

АНТЕННЫ, СВЧ-УСТРОЙСТВА И ИХ ТЕХНОЛОГИИ/ANTENNAS, MICROWAVE DEVICES AND THEIR TECHNOLOGIES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43>

ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ ОТРАЖАЮЩИХ СТРУКТУР ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ И СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН

Научная статья

Шишкин М.С.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-6289-6330;

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (mikkhail666[at]gmail.com)

Аннотация

Рассматриваются уникальные методы в разработке широкополосных (с полосой согласования около 40%) и сверхширокополосных (с полосой согласования около 100%) антенн с высоким коэффициентом усиления (не менее 10 дБи в рабочей полосе частот). На основе ранее опубликованных исследований, посвященных конструкциям составных микрополосковых антенн с модифицированными активным и пассивными излучателями, в данной статье предлагается методика значительного увеличения (от 2 до 4 дБ во всем рабочем частотном диапазоне) коэффициента направленного действия (коэффициента усиления) рассматриваемых антенн. Суть метода заключается в применении объемных отражателей (рефлекторов) в форме перевернутой пирамиды вместо плоских экранов. В статье представлены результаты трехмерного моделирования конструкций, подтверждающие применимость предлагаемых методов.

Ключевые слова: микрополосковая антенна, широкополосная антенна, СШП антенна, высокий коэффициент усиления, резонаторная антенна.

APPLICATION OF VOLUMETRIC REFLECTING STRUCTURES TO IMPROVE THE RADIATION CHARACTERISTICS OF WIDEBAND AND ULTRAWIDEBAND MICROSTRIP ANTENNAS

Research article

Shishkin M.S.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-6289-6330;

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (mikkhail666[at]gmail.com)

Abstract

Unique methods are studied in the designing of wideband (with a matching bandwidth of about 40%) and ultrawideband (with a matching bandwidth of about 100%) antennas with high gain (at least 10 dBi in the operating frequency band). This article implies a method for significantly increasing (up to 3–4 dB in the entire operating frequency range) the directivity (gain) of the analyzed stacked microstrip antennas with modified active and passive exciters based on previously published studies regarding their designs. The essence of the proposed method is the use of volumetric reflectors (cavities) in the shape of an inverted pyramid, instead of flat screens. The article presents the results of three-dimensional simulation of structures, confirming the applicability of the methods under study.

Keywords: microstrip antenna, wideband antenna, UWB antenna, high-gain antenna, cavity-backed antenna.

Введение

Направленные антенны, то есть антенны с высоким коэффициентом направленного действия (КНД), или с высоким коэффициентом усиления (КУ) широко используются в области современных радиотехнических систем (РТС), таких как системы беспроводной связи (беспроводной передачи данных) прямой видимости или спутниковой связи, системах радиомониторинга, измерительных лабораториях, при организации связи в робототехнических системах и комплексах (в беспилотных системах), в наземных или бортовых радиолокационных станциях и т. д. [1], [2], [3].

Практически во всех современных РТС требуется работа как минимум в широкой полосе частот, а часто и в сверхширокой, в том числе работа в нескольких полосах частот, часто широких. Тема разработки компактных сверхширокополосных (СШП) антенн с высоким КНД, кроме прочего, актуальна ввиду распространенности систем радиомониторинга, где требуется обнаружение источников радиоизлучения на достаточном удалении с возможностью оперативно анализировать достаточно большие участки спектра, а габариты антенн и их количество имеют значение.

Во многих работах, например [4], [5], [6], [7], описаны методы повышения КУ антенны. Они часто связаны с расширением поверхности излучения антенны: рупорные антенны, параболические зеркальные антенны и их различные модификации. Кроме того, используются конструкции, называемые антенными решетками, состоящие из множества отдельных излучателей, соединенных особым образом в единую излучающую систему, в том числе широкополосные и сверхширокополосные [8], [9], [10]. В [11], [12] приводится некоторый анализ широкополосных (ШП) антенн, с описанием недостатков той или иной конструкции, а также приводятся уникальные решения, позволяющие добиться работы антенн в широком и сверхшироком диапазонах частот с формированием направленной диаграммы с КУ не менее 10 дБи в рабочей полосе частот.

Отметим, что микрополосковые антенны имеют ряд существенных преимуществ, по сравнению с другими типами. Микрополосковые антенны чаще всего просты в изготовлении, при этом изготовление возможно с достаточно высокой точностью при небольших финансовых затратах, в сравнении, например, с рупорными или зеркальными антеннами. То есть рассчитанную (смоделированную) топологию легко воспроизвести с высокой точностью соответствия. Известны работы, например, [13], [14], [15], [16], где за счет формы рефлектора (резонатора) авторам удалось существенно улучшить коэффициент усиления микрополосковой антенны. Такой подход позволяет, во-первых, улучшить характеристики излучения антенны, во-вторых, сохранить прочие полезные свойства микрополосковой антенны, например полосу согласования при заданном уровне.

В данной статье на примере широкополосной [11] и сверхширокополосной [12] составных микрополосковых антенн рассмотрены возможности увеличения коэффициента усиления за счет специальной конструкции отражателя — в виде перевернутой пирамиды. Предлагаемый метод позволил увеличить КУ антенн на 3–4 дБ в рабочих диапазонах частот, при этом полоса согласования антенн не ухудшилась. После добавления объемного рефлектора в конструкции антенн коэффициент усиления поднялся примерно до 15–17 дБи, что ставит такие антенны в один ряд с известными измерительными рупорными антеннами с аналогичными характеристиками, однако с более высокими требованиями к точности изготовления.

Краткое описание исследуемых широкополосных антенн

В качестве первого примера рассмотрим ШП антенну из [11], где за счет использования Е-образного активного элемента в конструкции составной микрополосковой антенны удалось получить высокий коэффициент усиления (от 10 до 13 дБи) с полосой согласования около 33% при $|S_{11}| \leq 10$ дБ и около 26% при $|S_{11}| \leq 15$ дБ. Внешний вид антенны показан на рисунке 1. В данной антенне активный излучатель крепится к плоскому экрану на расстоянии 3 мм с помощью диэлектрической (нейлоновой) монтажной стойки, пассивные излучатели крепятся к плоскому экрану на высоте 6 и 7 мм с помощью металлических монтажных стоек.

