
АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396.677.32

ПЕЧАТНЫЕ АНТЕННЫ С РАЗНОСТНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДИПОЛЬНОГО ВИДА С ЦЕНТРАЛЬНО-КОНЦЕВЫМ ПИТАНИЕМ

© 2025 г. С. А. Алексеев, А. П. Горбачев, А. А. Колесников*

Новосибирский государственный технический университет,
просп. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630073 Российская Федерация

*E-mail: kolesiniandre@icloud.com

Поступила в редакцию 25.10.2023 г.

После доработки 18.07.2024 г.

Принята к публикации 03.12.2024 г.

Рассмотрены новые компоновочные схемы и топологии печатных антенн с разностными диаграммами направленности на основе излучателей дипольного вида с центрально-концевым питанием. Они сформированы с использованием системно-технического подхода с применением метода наводимых электродвижущих сил. Из-за несимметричной структуры излучателя возможна реализация разностных диаграмм направленности в двух формах: “долевой” (по аналогии с дольками апельсина) и “воронкообразной”. Обоснован механизм излучения антennы с “долевой” формой диаграммы направленности и приводятся подтверждающие его экспериментальные результаты. Отмечена особенность “воронкообразной” диаграммы, приводятся соображения для понимания механизма этого излучения, а также представлены результаты эксперимента, свидетельствующие о приемлемости такого понимания. Предлагаемые антенны могут служить элементной базой при разработке печатных излучающих систем различного назначения.

Ключевые слова: антenna, разностная диаграмма направленности, метод наводимых ЭДС, печатное исполнение

DOI: 10.31857/S0033849425020032, **EDN:** GMKPDF

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при дистанционном мониторинге лесов, трасс магистральных трубопроводов и высоковольтных линий электропередач целесообразно использовать радиолокационные средства наблюдения. Для формирования радиолокационного изображения в различных режимах обзора существенное значение имеют форма и параметры диаграммы направленности соответствующей антенны, а также ее ориентация относительно направления движения носителя [1, глава 5]. При этом весьма востребованы печатные многоэлементные антенны и фазированные антенные решетки (ФАР) с линейной поляризацией излучения [1, глава 7]. Для реализации отдельных излучателей последних широко применяются печатные диполи, питаемые противофазными равноамплитудными напряжениями в их центрах на близко расположенных смежных клеммах [иными словами: диполь с центральным питанием (ДЦП)]. Как правило [2, 3], на диэлектрической заготовке рядом с печатным диполем

формируется соответствующее симметрирующее устройство (СУ), роль которого для ДЦП играет противофазный равноамплитудный делитель мощности в отношении 1:1.

В результате компоновочная схема печатных многодипольных антенн с центральным питанием характеризуется заметной плотностью трассировки (другими словами: ярко выраженной скученностью) полосковых подводящих линий вблизи смежных клемм ДЦП, включая многократные изгибы, повороты на 180° и значительные зазоры между расположенными рядом невозмодействующими подводящими линиями питания. Последние факторы увеличивают входной коэффициент отражения печатного ДЦП и приводят к росту диссипативных потерь в проводниках и диэлектрике его подложки, снижая коэффициент усиления интегрированного модуля “ДЦП+СУ”.

Для преодоления части вышеупомянутых трудностей в патентах [4, 5] были предложены излучатели дипольного вида с центрально-концевым

питанием (ДЦКП), которые возбуждаются синфазными равноамплитудными напряжениями, подводимыми к удаленному концу одной половины и смежному концу другой половины излучателя. Упомянутые ДЦКП были успешно применены для построения печатной телекоммуникационной директорной антенны [6] и питаемого коаксиальным кабелем трехмерного излучателя системы радиолокационного мониторинга [7], смонтированного над металлической поверхностью носителя.

Кроме того, еще раньше в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) были предложены излучатели дипольного вида с концевым питанием (ДКП), когда противофазные равноамплитудные напряжения подводятся не к смежным, а к удаленным концам обеих половин диполя. И если ДЦП был использован в работе [8] для реализации антенны с суммарно-разностной диаграммой направленности, то в работе [9] для реализации такой же диаграммы был применен ДКП.

Наряду с работами [8, 9] по антеннам дипольного вида с суммарно-разностными диаграммами направленности (ДН), целесообразно отметить ряд работ по общим системно-техническим аспектам проектирования таких антенн. Так, в работе [10, фиг. 1.1, фиг. 7.9, фиг. 13.8] можно ознакомиться с алгоритмами определения направления на источник излучения по разностной ДН, а в работах [11, 12] излагаются как основы, так и уже развитые принципы радиопеленгации по разностным ДН. Имеются также работы, детально описывающие конкретные антенны, созданные на базе рекомендаций упомянутых [10–12] и других монографий. В их числе: микрополосковая антенная решетка диапазона 13.9–15.1 ГГц с суммарно-разностными ДН [13, фиг. 14 и фиг. 15 для суммарных ДН, затем фиг. 16 и фиг. 17 – для разностных ДН]; печатная антенна на базе резонаторного излучателя диапазона 2.3 ГГц [14, фиг. 6 для суммарной ДН и фиг. 7 – для разностной ДН]; микрополосковая антенная решетка с суммарно-разностными ДН диапазона 2.45 ГГц [15, фиг. 11] с использованием также резонаторных излучателей; печатная антенна диапазона 5 ГГц с суммарно-разностной ДН [16, фиг. 10 (а) для суммарной и фиг. 10 (б) – для разностной ДН].

В данной работе исследованы печатные антенны с разностной диаграммой направленности на основе двух коллинеарных ДЦКП. Их структуры привносят в проектирование антенных систем дополнительные степени свободы, позволяя повысить показатели производственной и эксплуатационной технологичности в области антенной техники СВЧ, об актуальности которых говорят соображения, изложенные в работах [1–3].

СИСТЕМНЫЙ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ АНТЕНН С РАЗНОСТНЫМИ ДИАГРАММАМИ НАПРАВЛЕННОСТИ

Вышеупомянутый ДЦКП (рис. 1) образован двумя коллинеарными идентичными цилиндрическими проводниками 1 и 2 с радиусом a и общей осью z , смежные концы 3 и 4 которых разнесены на расстояние $2b$ и расположены в непосредственной близости:

$$a \leq 0,01\lambda_c, \quad b \leq 0,03\lambda_c, \quad (1)$$

где λ_c – средняя длина волны рабочего диапазона частот $f_L \dots f_H$:

$$\lambda_c = 3 \times 10^8 / f_c, \quad f_c = (f_L + f_H) / 2. \quad (2)$$

Эти ограничения соответствуют классификации зазоров и диаметров цилиндрических проводников классических вытянутых диполей (они же – ДЦП), приведенной в [17]. Поскольку ДЦКП является излучателем дипольного вида, то естественно обобщить эти ограничения и на него. Питающие синфазные равноамплитудные напряжения подводятся как к смежному концу 4 проводника 2, так и к удаленному концу 5 проводника 1. Эти напряжения снимаются с выходов 7 и 8 двухканального синфазного делителя мощности 9 (например, полуволновый кольцевой делитель мощности Вилькинсона с балластным резистором между его выходами [6]), к входу 10 которого подключен питающий коаксиальный кабель. Выходы делителя соединены с концами проводников идентичными отрезками линий передачи 11 и 12 соответственно, имеющими выбранное на этапе проектирования конструктивно-технологическое оформление.

Под воздействием приложенных к концам 4 и 5 гармонических синфазных напряжений на

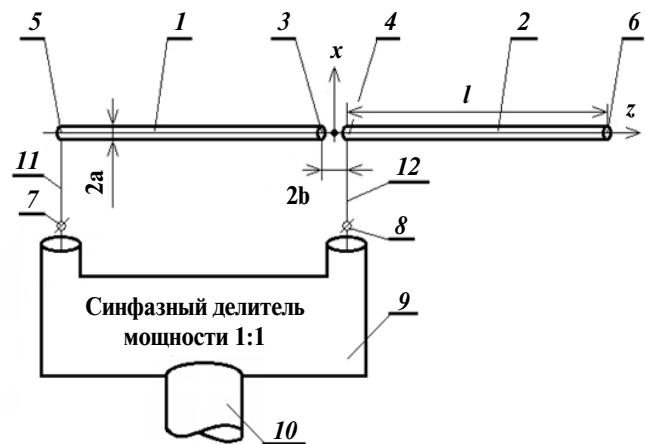


Рис. 1. Излучатель дипольного вида с центрально-концевым питанием.

поверхностях цилиндрических проводников 1 и 2 (рис. 1) возникают высокочастотные токи проводимости. Эти токи распределены вдоль проводников так, что возбуждаемые ими в окружающем свободном изотропном пространстве электромагнитные поля удовлетворяют уравнениям Максвелла и граничному условию для тангенциальной (касательной) составляющей напряженности электрического поля на поверхности проводников. В соответствии с общепринятой методикой исследований произвольных вытянутых цилиндрических излучателей [17] вначале решают внутреннюю задачу о нахождении закона распределения тока проводимости вдоль проводников, а затем в процессе решения внешней задачи находят комплексное входное сопротивление $Z_{bx} = R_{bx} + jX_{bx}$ излучателя, оценивают величину его входного коэффициента отражения g_{bx} , рассчитывают диаграмму направленности (ДН) уединенного ДЦКП. Это позволяет найти необходимые эксплуатационные характеристики исследуемых антенн с разностными ДН.

Внутренняя задача для уединенного ДЦКП уже решена в [5], где найдено, что выражение для “нитевидного” тока проводимости $I_z(z)$ вдоль оси z проводников 1 и 2 (рис. 1) имеет вид:

$$I_z(z) = \begin{cases} I_m \sin[k(l-z)], & 0 < z \leq +l; \\ I_m \sin[k(-z)], & -l \leq z < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где I_m – амплитуда синусоиды; k – волновое число; l – длина проводника.

Поэтому можно приступить к решению внешней задачи, начав с той ее части, которая связана с ДН уединенного ДЦКП. Для этого весь излучатель в интервале $[-l, +l]$ (рис. 2) разбивают на большое число коротких фрагментов длиной $\Delta z'$, каждый из которых согласно [10] рассматривают как элементарный диполь Герца.

Затем число фрагментов устремляют к бесконечности ($\Delta z' \approx dz'$), что позволяет записать

θ -компоненту dE_θ комплексной амплитуды напряженности электрического поля E_θ в произвольной точке $P(x, y, z)$ дальней зоны Фраунгофера:

$$dE_\theta = j\eta \frac{kI(z') \exp(-jkR_s)}{4\pi R_s} \sin \theta_1 dz', \quad (4)$$

здесь штрихи у координат означают принадлежность текущей точки рассмотрения (будущего интегрирования) только проводникам 1 и 2 (рис. 1); $R_s = R - \vec{z}'$ есть разностный вектор между радиусом-вектором $R(x, y, z)$ точки $P(x, y, z)$, из которой ведется наблюдение за антенной, и текущим радиусом-вектором $\vec{z}' = \vec{z}_0 z'$ точки интегрирования $Q(x', \vec{y}, z')$, перемещающейся в этом процессе по вспомогательной “штрихованной” оси z' (совпадающей с осью z) проводников 1 и 2 от точки $z' = -l$ до точки $z' = +l$; η – характеристическое сопротивление свободного пространства, окружающего ДЦКП.

Продолжая анализ излучательных свойств ДЦКП по классической методике [17], θ -проекцию комплексной амплитуды напряженности электрического поля E_θ всего ДЦКП можно выразить на основании принципа суперпозиции в виде:

$$\begin{aligned} E_\theta &= \int_{-l}^{+l} dE_\theta = \\ &= j\eta \frac{k \exp(-jkR)}{4\pi R} \sin \theta \int_{-l}^{+l} I(z') \exp(jkz' \cos \theta) dz' = \\ &= j\eta \frac{kI_m}{4\pi} \sin \theta \frac{\exp(-jkR)}{R} \left[\int_{-l}^0 \sin[k(-z')] \exp(jkz' \cos \theta) + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{+l} \sin[k(l-z')] \exp(jkz' \cos \theta) dz' \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

