля, полученные в результате теоретических расчетов ( $D_{с, Т}$  и  $D_{б, Т}$ ) и, полученные экспериментальным путем ( $D_{с, Е}$  и  $D_{б, Е}$ ). Размеры зоны повышенной напряженности определяются относительно положения точки максимума.

Размеры зоны повышенной напряженности

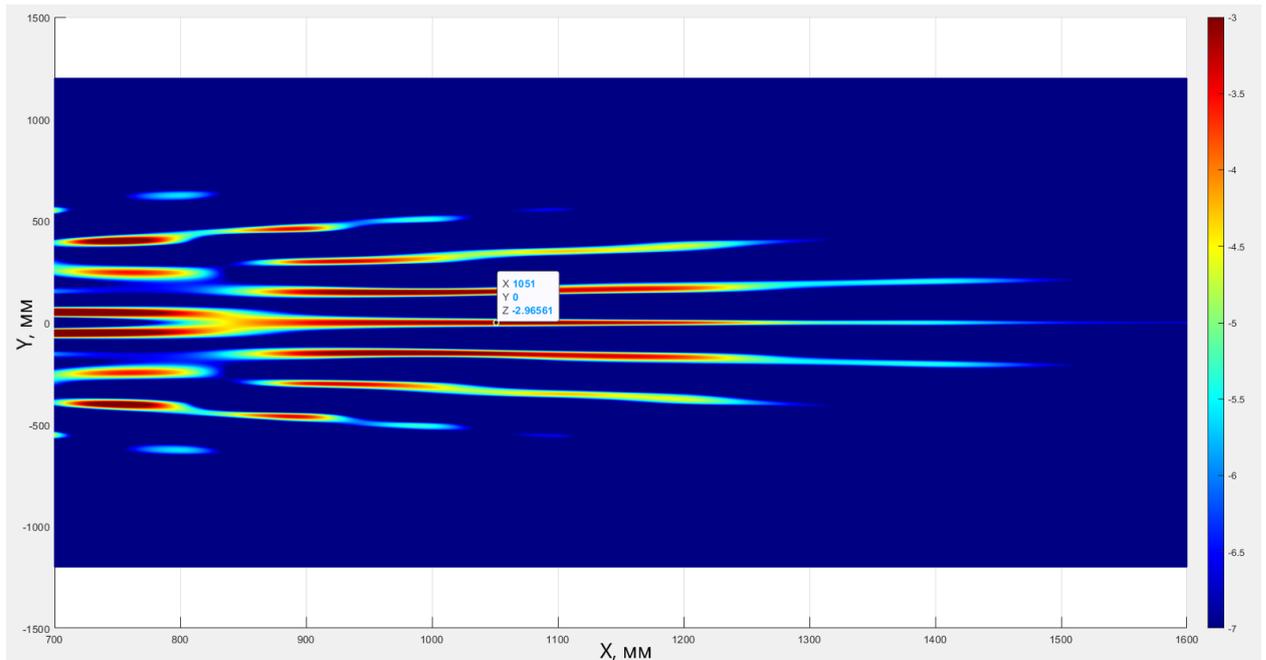
$D_{с, Т}$ , мм	$D_{b, Т}$ , мм	$D_{с, Е}$ , мм	$D_{b, Е}$ , мм
235	529	261	402

Анализируя данные из таблицы 4.1, становится понятно, что размеры зоны повышенной напряженности в сторону антенной решетки  $D_c$  отличаются на 26 мм. При этом среднеквадратическое отклонение (СКО) между теоретической и экспериментальной зависимостью составило 0.039, что говорит о достоверности теоретических результатов.

Дальнейшим очевидным шагом будет расчет трехмерной зависимости амплитуды напряженности электрического поля при помощи разработанного программного обеспечения и сравнение результатов с результатами измерений. На рисунке 4.8 (а) представлены результаты расчетов в разработанном программном обеспечении. Результаты измерений представлены на рисунке 4.8 (б). Величины напряженности электрического поля на рисунках приведены в дБ.



а)



б)

Рисунок 4.8 – Трехмерная зависимость амплитуды напряженности электрического поля для  $F = 1300$  мм. а) Расчет в ПО; б) измерение на макете

Анализируя результаты, показанные на рисунке 4.8 можно заметить, что теоретический расчет в разработанном программном обеспечении дал близкое к экспериментальному значение позиционирования максимума амплитуды напряженности электрического поля. Разница между координатами максимума амплитуды напряженности электрического поля для теоретического расчета и эксперимента получилась равной  $\Delta X = 11$  мм, т.е. позиционирование максимума амплитуды напряженности электрического поля удалось предсказать с погрешностью немногим больше 1%. Также нельзя не отметить совпадение с высокой точностью количество и расположение боковых лепестков антенной решетки.

### 4.3.2 Результаты экспериментальной апробации алгоритма позиционирования максимума амплитуды напряженности в заданной точке пространства

В разделе 2.1 настоящей работы был предложен итерационный алгоритм компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля. С помощью разработанного макета сфокусированной антенной решетки проведем апробацию алгоритма компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля. После выполнения шагов итерационного алгоритма компенсации для позиционирования максимума в координатах  $X = 1.3 \text{ м} = 1300 \text{ мм}$ , антенную решетку необходимо сфокусировать на расстоянии  $F = 2.1 \text{ м} = 2100 \text{ мм}$ . Результаты эксперимента и теоретических расчетов приведены на рисунке 4.9.

Максимум амплитуды напряженности после компенсации находится в координатах  $F_{\text{max}} = 1315 \text{ мм}$ . В таблице 4.2 сведены размеры зоны повышенной напряженности электрического поля, полученные в результате теоретических расчетов ( $D_{с, Т}$  и  $D_{б, Т}$ ) и, полученные экспериментальным путем ( $D_{с, Е}$  и  $D_{б, Е}$ ).

