

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ)

Научный руководитель: **Степанов Максим Андреевич**
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Радиоприемных и радиопередающих устройств, НГТУ

Официальные оппоненты: **Пастернак Юрий Геннадьевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет";

Денисов Дмитрий Вадимович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Защита диссертации состоится «24» декабря 2024 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/2ta7zzhe>

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном мире происходит цифровизация экономики, что приводит к увеличению абонентов беспроводных телекоммуникационных сетей. В качестве абонентов выступают, например телевизоры, персональные компьютеры, мобильные телефоны и прочие устройства интернета вещей. Большое количество абонентов создаст плотную среду с конкурирующими друг с другом устройствами. Они функционируют в одном частотном диапазоне, создают помехи друг другу, что приводит к снижению скорости передачи информации в канале передачи данных. На практике эффект снижения скорости передачи информации, вызванный большой плотностью абонентов беспроводных телекоммуникационных сетей, можно наблюдать в сетях Wi-Fi расположенных во многоквартирных домах. Схожий эффект имеет место во время проведения концертов и прочих массовых мероприятий, где 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. Вместе с тем абоненты беспроводных телекоммуникационных сетей расположены в разных точках пространства. Пространственная разнесённость таких устройств открывает пути их пространственного разделения. В простейшем 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. При этом обеспечивается синфазное сложение волн от каждого излучателя антенной решетки в требуемой точке пространства. Большой вклад в исследование сфокусированных антенных решеток сделали такие ученые как Роберт Хансен (R.C. Hansen), Филиппов В.С., Пономарев Л.И., Гринев А.Ю. Основные усилия в их работах были приложены на исследование способов проектирования антенных решеток, сохранению формы диаграммы направленности в точке фокусировки и ее окрестности.

Благодаря синфазному сложению электромагнитных волн от элементов сфокусированной антенной решетки в окрестности точки фокусировки формируется область высокой напряженности электрического поля. 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 окрестности расположения абонента.

Исследователи отмечали, что наблюдается смещение максимума напряженности электрического поля относительно точки фокусировки в сторону антенной решетки. Однако подробного исследования этого явления, не проводилось, взаимосвязь величины смещения, фокусного расстояния и размеров антенной решетки не определена. Таким образом, 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. Это определяет цель и основные задачи диссертационного исследования.

Цель работы: для сетей беспроводной передачи данных предложить метод, обеспечивающий позиционирование нескольких пучностей электромагнитного поля в заданной области пространства.

Для достижения цели необходимо решить следующие **основные задачи**.

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.

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.

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.

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 журналах входящих в международные библиографические системы Scopus или Web of Science, 6 публикаций в других изданиях, входящих в международные библиографические системы Scopus или Web of Science, получено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и два патента РФ на изобретение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе выполнен обзор исследований по теме диссертационной работы, сформулированы основные задачи работы и определены подходы к их решению.

Составлена математическая модель линейной антенной решетки, сфокусированной на конечное расстояние. С ее использованием исследован эффект смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля от точки фокусировки.

Установлена связь между линейными размерами антенной решетки и величиной смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля относительно точки фокусировки. На рисунке 1 представлено полученное семейство зависимостей, связывающее величину смещения, размеры антенной решетки и фокусное расстояние. Все величины нормированы к фокусному расстоянию.

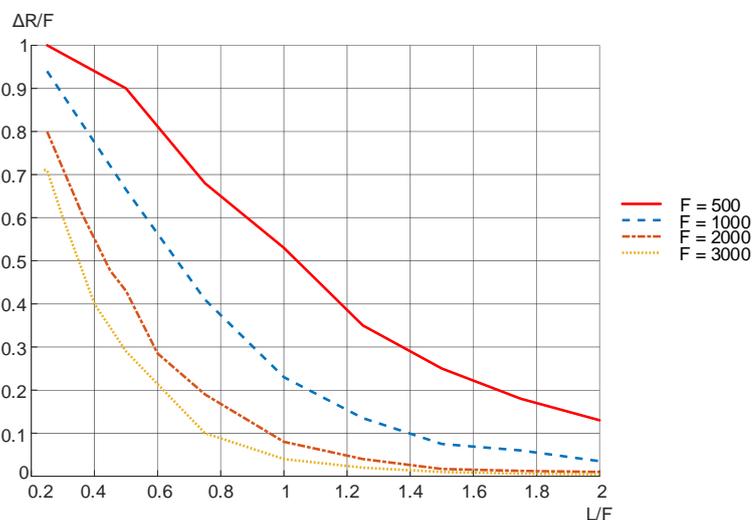


Рисунок 1. Зависимость величины смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля от линейных размеров антенной решетки для разных фокусных расстояний

Выполнена аппроксимация семейства зависимостей, показанного на рисунке 1 при помощи полинома двух переменных:

$$\frac{\Delta R}{F}(x, z) = a_1 x^3 + a_2 x^2 z + a_3 x^2 + a_4 x z^2 + a_5 x z + a_6 x + a_7 z^3 + a_8 z^2 + a_9 z + a_{10} \quad (1)$$

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

Кроме того, оценен размер области высокой напряженности электрического поля, формируемой в окрестности точки максимума и определена его взаимосвязь с параметрами антенной решетки и фокусным расстоянием. Полученные зависимости аппроксимированы степенным полиномом аналогичным (1).

