ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ВИБРАТОРНО-РАМОЧНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-3-16-23

Гайнутдинов Тимур Аншарович,
МТУСИ, Москва, Россия, ***tedia@mtuci.ru***

Кочержевский Вадим Георгиевич,
МТУСИ, Москва, Россия, ***tedia@mtuci.ru***

Ключевые слова: *КСВ, собственная полоса согласования, петлевой монополь, вибраторно-рамочный излучатель, кросс-поляризационное излучение*

Проволочные антенны являются одними из самых распространенных антеннами абонентских станций систем широкополосного радиодоступа. Во многом скорость передачи информации в таких системах ограничивает качество согласования антенн, определяющее их рабочую полосу. Поскольку антенна находящееся на мобильной абонентской станции должна быть сравнительно компактной, обычные методы расширения полосы согласования, предполагающие увеличение размеров антенны, в данном случае оказываются неприемлемыми. Рассматриваются методы построения сравнительно компактных проволочных антенн, обладающих широкой полосой собственного согласования по коэффициенту стоячей волны (КСВ) не хуже 2. Описываются результаты оптимизации геометрии известных простых проволочных антенн, таких как диполь, петлевой вибратор и рамка с целью расширения их полосы согласования. Предлагается метод построения компактных проволочных частотно-независимых антенн в виде комбинации простых электрических и магнитных излучателей с единым питанием. Объединение в единую конструкцию антенны двух разных по направленным и поляризационным свойствам излучателей приводит к появлению ряда проблем, таких как значительное кросс-поляризационное излучение и частотная неустойчивость направленных характеристик антенн по основной поляризации. В качестве иллюстрации предлагаемого метода приводятся оригинальные конструкции двух вибраторно-рамочных излучателей, обладающих широкой полосой собственного согласования, одна из которых, обладая меньшими размерами имеет ярко выраженную частотную дисперсию направленных и поляризационных свойств, а вторая при несколько больших размерах лишена этих недостатков, изначально свойственным гибридным конструкциям. Для обеих предлагаемых конструкций приведены численные результаты по расчету частотного поведения входного сопротивления и КСВ, коэффициента усиления по основной и кроссовой поляризации и типичный вид диаграмм направленности в полосе согласования антенны.

Информация об авторах:
Гайнутдинов Тимур Аншарович*, к.т.н., доцент кафедры ТЭДиА, МТУСИ, Москва Россия,*
Кочержевский Вадим Георгиевич*, старший преподаватель кафедры ТЭДиА, МТУСИ, Москва Россия*

Для цитирования:
Гайнутдинов Т.А., Кочержевский В.Г. Широкополосный вибраторно-рамочный излучатель // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №3. С. 16-23.

For citation:
Gainutdinov T.A., Kocherzhewskiy V.G. (2020) The broadband vibrator-loop antenna. *T-Comm*, vol. 14, no.3, pp. 16-23. (*in Russian*)

Введение

Переход к цифровым стандартам передачи информации привел к ужесточению требований к качеству согласования антенн, используемых в соответствующих каналах связи. Например, для передачи цифрового радиовещательного сигнала требуется величина коэффициента стоячей волны (КСВ) антенны не более (1,05-1,1) [1], в то время как передача аналогового радио позволяло использовать КСВ не более 2. Передающие антенны систем цифрового телевидения должны иметь сходную с цифровым радиовещанием величину максимально допустимого КСВ, в то время как для передающего аналогового телевидения допускалось использование антенн с КСВ не более 1,5 [2].

В системах мобильного радиодоступа фактически стало стандартом требование на максимально допустимый КСВ не более 2 [3], причем как для оборудования стационарной точки доступа, так и для конечного мобильного устройства. В связи с этим все более актуальным, особенно для систем мобильного радиодоступа, становится вопрос о создании компактных приемо-передающих антенн с расширенной полосой согласования с КСВ не хуже 2. Отметим, что расширение полосы согласования не только позволяет увеличить скорость передачи информации при расширении полосы рабочих частот, но и улучшить качество согласования антенны, и соответственно уменьшить искажения, вносимые несогласованным фидерным трактом в передаваемую цифровую последовательность при сохранении действующей полосы рабочих частот.

Результаты исследований

Целью работы является разработка сравнительно компактной проволочной антенны, обладающей расширенной, по сравнению известными аналогами, собственной, т.е. без применения дополнительных согласующих устройств, полосой согласования по уровню КСВ не более 2.

Рассмотрим сначала наиболее простые проволочные антенны и оценим их собственную полосу согласования по уровню КСВ не более 2. В качестве питающей линии будем использовать фидер с волновым сопротивлением 50, 75,100 или 150 Ом, причем для каждой антенны будем подбирать то волновое сопротивление, которое обеспечивает наибольшую полосу согласования.

В качестве первой антенны, оценим полосу собственного согласования симметричного электрического вибратора - диполя [4] (рис. 1.)

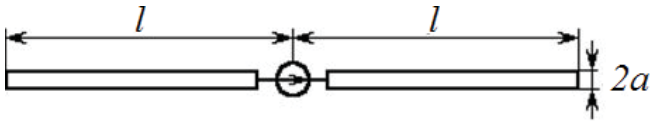

Рис. 1. Симметричный электрический вибратор

На рисунке 2а,б приведена зависимость относительной полосы согласования ($2\Delta f/f_0$) в процентах по уровню КСВ не более 2 от отношения длины плеча диполя l к длине волны λ_0 на центральной частоте f_0 для тонкого диполя (a/λ_0=0,001 – рис. 2а) и толстого диполя (a/λ_0=0,01 – рис. 2б). Волновое сопротивление фидера равно 75 Ом.

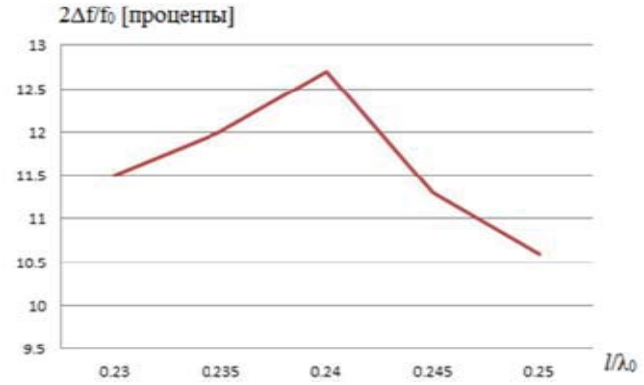

Рис. 2а Относительная полоса согласования тонкого диполя

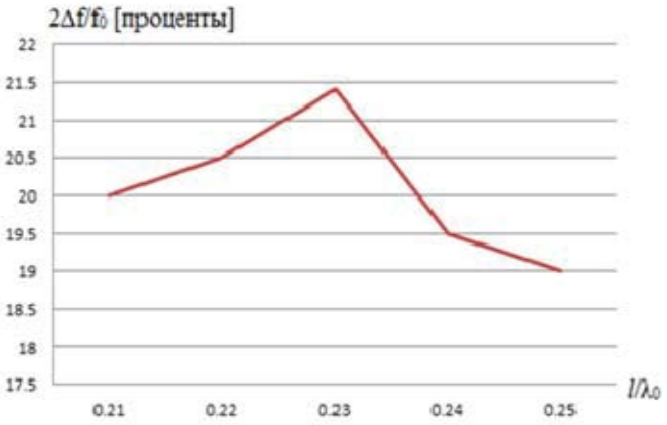

Рис. 2б. Относительная полоса согласования толстого диполя

Как видно из сравнения рис. 2а,б толщина диполя существенно влияет на численные значения полосы – при утолщении диполя в 10 раз полоса согласования возрастает практически в два раза и скорость падения полосы при отходе от оптимальной длины также существенно меньше для толстых диполей. При дальнейшем отходе от оптимальной высоты полоса согласования имеет какое-то численное значение, но центральная, рабочая частота не попадает в эту полосу, вследствие чего говорить о полосе согласования в этом случае не приходится. Поэтому во всех остальных, приведенных в статье численных результатов, будут указываться только те варианты построения антенн и соответствующие им полосы, для которых центральная частота действительно находится в центре полосы согласования.

В качестве второй простой проволочной антенны был рассмотрен широко известный в литературе петлевой вибратор (вибратор Пистолькорса) [4]. Поскольку в симметричном варианте петлевой вибратор является сравнительно высокоомной антенной, входное сопротивление которой на резонансной частоте близко к 300 Ом, то определялась собственная полоса согласования петлевого монополя, схематичный вид которого представлен на рис. 3 [5], а волновое сопротивление питающего фидера выбиралось равным 150 Ом.

Собственная относительная полоса согласования петлевого монополя, такой же толщины, как и толстый диполь (a/λ_0 = 0,01), оказалась равной 33,5%, что примерно в 1,5 раза больше, чем у толстого диполя. При этом оптимальная длина (высота) монополя, обладающего максимальной полосой собственного согласования составляет 0,22 λ_0, что чуть короче, чем аналогичный размер толстого диполя – 0,23 λ_0.

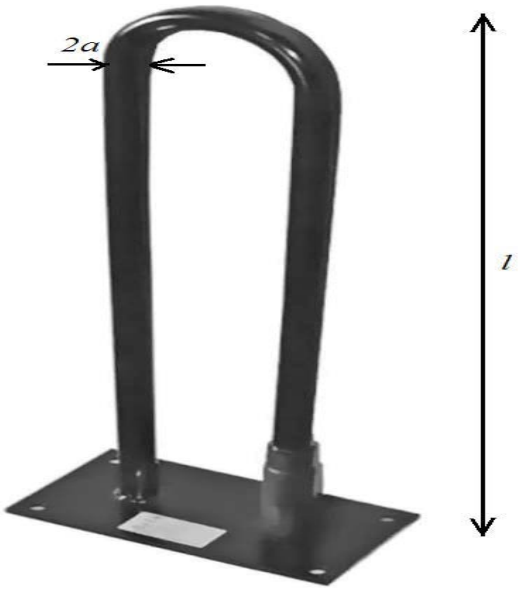

Рис. 3. Петлевой монополь

Фактически, петлевой вибратор, являясь существенно более широкополосной антенной по сравнению с диполем, не позволяет серьезно уменьшать свои размеры при сохранении полосы согласования, соизмеримой с полосой согласования диполя. На наш взгляд, интересны результаты по расчету собственных полос согласования модификаций петлевого монополя – сдвоенного петлевого монополя и сдвоенного петлевого монополя с двумя оттяжками [6], изображенных на рис. 4а,б.

Несмотря на сходство антенн, их собственные полосы и оптимальные высоты существенно отличаются. У сдвоенного петлевого монополя отличная собственная полоса 43,9% при сравнительно большей высоте антенны 0,24 λ_0, а сдвоенной петлевой монополь, сильно проигрывая по собственной полосе согласования, равной 8,8%, достигает ее при существенно меньшой высоте антенны 0,145 λ_0. При расчете собственной полосы согласования обеих антенн выбирался фидер с волновым сопротивлением 50 Ом.

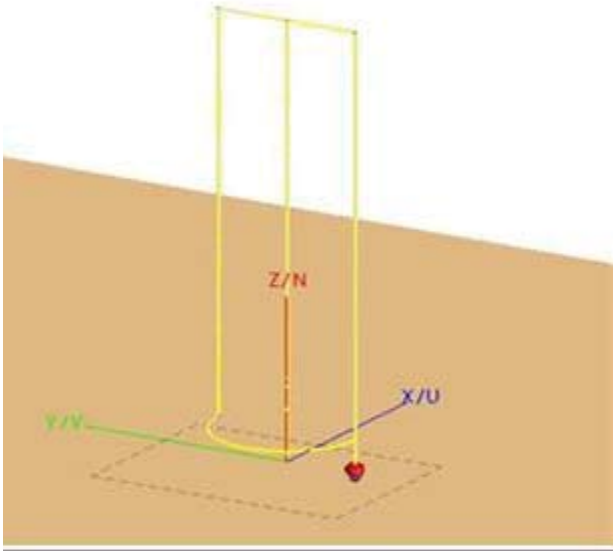

Рис. 4а. Сдвоенный петлевой монополь

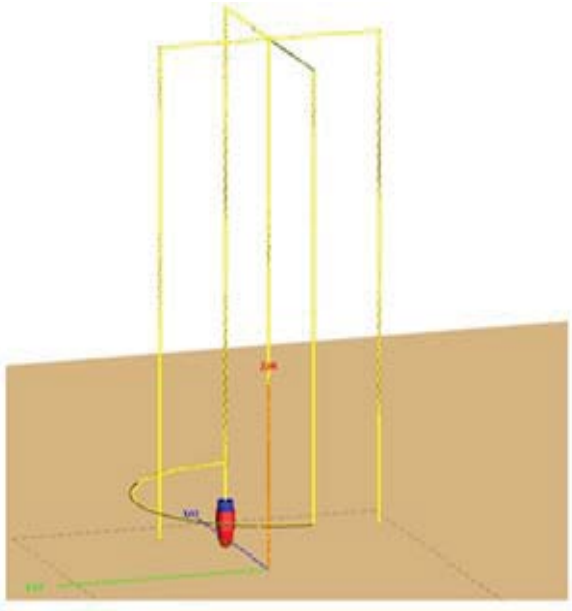

Рис. 4б. Сдвоенный петлевой монополь с двумя оттяжками

Отметим, что сдвоенный петлевой монополь имеет собственную полосу согласования, соизмеримую с полосой согласования антенн – бабочка (bow-tie antenna) [7], при существенно большей простоте изготовления.

Все петлевые вибраторные антенны, по сути, являются рамочными антеннами, поэтому нами был произведен расчет входного сопротивления и собственной полосы согласования квадратной рамочной антенны с длиной стороны l. Зависимость активного и реактивного сопротивления такой рамки с длиной стороны l = 0,12 м (0,251 λ_0) и толщиной провода (a/λ_0 = 0,017) для всего диапазона наземного цифрового ТВ в нашей стране (470МГц-790МГц) приведены на рис. 5, а зависимость КСВ от частоты при согласовании на виртуальный коаксиальный кабель с волновым сопротивлением $Z_в$=300 Ом представлена на рис. 6.

Как видно из рис. 5 рамочные антенны являются потенциально гораздо более широкополосными антеннами по сравнению с вибраторными из-за наличия гораздо ближе двух стоящих в частотной области резонансов реактивных сопротивлений.

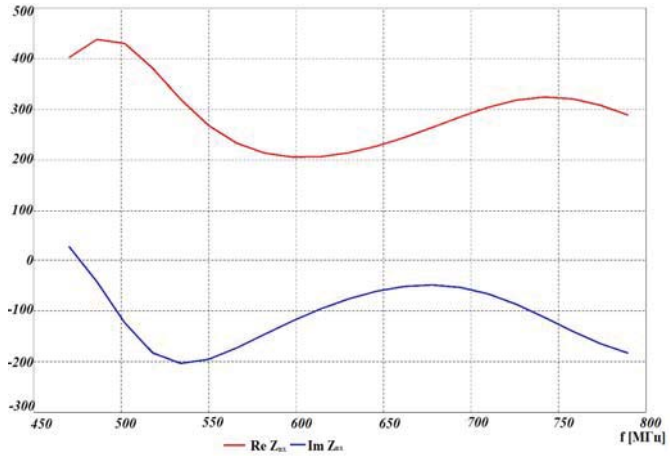

Рис. 5. Зависимость входного сопротивления квадратной рамки от частоты

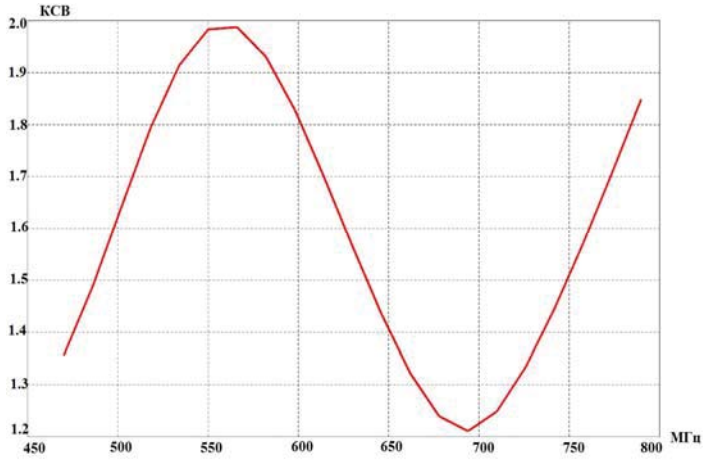

Рис. 6. Зависимость КСВ квадратной рамки от частоты

Однако высокоомность активного сопротивления рамки затрудняет практическое применение подобных антенн при подводе питания к ним через стандартные коаксиальные или микрополосковые линии.

Кроме того, как видно из рис. 6, практически в центре рабочего диапазона КСВ рамки близок к 2, вследствие чего для его гарантированного не превышения использовалась такая сравнительно толстая конструкция с $a/\lambda_0 = 0{,}017$.

Исходя из полученных результатов частотной зависимости входного сопротивления простой рамочной антенны и общеизвестных зависимостей входного сопротивления дипольных антенн [4, 5] предлагается создать гибридную антенну, содержащую в себе как вибраторную (дипольную) часть, обеспечивающую сравнительную малоомность активного сопротивления антенну и формирующего диаграмму направленности “восьмерочного” типа, так и рамочную часть, обеспечивающую немонотонный характер изменения реактивного сопротивления в пределах широкой частотной области при небольшой дисперсии этого сопротивления.

Если использовать физический подход к решению поставленной задачи, то суть идеи построения подобной антенны состоит в следующем: поскольку в ближнем поле короткого по сравнению с $\lambda_0/2$ диполя преобладает запасённая электрическая энергия и основным элементом эквивалентной схемы его входного сопротивления является ёмкость, тогда как для рамочной антенны короткого по сравнению λ_0 периметра превалирует магнитная запасённая энергия и, соответственно, индуктивность, а в диапазоне длин диполя от $\lambda_0/2$ до λ_0 и соответственно периметров рамки от λ_0 до $2\lambda_0$ ситуация абсолютно обратная, то вполне естественно попытаться свести к минимуму результат взаимодействия запасенных энергий в сравнительно широком частотном диапазоне, обеспечивая расширение собственной полосы согласования такого вибраторно-рамочного излучателя.

На рисунке 7 представлен первый вариант вибраторно-рамочного излучателя, обладающего широкой полосой собственного согласования при использовании в качестве питающей линии фидера с волновым сопротивлением $Z_в = 75$ Ом. Излучатель представляет из себя диполь с длиной плеча $l=0.3\ \lambda_0$ и круглую рамку радиуса $R = 0{,}157\ \lambda_0$. Плоскость рамки перпендикулярна оси диполя. Толщина всех проводов антенны $a/\lambda_0 = 0{,}01$. Питание подводится как к центру диполя, так и к вершине рамки, как указано на рис. 7.

Рис. 7. Вибраторно-рамочный излучатель

На рисунках 8 и 9 приведены кривые зависимости входного сопротивления антенны и КСВ от частоты в диапазоне 470-790 МГц соответственно.

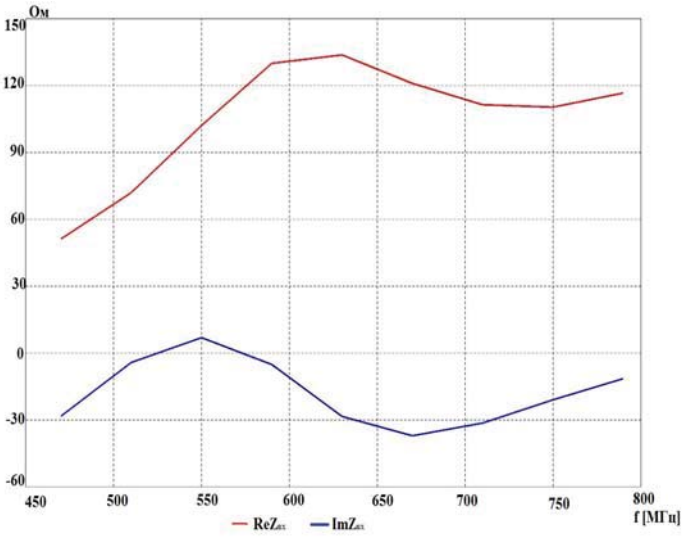

Рис. 8. Зависимость входного сопротивления вибраторно-рамочного излучателя от частоты