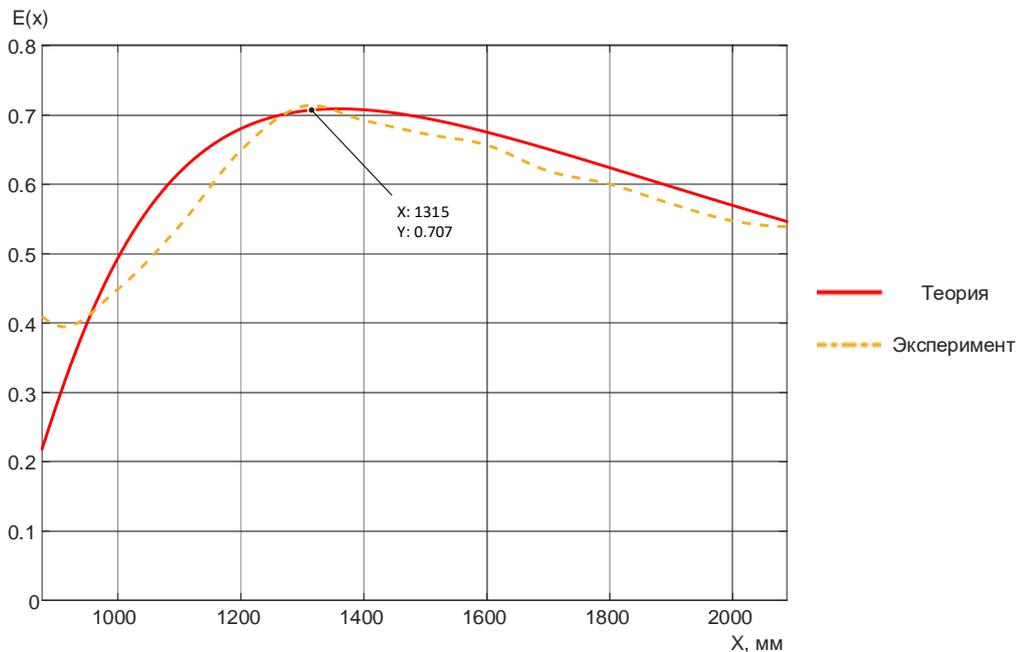


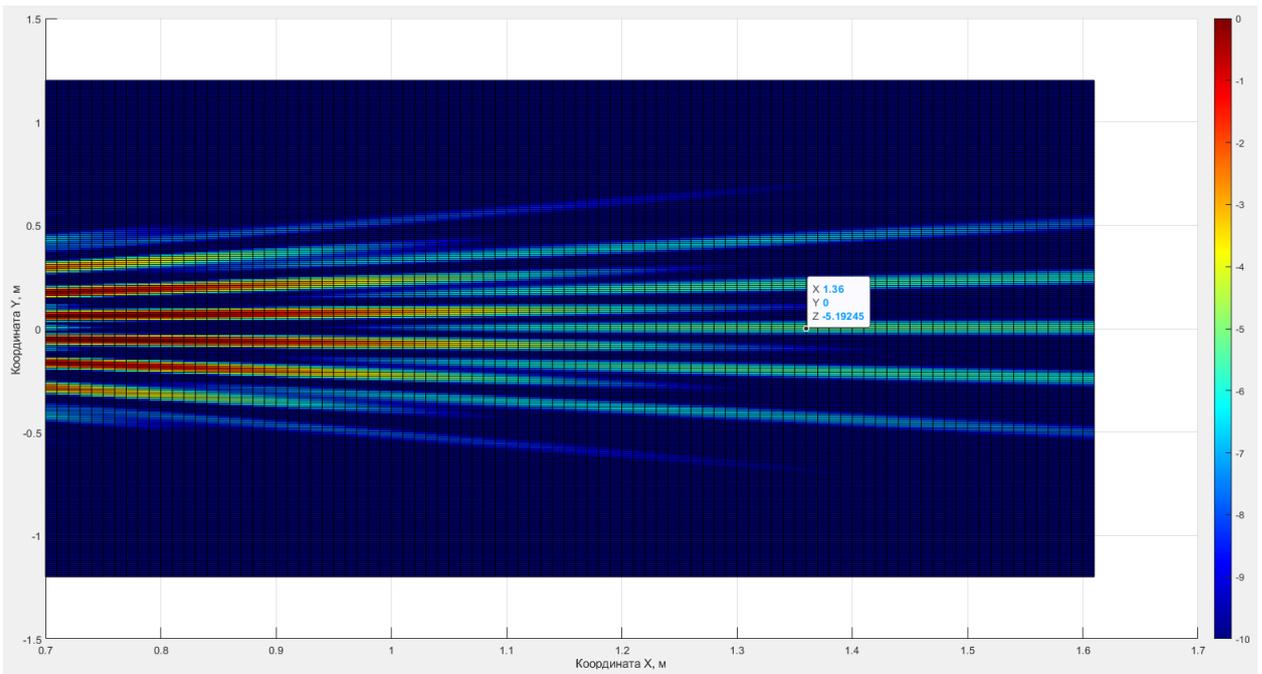
Рисунок 4.9 – Амплитуды напряженности электрического поля с применением компенсации смещения,  $F = 2100 \text{ мм}$

## Размеры зоны повышенной напряженности

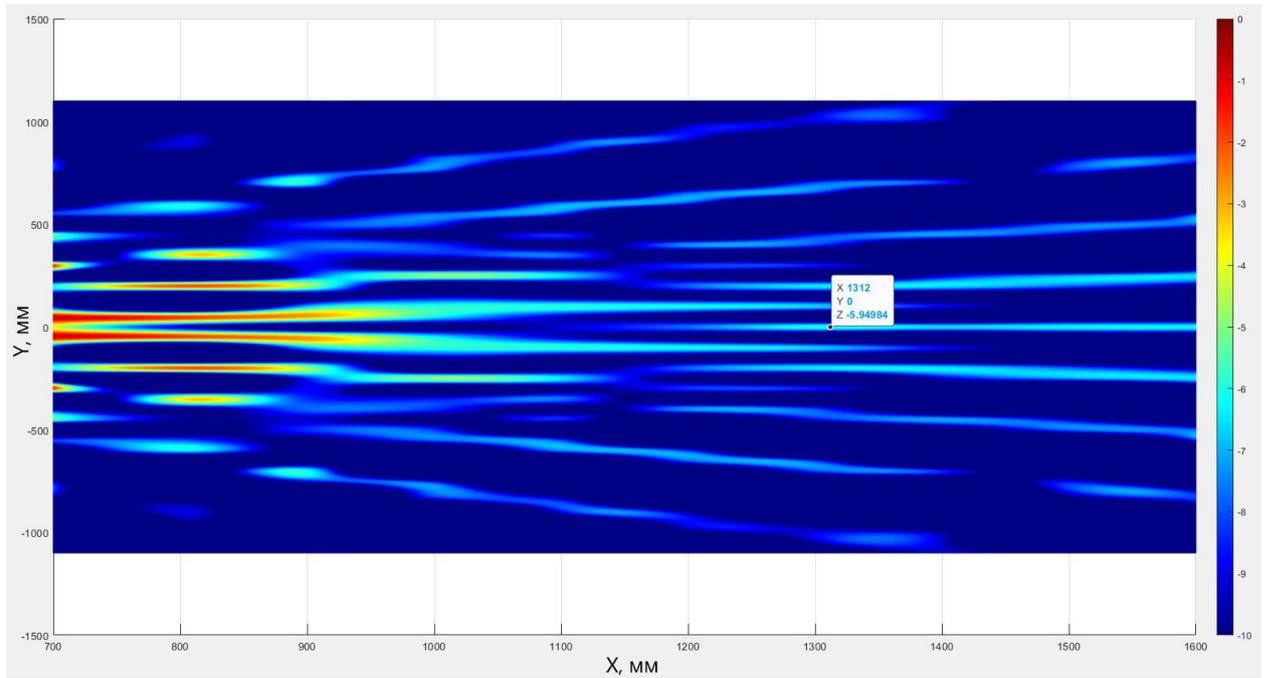
$D_{с, Т}$ , мм	$D_{б, Т}$ , мм	$D_{с, Е}$ , мм	$D_{б, Е}$ , мм
315	920	260	924

