

НИЗКОПРОФИЛЬНАЯ ПЛОСКАЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА

Во Ба Аю, Ю. В. Юханов

Рассмотрена конструкция низкопрофильной плоской сверхширокополосной антенной решетки. Основным элементом конструкции являются скрещенные диполи, напечатанные на подложке из стеклотекстолита толщиной 1 мм. Для обеспечения емкостной связи между элементами решетки применены металлические диски, гальванически соединенные с основанием. Уменьшение длины симметрирующего трансформатора было достигнуто путем придания ему формы затухающего колебания, что позволило уменьшить высоту профиля антенной решетки. Представлены результаты численного исследования характеристик элементарной ячейки антенной решетки с периодическими граничными условиями на гранях. Приведены зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению от частоты для элемента антенной решетки при различных формах симметрирующего трансформатора. Исследовано влияние симметрирующего трансформатора на характеристики элемента антенной решетки при различных значениях частоты затухающих колебаний и коэффициента затухания, определяющих форму полосковой линии передачи в составе симметрирующего трансформатора. Показаны зависимости эффективности излучения от частоты и коэффициент усиления элемента предлагаемой антенной решетки. Предложенная конструкция элемента антенной решетки имеет высоту профиля 0,18 длины волны на нижней частоте рабочего диапазона частот, при этом коэффициент стоячей волны по напряжению не превышает 2-х в полосе частот от 0,5 до 2,1 ГГц (4,2:1).

Ключевые слова: антенная решетка, дипольные антенны, излучатели, полосковые линии передачи, симметрирующий трансформатор.

Введение

Системы связи становятся все более мобильными и требуют недорогих низкопрофильных антенн, которые охватывают сразу несколько диапазонов и могут быть легко интегрированы с платформами. Антенны в этих системах должны работать в широких диапазонах с двойной поляризацией и низкой кросс-поляризацией при широких углах сканирования [1].

Плоская сверхширокополосная модульная антенна (ПСШМА) была разработана и широко применяется благодаря несложной конструкции для удобной сборки и простого изготовления [2 – 5]. При этом конструкция ПСШМА сохраняет эффективные широкополосные электрические характеристики без использования сложных симметрирующих трансформаторов и подключается напрямую к коаксиальным кабелям с характеристическим сопротивлением 50 Ом.

Для разработки ПСШМА были предложены различные конструкции. Например, в [6] измерение и моделирование предполагают работу антенной решетки (АР) в диапазоне частот с перекрытием 10:1 (1,2 – 12 ГГц) с возможностью сканирования луча до 45° для решения проблемы деградации кросс-поляризации АР Вивальди. При этом высота профиля АР составляет 2,5λ на нижней частоте рабочего диапазона длин волн. Более коротким

элементом АР, по сравнению с элементом Вивальди, является излучатель, известный как «заячьи уши» (bunny-ear). Однако в АР таких излучателей уровень кросс-поляризации уменьшается примерно до –10 дБ при угле сканирования ±50° [7].

Компактные дипольные АР с соотношением полосы пропускания 5,4:1 и углом сканирования 45° для работы в ультравысокочастотном диапазоне уже разработаны в [8], но они также имеют высокий профиль (более 0,66λ на нижней частоте рабочего диапазона длин волн).

В данной статье представлена низкопрофильная плоская сверхширокополосная антенная решетка, работающая в диапазоне частот 500 – 2100 МГц. При этом достигнуто уменьшение высоты профиля АР за счет укорочения распределенного симметрирующего трансформатора. Таким образом, достигается уменьшение высоты профиля всей АР.

Конструкция элемента антенной решетки

На рис. 1 показана конструкция предлагаемого низкопрофильного элемента АР, который состоит из четырех скрещенных диполей в печатном исполнении 1, симметрирующих трансформаторов 2, диэлектрического слоя над диполями – суперстрата 3 и металлического основания 4.

