МАХМУД А. АБДАЛЛА (MAHMOUD A. ABDALLA), Военно-технический колледж, Египет; Университет Ватерлоо, Канада
САМИР КУМАР ШАРМА (SAMEER KUMAR SHARMA), студент, член IEEE
ЖИРУН ХУ (ZHIRUN HU), Школа электротехники, Манчестерский университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИНИАТЮРНЫХ АНТЕНН

Использование линий передачи и резонаторов со ступенчатым изменением полного сопротивления (stepped impedance resonator, SIR) на недорогих композитных право-и левосторонних метаматериалах (Composite Right-/left-Handed Transmission Line, CRLH-TL) позволяет создавать высокоизбирательные одно- и двухдиапазонные антенны, физические размеры которых значительно меньше, чем у стандартных печатных антенн.

ВВЕДЕНИЕ

Практическое использование таких схемных СВЧ-структур как резонаторы со ступенчатым изменением полного сопротивления (SIR) и линий передачи (Transmission Lines, TL) разной формы обеспечивает реализацию высокоселективных одно- и двухдиапазонных антенн очень малых размеров. Анализ конструкций этих антенн на основе SIR-резонаторов и линий передачи на композитных право-и левосторонних (CRLH) метаматериалах показывает, как использовать одну антенну в нескольких разнесенных полосах рабочей частоты, а также уменьшить размеры антенн с четверть- и полуволновой конфигурацией.

Чтобы продемонстрировать предлагаемый подход, авторы настоящей статьи разработали четверть- и полуволновые антенны с одинаковой центральной рабочей частотой 4,5 ГГц и шириной пропускания по импедансу ($|S_{11}| \leq 10$ дБ) равной 500 МГц. Кроме того, у полуволновой антенны кроме указанной частоты была вторая полоса с центральной частотой 1,8 ГГц. Для корректного сравнения двух конфигураций размер обеих антенн был выбран одинаковым — 26×21,3 мм^2.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

В последние годы у разработчиков, проектирующих ВЧ- и СВЧ- устройства, а также у исследователей, работающих в этой области, большой интерес вызывают метаматериалы. В общем понимании — это специальные композитные материалы или системы, свойства которых обусловлены не столько свойствами составляющих элементов, но и искусственно созданной периодической структурой. Метаматериалы характеризуются отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостями [1, 2].

Для эффективного уменьшения физических и электрических размеров, а также для увеличения числа рабочих полос частот использовались в несимметричных вибраторных антеннах [3–6] такие метаматериалы как расщепленные кольцевые резонаторы (split-ring resonator, SRR) и комплементарные SRR-резонаторы (complementary split-ring resonator, CSRR). Линия передачи (TL) была реализована с использованием нерезонансных и широкополосных метаматериалов. Она периодически нагружалась последовательными конденсаторами и шунтирующими индуктивностями вместе со стандартными TL-элементами. Такая структура в [7, 8] называется линией передачи на композитных право-и левосторонних (CRLH-TL) метаматериалах. Она характеризуется нарастающим сдвигом фазы, который полностью контролируется с помощью нагрузки или паразитных элементов при нелинейной частотной зависимости. Оба этих метода можно эффективно применять для настройки произвольных полос рабочей частоты антенны.

В нескольких компактных одно-, двух- и многодиапазонных антенных конструкциях, представленных в технической литературе, применяются стандартные варианты линий CRLH-TL [9–15], модифицированные версии CRLH-TL [16–18] и их нагрузка несимметричными вибраторными или дипольными антенными структурами с CRLH-ячейками [19–21]. Очень компактные антенны нашли применение в приложениях с использованием технологии MIMO (multiple-input, multiple-output — многоканальный вход — многоканальный выход) [22, 23]. Однако при создании СВЧ-оборудования все еще востребована разработка небольших антенн с простыми и независимыми этапами проектирования. До сих пор она недостаточно полно и должным образом представлена в литературе.

ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННОГО РЕЗОНАНСА

Характеристики многих антенн разных типов в значительной мере зависят от резонаторов или, вообще говоря, от конкретной формы проявления резонанса. Резонансные эффекты в антеннах используются по-разному: например, для формирования основной рабочей частоты или полосы рабочих частот антенны, или для ее изоляции от тех или иных полос частот. Независимо от способа проектирования антенн большинство разработчиков сталкивается с общей проблемой, которая обусловлена наличием ложных резонансных частот, являющихся следствием использования разных режимов работы антенны, а также самой природы резонансов каждой конкретной антенны.

