

Верзунов С.Н.

Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек

СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЯЧЕЕК-РЕЗОНАТОРОВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Конструкции микрополосковых антенн широко описаны в литературе и дают хорошие результаты на практике. Однако, поскольку сами по себе они отличаются низкой эффективностью и ограниченной полосой пропускания, часто приходится оптимизировать конструкцию, изменяя ее параметры и улучшая технические характеристики. Один из способов добиться этого дает применение метаматериалов. Однако особенности ячеек метаматериала и их массива делает аналитическую разработку уравнений электромагнитного поля очень сложной и нецелесообразной. Обычно эту проблему решают путем разработки антенны с помощью множества дорогостоящих в вычислительном отношении и трудоемких электромагнитных симуляций. В настоящей работе предложен новый способ поиска оптимальной конструкции ячеек-резонаторов для микрополосковой антенны, позволяющий целенаправленно оптимизировать параметры ячеек-резонаторов, значительно улучшающие ее электрические характеристики. Предлагаемый метод объединяет регрессионную модель, использующую глубокую сеть на основе полносвязных нейронных слоев, с поиском на основе алгоритма условной оптимизации COBYLA для нахождения оптимальных конструктивных параметров ячеек-резонаторов. Вначале тензор, определяющий параметры ячеек-резонаторов, подается на вход нейронной сети, и сеть обучается, чтобы уменьшить разницу между выходом, предсказанным глубокой нейронной сетью, и соответствующими электрическими параметрами антенны, полученными в результате полноценного численного моделирования в программе CST MWS. Далее генерируются новые параметры ячеек-резонаторов посредством итеративной оптимизации. Этот шаг сочетает в себе сеть-регрессор, обученную ранее с алгоритмом оптимизации, и использует некоторую стратегию поиска для нахождения оптимальных параметров CSRR-ячеек. Такой подход полностью автоматизирует процесс создания микрополосковых антенн с ячейками-резонаторами на основе метаматериалов и позволяет находить параметры этих ячеек, обеспечивающие оптимальный режим работы в целом, и дает максимальный уровень излучения антенны при сохранении полосы пропускания. При этом ток перераспределяется между подложкой и патчем антенны в сторону патча, чем и объясняются полученные улучшения характеристик антенны.

Ключевые слова: метаматериалы, микрополосковые антенные ячейки, CSRR-ячейки, глубокое обучение, моделирование антенн, оптимизация, COBYLA, Matlab Antenna Toolbox, CST Microwave Studio, генеративное глубокое обучение

ВВЕДЕНИЕ

Антенны являются одним из самых распространенных видов датчиков в системах геоэкологического мониторинга, позволяя создать «интерфейс» между передатчиком или приемником и наблюдаемой средой. По сравнению с другими типами антенн в современных системах мониторинга микрополосковые антенны применяются наиболее часто, так как их конструкция отлично подходит для этой области применения благодаря своей плоской геометрии и небольшим размерам, обладая при этом и характерными недостатками, такими как низкие показатели усиления и распределение излучения в пространстве.

К примеру, такие антенны могут быть с успехом применены для реализации предложенного в работе [1] гибридного метода зондирования для обнаружения скрытых металлосодержащих объектов, например подземных кабельных линий, трубопроводов и т.п. При этом за счет повышения частоты излучения, на которой будет работать трассоискатель, можно будет достигнуть значительного повышения точности локализации неглубоко залегающих объектов.

Использование метаматериалов в конструкции антенн является актуальной областью исследований, это позволяет при сохранении небольших размеров максимально повысить их производительность за счет изменения значений магнитной и диэлектрической проницаемости подложки антенны. Однако геометрия ячеек метаматериала и их расположение делают нецелесообразным аналитическую разработку уравнений результирующих электромагнитных полей. Из-за чего инженеры вынуждены проектировать конструкции таких антенн посредством трудоемкого в вычислительном смысле электромагнитного моделирования, используя метод проб и ошибок [2].

Метаматериалы – материалы с особыми физическими свойствами, которые невозможно воспроизвести с помощью природных материалов, поэтому они являются довольно популярными средствами в современных высокотехнологичных сферах и часто используются во многих областях, таких как плащи-невидимки для микроволнового излучения, подводные лодки, которые используют стелс-технологии, инновационная электроника, микроволновые компоненты, фильтры и т.д. [3].

Метаматериалы – материалы с особыми физическими свойствами, которые невозможно воспроизвести с помощью природных материалов, поэтому они являются довольно популярными средствами в современных высокотехнологичных сферах и часто используются во многих областях, таких как плащи-невидимки для микроволнового излучения, подводные лодки, которые используют стелс-технологии, инновационная электроника, микроволновые компоненты, фильтры и т.д. [3].

Кроме того, метаматериалы, появившиеся благодаря последним достижениям науки и техники, привели к значительным достижениям в управлении и использовании волн, включая электромагнитные, акустические и механические волны. Благодаря разнообразным исследованиям метаматериалов стали доступны такие свойства, как отрицательное преломление, чрезвычайно высокий показатель преломления, управление амплитудой, фазой и поляризацией волн. Характеристики и свойства этих метаматериалов сделали возможными удивительные и необычные явления, которые невозможно найти среди природных материалов. Это оказало глубокое влияние на различные сферы исследований и технологий, включая электромагнитную инженерию, нанофотонику, оптику, материаловедение, физику твердого тела, физику полупроводников, акустику и механику упругости [4].

Одним из наиболее важных применений является разработка компактных высокоэффективных антенн, которые стали реальностью благодаря использованию метаматериалов. Используя метаматериалы с уникальными свойствами, становится возможным создавать антенны с инновационными функциями, которые не могут обеспечить стандартные материалы. Один или несколько слоев метаматериала могут использоваться в качестве подложки или в дополнение к конструкции антенны, чтобы расширить ее возможности. Например, если желательна компактная антенна с низкой стоимостью и высокой эффективностью, лучшим вариантом будет антенна с использованием метаматериалов, которые могут помочь увеличить пропускную способность и коэффициент усиления небольших антенн. Еще одно преимущество заключается в том, что метаматериалы не только уменьшают геометрические размеры антенн, но и могут увеличить направленность сигнала. В случае если размеры антенны не имеют значения, применение метаматериалов обеспечивают преимущество перед традиционными антеннами, поскольку это позволяет получить большую полосу пропускания [5].

В последнее десятилетие метаматериалы нашли применение в качестве поглотителей волн, и с тех пор эта область исследований привлекает большое внимание. В 2008 г. Лэнди с соавторами в работе [6] представил краткие сведения о ячейке-поглотителе для микроволнового диапазона на основе метаматериалов.

Метаматериалы, поглощающие электромагнитные волны, часто применяются в военной промышленности, что обусловлено хорошими характеристиками и малым весом, что важно для этой области. Например, в работе [7] представлена структура метаматериала из композита с превосходными характеристиками поглощения электромагнитных волн, охватывающих весь радиолокационный X-диапазон, который был разработан и изготовлен ими с целью практической проверки свойств.

Особенный интерес вызывает проектирование резонаторов в виде разомкнутых колец как ключевых составных блоков для создания эффективных сред с отрицательной магнитной проницаемостью ($\mu_{\text{eff}} < 0$) или «левых» материалов. В работе [8] демонстрируется потенциал включений субволновых (то есть очень маленьких) резонаторов с разъемным кольцом и комплементарных ячеек-резонаторов с разъемным кольцом (CSRR – Complementary Split Ring Resonator) для создания компактных микрополосковых режекторных фильтров для подавления нежелательных паразитных полос в микроволновом диапазоне.

