

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.10>

УДК: 621.396.673

РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ АНТЕННЫ СО СТАБИЛЬНОЙ ФОРМОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БПЛА

М. С. Шишкин

АО «ЭЙРБУРГ»
620063, Екатеринбург, ул. 8-марта 49, этаж 3

Статья поступила в редакцию 24 июля 2024 г.

Аннотация. В статье приведен метод получения диаграммы направленности стабильной формы в виде тороида в широком диапазоне частот для малогабаритной антенны на основе несимметричного печатного вибратора. Метод заключается в применении широкополосного прямоугольного излучателя и согласования его с входным 50-Омным разъемом посредством четвертьволнового трансформатора на основе микрополоской линий передачи и специальной формы противовеса. На основании предложенного метода разработана конструкция печатной антенны, которая имеет две широких полосы согласования по уровню коэффициента отражения (модуля S_{11}) не более минус 10 дБ: 1677-2786 МГц (50%) и 3230-3801 МГц (16,2%); формирует поле в виде тороида в диапазоне частот 1500-4000 МГц с коэффициентом усиления не менее 2 дБи в направлении максимального излучения. Форма диаграммы направленности достаточно стабильна во всем частотном диапазоне, максимумы ориентированы в перпендикулярном направлении оси антенны. Разработанная конструкция была изготовлена и измерены ее характеристики. Антенна, в первую очередь, применима в системах беспроводной связи беспилотных

авиационных систем и предназначена для установки на беспилотный летательный аппарат, где может обеспечить радиопокрытие по всем азимутальным направлениям. Изготовленная антенна имеет компактный размер (размер печатной платы антенны без разъема составляет $63 \times 22,5 \times 1$ мм³ или $0,35\lambda_{\max} \times 0,125\lambda_{\max} \times 0,006\lambda_{\max}$) и небольшой вес (не более 10 г с учетом разъема), а уникальная форма позволяет использовать ее без обтекателя без снижения аэродинамических свойств носителя.

Ключевые слова: широкополосная антенна, многодиапазонная антенна, стабильная форма диаграммы направленности, антенна летательного аппарата.

Финансирование: работа выполнена на основе инициативной НИР, финансируемой АО «ЭЙРБУРГ»

Автор для переписки: Шишкин Михаил Сергеевич, m.shishkin@air-burg.ru

Введение

Наибольшее развитие техники широкополосных и многодиапазонных антенн в последние 10-15 лет происходило в области мобильной (или сотовой) связи. Антенны здесь имеют совершенно различную форму и размеры, так как предполагается их использование как для мобильных устройств, так и для базовых станций и ретрансляторов связи с различными требованиями к форме диаграммы направленности, к рабочим диапазонам, к условиям их применения. За прошедшее время выполнено не малое число исследований, опубликовано не мало значимых публикаций, сборников, монографий, предложены различные методы по расширению рабочей полосы частот антенн. С повсеместным развитием роботизированных систем тема исследования антенн и антенных технологий вновь становится весьма актуальной. Вызвано это тем, что все беспилотные системы являются таковыми лишь условно, чаще всего аппараты (летательные или наземные подвижные) управляются оператором, находящимся у станции управления. Кроме того, беспилотный аппарат передает на станцию управления (сбора информации) различные данные, например, свои положение, направление и скорость перемещения, данные с различных

датчиков и т.д. Таким образом подобные системы, как правило, используют системы радиосвязи для обеспечения удаленного взаимодействия между беспилотным аппаратом и станцией управления и сбора информации [1-4].

Проблемы, которые возникают при построении беспроводного канала связи в таких системах, связаны с влиянием самого носителя, имеющего определенные электродинамические характеристики, с распространением радиоволн в пространстве, где прямые лучи между двумя антенными складываются с отраженными от различных поверхностей, вызывая так называемые замирания на приемной антенне, с влиянием активных помех в полосе рабочих частот. Методы улучшения качества связи, как в условиях преднамеренных, так и непреднамеренных помех, связаны с расширением полосы частот рабочего канала связи, либо с возможностью перехода или одновременной работы в нескольких диапазонах частот, причем желательно чтобы данные диапазоны были достаточно удалены друг от друга [4-6].

Для построения связи в беспилотных авиационных системах (БАС) в качестве бортовых могут использоваться антенны, имеющие форму диаграммы направленности (ДН) в виде тороида. Такая форма ДН обеспечивает покрытие вокруг беспилотного летательного аппарата (БПЛА) по всем азимутальным направлениям в том числе при изменениях пространственного положения последнего (крен, тангаж). Наиболее распространенные проблемы использования покупных антенн заключаются в следующем: часто разработчики намерено завышают характеристики своих антенн, например, указывая работу в достаточно широком диапазоне, при этом не уточняя уровень согласования по входу (уровень коэффициента отражения в зависимости от частоты), не указывая форму ДН или реальный коэффициент усиления (КУ); невозможно достоверно спрогнозировать связь между БПЛА и наземной станцией не имея полноценной модели антенны с учетом ее размещения на носителе; характеристики покупных антенн, как правило, получают идеальных условия и не учитывают наличия влияющих элементов конструкций, расположенных вблизи [4-6].

При работе в широком диапазоне частот или в нескольких диапазонах требуется использовать несколько антенн, настроенных на определенную рабочую полосу, как правило, недостаточно широкую. При использовании технологии разнесенного приема на борту с целью улучшения качества приема количество антенн увеличивается. Такой подход имеет ряд недостатков, во-первых, не всегда удобно менять антенны перед полетом (а тем более в полете) с целью настройки связи в конкретный диапазон, во-вторых, большое количество антенн ухудшает аэродинамические свойства носителя (БПЛА), кроме того, увеличивается взлетная масса последнего, что в некоторых случаях критично.

Таким образом, такие темы, как, «разработка широкополосных или многодиапазонных антенн для БПЛА», «анализ влияния различных отражающих поверхностей на характеристики антенны», «оптимизация антенн под условия установки на носитель» и т.п. являются актуальными и требуют глубокой проработки и исследования.

1. Уровень техники в области антенн для малогабаритных БПЛА

На рисунке 1 приведены примеры различных антенн, которые могут быть или используются в качестве бортовых антенн системы радиосвязи для малогабаритных БПЛА. В таблице 1 приведены некоторые характеристики для каждой антенны, доступные на сайте поставщика.

Таблица 1. Сравнение характеристик антенн с изотропной ДН.

Тип	Диапазон частот, МГц (%)	КСВ в полосе частот	Длина, мм	Вес, г	Особенности ДН
[7]	2300-2500	$\leq 2,0$	85	22	нет данных
[8]	2100-2400	$\leq 2,2$	78	10	равномерная в аз. плоскости
[9]	824-960 1710-2170	$\leq 3,5$	49	6	максимум смещается на разных частотах
[10]	698-960 1710-2170 2500-2700	$\leq 2,5$	195	31	нет данных
[11]	800-960 1700-2700	$\leq 2,0$	190	18	нет данных
[12]	840/868/915	$\leq 2,0$	200/400	30	нет данных
[13]	880-960 1700-2100 2400-2500	Нет данных	217	45	нет данных



Рис. 1. Кандидаты на бортовые антенны радиосвязи в БАС [7-13].

Как видно из таблицы 1, многие антенны имеют достаточно большие размеры (длину), имеют неудовлетворительный уровень согласования в полосе рабочих частот и узкую рабочую полосу, при этом для многих антенн невозможно найти данные о форме ДН в зависимости от частоты.

Некоторые конструкции антенн для БпЛА были предложены в статьях [14-18]. Так, например, антенна из [14], представляющая собой линейную решетку из двух вертикальных проводниковых цилиндрических вибраторов, имеет широкую полосу согласования – около 25%. Расширение полосы частот достигается за счет увеличения диаметров вибраторов, что определяет главный недостаток антенны – большие размеры, ограничивающие применение такой конструкции на воздушном носителе из-за увеличения сопротивления воздушным потокам. Элементы антенны расположены друг над другом и соединены линиями передачи, это определяет второй существенный недостаток данной конструкции – смещение максимумов ДН на разных частотах из рабочего диапазона частот. В [15] приведена схожая линейная решетка,

однако выполненная на основе печатных вибраторов. В сравнении с антенной из [14], здесь уменьшены размеры в целом, упрощена конструкция решетки; полоса согласования антенны составляет аналогично около 25%. Так как принцип построения схемы питания решетки из [15] аналогичен [14], антенна имеет те же недостатки, связанные со смещением ДН на разных частотах.

В [16-18] приведены конструкции одноэлементных антенн для БПЛА. При этом конструкция антенны из [16] является узкополосной и рассчитана на работу в одной частоте 956 МГц, кроме того, ДН антенны неравномерна и имеет провалы до 5 дБ. Антенна, представленная в статье [17], рассчитана на работу в трех узких диапазонах частот: 840,5-845 МГц; 1430-1444 МГц и 2408-2440 МГц, главным ее недостатком является большой размер ($117 \times 58 \times 30$ мм³ без учета разъема) что ограничивает ее применение в малогабаритных БПЛА; также наблюдается асимметрия ДН в угломестной плоскости и неравномерность в азимутальной с провалами в уровнях ДН до 5 дБ.

Антенна из [18] выполнена на основе печатных технологий и имеет достаточно высокие характеристики по сравнению с рассмотренными ранее: широкий рабочий диапазон частот от 3300 до 6900 МГц (70,6%) по уровню коэффициента стоячей волны (КСВ) не более 2; изотропная ДН в азимутальной плоскости; при этом антенна имеет достаточно компактные размеры $40,2 \times 12,6 \times 0,787$ мм³ (или $0,44\lambda_{\max} \times 0,14\lambda_{\max} \times 0,009\lambda_{\max}$) без учета разъема и элементов крепления. Недостатком антенны является смещение максимума ДН в угломестной плоскости на частотах свыше 4 ГГц, где отклонение от горизонтальной плоскости составляет от 15° до 30°. Кроме того, антенна требует достаточно высокой точности изготовления, что в некоторой степени усложняет ее конструкцию.

Таким образом, рассмотрев различные варианты антенн, подходящих для применения в составе радиосвязной аппаратуры современных малогабаритных БПЛА, выявляются тенденции, обозначенные в статье ранее, а именно: отсутствие достаточной информации (технических данных) по существующим на рынке антеннам; отсутствие на рынке антенн с высокими характеристиками,

работающих в широких диапазонах частот, актуальных для применения в современных системах беспроводной связи в БАС. На основе материалов из рассмотренных публикаций можно сделать вывод о том, что на сегодня нет методик для разработки широкополосных малогабаритных антенн с ДН нужной формы с незначительными искажениями в рабочем диапазоне частот. Выполненный анализ подтверждает необходимость и актуальность исследований в рассматриваемой области.