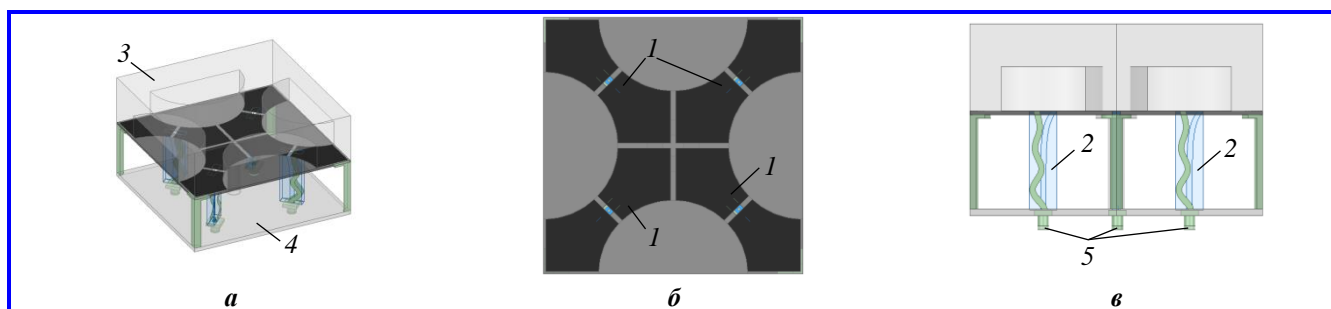


Рис. 1. Элемент низкопрофильной плоской сверхширокополосной антенной решетки:
а – общий вид; б – вид сверху; в – вид сбоку

Питание элемента разработанной АР осуществляется снизу при помощи четырех коаксиальных соединителей 5 через симметрирующие трансформаторы 2. Жилы 6 (рис. 2, а) коаксиальных соединителей 5 подсоединяются к полосковым линиям передачи 7, расположенным на внутренних слоях симметрирующих трансформаторов и припаиваются к одному из плеч диполей 1. Корпуса коаксиальных соединителей аналогичным образом подпаиваются к металлизированным слоям 8 на внешних поверхностях симметрирующих трансформаторов, которые соединяются с другими плечами диполей.

В отличие от традиционной конструкции симметрирующего трансформатора в предлагаемом трансформаторе (см. рис. 2, а, б) применяется полосковая линия передачи в форме затухающего колебания. В результате это позволяет осуществлять более плавную трансформацию сопротивления и обеспечить лучшее согласование. Форма и размер симметрирующего трансформатора оказывают большое влияние на характеристики антенны.

Для обеспечения емкостной связи между элементами АР в конструкцию были добавлены металлические диски, которые гальванически соединены с основанием через металлические стержни.

Расширить полосу рабочих частот и улучшить характеристики излучения АР удалось путем размещения непосредственно над диполями согласующего слоя (суперстрата) из органического стекла с диэлектрическими параметрами ($\epsilon_r = 3,5$, $\tan(\delta) = 0,004$), электрическая толщина которого составила $\lambda/4$ на центральной частоте рабочего диапазона длин волн [9].

Результаты численного исследования характеристик антенной решетки

Проектирование и разработка предлагаемой АР выполнялись при помощи программного обеспечения *Ansys HFSS*. Рассчитывались характеристики одной ячейки АР с периодическими граничными условиями на гранях. Таким образом, далее приводятся характеристики одной ячейки в составе АР бесконечных размеров, в которой не учитываются эффекты конкатенации АР.

На рис. 3 показаны зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) от частоты для различных форм полосковой линии передачи в составе симметрирующего трансформатора. Из анализа результатов можно сделать вывод, что применяемая форма полосковой линии передачи в виде затухающего колебания обеспечивает лучшее согласование и лучший КСВН в диапазоне рабочих длин волн. Но в то же время это приводит к уменьшению верхней граничной частоты.

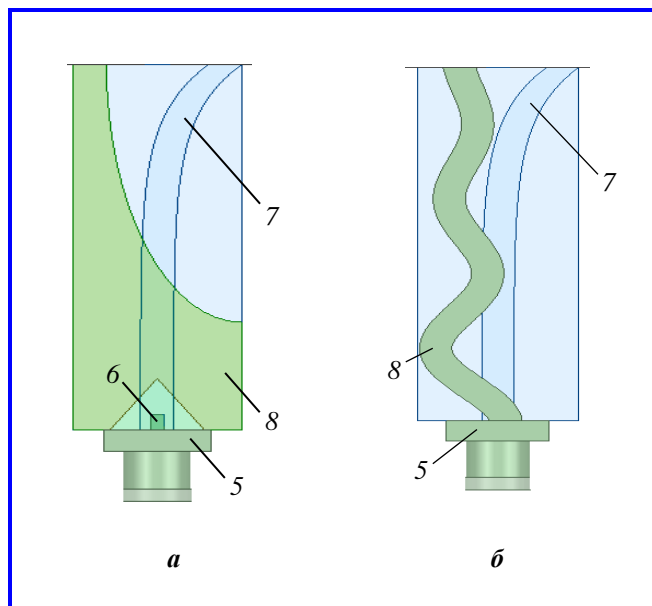


Рис. 2. Конструкция симметрирующего трансформатора: а – прототип; б – предлагаемый вариант