Второй раздел посвящен исследованию способов позиционирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в требуемой точке пространства с помощью линейных антенных решеток, сфокусированных на конечное расстояние.

Предложен алгоритм компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля. Суть алгоритма заключается в том, что антенная решетка фокусируется в точку, в которой требуется обеспечить максимум амплитуды напряженности электрического поля. Задается целевая погрешность по координатам позиционирования максимума электрического поля. Вычисляется по (1) или измеряется величина смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля, затем фокусное расстояние итерационно увеличивается на величину смещения максимума, до тех пор, пока максимум не будет позиционирован в требуемой точке пространства. На рисунке 2 (а) представлена блок-схема итерационного алгоритма.

На рисунке 2 (б) показаны распределения напряженности электрического поля на разных шагах итерационного алгоритма для обеспечения максимума амплитуды напряженности электрического поля на расстоянии 2000 мм от антенной решетки. Количество излучателей в антенной решетке $N = 20$, расстояние между излучателями составляет половину длины волны, рабочая частота $f = 2.5$ ГГц.

Для обеспечения максимума в координате $X = 2000$ мм потребовалось сфокусировать антенную решетку на расстояние $F = 3820$ мм. Нельзя не отметить, что позиционирование максимума напряженности электрического поля в заданную точку привело в конечном счете к снижению амплитуды напряженности электрического поля и расширению зоны повышенной напряженности. В связи с этим были рассмотрены конфигурации, состоящие из нескольких антенных решеток (рисунок 3).

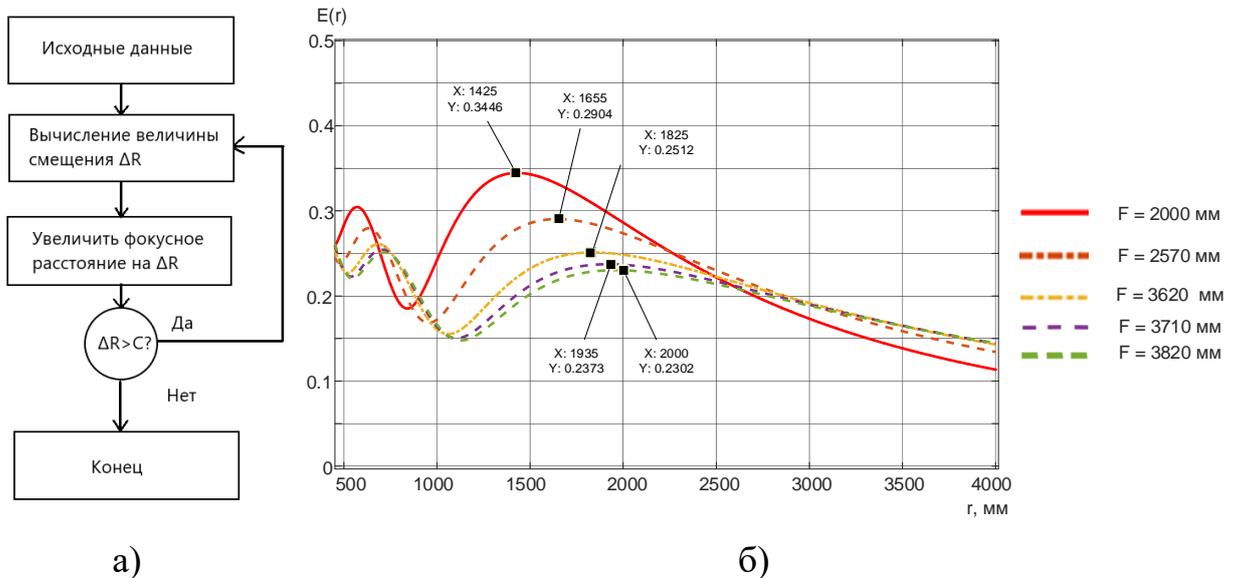


Рисунок 2. Итерационный алгоритм позиционирования: а) блок-схема алгоритма; б) зависимость амплитуды напряженности электрического поля от дальности на разных шагах итерационного алгоритма

