



УДК 621.396.67.029.6.001.2

А. С. Русаков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Печатная сверхширокополосная антенна с узкими полосами запираания¹

Разработаны сверхширокополосные (СШП) антенны, предназначенные для работы в диапазоне частот 2.5...12 ГГц, имеющие полосно-заграждающую характеристику: СШП-антенна с одной, двумя и тремя узкими полосами запираания. Продемонстрировано, что использование электрического кольцевого резонатора в составе СШП-антенны позволяет легко реализовать указанные полосы на требуемых частотах. Результаты измерений прототипов СШП-антенн с одной и двумя полосами запираания, изготовленных по технологии производства печатных плат, хорошо согласуются с расчетными данными.

Сверхширокополосная антенна, полоса запираания, электрический кольцевой резонатор, многомодовый резонатор, двухполосное запираание, трехполосное запираание

Сверхширокополосные (СШП) (англ. ultra-wide band – UWB) антенны предназначены для применения в СШП-радиолокации и СШП-радиосвязи. После выделения Федеральной комиссией связи США (US Federal Communications Commission – FCC) диапазона частот 3.1...10.6 ГГц для безлицензионного использования UWB [1] повсеместное распространение получила технология беспроводной радиосвязи с одноименным названием. Для безлицензионного использования СШП-сигналов в Российской Федерации выделен диапазон 2.85...10.6 ГГц [2].

В действительности внутри диапазона UWB имеются частоты, принадлежащие многим узкополосным беспроводным технологиям, например WLAN (5.15...5.35 и 5.725...5.825 ГГц), WiMAX (3.3...3.69 ГГц) или спутниковой связи (7.25...7.75 ГГц). Для решения проблемы интерференции между UWB и такими узкополосными системами за последнее время было предложено множество конструкций СШП-антенн с полосно-заграждающей характеристикой. Наиболее привлекательными являются планарные конструкции, выполненные по технологии производства печатных плат. Как правило, для реализации СШП-антенны с полосно-заграждающей характеристикой используется исходная СШП-антенна без полос запираания, в которую интегрированы до-

полнительные реализующие запирающие элементы. В качестве исходной антенны чаще всего выступают планарные реализации монополя, диполя, щелевой антенны с расширяющейся щелью, антенны Вивальди или рамочной антенны. Запирающими элементами, интегрированными в конструкцию антенны, могут выступать щели или шлейфы различных форм или разнообразные резонаторы (емкостно- или индуктивно-нагруженные, короткозамкнутые или разомкнутые), настроенные на требуемую частоту. Для реализации многополосного запираания, как правило, используется несколько запирающих элементов, настроенных на разные частоты [3]–[12], что усложняет конструкцию антенны и делает процесс проектирования достаточно сложным.

Другой способ реализации полосно-заграждающей характеристики антенны – использование метаматериалов и материалов с электронной запрещенной зоной (ЭЗЗ) [13]–[16]. Структуры с ЭЗЗ препятствуют распространению поверхностных волн в диэлектрической подложке. Компоненты метаматериалов – расщепленные кольцевые резонаторы – также успешно использовались при проектировании компактных антенн с многополосным запираанием [17]–[19].

В настоящей статье за основу взята дисковая монополярная антенна, возбуждаемая копланар-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 8.2579.2014/К "Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)".

ным волноводом (КПВ) [20]. Согласование антенны реализовано на ее первых 6 параллельных и 5 последовательных резонансах (не включая первый четвертьволновый последовательный), что обеспечивает работу антенны в диапазоне частот 2.5...12 ГГц. Для обеспечения полосно-заграждающей характеристики предложено использовать электрический кольцевой резонатор (ЭКР), размещение которого над подводящей линией с противоположной стороны подложки реализует запирающие на частоте, определяемой геометрическими размерами ЭКР. Для реализации двухполосного запирающего предложено использование каскадного включения двух ЭКР различных размеров. В качестве альтернативного варианта для реализации двухполосного запирающего предложено использование модифицированного двухмодового ЭКР, в котором один резонатор меньших размеров помещен внутрь другого. Для реализации трехполосного запирающего аналогичным образом предложен трехмодовый ЭКР, содержащий уже три резонатора разных размеров, вложенных друг в друга.

Исходная СШП-антенна без полос запирающих. Изготовленная исходная дисковая монополярная СШП-антенна без полос запирающих (рис. 1) с габаритными размерами $50 \times 50 \text{ мм}^2$ состоит из дискового планарного излучателя 1, возбуждаемого КПВ 2, и экрана 3, выполненных на одной стороне диэлектрической подложки Rogers RO3003 толщи-