Как правило, антенны на основе метаматериалов проектируются путем многократного моделирования и, внося многократные коррективы в параметры антенны, используя метод проб и ошибок, можно получить требуемый набор характеристик антенны. Количество времени, которое требуется для выполнения этой процедуры, совершенно непредсказуемо и определяется, кроме удачи, в некоторой степени опытом конструктора. Во многих известных случаях использование метода моделирования во временной области с конечным дифференцированием или метода конечных элементов позволило получить решения с оптималь-

ными характеристиками, только методом проб и ошибок, подкрепленных профессиональными рассуждениями и эмпирическими знаниями. Однако этот процесс трудоемкий и дорогостоящий, а из-за разнообразия конструктивных параметров и аналитических степеней свободы даже почти аналогичные конструкции могут иметь разные результаты численного моделирования и практического тестирования.

К счастью методы анализа данных на основе интеллектуального анализа данных, бурно развивающиеся в последние годы, также могут быть использованы для решения этой проблемы. Идеи глубоких нейронных сетей (DNN – Deep Neural Network), развивающиеся методы машинного обучения, основанные на биологических нейронных сетях и использующие глубокое (или иерархическое) обучение, начали быстро развиваться в 2000-х годах, хотя и были известны ранее. Глубокое обучение – это один из методов машинного обучения, использующийся для регрессии и классификации на больших объемах сложных данных, использующий принципы мышления человеческого мозга. Благодаря достижениям в области глубокого обучения оно применяется сейчас в самых разных областях и его результаты можно увидеть во многих областях экономики. Наибольшие успехи пока что были достигнуты в основном в компьютерном зрении, обработке естественного языка, распознавании голоса и обработке видеосигнала, но в последнее время появились исследования, свидетельствующие о большом потенциале глубокого обучения для ускорения процедуры проектирования антенн.

Предполагается, что машинное обучение ускорит процедуру проектирования антенны, обеспечивая при этом высокую точность, сводя к минимуму возможные ошибки, позволит экономить время и даст возможность прогнозировать поведение антенны, повышая эффективность вычислений, и уменьшить количество необходимых моделирований [9-12], чем и объясняется актуальность настоящего исследования.

Например, в работе [4] обсуждается метод, основанный на глубоком обучении, позволяющий быстро разработать ячейки с проводящим слоем структурного типа для применения в X-диапазоне (8–12 ГГц), представляющие собой ячейки со стороной 12,8 мм. Они состоят из нижней части, состоящей из заземляющей пластины, диэлектрика и ячейки-поглотителей электромагнитных волн с квадратным рисунком, площадью 16×16 пикселей, причем каждый пиксель представляет собой квадрат с ребром 0,8 мм. Рабочие характеристики такой ячейки зависят от того, как спроектирован пикселей квадратный шаблон.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Таким образом, конструкции микрополосковых антенн широко описаны в литературе и дают хорошие результаты на практике. Однако, поскольку сами по себе они отличаются низкой эффективностью и ограниченной полосой пропускания, часто приходится оптимизировать конструкцию, уменьшая ее геометрические размеры и улучшая технические характеристики для удовлетворения требований ее практического применения. Один из способов добиться этого – это применение метаматериалов. Метаматериалы – это мате-

риалы с особыми электрическими характеристиками. Однако геометрия ячеек метаматериала и их массива делает аналитическую разработку результирующих уравнений электромагнитного поля очень сложной и нецелесообразной. Традиционно эту проблему решают путем разработки антенны с помощью множества дорогостоящих в вычислительном отношении и трудоемких электромагнитных симуляций. С появлением доступных библиотек обработки данных с помощью глубоких нейронных сетей и их аппаратной поддержки появилась возможность оптимизировать конструкции антенн за счет разработки соответствующих моделей глубокого машинного обучения, что позволяет избежать ручного поиска оптимальной конструкции и является задачей настоящего исследования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности микрополосковых антенн

Как известно, антенна является переходной структурой между свободным пространством и передающим или принимающим устройством. Это последнее устройство обычно называется линией передачи и широко известно как волновод или фидер в телекоммуникационных системах. Линии передачи могут иметь форму коаксиального кабеля или полого металлического короба и используются для передачи энергии электромагнитной волны от источника к антенне или от антенны к приемнику. В первом случае имеется в виду передающая антенна, а во втором – антенна, принимающая сигнал. Чтобы описать работу антенны, необходимо определить множество параметров. Некоторые из этих параметров взаимосвязаны и не все из них необходимо указывать для полного описания характеристик антенны.

Диаграмма направленности излучения антенны определяется как математическая функция или графическое представление свойств антенны в координатном пространстве. Эти свойства могут включать интенсивность и плотность излучения, напряженность поля, направленность, фазу или поляризацию. Также важно отметить, что эти свойства обычно нормируются на основе их максимально возможного значения, которое может быть выражено в логарифмической шкале или в децибелах. На этом графике обычно присутствуют лепестки, представляющие собой замкнутые концентрации поля, обычно симметричные. Если антенна имеет только один лепесток постоянного радиуса во всех направлениях, такая антенна называется изотропной или ненаправленной, то есть излучает одинаковую мощность независимо от направления.

Другим важным параметром является интенсивность излучения U , определяемая как мощность, излучаемая антенной на единицу телесного угла в заданном направлении. Этот параметр может быть получен как

$$U = r^2 W_{rad},$$

где r – расстояние; W_{rad} – плотность излучения.

Также важно отметить, что антенна имеет эффективность излучения η_r :

$$\eta_r = \frac{P_{rad}}{P_0},$$

где P_{rad} – излучаемая мощность; P_0 – мощность, принимаемая антенной.

Направленность – это мера способности антенны концентрировать излучаемую мощность в определенном направлении. Если направление не указано, то под направленностью понимается направление максимальной интенсивности излучения ($U = U_{max}$). Эту безразмерную меру можно представить математически через уравнение:

$$D = \frac{U}{P_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}.$$

Коэффициент усиления антенны G является мерой способности концентрировать в определенном направлении мощность, принимаемую антенной. Эта мера также безразмерна и больше используется на практике, чем направленность, так как легче измерить мощность, принимаемую антенной, чем мощность, излучаемую ею. Он определяется как

$$G = \eta_r D = \frac{4\pi U}{P_0}.$$

Теоретически, в случае антенны без потерь ($\eta_r = 1$), направленность и усиление будут одинаковыми.

Полоса пропускания антенны определяется как диапазон частот, в котором характеристики антенны по некоторым параметрам соответствуют установленному стандарту. Полоса пропускания может рассматриваться как диапазон частот по обе стороны от центральной частоты (обычно это резонансная частота), где характеристики антенны (такие как входное сопротивление, диаграмма направленности, ширина луча, поляризация, уровень боковых лепестков, коэффициент усиления, направление луча, эффективность излучения) находятся в пределах допустимого значения для центральной частоты. Для широкополосных антенн ширина полосы обычно выражается как отношение верхних и нижних частот приемлемой работы. Например, полоса пропускания 10:1 означает, что верхняя частота в 10 раз больше нижней. Для стреловидных антенн ширина полосы выражается в процентах от разности частот (верхняя минус нижняя) относительно центральной частоты полосы пропускания. Например, полоса пропускания 5% указывает, что разность частот приемлемой работы составляет 5% от центральной частоты полосы пропускания [12].

Комплексный коэффициент отражения S_{11} показывает, какая часть падающей высокочастотной мощности отражается из-за рассогласования антенны с фидером. Рассогласование антенны с фидером заключается в разнице между входным сопротивлением антенны и волновым сопротивлением фидера или импедансом генератора (в случае, если линия передачи отсутствует). Зависимость комплексного коэффициента отражения от частоты дает возможность определить рабочую полосу антенны, которая берется по уровню амплитуды $S_{11} < -5$ дБ [13].

