

Низкопрофильная антенная решетка сильносвязанных диполей с дифференциальным питанием

И. Н. Бобков[✉], Ю. В. Юханов

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

[✉] antennadesign@outlook.com

Аннотация

Введение. Антенные решетки сильносвязанных диполей в настоящее время относятся к одному из наиболее востребованных типов систем излучателей. Их основные достоинства – электрически малая высота профиля, возможность сканирования луча в широком секторе углов без появления эффекта ослепления, низкий уровень кроссполаризации. Количество публикаций по теме антенных решеток этого типа за последние годы значительно выросло. Большое внимание авторы уделяли симметрирующим устройствам в составе излучателей. Однако малоизученной остается возможность реализации простого дифференциального питания плеч диполей в антенных решетках такого типа, что делает исследование этого вопроса особенно актуальным при разработке радиотехнических устройств, где такая схема питания является предпочтительной.

Цель работы. Разработать конструкцию элемента антенной решетки сильносвязанных дипольных излучателей с дифференциальным питанием и исследовать ее характеристики.

Материалы и методы. Для изготовления макета применялись следующие материалы: лист медный, диэлектрик RO3003, ситалловая подложка СТ-50-1. Численное исследование характеристик выполнялось в программе ANSYS HFSS, экспериментальное исследование макета – в безэховой камере с применением автоматизированного измерительного комплекса и векторного анализатора цепей.

Результаты. Представлены результаты проектирования плоской антенной решетки сильносвязанных диполей X-диапазона. В антенной решетке питание каждого из плеч диполей осуществляется при помощи отдельного коаксиального кабеля, при этом 2 плеча одного диполя запитываются в противофазе. Приведены результаты численного исследования характеристик антенной решетки 8×8 из разработанных элементов. В диапазоне от 6.5 до 12.25 ГГц средний активный коэффициент стоячей волны по напряжению не превышает 3, при этом коэффициент усиления варьируется от 21.5 до 25.7 дБи. Показана возможность сканирования луча в секторе углов до $\pm 45^\circ$. Приведены результаты экспериментального исследования характеристик излучения и согласования макета одного элемента.

Заключение. Показана важность проведения расчетов с учетом эффектов, возникающих на краях антенных решеток конечных размеров. Экспериментально подтверждена целесообразность изготовления и измерений макетов антенных решеток с большим количеством элементов. Предложенная конструкция элемента показала возможность реализации дифференциального питания в антенных решетках сильносвязанных дипольных излучателей.

Ключевые слова: антенные решетки, взаимная связь, дипольные антенны, дифференциальное питание, ССДИ

Для цитирования: Бобков И. Н., Юханов Ю. В. Низкопрофильная антенная решетка сильносвязанных диполей с дифференциальным питанием // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 2. С. 58–67. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-2-58-67

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 07.12.2023; принята к публикации после рецензирования 11.01.2024; опубликована онлайн 29.04.2024



Low-Profile Differentially-Fed Tightly-Coupled Dipole Array

Ivan N. Bobkov[✉], Yury V. Yukhanov

Southern Federal University, Taganrog, Russia

✉ antennadesign@outlook.com

Abstract

Introduction. Tightly coupled dipoles currently belong to one of the most popular types of antenna arrays. Their main advantages include an electrically low-profile height, the ability to scan the beam across a wide sector of angles without the onset of scan blindness, and a low level of cross-polarization. In recent years, the number of publications on the topic of antenna arrays of this type has increased significantly. The authors have paid sufficient attention to baluns included in the antenna array elements. However, the possibility of implementing a differentially-fed scheme in antenna arrays of this type remains poorly studied. This makes the study of this subject especially relevant in the development of radio devices where such feed technique is preferable.

Aim. Differentially-fed tightly-coupled dipole array design and study.

Materials and methods. The following materials were used to create the prototype: copper sheet, ceramic glass substrate ST-50-1, dielectric RO3003. A numerical study of the characteristics was carried out in the ANSYS HFSS environment; an experimental study of the prototype was carried out in an anechoic chamber using an automated measuring complex and a vector network analyzer.

Results. The results of designing a planar antenna array of tightly-coupled dipoles for the X-band are presented. In the antenna array, each of the dipole arms is fed using a separate coaxial cable, while the two arms of one dipole are fed out-of-phase. The results of a numerical study of the characteristics of an 8×8 antenna array made from the developed elements are presented. Across the range from 6.5 to 12.25 GHz, the average active VSWR does not exceed 3, while the gain varies from 21.5 to 25.7 dBi. The possibility of beam scanning in a sector of angles up to $\pm 45^\circ$ is shown. The results of an experimental study of the radiation characteristics and matching of the prototype of a single element are presented.

Conclusion. The importance of taking into account the effects that arise at the edges of finite antenna arrays during simulations is shown. The feasibility of manufacturing and measuring antenna array prototypes with a large number of elements is experimentally confirmed. The proposed element design demonstrates the possibility of implementing the differentially-fed scheme in tightly coupled antenna arrays.

