

НЕНАПРАВЛЕННЫЕ НИЗКОПРОФИЛЬНЫЕ АНТЕННЫ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Афанасьев П.О., Мануилов М.Б., Следков В.А.

Южный Федеральный Университет

ФГНУ НИИ «Спецвузавтоматика»

В статье представлена низкопрофильная миниатюрная антенна с вертикальной поляризацией и изотропным излучением, похожим на излучение четвертьволнового монополя. Приведены теоретические и экспериментальные результаты исследований этой антенны.

Ключевые слова: низкопрофильные антенны, электрически малые антенны, вертикальная поляризация, монополярные антенны.

Теория расчета и практическое конструирование низкопрофильных антенн активно развиваются в течение последних 60 лет. Вначале такие антенны устанавливались в основном на самолеты и автомобили. Развитие беспроводной связи и миниатюризация мобильных телефонов инициировали повышенный интерес к миниатюрным антеннам и всплеск публикаций в 90-х годах. Затем понадобились миниатюрные антенны для GPS и ГЛОНАСС приемников. В начале этого века были разработаны системы радиочастотной идентификации объектов, в радиочастотных метках которых также используются миниатюрные антенны. Колоссальный прогресс и миниатюризация электронных изделий и вычислительной техники привели внедрению активных и пассивных сенсорных технологий в транспорте, торговле, сельском хозяйстве, домашней автоматике и системах наблюдения. В связи с тем, что область применения миниатюрных антенн постоянно расширяется, а требования к их параметрам увеличиваются, ежегодное количество публикаций на эту тему постоянно растет. К настоящему моменту опубликовано множество статей и патентов, посвященных миниатюрным антеннам различных типов. Это свидетельствует о важности тематики и об актуальности продолжения исследований в этом направлении.

Основной целью настоящей работы является создание низкопрофильной малогабаритной антенны, излучающей электромагнитное поле с вертикально поляризованной электрической компонентой и имеющей круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости.

Обзор известных низкопрофильных антенн с вертикальной поляризацией и круговой диаграммой направленности

В настоящий обзор включены работы, посвященные уменьшению высоты монополярных антенн и миниатюризации щелевых антенн, излучающих вертикальную поляризацию.

Для уменьшения высоты монополя (провода длиной четверть излучаемой длины волны, расположенным над металлическим экраном) использованы различные конфигурации провода, например, в виде букв Т или перевернутой L. Также использованы различные виды укорачивающих нагрузок [1-4, 12] и диэлектрические покрытия [5]. В [6] описана антенна, полосковый излучатель которой расположен на поверхности керамического диска с диэлектрической проницаемостью 22. В конструкции излучателя антенны [7] использована комбинация укорачивающего диска с диэлектрическим покрытием. Различные виды изогнутого меандром монополя рассмотрены в [8]. В [9] предложена ещё более компактная структура, в которой к концу изогнутого меандром полоскового проводника (ПП) добавлен вертикальный отрезок. При резонансной частоте приблизительно 920 МГц высота такой антенны над экраном всего 28 мм, что составляет 0.086λ. Структуры, приведенные в перечисленных выше работах, позволяют укоротить монополь только на 25-40%. Монополи в виде фрактальных структур Коча и Серпинского исследованы в [10,11]. Однако, применение этих фрактальных структур, расположенных в перпендикулярной экрану плоскости, не позволило существенно уменьшить

высоту антенны, а изгибы ПП привели к появлению горизонтальных составляющих тока в антенне и, следовательно, к наличию горизонтальной составляющей электрического поля в дальней зоне, искажающей ДН антенны и уменьшающей её коэффициент усиления (КУ) в горизонтальной плоскости [10].

В [13] исследованы монополярные антенны, образованные разомкнутыми на концах ПП, изогнутыми в виде фрактальной структуры Гильберта в плоскости, параллельной экрану. Структуры размещены внутри квадрата размером 70×70 мм. По расчету первый резонанс структуры первого порядка равен 717 МГц, а полоса составляет 4% (при КСВН менее 2). Увеличение порядка структуры приводит к удлинению провода и уменьшению резонансной частоты. У структуры пятого порядка первый резонанс равен 211 МГц, а полоса согласования суживается до 0.05%. Таким образом, структура Гильберта пятого порядка позволяет создать антенну размером приблизительно 0.05λ , но полоса пропускания при этом ничтожно мала.