Как показано на **рис. 1**, микрополосковые антенны состоят из очень тонкой металлической полосы, называемой патчем, слоя диэлектрика, также называемого

подложкой, и металлической основы, так называемой заземляющей пластины. При выборе подложки, как правило, отдается предпочтение тонким слоям с низкой диэлектрической проницаемостью, конкретные характеристики могут меняться в зависимости от области применения. Этот выбор учитывает наилучшее соотношение цены и качества между характеристиками антенны и стоимостью конструкции.

Диэлектрическая подложка в большинстве случаев должна быть электрически тонкой, а диэлектрическая проницаемость должна варьироваться в пределах $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Резонанс патч-антенны достигается, когда L близко к $\lambda/2$. Входной импеданс регулируется путем изменения положения точки питания в диапазоне от 50 до 300 Ом [12].

Исходные данные

Для определенности необходимо выбрать резонансную частоту микрополосковой антенны. Наиболее перспективным, на наш взгляд, в настоящее время кажется диапазон 400 МГц на частоте 6 ГГц, который может быть задействован для использования в сети сотовой связи 5G. Либо, например, для определения диэлектрической проницаемости горных пород методом свободного пространства [14]. Этот диапазон во многих странах в настоящее время не задействован [15] и захватывается доступными программно-определяемыми радиопериферийными устройствами, способными передавать или принимать радиосигналы в диапазоне от 1 МГц до 6 ГГц. К примеру, устройство HackRF One, предназначенное для тестирования и разработки современных и радиотехнологий, представляет собой аппаратную платформу с открытым исходным кодом, которую можно использовать в качестве периферийного USB-устройства или запрограммировать для автономной работы [16].

В табл. 1 представлены значения, полученные по представленному в работе [12] способу. Моделируемая антенна изготовлена из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита с толщиной фольги 0,35 мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4,3$ размером 61620 на 51480 мкм, как рекомендуется в работе [17].

В настоящее время только небольшое количество прикладных программных пакетов может использоваться для моделирования эффектов применения метаматериалов. Хорошим примером является пакет CST Microwave Studio (CST MWS).

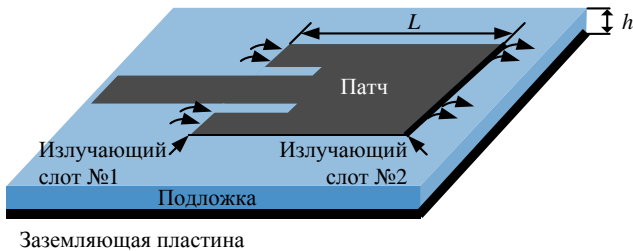


Рис. 1. Конструкция микрополосковой антенны

Таблица 1
Конструктивные параметры микрополосковой антенны

L_g , МКМ	W_g , МКМ	W , МКМ	L , МКМ	h , МКМ	W_0 , МКМ	y_0 , МКМ	g , МКМ
61620	51480	23694	19820	1700	3500	6800	1000

С помощью этой программы могут быть рассчитаны многие характеристики антенны, такие как полоса пропускания, коэффициент усиления, обратные потери и др. [18]. Сравнимую функциональность предоставляет Matlab Antenna Toolbox (АТ), хотя для моделирования он может задействовать только одно ядро CPU, в отличие от CST MWS, который может использовать параллельную обработку на множестве ядер CPU и GPU.

Для улучшения электрических характеристик необходимо добавить в конструкцию антенны ячейки метаматериала на основе комплементарных разомкнутых колец CSRR (рис. 2) с определенными конструктивными параметрами, как рекомендуется в работе [17].

Исходя из эмпирических правил, предложенных в работе [19], диапазон изменения этих параметров задается как функция от резонансной длины волны λ_0 :

$$\begin{aligned}
 0,025h_0 &\leq W_m \leq \frac{\lambda_0}{4}; \\
 t_m &\approx 0,1W_m; \\
 0,0019\lambda_0 &\leq W_{0m} \leq 0,0076\lambda_0; \\
 0,0009\lambda_0 &\leq d_m \leq 0,0057\lambda_0.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Ячейки располагаются по сторонам патча, как показано на рис. 3, с учетом соображений симметрии антенны.

Чтобы охватить достаточное количество возможных вариантов, интервалы, используемые при размещении CSRR-ячеек в массиве, задаются уравнениями:

$$\begin{aligned}
 g &\leq X_a \leq \left(\frac{W}{2} - \frac{W_m}{2}\right); \\
 W_m &\leq Y_a \leq \left(\frac{4L}{R-1} - W_m\right); \\
 R &= 3, 5, 7.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Таким образом, конструктивные параметры CSRR-ячеек можно задать тензором:

$$\bar{X} = [W_m, W_{0m}, d_m, t_m, R, X_a, Y_a].$$

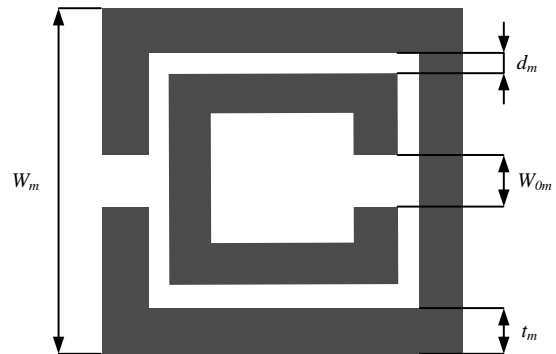


Рис. 2. Параметры CSRR-ячейки:

W_m – высота ячейки CSRR; W_{0m} – зазор кольца; d_m – расстояние между кольцами; t_m – толщина колец; X_a – расстояние между ячейкой и патчем; Y_a – расстояние между ячейками; R – количество ячеек в массиве с каждой стороны

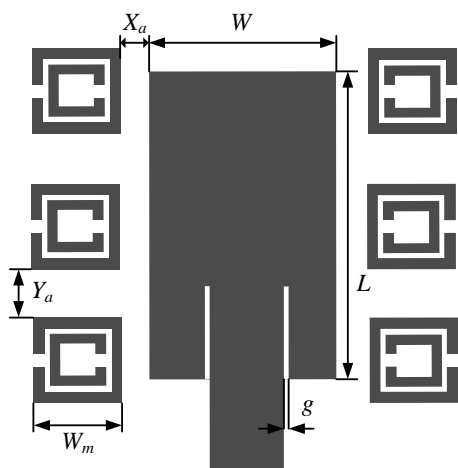


Рис. 3. Расположение CSRR-ячеек относительно патча антенны

Исходя из приведенных выше границ изменения конструктивных параметров CSRR-ячеек, заданных формулами (1), (2) в программе CST MWS Вазом Р. в работе [16], были сгенерированы исходные данные для обучения нейронных сетей в количестве 572 образцов, доступных в открытом доступе [18].

Для оценки электрических характеристик моделируемых электрических параметров микрополосковых антенн с CSRR-ячейками с помощью программы CST MWS были рассчитаны такие параметры, как

$$\bar{Y} = [G_a, B_w, S_r],$$

где G_a – усиление антенны, дБ; B_w – полоса пропускания; S_r – обратные потери на резонансной частоте.

СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЯЧЕЕК-РЕЗОНАТОРОВ

Предлагается новый способ, позволяющий оптимизировать параметры CSRR-ячеек резонаторов, взаимное функционирование которых будет обеспечивать оптимальный режим работы антенны в целом и даст максимальный уровень излучения антенны при сохранении полосы пропускания. Предлагаемый метод объединяет модель регрессии, использующую глубокую сеть на основе полносвязных нейронных слоев, с поиском на основе алгоритма условной оптимизации для нахождения наилучших конструктивных параметров ячеек-резонаторов. Такой подход полностью автоматизирует процесс создания микрополосковых антенн с ячейками-резонаторами на основе метаматериалов и позволяет находить параметры CSRR-ячеек, дающие наилучшие электрические характеристики антенны. В общем виде способ, схематически показанный на рис. 4, состоит из двух шагов.

Шаг 1 – обучение сети-регрессора, который предсказывает электрические характеристики антенны исходя из ее конструктивных параметров, заданных в виде тензора чисел. Тензор, определяющий параметры CSRR-ячеек, подается на вход нейронной сети, и сеть обучается, чтобы уменьшить разницу между выходом, предсказанным глубокой нейронной сетью, и соответствующими электрическими параметрами антенны, полученными в результате полноценного численного моделирования в программе CST MWS.

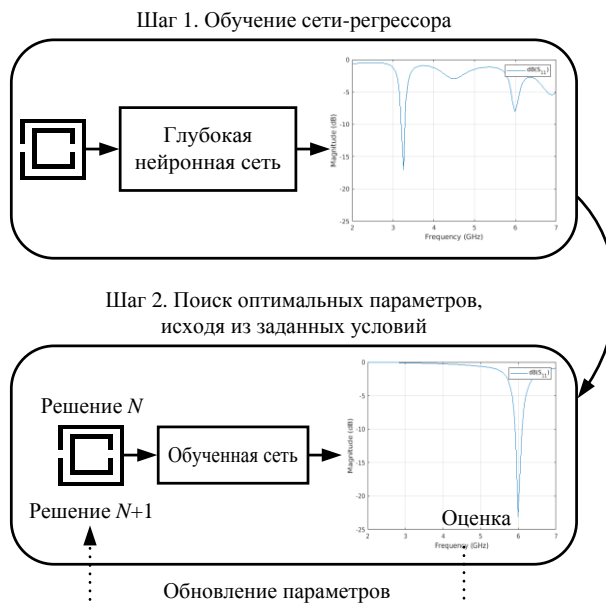


Рис. 4. Общая схема поиска оптимальной конструкции CSRR-ячеек микрополосковой антенны

Шаг 2 – генерация новых параметров CSRR-ячеек резонаторов посредством итеративной оптимизации. Он сочетает в себе сеть-регрессор, обученную на шаге 1 с алгоритмом оптимизации, и использует некоторую стратегию поиска для нахождения оптимальных параметров CSRR-ячеек.

Сеть-регрессор для определения электрических характеристик микрополосковой антенны с CSRR-ячейками

Как известно, задача регрессии заключается в предсказании тензора вещественных меток по имеющимся входным данным:

$$\hat{Y} = DNN(\bar{X}, \bar{Y}).$$

На рис. 5 показана матрица корреляции исходных данных. Очевидно наличие корреляции между t_m и W_m , следующей из формулы (1), и отрицательной корреляции между полосой пропускания B_w и обратными потерями S_r . Также присутствует корреляция между полосой пропускания B_w и усилением G_a .

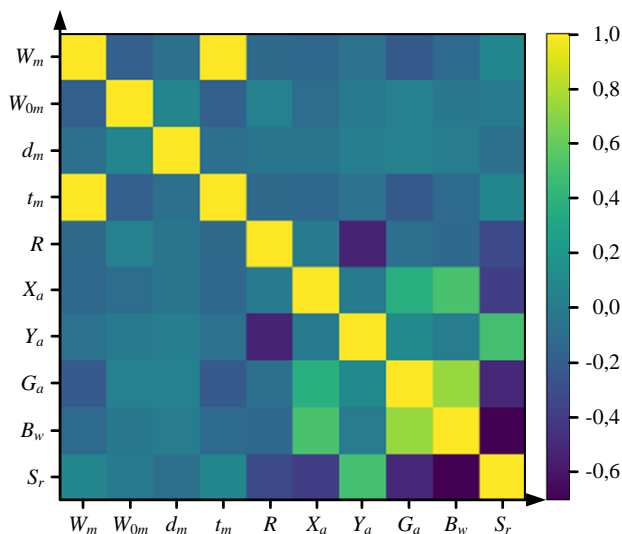


Рис. 5. Матрица корреляции исходных данных

Необходимо отметить существенную положительную корреляцию параметрами X_a и B_w , Y_a и S_r , а также отрицательную корреляцию между параметрами X_a и S_r , R и S_r . Но все же корреляция между параметрами G_a , B_w и S_r не полная и поэтому имеет смысл использовать для оптимизации все три эти параметра.

Каждый признак в исходных данных имеет свой масштаб. Например, полоса пропускания измеряется в мегагерцах, конструктивные параметры CSRR-ячеек в микрометрах, другие в децибелах и т.д. Как известно, проблематично передавать в нейронную сеть значения, имеющие самые разные диапазоны.

Сеть, конечно, сможет автоматически адаптироваться к таким разнородным данным, однако это усложнит обучение. На практике к таким данным принято применять нормализацию: для каждого признака во входных данных из каждого значения вычитается среднее по этому признаку и разность делится на стандартное отклонение:

$$\bar{\bar{Y}} = \frac{\bar{Y} - \langle \bar{Y} \rangle}{S(\bar{Y})};$$

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X} - \langle \bar{X} \rangle}{S(\bar{X})}.$$

Исходные данные делятся на обучающие и контрольные в отношении 4:1, и величины, используемые для нормализации контрольные данные, вычисляются с использованием только обучающих для более точной оценки качества обученной нейронной сети далее.

Из-за небольшого количества образцов используется небольшая сеть с тремя промежуточными полносвязными слоями с 64-мя нейронами в каждом. Связано это с большой вычислительной сложностью численного моделирования в программе CST MWS, даже несмотря на применение GPU. Вообще говоря, чем меньше обучающих данных, тем скорее, как известно, наступит переобучение, а использование маленькой сети, архитектура которой показана на рис. 6, – один из способов борьбы с ним. Кроме того, используется и самый популярный в настоящее время метод борьбы с переобучением, так называемое «прореживание» с коэффициентом 0,1 после первого скрытого слоя.

Другой более «точный» способ борьбы с переобучением – использование L_1 -регуляризации во втором полносвязном слое, он реализуется в предложенной архитектуре добавлением в функцию потерь сети штрафа за увеличение весов. Добавляемый штраф прямо пропорционален абсолютным значениям весовых коэффициентов, с коэффициентом пропорциональности $L_1=5 \cdot 10^{-4}$.

Сеть обучалась с функцией потерь mse – mean squared error (среднеквадратическая ошибка), вычисляющей квадрат разности между предсказанными и целевыми значениями. Эта функция широко используется в задачах регрессии.

Для более удобной оценки результатов обучения сети используется параметр точности регрессии mae – mean absolute error (средняя абсолютная ошибка). Это среднее абсолютное значение разности между предсказанными и целевыми значениями.

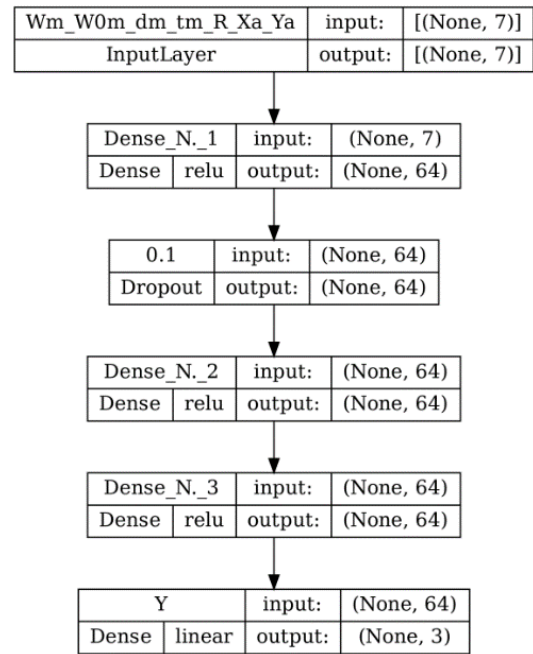


Рис. 6. Архитектура сети-регрессора

Для обучения сети использовался алгоритм оптимизации Adam с начальной скоростью обучения $l_r=10^{-3}$, экспоненциально убывающей на протяжении всего обучения с постоянным коэффициентом $d_r=0,95$ на пакетах размером 32 образца.

Результаты обучения сети на протяжении 4000 эпох показаны на рис. 7.

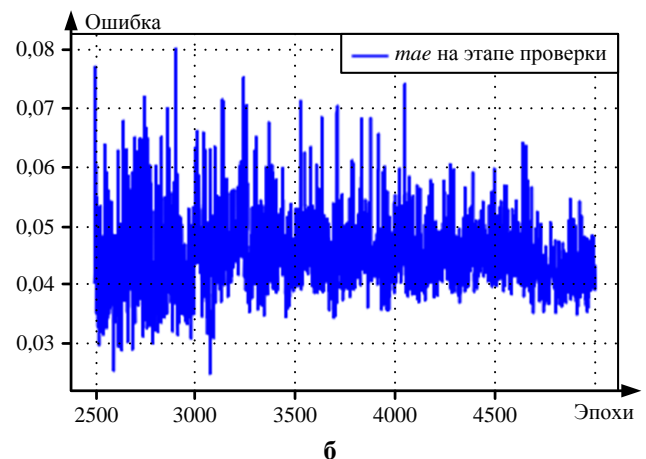
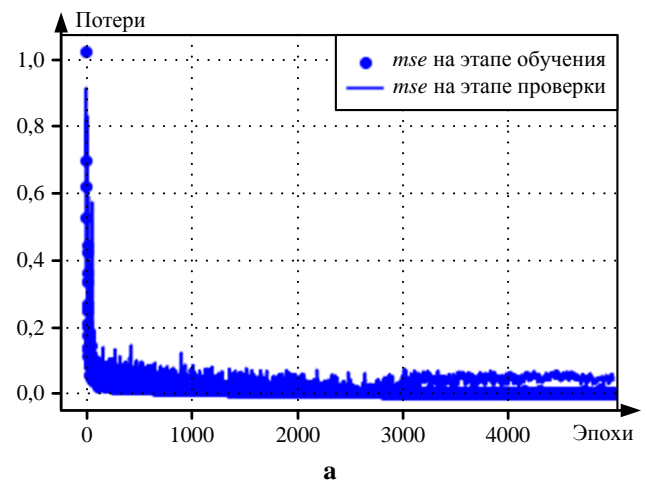


Рис. 7. Изменение mse (а) и mae (б) в ходе обучения сети-регрессора

Оптимизация конструктивных параметров CSRR-ячеек

Для определения наилучших конструктивных параметров CSRR-ячеек предлагается определить оптимизируемую функцию как

$$A(\bar{Y}) = k_g G_a + k_b B_w + k_s S_r,$$

где k_g, k_b, k_s – весовые коэффициенты, отражающие вклад каждого параметра в оптимизируемую функцию.

Тогда оптимизационная задача запишется как

$$A(\bar{Y}) = \min_{\bar{X}},$$

так как значения \bar{Y} , соответствующие \bar{X} , непосредственно вычислить невозможно, для их оценки, как было предложено выше, используется обученная нейронная сеть.

$$\hat{Y} = DNN(\bar{X}).$$

В табл. 2 показаны параметры CSRR-ячеек, полученные при решении оптимизационной задачи (3) методом COBYLA [20] с дополнительными ограничениями, заданными из геометрических соображений:

$$\bar{X}_i > 0, i = 1, 2, 3, \dots, 7;$$

$$R < 8;$$

$$R(W_m + X_a) < L_g$$

и условий (2) при значениях весовых коэффициентов, равных $k_g = -0,1$; $k_b = -0,1$; $k_s = 1$. То есть в результате оптимизации необходимо добиться минимального значения обратных потерь на резонансной частоте, при этом резонансная частота CSRR-ячеек будет приблизительно совпадать с одной из резонансных частот патча микрополосковой антенны. Для того чтобы при этом не ухудшались другие электрические параметры антенны, остальные веса должны иметь небольшие отрицательные значения.

Таблица 2

Оптимальные конструктивные параметры CSRR-ячеек

W_m , МКМ	W_{0m} , МКМ	d_m , МКМ	t_m , МКМ	R	X_a , МКМ	Y_a , МКМ	\hat{S}_r
2244,4	295,8	743,5	224,4	5,2	8731,4	6948,8	-25,4

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные при моделировании с помощью АТ микрополосковых антенн, представлены в табл. 3, а на рис. 8 показана кривая обратных потерь S_{11} в диапазоне 1-7 ГГц и диаграммы направленности антенн на резонансной частоте 6 ГГц.

Полученные улучшения можно объяснить тем, что CSRR-ячейка – очень удачная структура, в которой емкость между двумя кольцами сочетается с их индук-

тивностью. Изменяющееся во времени магнитное поле с вектором напряженности, перпендикулярным поверхности колец, вызывает потоки, которые в зависимости от резонансных свойств структуры подложки порождают вторичное электромагнитное поле, усиливающее исходное либо противодействующее ему в зависимости от разности фаз исходной и вторичной электромагнитной волны.

Резонансная частота, полученная с помощью двух кольцевых разомкнутых резонаторов, должна быть намного меньше, чем соответствующая классическим кольцевым или прямоугольным резонаторам с одиночным разомкнутым контуром аналогичных размеров. Эта особенность связана с большой распределенной емкостью между двумя кольцами. Небольшой размер CSRR-ячеек открывает возможность применения этой своеобразной конфигурации с целью создания компактных микрополосковых антенн. Так как существует множество различных параметров, влияющих на резонансную частоту CSRR-ячеек, наиболее важными из которых являются диэлектрическая проницаемость подложки и длина резонатора, ограничимся только численным определением резонансной частоты, путем моделирования в АТ.

Как видно из рис. 9, резонансная частота массива CSRR-ячеек действительно совпадает со второй резонансной частотой микрополосковой антенны, что и подтверждает приведенную выше гипотезу. CSRR-ячейка, выступая конструктивным элементом метаматериала подложки, в совокупности с другими элементами микрополосковой антенны образует локальные резонансные подобласти, изменяющие ее эффективную магнитную проницаемость.

Взаимное функционирование данных резонансных областей обеспечивает оптимальный режим работы антенны в целом и дает максимальный уровень излучения антенны при сохранении полосы пропускания, что подтверждается распределением тока в элементах антенны, показанных на рис. 10. При этом ток перераспределяется между подложкой и патчем антенны в сторону патча, чем и объясняются полученные улучшения электрических характеристик антенны.

Таблица 3

Сравнительные электрические характеристики микрополосковой антенны с CSRR-ячейками и без них

Микрополосковая антенна без CSRR-ячеек	
Обратные потери	-8,0 дБ
Полоса пропускания ($S_{11} < -5$ дБ)	≈350 МГц
Направленность	6,0 дБ
Микрополосковая антенна с CSRR-ячейками оптимальной конструкции	
Обратные потери	-23,1 дБ
Полоса пропускания ($S_{11} < -5$ дБ)	≈350 МГц
Направленность	9,7 дБ

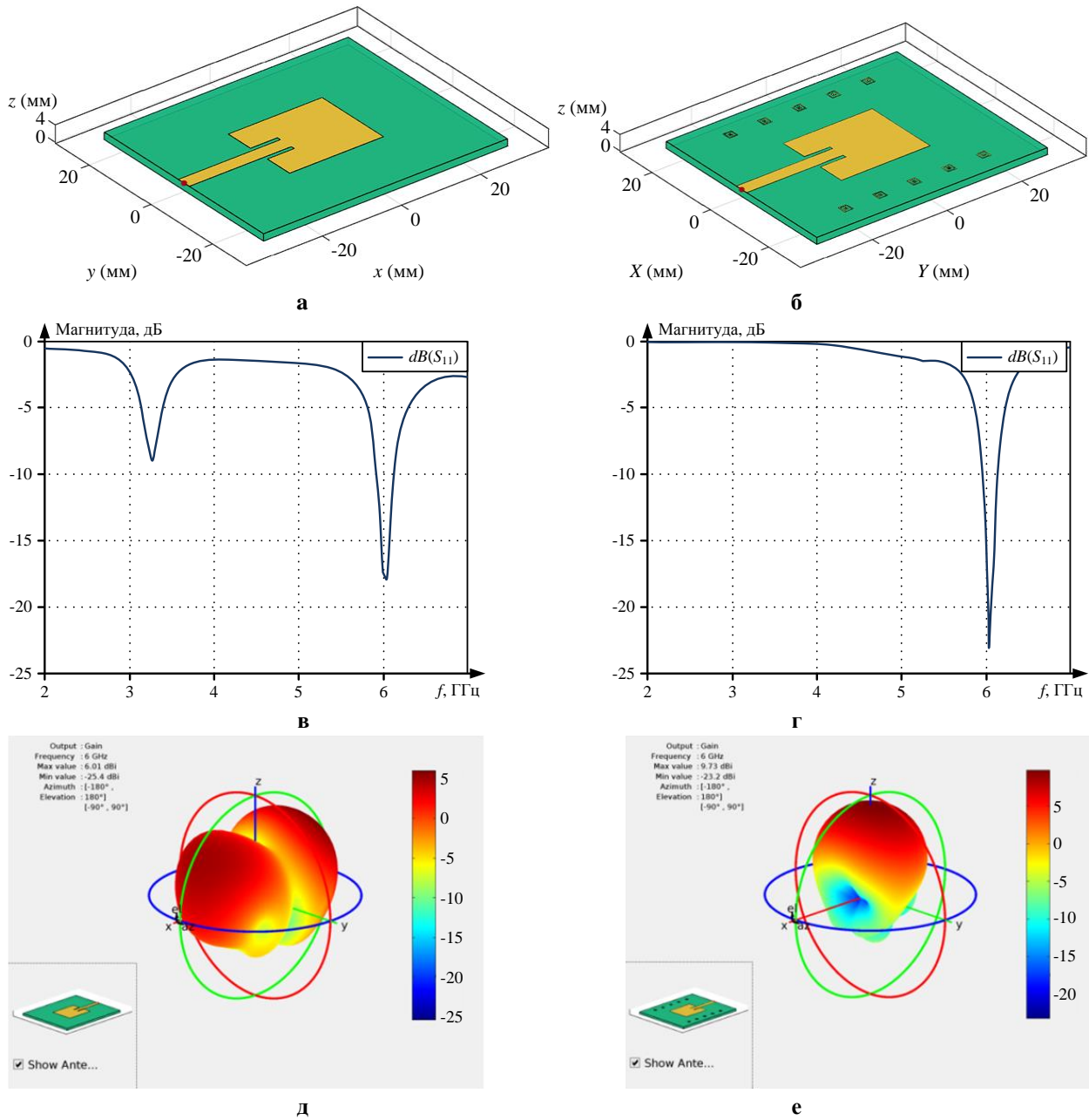


Рис. 8. Электрические характеристики микрополосковой антенны и антенны с CSRR-ячейками: а, б – внешний вид; в, г – кривая обратных потерь S_{11} ; д, е – диаграмма направленности

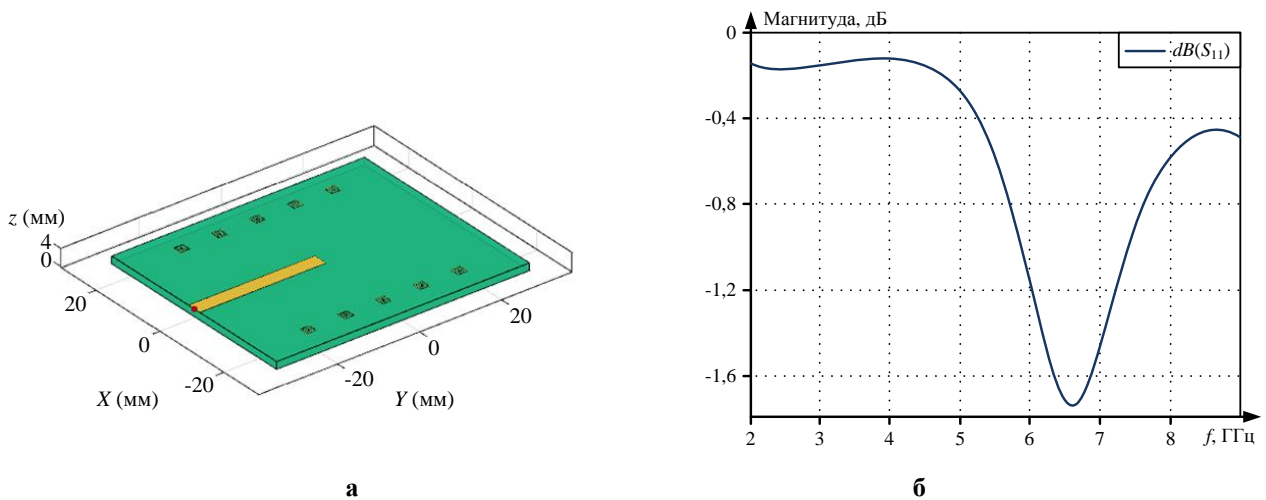


Рис. 9. Внешний вид CSRR-ячейки (а) и кривая обратных потерь (б)

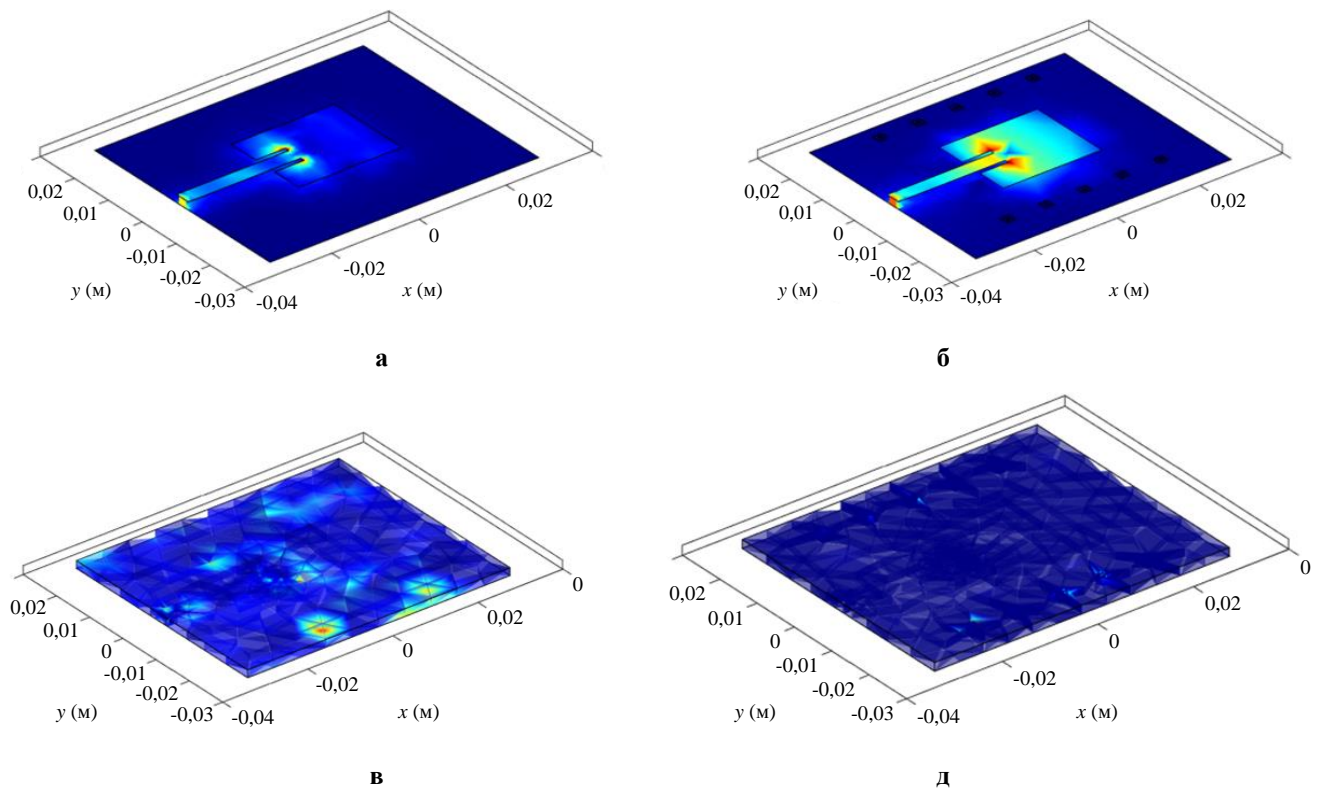


Рис. 10. Распределение тока: а, б – в элементах антенны; в, г – в диэлектрике подложки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, антенны являются одним из самых распространенных видов датчиков в системах геоэкологического мониторинга, позволяя создать «интерфейс» между передатчиком или приемником и исследуемой средой. Конструкции микрополосковых антенн широко описаны в литературе и дают хорошие результаты на практике, но сами по себе они отличаются низкой эффективностью и ограниченной полосой пропускания, поэтому приходится оптимизировать конструкцию, изменяя ее параметры и улучшая технические характеристики для удовлетворения требований ее практического применения. Один из способов добиться этого – применение метаматериалов. Метаматериалы – это материалы с замечательными электрическими характеристиками. Однако особенности ячеек метаматериала и их массива делает аналитическую разработку результирующих уравнений электромагнитного поля очень сложной и нецелесообразной. Традиционно эту проблему решают путем разработки антенны с помощью множества дорогостоящих в вычислительном отношении и трудоемких электромагнитных симуляций. С появлением доступных библиотек обработки данных с помощью глубоких нейронных сетей и их аппаратной поддержки появилась возможность оптимизировать конструкции антенн за счет разработки соответствующих моделей глубокого машинного обучения, что позволяет избежать ручного поиска оптимальной конструкции.

Поэтому в настоящей работе предложен новый способ поиска оптимальной конструкции CSSR-ячеек для микрополосковой антенны, позволяющий целенаправленно оптимизировать параметры ячеек-резонаторов, значительно улучшающие электрические характеристики антенны. Предлагаемый метод объ-

единяет регрессионную модель, использующую глубокую сеть на основе полносвязных нейронных слоев, с поиском на основе алгоритма условной оптимизации COBYLA для нахождения оптимальных конструктивных параметров ячеек-резонаторов. Такой подход полностью автоматизирует процесс создания микрополосковых антенн с ячейками-резонаторами на основе метаматериалов и позволяет находить параметры CSRR-ячеек, обеспечивающие оптимальный режим работы в целом, и дает максимальный уровень излучения антенны при сохранении полосы пропускания. Небольшой размер CSRR-ячеек открывает возможность применения этой своеобразной конфигурации с целью создания компактных и эффективных микрополосковых антенн.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Брякин И.В., Бочкарев В.И. Гибридный метод индукционного зондирования для обнаружения подземных кабельных линий и трубопроводов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 2(43). С. 70-78. doi: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78
2. Enabling Antenna Design with Nano-Magnetic Materials using Machine Learning / A. Gianfagn, M. Swaminathan, P. M. Raj, R. Tummala, G. Antonini // *IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference*. IEEE, 2015. 5 p. doi: 10.1109/NMDC.2015.7439256
3. Suganthi J., Kavitha T., Ravindra V. Survey on metamaterial antennas // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1070. No. 1. 12086. doi: 10.1088/1757-899X/1070/1/012086
4. Optimal design of microwave absorber using novel variational autoencoder from a latent space search strategy / H.-I. On, L. Jeong, M. Jung, D.-J. Kang, J.-H. Park, H.-J. Lee // *Materials & Design*. 2021. Vol. 212. 110266. doi: 10.1016/j.matdes.2021.110266
5. An overview of metamaterials and their achievements in wireless power transfer / K. Sun, R. Fan, X. Zhang,

- Z. Zhang, Z. Shi // Journal of Materials Chemistry. 2018. Vol. 6(12). Pp. 2925-2943. doi: 10.1039/C7TC03384B
6. Perfect metamaterial absorber / N.I. Landy, S. Sajuyigbe, J.J. Mock, D.R. Smith, W.J. Padilla // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 100. 4 p. doi: 10.1103/PhysRevLett.100.207402
 7. In-situ growth of SiC nanowires and carbon nanotubes on 3D printed metamaterial structures to enhance electromagnetic wave absorption / H. Mei, W. Yang, X. Zhao, L. Yao, Y. Yao, C. Chen, L. Cheng // Materials & Design. 2021. Vol. 197. 109271. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109271
 8. Al-Nuaimi M.K., Whittow W.G. Compact microstrip band stop filter using CSRR and CSRR: Design, simulation and results // Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. IEEE, 2010. 5 p.
 9. So S., Rho J. Designing nanophotonic structures using conditional deep convolutional generative adversarial networks // Nanophotonics. 2019. Vol. 8. Pp. 1255-1261. doi: 10.1515/nanoph-2019-0117
 10. Generative Model for the Inverse Design of Metasurfaces / Z. Liu, D. Zhu, S.P. Rodrigues, K.T. Lee, W. Cai // Nano Lett. 2018. Vol. 18. Pp. 6570-6576. doi: 10.1021/acs.nanolett.8b03171
 11. Deep learning for topology optimization of 2D metamaterials / H.T. Kollmann, D.W. Abueidda, S. Koric, E. Guleryuz, N.A. Sobh // Materials & Design. 2020. Vol. 196. 109098. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109098
 12. Balanis C.A. Antenna Theory: Analysis and Design. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2005.
 13. Типикин А. Моделирование антенных устройств в Matlab с использованием пакета расширения Antenna Toolbox. М: Солон-Пресс, 2016. 116 с.
 14. Касимова А.У., Верзунов С.Н. Обзор и анализ современных методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород // Проблемы автоматизации и управления. 2022. № 1(43). С. 33-49.
 15. URL:<http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/11510> (дата обращения: 28.04.2022)
 16. Vaz R. Optimization of microstrip antenna designs: simulation of CSRR metamaterial cells with machine learning: monograph (Graduate) – Electrical Engineering. Federal University of Tocantins, Palmas, 2019.
 17. Simuleon B.V. SIMULIA CST Studio Suite. Pettelaarpark 84 5216 PP's-Hertogenbosch, Netherlands: Electromagnetic Field Software. URL:<https://www.simuleon.com/simulia-cst-studio-suite/> (дата обращения: 28.04.2022).
 18. Sarkar S.B. Design and Analysis of 5.2 GHz Rectangular Microstrip Patch Array Antenna using Split Ring Resonator, 4th International Conference on Signal Processing, Communications and Networking. Chennai, India: IEEE, 2017. doi: 10.1109/ICSCN.2017.8085654
 19. Powell M.J.D. A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation. In: Advances in Optimization and Numerical Analysis. 1994. Pp. 51-67. doi: 10.1007/978-94-015-8330-5_4
 20. Слюсарь В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. 2010. № 3-4. С. 44-60.