СКО между теоретической и экспериментальной зависимостью составило 0.032, что говорит о достоверности теоретических результатов.

Аналогичные расчеты для фокусного расстояния  $F = 2.1$  м выполним в разработанном программном обеспечении и сравним результаты с экспериментом. Результаты расчетов представлены на рисунке 4.10 (а), экспериментальные результаты представлены на рисунке 4.10 (б).



а)



б)

Рисунок 4.10 – Трехмерная зависимость амплитуды напряженности электрического поля для  $F = 2100$  мм. а) Расчет в ПО; б) практическое измерение

Анализируя результаты расчетов, показанные на рисунке 4.10 можно заметить, что разница между координатами максимума амплитуды напряженности электрического поля для теоретического расчета и эксперимента получилась равной  $\Delta X = 48$  мм, т.е. разница между теоретическими и экспериментальными результатами составила не более 5%. Также стоит отметить совпадение с высокой точностью количество и расположение боковых лепестков антенной решетки.

#### 4.4 Выводы по четвертому разделу

1. Разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать распределение амплитуды электрического поля в заданной области пространства.

2. Для апробации теоретических результатов разработан макет трехэлементной антенной решетки, фокусируемой в заданной точке пространства.
3. Результаты расчетов распределения амплитуды напряженности электрического поля в разработанном ПО качественно и количественно совпадают с экспериментальными данными, полученными с использованием разработанного макета антенной решетки. Отдельно стоит отметить совпадение количества и положения боковых лепестков.
4. Экспериментально подтверждена возможность компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля относительно требуемой точки пространства с использованием разработанного алгоритма компенсации. Распределения амплитуды напряженности электрического поля, полученные экспериментально и с использованием математической модели совпадают и демонстрируют позиционирование максимума в требуемой точке при применении алгоритма компенсации смещения.

## Заключение

В диссертационном исследовании предложен метод, обеспечивающий позиционирование нескольких зон высокой напряженности электрического поля в заданных областях пространства.

1. Для линейных антенных решеток, сфокусированных на конечное расстояние установлена взаимосвязь между их размерами и величиной смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля от точки фокусировки. Установлено, что чем меньше отношение линейных размеров антенной решетки к величине фокусного расстояния, тем больше величина смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля относительно точки фокусировки.

2. Установлена взаимосвязь между линейными размерами антенной решетки, фокусным расстоянием и размерами зоны повышенной напряженности электрического поля, формируемая антенной решеткой.

3. Проведена оценка возможности формирования зоны высокой напряженности электрического поля, используя несколько одинаковых антенных решеток. Рассмотрены конфигурации, состоящие из двух параллельных антенных решеток, двух ортогональных антенных решеток и конфигурация, состоящая из четырех антенных решеток. В результате установлено, что в зависимости от размеров антенной решетки, фокусного расстояния возможно формирование одного или нескольких максимумов амплитуды напряженности электрического поля.

4. Была предложена и исследована конфигурация, состоящая из четырех антенных решеток, формирующая заданное распределение напряженности электрического поля в пространстве. Благодаря тому, что были рассмотрены паттерны 840 на 840 мм и 420 на 420 мм была показана масштабируемость предложенной конфигурации антенных решеток. Показано, что для предложенной конфигурации возможно формировать 9 точек фокусировки,

управлять уровнем напряженности электрического поля в заданных точках фокусировки. Рассмотрено несколько распределений электрического поля в пространстве.

5. Разработан макет сфокусированной антенной решетки. С помощью разработанного макета была выполнена апробация полученных теоретических результатов. Результаты экспериментов и теоретические результаты по определению положения максимума амплитуды напряженности электрического поля совпали с погрешностью, не превышающей 5%. Трехмерные зависимости амплитуды напряженности электрического поля дали качественное и количественное совпадение между теоретическим расчетом в разработанном ПО и экспериментальными результатами. Тем самым была подтверждена достоверность теоретических результатов и используемого математического аппарата.

Полученные в работе результаты дают основание полагать, что была решена важная задача, имеющая приоритетное значение при разработке беспроводных телекоммуникационных сетей нового поколения.

Теоретические результаты доведены до уровня рекомендаций для задач точного позиционирования максимумов амплитуды напряженности электрического поля в пространстве.

Разработаны способы формирования и управления несколькими максимумами амплитуды напряженности электрического поля.

Дальнейшие научные исследования могут быть направлены на исследование способов обеспечения одного и нескольких минимумов амплитуды напряженности электрического поля в заданной области пространства. В совокупности с решенной в этом диссертационном исследовании, задачей обеспечения нескольких максимумов в заданных областях пространства, позволит расширить способы пространственной

селекции устройств, функционирующих в беспроводных телекоммуникационных сетях.