Keywords: antenna arrays, mutual coupling, dipole antennas, differential feed, TCDA

For citation: Bobkov I. N., Yukhanov Yu. V. Low-Profile Differentially-Fed Tightly-Coupled Dipole Array. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 2, pp. 58–67. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-2-58-67

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 07.12.2023; accepted 11.01.2024; published online 29.04.2024

Введение. Исследования в области фазированных антенных решеток (АР) [1], направленные на уменьшение высоты профиля, массы, расширение рабочей полосы частот, привели к разработке излучателей типа "U-channel BAVA" [2], "banyan tree" [3], решеток из "излучателей-кнопок" [4], типа "длинная щель" [5–7] и конструкций из диполей с сильной связью на основе подхода, предложенного Б. Мунком [8]. Последние могут проектироваться по технологии шахтного типа, когда плоские излучатели располагают перпендикулярно апертуре решетки [9, 10], и планарной технологии изготовления СВЧ-печатных плат [11].

АР сильносвязанных дипольных излучателей (ССДИ) могут работать как на круговой [12], так и на двух ортогональных поляризациях, имеют низкий уровень кроссполаризационной составляющей [13, 14], могут быть реализованы на практике как для дециметрового [15], так и для миллиметрового диапазонов длин волн [16, 17], образовывать АР, состоящие из подрешеток, разбитых на частотные диапазоны [18].

В уже опубликованных работах по теме АР ССДИ значительное внимание уделяется вопросам обеспечения питания. Как правило, применяются симметрирующие трансформато-

ры, интегрированные в структуру излучателя и размещенные между металлическим экраном и плечами диполей [9, 10, 13]. Такие структуры призваны обеспечивать согласование и симметрирование в широкой полосе частот и при этом не допускать появления резонансов синфазных токов внутри рабочего диапазона длин волн [13]. Однако малоизученной остается возможность реализации дифференциального питания плеч диполей коаксиальными линиями передачи в АР ССДИ без применения каких-либо симметрирующих схем и устройств.

В данной статье рассматривается плоская низкопрофильная АР ССДИ, предназначенная для работы в X-диапазоне. В качестве прототипа выступила конструкция, описанная в [13, 19]. Предлагаемая АР отличается дифференциальной схемой питания плеч диполей, технологичностью и низкой стоимостью. Были исследованы как одиночный элемент, размеры которого без учета питающих кабелей составляют $21.2 \times 21.2 \times 4.8$ мм, так и АР конечных размеров из 8×8 элементов (256 диполей, 512 портов).

Конструкция излучателя. На рис. 1 представлена фотография макета элемента АР ССДИ. Размеры и топология приведены на рис. 2, геометрические параметры – в таблице.

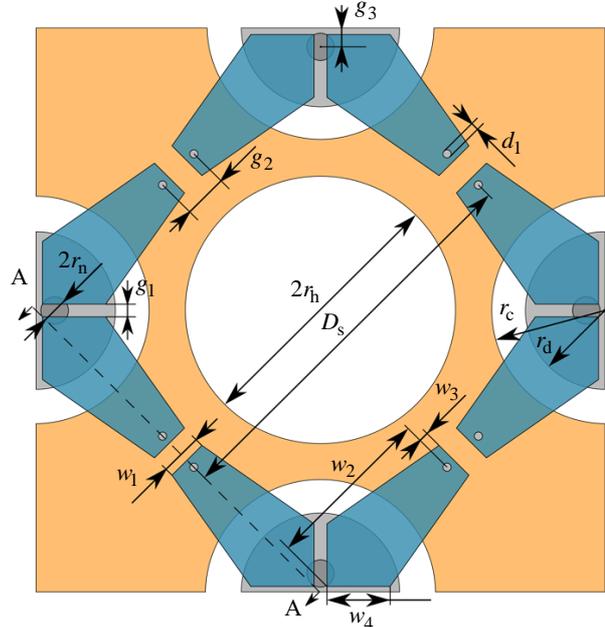
Элемент АР (рис. 2) состоит из медной пластины-основания, четырех пар плоских излучателей, шестислойной диэлектрической подложки, емкостных пластин полукруглой формы и двух верхних согласующих слоев [8], причем внешний слой дополнительно выполняет роль обтекателя.



Рис. 1. Фотография элемента антенной решетки ССДИ

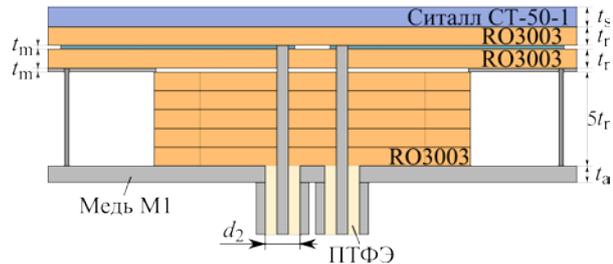
Fig. 1. TCDA element photo

Полукруглые пластины служат для увеличения емкостной связи между плечами соседних диполей. Эти пластины гальванически свя-



а

А–А



б

Рис. 2. Размеры и топология элемента АР ССДИ: а – вид сверху (медная пластина-основание и диэлектрические слои, расположенные выше слоя диполей, не показаны для улучшения восприятия); б – сечение А–А

Fig. 2. TCDA element dimensions and topology: а – top view (ground layer and dielectric layers above dipoles are not shown for clarity); б – section view А–А

Геометрические параметры элемента АР ССДИ

TCDA element dimensions

Параметр	Значение, мм	Параметр	Значение, мм
D_s	15	w_1	1.5
g_1	0.5	w_2	6.3
g_2	1.7	w_3	0.35
g_3	0.7	w_4	2.26
d_1	0.32	r_c	4.3
d_2	1	r_p	0.5
r_d	3	r_h	5
t_s	0.6	t_r	0.508
t_a	0.5	t_m	0.035

заны с основанием при помощи медных стержней. Последние вынесены от края излучателя на небольшое расстояние g_3 для обеспечения прочности конструкции макета излучателя. При работе излучателя в составе АР медные стержни, как правило, располагают по центру емкостных пластин, но размещение со смещением от центра также встречается [13].