Поступила в редакцию 30 мая 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHOD FOR OPTIMIZING DESIGN PARAMETERS OF MICROSTRIP ANTENNA CELL-RESONATORS ON THE BASIS OF INTELLIGENT DATA ANALYSIS

Sergey N. Verzunov

Ph.D. (Engineering), Leading Researcher, Laboratory of Information and Measurement Systems, Machinery researching and Automatics Institute of Kyrgyz Republic National Academy of Sciences, verzunov@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3130-2776>

The designs of microstrip antennas are widely described in the literature and give good results in practice. However, since they are inherently low-efficient and limited in bandwidth, it is often necessary to optimize the design by changing its parameters and improving performance. One way to achieve this is to use metamaterials. However, the features of the metamaterial cells and their array make the analytical development of the electromagnetic field equations very complicated and impractical. Typically, this problem is solved by designing the antenna with many computationally expensive and time-consuming electromagnetic simulations. In this paper, the authors propose a new method for searching the optimal design of resonator cells for a microstrip antenna, which makes it possible to purposefully optimize the parameters of resonator cells, which significantly improve its electrical characteristics. The proposed method combines a regression model using a deep network based on fully connected neural layers with a search based on the COBYLA conditional optimization algorithm to find the optimal design parameters of resonator cells. First, a tensor that defines the parameters of the resonator cells is fed to the input of the neural network, and the network is trained to reduce the difference between the output predicted by the deep neural network and the corresponding electrical parameters of the antenna obtained as a result of a full numerical simulation in the CST MWS program. Next, new parameters of the resonator cells are generated through iterative optimization. This step combines the neural network trained earlier with the optimization algorithm and uses some

search strategy to find optimal CSRR cell parameters. This approach fully automates the process of creating microstrip antennas with resonator cells based on metamaterials and allows you to find the parameters of the cells that provide the optimal operating mode in general and gives the maximum level of antenna radiation while maintaining the bandwidth. In this case, the current is redistributed between the substrate and the antenna patch towards the patch, which explains the obtained improvements in the antenna characteristics.

Keywords: metamaterials, microstrip cell antennas, CSRR cells, deep learning, antenna modeling, optimization, COBYLA, Matlab Antenna Toolbox, CST Microwave Studio

REFERENCES

1. Bryakin, I. V., Bochkarev, I. V. Hybrid method of induction sounding for detection of underground cable lines and pipelines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2019, no. 2(43), pp. 70-78. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78
2. Gianfagn A., Swaminathan M., Raj P.M., Tummala R., Antonini G. Enabling Antenna Design with Nano-Magnetic Materials using Machine Learning. IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference. IEEE, 2015. P. 5. doi: 10.1109/NMDC.2015.7439256
3. Suganthi, T. Kavitha, V. Ravindra Survey on metamaterial antennas. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP, 2021, vol. 1070, no. 1, p. 12086. doi:

- 10.1088/1757-899X/1070/1/012086
4. On H.-I., Jeong L., Jung M., Kang D.-J., Park J.-H., Lee H.-J. Optimal design of microwave absorber using novel variational autoencoder from a latent space search strategy. *Materials & Design*, 2021, vol. 212, p. 110266. doi: 10.1016/j.matdes.2021.110266
 5. Sun K., Fan R., Zhang X., Zhang Z., Shi Z. An overview of metamaterials and their achievements in wireless power transfer. *Journal of Materials Chemistry*, 2018, vol. 6, no. 12, pp. 2925–2943. doi: 10.1039/C7TC03384B
 6. Landy N.I., Sajuyigbe S., Mock J.J., Smith D.R., Padilla W.J. Perfect metamaterial absorber. *Phys. Rev. Lett.* 2008, vol. 100, pp. 1–4. doi: 10.1103/PhysRevLett.100.207402
 7. Mei H., Yang W., Zhao X., Yao L., Yao Y., Chen C., Cheng L. In-situ growth of SiC nanowires and carbon nanotubes on 3D printed metamaterial structures to enhance electromagnetic wave absorption. *Materials & Design*. 2021, vol. 197, p. 109271. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109271
 8. Al-Nuaimi M.K., Whittow W.G. Compact microstrip band stop filter using CSRR and CCSRR: Design, simulation and results. *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. IEEE*, 2010, pp. 1-5.
 9. So S., Rho J., Designing nanophotonic structures using conditional deep convolutional generative adversarial networks. *Nanophotonics*. 2019, vol. 8, pp. 1255–1261. doi: 10.1515/nanoph-2019-0117
 10. Liu Z., Zhu D., Rodrigues S.P., Lee K.T., Cai W. Generative Model for the Inverse Design of Metasurfaces. *Nano Lett.* 2018, vol. 18, pp. 6570–6576. doi: 10.1021/acs.nanolett.8b03171
 11. Kollmann H.T., Abueidda D.W., Koric S., Guleryuz E., Sobh N.A. Deep learning for topology optimization of 2D metamaterials. *Materials & Design*, 2020, vol. 196, p. 109098. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109098
 12. Balanis C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons Inc., 2005.
 13. Tipikin A. *Modelirovaniye antenykh ustroystv v Matlab s ispolzovaniem paketa rasshireniya AntennaToolbox* [Modeling antenna devices in Matlab using the Antenna Toolbox extension package]. Moscow, Solon-Press Publ., 2016, 116 p. (in Russian)
 14. Kasimova A. U., Verzunov S. N. Review and analysis of modern methods for measuring the dielectric permittivity of rocks, *Problemy avtomatiki i upravleniya*. [Automation and control issues], 2022, no. 1, vol. 43, pp. 33–49. (in Russian)
 15. <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/11510> (accessed 28 April 2022) (In Russian)
 16. Vaz R. Optimization of microstrip antenna designs: simulation of CSRR metamaterial cells with machine learning. Monograph (Graduate) – Electrical Engineering, Federal University of Tocantins, Palmas, 2019.
 17. Simuleon B.V. SIMULIA CST Studio Suite. Pettelaarpark 84 5216 PP's-Hertogenbosch, Netherlands: Electromagnetic Field Software. 2021. URL: <https://www.simuleon.com/simulia-cst-studio-suite/> (accessed 2021 September 24)
 18. Sarkar S. B. Design and Analysis of 5.2 GHz Rectangular Microstrip Patch Array Antenna using Split Ring Resonator. 4th International Conference on Signal Processing, Communications and Networking. IEEE, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICSCN.2017.8085654
 19. Powell M.J.D. A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation. *Advances in Optimization and Numerical Analysis*. 1994, pp. 51-67. doi: 10.1007/978-94-015-8330-5_4
 20. Slyusar V. Metamaterials in antenna technology: basic principles and results, *Pervaya Milya*. [Last Mile]. (Supplement to the journal "Electronics: Science, Technology, Business"), 2010, no. 3-4, pp. 44-60. (in Russian)

Верзунов С.Н. Способ оптимизации конструктивных параметров ячеек-резонаторов микрополосковых антенн на основе интеллектуального анализа данных // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 3(56). С. 54-64. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-54-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-54-64)

Verzunov S.N. Method for Optimizing Design Parameters of Microstrip Antenna Cell-resonators on the Basis of Intelligent Data Analysis. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 54-64. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-54-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-54-64)