

09;12

Управляемая отражательная антенная решетка, образованная нагруженными электрическими диполями

© A. Mainwaring, А.Л. Умнов, М.О. Шуралев, А.Ю. Ельцов

Intel Labs Berkeley,
2150 Shattuck Avenue, Penthouse Suite, Berkeley, CA, USA 94704
Нижегородский государственный университет им Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород
E-mail: maxim.shuralev@gmail.com

Поступило в Редакцию 27 сентября 2010 г.

Предложена и экспериментально исследована простая по конструкции и имеющая невысокую стоимость антенна сантиметрового диапазона с управляемой диаграммой направленности, построенная на базе зеркала, образованного нагруженными диполями.

Применение антенн с высоким коэффициентом усиления, направлением излучения и приема которых можно управлять электрически, представляется весьма перспективным для использования в современных беспроводных системах связи, поскольку такие антенные системы дают возможность устанавливать связь требуемого качества даже в тех случаях, когда взаимное положение источника и приемника излучения изменяется с течением времени. Однако несмотря на это, антенны с управляемыми диаграммами направленности до настоящего времени не нашли широкого применения в беспроводных системах связи, доступных на массовом рынке телекоммуникационного оборудования (в сетях WiFi, WiMax, 3G и т.п.). Единичные попытки создания таких коммерческих антенных систем [1] в основном касаются использования антенн с управляемыми диаграммами на стороне базовых станций, случаи использования подобных антенн на стороне клиентов сетей практически неизвестны.

Главной причиной данной ситуации является значительная стоимость подобных устройств, связанная с высокой ценой СВЧ-элементов (фазовращателей, волноводов и т.д.), на которых построено большин-

ство современных антенных систем с управляемыми диаграммами направленности — фазированных антенных решеток.

Решение задач минимизации числа используемых дорогих СВЧ-элементов, уменьшения потерь мощности в волноводах, а также существенного снижения стоимости антенной системы при сохранении преимуществ антенн с электрически управляемой диаграммой направленности, возможно в рамках концепции антенных решеток с пространственным питанием ее элементов — пассивных рассеивателей с управляемыми параметрами [2]. Изменение параметров рассеивателей возможно, например, за счет изменения параметров сосредоточенных нагрузок, включаемых в их конструкцию. Изменение параметров рассеивателей позволяет варьировать фазу и амплитуду переизлучаемых ими полей, что дает возможность формировать нужную диаграмму направленности всей системы рассеивателей. В зависимости от способа формирования диаграммы направленности при отражении первичной волны от массива рассеивателей или при прохождении через него различают отражательные антенные решетки [3,4], линзовые [5] или их комбинации [6].

Характерными особенностями подобных антенн является наличие сильной электродинамической связи между отдельными элементами, их образующими, а также сложный характер связи между параметрами рассеивателя и характеристиками (амплитудой и фазой) переизлученного им поля. Эти особенности затрудняют анализ антенн и требуют создания особых систем управления.

Первые антенны подобного типа были предложены более тридцати лет назад [6], однако не получили широкого распространения из-за отмеченных выше особенностей.

Развитие микроэлектроники, вычислительной техники, а также массовое распространение беспроводных систем связи вызвали новый интерес к антенным системам с управляемыми рассеивателями [2].

В настоящей работе предлагается конструкция антенны на базе системы управляемых рассеивателей, обеспечивающая высокий коэффициент усиления и управляемую диаграмму направленности.

На рис. 1, *a* показана концептуальная схема исследуемой антенны [7,8]. Антенна состоит из зеркала (1), образованного управляемыми рассеивателями (500 штук), и облучателя (2). В качестве управляемых рассеивателей выбраны электрические вибраторы, нагруженные в центре полупроводниковыми диодами, емкость которых может изменяться

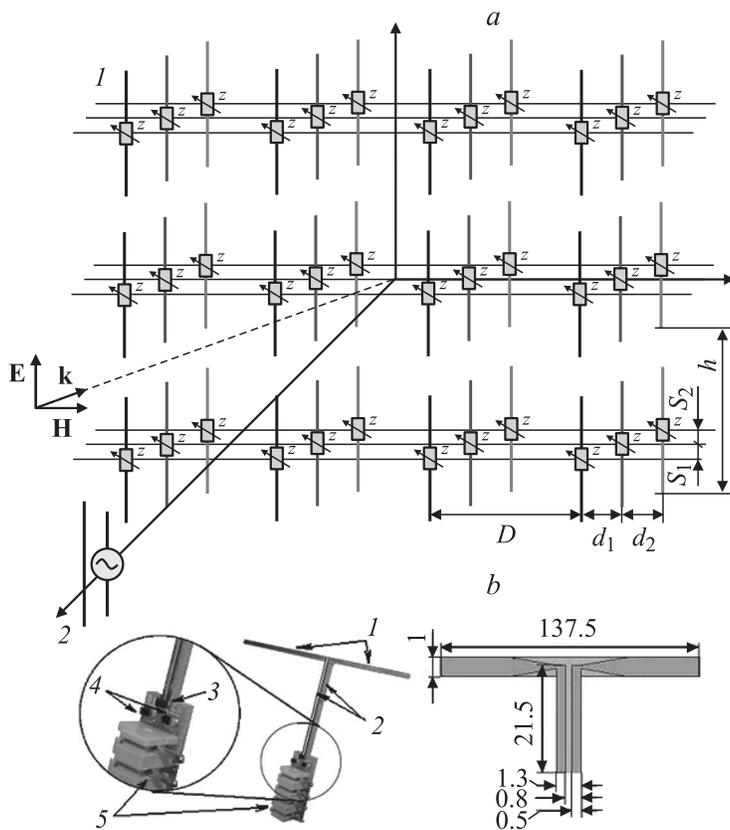


Рис. 1. *a* — концептуальная схема исследуемой антенны; *b* — конструкция и геометрические размеры рассеивателя.

при изменении напряжения смещения. Вариация импеданса нагрузки позволяет настраивать фазу рассеянной вибратором волн. Одновременно с этим изменяется и амплитуда рассеянного поля.

Пояснить принцип работы антенны можно на основе анализа ее работы в режиме приема излучения внешнего источника. Для эффективного приема излучения значения нагрузок рассеивателей должны выбираться таким образом, чтобы фазы вторичных волн, создаваемых

рассеивателем, обеспечивали оптимальное сложение этих волн в точке расположения облучателя. Необходимые значения импедансов нагрузок зависят от направления прихода волны, падающей на зеркало. Возможность изменения значений импедансов должна позволять эффективно принимать излучение с различных направлений.

К сожалению, при вариации импеданса нагрузки одновременно с изменением фазы тока изменяется и его амплитуда, что не позволяет использовать рассеиватель для создания вторичного излучения с произвольной фазой. Для достижения перестройки фазы в полном диапазоне приходится использовать комбинацию из нескольких слоев рассеивателей (на рис. 1, *a* показана трехслойная структура). При этом распространение возбуждающей и рассеянной волн между слоями обеспечивает необходимый постоянный сдвиг по фазе, который суммируется с фазовым сдвигом, обеспечиваемым вариацией импеданса нагрузки. Рассеиватели, образующие зеркало, не являются независимыми, между ними существует сильная электродинамическая связь. Поэтому рассеивающие свойства каждого элемента зеркала определяются не только значением нагрузки данного элемента, но и значениями нагрузок окружающих рассеивателей.

Конструкция и геометрические размеры рассеивателя (в миллиметрах), использованного в экспериментальной модели антенны, показаны на рис. 1, *b*. Рассеиватель представляет собой одностороннюю печатную плату и образован плечами диполя (1), трансформатором импеданса — длинной линией (2), варикапом (3), подключенным к длинной линии, шунтирующими дросселями (4), отделяющими ВЧ-часть рассеивателя от управляющих линий (5), по которым к варикапу прикладывается напряжение смещения, а также контактного блока, с помощью которого управляющие линии подключаются к системе управления антенной. Длинная линия (трансформатор импеданса) введена в конструкцию для расширения диапазона изменения импеданса нагрузки на входе диполя. Расстояния между рассеивателями в зеркале (рис. 1, *a*): $D = 3$ см, $d_1 = d_2 = 1$ см, $s_1 = s_2 = 27$ мм, $h = 15$ см.

Геометрические параметры рассеивателя и расстояния между рассеивателями в зеркале выбирались на основе данных численного моделирования, выполненных в программной среде HFSS. При этом считалось, что параметры материала, из которого изготовлен рассеиватель, совпадают с параметрами фольгированного текстолита FR4. Толщина диэлектрической подложки и толщина металла составляют 1.5

и 0.05 mm соответственно, значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь текстолита 4.9 и 0.03 соответственно.

Роль управляемой нагрузки рассеивателя выполнял варикап MA4ST1240 ODS1279 со следующими параметрами, заявленными производителем: при изменении напряжения смещения в пределах от 0 до 12 V емкость варикапа изменяется от 13 до 1.1 pF, а активное сопротивление изменяется от 1.2 до 1.1Ω. В качестве индуктивностей, через которые к рассеивателю подключалась линия управления, были выбраны дроссели ILC0603-68 pH.

Эксперименты по измерению параметров описанной антенны проводились в безэховой антенной камере. Настройка антенны (определение значений напряжений смещения на всех диодах, включенных в рассеиватели, для всех углов прихода волны) производилась в автоматическом режиме с использованием алгоритмов многомерной оптимизации по максимуму принимаемого сигнала.

На рис. 2, а представлены полученные в ходе экспериментов диаграммы направленности антенны при настройке ее в различных азимутальных направлениях, на графике экспериментальные значения — сплошная линия, теоретическое спадание коэффициента усиления по косинусоиду (из-за уменьшения эффективной площади сечения антенны) — пунктирная линия.

В диапазоне частот 2.4 GHz максимальный коэффициент усиления антенны составляет 21.5 dBi, сканирование главного лепестка диаграммы осуществляется в горизонтальной и вертикальной плоскостях ($\pm 60^\circ / \pm 15^\circ$) соответственно при общих размерах антенны $100 \times 60 \times 30$ см.

Графики, характеризующие широкополосность антенны, представлены на рис. 2, б, где сплошная линия — коэффициент усиления антенны (G), настроенной на частоте 2.415 GHz в направлении угла места 0° , азимута 0° . Ширина полосы (по уровню -1 dB) составляет 47 MHz, что соответствует четырем частотным каналам WiFi систем связи. Пунктирная линия — коэффициент усиления антенны (G), настроенный на частоте 2.415 GHz в направлении угла места 0° , азимута 30° . Ширина полосы составляет 45 MHz, что также соответствует четырем частотным каналам WiFi систем связи. Максимальное падение коэффициента усиления, наблюдаемое в пределах всей полосы WiFi 2.38–2.48 GHz, составляет для направления $0^\circ/0^\circ$ — 3.5 dB, для направления $0^\circ/30^\circ$ — 4.5 dB.

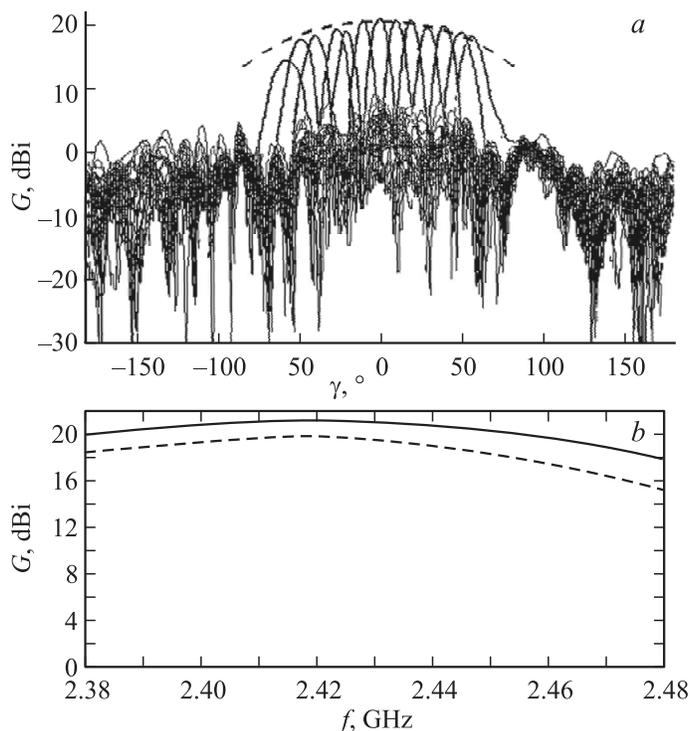


Рис. 2. *a* — диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости; *b* — зависимость коэффициента усиления антенны от частоты.

Полевые испытания антенной системы проводились путем установления беспроводной связи между точками, расположенными внутри города Нижнего Новгорода на крышах и верхних этажах офисных и жилых зданий, а также установлением связи между несколькими точками на расстоянии до 7 км в двух городах, разделенных рекой.

Схема каналов связи через реку представлена на рис. 3. Эксперимент состоял в настройке диаграммы направленности антенны (1) на источник сигнала (2, 3 или 4) с последующей установкой связи по протоколу IEEE 802.11b (WiFi) и измерением максимальной скорости передачи данных по этому протоколу с использованием исследуемой

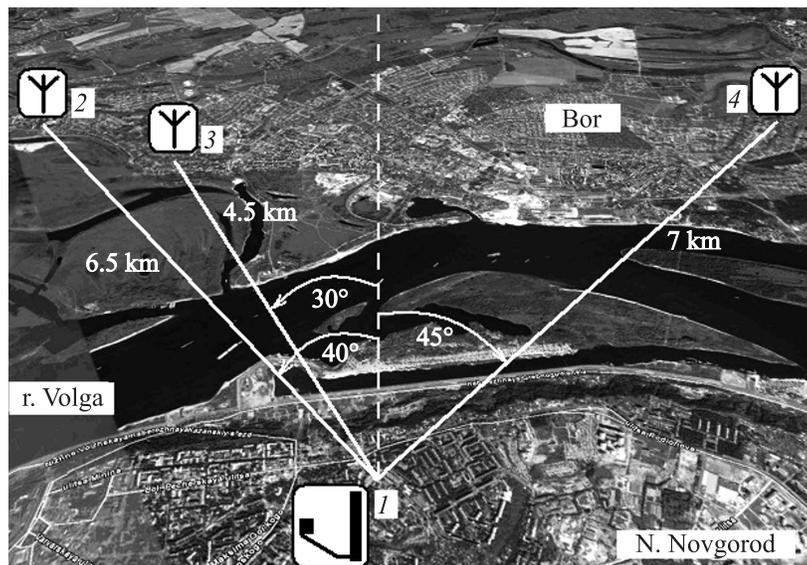


Рис. 3. Схема каналов связи через реку.

антенны. Для измерения пропускной способности канала связи антенны подключались к устройствам беспроводной связи Gateworks Avila Network Processing System (GW2348-4) с сетевыми адаптерами 600 mW Ubiquity XR2 802.11bg. Копирование по протоколу TCP/IP из точки 1 (офисное здание) в точки 2 (роддом), 3 (школа) и 4 (частный дом) случайно сгенерированного файла объемом 10 Mb и контроль времени для различных частотных каналов позволили оценить производительность системы. Пропускная способность составила от 6.17 до 7.53 Mbps ($6.85 \text{ Mbps} \pm 10\%$).

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована возможность создания антенны с высоким коэффициентом усиления и управляемой диаграммой направленности на основе зеркала, образованного дипольными рассеивателями с изменяемыми параметрами. Простота конструкции антенны и минимизация числа СВЧ-элементов позволяют ожидать, что антенны подобного типа могут быть эффективно использованы в массовых системах современной беспроводной связи.

Список литературы

- [1] Casas E., Tong Chia, da Silva M., Hujun Yin, Yang-Seok Choi // Proceedings of IEEE 58th Vehicular Technology Conference. 6–9 Oct. 2003, Spokane, WA, USA. V. 5. P. 3141.
- [2] Thiel D.V., Smith S. Switched Parasitic Antennas for Cellular Communications. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., 2002. 254 p.
- [3] Huang J., Encinar J.A. Reflectarray Antennas. Wiley Interscience — IEEE Press, 2007. 216 p.
- [4] Parnes M.D., Vendik O.G., Korolkov V.D. // PIERS Online. 2006. V. 2. N 2. P. 130.
- [5] Авдеев С.М., Бей Н.А., Морозов А.Н. Линзовые антенны с электрически управляемыми диаграммами направленности. М.: Радио и связь, 1987. 126 с.
- [6] Harrington R.F., Mautz J.R. Reactively loaded directive arrays. Office of Naval Research and Syracuse University, 1974.
- [7] Умнов А.Л., Шуралев М.О. // Труды Научной конференции по радиофизике. 5 мая 2006 г. Нижний Новгород: ННГУ, 2006. С. 83.
- [8] Filimonov V., Mainwaring A., Shishalov I. et al. // Proceedings of IEEE Sarnoff Symposium. April 30–May 2 2007. Nassau Inn, Princeton, NJ. P. 1.