2. Получение ДН стабильной формы в широком диапазоне частот

Наиболее простыми антеннами являются вибраторы, выполненные в виде тонких цилиндрических проводников некоторой резонансной длины [19-21]. Если рассмотреть пример такого вибратора (рисунок 2), он имеет достаточно узкую рабочую полосу и при этом формирует диаграмму в форме тороиды, что в целом приемлемо для связных устройств БПЛА, так как такая форма обеспечит покрытие по всем азимутальным направлениям вокруг БПЛА, а также связь при отклонениях носителя от горизонтальной оси до 30 градусов.

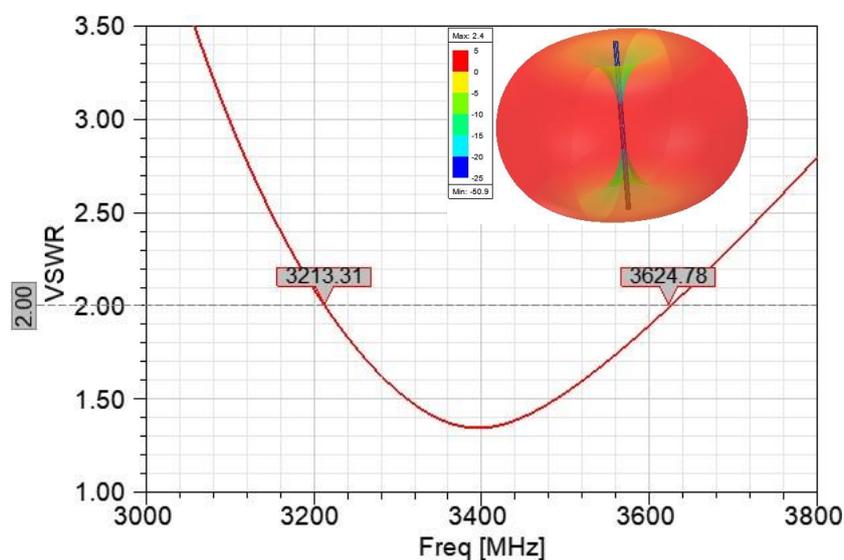


Рис. 2. Характеристики симметричного полуволнового цилиндрического вибратора, рассчитанного на центральной частоте 3400 МГц.

Известно, что увеличение диаметра проводника вибратора позволяет расширить его рабочую полосу, при этом длина вибратора сокращается. Однако, можно заметить (рисунок 3), что согласования по входу такой антенны

ухудшается, что приводит к снижению КПД такой антенны и для улучшения согласования вибратора следует применять определенные методы, некоторые из которых описаны в [19-21].

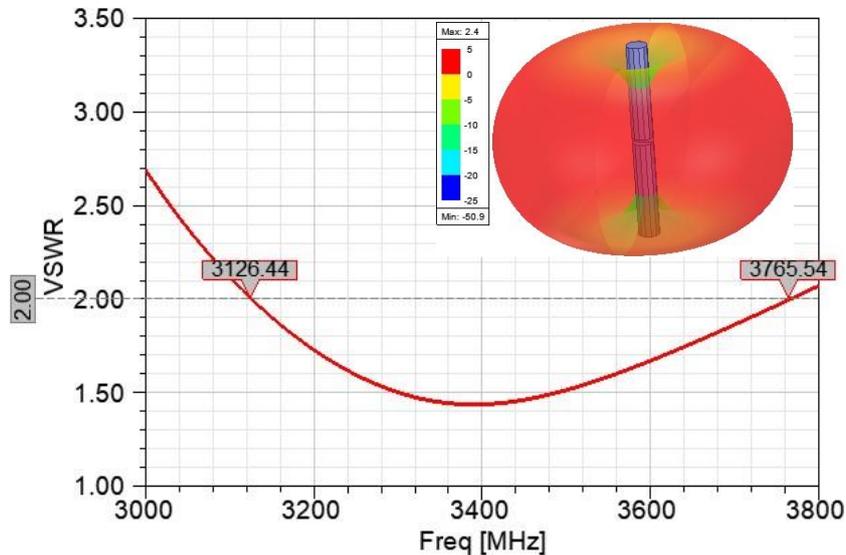


Рис. 3. Характеристики симметричного цилиндрического вибратора с увеличенным диаметром, рассчитанного на центральной частоте 3400 МГц.

Антенна на основе цилиндрических проводников имеет ряд недостатков с точки зрения использования для установки на БПЛА: не всегда получается просто и компактно ее согласовать, или улучшить согласование. Поэтому предлагается использовать вибратор, выполненный на основе печатных технологий. Конструкция такой антенны – печатного вибратора показана на рисунке 4. Антенна состоит из прямоугольного излучателя, питание на который от входного разъема поступает посредством микрополосковой линии (МПЛ) передачи, расположенной над экраном, играющим в свою очередь роль противовеса для излучателя.

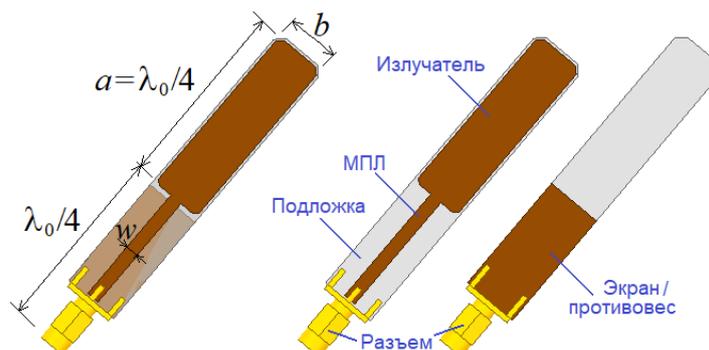


Рис. 4. Конструкция печатного вибратора.

Длина излучателя для рассматриваемой печатной антенны составляет четверть длины волны на центральной частоте, длина противовеса с учетом разьема составляет примерно такое же значение. Ввиду того, что диэлектрик имеет малые размеры и вносит незначительные изменения в характеристики излучателя, то на этапе проектирования антенны допустимо рассчитывать длину вибратора, опираясь на значение длины волны в свободном неограниченном пространстве:

$$\lambda_0 = c/f_0, \quad (1)$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны в условиях вакуума ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с), f_0 – центральная частота рабочего диапазона антенны, Гц.

Согласно [22], ширину микрополосковой линии с известным волновым сопротивлением R (50 Ом) можно приближенно рассчитать по формуле:

$$w = \frac{8h}{e^d - 2e^{-d}}, \quad (2)$$

где h – высота диэлектрической подложки (высота расположения линии над токопроводящим экраном,

$$d = \frac{R}{60} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon + 1}{2}} + \frac{(\varepsilon - 1) \cdot (0,226 + 0,12/\varepsilon)}{\varepsilon + 1}, \quad (3)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость подложки (в работе используется материал ФАФ 4Д: $\varepsilon = 2,55$, $h = 1$ мм, $\text{tg}\delta = 1 \times 10^{-3}$).

Для учета толщины металлизации t в [23] предложена формула расчета эффективной ширины микрополосковой линии:

$$w_{\text{эфф}} = w + \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi \cdot w}{t} \right). \quad (4)$$

Рассматривая цилиндрический вибратор, согласно [19-21], добиваясь работы антенны в более широком диапазоне частот путем увеличения диаметра проводника следует сокращать его длину, как показано на рисунке 5.

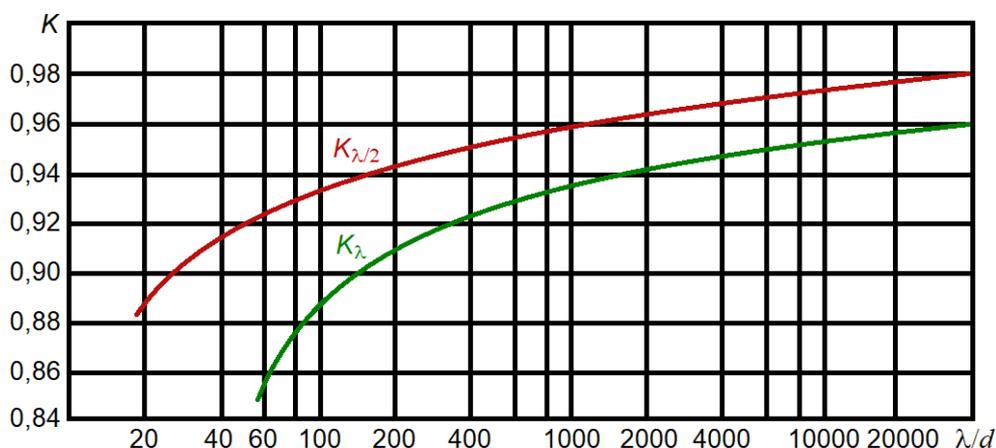


Рис. 5. Зависимость коэффициента укорочения от величины диаметра вибратора относительно рабочей длины волны.

По аналогии с цилиндрическим вибратором длина печатного излучателя изменяется с учетом коэффициента укорочения в зависимости от ширины b , где значение b принимается примерно в 2 раза меньшим диаметру d аналогичного цилиндрического вибратора:

$$a = K(\lambda/2b) \cdot \frac{\lambda_0}{4}. \quad (5)$$

На рисунке 6 показан пример печатного вибратора с увеличенной шириной излучателя. На рисунках 7 и 8 показаны диаграммы направленности представленного вибратора, рассчитанные на основе трехмерной модели.

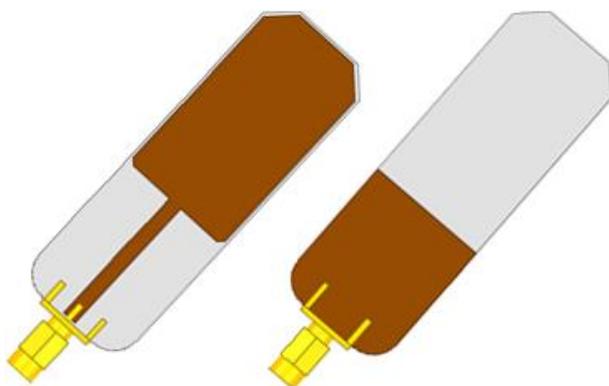


Рис. 6. Печатный вибратор с увеличенной шириной излучателя.