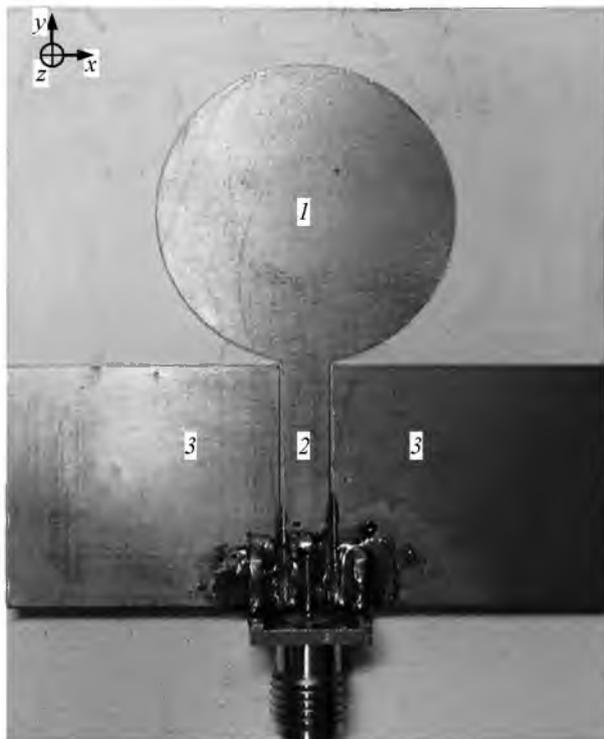


Рис. 1

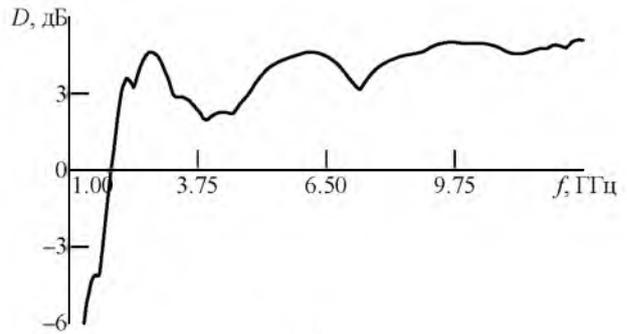
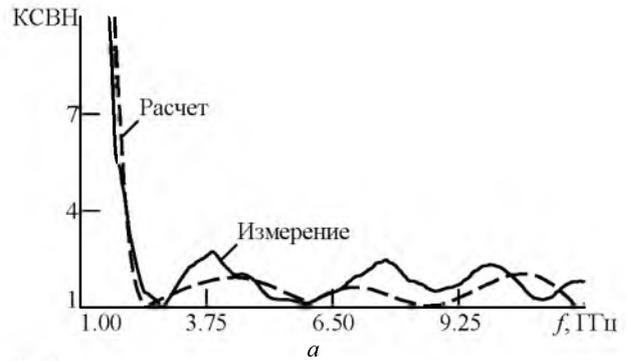


Рис. 2

ной 1.52 мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0.0013$. Радиус дискового планарного излучателя 12.5 мм, 50-омная подводящая линия реализована в виде КПВ с шириной линии 4 мм и двумя зазорами по 0.2 мм. Рассчитанный и измеренный коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) исходной СШП-антенны без полос запирающих изображен на рис. 2, а. Расчетный коэффициент усиления антенны в рабочем диапазоне частот составляет 2...5 дБ (рис. 2, б).

Электрический кольцевой резонатор. Резонатор, включенный в линию передачи, реализует узкую полосу запирающих на частоте, определяемой его размерами. Для реализации полосы запирающих у исходной СШП-антенны предлагается использовать ЭКР, применяющийся в метаматериальных структурах [21], [22]. Конструкция ЭКР изображена на рис. 3 а, а структура, содержащая такой резонатор, включенный в копланарную линию передачи, показана на рис. 3, б.

Структура на рис. 3, б состоит из двух проводящих слоев, реализованных по обе стороны диэлектрической подложки. Один из слоев (нижний) используется для реализации КПВ. В верхнем слое реализован запирающий элемент – ЭКР, выполненный в виде кольцевого резонатора, нагруженного на емкостный элемент, соединяющий две его противоположные точки. Резонатор, располагаясь с противоположной по отношению

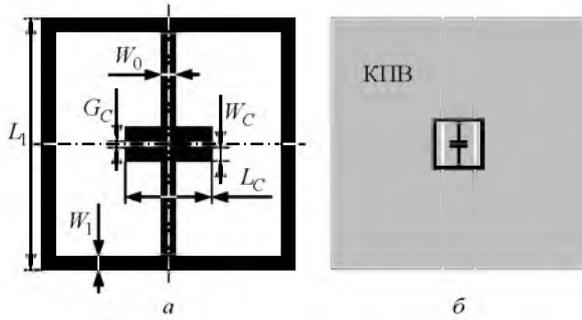


Рис. 3

к КПВ стороны диэлектрической подложки, связан с последней за счет электрического и магнитного полей. Резонансная частота, на которой происходит запираение электромагнитного сигнала, определяется геометрическими размерами (рис. 3, а) кольцевого резонатора L_1 , W_1 , W_0 и параметрами щелевого емкостного элемента L_C , G_C , W_C , на который нагружен резонатор. На резонансной частоте ЭКР вносит рассогласование в импеданс КПВ, обеспечивая тем самым отражение входной электромагнитной волны. За пределами резонансных частот ЭКР не влияет на работу КПВ.

Частотные зависимости параметров матрицы рассеяния КПВ с интегрированным ЭКР с размерами $W_0 = W_1 = W_C = 0.3$ мм, $L_C = 2$ мм и $G_C = 0.5$ мм представлены на рис. 4. Расчет выполнен для длин стороны L_1 кольцевого резонатора: 5 мм – сплошные линии, 7 мм – штриховые линии и 10 мм – пунктирные линии. Серыми линиями показаны зависимости S_{21} , черными – S_{11} .

Из рис. 4 видно, что для резонатора с размером $L_1 = 10$ мм частота запираения составляет 3.9 ГГц, для $L_1 = 7$ мм – 5.7 ГГц, а для $L_1 = 5$ мм – 8 ГГц. Таким образом, частота запираения может быть настроена выбором соответствующего размера ЭКР. Из рис. 4 также следует, что отражение сигнала от входа также происходит на удвоенных резонансных частотах, поскольку на этих частотах возбуждаются вторые моды резонаторов.

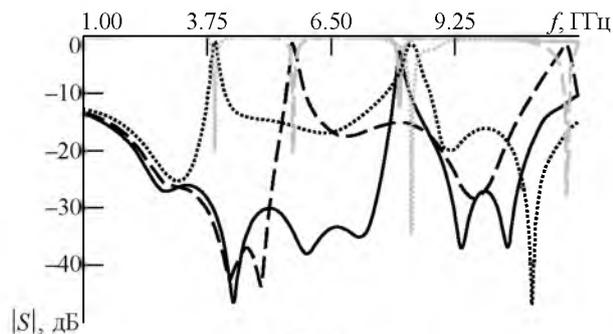


Рис. 4

Именно этот эффект лежит в основе разработки многомодовых ЭКР, рассмотренных далее.

СШП-антенна с одной полосой запираения.

Верхняя сторона всех рассматриваемых дальше СШП-антенн выполнена по рис. 1. Нижняя сторона подложки изготовленной СШП-антенны с интегрированным ЭКР представлена на рис. 5. Размеры ЭКР указаны ранее, длина стороны резонатора $L_1 = 7$ мм, что обеспечивает появление полосы запираения антенны на частоте 5.8 ГГц.

Распределение поверхностного тока на частоте запираения 5.8 ГГц показано на рис. 6. Рассчитанный (штриховая линия) и измеренный (сплошная)



Рис. 5

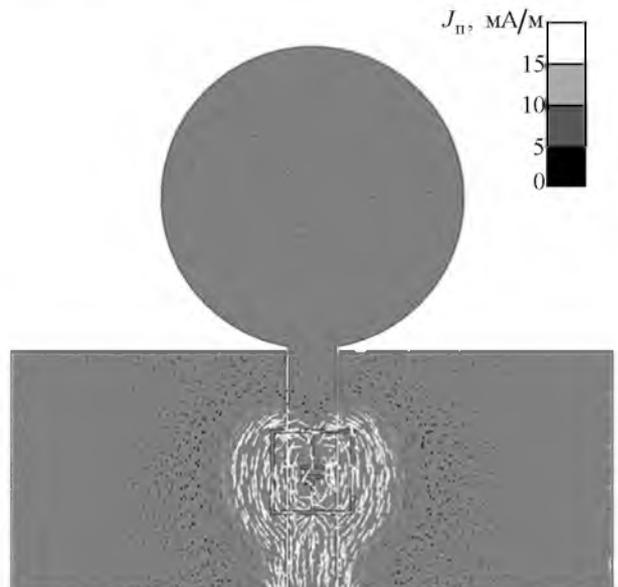
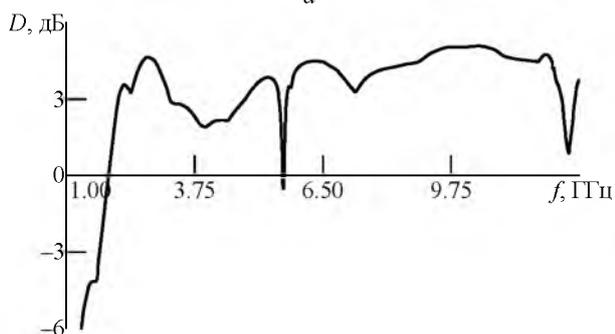
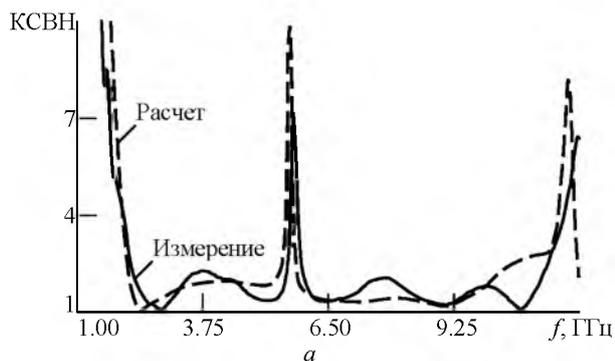


Рис. 6



б
Рис. 7

КСВН даны на рис. 7, а, рассчитанный коэффициент усиления разработанной антенны – на рис. 7, б.

Для повышения частоты запитания с 5.8 до 7.5 ГГц необходимо использовать ЭКР с меньшим размером L_1 . Частично нижняя сторона подложки изготовленной СШП-антенны с полосой запитания на частоте 7.5 ГГц изображена на рис. 8. Длина стороны L_1 нового ЭКР составляет 5.3 мм, остальные размеры остались без изменения. Распределение поверхностного тока на частоте запитания 7.5 ГГц дано на рис. 9, КСВН и коэффициент усиления антенны изображены на рис. 10, а, б



Рис. 8

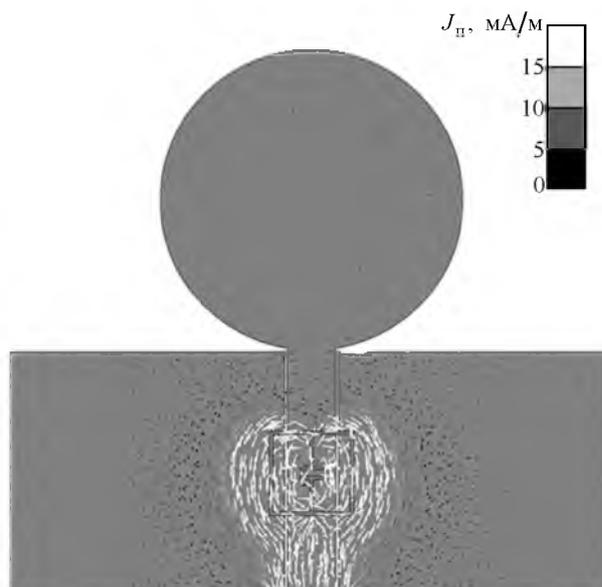
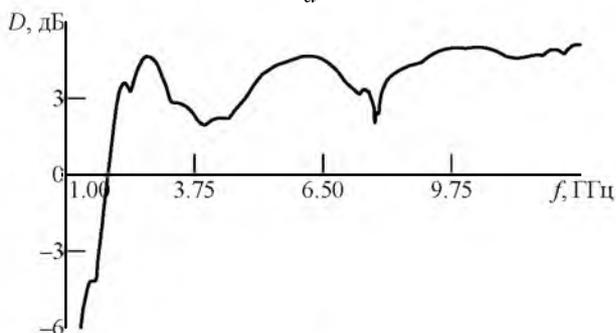
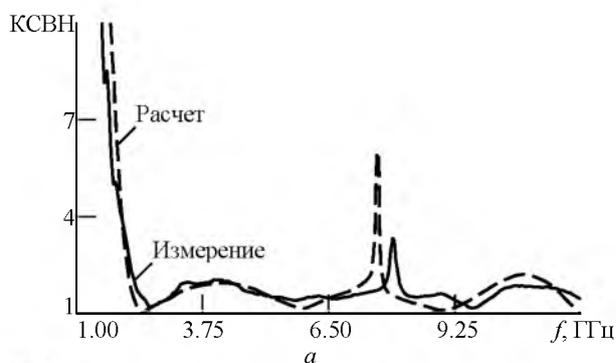


Рис. 9



б
Рис. 10

соответственно.

СШП-антенна с двумя полосами запитания.

Для реализации двухполосного запитания в качестве одного из вариантов может быть использовано каскадное включение двух ЭКР различных размеров. Каждый из резонаторов настраивается отдельно на требуемую частоту. Нижняя сторона подложки изготовленной СШП-антенны с каскадным включением двух ЭКР представлена на рис. 11. Длины сторон L_1 резонаторов равны 7 и 5.3 мм, что соответствует полосам запитания на

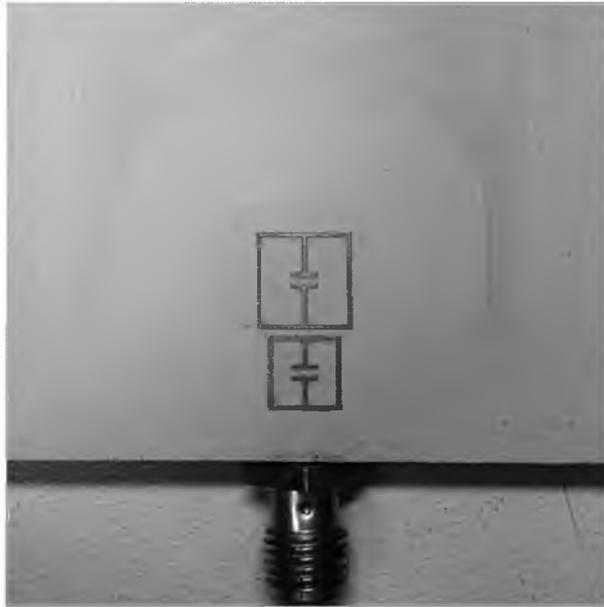
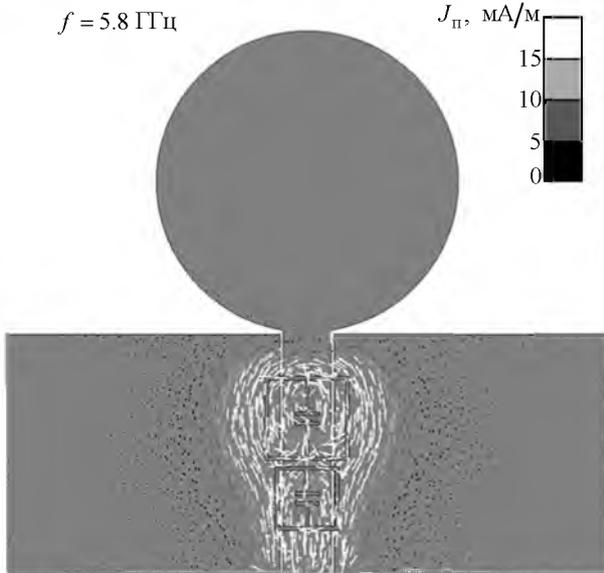


Рис. 11

$f = 5.8$ ГГц



$f = 7.5$ ГГц

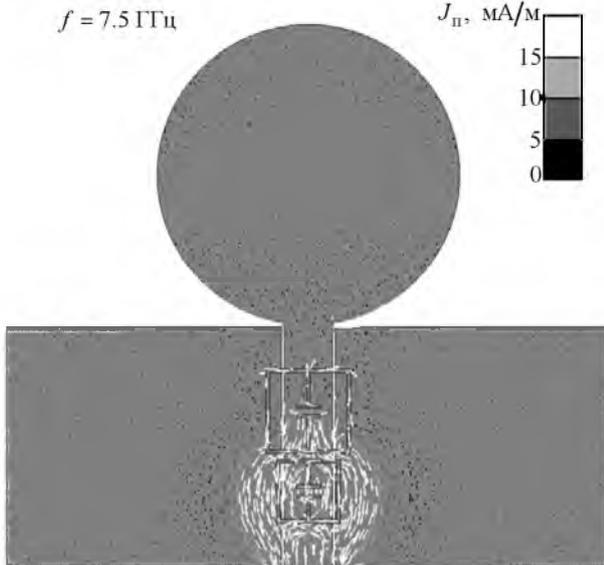


Рис. 12

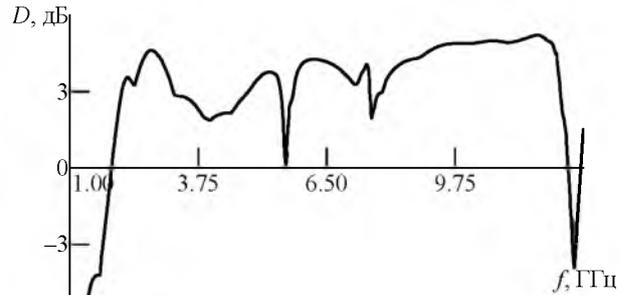
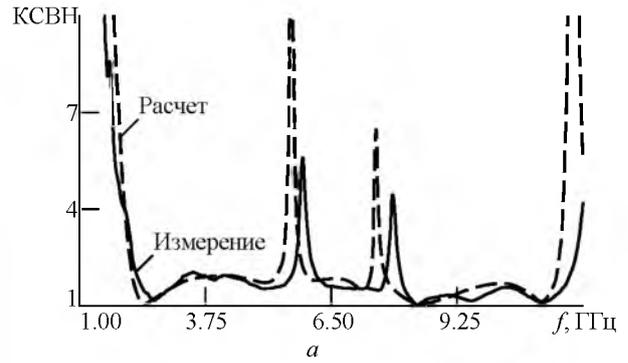


Рис. 13

частотах 5.8 и 7.5 ГГц. Остальные размеры обоих резонаторов оставлены неизменными.

Распределения поверхностного тока на частотах запитания 5.8 и 7.5 ГГц показаны на рис. 12; КСВН и коэффициент усиления антенны изображены на рис. 13, а и б соответственно.

Двухмодовый электрический кольцевой резонатор. Другой вариант реализации двухполосного запитания – использование компактного и простого в настройке двухмодового ЭКР, в котором один кольцевой резонатор меньших размеров помещен внутрь другого. Конструкция двухмодового ЭКР изображена на рис. 14, а, а структура, состоящая из такого резонатора, включенного в копланарную линию передачи – на рис. 14, б.

Частотные зависимости параметров матрицы рассеяния КПВ с интегрированным двухмодовым ЭКР с размерами $W_0 = W_1 = W_2 = W_C = 0.5$ мм, $L_C = 3$ мм, $L_1 = 6$ мм, $L_2 = 8.7$ мм, $G_C = 0.2$ мм,

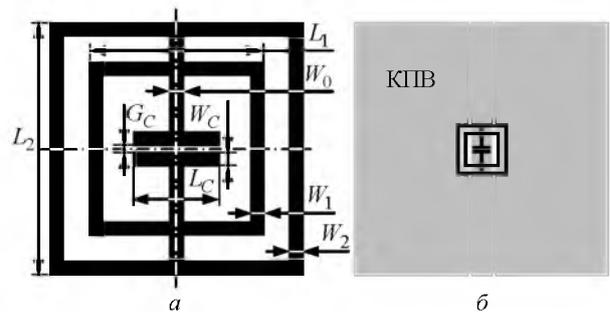


Рис. 14

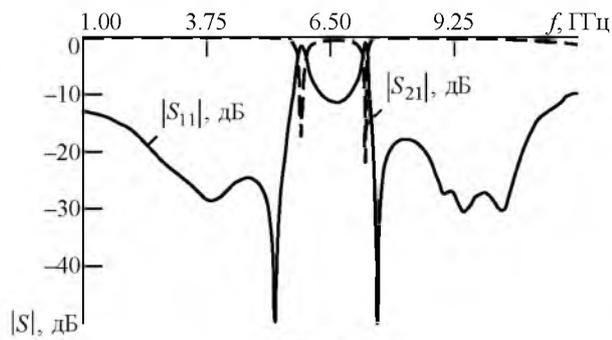


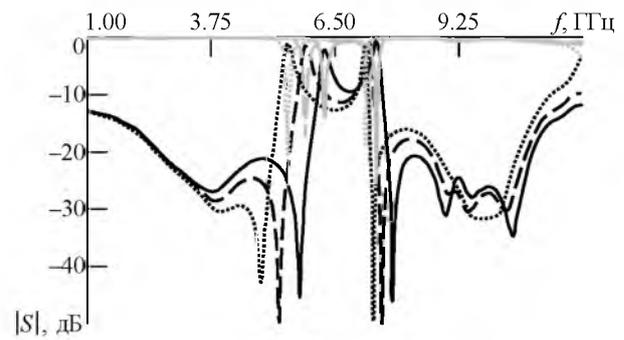
Рис. 15

представлены на рис. 15. Из представленных зависимостей следует, что использование размеров $L_1 = 6$ мм, $L_2 = 8.7$ мм позволяет реализовать полосы запираия на частотах 5.8 и 7.5 ГГц.

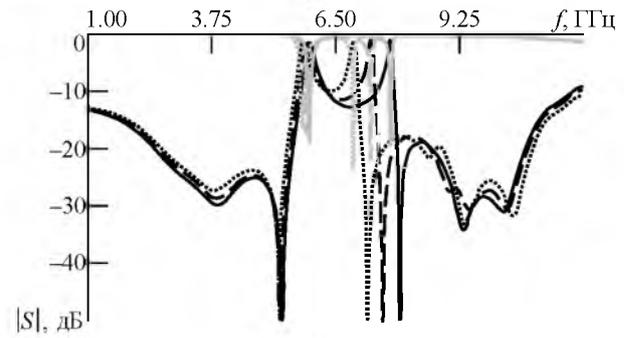
Первая резонансная частота, на которой происходит запираие электромагнитного сигнала, определяется первой модой внутреннего кольцевого резонатора, т. е. геометрическими размерами L_1 , W_1 , W_0 и параметрами щелевого емкостного элемента L_C , G_C . Вторая резонансная частота определяется второй модой внешнего кольцевого резонатора, т. е. геометрическими размерами L_2 , W_2 . На обеих резонансных частотах двухмодовый ЭКР вносит рассогласование в импеданс копланарной линии передачи, обеспечивая тем самым отражение электромагнитной волны от входа структуры. За пределами резонансных частот двухмодовый ЭКР не влияет на работу КПВ.

Для подтверждения описанной связи резонансных частот с модами кольцевых резонаторов проведен параметрический анализ КПВ с интегрированным двухмодовым ЭКР. Вначале изменялся параметр резонатора L_1 : 5.5, 6.0, 6.5 мм, а остальные размеры были равны значениям, указанным для ЭКР на рис. 15. Рассчитанные при этом частотные зависимости КСВН представлены на рис. 16, а. Серым цветом показаны зависимости S_{21} , черным – зависимости S_{11} ; пунктирные линии соответствуют $L_1 = 6.5$ мм, штриховые – $L_1 = 6$ мм, сплошные – $L_1 = 5.5$ мм.

Затем варьировался параметр L_2 : 8.2, 8.7 и 9.2 мм при $L_1 = 6$ мм и прежних значениях остальных параметров. Частотные зависимости КСВН представлены на рис. 16, б. Пунктиром показаны результаты для $L_2 = 9.2$ мм, штриховыми линиями – для $L_2 = 8.7$ мм, сплошными – для $L_2 = 8.2$ мм.



а



б

Рис. 16

Из графиков рис. 16 следует, что L_1 существенно влияет только на нижнюю резонансную частоту, а L_2 – только на верхнюю.

СШП-антенна с двумя полосами запираия на основе двухмодового электрического кольцевого резонатора. Нижняя сторона подложки изготовленной СШП-антенны с интегрированным двухмодовым ЭКР изображена на рис. 17. Размеры двухмодового резонатора равны значениям, указанным для ЭКР на рис. 15, а.

Распределение поверхностного тока на частотах запираия 5.8 и 7.5 ГГц представлены на рис. 18; КСВН и коэффициент усиления антенны – на рис. 19, а, б соответственно.