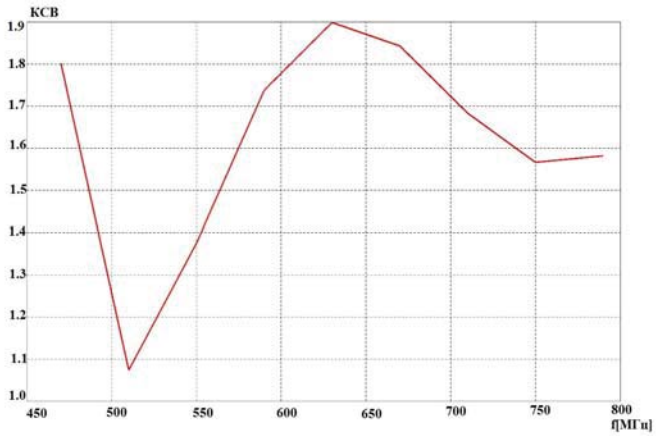

Рис. 9. Зависимость КСВ вибраторно-рамочного излучателя от частоты

Полоса собственного согласования такого излучателя по КСВ не более 2 составляет от 465 до 885 МГц, что составляет 62,2% от центральной частоты 675 МГц.

Диаграмма направленности (ДН) излучателя в горизонтальной плоскости по основной для вибраторной части антенны поляризации, которая в случае ориентации излучателя, изображенной на рис. 7, является горизонтальной, при-

ведена на рис. 10, а ДН излучателя в горизонтальной плоскости по кросс-поляризации (вертикальной) представлена на рис. 11. Обе ДН приведены на средней частоте 675 МГц.

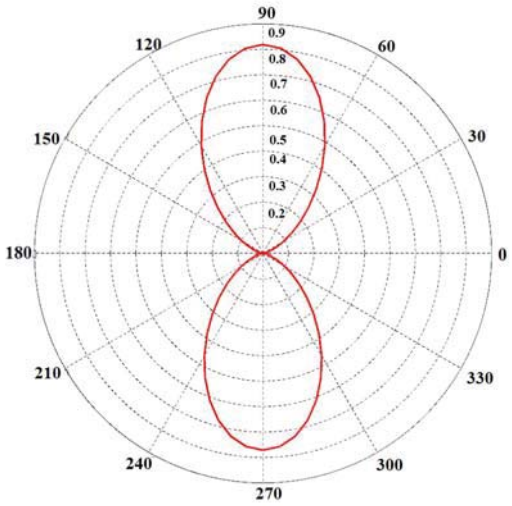

Рис. 10. ДН излучателя по основной поляризации в горизонтальной плоскости

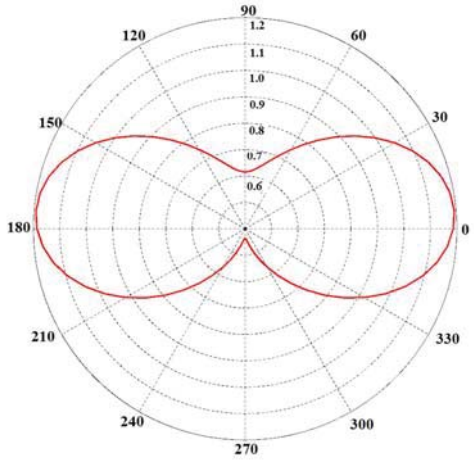

Рис. 11. ДН излучателя по кросс-поляризации в горизонтальной плоскости

Зависимость максимального КУ антенны по основной поляризации от частоты представлена на рис. 12, а аналогичная зависимость максимального КУ антенны по кросс-поляризации на рис. 13.