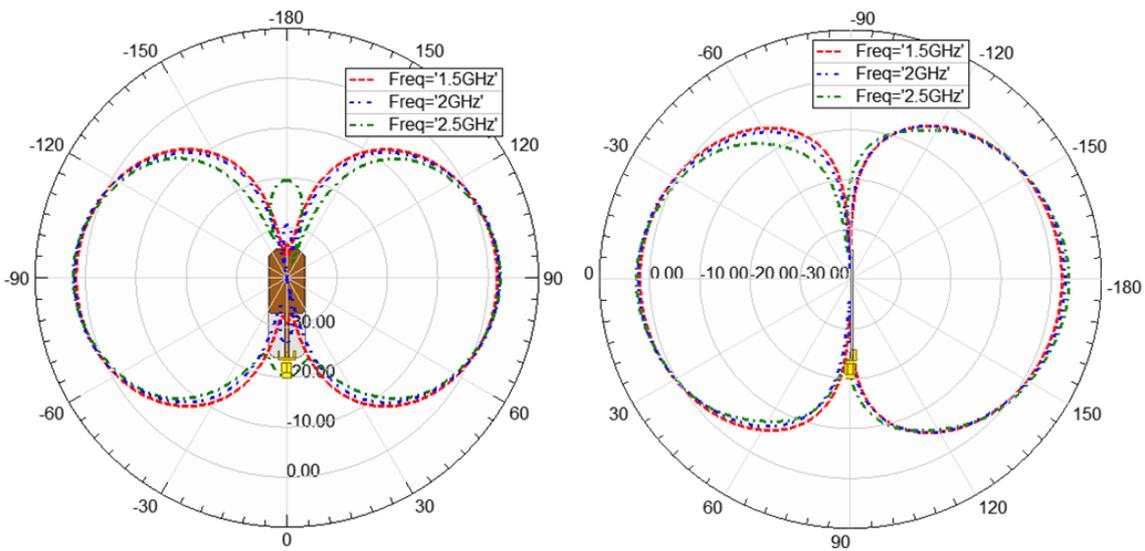


Рис. 7. ДН печатного вибратора в угломестной плоскости, рассчитанная на частотах 1500, 2000 и 2500 МГц.

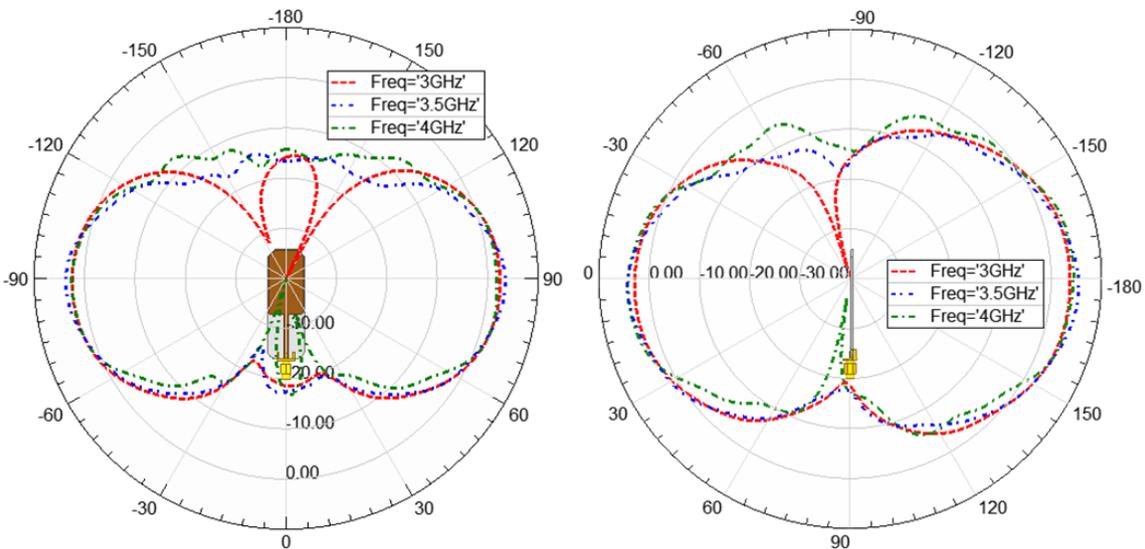


Рис. 8. ДН печатного вибратора в угломестной плоскости, рассчитанная на частотах 3000, 3500 и 4000 МГц.

Принцип работы антенны поясняет рисунок 9, где представлено распределение электрической составляющей электромагнитного (ЭМ) поля по всем элементам антенны, рассчитанное на частотах 1500, 2500 и 3500 МГц. Видно, что МПЛ обеспечивает прохождение ЭМ волны от разъема до излучателя, который в свою очередь, возбуждая противовес, формирует ЭМ поле в широком диапазоне частот.

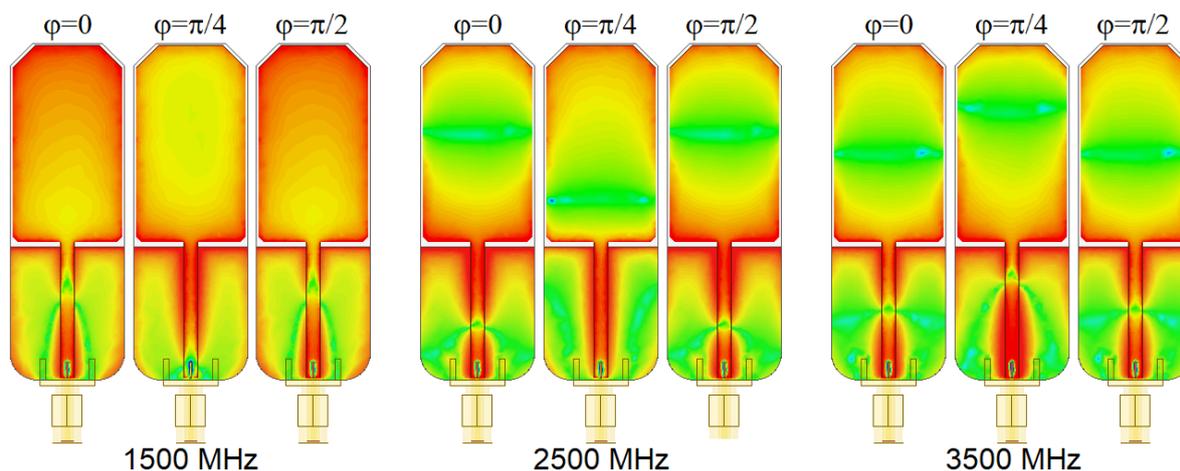


Рис. 9. Распределение электрического поля на элементах печатного вибратора.

На рисунке 10 показана частотная зависимость коэффициента отражения (модуль параметра S_{11}) на входе вибратора, рассчитанная на основе модели.

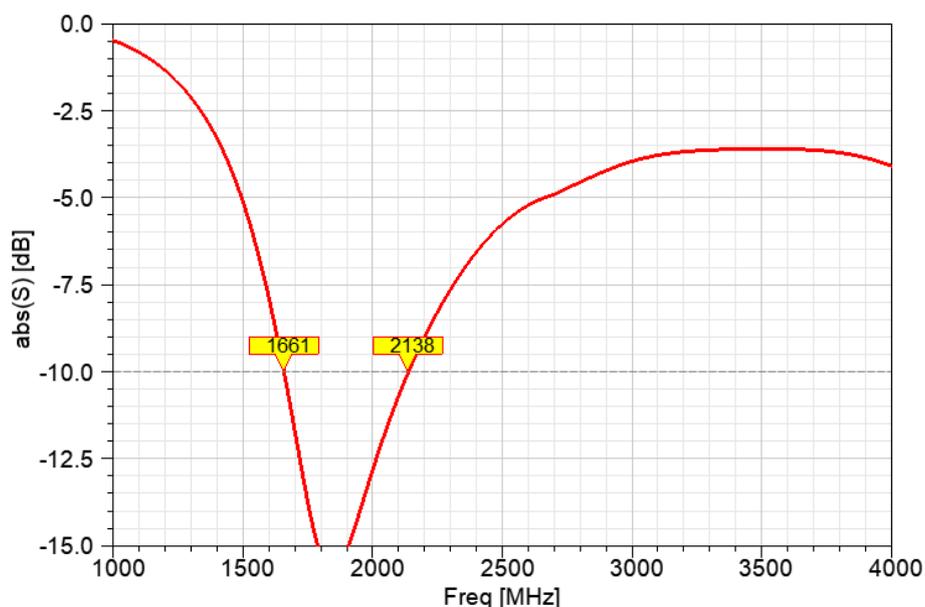


Рис. 10. Частотная зависимость коэффициента отражения на входе печатного вибратора.

И результатов моделирования видно, что антенна имеет стабильную форму ДН в широком диапазоне частот (более чем 1500-4000 МГц или 90%), однако, согласование в этой же полосе частот не выполняется, что требует дополнительных модификаций конструкции.

3. Согласование антенны в широком диапазоне частот

Для улучшения согласования антенны по входу рассмотрены два метода, во-первых, это включение согласующего трансформатора между основной линией питания и излучателем (рисунки 11 и 12). Этот метод позволяет улучшить согласование антенны в нижней части рабочего диапазона антенны.

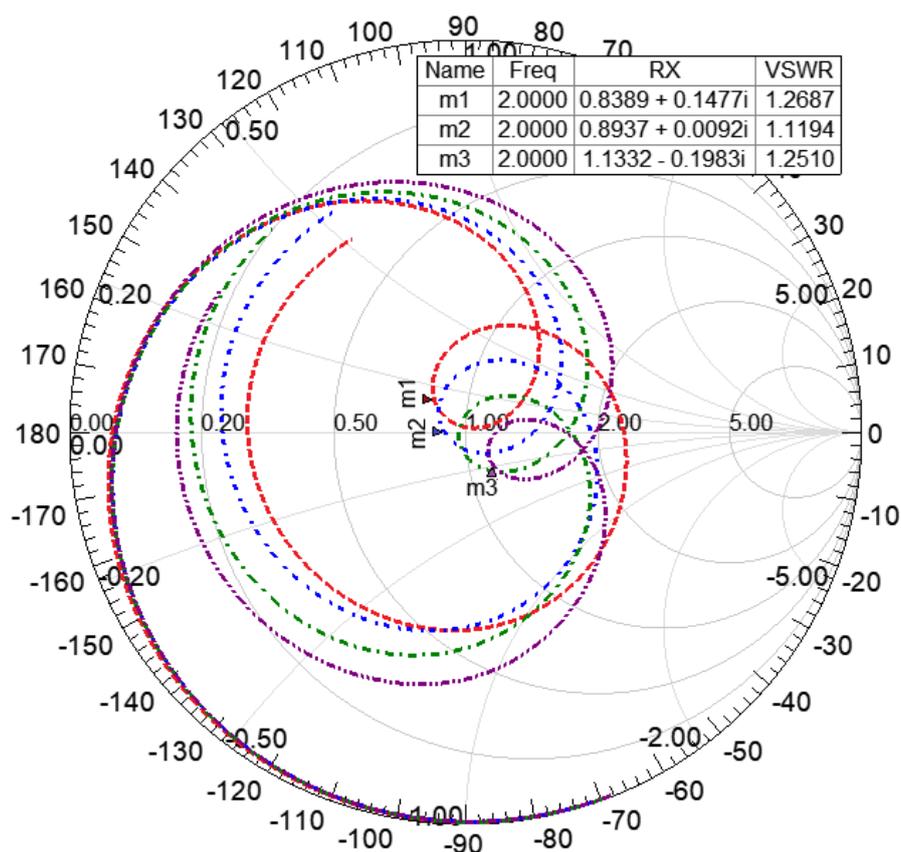


Рис. 11. Влияние длины трансформатора на согласование антенны.