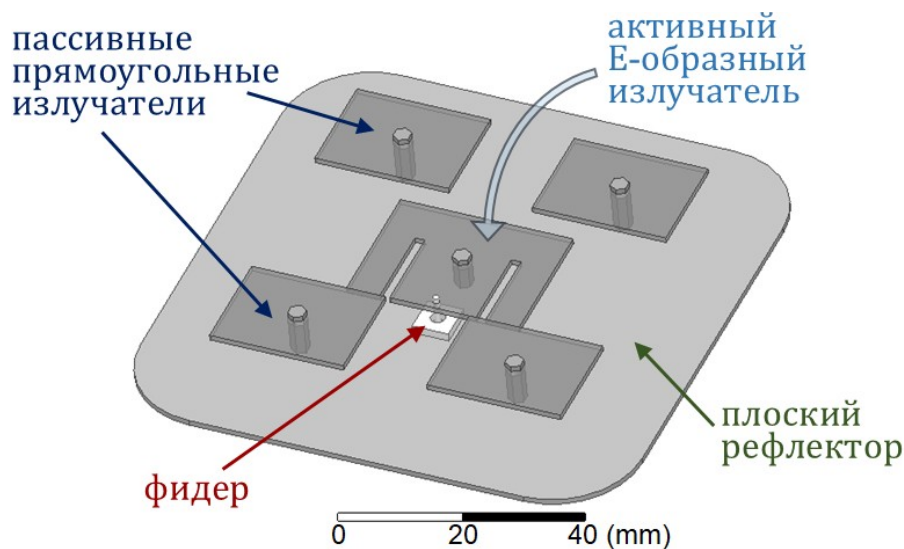


Рисунок 1 - Исследуемая широкополосная направленная антенна из [11]
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.1>

Рассмотрим пример СШП антенны из [12], где за счет использования модифицированного Е-образного активного излучателя в конструкции составной микрополосковой антенны и четырех односторонних пассивных элементов типа «кольцевая бабочка» удалось получить высокий коэффициент усиления (от 10 до 13 дБи) с измеренной полосой согласования около 100% (от 3850 до 12000 МГц) при $|S_{11}| \leq 10$ дБ и около 85% при уровне $|S_{11}| \leq 15$ дБ. Внешний вид антенны показан на рисунке 2. В данной антенне активный излучатель крепится к плоскому экрану на расстоянии 3 мм с помощью диэлектрических (нейлоновых) монтажных стоек, пассивные излучатели крепятся к экрану на высоте 6 мм с помощью металлических монтажных стоек.

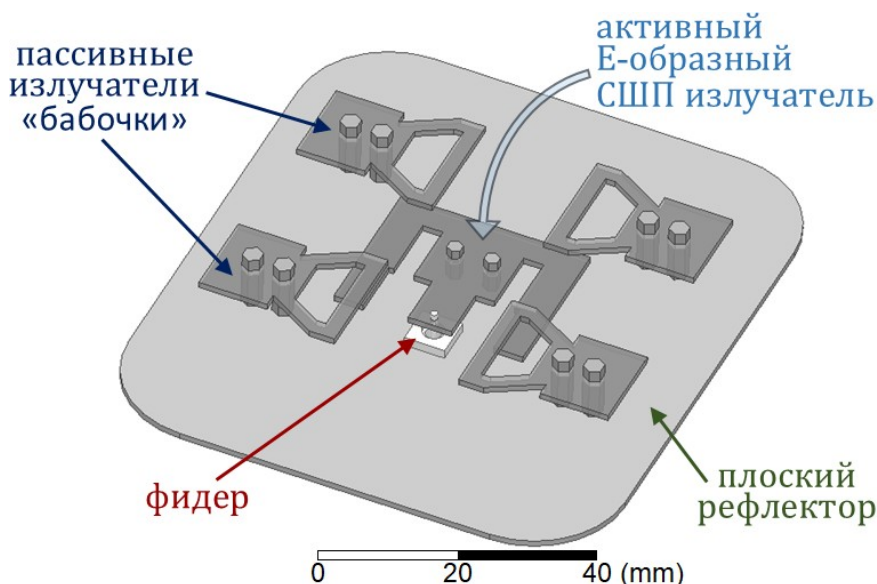


Рисунок 2 - Исследуемая конструкция сверхширокополосной направленной антенны из [12]
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.2>

Несмотря на достигнутые высокие характеристики рассматриваемых антенн из [11], [12], предполагается, что путем оптимизации рефлектора возможно улучшить некоторые из них, в частности увеличить КУ.

Методика увеличения направленности антенны

В [17] представлены исследования, показывающие влияние формы и размера объемного рефлектора (резонатора) на исследуемые антенны из [11], [12]. Суть применения резонатора состоит в том, что он позволяет улучшить распределение поля на излучающих частях антенны, тем самым улучшить ее характеристики излучения. Классическая упрощенная эквивалентная схема любой резонаторной антенны показана на рисунке 3. В схеме параллельно включенный колебательный контур резонатора указывает на улучшение работы излучающей системы в целом, без изменения (смещения, сужения или расширения) ее частотных характеристик.

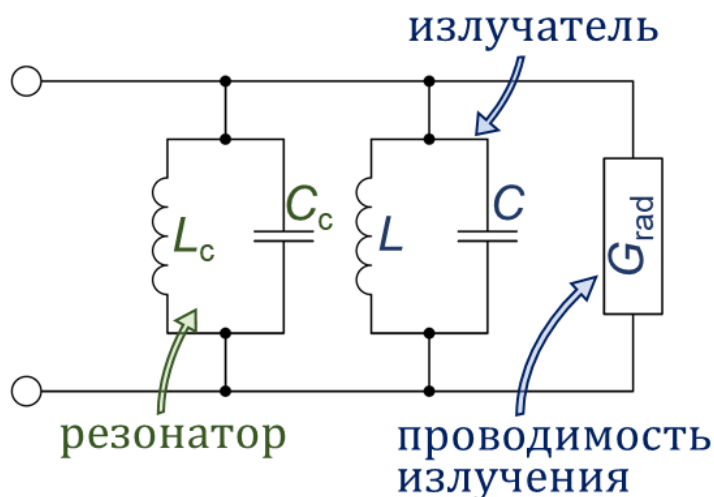


Рисунок 3 - Упрощенная эквивалентная схема резонаторной антенны
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.3>

У реальной антенны, в частности микрополосковой, эквивалентная схема излучателя представляет собой более сложную комбинацию из последовательно соединенных RLC-контуров, каждый из которых настроен на определенную частоту. В первую очередь это объясняется тем, что в таких антеннах помимо возбуждения основной моды появляются моды высших порядков TM_{200} , TM_{300} , TM_{400} и т.д. [18, С. 257-264]. Во вторую очередь, рассматриваемые антенны из [11], [12] имеют многорезонансную конструкцию излучающей системы, позволяющую тем самым получить широкую и сверхширокую рабочие полосы частот (рисунок 4).