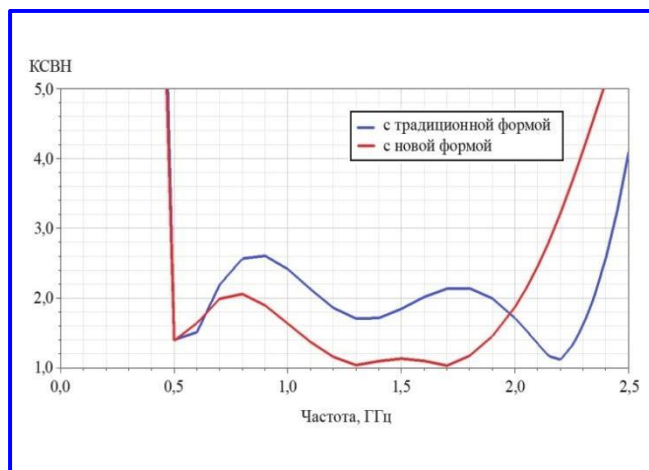


Рис. 3. Влияние формы симметрирующего трансформатора на характеристики антенной решетки

На рис. 4 показаны зависимости КСВН от частоты для различных значений частоты затухающих колебаний (T) и коэффициента затухания (β), определяющих форму полосковой линии передачи в составе симметрирующего трансформатора. Видно, что изменение КСВН является незначительным, в соответствии с критерием КСВН, менее 2-х в пределах рабочего диапазона длин волн при изменении параметров полосковой линии передачи.

На рис. 5 показана зависимость эффективности излучения от частоты. Эффективность излучения более 70% получена в диапазоне частот от 0,5 до 2,1 ГГц (4,2:1).

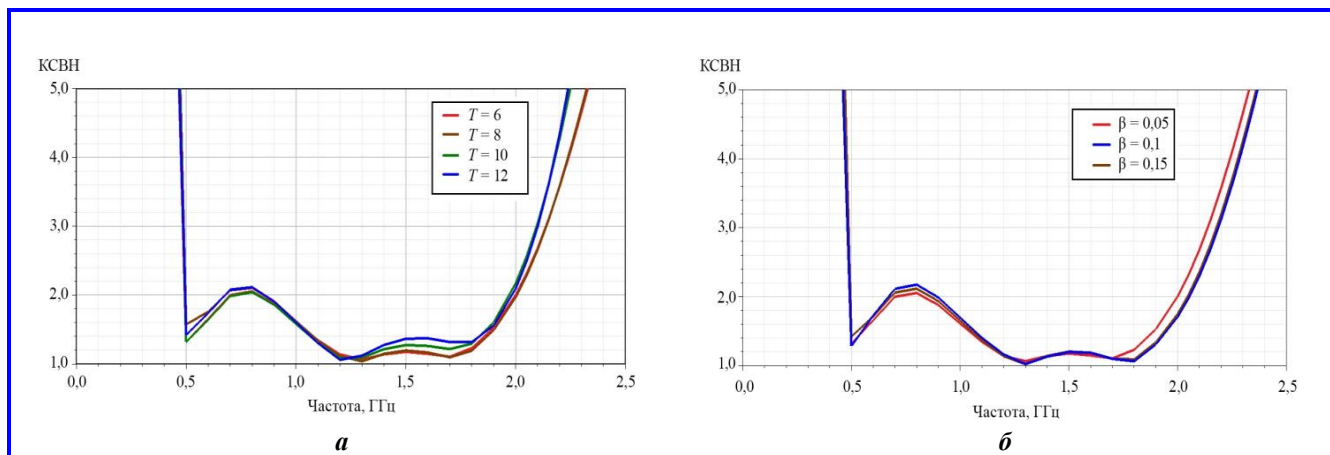


Рис. 4. Влияние параметров симметрирующего трансформатора на характеристики антенной решетки. Зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению элемента антенной решетки от частоты при изменении периода затухающего колебания (а) и при изменении коэффициента затухания (б)