Кроме того, предлагается увеличивать зазор между излучателем и противовесом, который в свою очередь играет роль экрана для линии питания (рисунок 13). Этот метод позволяет улучшить согласование в верхней части рабочего диапазона.

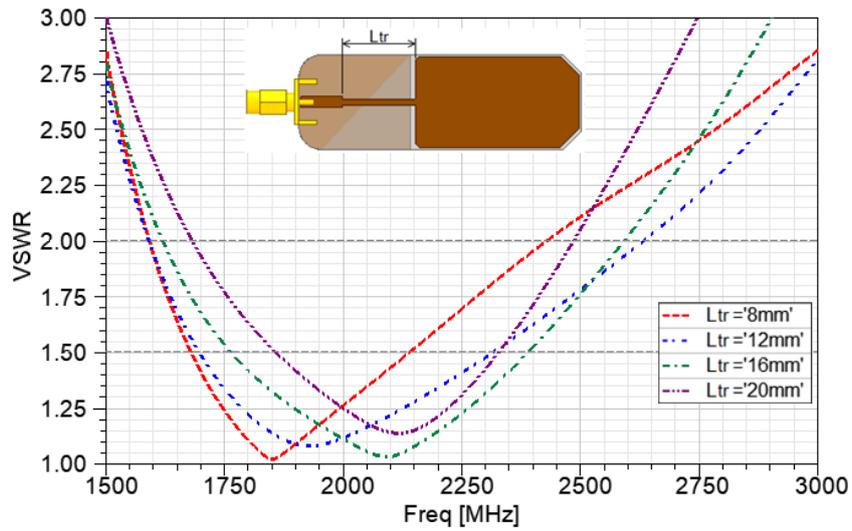


Рис. 12. Влияние длины трансформатора на согласование антенны.

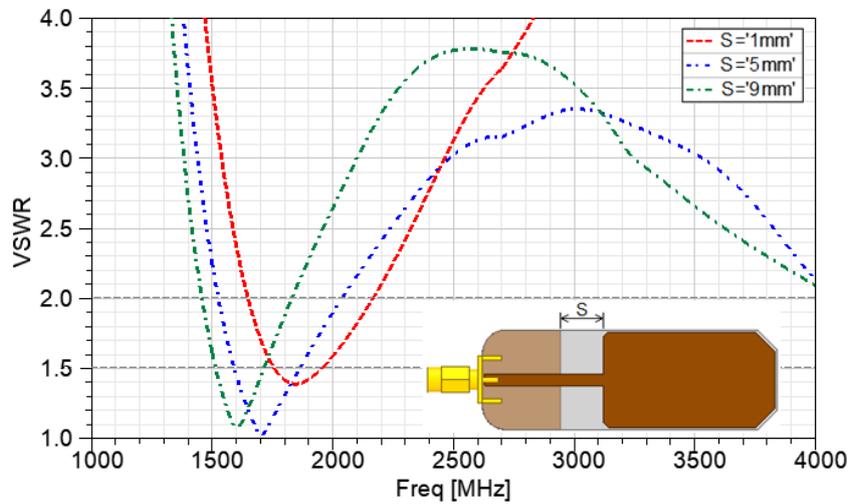


Рис. 13. Влияние величины зазора на согласование антенны.

Наилучший результат с точки зрения согласования антенны показывает комбинация предложенных методов, то есть добавление согласующего трансформатора и увеличение зазора между излучателем и противовесом, представленный на рисунке 14, где удалось добиться полосы согласования по уровню $|S_{11}| \leq -10$ дБ примерно в 60%.

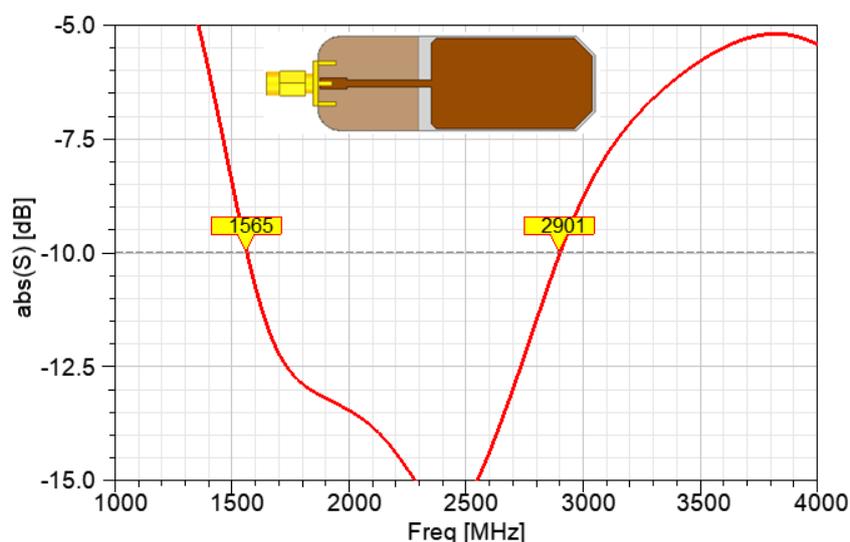


Рис. 14. Согласование антенны в широком диапазоне частот с помощью трансформатора и увеличенного зазора между излучателем и противовесом.

Несмотря на очевидное улучшение согласования антенны, увеличенный зазор между излучателем и противовесом приводит к несимметричному возбуждению антенны и смещению максимума ДН на верхних частотах рассматриваемого диапазона 1500-4000 МГц (рисунок 15).

На рисунке 16 представлена конструкция рассматриваемой антенны, где изменена форма противовеса, с одной стороны обеспечивающая зазор с излучателем для согласования в верхней части рабочего диапазона, с другой обеспечивающая симметричное возбуждение элементов антенны за счет примыкания линии к излучателю. Дополнительное согласование обеспечивают срезы углов в нижней части (со стороны входа) излучателя.

Путем оптимизации размеров всех элементов антенны удалось добиться согласования по уровню $|S_{11}| \leq -10$ дБ в двух широких диапазонах частот (рис. 17): 1730-2918 МГц и 3187-3763 МГц (51,1% и 16,6% соответственно). Если принять допущение по уровню $|S_{11}| \leq -9$ дБ, тогда антенна согласована в одном сверхширокополосном диапазоне 1730-3763 МГц, что соответствует относительному уровню в 74%. При этом, в соответствии с графиками на рисунках 18-20, форма ДН достаточно стабильна во всем рассматриваемом диапазоне частот, провалы в уровне, но не более 2 дБ, наблюдаются только в верхних частотах диапазона.

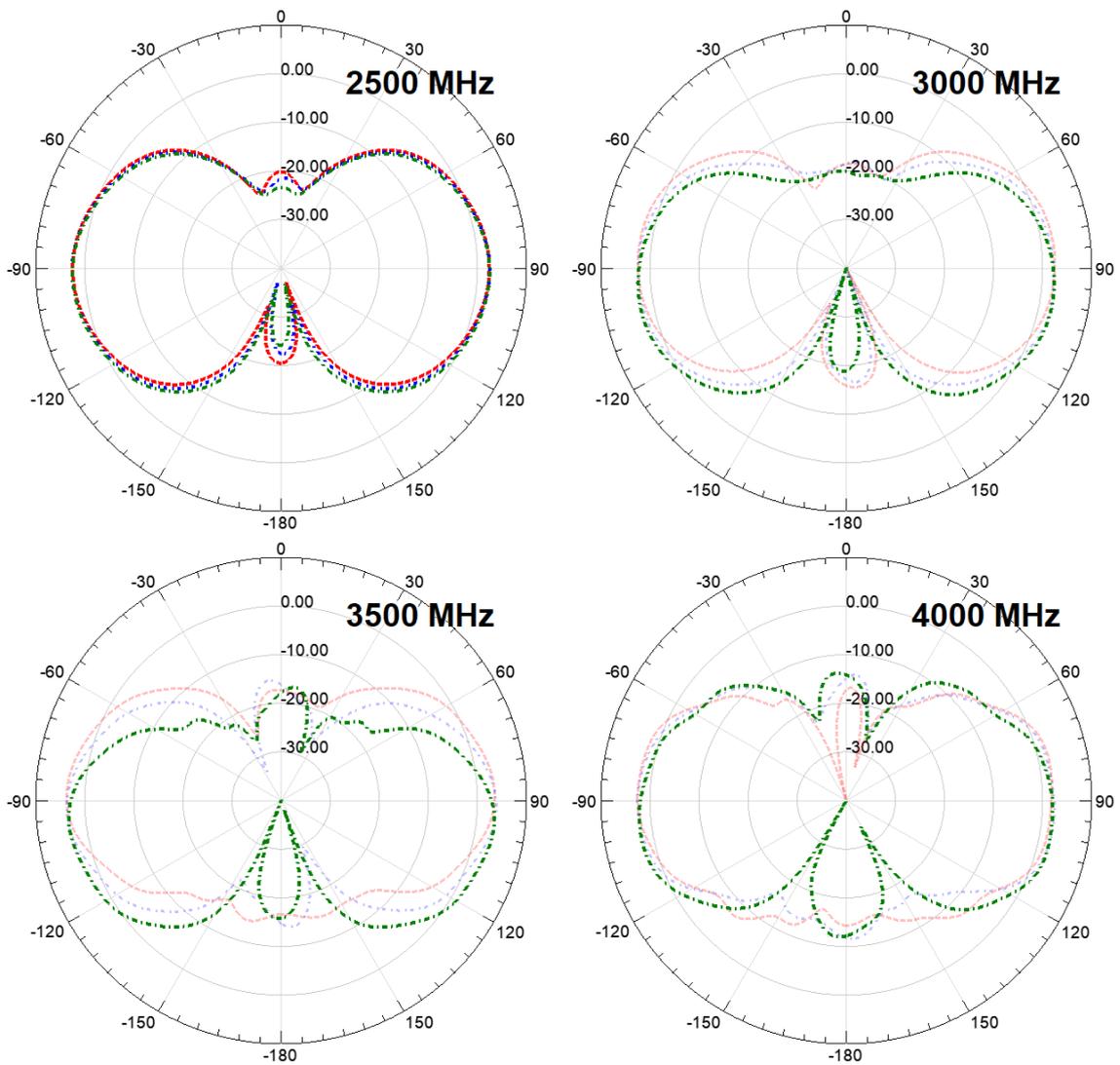


Рис. 15. Смещение максимумов ДН антенны при увеличении зазора между излучателем и противовесом.