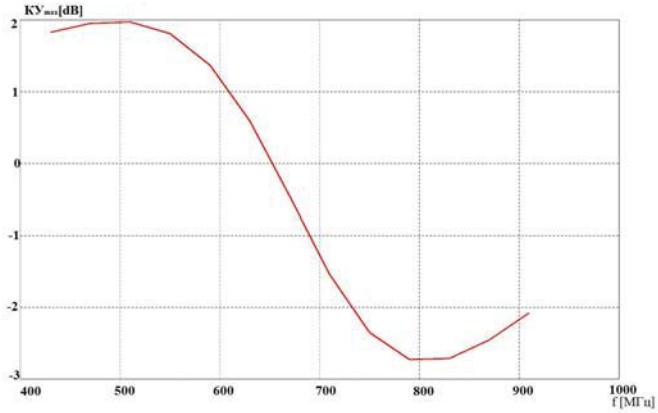

Рис. 12. Зависимость максимального КУ по основной поляризации от частоты

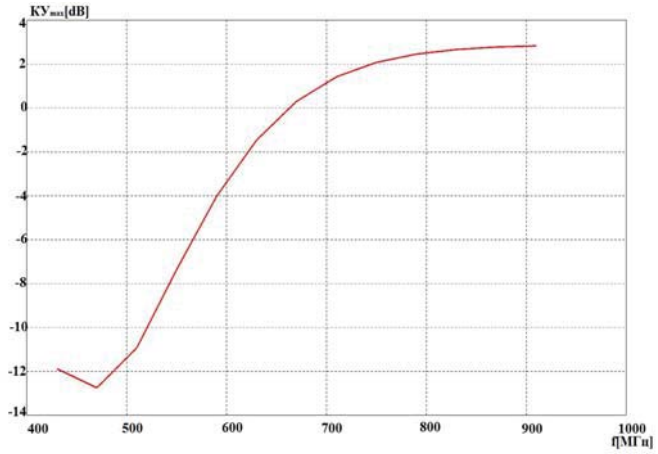

Рис. 13. Зависимость максимального КУ по кроссовой поляризации от частоты

Как видно из рис. 12, максимальный КУ меняется в пределах от 2 до -2 дБ, причем отрицательные значения КУ соответствуют верхней части диапазона диапазону. Для всех частот диапазона направлением максимального излучения по основной поляризации является направление нормали к оси вибратора.

Из сопоставления рис. 12 и 13 следует, что начиная с середины частотного диапазона КУ по кросс-поляризации по абсолютным значениям начинает превосходить КУ по основной поляризации и фактически антенна начинает передавать и принимать поле вертикальной поляризации, причем направления максимального излучения по кросс-поляризации, как видно из рис. 11 совпадают с направлениями оси вибратора.

Таким образом, меняется не только вид основной поляризации, но и направления пространственной избирательности антенны. В силу вышеизложенного можно считать, что такая, согласованная в широкой полосе частот антенна обладает весьма посредственными направленными и поляризационными характеристиками. Кроме того, как видно из самой конструкции антенны (рис. 7), антенну невозможно выполнить в несимметричном варианте, так как плоскость рамки в этом случае будет совпадать с плоскостью экрана, например с крышей автомобиля. Для систем мобильной передачи данных это весьма серьезный недостаток, если приоритетом является широкая полоса согласования, а жестких требований к направленным и поляризационным характеристикам не предъявляется и возможен вариант симметричного конструктивного выполнения конструкция, изображенная на рис. 7 является на наш взгляд, весьма интересной.

Другой вариант широкополосного вибраторно-рамочного излучателя, допускающий несимметричное выполнение и обладающей гораздо лучшими направленными и поляризационными свойствами, отличной полосой собственного согласования, но большим размером, представлен на рис. 14.

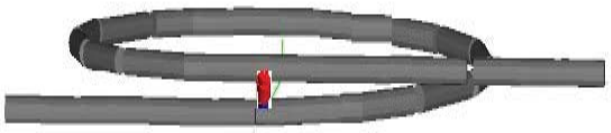

Рис. 14. Вибраторно-рамочный излучатель

Излучатель представляет из себя диполь с длиной плеча l = 0,42 λ_0 и круглую рамку радиуса R = 0,56 λ_0. Ось диполя располагается в плоскости рамки оси диполя. Толщина всех проводов антенны a/λ_0 = 0,013. Питание подводится как к центру диполя, так и к вершине рамки, как указано на рис. 14.

На рисунках 15 и 16 приведены кривые зависимости входного сопротивления антенны и КСВ от частоты в диапазоне 430-930 МГц соответственно.

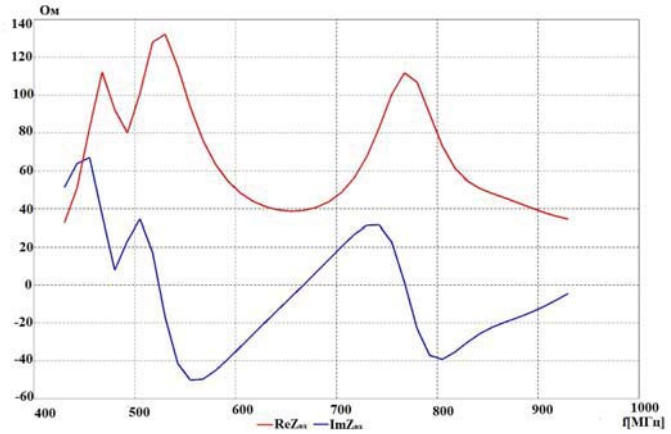

Рис.15 Зависимость входного сопротивления вибраторно-рамочного излучателя от частоты

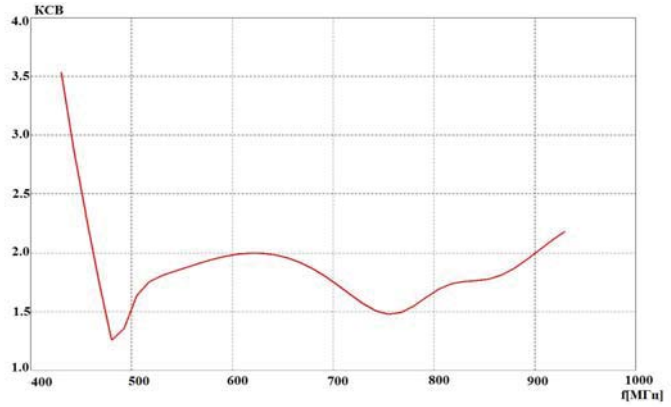

Рис. 16. Зависимость КСВ вибраторно-рамочного излучателя от частоты

Полоса собственного согласования такого излучателя по КСВ не более 2 при согласовании с 75-Омным фидером, как видно из рис. 16 составляет от 460 до 900 МГц, что составляет 64,7% от центральной частоты 680 МГц.

Диаграммы направленности по поляризации, определяемой дипольной частью антенны, в плоскости рамки на всех частотах имеют максимум в направлении нормали к оси диполя от рамки.

На низких частотах ДН имеет двулепестковый характер, свойственный обычным вибраторным антеннам (см. рис. 17), на средних частотах ДН носит однонаправленный характер с существенным уровнем боковых лепестко (см. рис. 18), на высоких частотах в ДН появляются излучение в направление на рамку и “заплывают” нули между главным и боковыми лепестками (см. рис. 19).

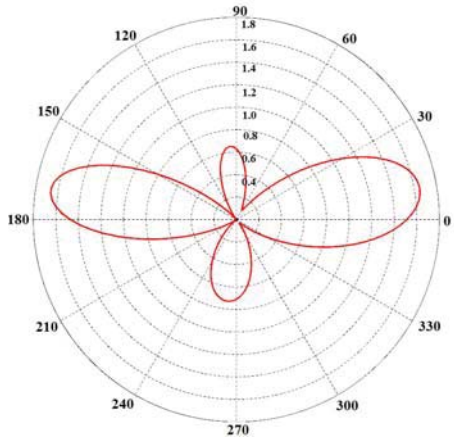

Рис. 17. ДН излучателя по основной поляризации в плоскости рамки на частоте 470 МГц

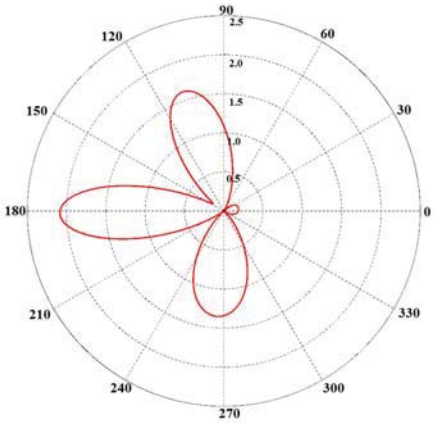

Рис. 18. ДН излучателя по основной поляризации в плоскости рамки на частоте 630 МГц

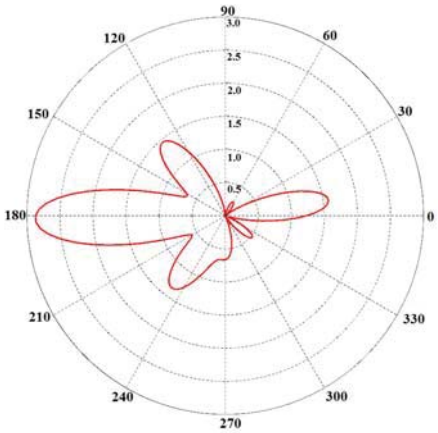

Рис. 19. ДН излучателя по основной поляризации в плоскости рамки на частоте 790 МГц

Зависимость КУ в направлении максимального излучения по поляризации диполя от частоты приведена на рис. 20.

Как видно из этого рисунка, КУ растет по мере роста частоты и достигает величины 4,5 дБ у верхней границы частотного диапазона. Вблизи нижней границы КУ мал и составляет около 0 дБ, однако этот частотный участок весьма невелик (от 470 до 500 МГц). В подавляющей части диапазона КУ антенны составляет 3-4 дБ.

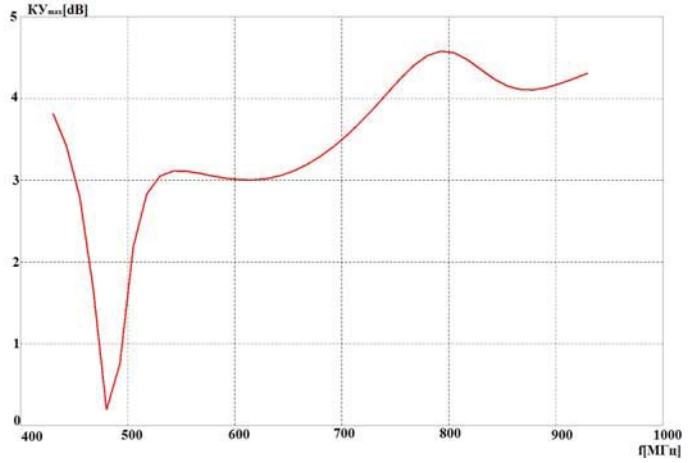

Рис. 20. Зависимость максимального КУ по основной поляризации от частоты

Коэффициент усиления по поляризации, определяемый рамкой, невелик по сравнению с КУ по основной поляризации и достигает максимума на верхних частотах. Величина этого максимума -8 дБ, на нижних частотах КУ по кросс-поляризации -20-22 дБ, в силу чего можно говорить о хороших поляризационных свойствах предлагаемого составного излучателя. Устойчивость по частоте направления максимального излучения позволяет делать вывод и о хороших направленных свойствах.

