

МОБИЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396.6

МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА Q-ДИАПАЗОНА

© 2022 г. А. В. Ефремов¹*, А. В. Гладких¹, Е. А. Митрофанов¹, С. В. Луговский¹

¹ Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

*E-mail: era_1@mil.ru

Поступила в редакцию 21.12.2021 г.

После доработки 14.01.2022 г.

Принята к публикации 17.01.2022 г.

В результате теоретических расчетов и электродинамического моделирования с помощью программного обеспечения AWR (Design Environment и CST Microwave Studio) разработана микрополосковая антенная решетка Q-диапазона частот. Показано, что антенная решетка может использоваться не только в мобильных терминалах, но и в качестве облучателя параболической антенны на частотах от 39 до 46 ГГц. Продемонстрирована конструкция антенны, получены графики зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению, диаграммы направленности в E- и H-плоскостях.

DOI: 10.56304/S2782375X22010090

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время микрополосковые антенные решетки (МΠΑР) находят широкое применение в сфере телекоммуникационных систем за счет своих преимуществ: тонкий профиль, малый вес, конформность, возможность возбуждения волны круговой поляризации, возможность реализации многочастотных антенн, интеграция со схемой питания в антенных решетках, дешевизна и простота реализации. Работы по совершенствованию конструкции МΠΑР активно ведутся как в России, так и за рубежом [1–3]. Однако, несмотря на ряд преимуществ, присущих данной антенне, главным ее минусом является недостаточная ширина рабочего диапазона.

Q-диапазон занимает полосу между 33 и 50 ГГц в области сверхвысоких частот (СВЧ) радиоспектра, которые используются в основном для спутниковой связи, наземной микроволновой связи и радиоастрономии. Одним из первых коммерческих операторов, начавших тестировать возможности Q/V-диапазона, стал Eutelsat со спутником Eutelsat 65 West A.

На сегодня свободные частотные ресурсы для спутников связи, работающих на геостационарной орбите в диапазонах C, Ku, Ka, практически исчерпаны [4]. Вместе с тем объемы информации, передаваемые через спутники связи, уверенно растут. Вследствие этого для перспективных спутниковых систем связи необходимо рассматривать другие, более широкие полосы частот. Для оказания услуг связи, таких как доступ в интернет, трансляция сигналов интерактивного интер-

нет-телевидения, телевидения высокой четкости, трансляция сигналов управления автоматизированными системами управления военной техникой (беспилотными летательными аппаратами), актуальным является вопрос использования в линиях передачи данных полосы частот пропускания каналов связи от 1 ГГц и более. Для построения перспективных спутниковых систем связи наиболее подходит диапазон частот от 30 ГГц, так как в настоящее время использование в спутниковой связи частотных ресурсов диапазонов C, Ku, Ka с полосой частот более 2 ГГц без ущерба действующим системам спутниковой связи невозможно. Применение спутниковых систем связи Q-диапазона обусловлено значительным преимуществом, которое дает использование рабочих полос пропускания каналов связи шириной от 2.5 до 5 ГГц.

Вместе с тем затухание сигнала в атмосфере на линии спутник–Земля в Q-диапазоне выше, чем в низкочастотных диапазонах [5]. Таким образом, использование Q-диапазона позволяет, с одной стороны, реализовать более широкополосную (высокоскоростную) передачу сигнала по сравнению с более низкочастотными диапазонами, а с другой – при передаче сигналов в Q-диапазоне частот необходимо учитывать дополнительные потери сигнала.

Для спутниковой связи наиболее подходящим вариантом являются зеркальные (параболические) антенны и фазированные антенные решетки [6].