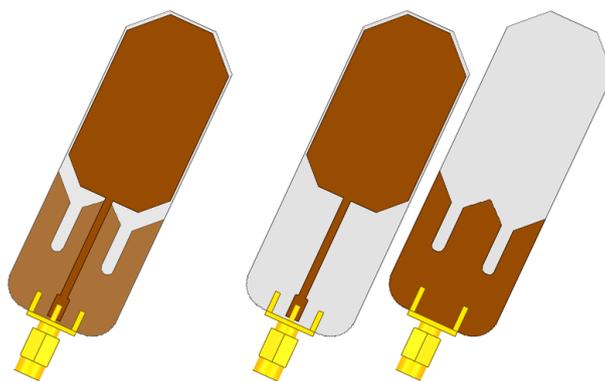


Рис. 16. Конструкция оптимизированного печатного вибратора.

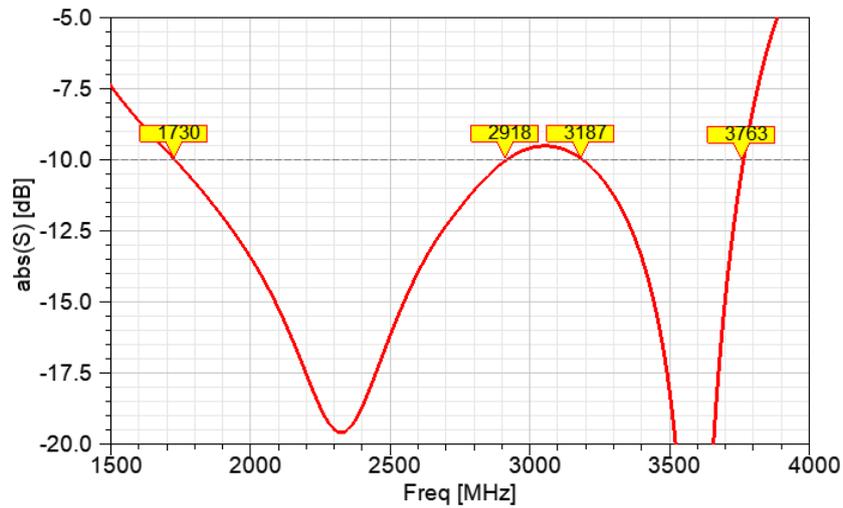


Рис. 17. Частотная зависимость коэффициента отражения на входе оптимизированного печатного вибратора.

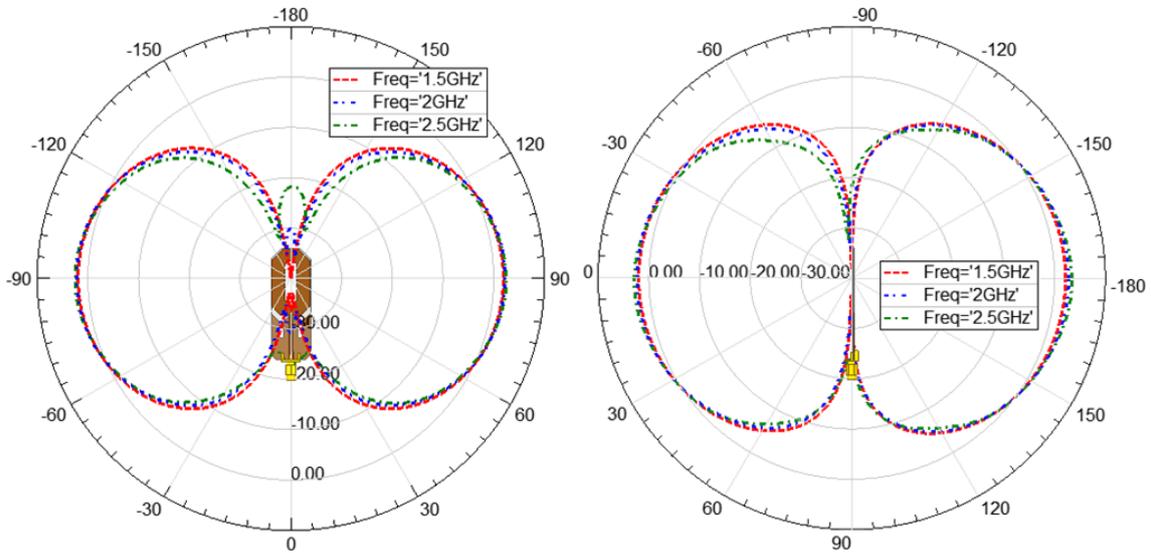


Рис. 18. ДН оптимизированного печатного вибратора в углометной плоскости на частотах 1500, 2000 и 2500 МГц.

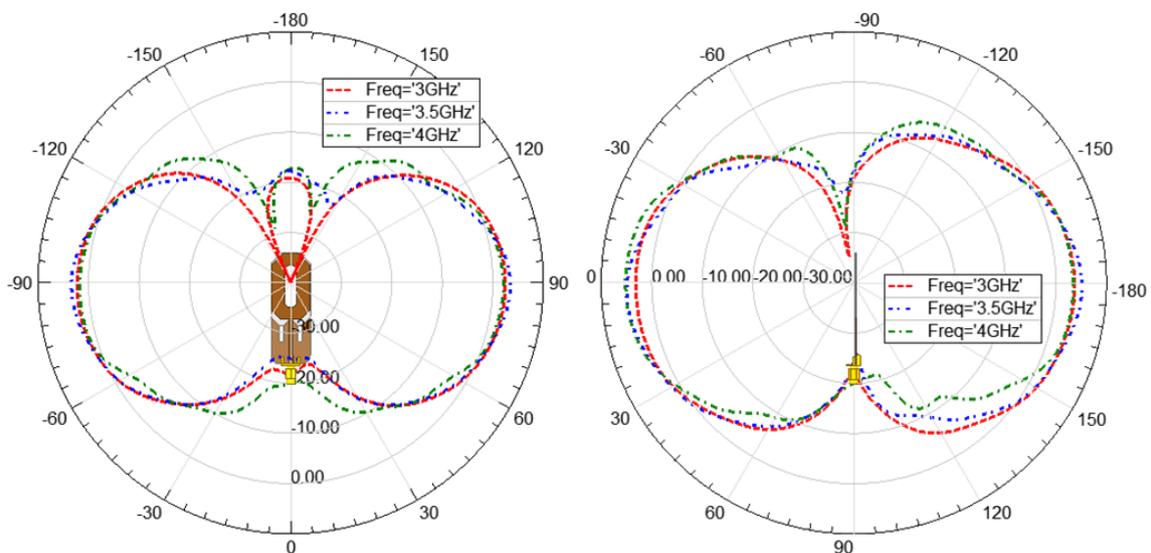


Рис. 19. ДН оптимизированного печатного вибратора в углометной плоскости на частотах 3000, 3500 и 4000 МГц.

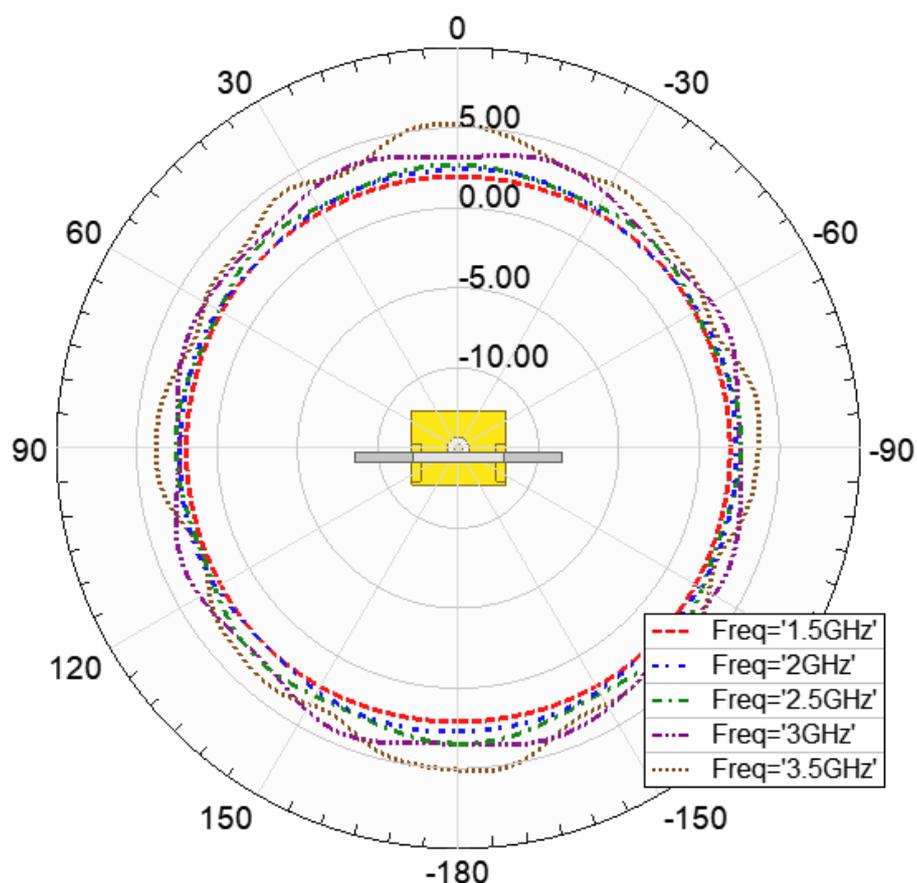


Рис. 20. ДН оптимизированного печатного вибратора в азимутальной плоскости.

4. Результаты моделирования широкополосной бортовой антенны

Для снижения сопротивления воздушным потокам антенной при установке ее на БПЛА без обтекателя в конструкции выполнены сквозные вырезы, не снижающие ее прочностные характеристики и характеристики излучения. Кроме того, добавлены два металлических элемента на лицевой стороне антенны у ее входа, необходимые для более прочного соединения с разъемом на входе, что требуется особенно если антенна будет использоваться без обтекателя. Полученная в результате исследований конструкция широкополосной антенны представлена на рисунке 21.

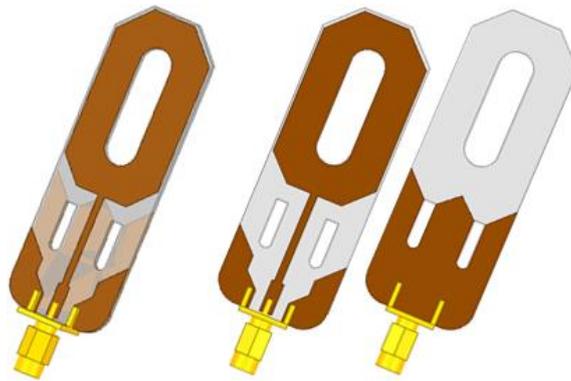


Рис. 21. Конструкция спроектированной широкополосной антенны.

Результаты моделирования полученной конструкции широкополосной антенны представлены на рисунках 22-24.

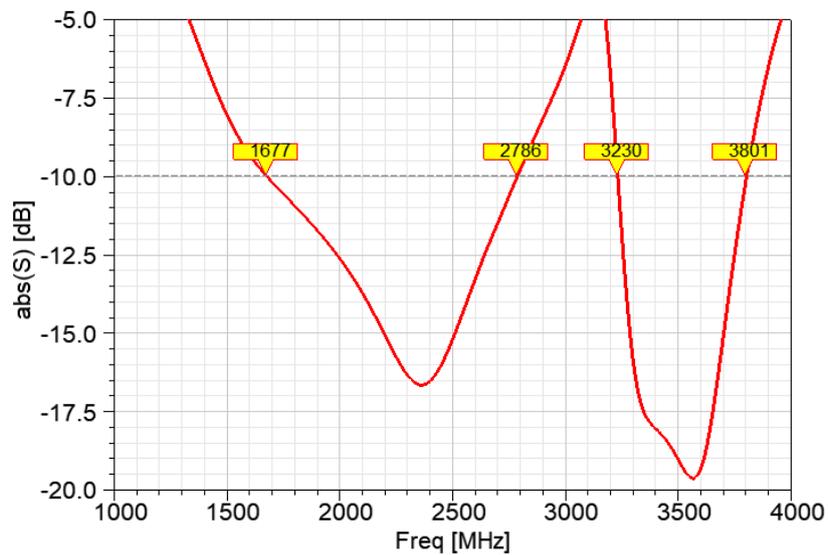


Рис. 22. Частотная зависимость коэффициента отражения на входе спроектированной широкополосной антенны.

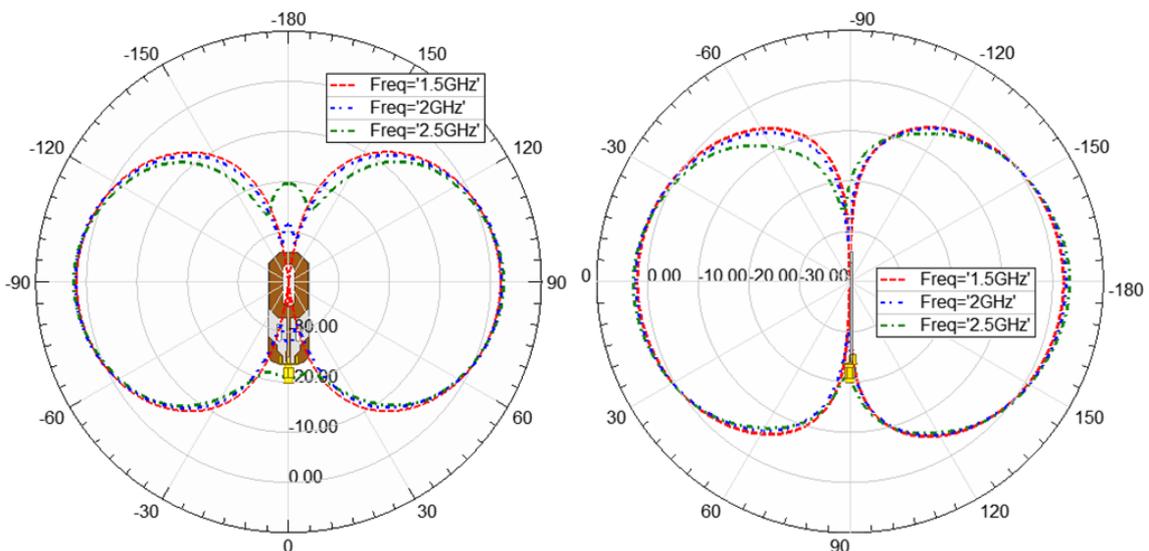


Рис. 23. ДН спроектированной широкополосной антенны в угломерной плоскости на частотах 1500, 2000 и 2500 МГц.

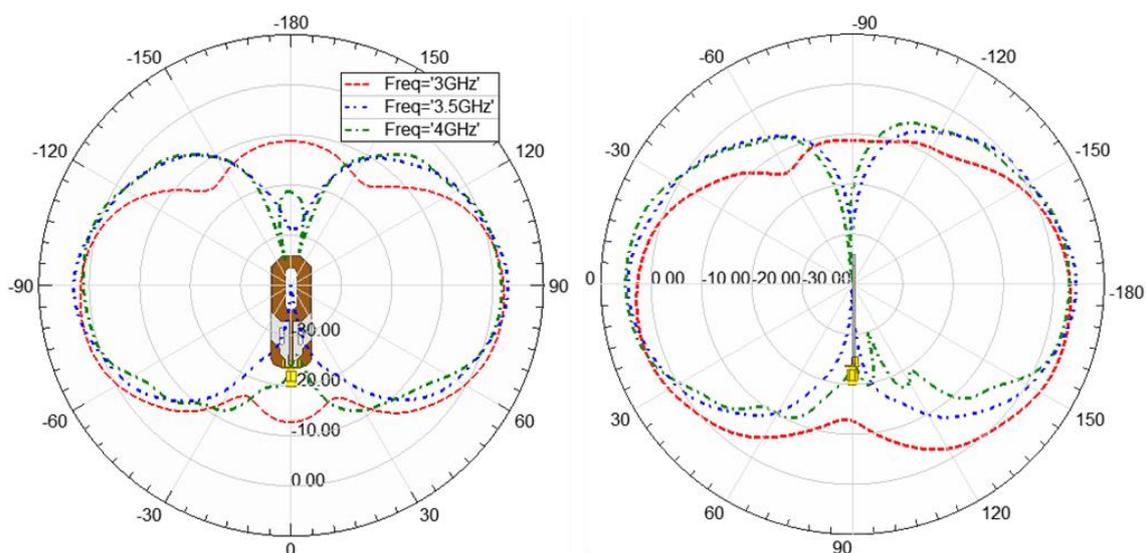


Рис. 24. ДН спроектированной широкополосной антенны в угломестной плоскости на частотах 3000, 3500 и 4000 МГц.

Согласно полученным результатам моделирования антенна согласована по уровню $|S_{11}| \leq -10$ дБ в двух широких диапазонах частот: 1677–2786 МГц (50%) и 3230–3801 МГц (16,2%). В соответствии с графиками на рисунках 21 и 22 форма ДН антенны достаточно стабильна во всем рассматриваемом диапазоне частот, имеет небольшое смещение максимума на частоте 3000 МГц.

Так как антенна предназначена для установки непосредственно на БПЛА или другой носитель, было исследовано влияние отражающей проводящей поверхности на ее характеристики (рисунки 25-27).

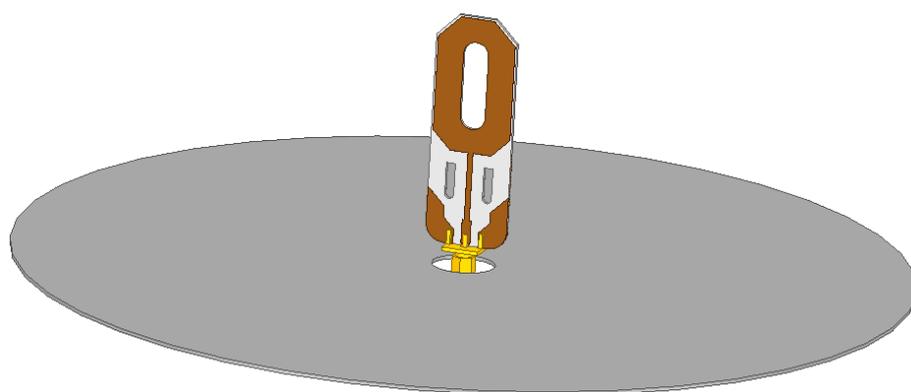


Рис. 25. Модель отражающей поверхности под антенной.

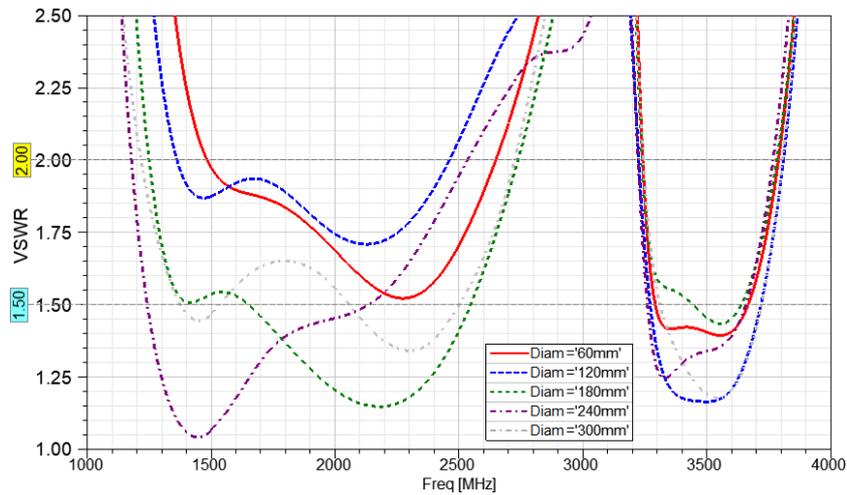


Рис. 26. Влияние отражающей поверхности на согласование антенны.