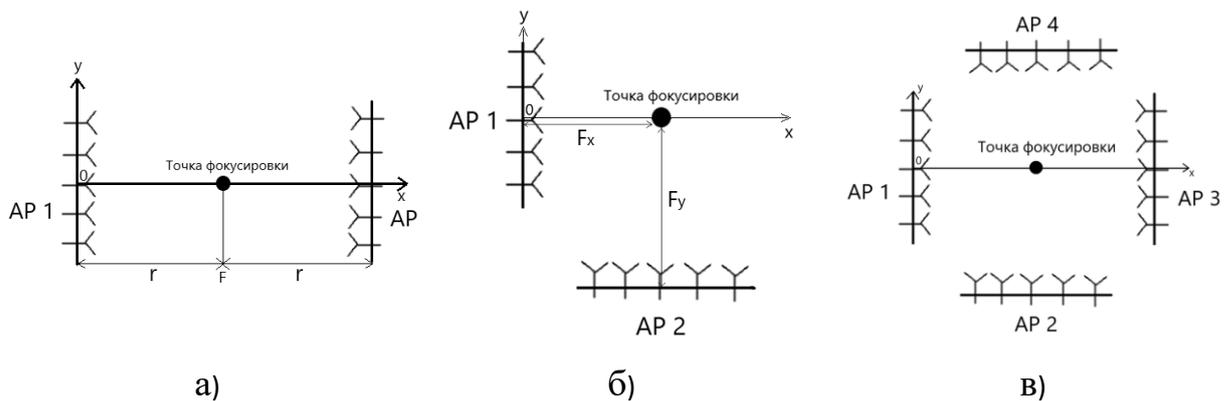


Рисунок 3. Рассмотренные антенные конфигурации: а) две параллельные антенные решетки; б) две ортогональные антенные решетки; в) четыре антенные решетки

Рассмотрена конфигурация двух одинаковых параллельных антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства (рисунок 3 а)). Каждой антенной решеткой формируется распределение напряженности электрического поля в пространстве, аналогичное изображенному на рисунке 2 б). Результирующее распределение определяется их суперпозицией. Для распределения от каждой из антенных решеток в окрестностях точки максимума напряженности электрического поля формируется зона повышенной напряженности электрического поля. Эти зоны будут пересекаться в точке, имеющий некоторый уровень напряженности

электрического поля, определяемый расстоянием до точки фокусировки и размерами антенной решетки. Возможно три случая (рисунок 4 а): зоны пересекутся по уровню ниже -3 дБ от максимума (результатирующее распределение напряженности будет иметь два максимума); зоны пересекутся по уровню -3 дБ от максимума (результатирующее распределение будет иметь один максимум и протяженную плоскую зону повышенной напряженности); зоны пересекутся по уровню выше -3 дБ от максимума (результатирующее распределение будет иметь один максимум и компактную зону повышенной напряженности).

На рисунке 4 (б) показаны зависимости амплитуды напряженности электрического поля для двух параллельных одинаковых антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства и расположенных на равном удалении от нее, полученные в результате моделирования.

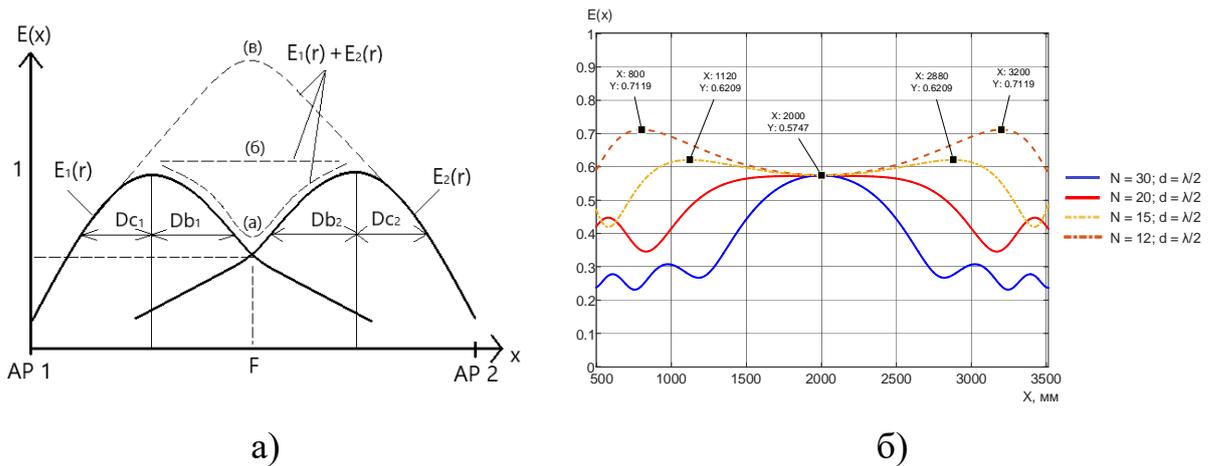


Рисунок 4. Распределение суммарной амплитуды напряженности электрического поля для двух параллельных антенных решеток: а) теоретическое представление; б) результат моделирования

В случае двух ортогональных антенных решеток (рисунок 3 б) каждая из-за эффекта снижения интенсивности сформирует 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). Их параметры (смещение и размер) будут определяться соотношениями, полученными в первом разделе диссертации. За счет пересечения диаграмм направленности антенных решеток в точке

фокусировки ожидается образование третьего максимума ($F_{0\max}$) амплитуды напряженности электрического поля.

Размер зоны повышенной напряженности электрического поля, в окрестностях третьего максимума амплитуды напряженности электрического поля ($F_{0\max}$), 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. Для его расчета вдоль каждой из координат получено выражение:

$$\Delta_i = 2 \cdot F_i \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{93^\circ}{2} \frac{\lambda}{L_i} \right), \quad (2)$$

где L_i - размер i -той антенной решетки; F_i - расстояние, на которое сфокусирована i -тая антенная решетка; нумерация антенных решеток согласно рисунку 3 б).

Рассмотрена возможность применения алгоритма компенсации смещения максимума напряженности электрического поля от требуемой точки. Его применение позволило совместить все три максимума в одной точке, совпадающей по координатам с местоположением третьего максимума.

В конфигурации, состоящей из четырех антенных решеток (рисунок 3 в), каждая антенная решетка будет формировать смещенный в свою сторону максимум и один максимум будет формироваться за счет пересечения четырех диаграмм направленности. Результат моделирования распределения напряженности электрического поля для такой конфигурации антенн представлен на рисунке 5. Каждая из антенн содержит 20 излучателей, шаг между излучателями равен половине длины волны, рабочая частота 2.5 ГГц.

Результат моделирования демонстрирует, что конфигурация из четырех ортогональных антенных решеток может обеспечить несколько точек максимума амплитуды напряженности электрического поля. Кроме того, управляя фокусным расстоянием антенных решеток, можно управлять количеством и местоположением точек максимума амплитуды напряженности электрического поля. Это открывает возможности по формированию нескольких разнесенных точек с высокой напряженностью электрического

поля с целью обеспечения пространственной селекции устройств, функционирующих в беспроводных телекоммуникационных сетях.

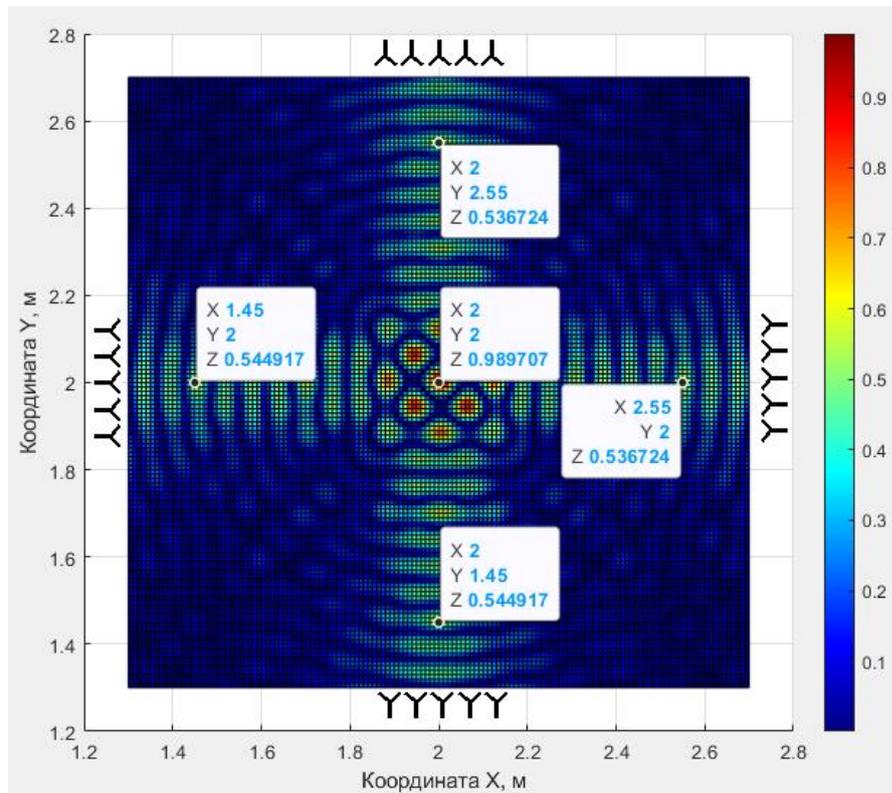


Рисунок 5. Распределение амплитуды напряжённости электрического поля для четырех ортогональных антенных решеток

Третий раздел направлен на разработку метода, позволяющего обеспечить несколько максимумов амплитуды напряженности электрического поля в пространстве.