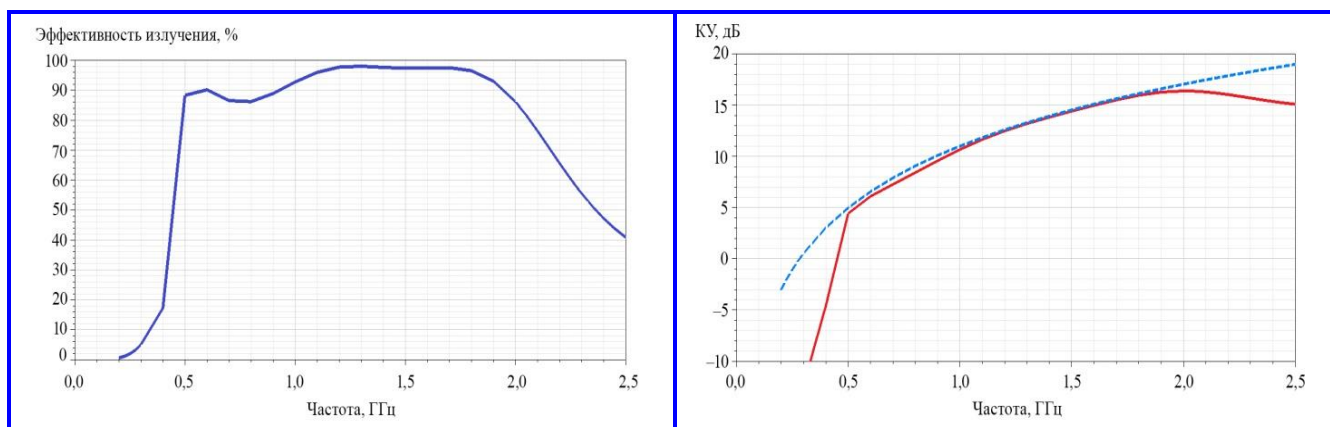


Рис. 5. Эффективность излучения элемента предлагаемой антенной решетки

Рис. 6. Реализованный коэффициент усиления элемента антенной решетки

На рис. 6 представлен реализованный коэффициент усиления (КУ) элемента предложенной АР в сравнении с теоретически возможным коэффициентом усиления апертуры аналогичного размера. Из графика видно, что мощность, подаваемая на вход элемента антенной решетки, эффективно излучается в свободное пространство без перехода в потери.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-19-00537 «Анализ и синтез отражателей и антенн на основе анизотропных импедансных структур и метаповерхностей с заданными характеристиками излучения и рассеяния» (Российский научный фонд : [сайт]. URL : <https://rscf.ru/project/22-19-00537/>).

Заключение

В работе предложена низкопрофильная плоская сверхширокополосная антенная решетка. Результаты измерений демонстрируют коэффициент стоячей волны менее 2-х в диапазоне частот от 0,5 до 2,1 ГГц. Кроме того, предложенная АР отличается более компактными и низкопрофильными параметрами в сравнении с существующими аналогами. Результаты моделирования подтвердили, что ее технические характеристики полностью соответствуют требованиям для систем связи.

Литература

1. Low-profile and wide-angle scanning planar ultrawide-band modular antenna with ultra-thin loading window / Q. Xin, C. Zhenxin, Z. Huaimin [et al.]. – DOI : 10.1109/ACCESS.2022.3211393 // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 105556–105563.
2. A review of planar ultrawideband modular antenna (PUMA) arrays / J. T. Logan, S. S. Holland, D. H. Schaubert [et al.] // 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory ; IEEE ; 20 – 24 May 2013. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6565879> (дата обращения: 12.02.2025).
3. A low-profile broadband phased array antenna / B. Munk, R. Taylor, T. Durham [et al.]. – DOI : 10.1109/

- APS.2003.1219272 // Conference: Antennas and propagation society international symposium, 2003 ; IEEE Xplore. – 2003. – Vol. 2. – P. 448–451.
4. Lee, J. J. A low profile 10:1 (200 – 2000 MHz) wide band long slot array / J. J. Lee, S. Livingston, D. Nagata. – DOI : 10.1109/APS.2008.4619302 // Conference: Antennas and propagation society international symposium, 2008 ; IEEE Xplore. – August 2008.
5. Neto, A. Ultrawide-band properties of long slot arrays / A. Neto, J. J. Lee. – DOI : 10.1109/TAP.2005.863140 // IEEE transactions on antennas and propagation ; IEEE. – 2006. – Vol. 54. – Issue 2. – P. 534–543.
6. Patent 2012/0146869 United States. Planar ultrawideband modular antenna array : US 20120146869A1 : 14.06.2012 / S. S. Holland, M. N. Vouvakis ; University of Massachusetts Amherst, Boston, MA, United States.
7. Logan, J. T. Low cross-polarization ultra-wideband arrays (student submission) / J. T. Logan, M. N. Vouvakis. – DOI : 10.1109/ARRAY.2016.7832625 // 2016 IEEE International symposium on phased array systems and technology (PAST). – 2016.
8. Lee, J. J. A low-profile wide-band (5:1) dual-pol array / J. J. Lee, S. Livingston, R. Koenig. – DOI : 10.1109/LAWP.2003.812243 // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2005. – Vol. 2. – P. 46–49.
9. Merola, C. UHF planar ultra-wideband modular antenna (PUMA) arrays / C. Merola, M. N. Vouvakis. – DOI : 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072944 // Conference: 2017 IEEE International symposium on antennas and propagation & USNC/URSI National radio science meeting. – 2017.
10. Holland, S. S. The planar ultrawideband modular antenna (PUMA) array / S. S. