

УДК 621.396.677

Печатная директорная двухдиапазонная антенна новой структуры*

Н.В. ТАРАСЕНКО

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант, e-mail: natashasunbeam@gmail.com

В статье рассматривается печатная директорная двухдиапазонная антенна новой структуры, отличительной особенностью которой является наличие металлизированного отверстия. Благодаря такому нововведению возможна реконфигурация топологии директорной антенны путем подключения к соответствующим проводящим участкам топологии $p-i-n$ -диодов. Описываемая антенна спроектирована для использования в мобильных телекоммуникационных системах с линейной поляризацией радиоволн и работы в двухчастотном режиме. В статье описан принцип работы, приведена топология двухдиапазонной директорной антенны и показаны особенности ее проектирования с учетом использования отечественных радиоэлектронных компонентов, а также конструкторско-технологических требований полосковой реализации, при этом антенна была реализована на стандартном отечественном диэлектрике ФАФ-4. Приведены результаты моделирования описываемой двухдиапазонной директорной антенны средствами специализированной компьютерной программы электродинамического моделирования. Проанализированы полученные в результате эксперимента данные, а именно: диаграммы направленности антенны для нижнего и верхнего диапазона частот, а также графики модуля входного коэффициента отражения антенны в низкочастотном и высокочастотном диапазоне. В соответствии с результатами анализа сделаны выводы о возможности использования антенны такого типа в системах мобильной радиосвязи.

Ключевые слова: директорная антенна, двухдиапазонная антенна, печатное исполнение, микрополосковое питание, $p-i-n$ -диоды, металлизированное отверстие, дипольный возбудитель, двухчастотный возбудитель

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что директорные антенны широко применяются в мобильных телекоммуникационных системах с линейной поляризацией радиоволн [1, 2]. В настоящее время все чаще используется двух/многочастотный режим работы базовых излучающих систем. Таким образом, за счет работы в двухдиапазонном режиме, а также при учете малых габаритно-массовых показателей проектируемая антенна будет предпочтительней ее одночастотных аналогов.

При разработке антенн такого типа необходимо учитывать ряд требований, применяемых к современным излучателям электромагнитной энергии, используемым в телекоммуникационных системах различного назначения. Прежде всего, директорная антенна должна отвечать требованиям максимально возможной модификации ее топологии под конкретное техническое задание. Таким образом, в условиях все более широких применений изменений топологии проводящего рисунка (т. е. реконфигурации) базовой печатной структуры, благодаря включению $p-i-n$ -диодов, актуальность разработки модифицированной двухдиапазонной директорной антенны становится очевидна. Более того, проектируемая антенна должна обеспечивать достижение преимуществ интегрально-групповой технологии микроэлектроники, т. е. стоит принять во внимание общемировую тенденцию к миниатюризации радиотехнических

* Статья получена 09 апреля 2014 г.

средств и, таким образом, разработать антенну с приемлемыми габаритно-массовыми показателями, при этом не стоит забывать и о стоимостных показателях. Также антенна должна проектироваться в соответствии с отечественными конструкторско-технологическим требованиями полосковой реализации с применением отечественных радиоэлектронных компонентов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Прототипом описываемой директорной антенны послужила печатная структура, предложенная в [3]. Описанный в данной работе дипольный излучатель выбран в качестве основы для проектируемой антенны не случайно. По сравнению с известными аналогами такая структура имеет ряд преимуществ. Так, например, в работе [4] описывается двухдиапазонная планарная антенна, в которой роль излучателей играют монополярные элементы. Известно, что монополярные излучатели имеют меньшую степень линейности поляризации излучения, чем классические дипольные излучатели. Более того, описанная антенна обеспечивает при использовании питающих коаксиальных кабелей с волновым сопротивлением 50 или 75 Ом, уровни входного коэффициента стоячей волны напряжения $K_{ст.У}$ не лучше 1.6. Для обеспечения более качественного согласования необходимо применять согласующие СВЧ-трансформаторы полных сопротивлений, которые увеличат габариты антенны и снизят ее коэффициент полезного действия и, следовательно, коэффициент усиления. Другие же известные аналоги двухдиапазонного дипольного излучателя характеризуются высоким уровнем кросс-поляризованного излучения [5], либо имеют большие размеры [6]. Немаловажным фактором в пользу выбора данного излучателя стала возможность размещения на одной подложке двух диполей, а также симметрирующего устройства.