В [14] исследованы антенны образованные ПП, расположенными над горизонтальным экраном и имеющими форму кривых Пеано и Гильберта. Концы этих ПП замкнуты на экран. Замыкающие штыри создают две параллельно включенные рамочные антенны и обеспечивают вертикальную поляризацию излучаемого сигнала. Без замыкающих штырей антенна будет излучать горизонтальную поляризацию. Поэтому роль полоскового проводника в этой антенне отличается от емкостного диска, который обычно помещается на вершине диполя для его укорочения. Высота антенны над экраном 0.08λ , а размер излучателя $0.15\lambda \times 0.15\lambda$. В [14] проведены и расчеты зависимости КУ исследуемой антенны от размера горизонтального экрана, по которым при увеличении его диаметра от длины волны до бесконечности КУ увеличивается от 0 дБ до 4.5 дБ. Положение максимума ДН при этом смещается из горизонтальной плоскости и оказывается выше горизонта. Измерения ДН изготовленного образца показали максимальный КУ приблизительно 4.5 дБ в направлении 50 градусов выше горизонта и приблизительно минус 1.5 дБ в горизонтальной плоскости.

Интересная конструкция низкопрофильной широкополосной антенны предложена в [15]. Её двухслойный излучатель имеет вид креста, концы которого соединены с экраном, возбуждается в середине и имеет две плоскости симметрии.

При высоте 10 мм и размере креста 100×100 мм, антенна имеет резонансную частоту 1.3 ГГц и обеспечивает КСВН менее 1.5 в полосе 20%. Высота антенны равна 0.043λ , а её ДН практически не отличаются от ДН обычного монополя, расположенного на экране того же диаметра.

Другая конструкция низкопрофильной антенны предложена в [16]. Верхний слой содержит четыре ПП, свернутых спиралью. Одни концы этих ПП соединены между собой в центре антенны, а другие разомкнуты. Нижний слой содержит четыре ПП, изогнутых меандром. Одни концы этих ПП соединены между собой в центре антенны, а другие замкнуты с экраном четырьмя вертикальными стержнями. Пятый стержень расположен в центре антенны и соединен со всеми проводниками своим верхним концом. Источник сигнала включен между нижним концом стержня и экраном. ПП излучателя занимают площадь 56×56 мм, а экран – 100×100 мм. При таких размерах антенна согласована на частоте 460 МГц и имеет КСВН менее 2 в полосе частот 3%. Измеренный в безэховой камере КУ антенны равен минус 4.1 dBi, а её направленность равна 1 dBi.

Очень простая низкопрофильная антенна предложена в [17]. К обычному окруженному диэлектриком монополю с емкостным кругом на конце добавлено кольцо, отделенное от круга зазором. При высоте 1.5 мм и диаметре кольца 62 мм такая антенна согласована на частоте 5.8 ГГц и имеет КСВН менее 2 в полосе примерно 12%. Т.е. её высота равна 0.029λ , а диаметр – 1.2λ . Поскольку антенна имеет ось симметрии, её ДН не отличаются от ДН обычного монополя.

Другая конструкция низкопрофильной антенны с большими продольными размерами предложена в [18]. Антенна имеет высоту 3 мм и диаметр экрана 150 мм. Над монополем,

имеющим емкостную нагрузку в виде крестообразной пластины на конце, расположены 64 квадратные пластинки. Такая структура возбуждает поверхностную волну, которая излучается на резонансных частотах 4.2 и 4.9 ГГц. При высоте менее 0.05λ антенна имеет полосы частот 1.1% и 3.9% соответственно. Похожая конструкция, в которой точка возбуждения перенесена из центра антенны на кольцо, а под проводящим кругом выполнена крестообразная щель в экране, исследована в [19]. Антенна изготовлена на подложке размером $130 \times 130 \times 2.97$ мм и работает на частоте 434 МГц.

Очень компактная антенна, имеющая высоту 0.036λ и максимальный линейный размер 0.091λ , описана в [20]. Её конструкция состоит из экрана и диэлектрической подложки размером 15×12 мм, которые закреплены на расстоянии 6 мм друг от друга. На подложке расположены два разделенных зазором ПП, которые соединены двумя конденсаторами. Источник сигнала включен между серединой первого ПП и экраном, а середина второго ПП соединена с экраном. Антенна работает на частоте 1.77 ГГц с полосой 6.8%. Приведены измеренные ДН, которые демонстрируют хорошую равномерность в горизонтальной плоскости и уровень кросс поляризации менее 10 дБ. КУ равен 0.95 дБ.

В [21-26] теоретически и экспериментально исследованы низкопрофильные щелевые антенны с дополнительным экраном, расположенным на определенном расстоянии от подложки и замкнутым с краями щели. В этих работах показано, что возбуждаемая в центре круговая щель над экраном излучает вертикальную поляризацию и создает круговую ДН. Самая тонкая (относительно λ) реально изготовленная антенна, обнаруженная в опубликованной литературе, предложена в [26]. Она может излучать вертикально поляризованное поле при высоте менее 0.01λ и диаметре менее 0.1λ . Щель сложной конфигурации вытравлена на верхней стороне подложки, которая установлена на диэлектрическое кольцо, помещенное на экране, и отделена от экрана воздушной полостью. Края подложки по всему периметру соединены с экраном металлическими перемычками, проходящими через диэлектрическое кольцо. Антенна согласована на частоте 455 МГц.

Изучение опубликованных работ, упомянутых выше, показало, что известные антенны имеют либо большую высоту, либо большие линейные размеры, либо сложную конструкцию. Эти недостатки не позволяют создать простую и миниатюрную низкопрофильную антенну на их основе, поэтому необходимо продолжать исследования и поиск оптимальной конструкции.

Разработка низкопрофильной миниатюрной антенны

В процессе поиска конструкции, наиболее подходящей для решения поставленной задачи, были изучены и антенны для мобильных телефонов, поскольку они всегда имеют малые габариты и просты в изготовлении, хотя не всегда имеют хорошую кросс поляризацию. В работе [27] описана антенна, которая представляет собой изогнутый меандром ПП, который расположен над экраном. Один конец этого проводника соединен с экраном, а источник возбуждения подключен на небольшом расстоянии от точки заземления. Такая конструкция является самой простой среди известных низкопрофильных антенн и позволяет обеспечить минимальные габариты. Однако горизонтальные токи в излучателе этой антенны не скомпенсированы, поэтому она излучает и горизонтальное электрическое поле. В результате ДН антенны сильно отличается от диаграммы монополя и уменьшается её КУ в направлении горизонта.

Для устранения этого недостатка нами предложено добавить ещё один изогнутый меандром ПП, который расположен симметрично первому относительно вертикальной плоскости. Такое дополнение делает антенну симметричной относительно вертикальной плоскости и существенно уменьшает направленное вверх излучение. Благодаря этому возрастает КУ антенны в направлении горизонта, но её габариты увеличиваются.

Задача расчета предложенной антенны состоит в нахождении топологии ПП, которая обеспечивает согласование антенны на рабочей частоте при минимальных габаритах. Разработка методики синтеза такой структуры является очень сложной задачей, поскольку её полная эквивалентная схема представляет собой каскадное соединение множества отрезков связанных линий передачи, имеющих потери на излучение. Поэтому оптимизация топологии проводилась численно последовательным приближением к желаемому результату путем изменения размеров ПП и оценки влияния этого изменения на рассчитанную частотную характеристику коэффициента отражения антенны. Для выбора направления следующего шага использовалась упрощенная эквивалентная схема, изображенная на рис. 1, которая качественно описывает частотную характеристику входного сопротивления антенны вблизи резонансной частоты.

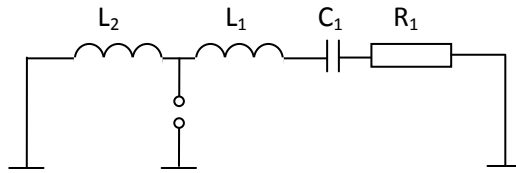
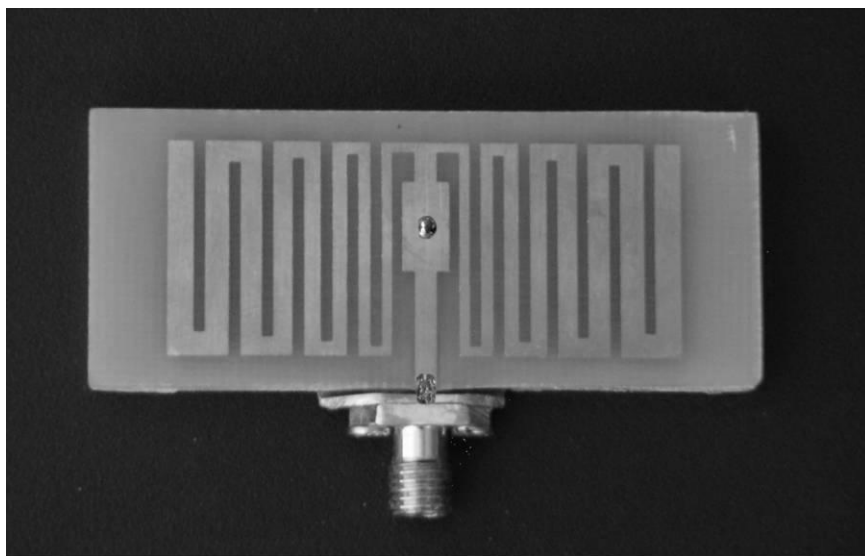


Рис. 1. Эквивалентная схема антенны вблизи резонансной частоты

L_1 - эквивалентная индуктивность ПП между точками возбуждения и заземления, L_2 - эквивалентная индуктивность ПП между точкой возбуждения и разомкнутым концом, C_1 - эквивалентная емкость ПП между точкой возбуждения и разомкнутым концом, R_1 - эквивалентное активное сопротивление излучения.