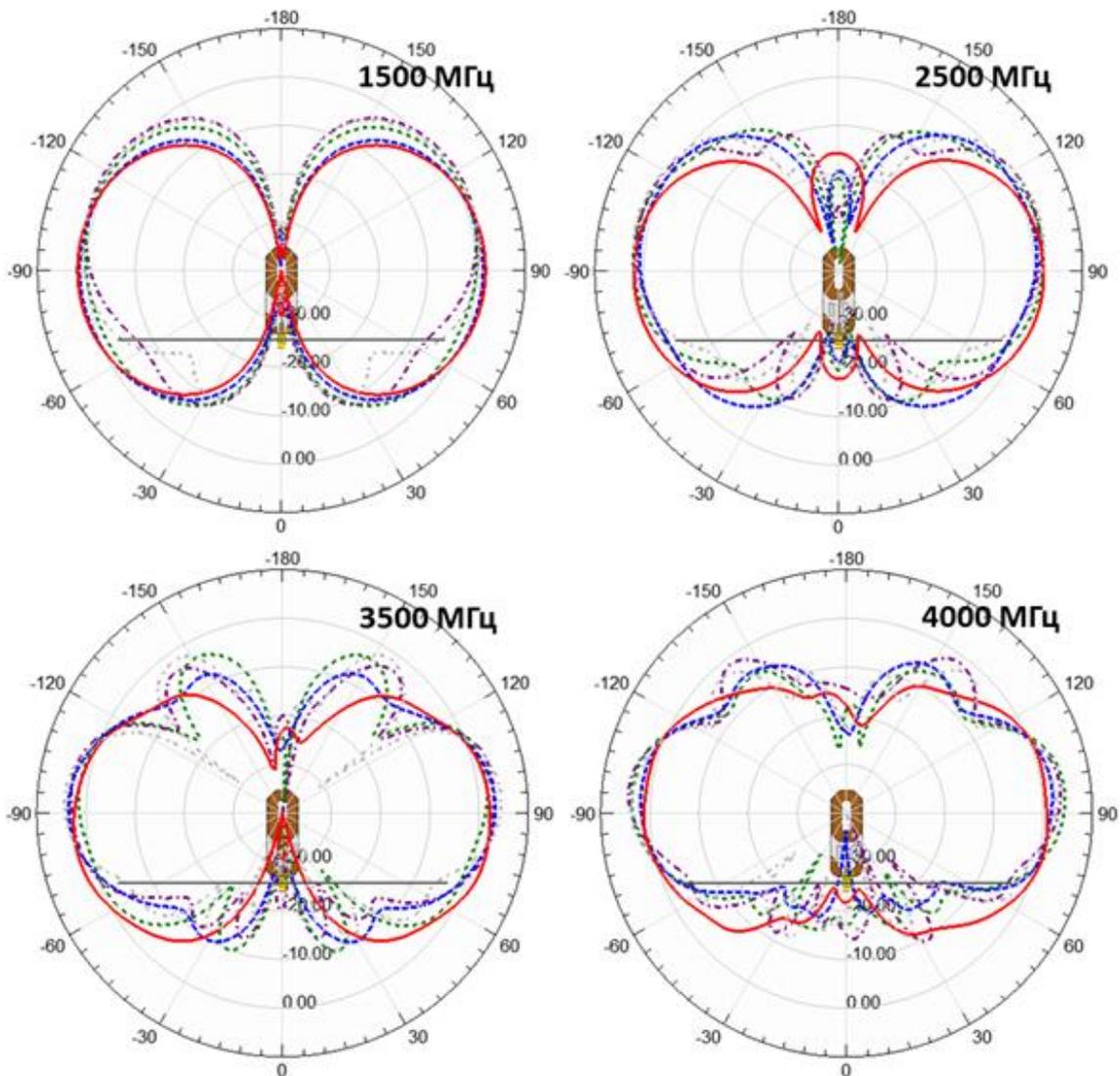


Рис. 27. Влияние отражающей поверхности на ДН антенны.

Как мы видим, в целом искажения ДН не критичны (рисунок 27), согласование антенны ухудшается (рисунок 26) в нижнем поддиапазоне, однако КСВ остается в пределах 2 в широкой полосе частот, хотя и повышается

в некоторых частях поддиапазона, верхний поддиапазон слабо подвержен влиянию проводящей поверхности.

Таким образом, на основе предлагаемой в статье методики спроектирована антенна с достаточно высокими характеристиками.

5. Экспериментальные исследования широкополосной бортовой антенны

Изготовленная на основе результатов моделирования антенна показана на рисунке 28. Конструкция выполнена на основе печатных технологий на диэлектрической подложке из материала ФАФ-4Д ($\epsilon = 2,55$; $\text{tg}\sigma = 0,001$) с точностью не хуже 0,05 мм; размер печатной платы без разъема составляет $63 \times 22,5 \times 1$ мм³. Для подключения антенны к приемопередающему оборудованию на ее входе припаян разъем SMA-Female. Полученные при измерениях характеристики антенны приведены на рисунках 29-33.



Рис. 28. Спроектированная широкополосная антенна.

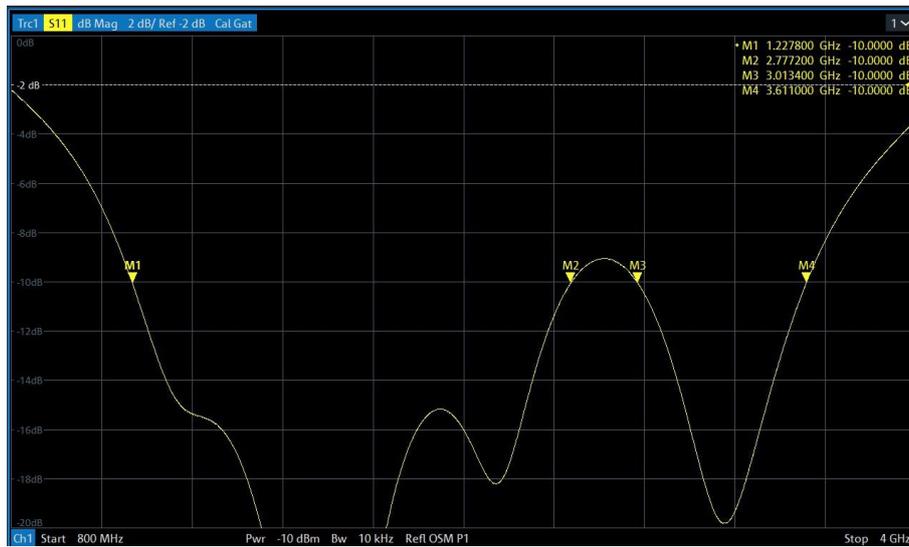


Рис. 29. Частотная зависимость коэффициента отражения, измеренная на входе спроектированной широкополосной антенны.

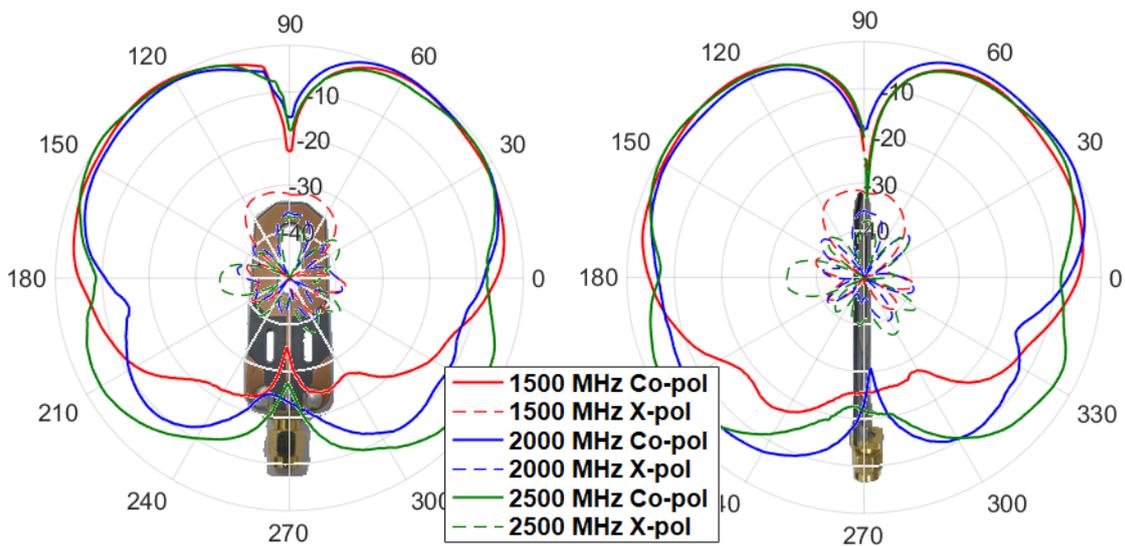


Рис. 30. ДН спроектированной антенны в угломерной плоскости.

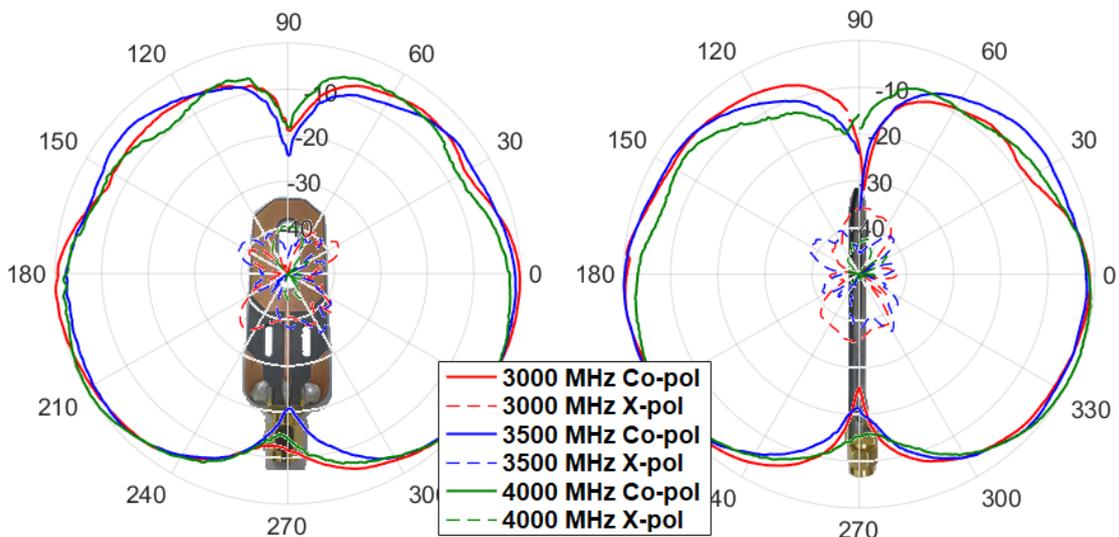


Рис. 31. ДН спроектированной антенны в угломерной плоскости.

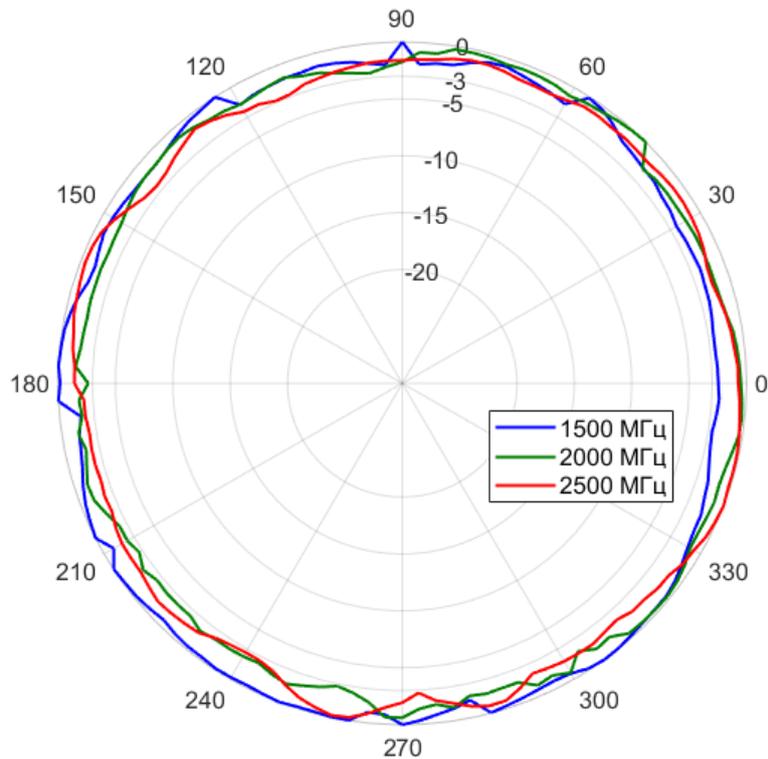


Рис. 32. ДН спроектированной широкополосной антенны в азимутальной плоскости, измеренная на частотах 1500, 2000 и 2500 МГц.

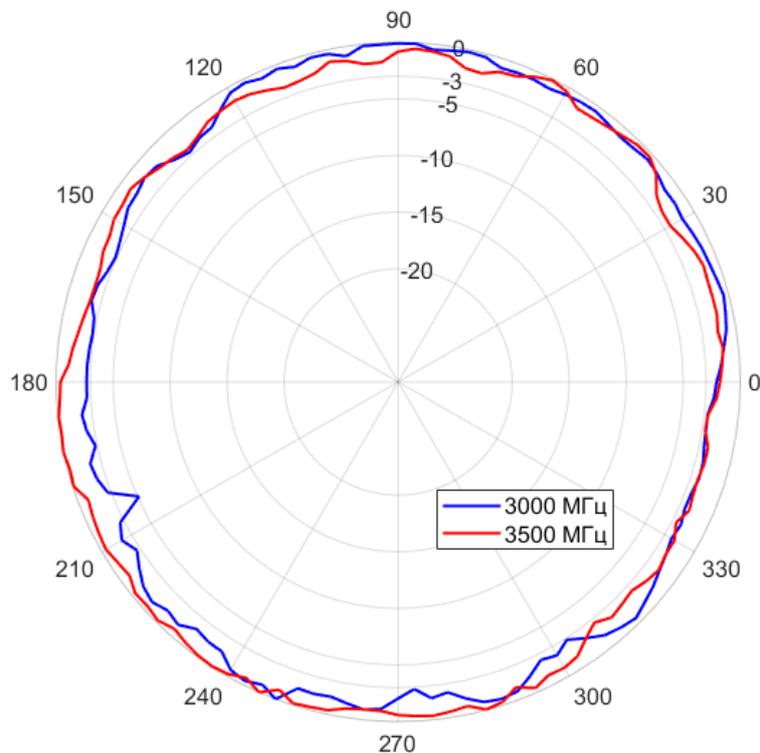


Рис. 33. ДН спроектированной широкополосной антенны в азимутальной плоскости, измеренная на частотах 3000 и 3500 МГц.

Анализируя результаты измерений получено, что спроектированная антенна согласована по уровню $|S_{11}| \leq -10$ дБ в двух широких диапазонах частот (рисунок 29): 1228-2777 МГц (77,4%) и 3013-3611 МГц (18,1%).

При допущении к уровню $|S_{11}| \leq -9$ дБ антенна согласована в одном сверхширокополосном диапазоне 1228-3611 МГц (98,5%). В целом, вид кривой схож с кривой, полученной при моделировании, однако видна тенденция смещения полосы частот примерно на 100-200 МГц влево, при этом измеренная полоса согласования шире, полученной в результате моделирования. С одной стороны, смещение по частоте может быть вызвано небольшим отличием значения относительной диэлектрической проницаемости реальной подложки и значениями, используемыми в модели. С другой стороны, разница в измеренной полосе согласования и полученной в модели может быть вызвана недостаточной точностью расчетов при моделировании, связанное в первую очередь с длительностью расчетов, во вторую очередь – с вычислительной мощностью используемого компьютера. Изготовленная антенна с точки зрения согласования показала результаты выше, чем рассчитанные на основе модели. В соответствии с графиками на рисунках 32 и 33, форма ДН антенны стабильна во всем рассматриваемом диапазоне частот, наблюдаются небольшие провалы в уровнях, но не более чем 3 дБ, вызванные в первую очередь погрешностями, допущенными при измерениях.

Заключение

В статье рассмотрен метод получения диаграммы направленности стабильной формы в виде тороида в широком диапазоне частот для антенны на основе широкополосного печатного прямоугольного излучателя. Согласование подобной антенны с линией передачи (коаксиальной, например) с волновым сопротивлением 50 Ом по входу осуществляется посредством четвертьволнового трансформатора и специальной формы противовеса, одновременно играющего роль экрана для микрополосковой линии передачи.

Предлагаемый метод позволил получить конструкцию антенны, формирующую поле с ДН в виде тороида в диапазоне частот 1500-4000 МГц с коэффициентом усиления не менее 2 дБи в направлении максимального излучения с небольшими провалами в пределах 1-2 дБ. Первоначально

характеристики антенны рассчитаны в специальном программном обеспечении на основе применения численных методов: было получено две широких полосы согласования по уровню коэффициента отражения (модуля S_{11}) не более минус 10 дБ: 1677-2786 МГц (50%) и 3230-3801 МГц (16,2%). На основе модели был изготовлен макет и измерены его характеристики: получены более широкие полосы согласования по уровню коэффициента отражения (модуля S_{11}) не более минус 10 дБ: 1228-2777 МГц (77,4%) и 3013-3611 МГц (18,1%); при этом, при уровне модуля S_{11} не более минус 9 дБ антенна согласована по входу со сверхширокой полосой – 98,5%.

Размеры антенны могут быть пересчитаны под другой диапазон частот. Антенна благодаря своей конструкции малому весу и размерам в первую очередь предназначена для установки на малоразмерные летательные аппараты (беспилотные или пилотируемые), где требуется обеспечение приема или передачи радиосигналов в широком диапазоне частот или нескольких диапазонах (например, системы связи с БПЛА, построенные на основе каналов прямой видимости или каналов сотовой связи). Выполненный анализ как существующих антенн, предлагаемых на сайтах поставщиков или разработчиков [7-13], так и антенн, отраженных в различных научных трудах [14-18], показывает, что не существует аналогов с лучшими или даже близкими характеристиками к полученным по результатам расчетов и экспериментов предлагаемой широкополосной антенны.

Финансирование: работа выполнена на основе инициативной НИР, финансируемой АО «ЭЙРБУРГ»

Литература

1. Sabban A. (ed.). Wearable systems and antennas technologies for 5G, IOT and medical systems. – CRC Press, 2020.
2. Chen Z.N., Luk K.M. Antennas for base stations in wireless communications. – McGraw-Hill, 2009.

3. Shishkin M.S. Wideband High-Gain Dual-Polarized Antenna for 5G Communications // 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2021. – P. 311–316.
4. Shishkin M.S., Shabunin S.N. Analysis of Various Designs of Wideband Patch Antennas // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2022. – P. 1190–1193.
5. Zeng Y. et al. (ed.). UAV Communications for 5G and Beyond. – John Wiley & Sons, 2020.
6. Saad W. et al. Wireless communications and networking for unmanned aerial vehicles. – Cambridge University Press, 2020.
7. Amphenol Procom: [сайт] – URL: <https://amphenolprocom.com/products> (дата обращения: 15.05.2024). – Текст. Изображение : электронные.
8. Смородинов А.А. Адаптивная антенна на беспилотном летательном аппарате или как одновременно увеличить дальность связи и подавлять помехи / А. А. Смородинов. – Текст. Изображение: электронные // Хабр: [сайт]. – 2023. – 16 янв. – URL: <https://habr.com/ru/articles/710834> (дата обращения 15.05.2024).
9. Taoglas: [сайт] – URL: <https://www.taoglas.com/product> (дата обращения 15.05.2024). – Текст. Изображение: электронные.
10. TELEOFIS: [сайт] – URL: <https://teleafis.ru/production> (дата обращения 15.05.2024). – Текст. Изображение: электронные.
11. 42unita: [сайт] – URL: <https://www.42unita.ru/catalog> (дата обращения 15.05.2024). – Текст. Изображение: электронные.
12. AliExpress: [сайт] – URL: <https://aliexpress.ru> (дата обращения 15.05.2024). – Текст. Изображение: электронные.
13. XLTE.RU: [сайт] – URL: https://xlte.ru/antenny_vse (дата обращения 15.05.2024). – Текст. Изображение: электронные.
14. Fraz Q., Ahmad J., Jafar H.M. Design and development of broadside Omni antennas for UAVs //2017 14th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). – IEEE, 2017. – P. 690–692.

15. Yan Y.D., Jiao Y.C. Omnidirection vertically polarized antenna on unmanned aerial vehicle //2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). – IEEE, 2018. – P. 1–3.
16. Kang D.G., Choi J. Compact segmented loop antenna for UAV applications // 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). – IEEE, 2017. – P. 1–2.
17. Cui Y. et al. A compact tri-band horizontally polarized omnidirectional antenna for UAV applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2019. – Т. 18. – №. 4. – P. 601–605.
18. Sumi M., Suzuki Y. A Wideband Single-Sided Folded-Off-Center-Fed Dipole Antenna for 4G/5G/Wi-Fi M2M/IoT Applications and UAVs // 2021 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). – IEEE, 2021. – P. 3–4.
19. Беньковский З., Липинский Э. Любительские антенны коротких и ультракоротких волн: Теория и практика: Пер. с поль. – Радио и связь, 1983.
20. Войтович Н.И., Ершов А.В., Соколов А.Н. УКВ вибраторные антенны // Челябинск: Издательство ЮУрГУ. – 2002.
21. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – 1988.
22. Бахарев С.И. и др. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. – 1982.
23. Fusco V.F. Microwave circuits: analysis and computer-aided design. – 1987.

Для цитирования:

Шишкин М.С. Разработка компактной широкополосной антенны со стабильной формой диаграммы направленности для применения в составе малоразмерных БПЛА. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.10>