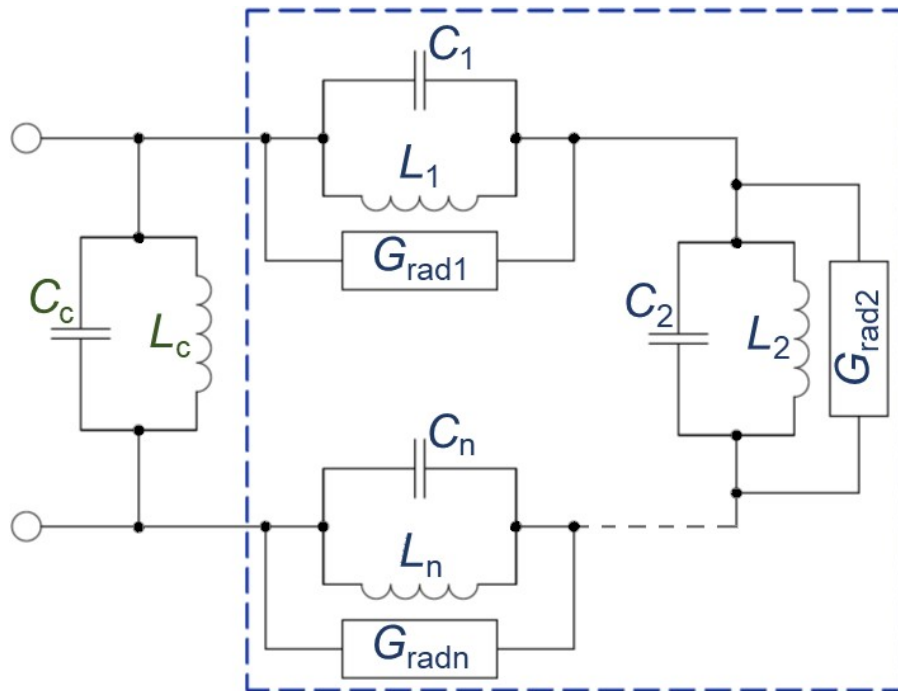


Рисунок 4 - Эквивалентная схема многорезонансной антенны с объемным рефлектором
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.4>

В [17] показано, что классический резонатор прямоугольной формы слабо улучшает характеристики излучения как ШП, так и СШП антенны. Это предсказуемо, так как такой рефлектор по сути представляет собой отрезок волновода прямоугольной формы, где распределение поля на излучающих частях антенны зависит от возбуждения высших мод резонатора, а в первую очередь основной моды (TE_{10}), что ограничивает применение такого резонатора в ШП и СШП антеннах. Кроме того, в [17] показано, что применение резонатора с высокими стенками негативно влияет на согласование, что, в свою очередь, также снижает КУ антенны.

Для улучшения характеристик излучения рассматриваемых антенн [11], [12] предлагается конструкция резонатора в виде перевернутой пирамиды, как показано на рисунках 5 и 6. Высота стенок рефлектора составляет 20 мм и выбрана из соображений наиболее оптимального значения эффективности излучения антенны (отношения коэффициента усиления к площади). В качестве материала стенок выбирается любой проводник (металл), в данном случае заданы параметры, соответствующие алюминию. Выполненные расчеты на основе трехмерного моделирования, в том числе, представленные в [17], показывают, что наибольшее увеличение КНД антенны достигается при углах наклона стенок резонатора около 45° в Е-плоскости (влияние стенок в Н-плоскости на КНД сказывается слабее, однако при близком расположении стенок к излучателям происходит ухудшение согласования антенны в целом). При оптимальной форме отражателя практически не происходит влияния на согласование антенны.

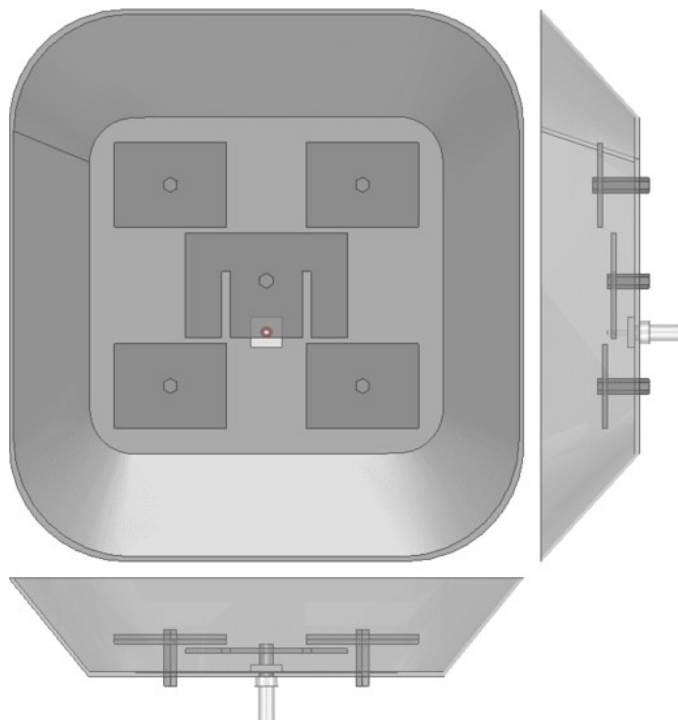


Рисунок 5 - Исследуемая конструкция широкополосной направленной антенны с широкополосным резонатором
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.5>

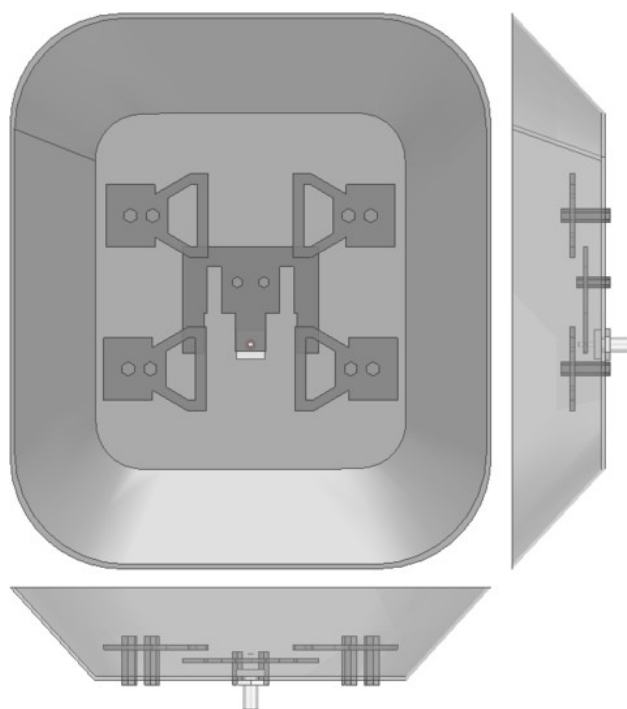


Рисунок 6 - Исследуемая конструкция сверхширокополосной направленной антенны с широкополосным резонатором
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.6>

Работу антенн с добавлением перевернуто-пирамидального резонатора можно увидеть на рисунках 7–9. На рисунке 7 показано распределение поверхностных токов на элементах конструкции на разных частотах, рассчитанное на примере трехмерной модели сверхширокополосной антенны в программном модуле ANSYS EM Suite HFSS Design. Видно, что у антенны с плоским рефлектором токи концентрируются вокруг излучающих элементов, когда у резонатора поверхностные токи текут и по его стенкам на всех частотах исследуемого диапазона частот, вызывая вторичное излучение электромагнитного поля. Результат такого распределения мы видим на рисунках 8 и 9, откуда видно, что в сравнении с использованием обычного плоского экрана при добавлении резонатора на краях пассивных

элементов ШП [11] и СШП [12] конструкций возрастает концентрация электрического поля, что и приводит к улучшению характеристики излучения антенны (или направленных свойств антенны).

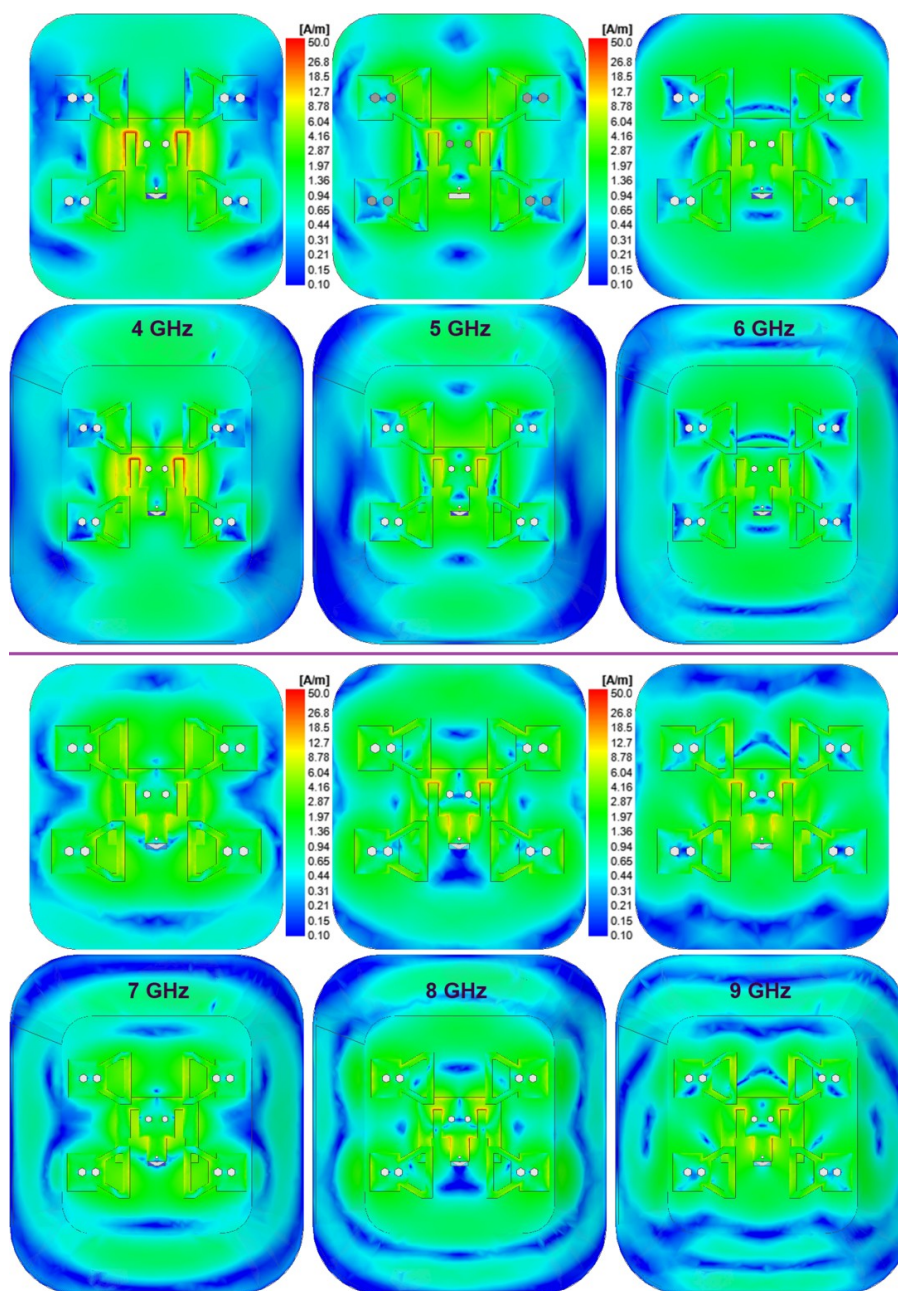


Рисунок 7 - Сравнение распределения поверхностных токов по поверхностям элементов сверхширокополосной направленной антенны с плоским рефлектором и пирамидальным, рассчитанное на частотах 4–9 ГГц

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.7>

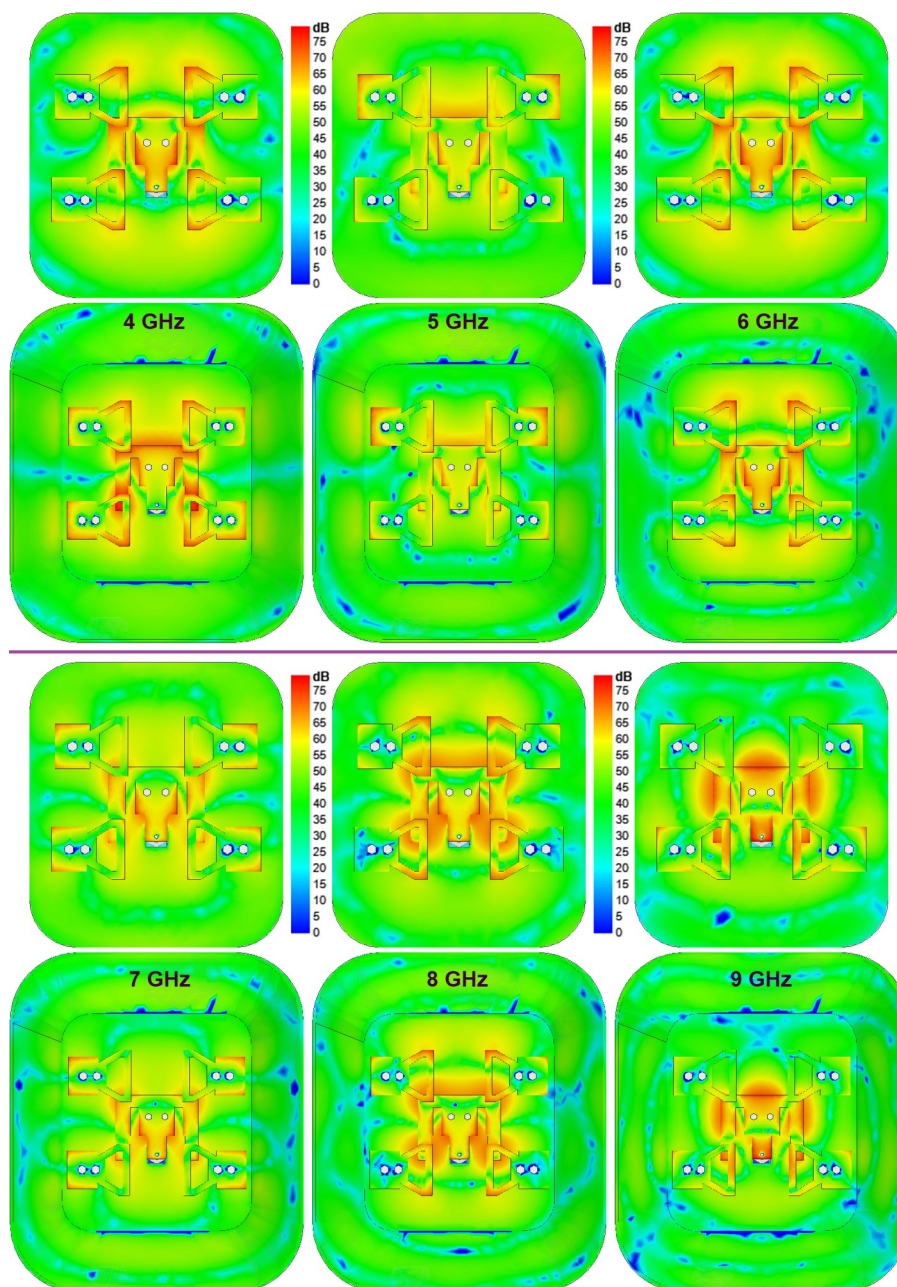


Рисунок 8 - Сравнение распределения электрического поля по поверхностям элементов сверхширокополосной антенны с плоским рефлектором и пирамидальным, рассчитанное на частотах 4–9 ГГц
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.8>

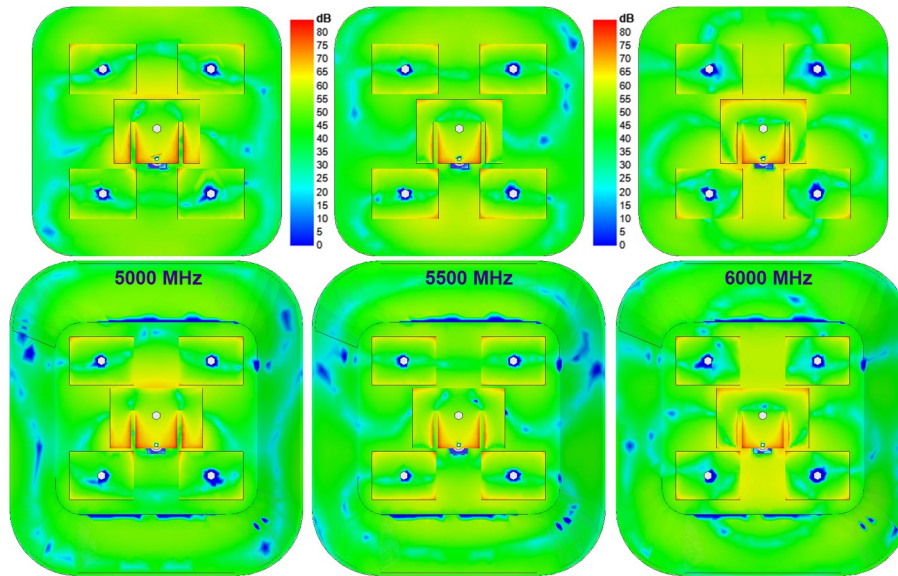


Рисунок 9 - Сравнение распределения электрического поля по поверхностям элементов широкополосной антенны с плоским рефлектором и пирамидальным, рассчитанное на частотах 5–6 ГГц
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.9>

С целью подтверждения обозначенных выводов необходимо выполнить расчеты характеристик антенн на основе трехмерного моделирования.

Результаты моделирования антенн с резонирующими отражателями

На основе предложенных трехмерных моделей антенн с добавлением резонаторов в виде перевернутой пирамиды (рисунки 5 и 6) выполнены расчеты основных характеристик антенн. Так, на рисунках 10–12 показаны характеристики широкополосной антенны, а на рисунках 13–15 показаны рассчитанные характеристики сверхширокополосной антенны.

Рисунок 10 иллюстрирует зависимость коэффициента усиления ШП антенны от частоты, откуда видно, что коэффициент усиления во всем рабочем диапазоне частот существенно увеличился — от 2 до 4 дБ в нижней и верхней частях исследуемого диапазона соответственно, при этом уровень кроссполаризационной составляющей также поднялся, однако коэффициент кроссполаризационной развязки остался не хуже 45 дБ — аналогично исходной конструкции с плоским рефлектором. На рисунке 11 показана частотная зависимость коэффициента отражения на входе ШП антенны. Видно, что добавление резонатора практически не сказывается на согласовании антенны, формы кривых очень схожи у исходной конструкции с плоским рефлектором и антенны с добавлением резонатора, ухудшение последней незначительное — около 45 МГц по уровню минус 10 дБ, что соответствует сужению рабочего диапазона примерно на 1%; при этом, при расчете полосы согласования по уровню $|S_{11}| \leq -15$ дБ сокращение рабочего диапазона составляет всего около 0,5%.

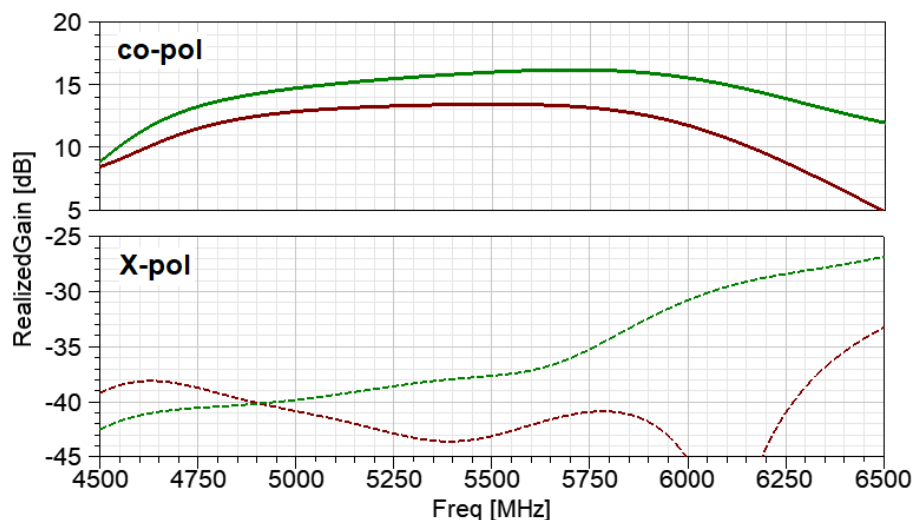


Рисунок 10 - Зависимости коэффициентов усиления широкополосной антенны:
красный – с плоским рефлектором; зеленый – с объемным резонатором
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.10>

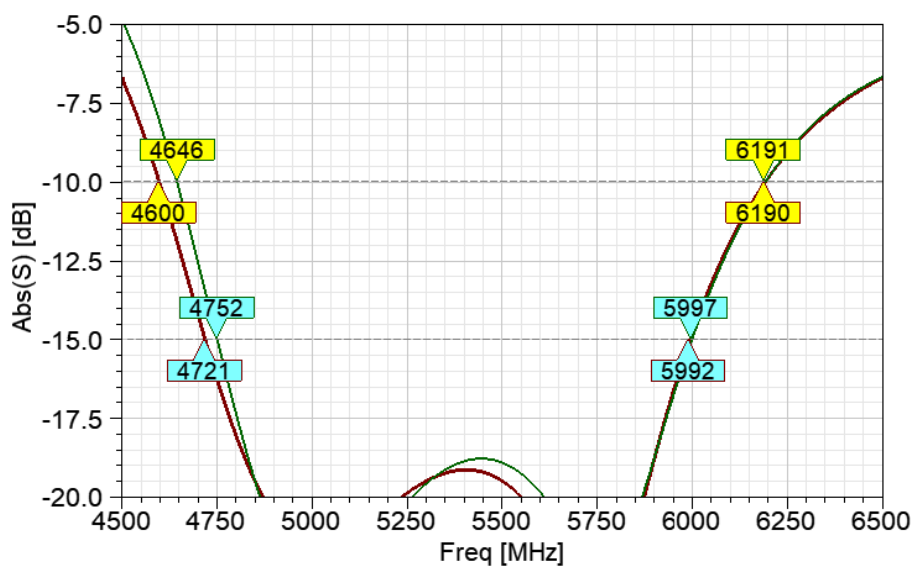


Рисунок 11 - Зависимости модулей коэффициентов отражения на входе широкополосной антенны:
 красный – с плоским рефлектором; зеленый – с объемным резонатором
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.11>

На рисунке 12 показаны диаграммы усиления ШП антенны, построенные в двух плоскостях. Из представленных диаграмм видно, что помимо увеличения КНД (или КУ) объемный рефлектор (резонатор) позволяет существенно увеличить значение коэффициента защитного действия — в верхней части рабочего диапазона частот до 10 дБ.

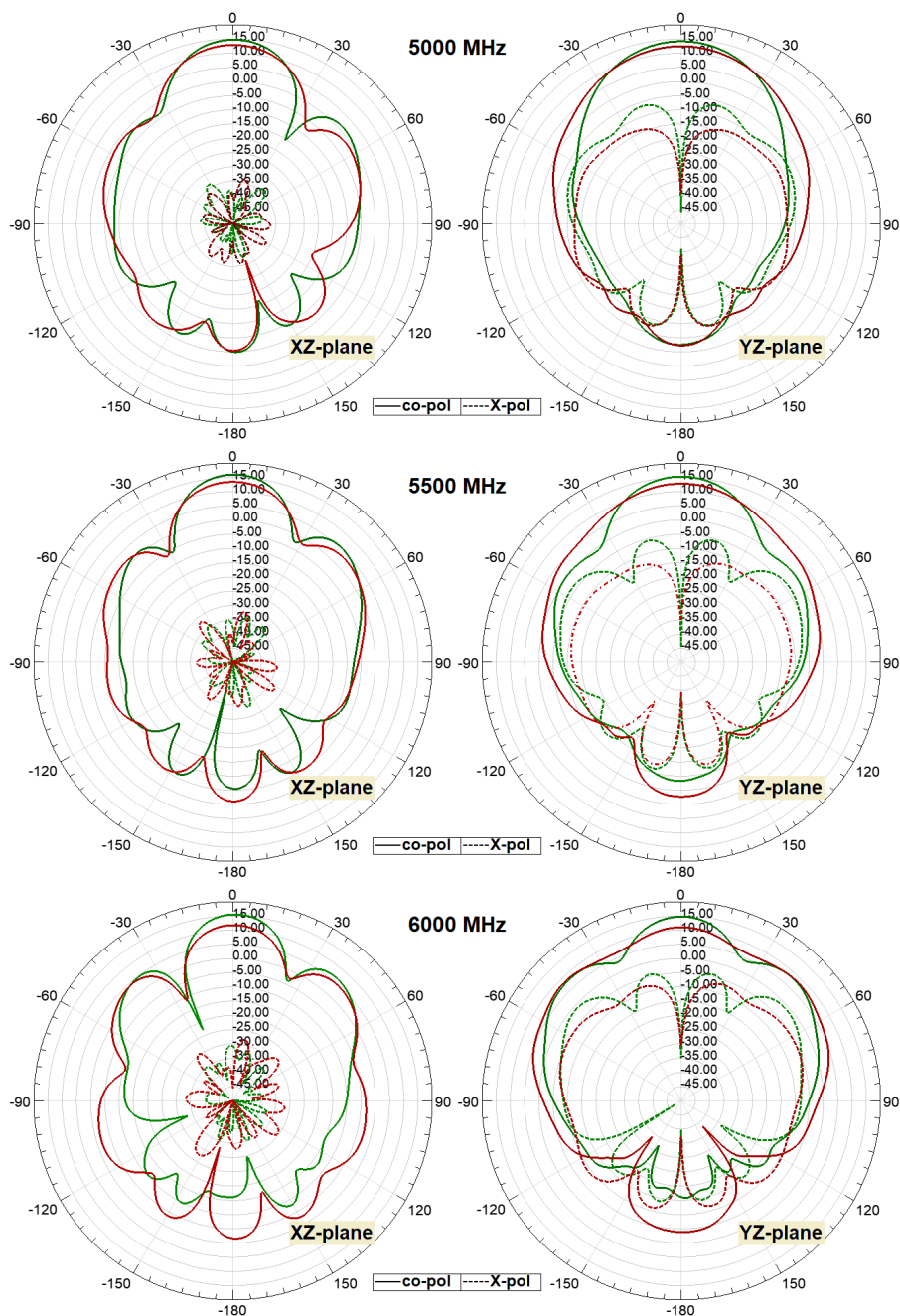


Рисунок 12 - Диаграммы усиления широкополосной антенны:
 красный – с плоским рефлектором; зеленый – с объемным резонатором
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.12>

На рисунке 13 показаны рассчитанные зависимости коэффициентов усиления сверхширокополосной антенны от частоты, а на рисунке 14 — частотные зависимости коэффициентов отражения, рассчитанные на входе сверхширокополосной антенны.

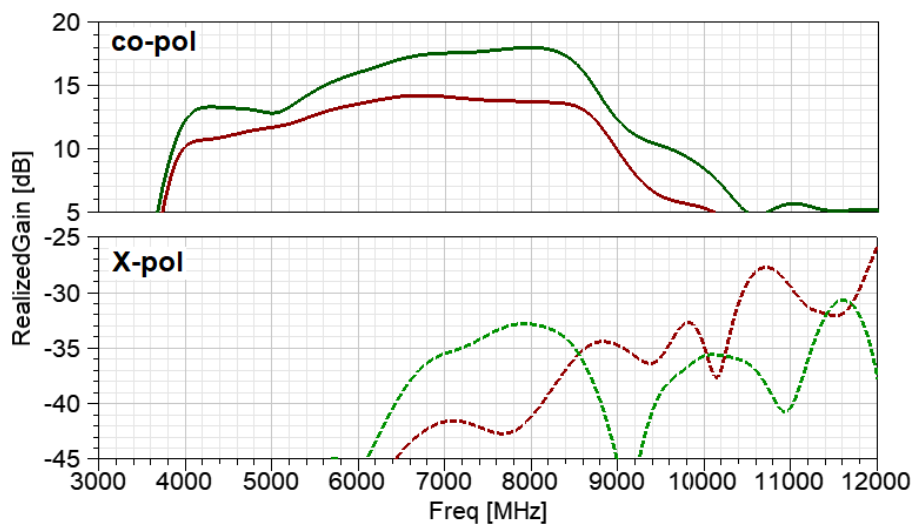


Рисунок 13 - Зависимости коэффициентов усиления СШП антенны:
красный – с плоским рефлектором; зеленый – с объемным резонатором
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.13>

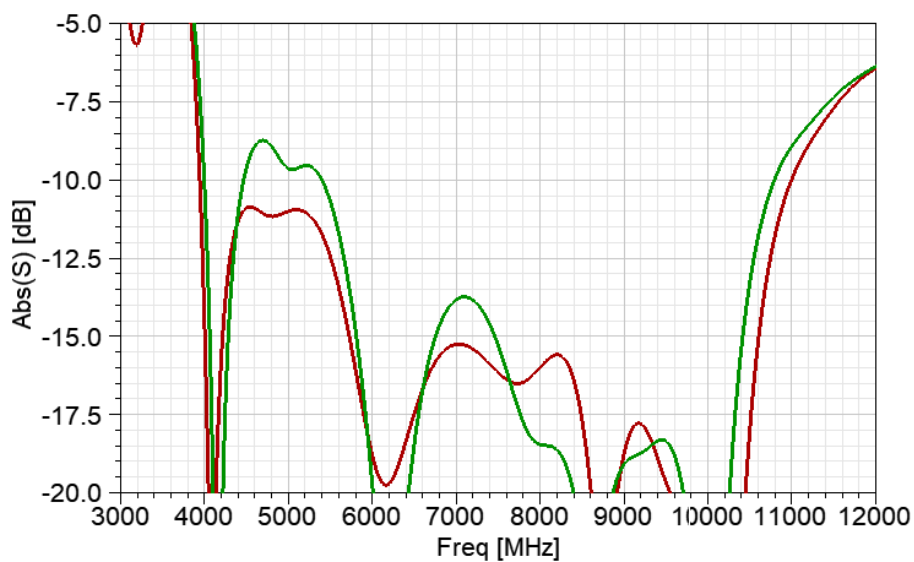


Рисунок 14 - Зависимости модулей коэффициентов отражения на входе сверхширокополосной антенны:
красный – с плоским рефлектором; зеленый – с объемным резонатором
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.14>

На рисунке 15 показаны диаграммы усиления СШП антенны, построенные в главных плоскостях.

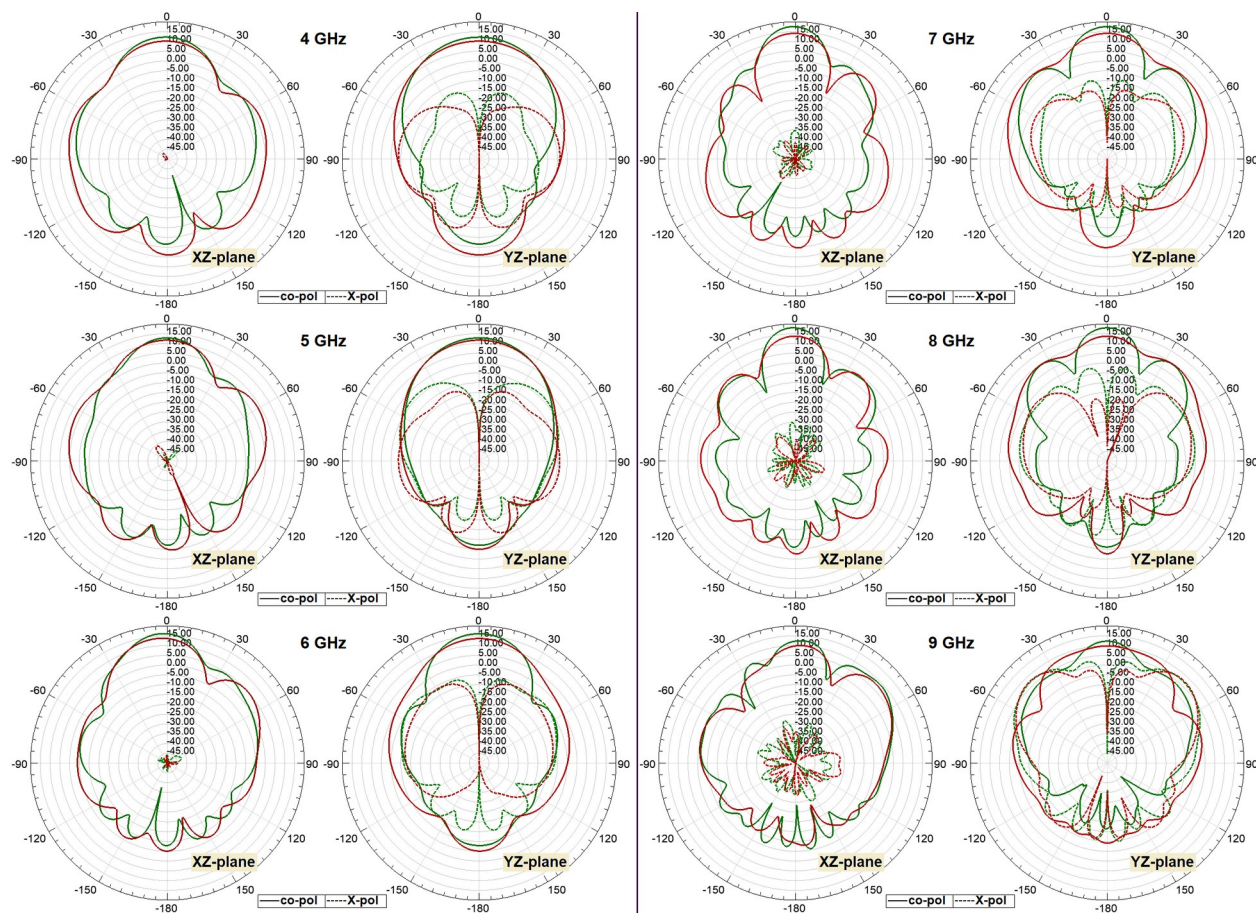


Рисунок 15 - Диаграммы усиления СШП антенны:
 красный – с плоским рефлектором; зеленый – с объемным резонатором
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.43.15>

Из графиков на рисунке 13 видно, что коэффициент усиления СШП антенны во всем рабочем диапазоне частот увеличился от 2 до 4 дБ, при этом уровень кроссполяризационной составляющей остался примерно прежним, так коэффициент кроссполяризационной развязки составляет более 50 дБ для антенны с объемным пирамидальным рефлектором (резонатором). По рассчитанным диаграммам усиления СШП антенны (рисунк 15) также видно увеличение коэффициента усиления (или КНД) и соответствующее сужение основного лепестка. Как и в варианте ШП антенны наблюдается улучшение значения коэффициента защитного действия практически во всем рабочем диапазоне частот.

Из кривых на рисунке 14 видно, что добавление резонатора слабо сказывается на согласовании антенны, аналогично ШП антенне происходит небольшое сужение рабочего диапазона (не более 1%), вид кривых с плоским и объемным рефлекторами схож. В нижней части частотного диапазона (на участке примерно 4200–6000 МГц) наблюдается небольшое возвышение значений коэффициента отражения и превышение требуемого значения — минус 10 дБ. Это сказывается на значении результирующего коэффициента усиления (что видно из рисунка 13), однако при проектировании антенны возможно выполнить ее согласование небольшой подстройкой размеров активного излучателя.

Заключение

В статье рассмотрены методы улучшения характеристик излучения ранее исследованных составных микрополосковых антенн. Рассмотрено влияние резонатора на распределение электрического поля по элементам антенны. На основе трехмерного моделирования антенн в программном пакете ANSYS EM Suite получено, что применение объемного резонатора в виде перевернутой пирамиды с оптимальными размерами стенок существенно улучшает направленность антенны, точнее ее коэффициент усиления — на 2–4 дБ в рабочих широком и сверхшироком диапазонах частот в сравнении с плоским рефлектором. Также показано, что замена плоского рефлектора на объемный резонатор с наклонными стенками слабо влияет на согласование антенны, в отличие от классического прямоугольного резонатора.

Основная особенность применения рефлектора (резонатора) в виде перевернутой пирамиды заключается в его изменяющейся ширине, что позволяет улучшить распределение поля по элементам составной антенны даже в сверхшироком диапазоне частот, в отличие от распространенной практики применения резонаторов прямоугольной формы.

Рассмотренные уникальные широкополосные и сверхширокополосные конструкции антенн за счет своих характеристик могут использоваться в таких РТС, как системы беспроводной связи или передачи данных, обеспечивая радиосвязь на больших дистанциях за счет высокого КУ, в системах ретрансляции, в качестве антенн наземных терминалов связи в беспилотных авиационных системах, в качестве измерительных антенн в лабораториях либо антенн систем радиомониторинга.

Предлагаемый метод может быть исследован применительно к другим микрополосковым направленным антеннам. Кроме того, предполагается провести экспериментальные исследования с целью подтверждения всех заявленных в статье улучшений характеристик антенн.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Chen Z.N. Antennas for base stations in wireless communications / Z.N. Chen, K.M. Luk. — McGraw-Hill, 2009. — 430 p.
2. Sabban A. Wearable systems and antennas technologies for 5G, IOT and medical systems / A. Sabban. — CRC Press, 2020. — 186 p.
3. Zeng Y. UAV Communications for 5G and beyond / Y. Zeng, I. Guvenc, R. Zhang. — John Wiley & Sons, 2020. — 464 p.
4. Zhang X. Gain-enhanced patch antennas with loading of shorting pins. / X. Zhang, L. Zhu // Transactions on Antennas and Propagation. — 2016. — 8. — P. 3310–3318.
5. Ta S.X. Wideband differentially fed dual-polarized antenna for existing and sub-6 GHz 5G communications. / S.X. Ta, D.M. Nguyen, K.K. Nguyen // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. — 2020. — 12. — P. 2033–2037.
6. Hua C. Dual-polarized filtering antenna with printed Jerusalem-cross radiator. / C. Hua, R. Li, Y. Wang et al. // IEEE Access. — 2018. — 6. — P. 9000–9005.
7. Letavin D.A. Antenna for mobile communication of the 5th generation. / D.A. Letavin, A.L. Kononov. // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT); — Moscow: IEEE, 2018. — P. 1–4.
8. Kumar A. Recent trends in compact planar antennas at 5G sub-6 GHz and mm wave frequency bands for automotive wireless applications: a review. / A. Kumar, M. Aijaidi, M. Singh // Progress In Electromagnetics Research. — 2024. — 143. — P. 169–180.

9. Schulpen R. Design of a phased-array antenna for 5G base station applications in the 3.4-3.8 GHz band. / R. Schulpen, U. Johannsen, S.C. Pires et al. // 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018); — Stevenage Uk: IET, 2018. — P. 743.
10. Sokolov V.S. MIMO 2x2 2.45 GHz Antenna Array with Polarizing Channel Separation / V.S. Sokolov, M.A. Stepanov // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM); — IEEE, 2022. — P. 109–112.
11. Shishkin M.S. Bandwidth enhancement methods analysis for high-gain stacked microstrip antenna. / M.S. Shishkin // Progress in Electromagnetics Research B. — 2024. — 107. — P. 19–31.
12. Shishkin M.S. Ultrawideband high-gain stacked microstrip antenna with modified E-shaped active exciter and four single-sided bowtie passive elements. / M.S. Shishkin // Progress in Electromagnetics Research B. — 2024. — 109. — P. 1–16.
13. Kong D.K. Broadband modified proximity coupled patch antenna with cavity-backed configuration. / D.K. Kong, J. Kim, D. Woo et al. // Journal of Electromagnetic Engineering and Science. — 2021. — 1. — P. 8–14.
14. Elsherbini A. Dual polarized wideband directional coupled sectorial loop antennas for radar and mobile base-station applications. / A. Elsherbini, J. Wu, K. Sarabandi // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 2015. — 4. — P. 1505–1513.
15. Yang J.O. A low-profile unidirectional cavity-backed log-periodic slot antenna. / J.O. Yang, S. Bo, J. Zhang et al. // Progress in Electromagnetics Research. — 2011. — 119. — P. 423–433.
16. Dhaundia G. A high-gain wideband microstrip patch antenna with folded ground walls. / G. Dhaundia, K.J. Vinoy // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. — 2022. — 2. — P. 377–381.
17. Shishkin M.S. Aperture efficiency improvement methods analysis for high-gain wideband/ultrawideband stacked microstrip antennas. / M.S. Shishkin. // 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE); — Simferopol: IEEE, 2024. — P. 260–265.
18. Garg R. Microstrip antenna design handbook / R. Garg. — Boston; London: Artech house, 2001. — 845 p.