



УДК 621.396.677

С. А. Алексейцев, Д. А. Бухтияров, А. П. Горбачев,
Ю. Н. Паршин, Н. В. Тарасенко

Печатные двухдиапазонные излучатели дипольного вида с концевым питанием

Описан новый двухдиапазонный печатный излучатель дипольного вида, входящий в состав интегрированного модуля, который содержит полосково-щелевое симметрирующее устройство, выходы которого впервые соединены с удаленными концами обеих половин излучателя дипольного вида. Рассмотрены особенности его структурной реализации, компоновки и технологического исполнения. Приведены оптимизированные геометрические параметры печатного модуля. Экспериментальные результаты верифицируют предлагаемый подход и служат свидетельством о приемлемости полученных рабочих характеристик излучателей.

Ключевые слова: излучатель дипольного вида, печатное исполнение, диаграмма направленности, коэффициент отражения.

Введение

Классические дипольные излучатели, питаемые на центральных, близкорасположенных смежных клеммах, являются элементной базой различных антенных систем, от турникетной антенны вплоть до многофункциональных активных фазированных антенных решеток [1].

Как правило, при печатном исполнении таких систем используется питание от несимметричной коаксиальной или полосковой линии, при этом возникает необходимость использовать симметрирующее устройство (СУ) той или иной структуры. СУ – это противофазный делитель мощности в отношении 1:1, обеспечивающий такое деление в требуемой относительной полосе частот (рис. 1, а). Но его размещение на подложке вблизи входных центральных смежных клемм диполя, находящихся в непосредственной близости, неизбежно приводит к усложнению компоновочной схемы, возрастанию диссипативных потерь и входного коэффициента отражения излучаю-

щего модуля за счет изгибов и поворотов печатных линий передачи внутри самого СУ и между противофазными выходами СУ и входными клеммами диполя. Кроме того, уровень кроссполяризации модуля весьма чувствителен к структуре и свойствам СУ, потому что обычно диполь возвышается над заземленным корпусом объекта установки на четверть или большую часть длины волны. В результате этого неприкрытый экраном участок планарной структуры СУ участвует в нежелательном («паразитном») излучении наряду с диполем. Несмотря на разработанные для широкого применения различные весьма компактные печатные СУ [2], при интенсивных доработках печатных интегрированных дипольных излучателей приходится принимать во внимание перечисленные неблагоприятные факторы. За многие десятилетия решение этой ситуации так и не было найдено. Однако экстенсивный поиск путей даже частичного преодоления хотя бы нескольких этих факторов уже представляет собой достойную усилий научно-техническую задачу.

Отметим, что равноамплитудные противофазные напряжения можно подать не только на центральные близкорасположенные концы половин диполя, но и на их удаленные, существенно разнесенные в пространстве концы [3], формируя тем самым излучатель дипольного вида (ИДВ) с концевым питанием (рис. 1, б). Степень разнесения (т. е. расстояние между концами) может достигать половину длины волны, соответствующей центральной частоте рабочего диапазона ИДВ, а в ряде случаев

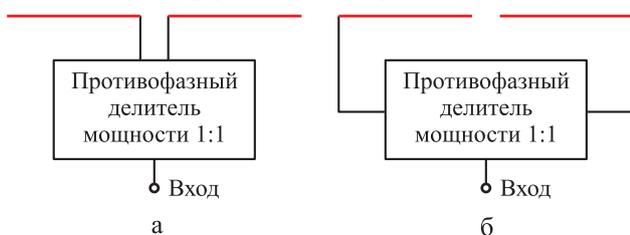


Рис. 1. Функциональные схемы:

а – классического диполя; б – излучателя дипольного вида с концевым питанием

© Алексейцев С. А., Бухтияров Д. А., Горбачев А. П., Паршин Ю. Н., Тарасенко Н. В., 2019

может быть и больше [3]. Такой излучатель с цилиндрическими проводниками был успешно применен как для уединенных антенн с волноводным питанием [4, 5], так и для однодиапазонной полосково-стержневой директорной антенны [6].

Цель статьи – исходя из предложенного в работе [3] ИДВ с концевым питанием его объемных цилиндрических проводников, исследовать характеристики печатного двухдиапазонного излучающего модуля, позволяющего разнести центральные частоты рабочих диапазонов при хорошем согласовании и приемлемых формах диаграмм направленности на каждом из них.

Системный подход к формированию топологии печатного излучающего модуля на базе двух ИДВ

В соответствии с системным подходом, рекомендованным в работе [1], анализируемый интегрированный модуль включает в себя широкополосное печатное полосково-щелевое СУ [7], перекрывающее полосу частот до трех октав и характеризующееся отсутствием каких-либо сквозных металлизированных отверстий (рис. 2).

Такие отверстия усложняют технологию изготовления модуля. При их наличии требуется провести ряд работ, в числе которых прецизионное сверление твердосплавными сверлами, последующая ультразвуковая очистка отверстий от продуктов сверления, металлической стружки и заусенцев для процедуры

химико-гальванической металлизации на всю глубину отверстия.

Наличие в СУ фрагмента на основе щелевой линии автоматически обеспечивает равенство и противофазность высокочастотных напряжений на противоположных краях щели в широкой полосе частот ее одномодового режима, с запасом перекрывающей оба разнесенных сравнительно узкополосных частотных канала, которые формируются каждым из ИДВ с концевым питанием. Сами ИДВ реализованы параллельно друг другу. Причем для уменьшения возрастающих с частотой диссипативных потерь ближайшим к полосково-щелевому делителю и, следовательно, к заземленной кромке «а» – «б» его обратной металлизации (см. рис. 2) выполнен ИДВ высокочастотного канала. На рис. 2 введены следующие обозначения:

$B, C, w, w_D, l_D, R_D, a_D, s_D, b_D, c_D, d_D, a_T, a_G, L_P, w_P, l, m, m_1, m_2, m_3, m_5, s_M, b_S, b_T, b_P, m_4$ – размеры;

A – точка пайки штырька разъема.

Габаритный размер излучающей части интегрированного модуля определяется длиной именно этого ИДВ, поэтому низкочастотный ИДВ приходится свертывать в меандр. Обратная процедура, т. е. растяжение (разнесение) половин высокочастотного ИДВ за счет увеличения расстояния между разомкнутыми смежными концами его половин, не представляется возможной, так как эти концы должны находиться в непосредственной близости [3].

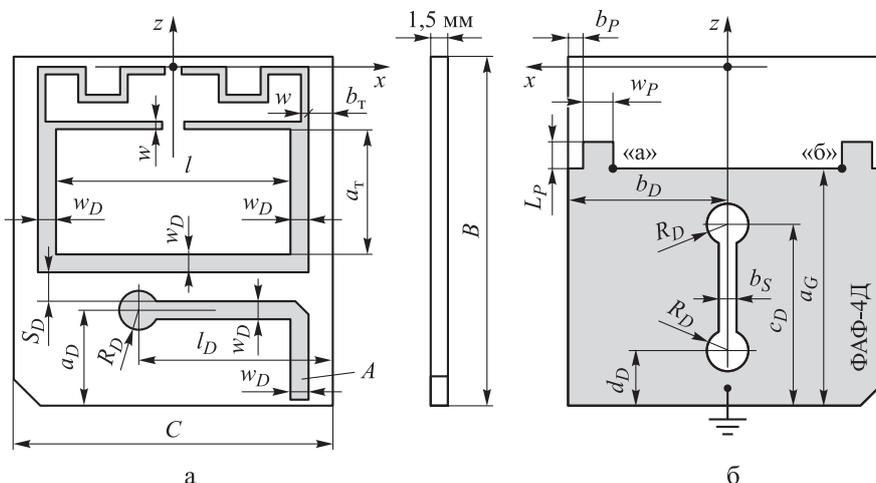


Рис. 2. Топология двухдиапазонного излучателя дипольного вида с концевым питанием:

а – лицевая сторона подложки; б – обратная сторона подложки



И хотя свертывание линейного излучателя в меандр не способствует сохранению его «поляризационной чистоты» (т. е. высокой линейности поляризации), на сегодняшний день пока нет альтернативы свертывания при компоновке двух параллельных друг другу различных по длине ИДВ.

В результате модуль выполняется на фольгированной с двух сторон заготовке размером $B \times C$ из материала ФАФ-4Д толщиной 1,5 мм (см. рис. 2). В отличие от материалов, использованных в работах [1, 2], в рассматриваемом случае отсутствуют какие-либо проводники и диэлектрики вблизи разомкнутых смежных концов излучающих проводников (за исключением самой подложки). Тем самым создаются предпосылки к упрощению компоновочных работ при проектировании многомодульных антенных систем. При этом возбуждающие напряжения подаются на существенно разнесенные в пространстве (на подложке) концы излучающих проводников, что снимает ограничения на типы печатных противозаземленных делителей мощности – они могут быть любыми с подходящей широкополосностью. Модуль содержит минимальное число изгибов и поворотов питающих полосковых линий, что способствует заметному снижению входного коэффициента отражения. Почти вся топология лицевой стороны делителя мощности прикрыта проводящим экраном, верхний (ориентация согласно рис. 2) край которого расположен над кромкой «а» – «б» металлизации обратной стороны подложки.

Два небольших пьедестала размером L_p и w_p необходимы как обратная металлизация верхней части подводных линий. Оба эти размера вместе с другими варьируются в процессе нелинейной параметрической оптимизации, чтобы одновременно достичь минимума модуля коэффициента отражения на обеих центральных частотах f_{0L} и f_{0H} низко- и высокочастотного каналов соответственно.

При этом излучающие проводники высокочастотного ИДВ расположены гораздо ближе к кромке «а» – «б» заземленной металлизации по сравнению с классическим диполем. Это связано со значительной емкостной составляющей входного импеданса уединенного ИДВ [3],

для компенсации которой приходится приближать проводники высокочастотного ИДВ к «земле», чтобы в него вносилась реактивная составляющая индуктивного характера, обусловленная наведенным током проводимости, текущим вдоль кромки «а» – «б» и локализованном в примыкающей к этой кромке полосе заземленной фольги. Ширина последней зависит от частоты и соотношения размеров в процессе оптимизации (настройки).

В результате входной коэффициент отражения двухдиапазонного модуля и интенсивность его излучения на основной и кроссполяризациях целесообразно рассчитывать с помощью программы трехмерного электродинамического проектирования, например, *CST Studio Suite*, доступной в сети Интернет по ссылке [8].

Можно найти все ключевые размеры топологии при заданных центральных частотах каналов, марке диэлектрика и допустимом уровне модуля входного коэффициента отражения на обеих частотах. Для этого используем полученную на основе системно-эвристического подхода (в значительной мере зависящего от опыта разработчика) [1] топологию излучающего модуля (см. рис. 2) в качестве стартового (начального) облика, за счет встроенного в систему *CST Studio Suite* параметрического оптимизатора.

При этом целесообразно учитывать, что неудачный (непрофессиональный) выбор облика начального приближения топологии всего излучателя, как правило, не может быть компенсирован за счет оптимизации размеров, расстояний и параметров диэлектрика подложки [1]. Кроме того, имеющийся опыт работы с излучателями дипольного вида [3–6] позволяет авторам полагать, что с большой вероятностью диаграммы направленности по основной поляризации на обеих центральных частотах будут вполне приемлемы, если на этих частотах будет достигнут минимум модуля входного коэффициента отражения.

Что касается кроссполяризованного излучения, то остается только надеяться, что его интенсивность не превысит допустимые уровни. Исходя из опыта работы авторов, сформулировать и разработать эффективный алгоритм процедуры минимизации кроссполяризован-

ной интенсивности в полном телесном угле 4π стерадиан на этапе параметрической оптимизации топологии печатной заготовки (см. рис. 2) не представляется возможным. Это связано с временными и материальными затратами, а также неактуальностью этой процедуры на этапе эскизного проектирования, когда не вполне однозначно определены факторы ближайшей к модулю конструктивно-компоновочной архитектуры антенной системы. В этом, по мнению авторов статьи, проявляется сущность метода целенаправленных проб и ошибок, широко применяемого в работах [1, 2] при проектировании симметрирующих устройств и различных излучателей.

Результаты параметрической оптимизации и рабочие характеристики двухдиапазонного излучателя дипольного вида

Итерационная процедура вариации ключевых размеров топологии излучателя (см. рис. 2) реализуется алгоритмом нелинейной оптимизации, встроенном в систему *CST Studio Suite* [8]. На рис. 3 показана излучающая часть в более крупном масштабе. Выбор этой системы обусловлен не только доступностью ее компактной версии, упомянутой в работе [8], вполне достаточной для моделирования и оптимизации уединенных печатных антенн, но и тем, что Новосибирский государственный технический университет приобрел в конце 2019 г. лицензию полной версии *CST Studio Suite*.

В данной программе можно моделировать многоэлементные ФАР и системы излучателей и материалов практически любого типа (рупоры с внутренними импедансными поверхностями, излучатели Вивальди, диполи всех видов, метаматериалы, графен, зеркальные антенны, ионизированная плазма и т. п.).

При этом существенное значение имеет все еще во многом эвристическая процедура придания тому или иному размеру или параметру топологии статуса «ключевой». Неудачное назначение этого статуса кроме возрастания временных затрат на оптимизацию может привести к потере перспективного с точки зрения достижения полезного эффекта конечного облика излучателя [1]. Рассматривая в качестве ключевых размеры $B, C, w, w_D, l_D, R_D, a_D, s_D, b_D, c_D, d_D, a_T, a_G, L_P, w_P, l, m, m_1, m_2, m_3, m_5, s_M, b_S$ (см. рис. 2, 3; всего 23 размера), удалось достичь приемлемых показателей на материале ФАФ-4Д толщиной 1,5 мм для частот $f_{0L} = 2,0$ ГГц и $f_{0H} = 2,6$ ГГц.

Согласование излучателя с коаксиальным кабелем волнового сопротивления 50 Ом характеризуется зависимостью модуля входного коэффициента отражения от частоты (рис. 4, красная линия). Расчетные диаграммы направленности по основной поляризации в плоскости вектора \mathbf{E} напряженности электрического поля (сечение xoz) обозначены красными линиями на рис. 5, а в плоскости вектора \mathbf{H} напряженности магнитного поля (сечение yoZ) – красными линиями на рис. 6. Синими линиями

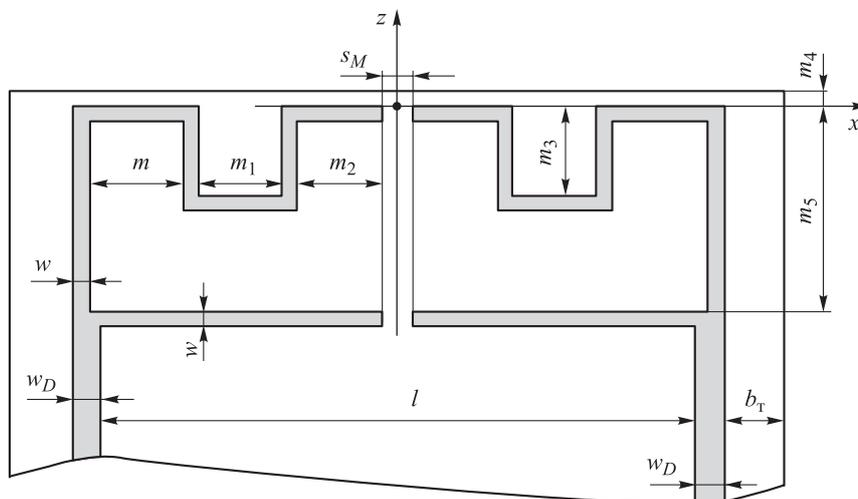


Рис. 3. Топология лицевой стороны подложки излучающей части модуля:
 $w, w_D, l, m, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, s_M, b_T$ – размеры



на рис. 5, 6 изображены полярные диаграммы интенсивности кроссполяризационного излучения, полученные после оптимизации. При этом значения ключевых и трех вспомогательных технологически обоснованных размеров (мм) составили (см. рис. 2, 3; всего 26 размеров):

$$\begin{aligned}
 B &= 95; & C &= 57,0; & w &= 1,9; & w_D &= 4,2; \\
 l_D &= 39,2; & R_D &= 2,9; & a_D &= 30,3; & s_D &= 7,5; \\
 b_D &= 28,5; & c_D &= 46,0; & d_D &= 25,5; & a_T &= 44,9; \\
 a_G &= 80,5; & L_P &= 2,2; & w_P &= 6,8; & l &= 32,0; \\
 m &= 4,0; & m_1 &= 3,5; & m_2 &= 6,5; & m_3 &= 6,7; \\
 m_4 &= 0,8; & m_5 &= 10,2; & s_M &= 1,2; & b_P &= 6,9; \\
 b_S &= 1,1; & b_T &= 8,0.
 \end{aligned}$$

Эти размеры были использованы при изготовлении опытного образца, обследованного в безэховой камере Акционерного общества «НИИ измерительных приборов – Новосибирский завод имени Коминтерна». В ней размещены стандартные поворотные и отсчетные устройства, а также векторный анализатор цепей *Agilent N5241A (PNA-X)*, генератор сигналов *E8257D PSG* и рупорные антенны с линейной поляризацией.

При этом подложка излучателя, реализованная согласно рис. 2, была размещена в плоском, почти сплошном сборном металлическом корпусе. В нижней узкой стенке корпуса было выполнено локальное прямоугольное отверстие для обеспечения доступа к коаксиально-полосковому переходу типа *SMA (SubMiniature version A connector)*. Верхняя узкая стенка полностью отсутствовала для беспрепятственной установки печатной платы излучателя, выступавшей за пределы верхней части корпуса на весь размер своего излучающего фрагмента (см. рис. 3). В результате верхний край корпуса проецировался на кромку «а» – «б» металлизации обратной стороны подложки (см. рис. 2, б).

По результатам измерений рабочих характеристик сформированы соответствующие зависимости (см. рис. 4–6, зеленые линии). Отличия между экспериментальными и расчетными характеристиками находятся в приемлемых границах и свидетельствуют об адек-

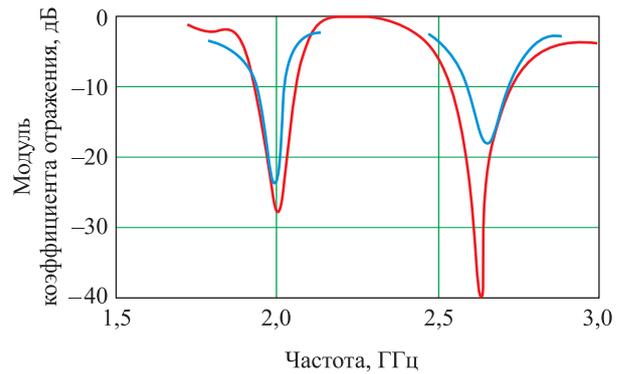


Рис. 4. Частотные характеристики модуля коэффициента отражения двухдиапазонного ИДВ, полученные в результате моделирования (—) и экспериментально (—)

ватности описанной методики проектирования двухдиапазонных ИДВ с концевым питанием. И хотя этапы проектирования еще предстоит упорядочить, полученные результаты можно квалифицировать как обнадеживающие. Отметим, что более подробно эти этапы описаны в заявке на патент Российской Федерации, положительное решение о выдаче которого получено недавно [9].

С одной стороны, описанные выше результаты свидетельствуют о возможности заметного разнесения центральных частот f_{0L} и f_{0H} обоих каналов без существенного искажения диаграмм направленности по основной поляризации и роста уровня кроссполяризационного излучения.

С другой стороны, возникает необходимость оценивать предельные возможности по разнесению центральных частот каналов с ИДВ. Такие оценки можно сформулировать лишь с привлечением статистических подходов. При этом полученные численные методы конкретных значений отношения f_{0H}/f_{0L} аппроксимируются полиномом соответствующей формы и степени при заданных типах диэлектрика, допустимой степени искажения диаграмм направленности и уровня кроссполяризационного излучения в пределах телесного угла ее главного лепестка. Так, например, для материала ФАФ-4Д толщиной 1,5 мм удалось обеспечить разнесение центральных частот, при котором $f_{0H}/f_{0L} = 1,4$.

Надо полагать, что природные свойства уединенных ИДВ в значительной мере будут влиять на разнесение частот двух близко рас-

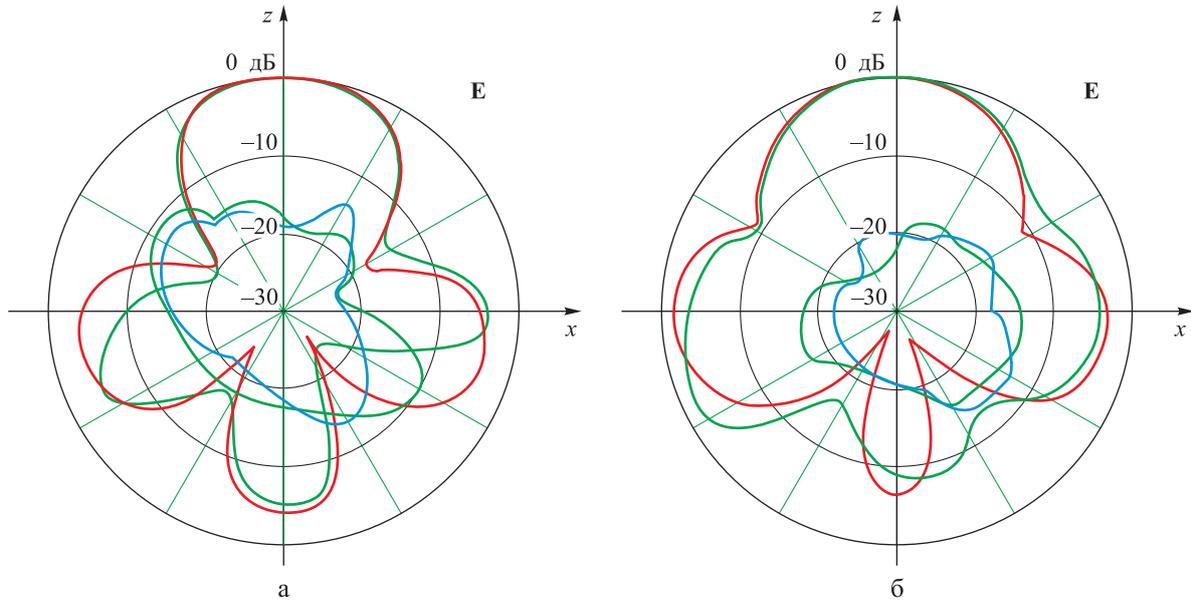


Рис. 5. Интенсивность кроссполаризационного излучения двухдиапазонного ИДВ в плоскости вектора **E** напряженности электрического поля (дБ) для частот f_{0L} (а) и f_{0H} (б) и полученные в результате моделирования:

— диаграммы направленности; — полярные диаграммы кроссполаризации;
— диаграммы, полученные экспериментально

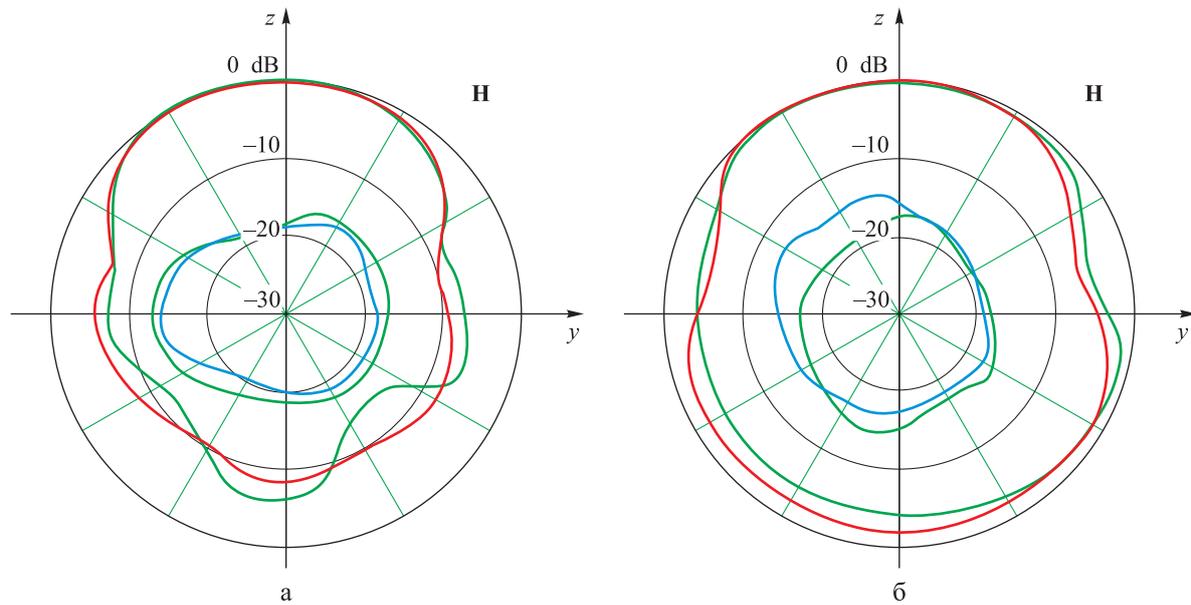


Рис. 6. Интенсивность кроссполаризационного излучения двухдиапазонного ИДВ в плоскости вектора **H** напряженности магнитного поля (дБ) для частот f_{0L} (а) и f_{0H} (б) и полученные в результате моделирования:

— диаграммы направленности; — полярные диаграммы кроссполаризации;
— диаграммы, полученные экспериментально

положенных в пространстве излучателей этого типа. И в этом плане авторы считают целесообразным рекомендовать работу [3], в которой на основе электродинамического анализа систематизированы ряд свойств уединенных ИДВ, включая частотные характеристики их комплексных входных импедансов и форму

диаграммы направленности по основной поляризации.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования ИДВ с концевым питанием при модернизации антенных систем с линейной поляризацией. Выбор кон-



цевых клемм обеих половин ИДВ для подачи возбуждающих противофазных напряжений привносит в процедуры проектирования дополнительные степени свободы как в плане выбора типов симметрирующих устройств, так и в конструктивно-компоновочных аспектах. Предложенная топология не требует реализации сквозных переходных металлизированных отверстий и/или каких-либо проводящих межслойных переходов в виде узких полосок фольги на торцах платы, припаиваемых к печатным фрагментам лицевой и обратной сторон подложки. Как приведенные результаты, так и аналогичные для других частот, могут быть полезны при оперативном принятии решений во время эскизного проектирования, а также при оценивании предельно достижимых (потенциальных) характеристик модернизируемых и вновь проектируемых антенных систем.

Список литературы

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д. И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2012, 744 с.
2. Zhi Ning Chen, ed. Handbook of antenna technologies. Springer Science + Business Media Singapore, 2016. XXXI. 3473 p.
3. Патент на изобретение № 2472261. Дипольный излучатель // Д. А. Бухтияров, А. П. Горбачев, Ю. О. Филимонова. Оpubл.: 10.01.2013. Бюл. № 1.
4. Бухтияров Д. А., Горбачев А. П., Шведова А. В. Модифицированная дипольная антенна, питаемая круглым волноводом с доминантной волной // Антенны. 2015. Вып. 9 (220). С. 44–52.
5. Buhtiyarov D. A., Gorbachev A. P., Atuchin V. V. The linearly polarized waveguide-fed dipole-like antenna // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. August 2015. No. 29:13. Pp. 1720–1727.
6. Buhtiyarov D. A., Gorbachev A. P., Zhelezko S. Yu. Improvement of the quasi-Yagi antenna performances by using an ends-fed dipole driver // Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering. January 2014. Vol. 2. No. 1. Pp. 6–17.
7. Bialkowski M. E., Abbosh A. M. Design of a compact UWB out-of-phase power divider // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. Apr. 2007. Vol. 17. No. 4. Pp. 289–291.
8. CST Studio Suite. URL: <http://www.cst.com/academia/student-edition> (data access 21.11.2019).
9. Алексейцев С. А., Горбачев А. П. Двухдиапазонная антенна. Решение от 03.12.2019 о выдаче патента на изобретение по заявке № 2019115309/28(029170) от 20.05.2019.

Поступила 02.12.18

Алексейцев Сергей Александрович – инженер-конструктор 2-й категории Акционерного общества «НИИ измерительных приборов – Новосибирский завод имени Коминтерна», аспирант кафедры «Радиоприемные и радиопередающие устройства» Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск. Область научных интересов: радиолокация, антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.

Бухтияров Дмитрий Андреевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Акционерного общества «НИИ измерительных приборов – Новосибирский завод имени Коминтерна», г. Новосибирск. Область научных интересов: радиолокация, антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.

Горбачев Анатолий Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоприемные и радиопередающие устройства» Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск. Область научных интересов: радиолокация, антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.

Паршин Юрий Николаевич – инженер-электроник 2-й категории Акционерного общества «НИИ измерительных приборов – Новосибирский завод имени Коминтерна», аспирант кафедры «Радиоприемные и радиопередающие устройства» Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск. Область научных интересов: радиолокация, антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.

Тарасенко Наталья Валентиновна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая физика» Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск. Область научных интересов: радиолокация, антенны, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.



Printed dual-band end-feed dipole radiators

The study describes a new dual-band dipole printed radiator, which is part of an integrated module that contains a strip-slotted balun, whose outputs are first connected to the remote ends of both halves of the dipole radiator. We examine the features of its structural implementation, layout and technological performance, and give optimized geometric parameters of the printing module. The experimental results verify the proposed approach and serve as evidence of the acceptability of the obtained operating characteristics of the radiators.

Keywords: dipole radiator, printed design, radiation pattern, reflection coefficient.

Alekseytsev Sergey Aleksandrovich – second category design engineer, Research Institute of Measuring Instruments – Comintern Novosibirsk Plant, Joint Stock Company; post-graduate, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk.

Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.

Bukhtiyarov Dmitriy Andreevich – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow, Research Institute of Measuring Instruments – Comintern Novosibirsk Plant, Joint Stock Company, Novosibirsk.

Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.

Gorbachev Anatoliy Petrovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk.

Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.

Parshin Yuriy Nikolaevich – second category electronic engineer, Research Institute of Measuring Instruments – Comintern Novosibirsk Plant, Joint Stock Company; post-graduate, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University, r. Novosibirsk.

Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.

Tarasenko Natalya Valentinovna – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of General Physics, Novosibirsk State Technical University, r. Novosibirsk.

Science research interests: radar, antennas, microwave devices, phased array antennas.