Наиболее простым решением в таких случаях в зависимости от того,

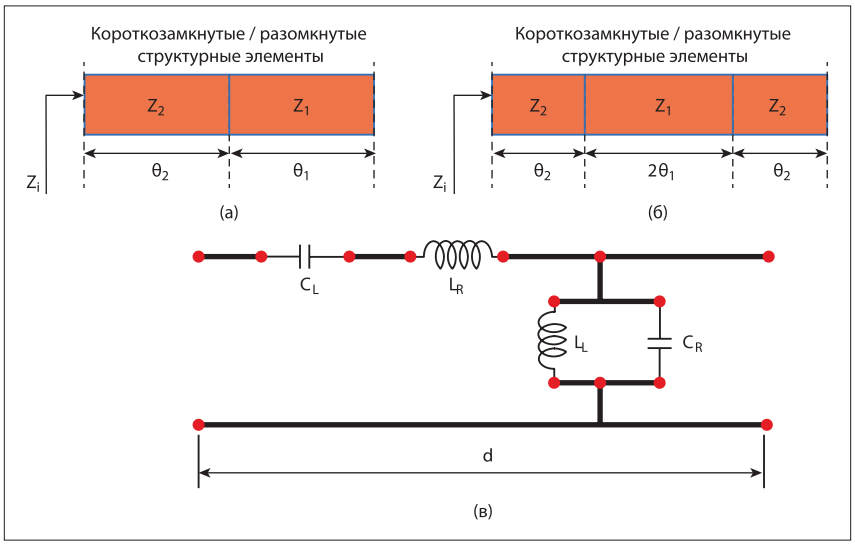


Рис. 1. Четвертьволновая (а) и полуволновая SIR-антенны (б), а также эквивалентная схема CRLH-ячейки (в)

передается или принимается сигнал, является установка фильтров до или после блока антенны [24]. Однако в результате существенно увеличивается общий размер структуры. В качестве другого решения можно задействовать SIR-резонаторы, которые блокируют ложные полосы и обеспечивают лучшую изоляцию. В [25–29] описывается применение SIR-фильтров на основе CRLH. В [30–34] предложены способы проектирования антенн для высокочувствительной аппаратуры с использованием этих структур на основе метаматериалов.

Чтобы доказать эффективность использования метаматериалов в конструкции антенн, в частности, в SIR-резонаторах и линиях передачи CRLH, была исследована возможность применения в качестве основного элемента антенны четверть- и полуволновых короткозамкнутых линий передачи SIR-TL на основе метаматериалов. У четвертьволновой антенны был одиночный резонанс на частоте 4,5 ГГц, а у полуволновой антенны — основной резонанс на частоте 4,5 ГГц, а также дополнительная узкая полоса частот с резонансом 1,8 ГГц при тех же размерах и с более резко выраженным внеполосным затуханием.

Обе антенны были выполнены на подложке из недорого материала — стеклотекстолита марки FR-4 с относительной диэлектрической проницаемостью 4,3, толщиной 1,6 мм и тангенсом угла диэлектрических потерь tgδ = 0,02. Для формирования круговой диаграммы направленности предложенные SIR-антенны на метаматериалах были разработаны в конфигурациях питания с помощью копланарного волновода. Для симуляции использовалось ПО для компьютерного моделирования Microwave Studio от компании CST.

Структура SIR реализуется путем каскадирования линий передачи с разными характеристическими импедансами и электрической длиной. Схема для четвертьволнового и полуволнового SIR-резонаторов показана на рис. 1а и 1б, соответственно. На ней Z_i обозначает характеристический импеданс, а θ_i — электрическую длину каждой линии передачи. Резонаторы могут использоваться в разомкнутой или короткозамкнутой конфигурации. Для обеспечения минимального или максимального импеданса в нашем распоряжении имеются четыре конфигурации.

Во всех конфигурациях при использовании этих структур в качестве антенн необходимо обеспечить нулевую входную проводимость ($Y_i = 0$).