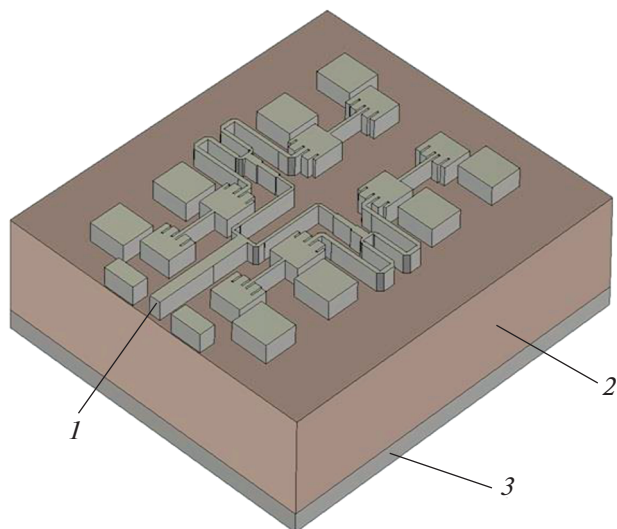


Рис. 1. Аксонометрическое схематичное изображение антенны.

Цель настоящей работы – исследование полосы рабочих частот при изменении параметров и конструктивных особенностей МПАР. Объектом исследования является микрополосковая антенная решетка.

МЕТОДЫ

Конструкция МПАР Q-диапазона, разработанная авторами данной публикации, представляет собой двухслойную антенную решетку (рис. 1, 2) в печатном исполнении, выполненную на подложке, содержащей экран, активные и пассивные излучатели, питающие линии и двухступенчатый делитель мощности, образующие несимметричную микрополосковую линию.

На рис. 1 и 2 использованы следующие обозначения: 1 – проводящий рисунок, 2 – подложка, 3 – экран, 4 – разъем питания антенны, 5 – питающая линия, 6 – первичный делитель мощности, 7 – вторичный делитель мощности с четвертьволновыми трансформаторами, 8 – активный излучатель, 9 – пассивный излучатель.

Восемь активных излучателей выполнены в виде прямоугольных металлических пластин с особенностями печатного рисунка и имеют по четыре поперечных выреза вдоль одной из сторон (рис. 2), которые совместно с параллельными им внешними сторонами активных излучателей создают электромагнитное излучение. У каждого активного излучателя размещен пассивный излучатель в виде прямоугольной металлической пластины таким образом, чтобы между ними была боковая (емкостная) связь. На пассивный излучатель в отличие от активного сигнал от питающей линии не подается.

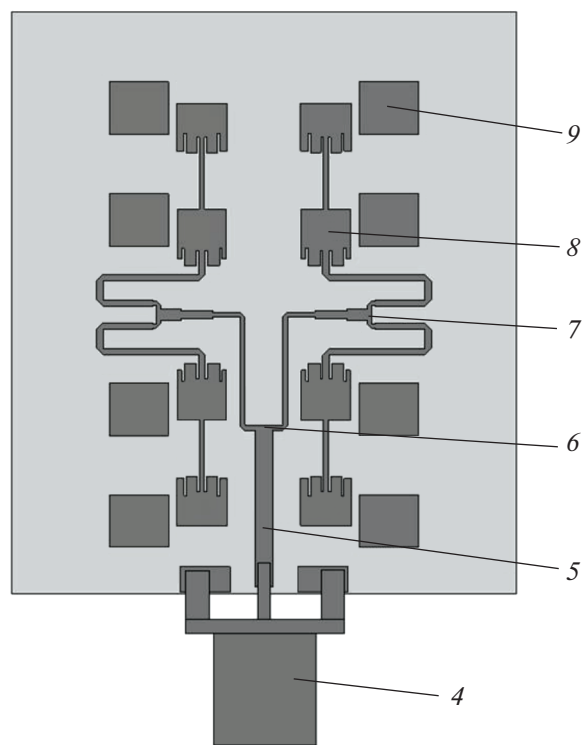


Рис. 2. Вид сверху излучающей стороны антенны.

Делитель мощности МПАР состоит из Т-образного первичного делителя, осуществляющего первоначальное деление мощности сигнала, четвертьволновых трансформаторов волнового сопротивления и двух симметрично расположенных друг относительно друга и параллельно соединенных Т-образных вторичных делителей, обеспечивающих передачу сигнала от плеч первого делителя на каждый активный излучатель.

Двухступенчатый делитель мощности и питающая линия являются связующим звеном между активными излучателями и входным портом.

Возбуждение активных излучателей осуществляется за счет их непосредственной связи с делителем мощности.

Ширина активного излучателя, полученная экспериментальным путем, зависит от длины волны в линии λ_B , рассчитанной на центральной частоте рабочего диапазона

$$W = 0.227\lambda_B, \quad (1)$$

где $\lambda_B = \frac{2c\sqrt{\epsilon}}{f_B + f_H}$; c – скорость света, м/с; f_B и

f_H – верхняя и нижняя границы рабочего диапазона частот; ϵ – диэлектрическая проницаемость материала подложки.

Длину излучателя L рассчитывали по формуле

$$L = 0.217\lambda_B. \quad (2)$$

Дополнительно у каждого активного излучателя размещен пассивный излучатель таким образом, чтобы между каждым активным и соответствующим пассивным излучателями была боковая емкостная связь. Размеры активных и пассивных излучателей одинаковы, однако пассивные выполнены в виде прямоугольников без вырезов.

Делители с питающей линией являются связующим звеном между активными излучателями и входным портом и выполняют распределение сигнала, поступающего от разъема питания антенны. При этом делители и питающая линия совместно с активными излучателями выполнены в виде несимметричной микрополосковой линии на распространенной в производстве подложке для печатных СВЧ-плат, например, марки RO4003C толщиной $h = 0.508$ мм, диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3.55$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\delta) = 0.0027$.

МПАР работает следующим образом. СВЧ-сигнал подается на входной разъем антенны 4 (рис. 2), от него через питающую линию 5 поступает на вход первичного делителя мощности 6, распределяясь, проходит через четвертьволновые трансформаторы до выходных плеч двух вторичных делителей 7 и поступает на активные излучатели 8. Происходит возбуждение электрического поля в вырезах активных излучателей, что обеспечивает сонаправленное протекание эквивалентного тока вдоль каждой из внешних сторон антенны, параллельных зазорам активных элементов, и возбуждение электромагнитной волны шестью участками протекания тока в каждом активном излучателе.

Токи, протекающие по краям активных излучателей, за счет емкостной связи через зазор создают индукционные токи проводимости на параллельных им сторонах пассивных излучателей 9, действующих как пассивные резонаторы, изменяя форму диаграммы направленности, направляя радиоволны, излучаемые активными излучателями, в один луч, увеличивая направленность антенной решетки. Пассивные излучатели настроены на нижнюю частоту рабочего диапазона антенны и тем самым расширяют полосу рабочих частот.

Кроме того, эффект расширения полосы рабочих частот по сравнению с антенной с традиционными прямоугольниками (без вырезов) активными излучателями достигается за счет добавления в них вырезов разной длины.

Оригинальная форма продольных вырезов активных излучателей обеспечивает излучение на верхней границе рабочего частотного диапазона антенны, внешние боковые грани излучателей создают электромагнитное излучение в нижней границе частотного диапазона.

В микрополосковой антенне возбуждение активных излучателей обеспечивается с помощью несимметричной микрополосковой линии передач, уложенной между активными излучателями, расстояние между центрами которых не превышает 1.1 длины волны излучаемого электромагнитного поля для получения максимального коэффициента усиления по направлению к нормали плоскости антенны, а также для передачи сигнала в диапазоне частот от 39 до 46 ГГц с потерями мощности, не превышающими 11% от мощности, подаваемой на разъем антенны в указанном частотном диапазоне (уровень коэффициента стоячей волны по напряжению ниже двух).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно на графике зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) от частоты (рис. 3), полученного путем электродинамического моделирования, потеря мощности в микрополосковой линии не превышает 25% при $\text{КСВН} \leq 3$ в пределах, отмеченных на графике, а на частотах 40 и 44 ГГц потери составляют менее 10%. На рис. 4 изображена диаграмма направленности антенны в H -плоскости в декартовой системе координат, на которой видно, что на частоте 40 ГГц максимум излучения направлен параллельно нормали к плоскости антенны и составляет примерно 11 дБ (главный лепесток), а при увеличении частоты происходит образование нескольких максимумов. На рис. 5 изображена диаграмма направленности в E -плоскости, которая показывает, что направление максимума излучения, величина которого 13.5 дБ, приходится также на нормаль к плоскости антенны. Зависимость максимального коэффициента усиления антенны от частоты (рис. 6) показывает, что на частоте 40 ГГц антенна имеет максимальное усиление (что также доказывают графики на рис. 4, 5).