Рассмотрено помещение, по периметру которого расположены излучающие антенны (N штук), а внутри произвольно располагаются точки приема (M штук) (рисунок б а).

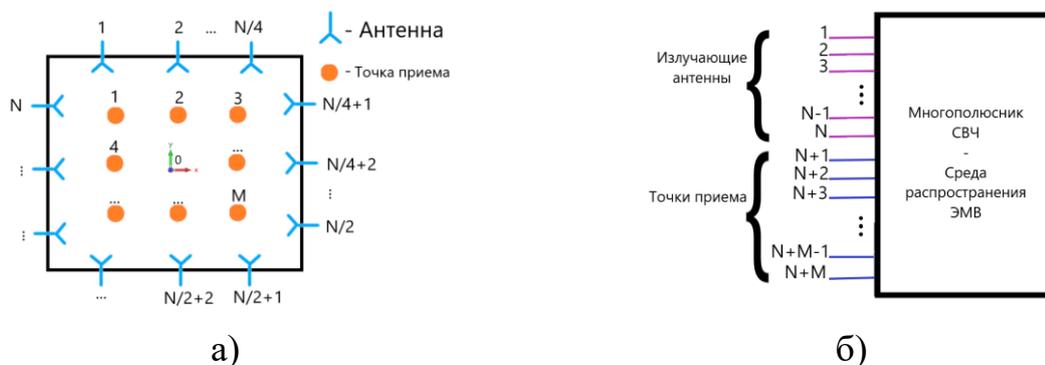


Рисунок 6. Конфигурация антенн: а) расположение в пространстве; б) представление в виде многополюсника

Помещение, можно представить в виде абстрактного многополюсника СВЧ с $N + M$ входами (рисунок 6 б). При этом точкам, из которых излучаются электромагнитные волны, соответствуют входы многополюсника с номерами 1 по N . Точки приема соответствуют входам многополюсника с номерами от $N+1$ по $N + M$. Сам абстрактный многополюсник характеризует среду распространения электромагнитных волн в рассматриваемом помещении.

С учетом линейности среды распространения запишем характеристическое уравнение многополюсника на основе матрицы рассеяния:

$$[\dot{Y}] = [\dot{S}] \cdot [\dot{X}], \quad (3)$$

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

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 рисунке 6 а) конфигурации, записано

выражение, определяющее вне диагональные элементы характеристической матрицы (без учета переотражений электромагнитных волн внутри помещения):

$$\dot{s}_{i,k} = g_{i,k} \cdot g_{k,i} \cdot r_{i,k}^{-q} \cdot \exp(-j \cdot \beta \cdot r_{i,k}), \quad (4)$$

где $r_{i,k}$ - расстояние от точки, соответствующей i -тому входу многополюсника до точки, соответствующей k -тому входу многополюсника; $\beta = 2 \cdot \pi / \lambda$ - 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 ; q - степень, определяющая закон уменьшения амплитуды напряженности электромагнитной волны.

Система (3) содержит количество уравнений равное сумме числа точек приема и излучения. Характеристическую матрицу абстрактного многополюсника можно разделить на четыре подматрицы:

$$[\dot{S}] = \begin{bmatrix} [\dot{S}_{TT}] & [\dot{S}_{TR}] \\ [\dot{S}_{RT}] & [\dot{S}_{RR}] \end{bmatrix}, \quad (5)$$

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

Показано, что при согласованности приемных и передающих антенн и отсутствии переотражений в помещении на величину напряженности в точках

приема влияние оказывать будет только подматрица прямых коэффициентов передачи $[\dot{S}_{RT}]$. Тогда выражение для расчета входных сигналов абстрактного многополюсника, можно записать в следующем виде:

$$[\dot{B}] = [\dot{S}_{RT}] \cdot [\dot{A}] \quad (6)$$

Очевидно, что в этом случае система содержит число уравнений, равное количеству точек приема.

Для проверки полученных соотношений разработана электродинамическая модель, содержащая 28 антенн, по 7 антенн на каждой из стен. На рисунке 7 (а, б, в) показано желаемое местоположение максимумов напряженности электрического поля в пространстве. По (6) получены значения амплитуд и начальных фаз сигналов, которые необходимо подвести для каждой антенны. На рисунке 7 (г, д, е) изображено распределение электрического поля, полученное в результате моделирования.

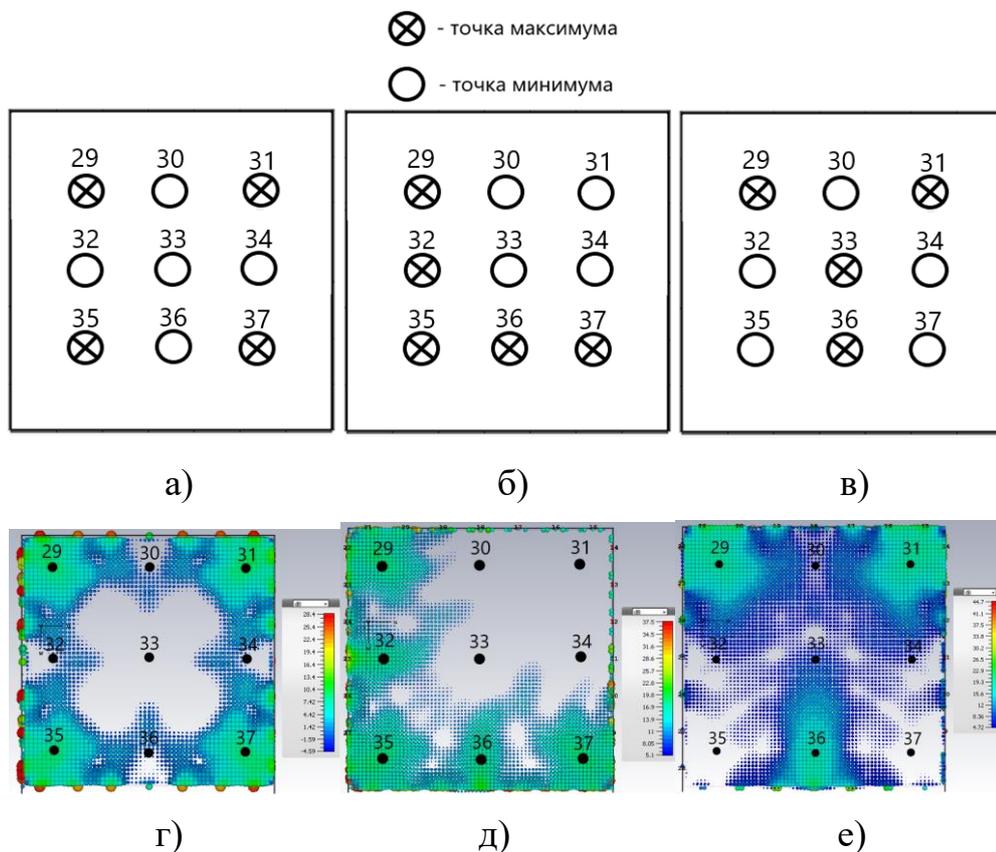


Рисунок 7. Требуемое и полученное в результате моделирования распределение амплитуды напряженности электрического поля в помещении

Четвертый раздел посвящен вопросам практического применения полученных теоретических результатов.

Разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитать распределение амплитуды напряженности электрического поля на основе заданной конфигурации антенн в пространстве, амплитуд и начальных фаз, подводимых к ним сигналов. Анализируемая область пространства разбивается с заданным шагом по каждой из координат. В каждом узле сетки разбиения осуществляется расчет комплексных амплитуд напряженности электрического поля, создаваемых всеми излучающими антеннами. Результирующая напряженность электрического поля является суперпозицией всех рассчитанных комплексных амплитуд.

Интерфейс программы представлен на рисунке 8 а). Его можно разбить на четыре блока: 1. Рабочие параметры (задаются размеры области моделирования, шаг разбиения, рабочая частота). 2. Таблица параметров излучателей (задаются координаты излучателей, амплитуды и фазы подводимых к ним сигналов). 3. Построение графиков и результаты (выбор формы представления результата). 4. Статус (отображение процесса расчета).

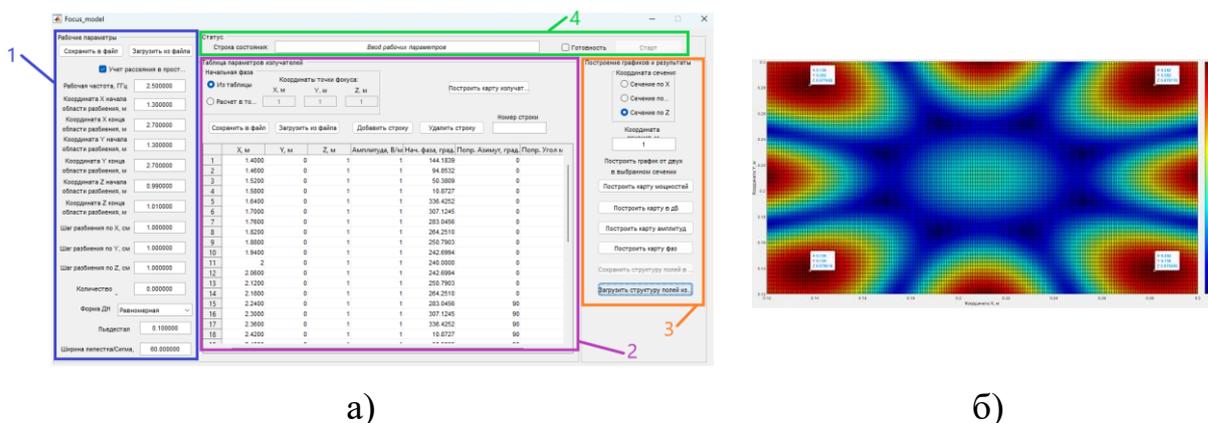


Рисунок 8. Разработанное программное обеспечение: а) Интерфейс; б) Результат расчета распределения амплитуды напряженности электрического поля

Проведено сравнение результатов моделирования в разработанном программном обеспечении и с использованием ранее разработанной электродинамической модели. Например, требуемое распределение амплитуды напряженности электрического поля изображено на рисунке 7 а), результат электродинамического моделирования – на рисунке 7 г), а результат расчета с использованием разработанного программного обеспечения – на рисунке 8 б).

Разработан макет сфокусированной антенной решетки. На рисунке 9 а) представлена его блок-схема, где использованы следующие обозначения: А – управляемый аттенюатор; Ф – управляемый фазовращатель; Г – генератор; ПК – персональный компьютер; цифрами обозначены излучающие антенны. Фотография макета в радиобезэховой камере приведена на рисунке 9 б). Макет работает на частоте 9.5 ГГц, расстояние между антеннами $d = 0.21$ м.

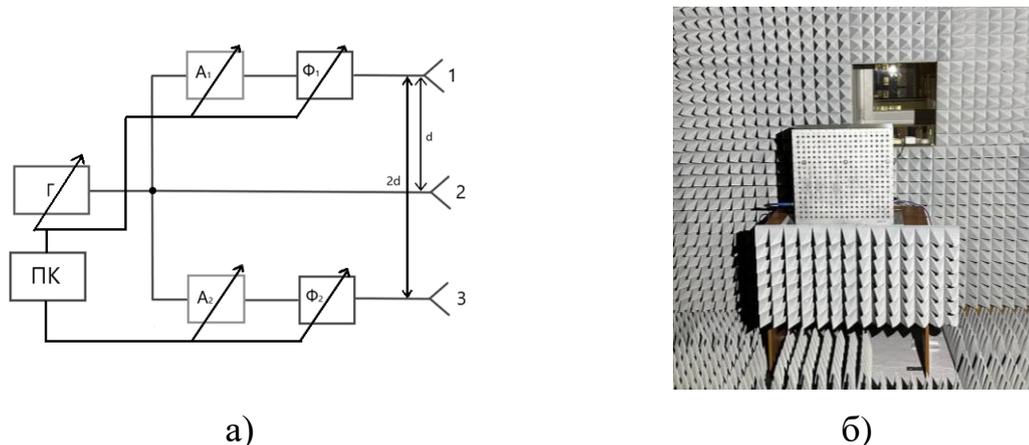
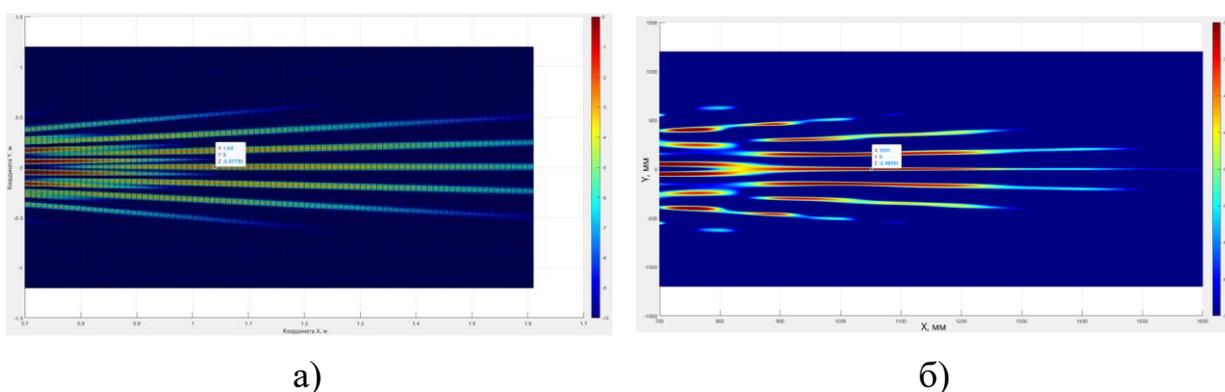
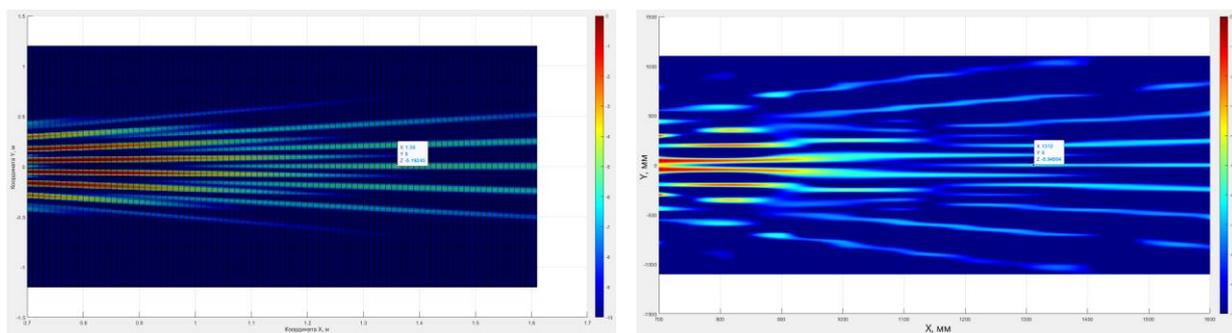