Для короткозамкнутой четвертьволновой SIR-антенны входной импеданс определяется как (1):

$$Z_{in}Q = (jZ_2)\,[(Z_2 tg(\theta_2) + Z_1/tg(\theta_1))/(Z_2 - Z_1 tg(\theta_2)/tg(\theta_1))]. \quad (1)$$

Входной импеданс короткозамкнутого полуволнового SIR-резонатора на основе метаматериала CRLH рассчитывается с помощью уравнения (2):

$$Z_{in}H = Z_2\,(j\,[Z_2 tg(\theta_2) + Z_1 tg(2\theta_1)] + jZ_2 tg(\theta_2)\,[Z_1 - Z_2 tg(2\theta_1) tg(\theta_2)]/Z_2\,[Z_1 - Z_2 tg(2\theta_1) tg(\theta_2)] - Z_1 tg(\theta_2)\,[Z_2 tg(\theta_2) + Z_1 tg(2\theta_1)]). \quad (2)$$

Условие резонанса для четвертьволновых и полуволновых короткозамкнутых SIR-антенн обеспечивается, если входной импеданс бесконечен, т. е. при нулевой входной проводимости, как видно из (3) и (4):

$$Z_2 = Z_1 tg(\theta_2)/tg(\theta_1), \quad (3)$$

$$Z_2\,[Z_1 - Z_2 tg(2\theta_1) tg(\theta_2)] = Z_1 tg(\theta_2) \cdot [Z_2 tg(\theta_2) + Z_1 tg(2\theta_1)]. \quad (4)$$

При проектировании SIR-резонатора с помощью проводников CRLH-TL используются параметры, определяемые уравнениями (5) и (6):

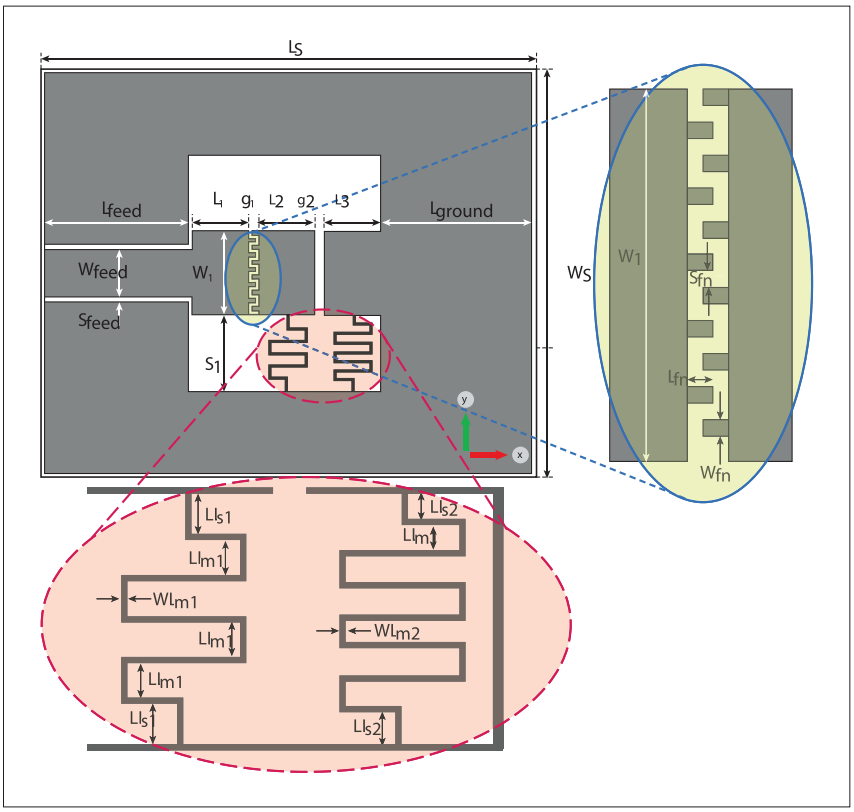
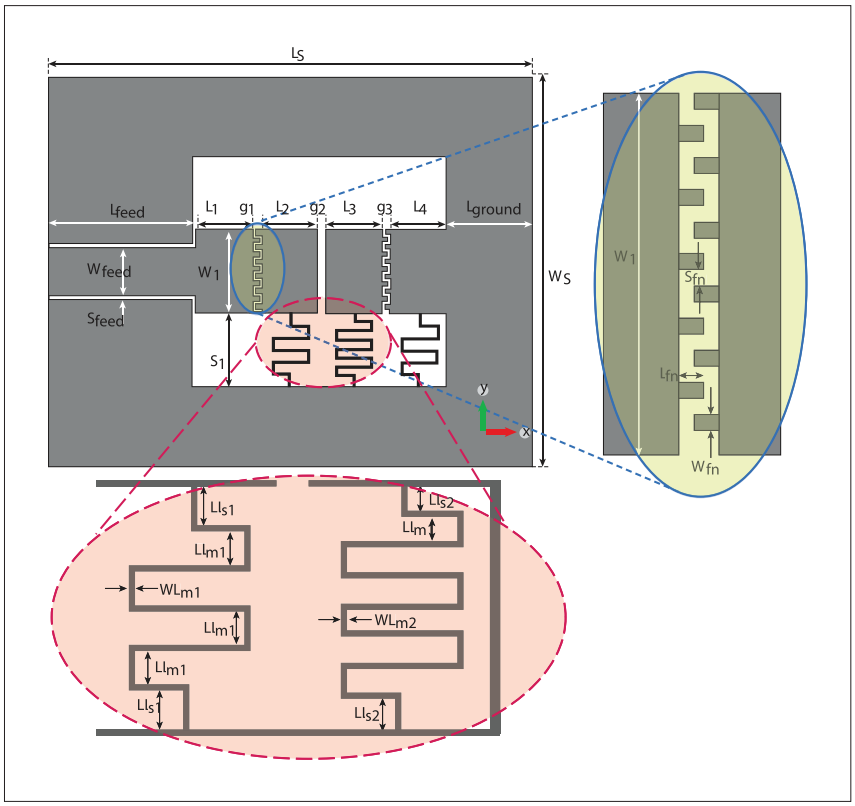


Рис. 2. Двумерное изображение короткозамкнутой четвертьволновой CRLH SIR-антенны с питанием через копланарный волновод. Размеры физических элементов антенны: L_s = 26 мм; W_s = 21,3 мм; $L_1 = L_2 = L_3 = L_4$ = 3 мм; $g_1 = g_2 = g_3$ = 0,5 мм; L_{feed} = 7,7 мм, W_{feed} = 2,5 мм; S_{feed} = 0,2 мм; S_1 = 4 мм; W_1 = 4,6 мм; L_{ground} = 8,1 мм; L_{L1} = 0,4 мм; L_{Lm1} = 4 мм; L_{L2}=0,65 мм; L_{Lm2} = 0,55 мм; $W_{Lm1} = W_{Lm2}$ = 0,1 мм



▲ **Рис. 3.** Двумерное изображение короткозамкнутой четвертьволновой (λ/4) CRLH SIR-антенны с питанием через копланарный волновод. Размеры физических элементов антенны: $L_s = 26$ мм; $W_s = 21{,}3$ мм; $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 3$ мм; $g_1 = g_2 = g_3 = 0{,}5$ мм; $L_{feed} = 7{,}7$ мм, $W_{feed} = 2{,}5$ мм; $S_{feed} = 0{,}2$ мм; $S_1 = 4$ мм; $W_1 = 4{,}6$ мм; $L_{ground} = 4{,}6$ мм; $L_{L1} = 0{,}4$ мм; $L_{Lm2} = 0{,}5$ мм; $L_{L2} = 0{,}65$ мм; $L_{Lm2} = 0{,}55$ мм; $W_{Lm1} = W_{Lm2} = 0{,}1$ мм

$$Z_i = \{[LLi\,(\omega^2 L_{Ri} C_{Li} - 1)]/ [C_{Li}\,(\omega^2 L_{Li} L_{Ri} - 1)]\}^{0,5} \quad (5)$$

$$\theta_i = \omega\,(L_{Ri} C_{Ri})^{0,5}\,\{[1-1/(\omega^2 C_{Li} L_{Ri})]\cdot [1-1/(\omega^2 C_{Ri} L_{Li})]\}^{0,5} \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) с подстановкой (3) и (4) подтверждают, что условия резонанса для полуволнового решения по сравнению с четвертьволновым предоставляют разработчикам большую гибкость. Таким образом, большее количество полос и высокоселективных антенн реализуется именно с помощью полуволновой CRLH SIR-антенны с короткозамкнутой нагрузкой.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СДВОЕННЫХ СТРУКТУР

Все приведенные выше предварительные соображения можно подтвердить путем сравнения поведения двух CRLH SIR-антенн — четвертьволновой и полуволновой, соответственно. На рис. 2 показана плоская двумерная топология четвертьволновой антенны. Она формируется двумя каскадными CRLH-ячейками, включенными после эквивалентной схемы (рис. 1в). Первая ячейка создана с использованием 11-элементного конденсатора со встречно-гребенчатой структурой и катушки индуктивности с малой собственной индуктивностью. Вторая ячейка построена с помощью последовательного щелевого конденсатора и катушки индуктивности в виде меандровой линии с небольшой собственной индуктивностью. На рис. 2 приведены физические размеры всех составляющих элементов антенны. Как видно, габаритные размеры такой антенны составляют всего 26,0×21,3 мм, т. е. лишь около 30% размера обычной патч-антенны.

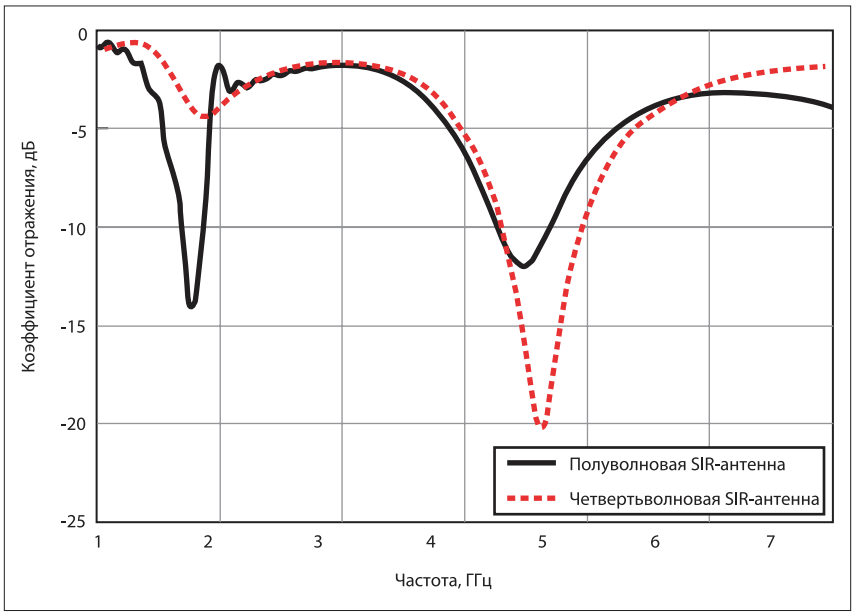
Для построения резонатора в полуволновой конфигурации (рис. 1б) четвертьволновая компоновка была модифицирована. Модифицированная структура показана на рис. 3.

Видно, что эта антенна состоит из трех каскадов линий CRLH-TL. Первый и третий каскад являются идентичными, а средний несколько от них отличается. Первая и третья линии передачи построены с использованием конденсатора со встречно-гребенчатой структурой и катушки индуктивности в виде меандровой линии с небольшой собственной индуктивностью. Средняя линия реализована с использованием конденсатора с воздушным зазором.

Это значит, что у внешних проводников — более высокие значения C_L и меньшие значения L_L, что обеспечивает меньший характеристический импеданс и почти эквивалентную электрическую длину, которую можно рассчитать с помощью уравнений (5) и (6). Аналогично, при короткозамкнутой нагрузке антенна имеет линию запитки с волновым сопротивлением 50 Ом и короткозамкнутым подключением. На рис. 2 представлена дополнительная информация о физических размерах для компонентов антенн.

Полученные путем симуляции коэффициенты отражения четвертьволновой и полуволновой SIR-антенн показаны на рис. 4. Хорошо видно, что у четвертьволновой антенны с единственным резонансом на частоте 4,6 ГГц коэффициент отражения равен –20 дБ с шириной полосы по импедансу ($|S_{11}| \le 10$ дБ) равной 0,6 ГГц (от 4,4 до 5 ГГц).

В отличие от четвертьволнового варианта, полуволновая CRLH SIR-антенна имеет два ярко выраженных резонанса на частотах 1,8 и 4,5 ГГц, соответствен-



▲ **Рис. 4.** Результаты компьютерной симуляции коэффициентов отражения для четвертьволновой и полуволновой SIR-антенн

но. На обеих частотах коэффициент отражения приближается к –15 дБ. Однако ее первая рабочая полоса с резонансом на частоте 1,8 ГГц очень узкая, с крутыми спадами (из-за более высокой добротности), тогда как вторая полоса имеет сравнительно более плоскую крутизну внеполосного затухания. При этом предлагаемая конструкция антенны в полуволновой конфигурации составляет всего 5% и 29% от размера двух отдельных обычных патч-антенн, используемых как самостоятельные элементы на частотах 1,8 и 4,5 ГГц по отдельности.

ИЗЛУЧЕНИЕ И ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ

Излучающие свойства CRLH SIR-антенны в четвертьволновом варианте были изучены путем компьютерного моделирования ее трехмерной (3D) диаграммы направленности и оценки усиления на частоте 4,6 ГГц (рис. 5). Видно, что четвертьволновая SIR-антенна имеет типичную круговую диаграмму направленности с фактическим усилением 2,169 дБ и хорошей эффективностью излучения 77,5%. Как и следовало ожидать, максимальная направленность излучения наблюдается вдоль координаты Z (широкая сторона антенны), а в направлении C (направление запитки) излучение нулевое.

Полученные трехмерные диаграммы направленности полуволнового варианта CRLH SIR-антенны для двух резонансных частот (1,8 и 4,6 ГГц, соответственно) приведены на рис. 6а и 6б. Эта конструкция антенны обладает одинаково хорошими характеристиками направленности на обеих частотах аналогично той, что имеется у четвертьволновой антенны на ее одной резонансной частоте. Максимальная направленность также круговая; наибольший уровень излучения — в Z-направлении. У антенны — разная эффективность излучения на двух частотах: 72% на частоте 4,5 ГГц и 1% — на частоте 1,8 ГГц. Малый КПД на более низкой рабочей частоте (1,8 ГГц) можно объяснить небольшим физическим размером антенны на этой длине волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Миниатюрные антенны можно построить с помощью технологии CRLH SIR, что было показано на примере двух антенн с разными конфигурациями. Полуволновая и четвертьволновая CRLH SIR-антенны гораздо меньше стандартных антенн, выполненных на печатной плате. Предложенная конструкция позволяет создать полуволновую антенну размером, который составляет всего 5% от размера обычной патч-антенны.

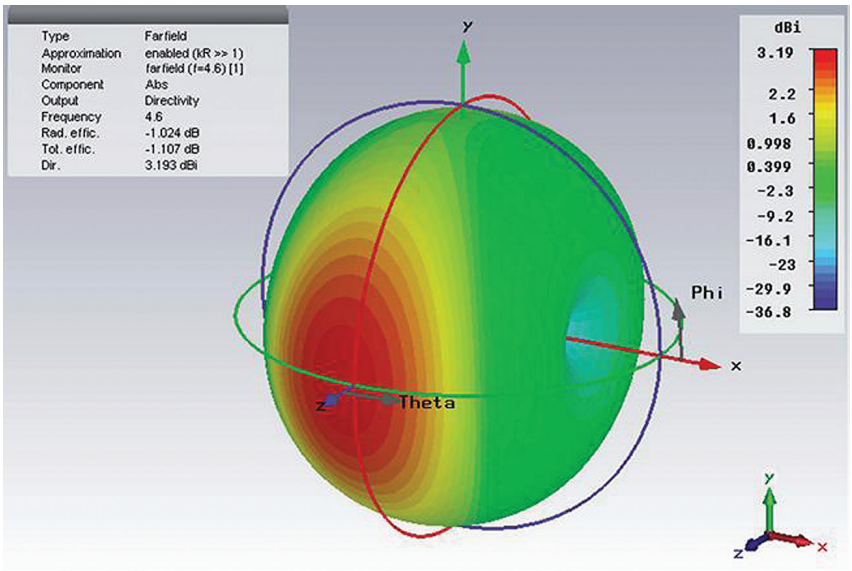


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования трехмерной диаграммы направленности четвертьволновой антенны и оценки ее усиления на частоте 4,6 ГГц

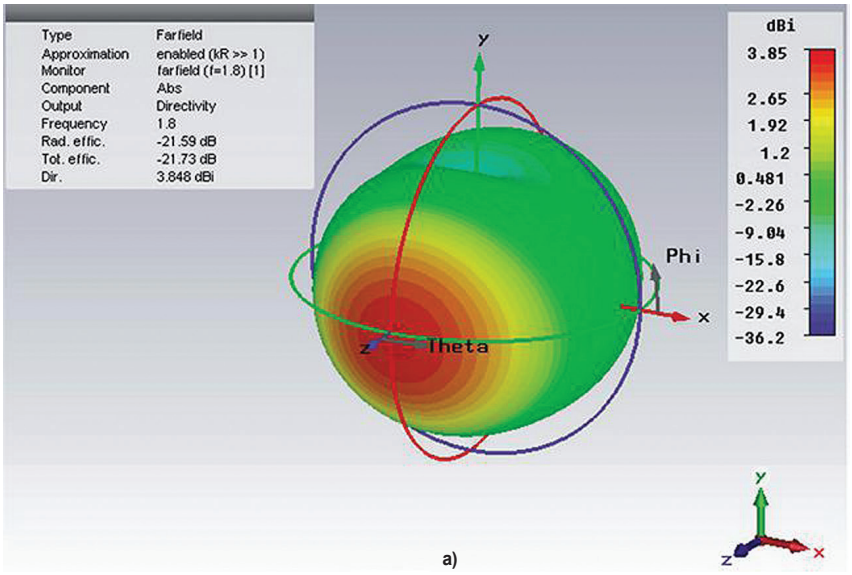


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования трехмерной диаграммы направленности полуволновой антенны и оценки ее усиления на частотах 1,8 ГГц (а) и 4,5 ГГц (б)

ЛИТЕРАТУРА

1. Nader Engheta, Richard W. Ziolkowski. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations.//Wiley, New York. 2006.

2. Ricardo Marques, Ferran Martin, Mario Sorolla. Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design, and Microwave Applications.//Wiley, New York. 2011.

3. Meng Li, Xian Qi Lin, Jessie Yao Chin, Ruopeng Liu, Tie Jun Cui. A Novel Miniaturized Printed Planar Antenna Using Split-Ring Resonator.//IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol. 7. 2008.

4. Li-Ming Si, Weiren Zhu, Hou-Jun Sun. A Compact, Planar, and CPW-Fed Metamaterial-Inspired Dual-Band Antenna.//IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol. 12. 2013.

5. S. K. Sharma, R. K. Chaudhary. Dual-band Metamaterial-inspired Antenna for Mobile Applications.//Microwave and Optical Technology Letters. Vol. 57, № 6. 2015.

6. Walaa Wahba, Mahmoud Abdalla, Ahmed Mohamed, Abdelmegeed Allam. A Uni-Planar Microstrip CSRR metamaterial Antenna.//2014 IEEEAP-S Internationa l Antenna and Propagation Symposium Digest, Memphis, TN. 2014.

7. C. Caloz, T. Itoh. Electromagnetic Metamaterials Transmission Line Theory and Microwave Applications.//Wiley, Paramus, NJ. 2006.

8. G. V. Eleftheriades, K. G. Balmain. Negative Refractive Metamaterials.//Wiley, Paramus, NJ. 2005.

9. Cheng-Jung Lee, Wei Huang, A. Gummalla, M. Achour. Small Antennas based on CRLH Structures: Concept, Design, and Applications.//IEEE Antennas and Propagation Magazine. Vol. 53, № 2. 2011.

10. R. W. Ziolkowski, P. Jin, C. Lin. Metamaterial-Inspired Engineering of Antennas.//IEEE Proceedings. Vol. 99, № 10. 2011.

11. M. Abdalla, Z. Hu. Compact and Tunable Metamaterial Antenna for Multi-band Wireless Communication applications.//IEEE AP-S International Antenna and Propagation Symposium Digest. 2011.

12. S. K. Sharma, R. K. Chaudhary. A Compact Zeroth-order Resonating Wideband Antenna with Dual-band Characteristics.//IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol. 14. 2015.

13. Mahmoud A. Abdalla, Walaa W. Wahba, Abdelmegid M. Allam. Asymmetric dual-band integrated compact CRLH SIW array antenna.//Journal of Electromagnetic Waves and Applications. Vol. 31, № 3. 2017.

14. Li, Long, Zhen Jia, Feifei Huo, Weiqiang Han. A novel compact multiband antenna employing dualband CRLH-TL for smart mobile phone application.//IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol. 12. 2013.

15. Jeong Keun Ji, Gi Ho Kim, Won Mo Seong. Bandwidth enhancement of metamaterial antennas based on composite right/left-handed transmission line.//IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol. 9. 2010.

16. Mahmoud A. Abdalla, Mohamed I. Abdelnaser. A Compact Dual Band D-CRLH Antenna with Radiation Pattern Directional Characteristics.//IEEE AP-S International Antenna and Propagation Symposium Digest. 2016.

17. Mohammad Bemani, Saeid Nikmehr, Mahdi Fozi. A Dual-Band Feed Network for Series-Fed Antenna Arrays Using Extended Composite Right/Left-Handed Transmission Lines.//IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 65, № 1. 2017.

18. M. A. Abdalla, Z. Hu. A Compact Dual Band Meta-material Antenna for Wireless Applications.//Loughborough Antennas & Propagation Conference, Loughborough. 2012.

19. J. Zhu, G. V. Eleftheriades. Dual-band metamaterial-inspired small monopole antenna for WiFi applications.//Electronics Letters. Vol. 45, № 22. 2009.

20. M. A. Abdalla, U. Abdelnaby, A. A. Mitkees. Compact and Triple Band Meta-material Antenna for All WiMAX Applications.//International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). 2012.

21. S. Jamilan, M. A. Antoniades, J. Nourinia, M. N. Azarmanesh. A compact multiband printed dipole antenna loaded with two unequal parallel NRI-TL metamaterial unit cells.//IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 63, № 9. 2015.

22. Ahmed A. Ibrahim, Mahmoud A. Abdalla. CRLH MIMO Antenna with Reversal Configuration.//AEÜ-International Journal of Electronics and Communications. Vol. 70, № 7. 2016.

23. Mahmoud A. Abdalla, Ahmed A. Ibrahim. Design and Performance Evaluation of Metamaterial Inspired MIMO Antennas for Wireless Applications.//Wireless Personal Communication. 2016.

24. C. A. Balanis. Antenna Theory and Design.//Wiley, Paramus, NJ. 2005.

25. S. Karimian, M. A. Abdalla, Z. Hu. Left-handed Stepped Impedance Resonator for WLAN Applications.//3rd Internation al Congress on Advanced Electromagnetic Material in Microwave and Optics. London, UK. 2009.

26. S. Karimian, M. Abdalla, Z. Hu. Compact Half-wavelength Metamaterial Stepped Impedance Resonator (SIR).//IEEE AP-S International Antenna and Propagation Symposium Digest. Spokane, WA. 2011.

27. S. Karimian, M. Abdalla, Z. Hu. Tunable Metamaterial Ferrite Stepped Impedance Resonator (SIR).//27th Progress in Electromagnetics Research Symposium. Xi an, China. March, 2010.

28. Paris Velez, Miguel Duran-Sindreu, Armando Fernandez-Prieto, Jordi Bonache, Francisco Medina, Ferran Martin. A Compact Dual-Band Differential Power Splitter With Common-Mode Suppression and Filtering Capability Based on Differential-Mode Composite Right/Left-Handed Transmission-Line Metamaterials.//IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol. 13. 2014.

29. Mahmoud A. Abdalla, Ahmed A. Ibrahim. Metamaterials Sculpt UWB Bandpass Filter, Microwaves and RF. Vol. 56, № 3. March, 2017.

30. Mahmoud. A. Abdalla, Aliaa A. Awad, Khaled M. Hassan. Wide Band High Selective Compact Metamaterial Antenna for 2 GHz Wireless Applications.//Loughborough Antennas & Propagation Conference. Loughborough, UK. 2014.

31. M. A. Abdalla, S. Karimian, Z. Hu. Dual Band Spurious-Free SIR Metamaterial Antenna.//IEEE AP-S International Antenna and Propagation Symposium Digest. July, 2014.

32. Mahmoud Abdalla, Mohamed Abo El-Dahab, Mohamed GHouz. SIR Double Periodic CRLH Loaded Dipole Antenna.//IEEE AP-S International Antenna and Propagation Symposium Digest. Vancouver, Canada. July, 2015.

33. Y. Kushiyama, T. Arima, T. Uno. Differential Type CRLH Leaky-Wave Antenna Using Stepped Impedance Resonators.//IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol. 15. 2016.

34. S. K. Sharma, M. A. Abdalla, R. K. Chaudhary. An Electrically Small SICRR Metamaterial-inspired Dual-band Antenna for WLAN and WiMAX applications.//Microwave and Optical Technology Letters. Vol. 59, № 3. 2017.