

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.6>

УДК 621.396.677

НИЗКОПРОФИЛЬНАЯ ДВУХПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА СИЛЬНО СВЯЗАННЫХ ДИПОЛЕЙ С-Х-ДИАПАЗОНОВ

А. И. Семенихин, Д. В. Семенихина, Ю. В. Юханов

Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета,
347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, д.44

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2020 г.

Аннотация. Современные низкопрофильные сверхширокополосные антенные решетки представляют собой решетки сильно связанных дипольных излучателей (ССДИ). В статье рассмотрена модель низкопрофильной двухполяризационной антенной решетки ССДИ планарного типа для работы в полосе $4\div 12$ ГГц со сканированием в секторе углов $\pm 30^\circ$ в двух главных плоскостях. В отличие от известных ССДИ предлагаемая решетка отличается простотой конструкции, отсутствием симметрирующих трансформаторов, увеличенным периодом 12×12 мм и малой высотой 5,63 мм (включая толщину верхних однородных неперфорированных согласующих слоев 1,67 мм и слоев подложки – 3,968 мм). Выбранный период решетки позволяет учесть специальные конструктивные требования схемы питания элементов решетки. Широкополосность ССДИ (по уровню КСВН $< 3,6$) достигнута с помощью верхних согласующих слоев. Эти слои также служат обтекателем решетки.

Ключевые слова: низкопрофильная антенная решетка, сильно связанные дипольные излучатели, двухполяризационная антенная решетка.

Abstract. Modern low-profile ultra-wideband antenna arrays are tightly coupled dipole array (TCDA). The paper presents a model of a low-profile dual-polarized of planar-type TCDA for operation in the $4\div 12$ GHz band with scanning in the sector of angles $\pm 30^\circ$ in two principal planes. In contradistinction to the well-known TCDAs, the proposed array is distinguished by its simplicity of design, the absence of balancing transformers, the extended period of 12×12 mm, and the small height of

5.63mm (including the thickness of the upper homogeneous non-perforated matching layers of 1.67mm and the substrate layers of 3.968mm. The selected array period allows taking into account the special design requirements of the feed network for the array elements. The broadband of the TCDA (at $VSWR < 3.6$) is achieved using the upper matching layers. These layers also serve as the radome for the array.

Key words: low-profile array, tightly coupled dipole array, dual-polarized array.

Введение

Современные низкопрофильные сверхширокополосные антенные решетки (АР) представляют собой решетки сильно связанных дипольных излучателей (ССДИ) – Tightly Coupled Dipole Array (TCDA) [1-3]. Излучатели типа TCDA предложены Мунком и основаны на идее антенны в виде слоя тока (Current Sheet Antenna - CSA) [1]. Подход Мунка обеспечивает широкополосность АР, совмещенный и стабильный фазовый центр в диапазоне частот, низкий уровень кроссполяризационной компоненты и хорошие характеристики конечных решеток.

Известные технические решения низкопрофильных АР на основе ССДИ используют технологию многослойных СВЧ печатных плат, которая обеспечивает возможность их интеграции с приемопередающими модулями (ППМ). Все внутренние СВЧ линии связи между излучателями и ППМ могут выполняться также по печатной технологии.

Во многих публикациях, например [2-15], рассматриваются компоновочные схемы антенных решеток ССДИ двух типов. Печатные платы излучателей в решетках шахтного типа располагаются перпендикулярно апертуре АР. В решетках планарного типа платы излучателей параллельны апертуре АР. Компоновочные схемы таких АР существенно отличаются по выбору подложек, топологии плеч диполей, питанию и согласованию диполей.

Развитие решеток ССДИ идет по пути расширения диапазона рабочих частот и углового сектора сканирования путем тщательной оптимизации схем питания и согласования. С этой целью используется метод эквивалентных схем

[3], в компоновочную схему ССДИ вводятся резистивные слои [3, 4], частотно-селективные поглотители из метаматериала [5], не резистивные [6] и резистивные частотно-избирательные поверхности [7, 8], симметричные широкополосные трансформаторы сопротивлений [9], слои широкоугольного согласования импедансов [10], в том числе с метаповерхностью, с частотно-селективным ферритовым покрытием экрана [11]. В [12] сообщается, что реализованы решетки ССДИ с коэффициентом перекрытия по частоте более чем 50:1 (без сканирования) и 42:1 (при сканировании в секторе углов до $\pm 60^\circ$ в *E*- и *H*-плоскостях). При этом используется частотно-избирательная поверхность внутри подложки, которая действует как многокаскадный режекторный фильтр для устранения интерференции волн над экраном.

Часто при проектировании коммерческих антенных решеток ССДИ приходится удовлетворять специальным требованиям. Например, в [13] проектируемая АР соответствовала требованиям систем 2G/3G/4G. В [14, 15] широкополосные планарные АР предназначались для систем 5G, причем со сканированием под низким углом [15].

В настоящей работе рассматривается модель низкопрофильной двухполяризационной антенной решетки ССДИ планарного типа для работы в С-Х диапазонах 4÷12 ГГц со сканированием в секторе углов 30° в двух главных плоскостях. Излучатели имеют высоту 5,63мм и увеличенный до 12мм поперечный размер. Это позволяет учесть специальные конструктивные требования схемы питания элементов решетки, в частности, размер поперечного сечения ППМ. Частотно-селективные структуры и метаповерхности не использовались, т.к. большое перекрытие по частоте и широкоугольное сканирование не задавалось.

1. Модель и характеристики излучателя ССДИ в составе бесконечной решетки

Модель единичной ячейки предлагаемой двухполяризационной решетки показана на рис.1. Она состоит из перфорированной четырехслойной подложки,

диполей, металлической емкостной пластины квадратного сечения и трех внешних согласующих слоев без перфорации. Слои служат обтекателем АР. Емкостная пластина толщиной 70мкм обеспечивает связь соседних плеч диполей и обрезана по контуру перфорации подложек.

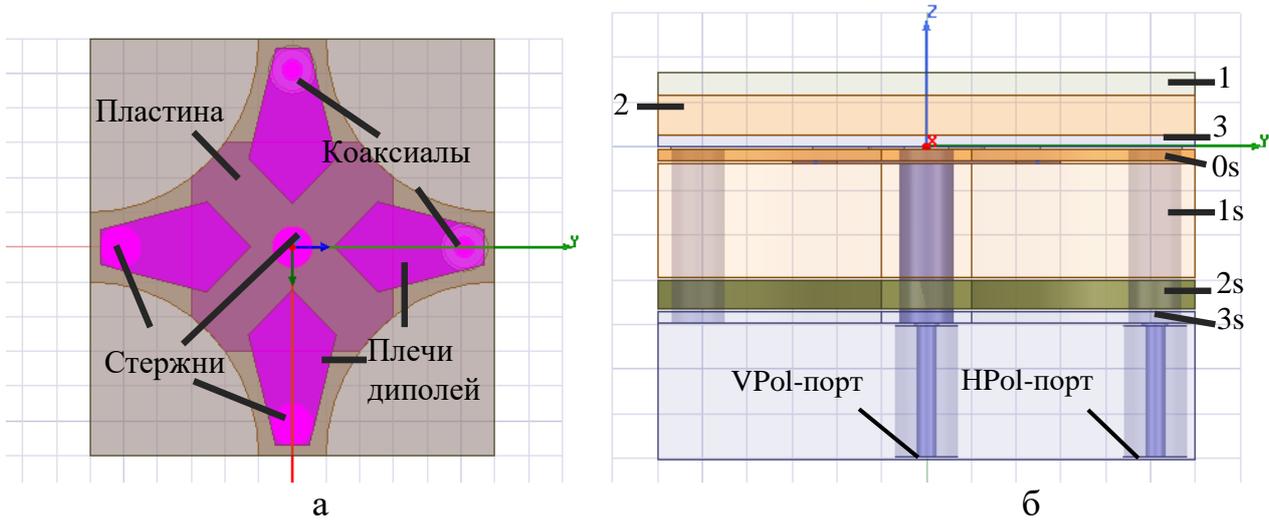


Рис.1. Единичная ячейка решетки: (а) вид сверху; (б) поперечное сечение.

В качестве тонкой подложки между диполями и емкостной пластиной выбран материал Rogers RO3003™ толщиной 0,254мм (рис.1б, слой 0s). Три нижних подложки 1s, 2s, 3s (рис.1б, слои 1s, 2s, 3s) выполнены из материала Rogers RT/duroid 5880LZ толщиной 2,54мм, 0,64мм и 0,254мм, соответственно.

Для улучшения согласования все четыре подложки излучателя перфорируются (в пространстве между плеч диполей) одинаковыми отверстиями радиусом 5мм и разделяются клеевыми прослойками толщиной 70мкм. Все подложки также содержат 4 отверстия диаметром 1,2мм, через которые проходят металлические штыри двух каналов коаксиального питания плеч диполей (без применения симметрирующих трансформаторов). Каждая емкостная пластина нагружена на металлический штырь диаметром 1,2мм.

Внешние согласующие слои выполнены из разных материалов. Верхний слой 3 – Rogers RO3210™ толщиной 0,508 мм; средний слой 2 – Rohacell ($\epsilon=1,26$; $tg\delta=0,0016$) толщиной 0,9мм; нижний слой 1 – Rogers RT/duroid 6006™ толщиной 0,254мм. Металлическая поверхность ППМ служит нижней частью канала Флоке с двумя коаксиальными входами питания (50 Ом).

Моделирование элементарной ячейки АР выполнялось в HFSS с помощью периодических граничных условий [16]. Оптимизировались форма плеч диполей, ширина зазоров связи между соседними диполями, форма емкостной пластины, толщины слоев подложки и согласующих слоев. Это позволило получить желаемую полосу частот и простую, сравнительно дешевую в изготовлении конструкцию ячейки АР, отличающуюся увеличенным периодом и малой высотой.

В результате оптимизации период решетки возрос до 12мм ($0,48\lambda_v$), продольный размер диполей – до 9,525мм ($0,127\lambda_n$, $0,381\lambda_v$), ширина емкостных зазоров между диполями – до 1,75мм, где λ_n , λ_v – длины волн на нижней (4 ГГц) и верхней (12 ГГц) рабочих частотах. Высота диполей относительно экрана – 3,968мм ($0,053\lambda_n$, $0,159\lambda_v$), полная высота ССДИ – 5,63мм ($0,075\lambda_n$, $0,225\lambda_v$).

Характеристики согласования излучателя в составе бесконечной АР рассчитывались в полосе от 3 до 14 ГГц. На рис.2 и рис.3 изображены частотные характеристики (ЧХ) коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и развязки между двумя ортогональными портами VPol (на оси x) и HPol (на оси y) в режимах без сканирования и со сканированием на угол $\theta_0 = \pm 30^\circ$ в главных плоскостях.

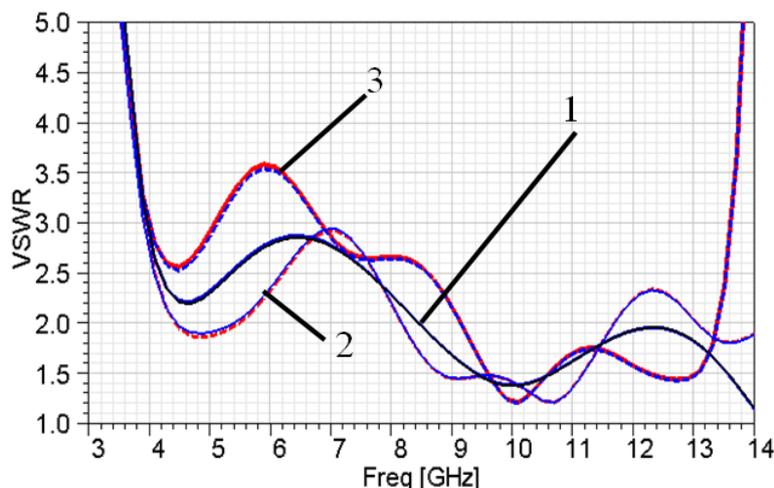


Рис.2. КСВН: 1 – без сканирования, 2 – плоскость E , $\theta_0=30^\circ$; 3 – плоскость H , $\theta_0=30^\circ$.

Излучатель обеспечивает КСВН $< 2,9$ без сканирования и КСВН $< 3,6$ при сканировании в диапазоне частот от 4 до 12 ГГц. Относительно высокий КСВН – это компромисс между простотой модели, низким профилем, увеличенным поперечным размером излучателя и требованием к его согласованию. Как и у других ССДИ [17], более согласованное сканирование наблюдается в E -плоскости. Развязка между портами при сканировании не хуже 8–10дБ в полосе от 3,5 до 14 ГГц (рис.3).

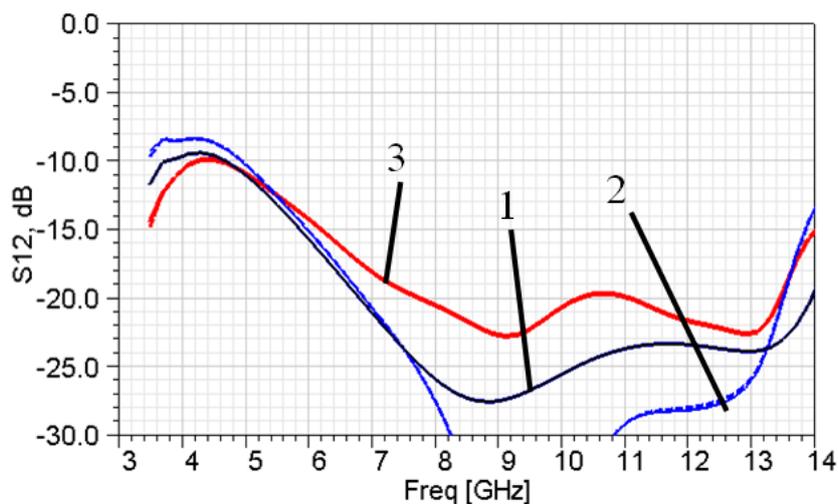


Рис.3. Развязка портов: 1 – без сканирования; 2 – плоскость E , $\theta_0=30^\circ$; 3 – плоскость H , $\theta_0=30^\circ$.

2. Характеристики излучения конечной антенной решетки

Ниже приведены некоторые характеристики излучения конечной (без учета краевых эффектов) антенной решетки, состоящей из 20 элементов по оси y и 5 элементов по оси x . Размер апертуры АР – 240×60мм.

Реализованный коэффициент усиления (КУ) антенны на ко-поляризации составил от 12 до 23 дБ в полосе 4÷12 ГГц при сканировании на угол 30° в главных плоскостях (рис.4). При этом уровень кросс-поляризации – меньше 12–17дБ в полосе 5÷14 ГГц (линии 4, 5 на рис.4). Эффективность излучения – больше 98% (рис.5). Примеры диаграмм направленности в плоскости yoz конечной синфазной решетки и АР при сканировании на угол 30° в этой плоскости на ко- и кросс-поляризациях представлены на рис.6. Видим, что уровень кросс-поляризации мал в широком угловом секторе.

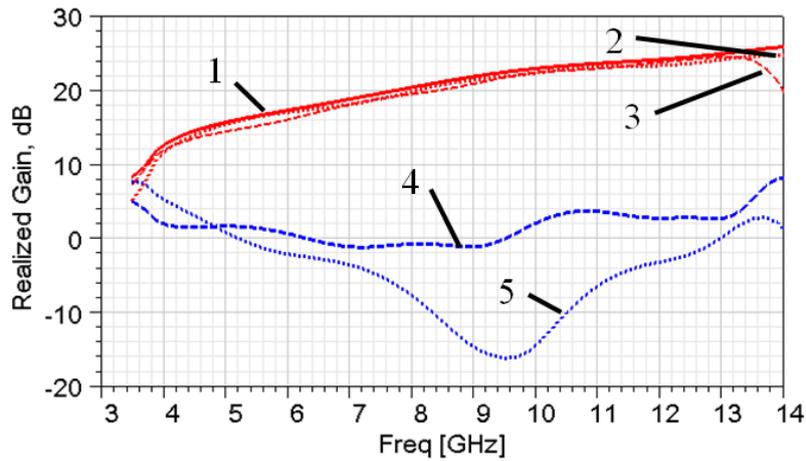


Рис.4. Реализованный КУ конечной решетки ($\theta_0=30^\circ$) на ко-поляризации (1 – без сканирования, 2 – плоскость E , 3 – плоскость H) и кросс-поляризации (4 – плоскость H ; 5 – плоскость E).

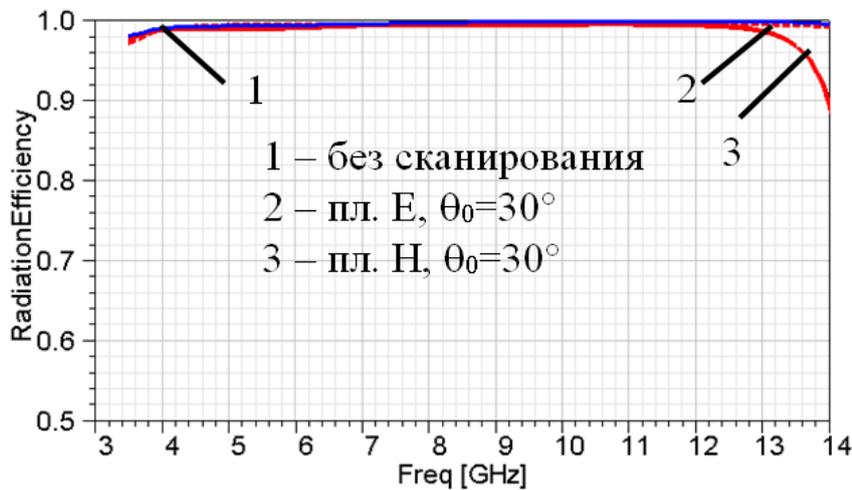


Рис.5. Эффективность излучения антенной решетки при сканировании.

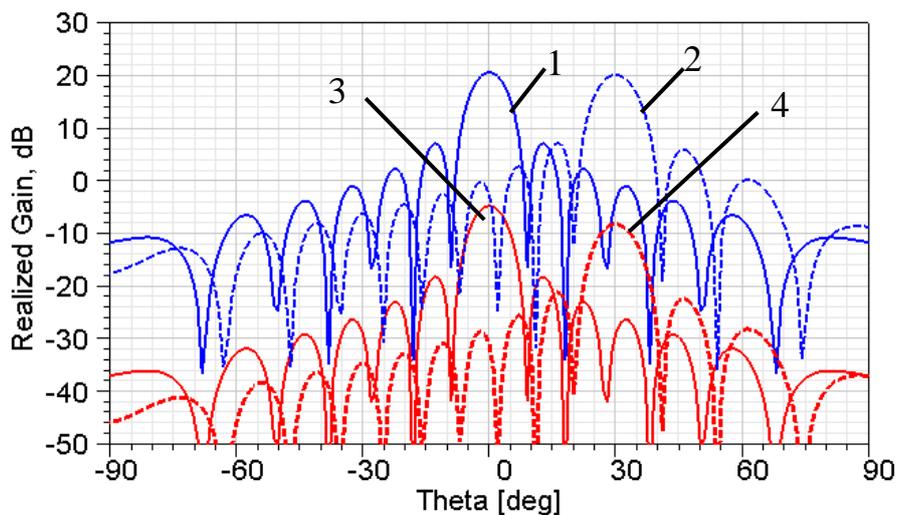


Рис.6. Диаграммы направленности решетки в плоскости yoz на частоте 8,1 ГГц на ко-поляризации (1 – без сканирования, 2 – $\theta_0=30^\circ$) и кросс-поляризации (3 – без сканирования, 4 – $\theta_0=30^\circ$).

Заключение

Рассмотрена модель сверхширокополосной двухполяризационной антенной решетки сильно связанных дипольных излучателей для работы в диапазонах 4÷12 ГГц. В отличие от известных низкопрофильных модульных АР предлагаемая решетка отличается более простой конструкцией, увеличенным до 12мм поперечным размером излучателей, малой высотой 5,63мм. Увеличенный период решетки позволяет учесть специальные конструктивные требования схемы питания элементов решетки, в частности, размер поперечного сечения приемо-передающего модуля. Внешние согласующие слои не имеют перфорации и могут служить обтекателем АР.

Излучатели обеспечивают КСВН<2,9 без сканирования и КСВН<3,6 при сканировании на угол $\pm 30^\circ$ в главных плоскостях в полосе 4÷12 ГГц; развязка между портами – не хуже 8–10дБ; реализованный КУ антенны на ко-поляризации меняется от 12 до 23 дБ; эффективность излучения – больше 98%; уровень кросс-поляризации – меньше 12–17дБ в полосе 5÷14 ГГц.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета по гранту Российского научного фонда - проект № 16-19-10537-П.

Литература

1. Munk B., et al. A low-profile broadband phased array antenna // IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp. June 2003. Vol.2. P.448–451.
2. Livingston S., Lee J.J. Evolution of Wide Band Array Designs // 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). Spokane. WA. USA. 2011. P.1957-1960.
3. Zhou W., Chen Y., Yang S. Efficient Design of Tightly Coupled Dipole Array Using an Equivalent Circuit-Based Approach // IEEE Access. 2020. Vol.8, P.14013-14023.

4. Li M., Chen A., An K. A Low-Profile Tightly Coupled UWB Array Antenna // 2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES). Nanjing. China. 2019. P.1-2.
5. Zhang Z., Huang M., Chen Y., Qu S., Hu J., Yang S. In-Band Scattering Control of Ultra-Wideband Tightly Coupled Dipole Arrays Based on Polarization Selective Metamaterial Absorber // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2020 (Early Access).
6. Carvalho M., Johnson A.D., Alwan E.A., Volakis J.L. Frequency Selective Surface Network for In-Phase Ground Plane Reflections in Tightly Coupled Dipole Arrays // 2020 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). Monterey. CA. USA. 2020. P.1-2.
7. Moulder W.F., Sertel K., Volakis J.L. Superstrate-Enhanced Ultrawideband Tightly Coupled Array With Resistive FSS // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Sept. 2012. Vol.60. No.9. P.4166-4172.
8. Kim S., Nam S. Design of TCDA Avoiding Half-wavelength Limitation Using PC // 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen. Denmark. 2020. P.1-4.
9. Johnson A.D., Venkatakrisnan S.B., Alwan E.A., Volakis J.L. Balanced Wideband Impedance Transformer (BWIT) for Common-Mode Resonance Cancellation in UWB Dipoles over a Ground Plane // 2020 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). Monterey. CA. USA. 2020. P.1-2.
10. Hu C. et al. A Wide-Band Self-Complementary Tightly-Coupled Dipole Array With $\pm 80^\circ$ Scanning Range in the E Plane // IEEE Access. 2020. Vol.8. P.151316-151324.
11. Bah A.O., Bird T.S., Qin P. A Low Profile Tightly Coupled Antenna Array with 80° Scanning for Multifunctional Applications // 2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST). Waltham. MA USA. 2019. P.1-4.

12. Johnson A.D., Alwan E.A., Volakis J.L. Low Angle Scanning Phased Arrays With Greater Than 50:1 Bandwidth // 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Atlanta. GA. USA. 2019. P.1215-1216.
13. Dai Z., Zhou Y., Wang J. Design of a Broadband Base Station Antenna Based on Tightly Coupled Structure // 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM). Shanghai. China. 2019. P.1-3.
14. Hussain S., Qu S., Zhou W., Zhang P., Yang S. Design and Fabrication of Wideband Dual-Polarized Dipole Array for 5G Wireless Systems // IEEE Access. 2020. Vol.8. P.65155-65163,
15. Johnson A.D., Alwan E.A., Volakis J.L. UWB Differential Millimeter-Wave Phased Array // 2019 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). Miami. FL. USA. 2019. P.44-46.
16. Ansys HFSS: 3D Electromagnetic Field Simulator for RF and Wireless Design // <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> (Accessed on: 29.07.2020).
17. 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. Feb. 2018. Vol.66. No.2. P.692-701.

Для цитирования:

Семенихин А.И., Семенихина Д.В., Юханов Ю.В. Низкопрофильная двухполяризационная антенная решетка сильно связанных диполей С-Х-диапазонов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.6>