УДК 621.396.677

С. А. Алексейцев, А. П. Горбачев, Н. В. Тарасенко

Модифицированные печатные двухдиапазонные дипольные излучатели

Описаны модифицированные двухдиапазонные печатные дипольные излучатели, которые реализуются как интегрированные излучающие модули, содержащие компактную печатную версию нового коаксиального симметрирующего устройства в форме «ласточкина хвоста» и два печатных диполя, реализованные как соответствующие продолжения питающей полосковой линии и разомкнутого шлейфа. Рассмотрены некоторые особенности структурной реализации и технологического исполнения. Представлены оптимизированные геометрические параметры топологии печатной реализации. Предлагаемый подход подтвержден экспериментальными результатами, способствующими оцениванию предельно-достижимых показателей излучателей.

Ключевые слова: дипольный излучатель, печатное исполнение, диаграмма направленности, обратные потери.

Введение

Известно, что печатные дипольные излучатели составляют элементную базу при реализации различных многодипольных антенн с круговой или линейной поляризацией, например турникетных, директорных, логопериодических, а также многослойных фазированных антенных решеток [1]. Одной из современных тенденций в проектировании таких антенн является реализация двух- и многочастотного режима работы, когда с одной конструктивно-компоновочной единицы (базового излучателя) обеспечивается формирование требуемых диаграмм направленности на двух и больших частотах при приемлемом согласовании с источником сигнала на каждой из них. По этой причине оправдано стремление усовершенствовать уже имеющиеся технологические решения или выявлять новые подходы к реализации двух- и многочастотного режима работы дипольных излучателей.

Цели работы – усовершенствование предыдущих технических решений и выявление предельно-достижимых показателей модифицированного варианта печатного двухдиапазонного дипольного излучателя, защищенного патентом Российской Федерации [2], который позволяет реализовать заметное разнесение центральных частот рабочих диапазонов при сохранении формы диаграммы направленности на каждой из них.

Топология печатного излучателя

Предлагаемый излучатель выполнен как интегрированный излучающий модуль [2], включающий в себя печатную версию компактного коаксиального симметрирующего устройства, еще раньше защищенного патентом [3], реализованную в соответствии с методикой оптимизации, изложенной в работе [4]. В результате модуль выполняется на двухсторонней фольгированной заготовке размерами $a \times b$ из материала ФАФ-4 толщиной 1,5 мм (рис. 1).

В отличие от материалов работы [5] предлагаемая топология допускает беспрепятственное фрезерование продольного паза на всю глубину печатного фрагмента симметрирующего устройства в форме «ласточкина хвоста». Паз необходим для построения печатных скрещенных дипольных излучателей в системах с поляризационной селективностью за счет переключения коммутационными диодами $p-i-n$ плоскостей поляризации излучения, ориентированных ортогонально друг другу, и печатных турникетных антенн с близкой к круговой поляризацией излучения в главном направлении.

В случае однодиапазонного излучателя все ключевые геометрические размеры топологии рассчитываются по материалам работы [4]. Используется описанный в ней декомпозиционный алгоритм анализа произвольных плоских металло-диэлектрических структур и поиска экстремума целевой функции при нелинейной параметрической оптимизации, а также метод сопряженных градиентов. Однако для двухдиапазонного режима работы,

Рис. 1. Топология двухдиапазонной антенны:

а – лицевая сторона подложки; б – обратная сторона подложки;

$a, b, l_L, l_H, l_P, l_B, w_D, w_S, w_F, w_B, s_F, s_P, s_D$ – размеры; А – точка пайки центрального штырька разъема

когда задействованы два расположенных в непосредственной близости печатных диполя низкочастотного (соответствующая центральная частота f_{0L} и длина l_L диполя) и высокочастотного (соответствующая центральная частота f_{0H} и длина l_H диполя) каналов (см. рис. 1), процедура формирования упомянутого декомпозиционного алгоритма существенно усложняется из-за необходимости учитывать взаимное влияние диполей. В связи с этим целесообразно задействовать одну из программ трехмерного электродинамического моделирования, например *WIPL-D*, которая представлена в свободной продаже на рынке в виде приложения на компакт-диске к работе [6]. Используя полученную на основе системно-эвристического (другими словами, в значительной мере зависящего от опыта работы исследователя-проектировщика) подхода топологию излучателя (см. рис. 1) в качестве стартового (начального) облика, за счет встроенного в систему параметрического оптимизатора можно найти все ключевые размеры топологии. При этом целесообразно подчеркнуть, что неудачный (непрофессиональный) выбор облика начального приближения топологии излучателя, как правило, не может быть компенсирован за счет оптимизации размеров, расстояний и параметров диэлектрика подложки [1].

Оценивание предельно-достижимых показателей

Такое оценивание целесообразно проводить, применяя метод целенаправленных проб и ошибок, успешно использованный в работах [1, 4, 5]. Вариации ключевых размеров и параметров подложки излучателя (см. рис. 1) формируются соответствующими алгоритмами нелинейной параметрической оптимизации, встроенными в систему *WIPL-D*. При этом существенное значение имеет все еще во многом эвристическая процедура придания тому или иному размеру или параметру топологии (см. рис. 1) статуса «ключевой». Неудачное назначение этого статуса может привести к неоправданному росту временных и денежных затрат на вычисления при оптимизации или к потере перспективного с точки зрения достижения полезного эффекта конечного облика излучателя [7]. В связи с этим целесообразно максимально внимательно и всесторонне оптимизировать ключевые размеры уединенного излучателя для того, чтобы при оценивании параметров многоэлементной антенной системы (например, эквидистантной фазированной антенной решетки) не сомневаться в предельных показателях уединенного излучателя и все внимание сосредоточить на ключевых размерах компоновочной схемы

антенной системы в целом с учетом объекта установки и климатического районирования территории эксплуатации.

Рассматривая в качестве ключевых размеры a , b , l_L , l_H , l_P , l_B , w_D , w_S , w_F , w_B , s_F , s_P , s_D (см. рис. 1), удалось достичь предельных показателей на подложке ФАФ-4 толщиной 1,5 мм, остающихся, по мнению авторов, приемлемыми. Согласование излучателя с коаксиальным кабелем волнового сопротивления 75 Ом характеризуется зависимостью обратных потерь от частоты (рис. 2).

Диаграммы направленности по основной поляризации в плоскости вектора $\mathbf{E}$

напряженности электрического поля (сечение yoz) обозначены красными линиями на рис. 3, в плоскости вектора $\mathbf{H}$ напряженности магнитного поля (сечение xoy) – красными линиями на рис. 4. Синими линиями на рис. 3, 4 показаны полярные диаграммы интенсивности кросс-поляризованного излучения. При этом значения ключевых размеров составили (мм): $a = 80$; $l_B = 13,8$; $s_F = 0,4$; $b = 74$; $w_D = 1,8$; $s_P = 0,9$; $l_L = 63,2$; $w_S = 2,4$; $s_D = 2$; $l_H = 36,8$; $w_F = 2,3$; $l_P = 20,3$; $w_B = 4,4$.

Экспериментальные исследования опытного образца с заданными размерами проводились в безэховой камере Акционерного

Рис. 2. Частотные характеристики обратных потерь двухдиапазонной антенны, полученных в результате моделирования (—) и экспериментально (—)

Рис. 3. Диаграммы направленности двухдиапазонной антенны в плоскости вектора $\mathbf{E}$ напряженности электрического поля (дБ) для частот f_{0L} (а) и f_{0H} (б), полученные в результате моделирования (—), экспериментально (—) и моделирования интенсивности кросс-поляризованного излучения (—)

Рис. 4. Диаграммы направленности двухдиапазонной антенны в плоскости вектора **H** напряженности магнитного поля (дБ) для частот f_{0L} (а) и f_{0H} (б), полученные в результате моделирования (—), экспериментально (—) и моделирования интенсивности кросс-поляризационного излучения (—)

общества «НИИ измерительных приборов – Новосибирский завод имени Коминтерна». В ней были размещены поворотные и отсчетные приспособления, включая векторный анализатор цепей *Agilent N524A (PNA-X)*, стандартную рупорную антенну и генератор сигналов *E825D PSG*. Измеренные уровни кросс-поляризационного излучения в области $y > 0$ (см. рис. 1) местами были хуже результатов оптимизации на 4...5 дБ, а в области $y < 0$ (см. рис. 1) – на 6...8 дБ, хотя по некоторым направлениям кросс-поляризация была лучше результатов оптимизации на 5...6 дБ.