Изменяя длину ПП и расположение точки возбуждения, удалось рассчитать антенну на подложке размером 60×25 мм и толщиной 5 мм из материала FR4, имеющего диэлектрическую проницаемость 4.3, согласованную с волновым сопротивлением 50 Ом на заданной частоте 425 МГц.

По результатам расчетов были изготовлены образцы, фотография одного из которых приведена на рис. 2а.



(а)

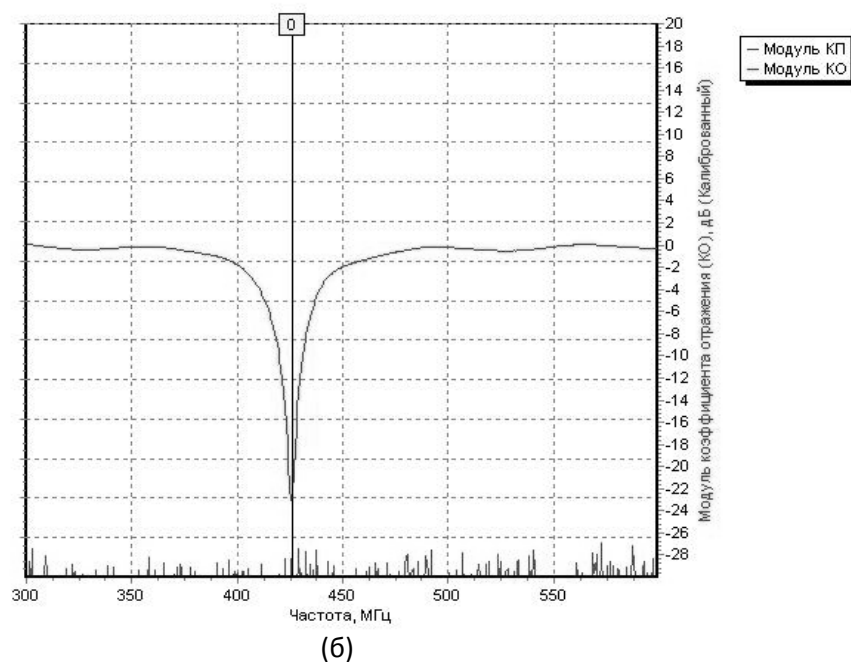


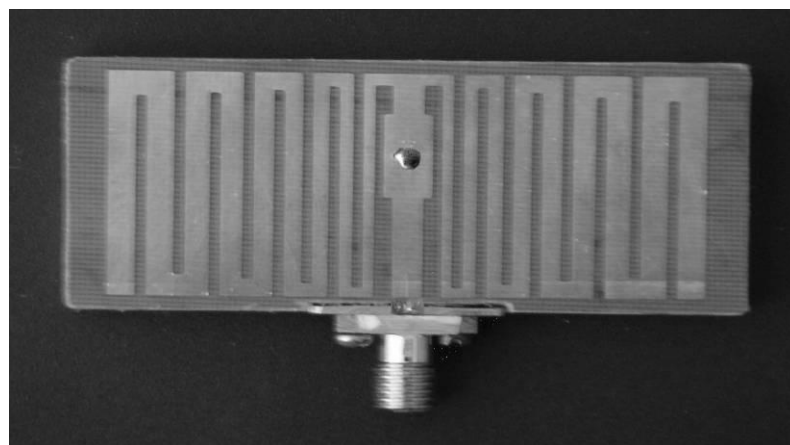
Рис. 2. Миниатюрная симметричная антенна изготовленная из материала FR4:
а – внешний вид; б – частотная зависимость коэффициента отражения.

В средней части, где токи максимальны, ПП сделаны узкими, а вблизи разомкнутых концов, где напряжение максимально, ПП сделаны широкими. Такая конфигурация позволила увеличить L_2 и C по сравнению с ПП одинаковой ширины и, следовательно, уменьшить резонансную частоту антенны при тех же габаритах.