Рисунок 9. Макет антенной решетки: а) Блок-схема; б) Фотография макета

С использованием разработанного макета измерено распределение напряженности электрического поля при фокусировке на расстояние 1.3 метра. Моделирование и эксперимент проведены для двух случаев: без компенсации смещения максимума относительно требуемой точки и с компенсацией. Результаты моделирования и измерений приведены на рисунке 10. Видно их хорошее совпадение в обоих случаях.





в)

г)

Рисунок 10. Распределение напряженности электрического поля: а) моделирование без компенсации смещения; б) результат эксперимента без компенсации смещения; в) моделирование с компенсацией смещения; г) результат эксперимента с компенсацией смещения

В заключении перечислены основные результаты работы.

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

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.

Дальнейшие научные исследования могут быть направлены на разработку 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, это позволит расширить способы пространственной селекции устройств, функционирующих в беспроводных телекоммуникационных сетях.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. 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.

2. Юзвик Д. А., Степанов М. А. Алгоритм синтеза пленочного аттенюатора с равномерным рассеянием мощности по его длине // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2022. – №. 2 (55). – С. 60-69.

Статьи в других рецензируемых научных журналах:

3. Юзвик Д. А., Степанов М. А. Фокусировка излучения сетей беспроводной передачи данных в заданных точках пространства // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – №. 11.

4. Юзвик Д.А., Степанов М.А. Позиционирование максимума напряженности электрического поля в требуемой точке пространства при помощи сфокусированной антенной решетки // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 8.

Статьи в научных журналах, включенных в международные базы данных цитирования Web of Science или Scopus:

5. Iuzvik D., Stepanov M. 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. – 2024. – С. 411-427.

6. Iuzvik D. A., Stepanov M. A. Focusing of the electromagnetic field in several given areas of space //Progress In Electromagnetics Research M. – 2022. – Т. 113. – С. 11-22.

Публикации в других изданиях, включенных в международные базы данных цитирования Web of Science или Scopus:

7. Iuzvik D. A., Stepanov M. A. 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). – IEEE, 2023. – С. 350-354.

8. Iuzvik D. A., Stepanov M. A. Decomposition of an Antenna Array Focused at Several Space Points //2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2022. – С. 1020-1023.

9. Iuzvik D. A., Stepanov M. A. 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). – IEEE, 2022. – С. 93-96.

10. Iuzvik D. A. Algorithm for the Synthesis of a Film Attenuator with Uniform Power Dissipation //2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2021. – С. 342-345.

11. Iuzvik D. A., Stepanov M. A. Study of influence of absorbing material on parameters of line with losses //2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE). – IEEE, 2020. – С. 59-63.

12. Iuzvik D. A., Sokolov V. S., Stepanov M. A. Experimental Verification of the Algorithm for Positioning at a Required Point of Maximum Electric Field Strength //2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2024. – С. 510-513.

Патенты на изобретение в РФ и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

13. 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.

14. Юзвик Д.А., Степанов М.А., Новосибирский государственный технический университет. Способ позиционирования максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства с помощью одномерной сфокусированной антенной решетки. Патент № 2824934; Заявл. 12.02.2024; Оpubл. 15.08.2024.

15. 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.