Отметим, что кросс-поляризационные измерения весьма чувствительны к качеству закрепления антенн в поворотных устройствах и люфтам в них, точности наведения облучающего рупора и ориентации его плоскости поляризации в процессе измерений, устойчивости контактных соединений в коаксиальных и коаксиально-полосковых соединителях. Учитывая это, авторы данной статьи сочли степень соответствия кросс-поляризационных результатов моделирования и измерений в целом приемлемой, поэтому эти экспериментальные зависимости не отображены на рис. 3, 4. Экспериментальные исследования опытного образца с этими размерами служат подтверждением возможности достижения вышеупомя-

нутых показателей по основной поляризации (голубые линии на рис. 2–4).

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют об успешном разнесении частот f_{0L} и f_{0H} на 1,5 ГГц, что позволяет достичь в планировании модификаций топологии модуля (см. рис. 1) большего разнесения, когда значения частот близки к $f_{0L} = 0,5$ и $f_{0H} = 3$ ГГц соответственно. Представленные результаты могут быть полезны при оперативном принятии решений по предельно-допустимым (потенциальным) характеристикам в эскизном проектировании печатных двухдиапазонных многомодульных антенных устройств в полосе частот 2...3,5 ГГц.

Список литературы

1. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д. И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
2. Патент на изобретение № 2432646. Двухдиапазонная печатная дипольная антенна // А. П. Горбачев, Т. А. Евдокимов, А. Г. Хлопина. Оpubл.: 27.10.2011. Бюл. № 30. 21 с.
3. Патент на изобретение № 2255393. Симметрирующее устройство // А. П. Горбачев, Е. В. Чубарь. Оpubл.: 27.06.2005. Бюл. № 18. 10 с.
4. Gorbachev A. P., Egorov V. M. The dipole radiating integrated module: experimental results.

IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Nov. 2007. Vol. 55. No. 11. Pp. 3085–3087.

5. *Doane J. P., Sertel K., Volakis J. L.* A wideband wide scanning tightly coupled dipole array with integrated balun (TCDA-IB). IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Sept. 2013. Vol. 61. No. 9. Pp. 4538–4548.

6. *Kolundzija B. M., Ognjanovic J. S., Sarkar T. K.* WIPL-D microwave: circuit and 3D EM

simulation for RF & microwave applications. Software and User's Manual. Artech House, 2005. 400 p.

7. *Горбачев А. П., Тарасенко Н. В.* Двухдиапазонные директорные антенны. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 231 с.

Поступила 09.09.17

Алексейцев Сергей Александрович – инженер третьей 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: 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.

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.

Modified printed two-band dipole radiators

The study describes the modified two-band printed dipole radiators, which are implemented as integrated radiating modules containing a compact printed version of a new coaxial dovetail balancing system, and two printed dipoles implemented as corresponding continuations of a feeding strip line and an open loop. We considered some features of structural implementation and technological completion and showed the optimized geometric parameters of the printed version topology. The approach introduced is confirmed by experimental results contributing to the estimation of the maximum achievable radiator performance.

Keywords: dipole radiator, printed version, radiation pattern, return loss.

Alekseytsev Sergey Alexandrovich – Engineer of the 3rd rank, Joint Stock Company “Scientific and Research Institute of Measurement Instrumentation – Novosibirsk Plant named after the Komintern”, post-graduate student, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk.
Science research interests: 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: radiolocation, antennas, microwave devices, phased array antennas.

Tarassenko Natalya Valentinovna – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of General Physics, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk.
Science research interests: radiolocation, antennas, microwave devices, phased array antennas.