**Список сокращений**

АР – Антенная решетка

СВЧ – СВЕРХВЫСОКИЕ ЧАСТОТЫ

ПО – Программное обеспечение

АС – Анализатор спектра

УПК – Управляемая подвижная каретка

СКО – Среднеквадратическое отклонение

ПК – Персональный компьютер

**Список литературы**

1. Lei Xia, S. Baghaie, S. Mohammad Sajadi, "The digital economy: Challenges and opportunities in the new era of technology and electronic communications," *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 15, Issue 2, 2024, doi: 10.1016/j.asej.2023.102411.
2. Jakhongir Kosimov, Guliza Ruziboyeva THE ROLE OF THE DIGITAL ECONOMY IN THE WORLD // *Scientific progress*. 2022. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/the-role-of-the-digital-economy-in-the-world> (дата обращения: 04.05.2024).
3. Z. Xie, "Research on comprehensive evaluation of digital economy development level in typical areas of China," 2021 International Conference on Public Management and Intelligent Society (PMIS), Shanghai, China, 2021, pp. 181-184, doi: 10.1109/PMIS52742.2021.00046.
4. C. Li and X. Li, "Analysis on the logic of digital economy development in the era of big data," 2021 2nd International Conference on Big Data Economy and Information Management (BDEIM), Sanya, China, 2021, pp. 185-188, doi: 10.1109/BDEIM55082.2021.00044.
5. X. -y. Xiao, "Research on the Revitalization of Real Economy based on digital technology," 2020 Management Science Informatization and Economic Innovation Development Conference (MSIEID), Guangzhou, China, 2020, pp. 73-76, doi: 10.1109/MSIEID52046.2020.00021.
6. Li X, Wu Q. The impact of digital economy on high-quality economic development: Research based on the consumption expansion. *PLoS One*. 2023 Dec 15;18(12):e0292925. doi: 10.1371/journal.pone.0292925.
7. T. Aldalgamouni, A. M. Magableh and S. Al-Theiabat, "Performance evaluation for code division multiple access with space-frequency block code downlink transmission over multipath Weibull fading channel model," 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), Houston, TX, USA, 2011, pp. 575-579, doi: 10.1109/GLOCOMW.2011.6162516.

8. A. I. Falko, M. S. Shushnov, T. V. Shushnova and A. S. Belezekova, "The Effect of Crosstalk due to Path Non-linearity on the OFDM Signal Reception Noise Immunity," 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 2021, pp. 295-298, doi: 10.1109/APEIE52976.2021.9647446.
9. J. -H. Deng, K. -H. Liu, W. -C. Huang, P. -N. Chen and M. -L. Ku, "Loopback Crosstalk Estimation and Compensation for MIMO Wideband Transceiver Systems: Design and Experiments," 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Kyoto, Japan, 2022, pp. 819-824, doi: 10.1109/PIMRC54779.2022.9978016.
10. A. Vaezi, A. Abdipour, A. Mohammadi and F. M. Ghannouchi, "On the Modeling and Compensation of Backward Crosstalk in MIMO Transmitters," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 27, no. 9, pp. 842-844, Sept. 2017, doi: 10.1109/LMWC.2017.2734751.
11. B. Hraimel, X. Zhang and Yiming Shen, "Impact of crosstalk on MB-OFDM UWB transmission in radio over fiber WDM system," 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, CA, 2011, pp. 1-3.
12. Юзвик Д.А., Степанов М.А. Фокусировка излучения сетей беспроводной передачи данных в заданных точках пространства. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2022. №11.
13. Denis Iuzvik and Maksim Stepanov, "Focusing of the Electromagnetic Field in Several Given Areas of Space," Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 113, 11-22, 2022.
14. H. -C. Chi, W. -H. Chang, M. -C. Tseng, Y. -P. Yu and K. -H. Lai, "SDN-enabled Framework for Resilient Traffic Routing in 5G Networks," 2022 23rd Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS),

- Takamatsu, Japan, 2022, pp. 1-4, doi: 10.23919/APNOMS56106.2022.9919952.
- 15.M. Li, M. Huo, X. Cheng and L. Xu, "Research and Application of AI in 5G Network Operation and Maintenance," 2020 IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking (ISPA/BDCLOUD/SocialCom/SustainCom), Exeter, United Kingdom, 2020, pp. 1420-1425, doi: 10.1109/ISPA-BDCLOUD-SocialCom-SustainCom51426.2020.00212.
- 16.M. -H. Hung, C. -C. Teng, C. -P. Chuang, C. -S. Hsu, J. -W. Gong and M. -C. Chen, "A SDN Controller Monitoring Architecture for 5G Backhaul Networks," 2022 23rd Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), Takamatsu, Japan, 2022, pp. 1-4, doi: 10.23919/APNOMS56106.2022.9919988.
- 17.F. Gabriel, G. T. Nguyen, R. -S. Schmoll, J. A. Cabrera, M. Muehleisen and F. H. P. Fitzek, "Practical deployment of network coding for real-time applications in 5G networks," 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2018, pp. 1-2, doi: 10.1109/CCNC.2018.8319320.
- 18.M. -I. Corici, F. Eichhorn, V. Gowtham, T. Magedanz, E. -R. Modroiu and F. Schreiner, "How Organic Networking meets 6G Campus Network Management Challenges," 2023 26th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops (ICIN), Paris, France, 2023, pp. 169-173, doi: 10.1109/ICIN56760.2023.10073499.
- 19.X. Tang et al., "Computing power network: The architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement," in China Communications, vol. 18, no. 2, pp. 175-185, Feb. 2021, doi: 10.23919/JCC.2021.02.011.

20. J. Zong, Y. Liu, H. Liu, Q. Wang and P. Chen, "6G Cell-Free Network Architecture," 2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), Changchun, China, 2022, pp. 421-425, doi: 10.1109/ICETCI55101.2022.9832308.
21. M. Corici, E. Troudt, T. Magedanz and H. Schotten, "Organic 6G Networks : Decomplexification of Software-based Core Networks," 2022 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Grenoble, France, 2022, pp. 541-546, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit54941.2022.9815730.
22. H. Cui et al., "Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: Requirements, architecture and challenges," in *China Communications*, vol. 19, no. 2, pp. 90-108, Feb. 2022, doi: 10.23919/JCC.2022.02.008.
23. Z. Hu et al., "Intelligent decision making framework for 6G network," in *China Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 16-35, March 2022, doi: 10.23919/JCC.2022.03.002.
24. M. Inomata et al., "Scattering Effect up to 100 GHz Band for 6G," 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Osaka, Japan, 2021, pp. 749-750, doi: 10.23919/ISAP47053.2021.9391482.
25. H. -M. Kim, D. Kim, T. -K. Kim and G. -H. Im, "Frequency domain channel estimation for MIMO SC-FDMA systems with CDM pilots," in *Journal of Communications and Networks*, vol. 16, no. 4, pp. 447-457, Aug. 2014, doi: 10.1109/JCN.2014.000075.
26. S. Karimkashi and A. A. Kishk, "Focused Microstrip Array Antenna Using a Dolph-Chebyshev Near-Field Design," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 12, pp. 3813-3820, Dec. 2009, doi: 10.1109/TAP.2009.2033435.
27. P. -F. Li and S. -W. Qu, "Microwave Imaging Using Focused Array Antenna," 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation &

- USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, USA, 2018, pp. 2131-2132, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608955.
28. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Основы теории и технические приложения / под общ. ред. Ю .Е. Седельникова и Н.А. Тестоедова. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т - Красноярск, 2015. 308 с
29. Низамутдинов Р.Р. Исследование характеристик линейных сфокусированных антенн для радиоволновых технологических и диагностических устройств: Дисс. - Казань, 2011. – 155 с.
30. Халикова К.Н. Антенны, сфокусированные в области ближнего излученного поля для задач микроволновых технологий: Дисс. – Казань, 2017. – 166 с.
31. L. Sun, P. -F. Li, S. -W. Qu and S. Yang, "A near-field focused array antenna with reconfigurable elements," 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 2016, pp. 319-320, doi: 10.1109/APCAP.2016.7843222.
32. L. Shan and W. Geyi, "Optimal Design of Focused Antenna Arrays," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 11, pp. 5565-5571, Nov. 2014, doi: 10.1109/TAP.2014.2357421.
33. H. -T. Chou, J. -W. Liu, C. -Y. Liu and P. Nepa, "Focusing characteristics of near-field radiations from multi-panels of phased array of antennas in circularly cylindrical arrangement," 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Phuket, Thailand, 2017, pp. 1-2, doi: 10.1109/ISANP.2017.8228974.
34. M. Garg and S. K. Sharma, "Beam focussing properties of circular array antenna by employing dielectric resonator antennas," Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Chicago, IL, USA, 2012, pp. 1-2, doi: 10.1109/APS.2012.6348938.

35. P. Nayeri, A. Z. Elsherbeni and R. L. Haupt, "Broadband focusing using aperture-coupled microstrip patch antenna arrays," 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, Portugal, 2015.
36. Y. Jiang, W. Geyi, L. Yang and H. Sun, "Circularly-Polarized Focused Microstrip Antenna Arrays," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, pp. 52-55, 2016, doi: 10.1109/LAWP.2015.2428931.
37. H. -W. Liu et al., "Design of RFID near-field focusing circular patch array antenna at 2.4GHz with applications," 2010 Internet of Things (IOT), Tokyo, Japan, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/IOT.2010.5678442.
38. G. Sun and Q. Zhu, "The design of a focused sparse microstrip antenna array," 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, PR, USA, 2016, pp. 515-516, doi: 10.1109/APS.2016.7695966.
39. M. Sohail and R. Uyguroğlu, "Near Field Focused Microstrip Patch Antenna Array Characteristics Enhancement With Parasitic Patch Elements," 2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Istanbul, Turkey, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU53274.2021.9477974.
40. R. Siragusa, P. Lemaitre-Auger and S. Tedjini, "Tunable Near-Field Focused Circular Phase-Array Antenna for 5.8-GHz RFID Applications," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 10, pp. 33-36, 2011, doi: 10.1109/LAWP.2011.2108632.
41. Аникин Алексей Сергеевич, Крутиков Михаил Владимирович  
Эффективность фокусировки плоских активных фазированных  
антенных решеток вдоль оптической оси в ближней зоне // Доклады  
ТУСУР. 2015. №4 (38).
42. Yingjun Li Na Kou Shixing Yu, "Partially Excited Antenna Array for Near-Field Patterned Focusing," Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 105, 149-154, 2022. doi:10.2528/PIERL22051901

43. Peng-Fa Li, Shi-Wei Qu, Yuan-Song Zeng and Shiwen Yang, "Focused array antenna with 2-D steerable focus," 2017 10th Global Symposium on Millimeter-Waves, Hong Kong, China, 2017, pp. 126-128, doi: 10.1109/GSMM.2017.7970308.
44. Karimkashi, Shaya, "Characteristics of different focusing antennas in the near field region" (2011). Electronic Theses and Dissertations.
45. Jana Alvarez, Rafael González Ayestarán, "Design of antenna arrays for near-field focusing requirements using optimization," *Electronics Letters* 48(21), pp. 1323-1325.
46. Nitin Jonathan Myers, Yanki Aslan, Geethu Joseph, "Near-field focusing using phased arrays with dynamic polarization control".
47. P. Nayeri, A. Z. Elsherbeni and R. Haupt, "Phased array antenna limitations for ultra-wideband focusing," 2014 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Antibes Juan-les-Pins, France, 2014, pp. 1-3, doi: 10.1109/CAMA.2014.7003459.
48. H. -T. Chou, "Near-Field Focus Radiation from Phased Antenna Array for Best Reception by Relatively Large Antennas," 2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), Pisa, Italy, 2019, pp. 86-88, doi: 10.1109/RFID-TA.2019.8892124.
49. A. Badawi, A. Sebak and L. Shafai, "Array near field focusing," *IEEE WESCANEX 97 Communications, Power and Computing. Conference Proceedings*, Winnipeg, MB, Canada, 1997, pp. 242-245, doi: 10.1109/WESCAN.1997.627147.
50. D. A. Iuzvik and M. A. Stepanov, "Formation of the Electric Field Strength Maximum at a Given Point in Space by a Focused Linear Antenna Array," 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Novosibirsk, Russian Federation, 2023, pp. 350-354, doi: 10.1109/EDM58354.2023.10225190.

- 51.S. Karimkashi and A. A. Kishk, "Focusing Properties of Fresnel Zone Plate Lens Antennas in the Near-Field Region," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 5, pp. 1481-1487, May 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2123069.
- 52.R. Hansen, "Focal region characteristics of focused array antennas," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 33, no. 12, pp. 1328-1337, December 1985, doi: 10.1109/TAP.1985.1143539.
- 53.Юзвик Д.А., Степанов М.А., Формирование максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства сфокусированной линейной антенной решеткой. Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации, 2023, № 3(60), С. 67-79.
- 54.J. M. C. Brito, L. L. Mendes and J. G. S. Gontijo, "Brazil 6G Project - An Approach to Build a National-wise Framework for 6G Networks," 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083775.
- 55.S. Suyama, T. Okuyama, N. Nonaka and T. Asai, "Recent Studies on Massive MIMO Technologies for 5G Evolution and 6G," 2022 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 2022, pp. 90-93, doi: 10.1109/RWS53089.2022.9719949.
- 56.B. Dzogovic, T. van Do, B. Santos, D. Van Thuan, B. Feng and N. Jacot, "Thunderbolt-3 Backbone for Augmented 5G Network Slicing in Cloud-Radio Access Networks," 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF), Dresden, Germany, 2019, pp. 415-420, doi: 10.1109/5GWF.2019.8911710.
- 57.V. Ziegler and S. Yrjölä, "How To Make 6G a General Purpose Technology: Prerequisites and value creation paradigm shift," 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Porto, Portugal, 2021, pp. 586-591, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482431.