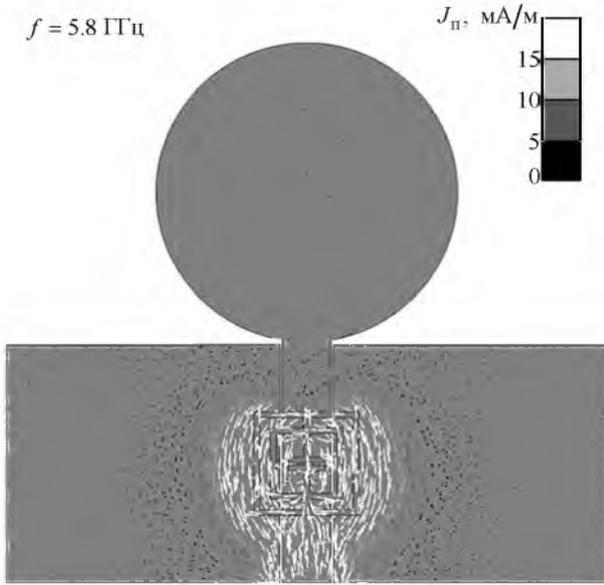
СШП-антенна с тремя полосами запираия. Для реализации трехполосного запираия предложен трехмодовый ЭКР, содержащий три кольцевых резонатора различных размеров, вложенных друг в друга. Конструкция трехмодового ЭКР, позволяющая реализовать трехполосное запираие, изображена на рис. 20.

Первая резонансная частота, на которой происходит запираие электромагнитного сигнала, определяется первой модой внутреннего кольцевого резонатора, т. е. геометрическими размерами L_1 , W_1 , W_0 и параметрами щелевого емкостного элемента L_C , G_C . Вторая резонансная частота определяется второй модой внешнего кольцевого резо-



Рис. 17

$f = 5.8 \text{ ГГц}$



$f = 7.5 \text{ ГГц}$

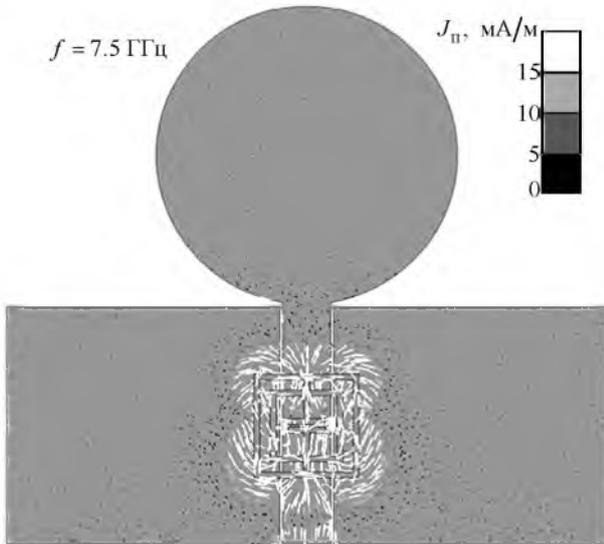


Рис. 18

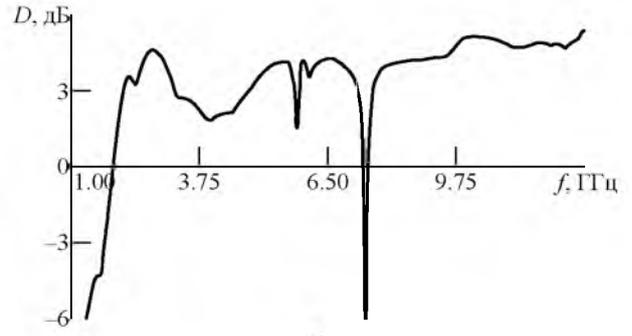
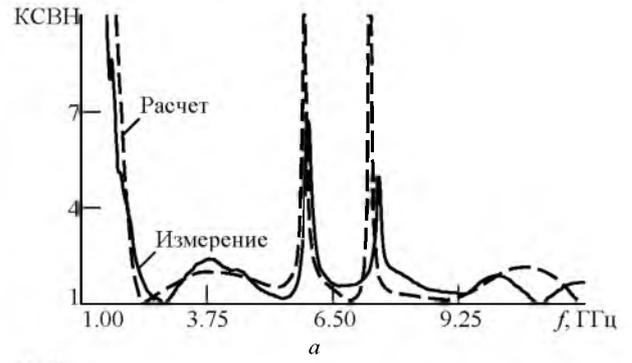


Рис. 19

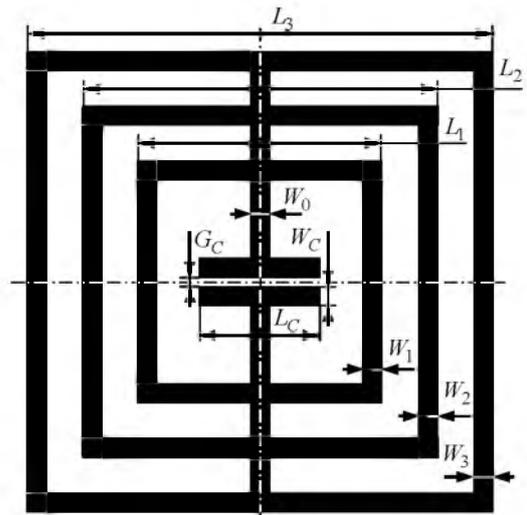


Рис. 20

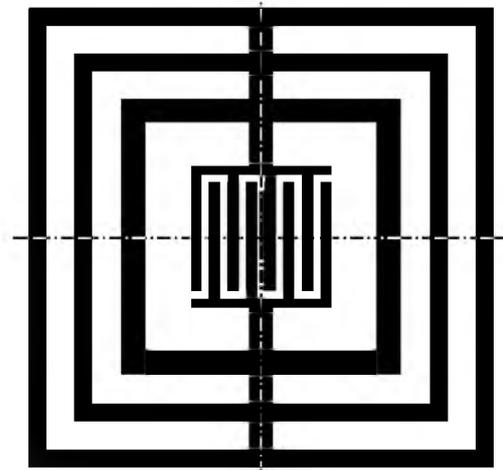


Рис. 21

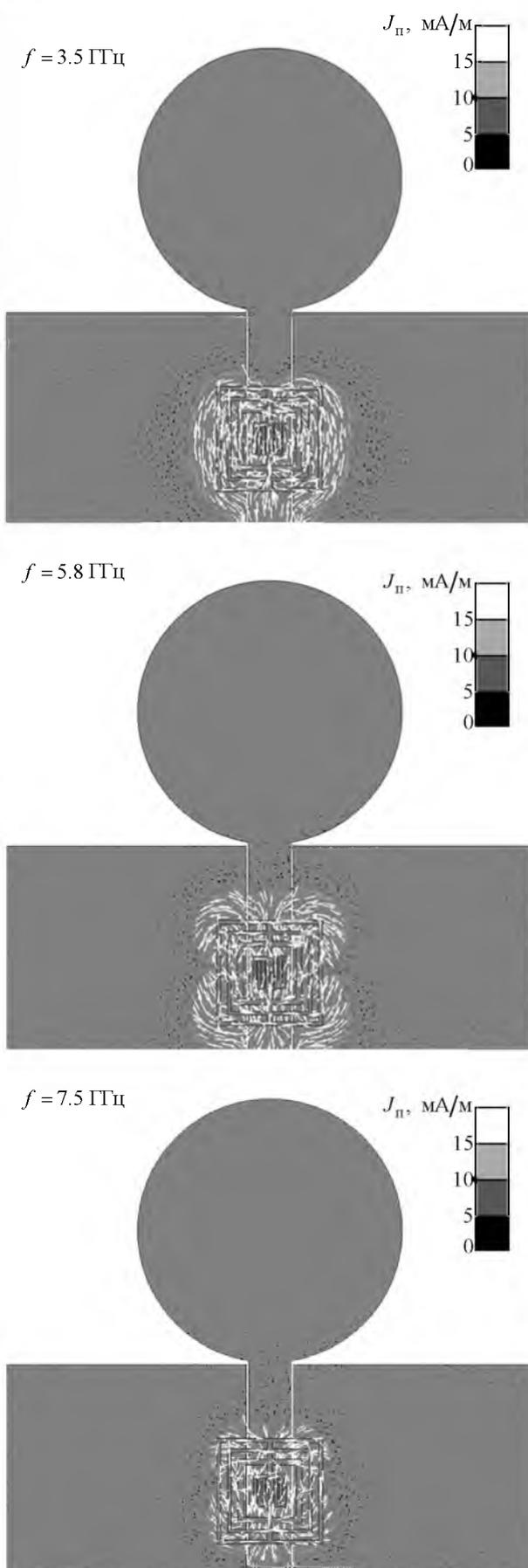


Рис. 22

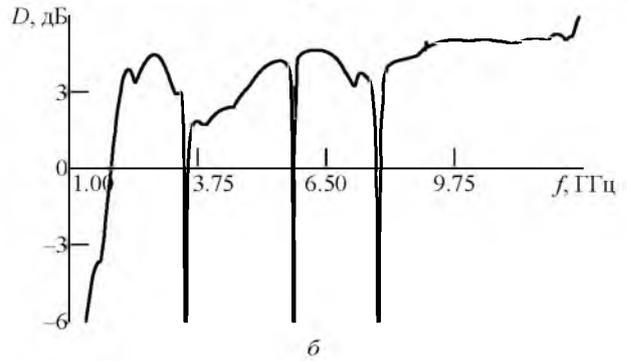
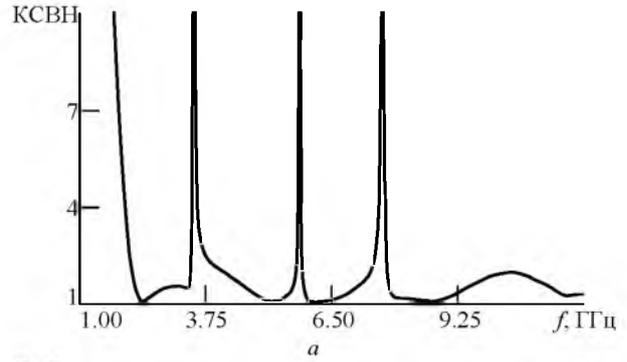


Рис. 23

натора, т. е. геометрическими размерами L_3 , W_3 . Третья (самая высокая) резонансная частота определяется второй модой среднего кольцевого резонатора – геометрическими размерами L_2 , W_2 .

Для реализации СШП-антенны с трехполосным запираем на частотах 3.5, 5.8 и 7.5 ГГц предложена конструкция трехмодового ЭКР с размерами: $W_0 = W_1 = 0.5$ мм, $W_2 = W_3 = 0.35$ мм, $L_1 = 6$ мм, $L_2 = 8$ мм, $L_3 = 10$ мм. В данном случае для реализации первой полосы запираения на частоте 3.5 ГГц потребовалось увеличить емкость щелевого элемента резонатора путем использования встречно-штыревого конденсатора (рис. 21).

Распределение поверхностного тока на частотах запираения 3.5, 5.8 и 7.5 ГГц изображено на рис. 22; КСВН и коэффициент усиления антенны представлены на рис. 23, а и б соответственно.

В настоящей статье приведены результаты моделирования и исследования печатных СШП-антенн с ЭКР для обеспечения полосно-заграждающей характеристики. Продемонстрировано, что использование ЭКР в составе СШП-антенны позволяет легко реализовать одну или несколько узких полос запираения на требуемых частотах.

Автор выражает благодарность профессору И. Б. Вендик за полезные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Federal Communications Commission, First Report and Order, FCC 02-48, Febr. 14, 2002. URL: https://www.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Orders/2002/fcc02048.pdf (дата обращения 28.06.2016).
2. Решение ГКПЧ № 09-05-02 от 15 декабря 2009 г. URL: minsvyaz.ru/common/upload/prot_09-05.pdf (дата обращения 28.06.2016).
3. Mandal T., Das S. Design and Analysis of a Coplanar Waveguide Fed Ultra wideband Hexagonal Open Slot Antenna with WLAN and Wimax Band Rejection // *Microw. and Opt. Technol. Lett.* 2014. Vol. 56, iss. 2. P. 434–443.
4. Multiband And Wideband Planar Antenna for WLAN And Wimax Applications / X. Dong, Z. Liao, J. Xu, Q. Cai, G. Liu // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2014. Vol. 46. P. 101–106.
5. Karimian R., Oraizi H., Fakhte S. Design of a Compact Ultra-Wide-Band Monopole Antenna with Band Rejection Characteristics // *IET Microwaves, Ant. & Prop.* 2014. Vol. 8, iss. 8. P. 604–610.
6. A CPW-Fed Dual-Band-Notched Antenna with Sharp Skirt Selectivity for UWB Applications / D. Dong, S. Chen, Z. Liao, G. Liu / *Int. J. of Ant. and Prop.* 2014. Vol. 2014. 7 p.
7. Planar Ultra Wideband Monopole Antenna with Tri-Notch Band Characteristics / S. K. Venkata, M. Rana, P. S. Bakariya, S. Dwari, M. Sarkar // *Progress in Electromagnetics Research C*. 2014. Vol. 46. P. 163–170.
8. Bakariya P. S, Dwari S., Sarkar M. Triple Band Notch UWB Printed Monopole Antenna with Enhanced Bandwidth / *AEU – Int. J. of Electronics and Communications*. 2015. Vol. 69, iss. 1. P. 26–30.
9. Sarkar D., Srivastava K. V., Saurav K. A Compact Microstrip-Fed Triple Band-Notched UWB Monopole Antenna // *IEEE Ant. and Wireless Prop. Lett.* 2014. Vol. 13. P. 396–399.
10. Electromagnetic Behaviors of Thin Film CPW-Fed CSRR Loaded on UWB Transparent Antenna / M. S. A. Rani, S. K. A. Rahim, M. R. Kamarudin, T. Peter, S. W. Cheung, B. M. Saad / *IEEE Ant. and Wireless Prop. Lett.* 2014. Vol. 13. P. 1239–1242.
11. A Compact CPW-Fed Antenna with Dual Band-Notched Characteristics for UWB Applications / X. Wang, L. Wang, H. Zhou, W. Lu / *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2014. Vol. 56. P. 1047–1049.
12. Analysis of CPW-Fed UWB Antenna for Wimax and WLAN Band Rejection / S. Jacob, A. O. Lindo, C. M. Nijas, C. K. Aanandan, P. Mohanan // *Progress in Electromagnetics Research C*. 2014. Vol. 52. P. 83–92.
13. Liu H., Xu Z. Design of UWB Monopole Antenna with Dual Notched Bands Using One Modified Electromagnetic-Bandgap Structure // *The Scientific World J.* 2013. Vol. 2013. 9 p.
14. Design of WLAN Band Notched UWB Monopole Antenna with Stepped Geometry Using Modified EBG Structure / G. K. Pandey, H. S. Singh, P. K. Bharti, M. K. Meshram // *Progress in Electromagnetics Research B*. 2013. Vol. 50. P. 201–217.
15. Compact Planar Monopole Antenna with Dual Band Notched Characteristics Using T-Shaped Stub and Rectangular Mushroom Type Electromagnetic Band Gap Structure for UWB and Bluetooth Applications / R. Singh, G. K. Pandey, M. Agarwal, H. S. Singh, P. K. Bharti, M. K. Meshram / *Wireless Personal Communications*. Vol. 78, iss. 1. P. 215–230.
16. Peng L., Ruan C. L. Design and Time-Domain Analysis of Compact Multi-Band-Notched UWB Antennas with EBG Structures / *Progress in Electromagnetics Research B*. 2013. Vol. 47. P. 339–357.
17. Electromagnetic Behaviors of Thin Film CPW-Fed CSRR Loaded on UWB Transparent Antenna / M. S. A. Rani, S. K. A. Rahim, M. R. Kamarudin, T. Peter, S. W. Cheung, B. M. Saad // *IEEE Ant. and Wireless Prop. Lett.* 2014. Vol. 13. P. 1239–1242.
18. Sarkar D., Srivastava K. V., Saurav K. A Compact Microstrip-Fed Triple Band-Notched UWB Monopole Antenna // *IEEE Ant. and Wireless Prop. Lett.* 2014. Vol. 13. P. 396–399.
19. Siddiqui J. Y., Saha C., Antar Y. M. M. Compact SRR Loaded UWB Circular Monopole Antenna with Frequency Notch Characteristics // *IEEE Trans. on Ant. and Prop.* 2014. Vol. 62, iss. 8. P. 4015–4020.
20. A Novel CPW-fed Disc Antenna / S.-Y. Suh, W. Stutzman, W. Davis, A. Waltho, J. Schiffer // *Ant. and Prop. Society Int. Symp.*, 20–25 June 2004, Monterey. Piscataway: IEEE, 2004. Vol. 3. P. 2919–2922.
21. Schurig D., Mock J. J., Smith D. R. Electric-Field-Coupled Resonators for Negative Permittivity Metamaterials // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88. P. 04119.
22. Withayachumnankul W., Fumeaux C., Abbott D. Near-Field Interactions in Electric Inductive–Capacitive Resonators for Metamaterials // *J. of Physics D: Applied Physics*. 2012. Vol. 45, iss. 48. P. 1–7.

A. S. Rusakov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Planar UWB Antenna with Notched Bands

The ultra-wideband (UWB) monopole antennas are designed to provide the impedance bandwidth of the wideband response from 2.5 to 12 GHz. To achieve single-, dual-, or triple-band notched characteristics at desirable frequencies, the electric ring resonator incorporated into the CPW feed line is used in the planar configuration of the UWB antenna. The notched frequency bands are controlled by dimensions of the ERR structure. The results of simulations and measurements are in good agreement.

Ultra-wideband antenna, band notch, electric ring resonator, multimode resonator, dual-band notched, triple-band notched

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2016 г.