Для создания двухдиапазонной директорной антенны необходимо модернизировать описанный дипольный излучатель, просчитав и разместив на подложке ряд дополнительных элементов, а именно: рефлектор (для концентрации излучения в направлении директоров) и непосредственно директора (данная антенна содержит два директора низкочастотного и два директора высокочастотного диапазона). Кроме того, была поставлена задача возможности реконфигурируемости топологии благодаря использованию $p-i-n$ -диодов.

Изначально двухдиапазонная директорная антенна (рис. 1 и 2) реализуется на двух сторонах фольгированной заготовки из материала ФАФ-4 толщиной $s = 1,5$ мм, характеризующейся относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2,5$. Таким образом, при разработке топологии антенны и для ее последующей реализации учитывались конструкторско-технологические требования полосковой реализации, а также использовались отечественные радиоэлектронные компоненты. Более подробно о технологии изготовления печатных версий антенн, а также особенностях их конструирования рассказано в работах [7, 8, 9, 10, 11, 12]. Рассматриваемая антенна содержит прямоугольную диэлектрическую подложку с лицевой и обратной поверхностями, имеющую параллельные друг другу излучающую и неизлучающую стороны, а также боковые неизлучающие стороны, два (высокочастотный и низкочастотный) дипольных возбуждателя и два (разночастотных) директора.

Являющаяся питающей полосковая линия w_{01} соединена с центральным штырьком коаксиально-полоскового перехода СРТ-50-751-ФВ (на рис. 1 не показан), резьбовый металлический корпус которого, в свою очередь, соединен гальванически со сплошной заземленной частью обратной стороны заготовки.

При этом дополнительным преимуществом антенны является наличие сквозного металлизированного отверстия (МО). Благодаря использованию МО достигается гальваническое соединение вспомогательной полосковой линии шириной w_{01} с заземленной металлизацией обратной стороны подложки, что дает возможность для установки коммутационных $p-i-n$ -диодов с подключением к ним питания. Таким образом, при необходимости может быть получена последующая реконфигурация излучающей части двухдиапазонной директорной антенны.

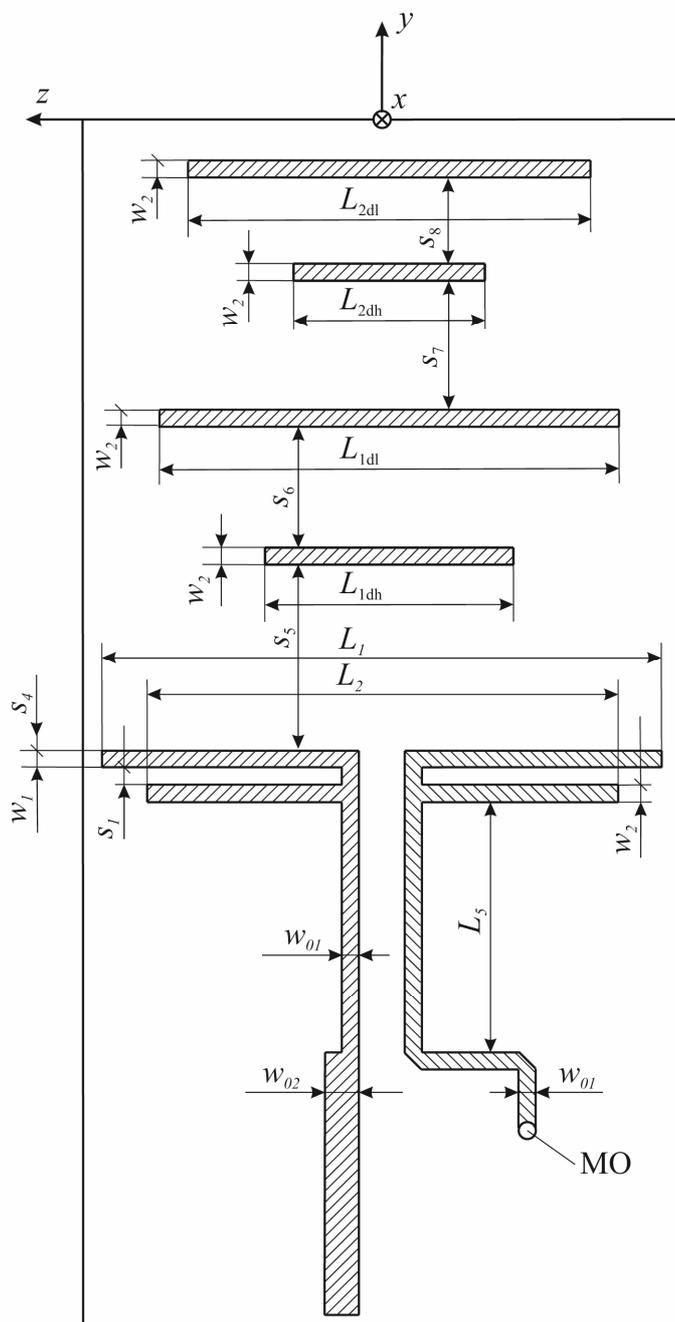


Рис. 1. Лицевая сторона подложки печатной двухдиапазонной директорной антенны

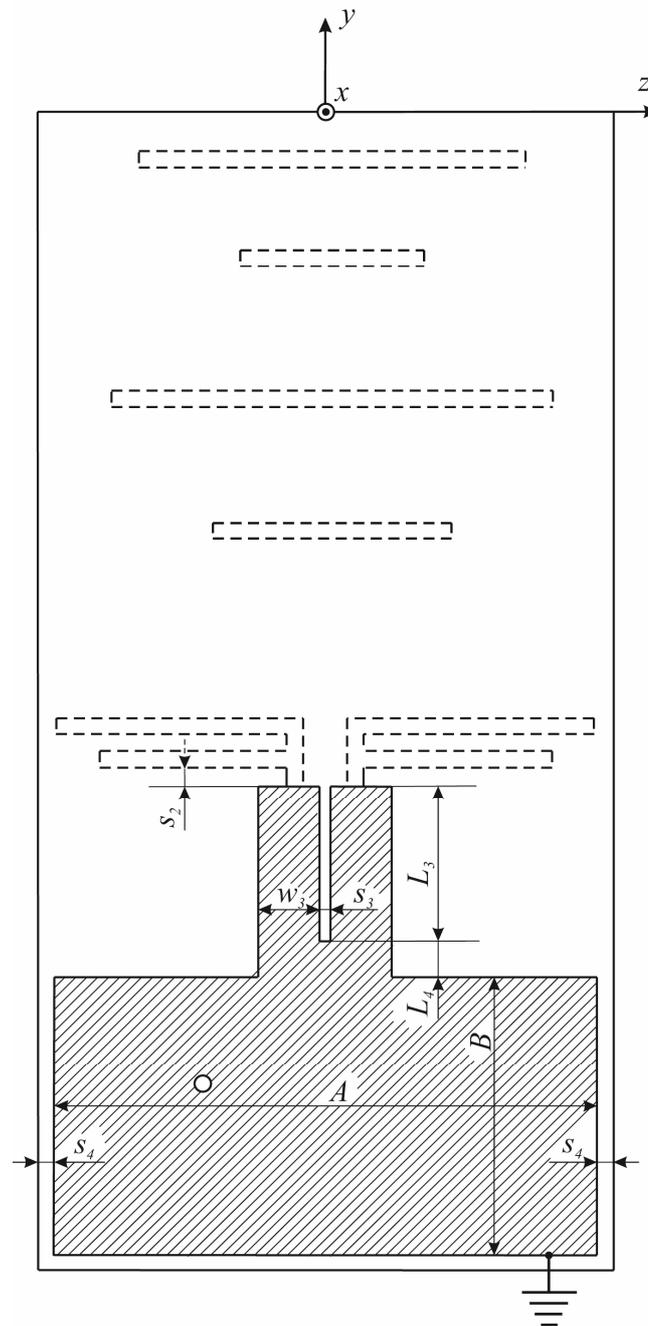


Рис. 2. Обратная сторона подложки печатной двухдиапазонной директорной антенны

Излучающая часть, как было сказано выше, образована двумя разночастотными диполями, имеющими длину L_1 , L_2 и ширину w_1 , w_2 соответственно. Расстояние между диполями составляет s_1 . В качестве симметрирующего устройства используется фрагмент топологии, в состав которого входит печатный пьедестал в форме «ласточкина хвоста» и короткозамкнутая через металлизированное отверстие диаметром 1,6 мм вспомогательная полосковая линия. «Ласточкин хвост» представляет собой отрезок двух связанных линий длиной L_3 и шириной w_3 , расстояние между которыми равно s_3 , соединенных с печатным фрагментом

$L_4 \times (2w_3 + s_3)$, являющимся продолжением заземленного участка. Верхние концы отрезка отстоят от нижней кромки высокочастотного (короткого) диполя длиной L_2 на расстояние s_2 . Краевые технологические поля по периметру заготовки составляют $s_4 = 0,5$ мм.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ АНТЕННЫ

Принцип действия рассматриваемой печатной двухдиапазонной директорной антенны состоит в следующем.

К началу питающей микрополосковой линии w_{02} через коаксиально-полосковый разъем СРГ50-751-ФВ от генератора подводится СВЧ-сигнал, амплитуда которого остается постоянной в широкой полосе частот. Дойдя до конца питающей микрополосковой линии w_{01} , сигнал возбуждает половину дипольных возбуждателей обеих частот.

Вторая же половина возбуждателей возбуждается за счет переменных токов смещения, которые возникают в окружающем их диэлектрическом пространстве. Из-за малой толщины s диэлектрической подложки можно считать, что диэлектриком, окружающим возбуждители, является воздух, величина относительной диэлектрической проницаемости которого составляет приблизительно единицу $\epsilon_r^{\text{возд}} \approx 1,0$.

В результате электромагнитное излучение возбуждителя будет концентрироваться в направлении директоров высокочастотного L_{dh} , L_{2dh} и низкочастотного L_{dl} , L_{2dl} диапазонов, чему способствует наличие рефлектора. В данной антенне роль рефлектора для обоих диапазонов играет верхняя кромка заземленного прямоугольного проводящего фрагмента $A \times B$. С этим фрагментом в верхней его части соединен печатный пьедестал в форме «ласточкина хвоста», образующий фрагмент двухдиапазонного симметрирующего устройства, которое обеспечивает требуемую разность фаз ($\pm 180^\circ$) сигналов, возбуждающих оба печатных диполя (нижнего и верхнего диапазонов частот).

При этом при проектировании такого типа директорных антенн нужно учитывать факт того, что в двухчастотных директорных антеннах не соблюдаются правила компоновки элементов, применимые к широко известным и давно запатентованным классическим директорным антеннам. Прежде всего, следует отметить, что частотная характеристика входного импеданса двухдиапазонного дипольного возбуждителя, образованного двумя параллельно соединенными, расположенными в непосредственной близости параллельными низкочастотным и высокочастотным диполями длиной L_1 и L_2 соответственно, существенно отличается от характеристики уединенного диполя как в области резонанса, так и вне ее. Это означает, что в данной двухдиапазонной директорной антенне непосредственно неприменимы сформулированные ранее критерии расстановки элементов антенны при ее компоновке и расчете длин элементов в каждом из диапазонов.

Также следует принять во внимание особенности законов изменений токов проводимости, что обуславливает существенные трудности в построении математической части алгоритма анализа на основе метода наводимых электродвижущих сил (ЭДС), поскольку данный метод основан на предположении о синусоидальном распределении токов проводимости по длине излучающих элементов. В описываемой же двухчастотной директорной антенне при работе в высокочастотном диапазоне $f_{hl} - f_{hh}$ на низкочастотных директорах L_{dl} и L_{2dl} наводятся «высокочастотные» токи проводимости, интенсивностью которых пренебречь невозможно, особенно в сравнении с токами, наводимыми на директорах L_{dh} и L_{2dh} высокочастотного диапазона. В данной ситуации гарантировать синусоидальное распределение токов проводимости в высокочастотном диапазоне $f_{hl} - f_{hh}$ на низкочастотных директорах L_{dl} и L_{2dl} крайне тяжело.

Более того, расчет антенны осложняется с увеличением количества директоров, и таким образом определить точные геометрические размеры элементов антенны путем использования стандартных методов расчета вряд ли возможно. После вычисления приблизительных размеров элементов и расстояний между ними антенна будет смоделирована в компьютерной программе с проведением последующей оптимизации.

Как было сказано ранее, дополнительным преимуществом описываемой двухдиапазонной директорной антенны является наличие сквозного МО, благодаря чему полосковая линия

w_{01} гальванически соединена с заземленной металлизацией обратной стороны подложки. Таким образом, при необходимости излучающая структура антенны может быть изменена благодаря использованию $p-i-n$ -диодов. Известно, что конструктивно диоды СВЧ часто выполняются бескорпусными, имеющими максимальный размер – 1 мм [13]. Включение в структуру антенны таких диодов не утяжелит ее конструкцию и не увеличит массогабаритный показатель даже при условии достаточно малых размеров изначальной заготовки.

При нулевом или обратном напряжении смещения на диоде контактные разности потенциалов $p-i$ и $i-n$ -переходов препятствуют проникновению свободных носителей заряда из p - и n -областей в базу диода и диод обладает большим сопротивлением (единицы или десятки кОм). При подаче колебаний СВЧ на закрытый $p-i-n$ -диод не наблюдается эффекта выпрямления, так как за положительный полупериод колебания в базе диода не успевают накопиться свободные носители заряда. При подаче на диод положительного управляющего смещения полупроводниковые переходы отпираются, база диода заполняется свободными носителями заряда, и сопротивление базы резко уменьшается. Открытый диод способен пропускать высокие токи при сохранении низкого сопротивления, так как отрицательная полуволна колебания СВЧ не успевает вытянуть из базы диода часть пространственного заряда [13].

Таким образом, включив в структуру двухдиапазонной директорной антенны коммутационные диоды и подавая на них управляющее напряжение, можно изменять топологию, а, соответственно, и некоторые характеристики антенны, что упростит адаптацию такого вида антенн к условиям различных технических заданий.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Все ключевые геометрические размеры полосковой структуры двухдиапазонной директорной антенны рассчитаны в соответствии с общепринятой процедурой проектирования коаксиально-полосковых симметрирующих устройств [14] и оценивания электрических характеристик дипольных излучателей [15, 16]. Также проектирование данной антенны с учетом особенностей антенн такого типа, которые были описаны ранее, осуществлялось при помощи многократного использования параметрической оптимизации методом сопряженных градиентов [17] в сочетании с программным продуктом [18] и частичного использования в методе сопряженных градиентов материалов работ [19, 20].

При указанном на рис. 1 и 2 направлении осей координат с использованием упомянутой методики электродинамического анализа спроектирована двухдиапазонная дипольная антенна на центральные частоты $f_{01} = 2,184$ ГГц и $f_{02} = 2,77$ ГГц со следующими размерами:

Таблица 1

Элемент	Величина (мм)	Элемент	Величина (мм)
L_1	56	w_3	4,5
L_2	46	s	1,5
L_3	13	s_1	2
L_4	5	s_2	1
L_5	21	s_3	1
L_{dl}	46	s_4	0,5
L_{dh}	30	s_5	28
L_{2dl}	38	s_6	16
L_{2dh}	26	s_7	18
w_{01}	2,3	s_8	8
w_{02}	2,6	A	80
w_1	2	B	49
w_2	2		

В результате моделирования были получены диаграммы направленности описываемой антенны, питаемой 50-омным коаксиальным кабелем, на нижней (рис. 3) и верхней (рис. 4) частоте.

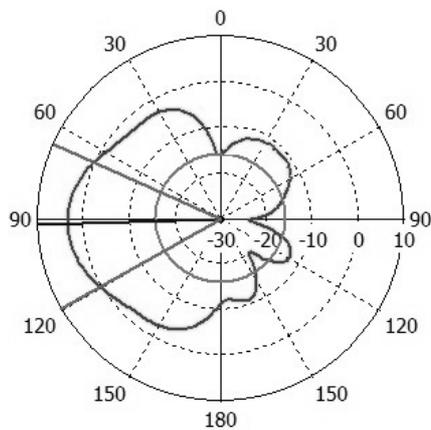


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны на нижней частоте

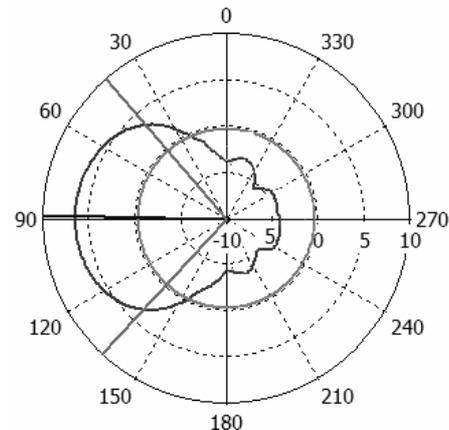


Рис. 4. Диаграмма направленности антенны на верхней частоте

Как видно из рис. 3, направленность антенны составляет порядка 4 дБ, что удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым ко многим телекоммуникационным системам. Ширина же представленной на рис. 3 диаграммы направленности составляет 56°, что является оптимальным значением, востребованным при конструировании радиотехнических систем.

Из рис. 4 видно, что диаграмма направленности двухдиапазонной директорной антенны на нижней частоте несколько лучше, нежели на верхней. При этом направленность антенны на верхней частоте составляет приблизительно 7 дБ. В верхней полусфере диаграмма направленности характеризуется приемлемой формой, а в задней полусфере максимальный уровень излучения находится на уровне -4 дБ, т. е. на 11 дБ меньше интенсивности излучения вперед, что для большинства технических применений является приемлемым показателем.

Также после расчета антенны были получены графики зависимости модуля входного коэффициента отражения описываемой антенны, которые приведены на рис. 5 для диапазона частот 2,0...2,4 ГГц, и на рис. 6 для диапазона частот 2,5...2,98 ГГц. При этом модуль входного коэффициента отражения связан с коэффициентом стоячей волны антенны следующей формулой:

$$S_{11} = 20 \lg \frac{K_{ст.У} - 1}{K_{ст.У} + 1}, \text{ дБ}.$$

Таким образом, из рис. 5 и 6 следует, что в диапазоне частот 2,1...2,25 ГГц коэффициент стоячей волны $K_{ст.У}$ не хуже 1,5, а в полосе частот 2,74...2,83 ГГц – не хуже 1,8.

Как видно из рис. 6, согласование в высокочастотном диапазоне оказалось хуже по сравнению с согласованием в низкочастотном диапазоне. Причиной тому служит в первую очередь не точная настройка антенны. Для улучшения характеристик двухдиапазонной директорной антенны необходима ее дальнейшая настройка (т. е. подбор размеров элементов и расстояний между ними), многоэтапная параметрическая оптимизация, а также установка различных корректирующих элементов (например, корпуса антенны), которые оказывают определенное влияние на ее характеристики.

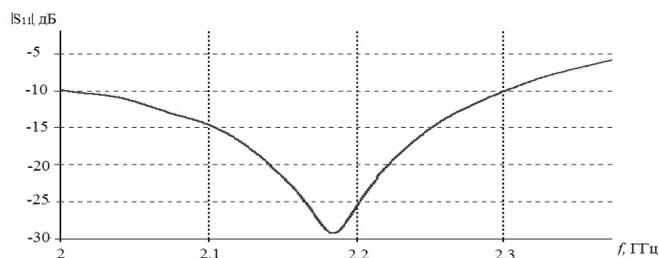


Рис. 5. График модуля входного коэффициента отражения двухдиапазонной директорной антенны в низкочастотном диапазоне

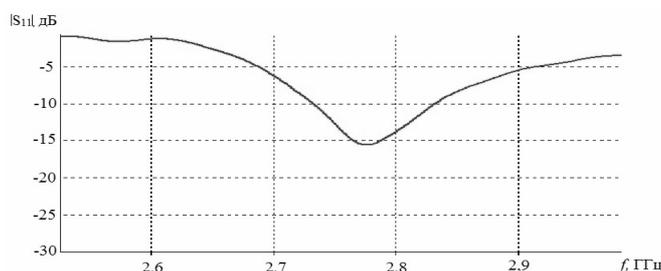


Рис. 6. График модуля входного коэффициента отражения двухдиапазонной директорной антенны в высокочастотном диапазоне

Ввиду громоздкости и сложности вычислений, анализ использования описанных выше мер, применяемых для улучшения характеристик антенны, в данной работе не приводится.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье была рассмотрена печатная директорная двухдиапазонная антенна новой структуры, актуальность разработки которой обоснована широким применением директорных антенн в мобильных телекоммуникационных системах с линейной поляризацией радиоволн. Дополнительным преимуществом такой антенны является наличие металлизированного отверстия, что позволяет изменять топологию антенны благодаря использованию р-і-п-диодов, при этом сохраняя ее малые габариты, что особенно важно, учитывая современную тенденцию к миниатюризации радиотехнических средств. В качестве прототипа была использована двухдиапазонная печатная дипольная антенна, имеющая ряд преимуществ перед существующими на данный момент аналогами. Двухдиапазонная директорная антенна проектировалась в соответствии с отечественными конструкторско-технологическими требованиями полосковой реализации с применением отечественных радиоэлектронных компонентов.

При моделировании антенны были получены графики зависимости модуля входного коэффициента отражения, а, соответственно, и значения коэффициента стоячей волны, а также диаграммы направленности антенны на нижней и верхней рабочих частотах. Результаты моделирования говорят нам о том, что антенна такого типа найдет применение в системах мобильной радиосвязи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
2. Модель А.М. Анализ антенн типа волновой канал // Радиотехника. – 1954. – Т. 9, № 5. – С. 55–62.

3. Патент 2432646 Российская Федерация, МПК⁸ Н 01 Q 1/38. Двухдиапазонная печатная дипольная антенна / А.П. Горбачев, Т.А., Евдокимов, А.Г. Хлопина. – № 2010116322/07; заявл. 23.04.2010; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30. – 22 с.
4. Патент № 6801168 США, Н 01 Q 1/38. Planar Double L-Shaped Antenna of Dual Frequency / Ming-Hau Yeh; D-Link Corporation. – № US 10/403,125; заявл. 01.04.2003; опубл. 05.10.2004.
5. Патент № 7088299 США, Н 01 Q 9/00. Multi-band antenna structure / Michael J. Siegler, Robert Sainati; Dsp Group Inc. – № US 10/976166; заявл. 28.10.2004; опубл. 08.08.2006.
6. Патент № 7432873 США, Н 01 Q 1/38, H01Q 21/00. Multi-band printed dipole antenna / Patrice Brachat, Philippe Ratajczak, Frédéric Devillers; France Telecom. – № US 11/888,7562008; заявл. 02.08.2008; опубл. 07.10.2008.
7. Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления / под ред. А.Ю. Седакова. – М.: Радиотехника, 2011. – 168 с.
8. Джуринский К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.
9. Бушминский И.П., Морозов Г.В. Технологическое проектирование микросхем СВЧ. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 356 с.
10. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева, В.В. Макачук, Э.В. Мысловский, О.Д. Парфенов, Е.В. Пирогова, В.А. Шахнов, В.В. Шерстнев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568 с.
11. Климачев И.И., Иовдальский В.А. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования. – М.: Техносфера, 2006. – 352 с.
12. Моро В. МикролитогRAFия. Принципы, методы, материалы. В 2 ч. – М.: Мир, 1990. – 1240 с.
13. Неганов В.А., Яровой Г.П. Теория и применение устройств СВЧ: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2006. – 720 с.
14. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / Г.А. Ерохин, О.В. Чернышов, Н.Д. Козырев, В.Г. Кочержевский; под ред. Г.А. Ерохина. – М.: Горячая линия–Телеком, 2004. – 491 с.
15. Ерохин Г.А., Кочержевский В.Г. Электрические характеристики петлевых вибраторов в диапазоне частот // Электросвязь. – 2000. – № 12. – С. 41–42.
16. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование антенно-фидерных устройств. – М.: Л.: Энергия, 1966. – 648 с.
17. Гилл Ф., Муррей У., Райт М. Практическая оптимизация: пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
18. Kollindzija В.М. WIPL-D: Microwave circuit and 3D EM simulation for RF & Microwave applications, software and user's manual. – Norwood, MA: Artech House, 2005.
19. Гринев А.Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики. – М.: Радиотехника, 2012. – 336 с.
20. Balanis C.A. Antenna theory – Analysis and Design. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. – 1118 p.

Тарасенко Наталья Валентиновна, аспирантка кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Основное научное направление исследований – антенны и СВЧ-устройства. Имеет 8 публикаций. E-mail: natashasunbeam@gmail.com

The new structure dual-band printed quasi-Yagi antenna*

N.V. TARASENKO

Novosibirsk state technical University, 20 prospect Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, post-graduate student, e-mail: natashasunbeam@gmail.com

There is the new dual-band quasi-Yagi antenna with a plated hole presented in this article. The antenna works in two non-adjacent bands, and its topology could be changed by p-i-n-diodes commutation due to using the plated hole. The antenna was designed for using in different telecommunication systems with linearly polarized radio waves. The principle of work is described and features of its design are shown. There are Russian standard radio components used to construct the antenna (the antenna is based on Russian standard dielectric FAF-4). Results of modeling of the described antenna on means of the specialized computer program are given. The results contain the next parameters: pattern formation at low and high frequency bands, S_{11} -parameter graph at low and high frequency band. The presented results were analyzed and after that conclusion about application of this antenna in the field of radio engineering was made.

Keywords: quasi-Yagi antenna, dual-band antenna, printed implementation, microstrip feed, p-i-n diodes, plated hole, dipole driver, dual-frequency driver

* Received 09 April 2014.

REFERENCES

1. *Ustroistva SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok* [Microwave devices and antennas. Designing of phased array], ed. by D.I. Voskresensky. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 744 p.
2. Model' A.M. Analiz antenn tipa volnovoi kanal [Analysis of Yagi antennas]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 1954, vol. 9, no. 5, pp. 55-62.
3. Gorbachev A.P., Evdokimov T.A., Khlopina A.G. *Dvukhdiapazonnaya pechatnaya dipol'naya antenna* [Dual-band printed dipole antenna]. Patent RF, no. 2432646, 2011.
4. Yeh Ming-Hau. Planar Double L-Shaped Antenna of Dual Frequency. Patent US, № 6801168, 2004.
5. Siegler Michael J., Sainati Robert. Multi-band antenna structure. Patent US, № 7088299, 2005.
6. Brachat Patrice, Ratajczak Philippe, Devillers Frédéric. Multi-band printed dipole antenna. Patent US, № 7432873, 2008.
7. Sedakov A.Yu., ed. *Tonkoplennochnye elementy v mikroelektronike. Osnovy proektirovaniya i izgotovleniya* [Thin-film components for microelectronics: theory of design and construction]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 168 p.
8. *Dzhurinskii K.B. Miniaturnye koaksial'nye radiokomponenty dlya mikroelektroniki SVCh* [Microsized coaxial radio components for microwave microelectronics]. Moscow, Technosfera Publ., 2006. 216 p.
9. Bushminskii I.P., Morozov G.V. *Tekhnologicheskoe proektirovanie mikroskhem SVCh* [Technological design of microwave microchips]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 356 p.
10. Bilibin K.I., Vlasov A.I., Zhuravleva L.V., Makarchuk V.V., Myslovskii E.V., Parfenov O.D., Pirogova E.V., Shakhnov V.A., Sherstnev V.V. *Konstruktorsko-tehnologicheskoe proektirovanie elektronnoi apparatury* [Structurally-technological design of electronics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005. 568 p.
11. Klimachev I.I., Iovdal'skii V.A. SVCh GIS. Osnovy tekhnologii i konstruirovaniya [Microwave GIS. Theory of technology and design]. Moscow, Technosfera Publ., 2006. – 352 p.
12. Moreau W.M. *Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials*. New York, London, Plenum Publ., 1988. (Russ. ed.: Moro U. *Mikrolitografiya. Printsipy, metody, materialy*. V 2 chastyakh. Moscow, Mir Publ., 1990. 1240 p.).
13. Neganov V.A., Yarovoi G.P. Teoriya i primeneniye ustroystv SVCh [Theory and application of microwave devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2006. 720 p.
14. Erokhin G.A., Chernyshov O.V., Kozyrev N.D., Kocherzhevsky V.G. Antenna-fidernye ustroystva i rasprostraneniye radiovoln [Antenna-feeder devices and radio wave propagation]. Moscow, Publ. House "Hot Line-Telecom", 2004. 491 p.
15. Erokhin G.A., Kocherzhevskii V.G. Elektricheskie kharakteristiki petlevykh vibratorov v diapazone chastot [Electrical characteristics of loop vibrators in frequency bands]. *Electrosvyaz – Telecommunications*, 2000, no. 12, pp. 41-42.
16. Zhuk M.S., Molochkov Yu.B. *Proektirovanie antenno-fidernykh ustroystv* [Design of antenna-feeder devices]. Moscow, Leningrad, Energy Publ., 1966. 648 p.
17. Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H. *Practical Optimization*. London, Academic Press, 1981. (Russ. ed.: Gill F., Myurrei U., Rait M. *Prakticheskaya optimizatsiya*. Moscow, Mir Publ., 1985. 509 p.).
18. Kollindzija B.M. WIPL-D: Microwave circuit and 3D EM simulation for RF & Microwave applications, software and user's manual. Norwood, MA, Artech House, 2005.
19. Grinev A.Iu. *Chislennyye metody resheniya prikladnykh zadach elektrodinamiki* [Calculus of approximations for applied problems in electrodynamics]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 336 p.
20. Balanis C.A. *Antenna theory – Analysis and Design*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005. 1118 p.