Таким образом, приведенный на рис. 14 вибраторно-рамочный излучатель обладает широкой (64,7% процентов от центральной частоты) собственной полосой согласования по КСВ не хуже 2, устойчивыми направленными и поляризационными свойствами. Максимальный поперечный размер антенны равен длине диполя $L=2l=0{,}84\ \lambda_0$, а максимальный продольный диаметру рамки $d=2R=1{,}12\ \lambda_0$. В случае несимметричного выполнения возможно уменьшение всех размеров антенны в два раза, однако это потребует наличие соответствующего проводящего экрана, размером не менее 2-3 λ_0.

Заключение

В заключении отметим, что на наш взгляд, сама идея совмещения в одной антенне как электрической части, реализуемой в виде вибраторной субантенны, так и магнитной части, реализуемой либо в виде рамочной, либо в виде ферритовой субантенны, является по сути развитием принципа самодополнительности [4, 5], позволяя реализовывать сравнительно компактные широкополосные антенны.

Литература

1. *Варламов О.В., Горегляд В.Д.* Расширение полосы согласования передающих вещательных антенн диапазона ДВ для работы в стандарте DRM // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. № 1. 2013. С. 18-22.
2. *Бузов А.Л.* УКВ антенны для радиосвязи с подвижными объектами, радиовещания и телевидения. М.: Радио и связь, 1997. 293 с.
3. *Шахнович И.В.* Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2006. 288 с.
4. *Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г.*, под ред. Г.А. Ерохина Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. М.: Москва. Горячая линия – Телеком 2007. 491 с.
5. *Сазонов Д.М.* Устройства СВЧ и антенны. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
6. *Гайнутдинов Т.А., Гаранкина Н.И., Кочержевский В.Г.* Укороченный несимметричный петлевой вибратор // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. № 8. С. 9-17.
7. Modern Antenna Handbook. Edited by Constantine A. Balanis. Wiley-Interscience, 2008. 1704 p.

THE BROADBAND VIBRATOR-LOOP ANTENNA

Timur A. Gainutdinov, *Assistant professor, Cathedra of Technical Electrodynamics and Antennas, MTUCI, Moscow, Russia,* ***tedia@mtuci.ru***

Vadim G. Kocherzhewskiy, *Senior lecturer, Cathedra of Technical Electrodynamics and Antennas, MTUCI, Moscow, Russia*

Abstract

Wire antennas are one of the most widely distributed antennas of subscriber stations of broadband radio access systems. In many ways, the speed of information transmission in such systems limits the quality of antenna matching, which determines their working band. Since the antenna located at the mobile subscriber station must be comparatively compact, conventional methods of expansion of the matching field, involving an increase in the size of the antenna, in this case are unacceptable. The paper considers the methods of constructing comparatively compact wire antennas with a wide band of their own matching by the voltage standing wave coefficient (VSWR) not worse than 2. The results of optimization of the geometry of known simple wire antennas, such as dipole, loop vibrator and coil in order to expand their bandwidth are described. A method of constructing compact wire frequency-independent antennas in the form of a combination of simple electric and magnetic radiators with a single power supply is proposed. Combining into a single antenna structure two different directional and polarization properties of the radiators leads to the emergence of a number of problems, such as significant cross-polarization radiation and frequency instability of the main polarization pattern. As an illustration of the proposed method, the original designs of two vibratory-loop antennas with a wide band of their own coordination are given, one of which, having smaller dimensions, has a pronounced frequency dispersion of directional and polarization properties, and the second, with slightly larger dimensions, has these disadvantages, which are originally characteristic of hybrid designs. For both of the proposed structures, numerical results are given for the calculation of the frequency behavior of the input impedance and VSWR, the gain on the main and cross polarization, and a typical view of the radiation patterns in the field of antenna matching.

Keywords: *VSWR, antenna natural matching, loop monopole, vibrator-loop antenna, cross-polarization radiation.*

References

1. Varlamov O.V., Goreglyad V.D. (2013). Bandwidth Extension LW Transmitting Broadcasting Antenna Systems for Operating in DRM Mode. *T-Comm*. No. 1, pp. 18-23.
2. Buzov A.L. et al. (1997). *VHF antennas for radio communication with mobile objects, broadcasting and television.* Moscow: Radio and communications. 293 p.
3. Shakhnovich I.V. (2006). *Modern technologies of a wireless communication*. Moscow: Technosphere. 288 p.
4. Erokhin G.A. Chernyshev O.V. et al. (2007). *Antenna Devices and Radio wave Propagation*. Moscow: Hot Line – Telecom. 491 p.
5. Sazonov D.M. (1988). *SHF devices and antennas*. Moscow: The higher school. 432p.
6. Gainutdinov T.A., Garankina N.I., Kocherzhewskiy V.G. (2016). The shortened asymmetrical loopback vibrator. *T-Comm*. No. 8, pp. 9-17.
7. Modern Antenna Handbook. Edited by Constantine A. Balanis. Wiley-Interscience, 2008. 1704 p.

Information about authors:

Timur A. Gainutdinov, *Assistant professor, Cathedra of Technical Electrodynamics and Antennas, MTUCI, Moscow, Russia*

Vadim G. Kocherzhewskiy, *Senior lecturer, Cathedra of Technical Electrodynamics and Antennas, MTUCI, Moscow, Russia*