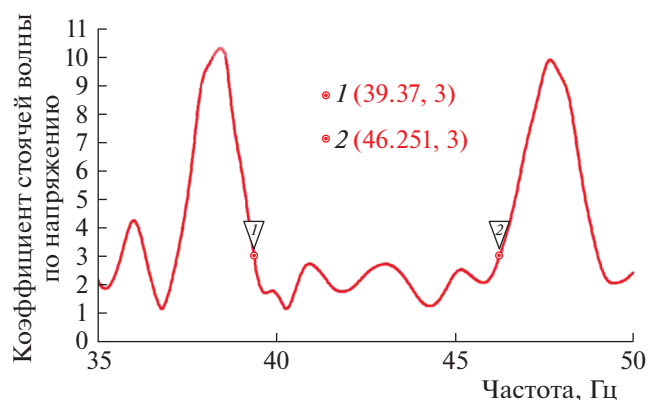


Рис. 3. График зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению от частоты.

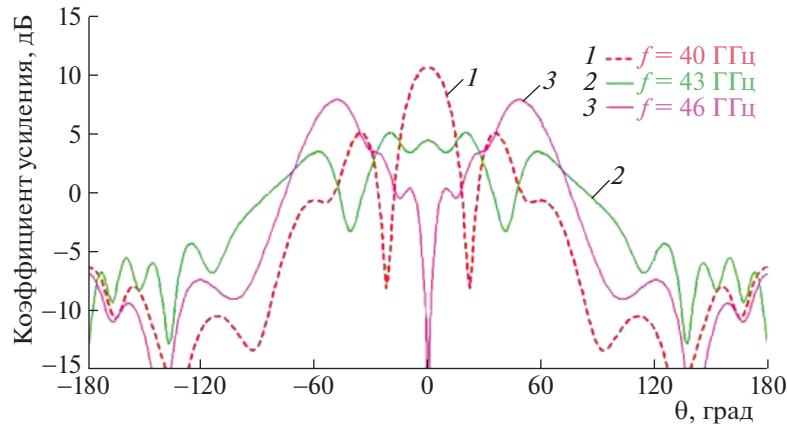


Рис. 4. Диаграмма направленности антенны в *H*-плоскости МПАР Q-диапазона в декартовой системе координат.

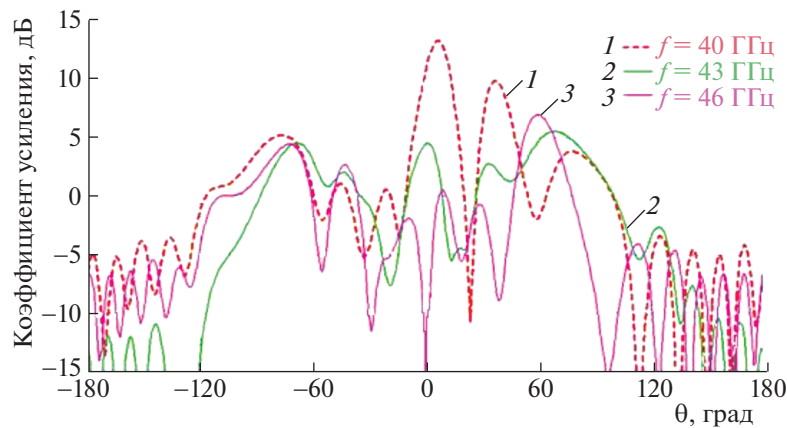


Рис. 5. Диаграмма направленности антенны в *E*-плоскости МПАР Q-диапазона в декартовой системе координат.