- 58.Смирнов В.Ю., Никитин О.Р., Линейные фазированные антенные решетки, сфокусированные в ближней зоне. – Вестник РГРТУ, 2008.
- 59.Метод реконструкции изображения объекта с помощью кольцевой антенной решетки / В. П. Ющенко, В. Г. Эдвабник, О. В. Гофман, Т. В. Дулуба, В. Н. Легкий // Автометрия. - 2020. – Т. 56, № 6. – С. 68–77. - DOI: 10.15372/AUT20200608.
60. Седельников Ю.Е., Потапова О.В., Садыков А.Р., Скачков В.А. Сфокусированные антенны в задачах контактной радиотермометрии. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.11>
- 61.F. Ondrej, M. Ilja, V. Lucie and V. Jan, "Utilization of waveguide applicators combination for electromagnetic field focusing," 2014 24th International Conference Radioelektronika, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/Radioelek.2014.6828446.
- 62.K. H. Schoenbach, S. Xiao and J. T. Camp, "Subnanosecond Electrical Pulses for Medical Therapies and Medical Imaging," 2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference, Las Vegas, NV, USA, 2008, pp. 60-60, doi: 10.1109/IPMC.2008.4743576.
- 63.H. M. Bernety, R. D. Puckett, D. Schurig and C. Furse, "Comparison of Passive 2-D and 3-D Ring Arrays for Medical Telemetry Focusing," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, no. 6, pp. 1189-1193, June 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2911928.
- 64.A. Ludwig, J. P. S. Wong, A. Epstein, A. M. H. Wong, G. V. Eleftheriades and C. D. Sarris, "Focusing and steering for medical applications with magnetic near-field arrays and metasurfaces," 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, Portugal, 2015, pp. 1-4.
- 65.H. Ishizawa, M. Hashimoto, T. Tanabe, S. H. R. Hosseini, S. Katsuki and H. Akiyama, "Burst electromagnetic wave focusing system for medical application," 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage

- Conference (IPMHVC), San Diego, CA, USA, 2012, pp. 508-511, doi: 10.1109/IPMHVC.2012.6518792.
- 66.H. Ishizawa et al., "Effects of Burst Electromagnetic Wave Focusing and Their Combination With Nanosecond Pulsed Electric Fields on HeLa S3 Cells," in *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 43, no. 4, pp. 1093-1099, April 2015, doi: 10.1109/TPS.2015.2407052.
- 67.F. Tofigh, J. Nourinia, M. Azarmanesh and K. M. Khazaei, "Near-Field Focused Array Microstrip Planar Antenna for Medical Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 951-954, 2014, doi: 10.1109/LAWP.2014.2322111.
- 68.Y. Xiao, L. Wu, S. S. Peng and Z. L. Xiao, "Single-Layer Metasurface Focusing Lens for Medical Applications," 2019 IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC), Nanjing, China, 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/IMBIOC.2019.8777919.
- 69.L. Zhang, S. Yong, Y. Liu and V. Khilkevich, "Auto Focus for Far Field Source Localization Using Emission Source Microscopy," 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium, Raleigh, NC, USA, 2021, pp. 115-118, doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559171.
- 70.T. Anderson, "Antenna Beam Focusing and Steering with Refraction Through a Plasma," 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2019, pp. 1-5.
- 71.Q. Yu, S. Liu, X. Kong, Z. Huang, Y. Wen and Y. Hu, "Wideband Focusing Gradient Meta-surface for High-gain Planar Lens Antenna Application," 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/COMPEN.2019.8779145.
- 72.T. Anderson, "Antenna Beam Focusing and Steering with Refraction Through a Plasma," 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2019, pp. 1-5.

- 73.E. Cherkaev and A. C. Tripp, "Optimal design of focusing inductive arrays for inhomogeneous medium," Proceedings 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology (Cat. No.00TH8510), Dana Point, CA, USA, 2000, pp. 485-488, doi: 10.1109/PAST.2000.859002.
- 74.G. Xue et al., "A Review of Electrical and Electromagnetic Methods for Coal Mine Exploration in China," in IEEE Access, vol. 7, pp. 177332-177341, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2951774.
- 75.X. Wu, G. Xue, G. Fang, X. Li and Y. Ji, "The Development and Applications of the Semi-Airborne Electromagnetic System in China," in IEEE Access, vol. 7, pp. 104956-104966, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930961.
- 76.G. Chao, Y. Xiaofeng and B. Yang, "An Approach for Extrapolating Far Field Radar Cross-Section from Near Field Measurement," 2013 IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing, Beijing, China, 2013, pp. 1604-1607, doi: 10.1109/GreenCom-iThings-CPSCoM.2013.290.
- 77.Donghoon Shin, Il-Suek Koh and Sangwook Nam, "Spatially focusing electromagnetic field in a multi-path environment using time-reversal," 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington, DC, 2005, pp. 321-324 vol. 3A, doi: 10.1109/APS.2005.1552247.
- 78.K. H. Schoenbach, Shu Xiao, J. T. Camp and J. F. Kolb, "Focusing impulse radiating antenna for medical imaging," 2008 IEEE 35th International Conference on Plasma Science, Karlsruhe, 2008, pp. 1-1, doi: 10.1109/PLASMA.2008.4590816.
- 79.T. Yamada et al., "Electromagnetic Evaluation of HTS RF Coils for Nuclear Magnetic Resonance," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, pp. 1-4, June 2015, Art no. 1500504, doi: 10.1109/TASC.2014.2368778.

- 80.J. Bonior, Z. Hu, T. N. Guo, R. C. Qiu, J. P. Browning and M. C. Wicks, "Software-Defined-Radio-Based Wireless Tomography: Experimental Demonstration and Verification," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 175-179, Jan. 2015, doi: 10.1109/LGRS.2014.2330764.
- 81.B. H. Choi, J. H. Kim, J. P. Cheon and C. T. Rim, "Synthesized Magnetic Field Focusing Using a Current-Controlled Coil Array," in *IEEE Magnetics Letters*, vol. 7, pp. 1-4, 2016, Art no. 6501504, doi: 10.1109/LMAG.2016.2520903.
- 82.Z. Zakaria et al., "Simulation of electromagnetic field (EM) focusing capability on biological tissue through the application of C-type excitation coil screen," 2012 International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE), Penang, Malaysia, 2012, pp. 598-601, doi: 10.1109/ICoBE.2012.6178987.
- 83.L. Yi, W. Xu, J. Jingjing, L. Jianhui, H. Changjun and G. Suchun, "A new excitation field for magnetic induction tomography based on the focusing magnetic field," 2014 IEEE 11th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), Beijing, China, 2014, pp. 1136-1139, doi: 10.1109/ISBI.2014.6868075.
- 84.A. Buffi, A. A. Serra, P. Nepa, H. -. T. Chou and G. Manara, "A Focused Planar Microstrip Array for 2.4 GHz RFID Readers," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 5, pp. 1536-1544, May 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2044331.
85. Denis Iuzvik & Maksim Stepanov, "Ensuring the maximum amplitude of the electric field strength in given coordinates using a linear antenna array focused on a finite distance," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 38(4), pp. 411–427, 2024, doi: 10.1080/09205071.2024.2315063
- 86.D. Blanco, J. L. Gómez-Tornero, E. Rajo-Iglesias and N. Llombart, "Radially Polarized Annular-Slot Leaky-Wave Antenna for Three-Dimensional Near-

- Field Microwave Focusing," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 583-586, 2014, doi: 10.1109/LAWP.2014.2311854.
- 87.Álvarez, J. and R. Ayestarán, "Near field multifocusing on antenna arrays via non-convex optimisation," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 754-764, 2014. doi:10.1049/iet-map.2013.0563
- 88.D. A. Iuzvik and M. A. Stepanov, "Focusing the Radiation of Wireless Data Transmission Networks at Given Points in Space," 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, 2022, pp. 93-96, doi: 10.1109/EDM55285.2022.9855132.
- 89.D. A. Iuzvik and M. A. Stepanov, "Decomposition of an Antenna Array Focused at Several Space Points," 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, Russian Federation, 2022, pp. 1020-1023, doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017099.
- 90.Poynting, John Henry. "On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field". *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1884.
- 91.Stratton, Julius Adams. *Electromagnetic Theory* (1st ed.). New York: McGraw-Hill, 1941. ISBN 978-0-470-13153-4.
- 92.Grant, Ian S.; Phillips, William R. (1990). *Electromagnetism* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, 1990. ISBN 978-0-471-92712-9
- 93.Griffiths, David J. *Introduction to Electrodynamics* (3rd ed.). Boston: Addison-Wesley, 2012. ISBN 978-0-321-85656-2.
- 94.Справочник по радиолокации. Книга 1. Под редакцией М.И. Сколника. Техносфера, Москва, 2014.
- 95.Y. Huo, X. Dong, W. Xu and M. Yuen, "Cellular and WiFi Co-design for 5G User Equipment," 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF), 2018, pp. 256-261, doi: 10.1109/5GWF.2018.8517059.

- 96.C. Lee, H. Park, G. -G. Namgung, J. Kwon and S. Kahng, "A Wide-Band Power-Splitter Fed Wide-Band Array Antenna Adoptable to Low-Weight GPR Systems," 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Busan, Korea (South), 2018, pp. 1-2.
- 97.F. Bobor-Oyibo, S. J. Foti and D. Smith, "A multiple switched beam Smart antenna with beam shaping for dynamic optimisation of capacity & coverage in mobile telecommunication networks," 2008 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Kunming, China, 2008, pp. 356-359, doi: 10.1109/ISAPE.2008.4735219.
- 98.C. Marchais, G. Le Ray and A. Sharaiha, "Stripline Slot Antenna for UWB Communications," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 5, pp. 319-322, 2006, doi: 10.1109/LAWP.2006.878894.
- 99.N. Fhafhiem, W. Naktong, A. Innok and A. Ruengwaree, "High-gain and broadband antenna using microstrip combined with the waveguide antenna," 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Phuket, Thailand, 2017, pp. 1-2, doi: 10.1109/ISANP.2017.8229007.
100. P. Lepeltier, P. Bosshard, J. Maurel, C. Labourdette, G. Navarre and J. David, "Recent achievements and future trends for multiple beam telecommunication antennas," 2012 15 International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, Toulouse, France, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/ANTEM.2012.6262426.
101. C. Yang, J. Kim, H. Kim, J. Wee, B. Kim and C. Jung, "Quad-Band Antenna With High Isolation MIMO and Broadband SCS for Broadcasting and Telecommunication Services," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 9, pp. 584-587, 2010, doi: 10.1109/LAWP.2010.2053515.
102. R. Huang, B. Liu and Q. Tan, "A Near-Field Focused Circular Array Based on Dielectric Resonator Antenna," 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science

- Meeting (APS/URSI), 2021, pp. 1165-1166, doi: 10.1109/APS/URSI47566.2021.9704092.
103. H. S. Ju, S. -Y. Cho, J. So and S. B. Kim, "Radiation Characteristics of Near-Field Beam Focusing for an Active Array Antenna," 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2018, pp. 1-2.
104. Алексеев Н.И., Кравцов А.В. Исследование колебаний струны. Стоячие волны. Изд-во МГТУ им. Баумана.
105. Хансен Р., Фазированные антенные решетки, Техносфера, 2012.
106. Mauch S. Introduction to Methods of Applied Mathematics or Advanced Mathematical Methods for Scientists and Engineers. Mauch Publishing Company. 2003. 593 p.
107. Юзвик Д.А., Степанов М.А., Новосибирский государственный технический университет. Способ фокусировки электромагнитного излучения в нескольких областях помещения. Патент № 2808780; Заявл. 21.10.2022; Опубл. 05.12.2023.
108. Сазонов Д. Антенны и устройства СВЧ. Москва, Высшая школа. 1988. 434 с.
109. Обуховец В.А. Синтез симметричных СВЧ-многополюсников. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2018. №7 (201). С.177-185.
110. Cameron R. Analysis of Multiport Microwave Networks. Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications. 2018. P.147-175. <https://doi.org/10.1002/9781119292371.ch5>
111. James J, Hall P., Wood C. Microstrip antenna theory and design. London, Peter peregrinus Ltd. 1981. 304 p.
112. Golio M., Golio J. RF and microwave circuits, measurements, and modeling. CRC Press. 2007. 772 p.
113. Steer M. Fundamentals of Microwave and RF Design. NC state, University of North Carolina Press. 2019. 244 p.

114. Aaen P. Modeling and Characterization of RF and Microwave Power FETs. Cambridge University Press. 2011. 380 p.
115. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. 1978, Москва, 248 с.
116. А.В. Шанин. Введение в теорию дифракции. 2001, Москва, 104 с.
117. Магурин В. Г., Тарлыков В. А. Применение аппарата геометрической теории дифракции для описания механизма формирования структуры дифракционной картины Фраунгофера объекта сложной формы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2001. №4.
118. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. О критериях применимости геометрической теории дифракции. 1982, Известия высших учебных заведений, Том XXV, С. 805-814.
119. Степанов М.А., Никулина Ю.С. Необходимые условия физической реализуемости бифокального линзового коллиматора // Доклады АН ВШ РФ. – 2020. – № 1-2 (46-47). – С. 68–78.
120. С. E. Rubio-Mercedes, N. H. O. Cunha, J. P. da Silva. Numerical Analysis of Plasmonic Couplers based on Metallic Lens. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 22, No. 3, Set. 2023. PP. 346-359.
121. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023660575. Программа для расчета электромагнитных полей в задаваемой области пространства / Подкопаев А.О., Степанов М.А., Юзвик Д.А. – Заявка №2023660054. Дата поступления 23 мая 2023 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23 мая 2023 г.

## Приложение А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ


**RU2023660575**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
**ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):  
2023660575  
Дата регистрации: 23.05.2023  
Номер и дата поступления заявки:  
2023660054 23.05.2023  
Дата публикации и номер бюллетеня:  
23.05.2023 Бюл. № 6

Автор(ы):  
Подкопаев Артемий Олегович (RU),  
Степанов Максим Андреевич (RU),  
Юзвик Денис Андреевич (RU)  
Правообладатель(и):  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» (RU)

Название программы для ЭВМ:

**Программа для расчета амплитуд электромагнитных полей в задаваемой области пространства**

**Реферат:**

Программа предназначена для расчета трехмерной пространственной структуры амплитуды электромагнитных полей. В программе задается конфигурация антенной решетки, начальные фазы и амплитуды сигналов. Программа может использоваться для анализа антенных систем, предназначенных для фокусировки в нескольких областях пространства. Функциональные возможности программы заключаются в расчете трехмерной пространственной структуры амплитуды электромагнитных полей на основе заданной конфигурации антенной решетки, амплитуд и начальных фаз сигналов.

**Язык программирования:** MATLAB

**Объем программы для ЭВМ:** 48 Кб

## Приложение Б. Акты о внедрении результатов диссертационного исследования

<p>УТВЕРЖДАЮ</p> <p>Первый заместитель генерального директора – генеральный конструктор А. И. Живец</p>  <p>_____ 2024</p>	<p>УТВЕРЖДАЮ</p> <p>Проректор НГТУ по научной работе и инновациям А.И. Отто</p>  <p>_____ 2024</p>
<p><b>АКТ</b></p> <p>О внедрении научных результатов диссертационной работы Юзвика Д.А.</p>	
<p>Мы, представители АО «ЗАСЛОН» в лице первого заместителя генерального директора – генерального конструктора А.И. Живца, начальника отделения А.Л. Лободы, начальника отдела А.Н. Бызова, ст.н.с. М.Б. Рыжикова и представители Новосибирского государственного технического университета в лице проректора по научной работе и инновациям А.И. Отто, руководителя темы РТУ-1-23, профессора каф. РПиРПУ А.В. Киселева, заведующего кафедрой РПиРПУ М.А. Степанова составили настоящий акт об использовании научных результатов диссертационной работы Юзвика Дениса Андреевича.</p>	
<p>Использование результатов диссертационной работы проходило в рамках хозяйственного договора РТУ-1-23 от 22.06.2023 г. между АО «ЗАСЛОН» и НГТУ.</p>	
<p>Юзвиком Д.А. выполнены теоретические исследования возможностей управляемого позиционирования зоны высокой напряженности электрического поля антеннами, сфокусированными в заданную точку пространства. На их основе разработаны требования к сигналам, подводимым к излучающим антеннам, обеспечивающие заданную точность позиционирования зоны высокой напряженности электрического поля. Они были использованы при разработке программного обеспечения имитатора (в части управления его излучающей системой).</p>	
<p>От АО «ЗАСЛОН»:</p> <p>Начальник отделения _____ А.Л. Лобода</p> <p>Начальник отдела _____ А.Н. Бызов</p> <p>Старший научный сотрудник _____ М.Б. Рыжиков</p>	<p>От НГТУ:</p> <p>Руководитель темы РТУ-1-23, проф. кафедры РПиРПУ _____ А.В. Киселев</p> <p>Зав. кафедрой РПиРПУ _____ М.А. Степанов</p>

УТВЕРЖДАЮ



Директор ООО «Предприятие  
«ЭЛТЕКС»  
А. Н. Черников

21 » 08 2024 г.



Проректор НГТУ по научной работе  
и инновациям  
А. И. Отто

« 21 » 08 2024 г.

## АКТ

О внедрении научных результатов диссертационной работы Юзвика Д. А.

Представители ООО «Предприятие «ЭЛТЕКС» в лице директора А. Н. Черникова, технического директора В. К. Малова, начальника лаборатории «Hardware» В. О. Горбача и представители Новосибирского государственного технического университета в лице проректора по научной работе и инновациям А. И. Отто, руководителя тем РТУ-9-22 «Выполнение работ по разработке направленной антенны МИМО 2\*2» и РТУ-2-21 «Выполнение работ по разработке направленной антенны для МИМО» М. А. Степанова составили акт об использовании научных результатов диссертационной работы Юзвика Дениса Андреевича.

Использование результатов диссертационной работы проходило в рамках хоздоговоров РТУ-9-22 «Выполнение работ по разработке направленной антенны МИМО 2\*2» и РТУ-2-21 «Выполнение работ по разработке направленной антенны для МИМО».

Юзвиком Д. А. выполнены теоретические исследования влияния количества и местоположения элементов антенной решетки на формируемое ей распределение напряженности электрического поля. Эти исследования были использованы при разработке антенных решеток беспроводных точек доступа.

От ООО «Предприятие  
«ЭЛТЕКС»:  
Технический директор  
В. К. Малов

Начальник лаборатории  
«Hardware»  
В. О. Горбач

От НГТУ:

Руководитель тем РТУ-9-22,  
РТУ-2-21,  
зав. кафедрой РПиРПУ, д.т.н.,  
доцент  
М. А. Степанов

## Приложение В. Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2808780****Способ фокусировки электромагнитного излучения в нескольких областях помещения**

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ" (RU)**

Авторы: **Юзвик Денис Андреевич (RU), Степанов Максим Андреевич (RU)**

Заявка № **2022127427**Приоритет изобретения **21 октября 2022 г.**Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **05 декабря 2023 г.**Срок действия исключительного права на изобретение истекает **21 октября 2042 г.**

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат: 429b5a0b23b3364ba195183e73b4aa7  
Идентификатор: **Зубов Юлий Сергеевич**  
Действителен с 19.07.2023 по 02.08.2024

**Ю.С. Зубов**