После преобразований, выполненных в работе [18], (5) примет вид

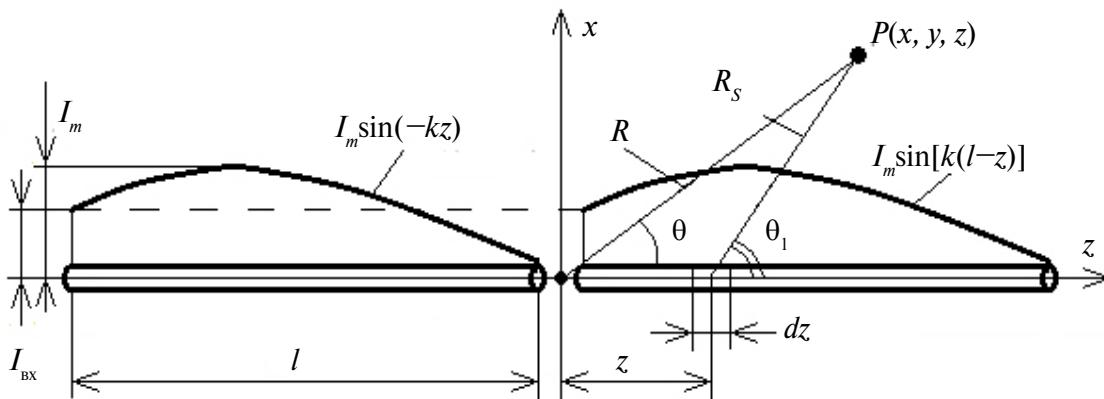


Рис. 2. Геометрия задачи анализа ДЦКП.

$$E_\theta = j\eta \frac{I_m \exp(-jkR)}{4\pi R} \left[\frac{Q}{\sin \theta} \right],$$

$$Q = \operatorname{Re}[Q] + j \operatorname{Im}[Q], \quad (6)$$

причем:

$$\operatorname{Re}[Q] = 1 - \cos(kl \cos \theta) \cos(kl) + \cos(kl \cos \theta) -$$

$$- \sin(kl \cos \theta) \cos \theta \sin(kl) - \cos(kl),$$

$$\operatorname{Im}[Q] = \sin(kl \cos \theta) \cos(kl) + \sin(kl \cos \theta) -$$

$$- \cos(kl \cos \theta) \sin(kl) \cos \theta - \cos \theta \sin(kl).$$

Используя (6) для анализа ДН линейно поляризованного излучения ДЦКП (комплексная амплитуда напряженности его электрического поля имеет только одну проекцию E_θ), приходим к заключению, что ее максимум ориентирован перпендикулярно оси z проводников (рис. 2), а сама она удовлетворяет критерию все направленности в плоскости XOY магнитного вектора с единственной проекцией H_ϕ , так как согласно [17] в дальней зоне Фраунгофера $H_\phi = E_\theta/\eta$. Это обстоятельство открывает возможность формирования не только суммарной (подобно двухэлементной фазированной антенной решетке, описанной в [19]), но и разностной диаграммы направленности. При этом следует отметить, что в работе [19] наряду с топологией антенны для суммарной ДН, изображена

и проанализирована в общих чертах также и антenna с разностной диаграммой. Так что данную работу можно квалифицировать как расширение и углубление анализа антенн с разностными ДН, частично описанными в работе [19]. Как будет показано далее, разностные диаграммы могут иметь как “долевую” форму (подобно долькам апельсина, рис. 3) с глубокой вытянутой седловиной в направлении максимума, так и “воронкообразную” в виде узкой воронки с глубоким провалом (рис. 4), ось которого ориентирована в направлении максимума излучения уединенного ДЦКП.

Трехмерные ДН рис. 3 и 4, несколько опережая результаты последующего системно-технического анализа, сформированы в программе “CST Studio Suite”. Эти рисунки уже сейчас позволяют увидеть предстоящие отличия разностных диаграмм направленности, а затем в последующем анализе расставить приоритеты и избежать повторений. При этом целесообразно подчеркнуть, что различные формы ДН, как суммарная [19], так и обе разностные (рис. 3 и 4), сформированы из двух коллинеарных ДЦКП без введения в топологию их питания каких-либо линий задержки/фазовращателей. Иными словами, питание обоих ДЦКП в каждой из трех топологий осуществляется 4-канальным синфазным делителем мощности по двоично-этажной схеме “елочки” (рис. 5, квадратики – узлы разветвления линий передачи, утолщенные линии – проводники ДЦКП), так что та или иная форма ДН возникает не за счет разности

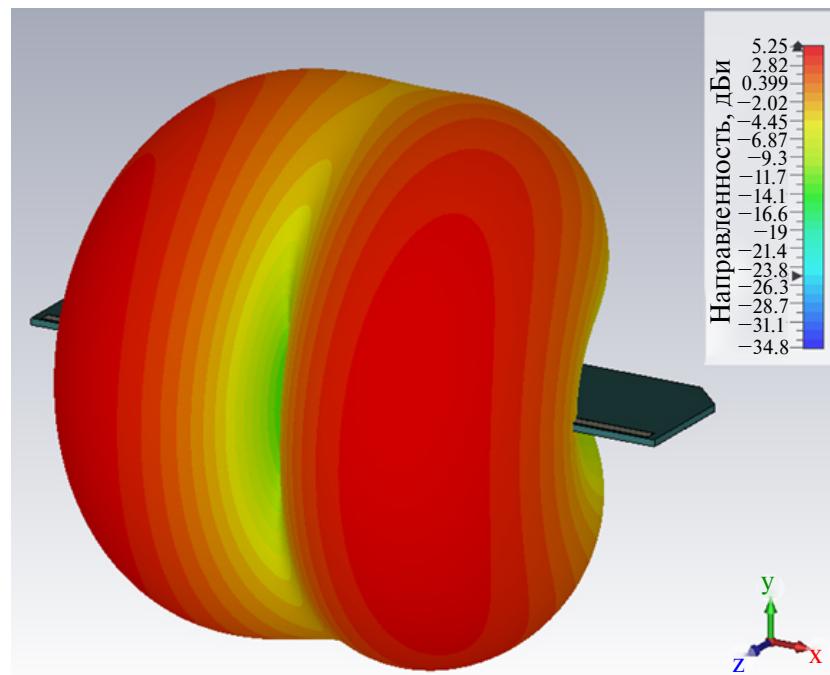


Рис. 3. “Долевая” разностная диаграмма направленности.

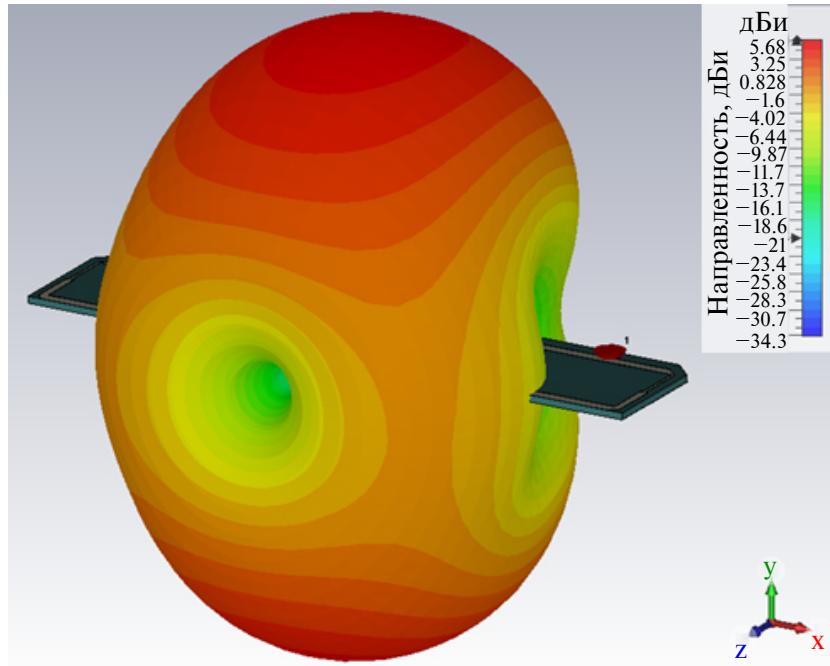


Рис. 4. “Воронкообразная” разностная диаграмма направленности.

фаз питающих напряжений, а за счет различной ориентации несимметричных по своей природе ДЦКП (рис. 1), когда структура делителя остается неизменной.

Формирование последующих стартовых/начальных обликов, заявленных в названии работы антенн, базировалось на результатах анализа частотных характеристик входного сопротивления

$$\begin{aligned} Z_{\text{вх}} &= R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}} = Z_m / \sin^2(kl) = \\ &= (R_m + jX_m) / \sin^2(kl) \end{aligned}$$

уединенного ДЦКП, а также с учетом опыта практической реализации антенн на базе ДКП [9] и ДЦКП [4–7, 18, 19], где широко применялся метод “проб и ошибок”. Вещественную часть $R_{\text{вх}}$ находят путем определения потока среднего (за период гармонического колебания) значения вектора Пойнтинга через сферическую поверхность в дальней зоне Фраунгофера (сам ДЦКП расположен в центре сферы), а оценивание реактивной составляющей $X_{\text{вх}}$ может быть проведено лишь с применением метода наводимых электродвижущих сил (ЭДС) [17]. Как первая ($R_{\text{вх}}$), так и вторая ($X_{\text{вх}}$) процедуры, опубликованные в работах [7, 18–20], где результаты анализа в методе наводимых ЭДС отнесены к входному току $I_{\text{вх}}$ на клеммах излучателя дипольного вида (рис. 2), сопровождаются подробными/громоздкими математическими преобразованиями, итоговые аналитические выражения которых не поддаются компактному представлению

в замкнутой форме. Поэтому приходится использовать численные методы, которые характеризуются приемлемой точностью в ординарных пакетах типа “MatchCad” или “MatLab”.

Частотные характеристики вещественной и реактивной составляющих входного импеданса ДЦКП, приведенные в [19], вселяли оптимизм. Так, например, при отношении длины l половины ДЦКП (рис. 1, рис. 2) к текущей длине волны λ , равном $l/\lambda = 0.29$ при радиусе цилиндров $a = 0.5$ мм вещественная составляющая входного импеданса составила 126 Ом, а реактивная – “минус” 4 Ома. Это можно считать приемлемым для последующего перехода от цилиндрической формы половин ДЦКП к их печатной форме [2, глава 2.6] при ширине w_r микрополосковых половин. Учитывая классическую связь размеров обеих форм (а именно: $a = w_r/4$), убеждаемся, что данный результат $w_r = 2.0$ мм вполне приемлем с точки зрения конструкторско-технологических ограничений на печатную реализацию и может быть использован в качестве стартового/начального приближения при оптимизации в системе “CST Studio Suite”.

В результате это и другие обстоятельства способствовали в работе [21] формированию согласно рис. 5 (схема в центре рисунка) топологии с “долевой” формой ДН (рис. 6; здесь и далее с целью более наглядного обоснования механизма излучения сохранены номера позиций и обозначения размеров, использованные в [21]). Антенна содержит подложку 1 толщиной H с лицевой 2 и обратной 3

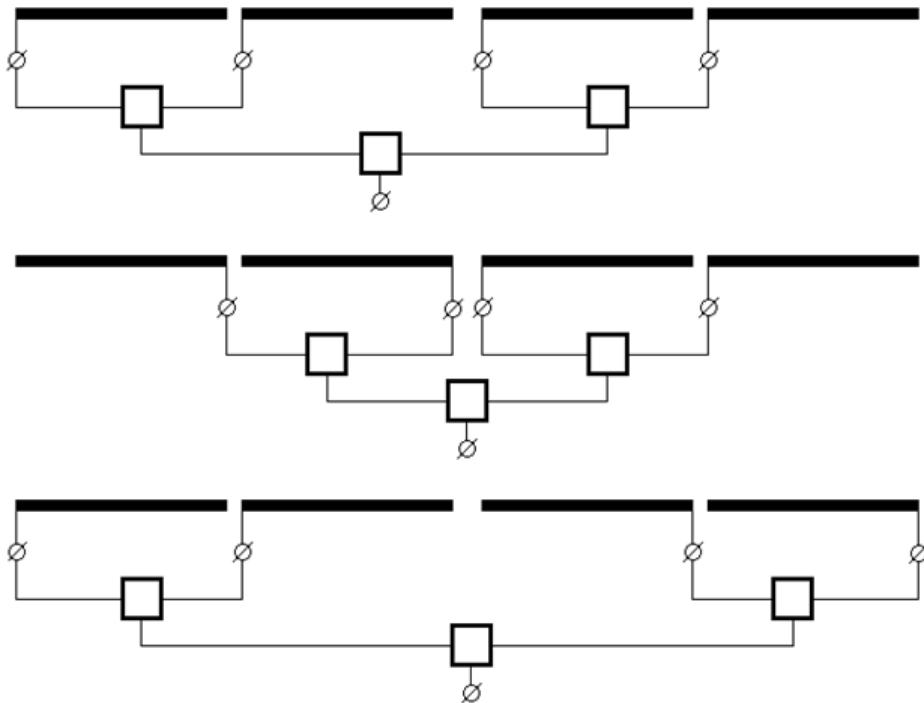


Рис. 5. Структурные схемы антенн из двух коллинеарных ДЦКП. Сверху – схема для суммарной ДН, в центре – для “долевой”, снизу – для “воронкообразной”.

поверхностями, имеющую пару больших 4, 5 и пару малых 6, 7 сторон. На поверхности 2 параллельно стороне 4 селективным травлением фольги [22] при краевых полях $s = 0.2 \dots 0.5$ мм выполнены два проводника, разделенные зазорами 8 на две половины 9, 10 (они формируют первый ДЦКП) и 11, 12 (они образуют второй ДЦКП).

Три идентичных 2-канальных равнампли-тудных синфазных делителя мощности выполнены также на поверхности 2 (рис. 6, светло-серый цвет) и формируют 4-канальный делитель по схеме “елочка” с входом 21. Разъем устанавливают на стороне 5 и его корпус соединяют с печатным за-земленным проводником 36 (рис. 6, темно-серый цвет). Там же реализованы четыре пьедестала 37, 38, 39 и 40 с размерами $w_p \times l_c$, расположенные под широкими линиями двухступенчатых соединительных отрезков на всю их длину l_c (рис. 7).

Сигнал, подведенный к входу 21, делится на четырех равные части. В результате токи i_{30} , i_{31} , i_{34} и i_{35} выходных концов [размер w_{cb} (рис. 6)] соединительных линий в виде двухсекционных трансформаторов сопротивлений являются синфазными и равнампли-тудными $i_{30} = i_{31} = i_{34} = i_{35}$, что иллюстрируется в некоторый момент времени на рис. 7. Эти токи, покидая широкие отрезки линий, при-водят к появлению и поддержанию поверхностных токов проводимости j_9, j_{10}, j_{11} и j_{12} на ничем не экра-нированных половинах 9, 10, 11 и 12 обоих ДЦКП. Они являются источниками излучения, причем,

хотя эти токи синфазны, их пространственная ори-ентация попарно противоположна. Согласно [17], эти обстоятельства приводят к исчезновению (ярко выраженному ослаблению) поля в точках, лежащих в плоскости YOZ , проходящей через ось Z перпендикулярно плоскости подложки (рис. 6, 7; здесь и далее с целью более удобного общения с интер-фейсом программы электродинамического моде-лирования “CST Studio Suite” направления осей координат выбраны отличающимися от направ-лений рис. 2). При этом оптимизируют ключевые размеры (антенна как бы настраивается) с целью добиться согласования ее с генератором при приемлемых формах ДН.

В результате в плоскости поляризации XOZ ДН имеет ярко выраженную седловину при двухвер-шинной форме (рис. 3) с симметрично расположенным-ными экстремумами, отстоящими от оси Z на угол θ_{\max} . Рассчитанные согласно [22–24] конкретные ве-личины размеров формируют стартовый облик, по-сле оптимизации которого на подложке из материала FR-4 ($\epsilon_r = 4.58$) толщиной $H = 1$ мм для волнового сопротивления 50 Ом и центральной частоты $f_0 = 2.8$ ГГц получены следующие размеры (в миллиметрах):

$$l_c = 6.8; \quad l_r = 21.3; \quad s_r = 2.1;$$

$$s = 0.3; \quad s_8 = 1.7; \quad w_p = 3.2;$$

$$w_{cn} = 0.5; \quad w_{cb} = 1.2; \quad w_r = 1.8; \quad w_{50} = 2.0; \quad w_{71} = 1.8.$$

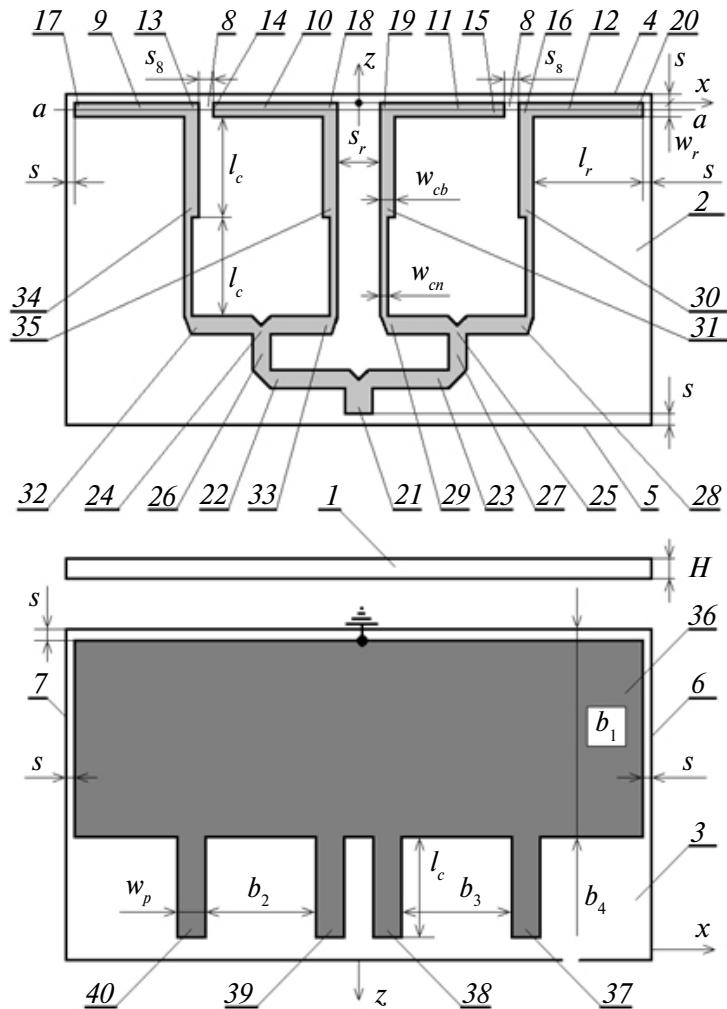


Рис. 6. Топология антенны с “долевой” разностной диаграммой направленности.

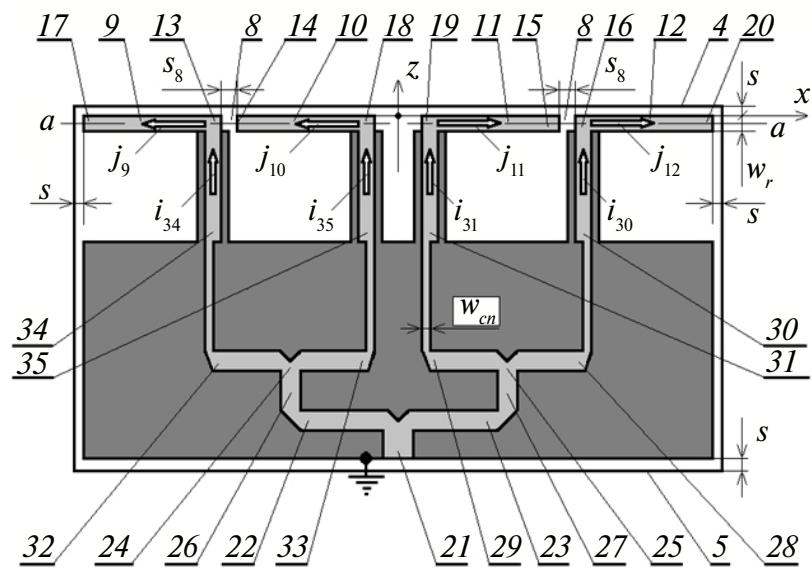


Рис. 7. Совмещенные топологии лицевой и обратной сторон подложки антенны с “долевой” разностной диаграммой направленности.

Они обеспечивают хорошее согласование, что подтверждает обоснованность вышеописанного механизма излучения. Для его экспериментального подтверждения был изготовлен образец с этими размерами (рис. 8) и питанием кабелем РК 50–1–11 при габаритах подложки 96 × 25 мм. Согласование и форма ДН проверялись в сертифицированной безэховой камере с использованием анализатора цепей Rohde & Schwarz RS-ZVL-13, что отражено на рис. 9 маркерами (сплошная линия — моделирование). Полярная ДН в терминах коэффициента усиления измерялась по стандартной процедуре при использовании упомянутого анализатора, рупорного облучателя и генератора E8257D PSG. Результаты измерений

(рис. 10, маркеры, сплошная линия — моделирование) хорошо совпадали с данными трехмерного моделирования, в том числе по величине $\theta_{\max} \approx 32^\circ$.

Характеристики излучения антенны с “воронкообразной” ДН (последняя схема на рис. 5 и фото на рис. 11) можно исследовать аналогично. Механизм излучения этой антенны похож на предыдущий, что подтверждается результатами измерений ее характеристик (рис. 12, рис. 13). При этом на рис. 12 текущая частота нормирована к опорной/референсной частоте $f_{\text{оп}}$, определяемой длиной реализованного на рис. 11 отдельного ДЦКП, а сечения объемной разностной ДН этой антенны представлены для частоты наилучшего согласования.

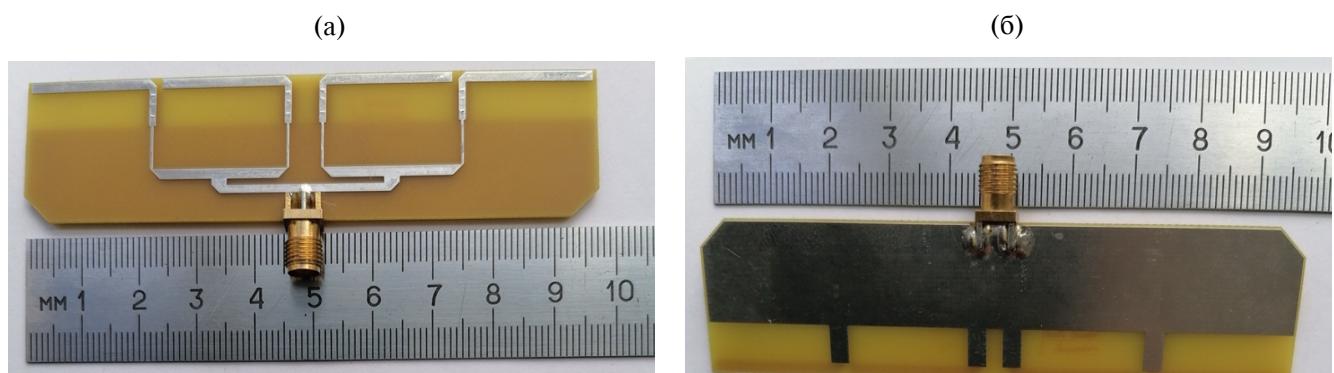


Рис. 8. Фотографии лицевой (а) и обратной (б) сторон антенны с “долевой” разностной ДН.

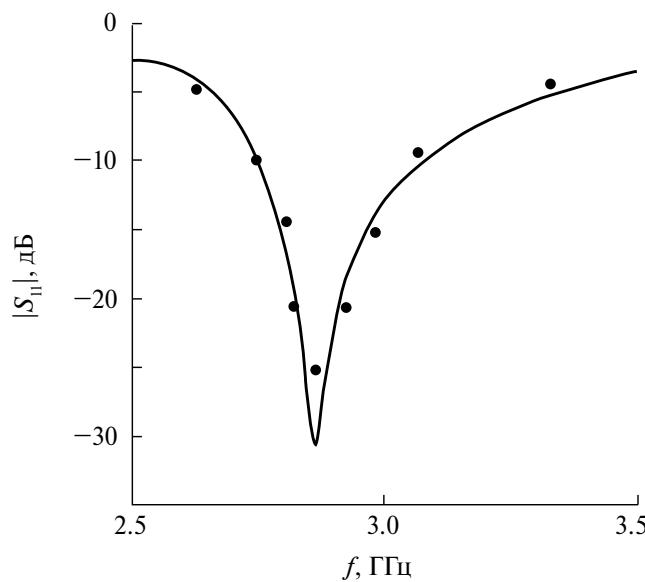


Рис. 9. Частотная характеристика модуля входного коэффициента отражения $|S_{11}|$ антенны с “долевой” разностной ДН.

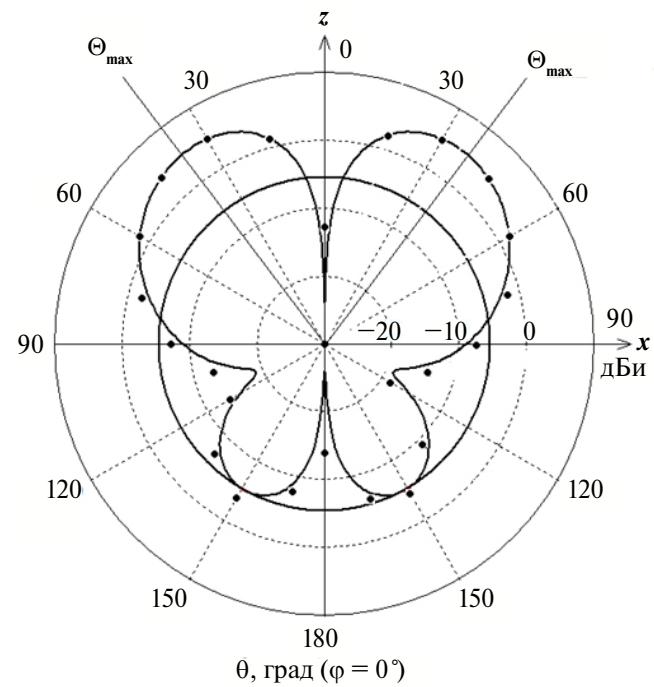


Рис. 10. Сечение объемной диаграммы направленности в плоскости поляризации антенны с “долевой” разностной ДН.

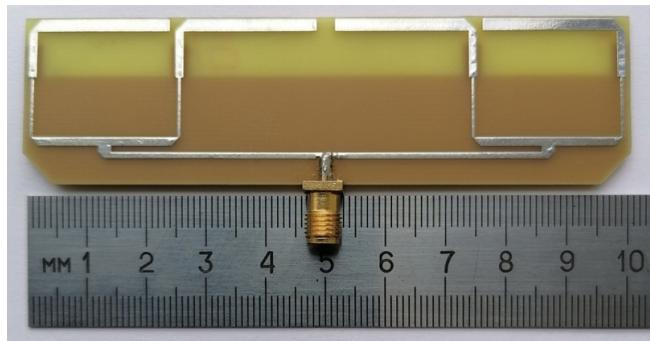


Рис. 11. Фотография лицевой стороны антенны с “воронкообразной” разностной ДН.

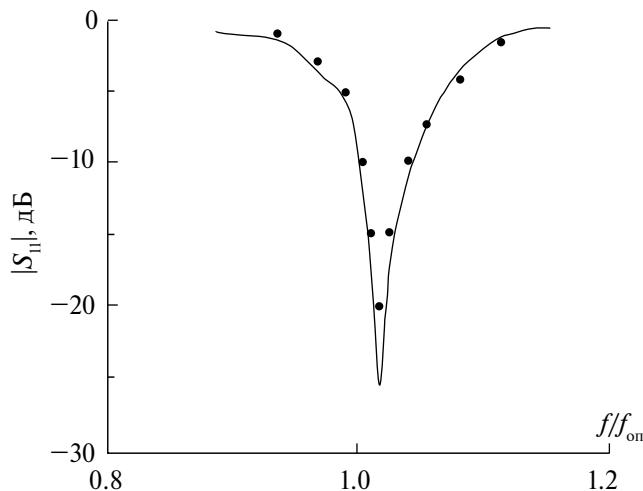


Рис. 12. Частотная характеристика модуля входного коэффициента отражения $|S_{11}|$ антенны с “воронкообразной” разностной ДН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в работе антенны дипольного вида с разностными диаграммами направленности открывают возможности их практического применения в системах радиолокации и радионавигации. Впервые удалось выявить особенности диаграмм направленности антенн этого типа и обосновать их форму интерференцией в дальней зоне Фраунгофера электромагнитных полей двух излучателей с центрально-концевым питанием, скомпонованных в коллинеарную систему. Представляется, что предложенные антенны уже сейчас готовы к проектированию топологий и формированию компоновочных схем многоэлементных излучателей с высокой степенью готовности.

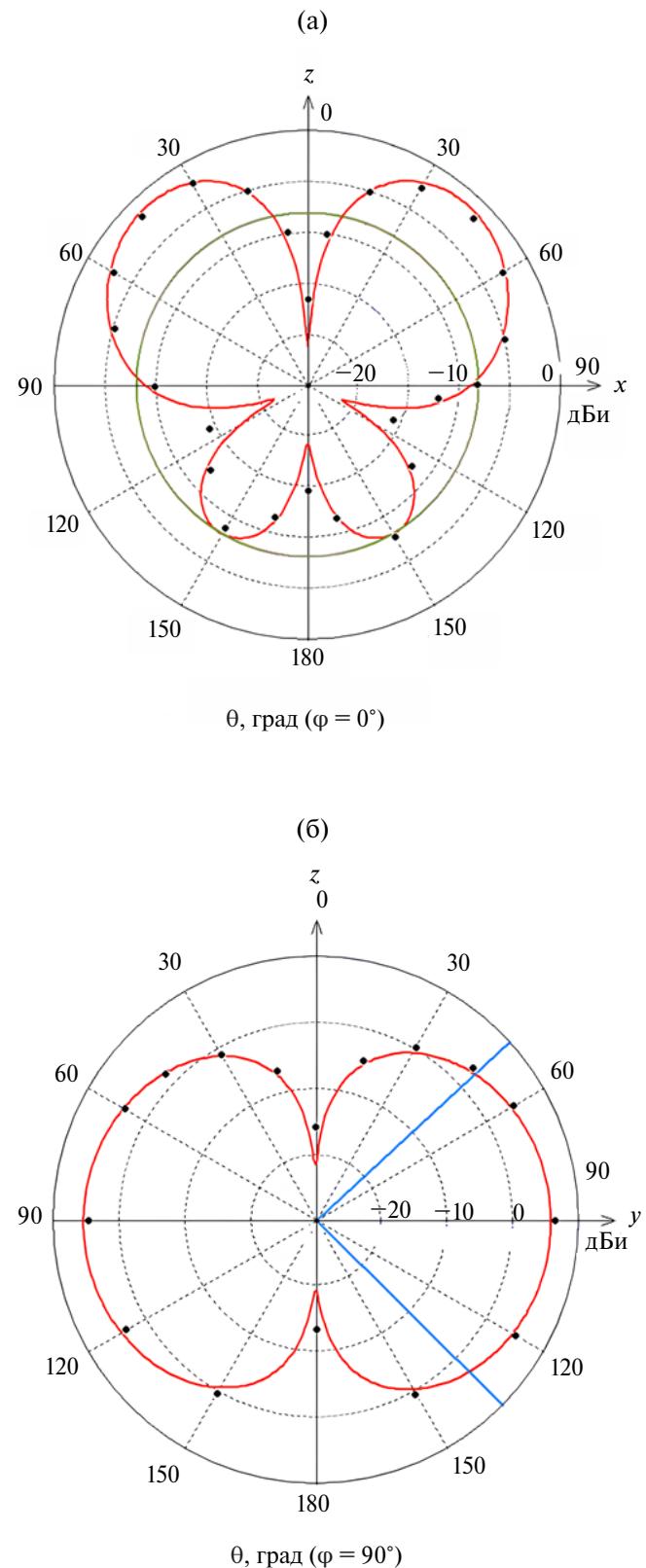


Рис. 13. Сечения объемной диаграммы направленности антенны с “воронкообразной” разностной ДН в плоскости поляризации (а) и в плоскости магнитного вектора (б).

КОНФЛИКТ ИНТЕРСОВ

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке из средств гранта РНФ в рамках научного проекта № 24-29-20048, <https://rscf.ru/project/24-29-20048/>, а также за счет финансовой поддержки Правительства Новосибирской области, Соглашение № р-77.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х кн.: Кн. 1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА / Под ред. В. С. Вербы, Б. Г. Татарского. М.: Радиотехника. 2016.
2. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д. И. Воскресенского. М.: Радиотехника. 2012.
3. Handbook of Antenna Technologies / Ed by Z. N. Chen. Singapore: Springer, 2016.
4. Борейчук А.И., Горбачев А.П., Кириллова Н.А., Шведова А.В. Вибраторная антенна. Патент РФ № 2571156. Опубл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 35 от 20. 12. 2015.
5. Бухтияров Д.А., Вильмицкий Д.С., Горбачев А.П. и др. Волноводно-дипольная антенна. Патент РФ № 2676207. Опубл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 36 от 26. 12. 2018.
6. Бухтияров Д.А., Горбачев А.П. // Вопросы радиоэлектрон. 2018. № 4. С. 19.
<http://doi.org/10.21778/2218-5453-2018-4-19-23>
7. Alekseytsev S.A., Atuchin V.V., Gorbachev A.P., Parshin Y.N. // J. Electromagnetic Waves and Applications. 2022. V. 36. № 15. P. 2115.
<http://doi.org/10.1080/09205071.2022.2065938>
8. Jenn D.C., Chua E.-H. // Electron. Lett. 2003. V. 39. № 12. P. 892.
<http://doi.org/10.1049/el:20030584>
9. Alekseytsev S.A., Bukhtiyarov D.A., Gorbachev A.P., Vilmitsky D.S. // Electromagnetics. 2020. V. 40. № 8. P. 554.
<http://doi.org/10.1080/02726343.2020.1838046>
10. Sherman S.M., Barton D.K. Monopulse Principles and Techniques. Norwood: Artech House, 2011.
11. Bailey A.D., Jordan E.C., Webb H.D. A Comparison of Radio Direction Finding Systems. Urbana: Univ. of Illinois, 1949.
12. Jenkins H.H. Small-aperture Radio Direction-Finding. Norwood: Artech House, 1991.
13. Wang H., Fang D.-G., Chen X.G. // IEEE Trans. 2006. V. AP-54. № 2. P. 503.
<http://doi.org/10.1109/TAP.2005.863103>
14. Yu F., Xie Y., Zhang L. // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2016. V. 26. № 10. P. 762.
<http://doi.org/10.1109/LMWC.2016.2604866>
15. Sun H., Ge X., He W., Zhao L. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2020. V. 19. P. 1073.
<http://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2988690>
16. Deng Z., Zhang F., Liang M. et al. // Progress in Electromagnetics Research C. 2017. V. 74. P. 41.
17. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975.
18. Колесников А.А. Волноводно-дипольная антенна для систем радио-мониторинга. Магистерская дисс. Новосибирск: Гос. тех. унив, 2023. 101 с.
19. Kolesnikov A.A., Alekseytsev S.A., Gorbachev A.P. // 2023 IEEE XVI Int. Scientific and Technical Conf. “Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)” Novosibirsk. 10–12 Nov. N.Y.: IEEE, 2023. P. 730.
<http://doi.org/10.1109/APEIE59731.2023.10347804>
20. Buhtiyarov D.A., Gorbachev A.P. // 2014 12th Int. Scientific and Technical Conf. “Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)” Novosibirsk. 02–04 Oct. N.Y.: IEEE, 2014. P. 304.
<http://doi.org/10.1109/APEIE.2014.7040902>
21. Горбачев А.П., Колесников А.А. Вибраторная антенна система. Патент РФ № 2802177. Опубл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 24 от 22.08.2023.
22. Бушминский И.П., Морозов Г.В. Технологическое проектирование микросхем СВЧ. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
23. Справочник по элементам полосковой техники / Под ред. А.Л. Фельдштейна. М.: Связь, 1979.
24. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д. И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2016.

PRINTED ANTENNAS WITH DIFFERENCE RADIATION PATTERN ON A BASE OF THE CENTER-END-FED DIPOLE-LIKE RADIATORS

© 2025 S. A. Alekseytsev, A. P. Gorbachev, A. A. Kolesnikov*

*Novosibirsk State Technical University,
K. Marx Avenue, 20, Novosibirsk, 630073 Russian Federation*

*E-mail: kolesiniandre@icloud.com

Received October 25, 2023; revised July 18, 2024; accepted December 3, 2024

New layout schemes and topologies of the printed antennas with difference radiation patterns on a base of the center-end-fed dipole-like radiators are considered. They are formed using a systems-technical approach together with an induced electromotive force method. Due to the asymmetrical structure of the radiator, it is possible to realize the two forms of the difference radiation patterns: "slice-shaped" (similar to orange slices) and "funnel-shaped". A mechanism of the antenna radiation with "slice-shaped" radiation pattern is justified and the validity results are presented. A feature of the "funnel-shaped" radiation pattern is noted. Considerations for understanding this radiation mechanism are given, and the validity experimental results are presented. The proposed antennas can serve as an element base through a creation of the printed radiating systems of various kinds.

Keywords: antenna, difference radiation pattern, induced electromotive force (EMF) method, printed implementation