Разработанная МПАР Q-диапазона обладает следующими основными характеристиками:

- КСВН ≤ 3 на всем диапазоне частот от 39.37 до 46.251 ГГц;
- КСВН ≤ 2 в окрестностях частот 40 и 44 ГГц;

- коэффициент усиления антенны варьируется от 7.66 до 13.51 дБ в зависимости от частоты (в диапазоне частот 40–46 ГГц);
- максимум излучения направлен по нормали к плоскости антенны;
- ширина диаграммы направленности (главного луча) на частоте 40 ГГц составляет $\sim 20^\circ$;
- общие геометрические размеры антенны составляют $34.6 \times 30.0 \times 0.578 \text{ мм}^3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция МПАР Q-диапазона, отличающаяся от существующих аналогов:

- оригинальной геометрией печатного рисунка, которая включает в себя функционально связанные активные излучатели, двухступенчатый делитель мощности, образующие несимметричную микрополосковую линию, а также пассивные излучатели в виде прямоугольной металлической пластины, определяющие нижнюю границу рабочего диапазона частот;

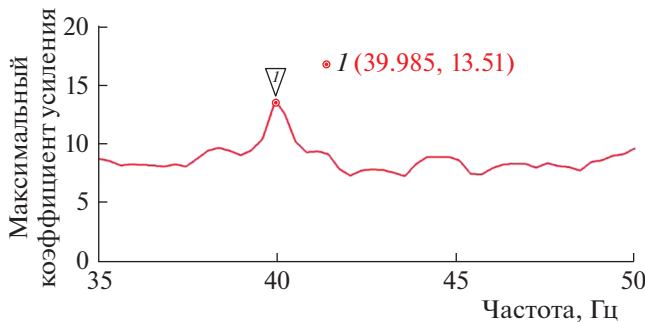


Рис. 6. График максимального коэффициента усиления МПАР Q-диапазона в зависимости от частоты.

– формой активных излучателей, в отличие от традиционных излучателей МПАР имеющих по четыре выреза разной длины и являющихся вторичными источниками электромагнитного излучения по отношению к внешним боковым краям активных излучателей, чем определяют верхнюю границу рабочего диапазона частот излучения антенны 46 ГГц;

– осуществлением возбуждения активных излучателей с помощью несимметричной микрополосковой линии передач, уложенной между активными излучателями, расстояние между центрами которых не превышает 1.1 длины волны излучаемого электромагнитного поля для получения максимального коэффициента усиления по направлению к нормали плоскости антенны.

Из-за сравнительно малых размеров МПАР Q -диапазона можно использовать в портативных устройствах, где местонахождение источника сигнала (спутника, базовой станции) неизвестно, а также в стационарных малогабаритных устройствах.

Разработанная авторами МПАР Q -диапазона имеет те же направленные характеристики (ко-

эффициент усиления, ширину главного луча, форму диаграммы направленности и т.д.), что и рупорные антенны, работающие в том же частотном диапазоне, но имеет меньшие габаритные размеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент US 7675466, В2 Структура антенно-фидерных линий для миллиметрового диапазона: заявл. 09.03.2010.
2. Патент US 9391375, В1 Плоская реконфигурируемая широкодиапазонная поляризованная антенна: заявл. 12.07.2016.
3. *Кропотов В.А.* Патент № 26131524, РФ, МПК H01Q 9/28 (2006.01), Антенная решетка: заявл. 07.11.2016: опубл. 25.09.2017.
4. *Сподобаев М.Ю., Ментус О.В., Дьякова Е.А.* // Труды НИИР: сборник научных статей 2019. С. 75.
5. *Потапов Л.А.* Учебное пособие для бакалавриата и специалитета / 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2019. 196 с.
6. *Синицын Ю.И.* Учебно-методическое пособие для СПО. Саратов: Профобразование, 2020. 113 с.