Емкостные пластины, как и плечи дипольных излучателей, выполнены из медного ламината толщиной 35 мкм и расположены на противоположных внешних слоях диэлектрической подложки из материала RO3003. Этот диэлектрический слой вместе с остальными нижними пятью слоями диэлектрика (рис. 2, б) образует стопку толщиной 0.12 длины волны на верхней частоте рабочего диапазона, предназначенную для фиксации плеч диполей, питающих линий и обеспечения общей механической прочности излучателя [13].

Вся шестислойная стопка из материала RO3003 перфорирована отверстиями диаметром $2r_h$ для ухудшения условий распространения поверхностных волн при работе излучателя в составе АР в режиме сканирования луча [11]. Кроме того, отверстиями радиусом r_c перфорируется область размещения емкостных пластин. Перфорация на углах одиночного элемента ССДИ не выполнялась из соображений обеспечения механической прочности, в то время как АР из излучателей ССДИ перфорируется полностью.

Питание диполей дифференциальное, осуществляется при помощи подводимых к элементу снизу 50-омных коаксиальных кабелей, сплошной медный экран которых припаивается к медному основанию. Жилы кабелей подводятся непосредственно к плечам диполей, для чего в шестислойной диэлектрической стопке имеются отверстия диаметром d_1 .

Исследование одиночного элемента АР ССДИ. Рассмотрим результаты экспериментального исследования одиночного элемента АР ССДИ (рис. 1) и сравним их с расчетными данными. Расчет характеристик выполнялся в программном обеспечении ANSYS HFSS. Диаграммы направленности макета измерялись в сертифицированной безэховой камере в соответствии с имеющейся методикой измерений.

На рис. 3 показаны расчетные и измеренные зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) на одном из портов ССДИ, в то время как остальные 7 портов были нагружены на согласованные нагрузки. Так как применяется дифференциальная схема питания плеч диполей, рассматривать значения активного КСВН (КСВН при одновременном возбуждении всех восьми портов АР, половина которых в рассматриваемой конструкции возбуждается в противофазе) крайне затруднительно. Авторы связывают осциллирующий характер кривой измеренного КСВН с допусками при изготовлении (макет элемента АР изготавливался полностью вручную). Тем не менее некоторое сходство результатов измерений и расчетов просматривается.

На рис. 4 показаны рассчитанные и измеренные диаграммы направленности элемента ССДИ на частоте 7 ГГц: кривая 1 – рассчитанные значения; кривая 2 – измеренные значения; кривая 3 – рассчитанные значения без учета системы питания позади излучателя. Возбуждалась пара противоположно расположенных диполей, ортогонально расположенные диполи были нагружены на согласованные нагрузки. При проведении расчетов позади макета размещались модели коаксиальных кабелей и противофазных делителей мощности, аналогичные по размерам тем, что применялись при измерениях (оснастка намеренно не укрывалась радиопоглощающим материалом). Из рис. 4 видно, что система питания (кабели, делители мощности) и прочие элементы, располагаемые позади излучателя, существенно влияют на форму диаграммы направленности. Для уменьшения этого влияния ССДИ необходимо размещать по возможности конформным образом.

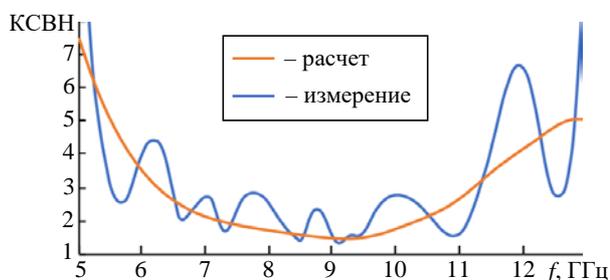


Рис. 3. КСВН на одном из портов элемента ССДИ. Другие порты нагружены на согласованные нагрузки

Fig. 3. VSWR at a single port of the antenna element. All other ports are terminated with matched loads

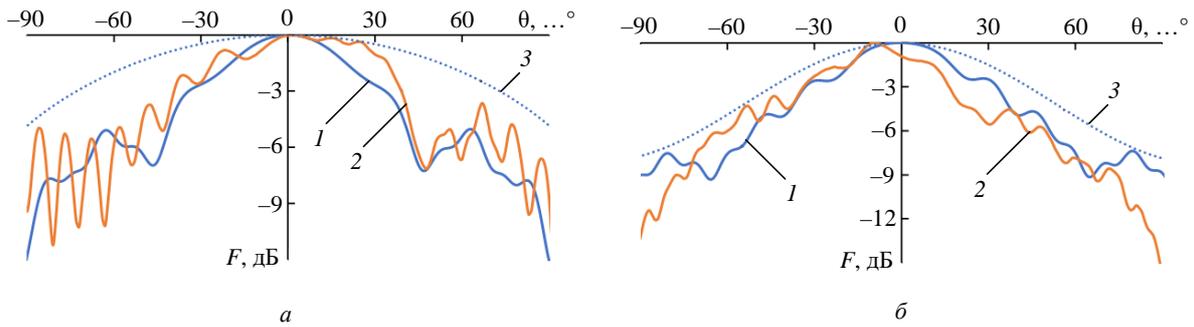


Рис. 4. Рассчитанные и измеренные диаграммы направленности элемента ССДИ на частоте 7 ГГц (возбуждена пара противоположно расположенных диполей): а – *E*-плоскость; б – *H*-плоскость

Fig. 4. Simulated and measured radiation patterns of the TCDA element at 7 GHz (only two oppositely placed dipoles are excited): а – *E*-plane; б – *H*-plane

Численное исследование АР 8 × 8 элементов ССДИ. Существует несколько техник расчета характеристик АР в системах автоматизированного проектирования устройств сверхвысоких частот. Первая и наиболее совершенная техника расчета основана на методе декомпозиции домена для АР конечных размеров (Finite Array Domain Decomposition Method – FADDM). Данный способ расчета позволяет учесть взаимное влияние элементов и эффекты на краях, обусловленные конечными размерами АР, получить полную матрицу *S*-параметров для всех портов АР и осуществлять сканирование луча посредством явного указания амплитуд и фаз возбуждения на каждом из них.

Вторая техника расчета основана на анализе свойств элементарной ячейки с периодическими граничными условиями (ГУ) на гранях при работе в составе бесконечной АР. Так, по-прежнему имеется возможность устанавливать количество элементов, шаг решетки и угол сканирования луча, но расчет выполняется исходя из предположения отсутствия взаимного влияния излучения элементов друг на друга и эффектов, возникающих на краях АР. В ряде случаев эта техника расчета оказывается недостаточно точной. Поводами предпочесть этот метод первому являются высокая скорость выполнения расчетов и невысокие требования к вычислительным ресурсам.

На рис. 5 показана конструкция АР 8 × 8 ССДИ, а также отмечены фазы, с которыми возбуждаются плечи диполей.

На рис. 6 представлены расчетные зависимости значения активного КСВН от частоты на портах АР: кривая 1 – среднее значение активного

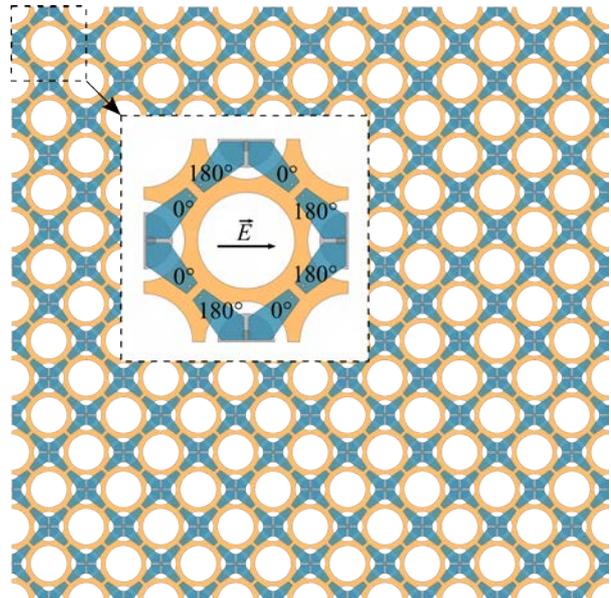


Рис. 5. Вид сверху на антенную решетку 8 × 8 элементов ССДИ. Медная пластина-основание и диэлектрические слои, расположенные выше слоя диполей, не показаны для улучшения восприятия

Fig. 5. Top view of the 8 × 8 TCDA. Ground layer and dielectric layers above dipoles are not shown for clarity

КСВН на 512 портах АР; кривые 2 и 3 – среднеквадратическое отклонение ($\pm 3\sigma$) значения активного КСВН на каждой частоте для 512 портов АР; кривая 4 – активный КСВН на входе одного из портов элементарной ячейки с периодическими ГУ на гранях.

В нижней части диапазона рабочих частот можно отметить более высокие средние значения активного КСВН для АР 8 × 8 ССДИ конечных размеров (рис. 6). Вызвано это ухудшением согласования на портах элементов, расположенных на краях АР [20]. Существуют различные способы борьбы с последствиями эффектов, возникающих на краях АР конечных

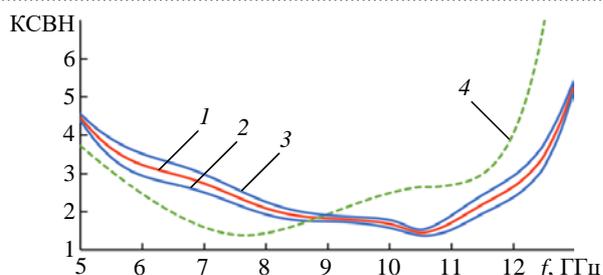


Рис. 6. Активный КСВН AP 8 × 8 ССДИ

Fig. 6. Broadside active VSWR of the 8 × 8 TCDA

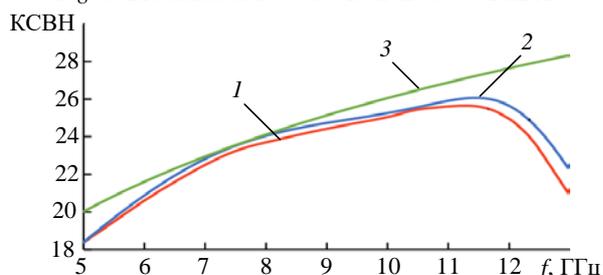


Рис. 7. Коэффициент усиления AP 8 × 8 ССДИ в сравнении с теоретическим максимально достижимым КНД апертуры такого же размера

Fig. 7. Realized gain of the 8 × 8 TCDA compared to the maximum achievable gain of a same size aperture

размеров, например подсоединение элементов, располагающихся на краях, к согласованным или короткозамкнутым нагрузкам [21]. Однако применимость подобных техник к рассматриваемой AP ССДИ выходит за рамки настоящей статьи.

Зависимости коэффициента усиления (КУ) AP ССДИ от частоты приведены на рис. 7: кривая 1 – расчет AP 8 × 8 методом декомпозиции домена; кривая 2 – расчет AP 8 × 8 на основе ячейки с периодическими ГУ на гранях; кривая 3 – теоретически достижимый коэффициент направленного действия (КНД) апертуры такой же площади, что и элемент AP, определяемый как $4\pi A/\lambda^2$, где A – площадь апертуры; λ – длина волны на рассматриваемой частоте.

На рис. 8 показаны нормированные диаграммы направленности в E -, H - и D -плоскостях без сканирования и со сканированием луча на угол 45° : кривые 1 – расчет AP 8 × 8 элементов методом декомпозиции домена; кривые 2 – рас-

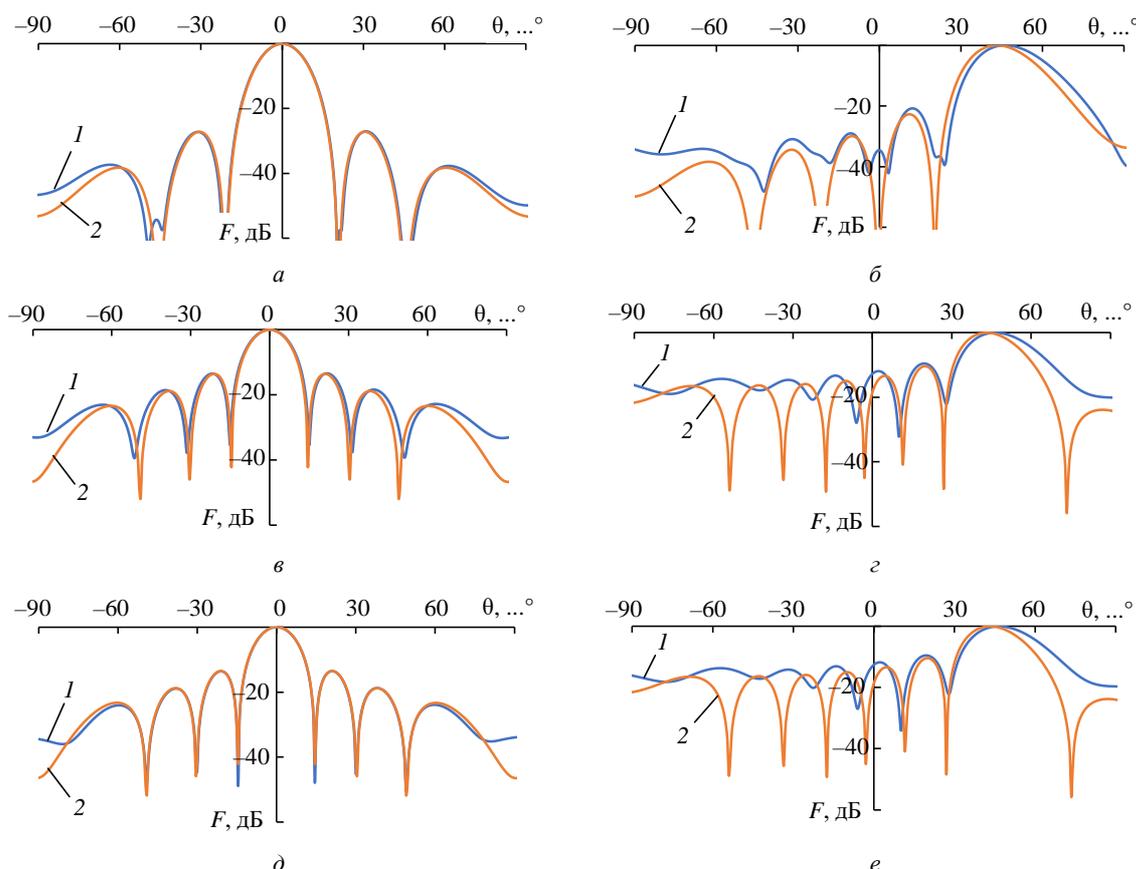


Рис. 8. Нормированные диаграммы направленности конечной и в составе "бесконечной" AP 8 × 8 ССДИ на частоте 7 ГГц: а – D-плоскость, без сканирования; б – D-плоскость, угол сканирования 45° ; в – E-плоскость, без сканирования; г – E-плоскость, угол сканирования 45° ; д – H-плоскость, без сканирования; е – H-плоскость, угол сканирования 45°

Fig. 8. Normalized radiation patterns of the finite and infinite 8 × 8 TCDA at 7 GHz: а – D-plane, broadside; б – D-plane, scan angle of 45° ; в – E-plane, broadside; г – E-plane, scan angle of 45° ; д – H-plane, broadside; е – H-plane, scan angle of 45°

чет АР 8×8 элементов на основе ячейки с периодическими ГУ на гранях. При расчетах методом декомпозиции домена амплитуды возбуждения на всех портах АР принимались равными, а набег фазы устанавливался явным образом. Максимальный уровень первого бокового лепестка обнаруживается при сканировании на угол 45° в E - и H -плоскостях (см. рис. 8, z , e), амплитуда составляет -9.5 дБ. Уровень боковых лепестков при сканировании на 45° в D -плоскости (рис. 8, b) составляет -20.8 дБ (-27.1 дБ без сканирования).

Стоит отметить, что диаграммы направленности без сканирования луча (см. рис. 8, a , v , d), полученные обоими методами расчета характеристик АР, совпадают в части главного и первых боковых лепестков. Расчеты элементарной ячейки с периодическими ГУ на гранях требуют существенно меньше времени и вычислительных ресурсов, чем расчеты полноразмерной АР. При этом такие расчеты позволяют с достаточной для предварительной оценки точностью получить представление как о ширине главного луча, так и об уровне боковых лепестков диаграммы направленности. Однако при сканировании луча (см. рис. 8, b , z , e) влияние конечных размеров АР на характеристики излучения становится существенным и необходимо отдавать предпочтение методу декомпозиции домена.

Заключение. Рассмотрена конструкция плоской низкопрофильной двухполяризационной АР ССДИ. Питание каждого из плеч дипо-

лей осуществляется отдельным коаксиальным кабелем, при этом 2 плеча одного диполя запитываются в противофазе.

Экспериментально исследованы характеристики излучения и согласования макета одного элемента АР ССДИ. Сравнение с результатами расчетов показало необходимость изготовления и исследования макета, состоящего из большего количества элементов, так как влияние допусков при ручном изготовлении физически малого элемента оказалось существенным. Диаграммы направленности макета и модели в общем совпадают.

Расчетным путем установлено, что АР 8×8 из предложенных элементов обеспечивает средний КСВН < 3 в диапазоне от 6.5 до 12.25 ГГц, при этом КУ варьируется от 21.5 до 25.7 дБи. Показана важность проведения расчетов с учетом эффектов, возникающих на краях АР конечных размеров, и взаимного влияния излучения элементов АР.

Показана возможность сканирования луча в секторе углов до $\pm 45^\circ$ в двух основных и диагональной плоскостях. Уровень первого бокового лепестка при сканировании на угол 45° в E - и H -плоскостях составляет -9.5 дБ. Уровень боковых лепестков в D -плоскости составляет -27.1 дБ без сканирования и -20.8 дБ при сканировании на 45° .

Исследованная конструкция АР ССДИ с дифференциальным питанием может найти применение при разработке радиотехнических устройств, где такая схема питания является предпочтительной.

Список литературы

1. Opportunities and advances in ultra-wideband electronically scanned arrays / J. T. Logan, R. W. Kindt, M. Y. Lee, M. N. Vouvakis // Intern. Symp. on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, USA, 26 June–01 July 2016. IEEE, 2016. P. 431–432. doi: 10.1109/APS.2016.7695924
2. Elsallal M. W., Mather J. C. An ultra-thin, decade (10:1) Bandwidth, modular "BAVA" array with low cross-polarization // Intern. Symp. on Antennas and Propagation (APSURSI), Spokane, USA, 03–08 July 2011. IEEE, 2011. P. 1980–1983. doi: 10.1109/APS.2011.5996893
3. Holland S. S., Vouvakis M. N. The Banyan Tree Antenna Array // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011. Vol. 59, № 11. P. 4060–4070. doi: 10.1109/TAP.2011.2164177
4. Livingston S., Lee J. J. A wide band low profile dual-pol "Thumbtack" array // Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Waltham, USA, 12–

- 15 Oct. 2010. IEEE, 2010. P. 477–483. doi: 10.1109/ARRAY.2010.5613323

5. Compact light weight UHF arrays using long slot apertures / J. J. Lee, S. Livingston, R. Koenig, D. Nagata, L. L. Lai // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, № 7. P. 2009–2015. doi: 10.1109/TAP.2006.877169

6. Lee J. J., Livingston S., Nagata D. A low profile 10:1 (200–2000 MHz) wide band long slot array // Antennas and Propagation Society Intern. Symp., San Diego, USA, 05–11 July 2008. IEEE, 2008. P. 1–4. doi: 10.1109/APS.2008.4619302

7. Long slot arrays - part 2: ultra wideband test results / J. J. Lee, S. Livingston, R. Koenig, D. Nagata, L. Lai // Antennas and Propagation Society Intern. Symp., Washington, USA, 03–08 July 2005. IEEE, 2005. Vol. 1A. P. 586–589. doi: 10.1109/APS.2005.1551387

8. A low-profile broadband phased array antenna / B. Munk, R. Taylor, T. Durharn, W. Crosswell, B. Pigon, R. Boozer, S. Brown, M. Jones, J. Pryor, S. Ortiz, J. Rawnick, K. Krebs, M. Vanstrum, G. Gothard, D. Wiebelt // Antennas and Propagation Society Intern. Symp., Columbus, USA, 22–27 Jun. 2003. IEEE, 2003. Vol. 2. P. 448–451. doi: 10.1109/APS.2003.1219272
9. Gevorkyan A. V., Privalova T. Y., Yukhanov Y. V. Radiation Characteristics of the Low Profile Dipole Antenna // Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS-Toyama), Toyama, Japan, 01–04 Aug. 2018. IEEE, 2019. P. 1621–1625. doi: 10.23919/PIERS.2018.8597967
10. Novak M. H., Volakis J. L. Ultrawideband Antennas for Multiband Satellite Communications at UHF–Ku Frequencies // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63, № 4. P. 1334–1341. doi: 10.1109/TAP.2015.2390616
11. Holland S. S., Vouvakis M. N. The Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) Array // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60, № 1. P. 130–140. doi: 10.1109/TAP.2011.2167916
12. Au V. B., Bobkov I. N., Yukhanov Y. V. Low-Profile Circularly Polarized Tightly Coupled Dipole Array // IEEE 8th All-Russ. Microwave Conf. (RMC), Moscow, Russia, 23–25 Nov. 2022. IEEE, 2022. P. 207–210. doi: 10.1109/RMC55984.2022.10079477
13. A New Class of Planar Ultrawideband Modular Antenna Arrays with Improved Bandwidth / J. T. Logan, R. W. Kindt, M. Y. Lee, M. N. Vouvakis // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66, iss. 2. P. 692–701. doi: 10.1109/TAP.2017.2780878
14. Lee M. Y., Kindt R. W., Vouvakis M. N. Polarization properties of finite ultra-wideband arrays // 31st Intern. Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics (ACES), Williamsburg, USA, 22–26 March 2015. IEEE, 2015. P. 1–2.
15. Merola C. S., Vouvakis M. N. UHF planar ultra-wideband modular antenna (PUMA) arrays // Intern. Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, USA, 09–14 July 2017. IEEE, 2017. P. 1803–1804. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072944
16. Logan J. T., Vouvakis M. N. Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) arrays scalable to mm-waves // Antennas and Propagation Society Intern. Symp. (APSURSI), Orlando, FL, USA, 07–13 July 2013. IEEE, 2014. P. 624–625. doi: 10.1109/APS.2013.6710972
17. A 6:1 bandwidth PUMA array at 7mm scale / R. Kindt, R. Mital, J. Logan, M. Lee, M. Vouvakis // Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology (PAST), Waltham, USA, 18–21 Oct. 2016. IEEE, 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/ARRAY.2016.7832626
18. Lee M. Y., Kindt R. W., Vouvakis M. N. Planar ultrawideband modular antenna (PUMA) wavelength-scaled array // Intern. Symp. on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, USA, 26 June–01 July 2016. IEEE, 2016. P. 435–436. doi: 10.1109/APS.2016.7695926
19. Simplified design of 6:1 PUMA arrays / M. Y. Lee, J. T. Logan, R. W. Kindt, M. N. Vouvakis // Intern. Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Vancouver, Canada, 19–24 July 2015. IEEE, 2015. P. 2515–2516. doi: 10.1109/APS.2015.7305646
20. Tightly Coupled Array Antennas for Ultra-Wideband Wireless Systems / Y. Zhou, F. Zhu, S. Gao, Q. Luo, L.-H. Wen, Q. Wang, X. X. Yang, Y. L. Geng, Z. Q. Cheng // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 61851–61866. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2873741
21. Holzman E. On the use of dummy elements to match edge elements in transmit arrays // Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Waltham, USA, 15–18 Oct. 2013. IEEE, 2014. P. 549–552. doi: 10.1109/ARRAY.2013.6731887

Информация об авторах

Бобков Иван Николаевич – инженер по специальности "Средства радиоэлектронной борьбы" (2011, Южный федеральный университет), научный сотрудник передовой инженерной школы "Инженерия кибер-платформ" Южного федерального университета. Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – теория и практика антенных решеток; СВЧ-устройства и технологии.

Адрес: Южный федеральный университет, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, 347900, Россия

E-mail: antennadesign@outlook.com

<https://orcid.org/0000-0002-6923-7917>

Юханов Юрий Владимирович – доктор технических наук (1997), профессор (2000), заведующий кафедрой антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета. Автор 255 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика и распространение радиоволн; синтез импедансных структур по заданным характеристикам излучения и рассеяния.

Адрес: Южный федеральный университет, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, 347900, Россия