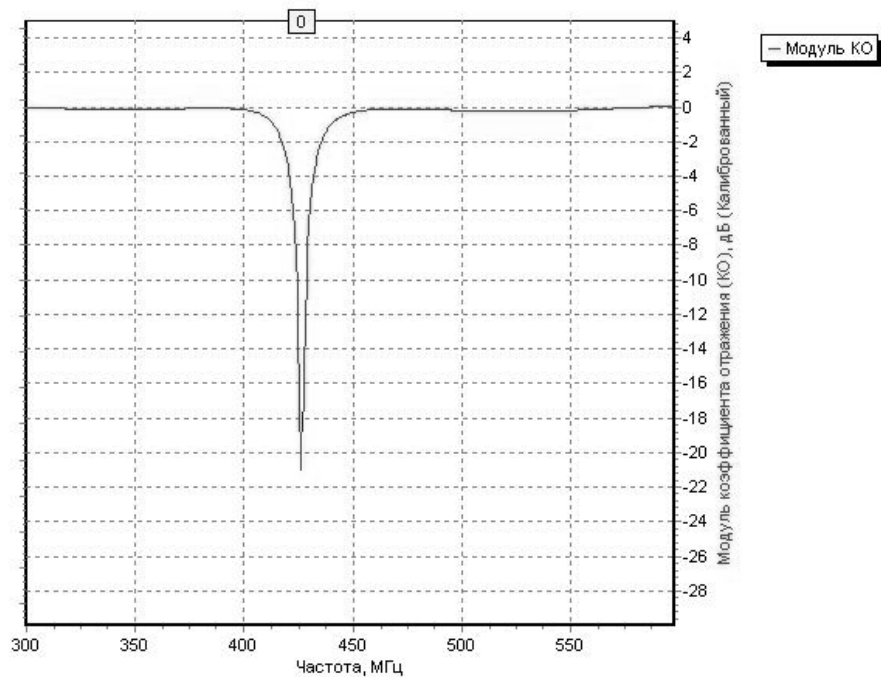
Разъем расположен в боковой стенке. Его корпус соединен с экраном и средним концом ПП, а центральный проводник соединен с серединой расширенной части среднего ПП проводом, проходящим под средним ПП.

Измеренная частотная зависимость этого образца приведена на рис. 2б.

Для исследования влияния свойств подложки на параметры антенны рассчитаны и изготовлены образцы антенн из материала ФАФ-4 с диэлектрической проницаемостью 2.5. имеющие такие же габариты 60×25 мм. Внешний вид такой антенны, имеющей такие же габариты экрана 60×25 мм, представлен на рис. 3а. Частотная характеристика согласования одного из изготовленных образцов приведена на рис. 3б.



(а)

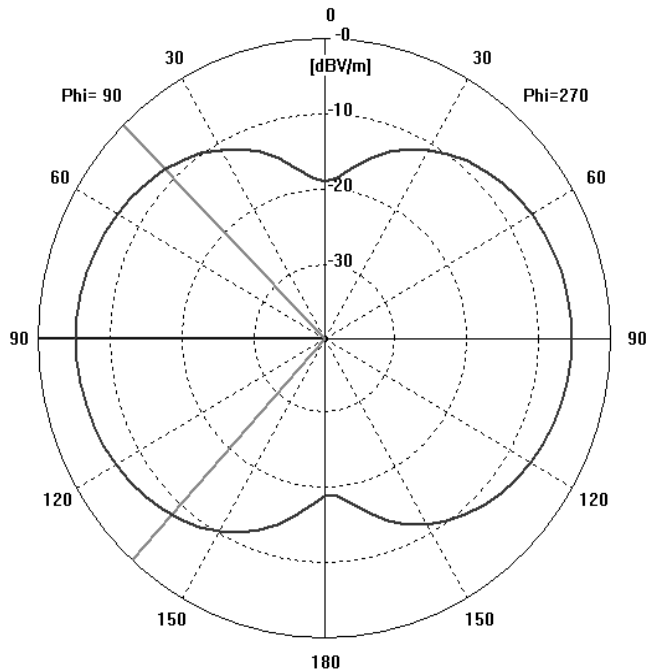


(б)

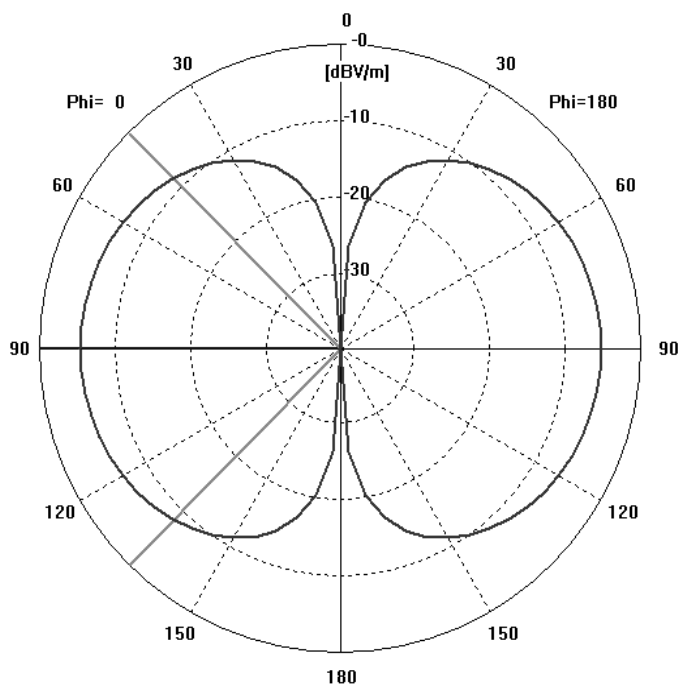
Рис. 3. Миниатюрная симметричная антенна изготовленная из материала ФАФ:

а – внешний вид; б – частотная зависимость коэффициента отражения.

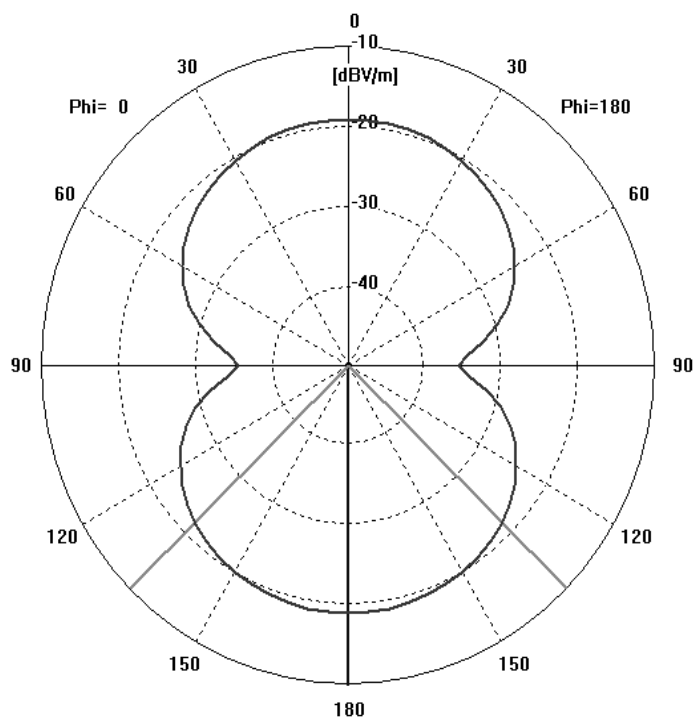
Расчеты показали, что использование материала ФАФ-4 позволяет увеличить КУ антенны на 4.6 дБ по сравнению с материалом FR4. Диаграмма направленности антенны из материала ФАФ-4 в различных сечениях приведена на рис. 4. Диаграмма направленности антенны, изготовленной из FR4, практически не отличается по форме.



(а)



(а)



(б)

Рис. 4. Диаграмма направленности антенны, изготовленной из ФАФ.

а – компонента E_{θ} в плоскости симметрии антенны; б – компонента E_{θ} в вертикальной плоскости, перпендикулярной плоскости симметрии; в – компонента E_{φ} в вертикальной плоскости, перпендикулярной плоскости симметрии.

Измерение разницы между КУ антенн, изготовленных из этих материалов, проведено методом замещения. Сначала измерена частотная зависимость коэффициента передачи между двумя антеннами, изготовленными из материала FR4. Затем одна из антенн заменена антенной, изготовленной из материала ФАФ-4, и измерение повторено. Потом измерена частотная зависимость коэффициента передачи между двумя антеннами, изготовленными из материала ФАФ-4. Результаты измерений приведены на рис. 5. Они показывают, что антенны, изготовленные из материала ФАФ-4, имеют КУ приблизительно на 5 дБ выше, чем антенны, изготовленные из материала FR4. Таким образом, для обеспечения максимально возможного КУ, антенны необходимо изготавливать из высокодобротного диэлектрика с минимальной проницаемостью.

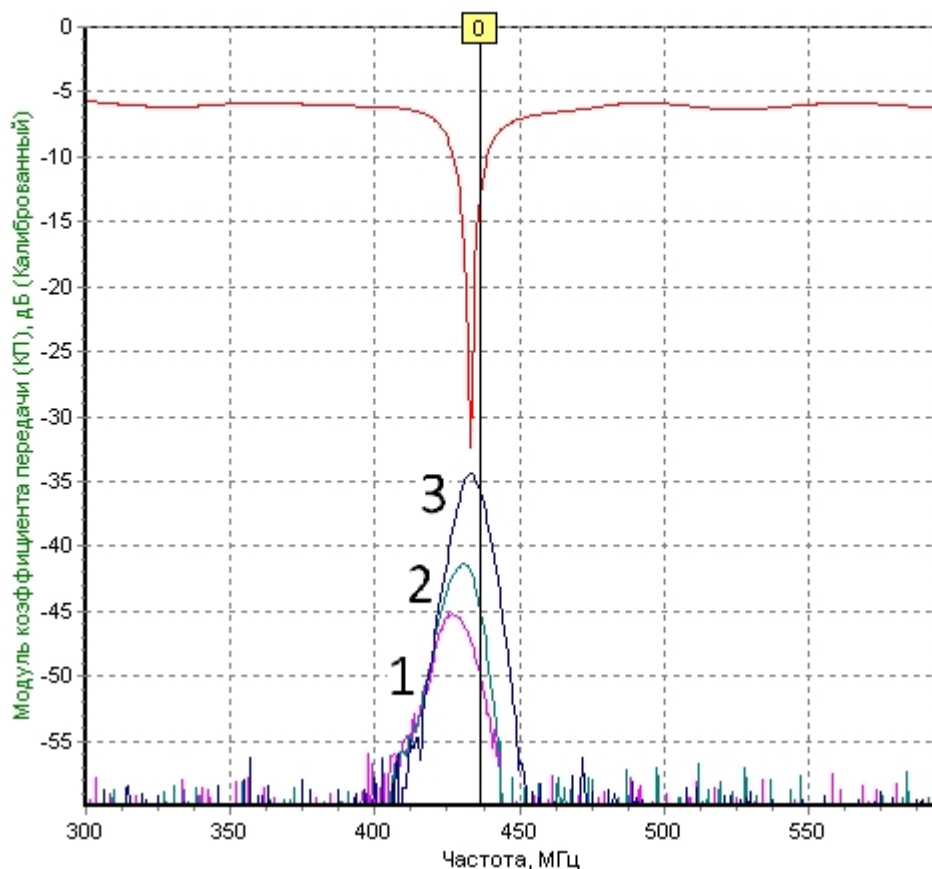


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента передачи между двумя антеннами: кривая 1 – обе антенны изготовлены на FR4; кривая 2 – одна антенна изготовлена из FR4, другая – из ФАФ; кривая 3 – обе антенны изготовлены на ФАФ.

Теоре
расположенн
Расчеты пока
над экраном]
– на 8 МГц, ε
сдвиг частот
образом, соз
металлическ

Сравнение параметров разработанной антенны (МСА) с известными зарубежными антеннами приведено в таблице 1, из которой видно, что размеры разработанной антенны значительно меньше размеров зарубежных аналогов низкопрофильных антенн с вертикальной поляризацией, но она уступает им по значению КУ.

Табл. 1. Сравнительные характеристики антенн

	Частота	Полоса частот	КУ	Высота*	Нормированная высота**	Линейные размеры	Нормированные линейные размеры***
	<i>МГц</i>	<i>%</i>	<i>dBi</i>	<i>Мм</i>		<i>Мм</i>	
МСА (ФАФ-4Д)	450	1.8	-5.4	5.0	0.007	60*25	0.09*0.037
МСА (FR4)	450	2.2	-9.4	5.0	0.007	60*25	0.09*0.037
[20]	1770	6.8	0.95	6.1	0.036	15*10	0.09*0.06
Пеано [14]	2600	10	0	9.2	0.08	17*17	0.15*0.15
СВСЛА N1 [26]	446	0.7	-3.7	6.35	0.009	100*100	0.15*0.15
СВСЛА N2 [26]	455	1.1	-1.5	12.7	0.019	100*100	0.15*0.15
СВСЛА N3 [26]	434	0.7	-3.4	12.7	0.018	60*60	0.09*0.09

* высота между излучающими проводниками и экраном, которая меньше высоты антенны на 1-2 мм

** Отношение высоты антенны к длине рабочей волны

*** Отношение линейных размеров антенны к длине рабочей волны

Заключение

Основные результаты проведенных исследований состоят в следующем.

1. Проведен обзор литературы по низкопрофильным антеннам с вертикальной поляризацией и круговой ДН, который позволил выявить недостатки известных конструкций, препятствующие созданию низкопрофильной антенны с малыми линейными размерами.
2. Предложено новое решение поставленной задачи, состоящее в усовершенствовании известной антенны [27] добавлением второго полоскового проводника, уменьшающего излучение горизонтального электрического поля.
3. Разработаны антенны высотой 7 мм и размером 60×25 мм, согласованные с 50-омным кабелем на частоте 425 МГц с КСВН менее 2 в полосе 2%, которые работают как в свободном пространстве, так и на поверхности металлического листа.
4. Показано, что антенна, изготовленная из материала ФАФ-4, имеет КУ почти на 5 дБ больше по сравнению с антенной такого же размера, изготовленной из материала FR4, но её резонансная частота больше зависит от свойств поверхности, на которой расположена антенна.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Pomerleau and M. Fournier, "Inductively loaded monopole antenna," in *IEEE Int. Symp. on Antennas Propag.*, Dec. 1972, vol. 10, pp. 81–84.
2. C. Harrison, Jr., "Monopole with inductive loading," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 11, pp. 394–400, Jul. 1963.
3. R. C. Hansen, "Efficiency and matching tradeoffs for inductively loaded short antennas," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-23, pp. 430–435, 1975.
4. H. Nakano, H. Tagami, A. Yoshizawa, and J. Yamauchi, "Shortening ratios of modified dipole antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-32, pp. 385–386, 1984.
5. J. R. James and A. Henderson, "Electrically short monopole antennas with dielectric or ferrite coatings," *Proc. Inst. Elec. Eng.*, pp. 793–803, 1978.
6. Y. F. Lin, C. H. Lin, and P. S. Hall, "A miniature dielectric loaded monopole antenna for 2.4/5 GHz WLAN applications," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 16, pp. 591–593, Nov. 2006.
7. J. McLean, H. Foltz, and G. Crook, "Broadband, robust, low profile monopole incorporating top loading, dielectric loading, and a distributed capacitive feed mechanism," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Antennas Propag.*, Jul. 11–16, 1999, vol. 3, pp. 1562–1565.
8. J. Rashed and C. T. Tai, "A new class of resonant antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 39, pp. 1498–1430, Sept. 1991.
9. H. Chen, W. Chen, Y. Cheng, and Y. Lin, "Dualband monopole antenna," in *IEEE Int. Symp. on Antennas Propag.*, June 22–27, 2003, vol. 3, pp. 48–51.
10. C. Puente-Baliarda, J. Romeu, and A. Cardama, "The Koch monopole: A small fractal antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 48, pp. 1773–1781, Nov. 2000.
11. C. Puente-Baliarda, J. Romeu, R. Pous, and A. Cardama, "On the behavior of the Sierpinski multiband fractal antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 46, pp. 517–528, Apr. 1998.
12. I.-Fong Chen, "Bandwidth Enhancement of a Coupled Meander-Line-Feed High Gain Whip Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, pp. 3078–3082, Nov. 2007.
13. J. Zhu, A. Hoorfar, and N. Engehta, "Bandwidth, cross-polarization, and feed-point characteristics of matched hilbert antennas," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 2, pp. 2–5, 2003.
14. J. McVay and A. Hoorfar, "Miniaturization of top-loaded monopole antennas using Peano-curves," in *Proc. IEEE Radio and Wireless Symp.*, Jan. 9–11, 2007, pp. 253–256.
15. S. Tokumaru, "Multiplates: Low profile antennas," in *IEEE Int. Symp. on Antennas Propag.*, Oct. 1976, vol. 14, pp. 379–382.
16. Wonbin Hong, "Low-Profile, Multi-Element, Miniaturized Monopole Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, pp. 72–80, January. 2009.
17. A. Al-Zoubi, Fan Yang, A. Kishk, "Broadband Center-Fed Circular Patch-Ring Antenna With a Monopole Like Radiation Pattern," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, pp. 789–792, March 2009.
18. A. Al-Zoubi, F. Yang, A. Kishk, "A Low-Profile Dual-Band Surface Wave Antenna With a Monopole-Like Pattern," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, pp. 3404 – 3412, Dec. 2007.
19. S. Curto, P. McEvoy, X. Bao, M. Ammann, "Compact Patch Antenna for Electromagnetic Interaction With Human Tissue at 434 MHz," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, pp. 2564–2571, Sept. 2009.

20. F. Qureshi, M. Antoniadis, G. Eleftheriades, “A Compact and Low-Profile Metamaterial Ring Antenna with Vertical Polarization,” *IEEE Antennas and Wireless Prop. Let.*, vol. 4, 2005.
21. B. Guo, J. Fang, and W. Wang, “The study of the radiation characteristic for cavity backed antennas,” *Electron. Lett.*, pp. 236–237, 1999.
22. S. Dey, C. K. Aanandan, P. Mohanan, and K. G. Nair, “Analysis of cavity backed printed dipoles,” in *Proc. IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation*, Feb. 3, 1994, vol. 3, no. 3, pp. 173–174.
23. W. Hong, N. Behdad, and K. Sarabandi, “Size reduction of cavity-backed slot antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, pp. 1461–1466, 2006.
24. M. Li, M. K.A. Hummer, and K. Chang, “Theoretical and experimental study of the input impedance of the cylindrical cavity-backed rectangular slot antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 39, pp. 1158–1166, 1991.
25. M. Zheng, P. Hall, Q. Chen, and V. Fusco, “Cavity-backed active slot loop antenna,” in *Proc. IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation*, Jun. 21–26, 1998, vol. 3, pp. 1620–1623.
26. W. Hong, K. Sarabandi, “Low Profile Miniaturized Planar Antenna With Omnidirectional Vertically Polarized Radiation,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, pp.1533 – 1540, June 2008.
27. W. P. Dou and Y. W. M. Chia, “Novel meandered planar inverted-F antenna for triple-frequency operation,” *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol 27, pp. 58-60. Oct. 5, 2000.