E-mail: yu_yukhanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8448-5508>

References

1. Logan J. T., Kindt R. W., Lee M. Y., Vouvakis M. N. Opportunities and Advances in Ultra-Wideband Electronically Scanned Arrays. Intern. Symp. on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, USA, 26 June–01 July 2016. IEEE, 2016, pp. 431–432. doi: 10.1109/APS.2016.7695924
2. Elsallal M. W., Mather J. C. An Ultra-Thin, Decade (10:1) Bandwidth, Modular "BAVA" Array with Low Cross-Polarization. Intern. Symp. on Antennas and Propagation (APSURSI), Spokane, USA, 03–08 July 2011. IEEE, 2011, pp. 1980–1983. doi: 10.1109/APS.2011.5996893
3. Holland S. S., Vouvakis M. N. The Banyan Tree Antenna Array. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011, vol. 59, no. 11, pp. 4060–4070. doi: 10.1109/TAP.2011.2164177
4. Livingston S., Lee J. J. A Wide Band Low Profile Dual-Pol "Thumbtack" Array. Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Waltham, USA, 12–15 Oct. 2010. IEEE, 2010, pp. 477–483. doi: 10.1109/ARRAY.2010.5613323
5. Lee J. J., Livingston S., Koenig R., Nagata D., Lai L. L. Compact Light Weight UHF Arrays Using Long Slot Apertures. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006, vol. 54, no. 7, pp. 2009–2015. doi: 10.1109/TAP.2006.877169
6. Lee J. J., Livingston S., Nagata D. A Low Profile 10:1 (200–2000 MHz) Wide Band Long Slot Array. Antennas and Propagation Society Intern. Symp., San Diego, USA, 05–11 July 2008. IEEE, 2008, pp. 1–4. doi: 10.1109/APS.2008.4619302
7. Lee J. J., Livingston S., Koenig R., Nagata D., Lai L. Long Slot Arrays - part 2: Ultra Wideband Test Results. Antennas and Propagation Society Intern. Symp., Washington, USA, 03–08 July 2005. IEEE, 2005, vol. 1A, pp. 586–589. doi: 10.1109/APS.2005.1551387
8. Munk B., Taylor R., Durharn T., Crosswell W., Pigon B., Boozer R., Brown S., Jones M., Pryor J., Ortiz S., Rawnick J., Krebs K., Vanstrum M., Gothard G., Wiebelt D. A Low-Profile Broadband Phased Array Antenna. Antennas and Propagation Society Intern. Symp., Columbus, USA, 22–27 Jun. 2003. IEEE, 2003, vol. 2, pp. 448–451. doi: 10.1109/APS.2003.1219272
9. Gevorkyan A. V., Privalova T. Y., Yukhanov Y. V. Radiation Characteristics of the Low Profile Dipole Antenna. Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS-Toyama), Toyama, Japan, 01–04 Aug. 2018. IEEE, 2019, pp. 1621–1625. doi: 10.23919/PIERS.2018.8597967
10. Novak M. H., Volakis J. L. Ultrawideband Antennas for Multiband Satellite Communications at UHF–Ku Frequencies. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1334–1341. doi: 10.1109/TAP.2015.2390616
11. Holland S. S., Vouvakis M. N. The Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) Array. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012, vol. 60, no. 1, pp. 130–140. doi: 10.1109/TAP.2011.2167916
12. Au V. B., Bobkov I. N., Yukhanov Y. V. Low-Profile Circularly Polarized Tightly Coupled Dipole Array. IEEE 8th All-Russ. Microwave Conf. (RMC), Moscow, Russia, 23–25 Nov. 2022. IEEE, 2022, pp. 207–210. doi: 10.1109/RMC55984.2022.10079477
13. Logan J. T., Kindt R. W., Lee M. Y., Vouvakis M. N. A New Class of Planar Ultrawideband Modular Antenna Arrays with Improved Bandwidth. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018, vol. 66, iss. 2, pp. 692–701. doi: 10.1109/TAP.2017.2780878
14. Lee M. Y., Kindt R. W., Vouvakis M. N. Polarization Properties of Finite Ultra-Wideband Arrays. 31st Intern. Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics (ACES), Williamsburg, USA, 22–26 March 2015. IEEE, 2015, pp. 1–2.
15. Merola C. S., Vouvakis M. N. UHF Planar Ultra-Wideband Modular Antenna (PUMA) Arrays. Intern. Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, USA, 09–14 July 2017. IEEE, 2017, pp. 1803–1804. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072944
16. Logan J. T., Vouvakis M. N. Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) arrays scalable to mm-waves. Antennas and Propagation Society Intern. Symp. (APSURSI), Orlando, FL, USA, 07–13 July 2013. IEEE, 2014, pp. 624–625. doi: 10.1109/APS.2013.6710972
17. Kindt R., Mital R., Logan J., Lee M., Vouvakis M. A 6:1 Bandwidth PUMA Array at 7mm Scale. Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology (PAST), Waltham, USA, 18–21 Oct. 2016. IEEE, 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/ARRAY.2016.7832626
18. Lee M. Y., Kindt R. W., Vouvakis M. N. Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) Wavelength-Scaled Array. Intern. Symp. on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, USA, 26 June–01 July 2016. IEEE, 2016, pp. 435–436. doi: 10.1109/APS.2016.7695926
19. Lee M. Y., Logan J. T., Kindt R. W., Vouvakis M. N. Simplified Design of 6:1 PUMA Arrays. Intern. Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Vancouver, Canada, 19–24 July 2015. IEEE, 2015, pp. 2515–2516. doi: 10.1109/APS.2015.7305646
20. Zhou Y., Zhu F., Gao S., Luo Q., Wen L.-H., Wang Q., Yang X. X., Geng Y. L., Cheng Z. Q. Tightly Coupled Array Antennas for Ultra-Wideband Wireless Systems. IEEE Access. 2018, vol. 6, pp. 61851–61866. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2873741
21. Holzman E. On the Use of Dummy Elements to Match Edge Elements in Transmit Arrays. Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Waltham, USA, 15–18 Oct. 2013. IEEE, 2014, pp. 549–552. doi: 10.1109/ARRAY.2013.6731887

Information about the authors

Ivan N. Bobkov, Engineer's degree in electrical engineering (2011, Southern Federal University), researcher at Advanced engineering school in Cyberplatform Engineering of Southern Federal University. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: theory and application of antenna arrays; microwave theory and techniques. Address: Southern Federal University, 44, Nekrasovsky Per., Taganrog 347900, Russia
E-mail: antennadesign@outlook.com
<https://orcid.org/0000-0002-6923-7917>

Yury V. Yukhanov, Dr Sci. (Eng.) (1997), Professor (2000), Head of the Antenna and Radio Transmitter Department at Institute of Radioengineering Systems and Control of Southern Federal University. The author of 255 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic scattering theory and application; analysis and synthesis of impedance surfaces. Address: Southern Federal University, 44, Nekrasovsky Per., Taganrog 347900, Russia
E-mail: yu_yukhanov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8448-5508>
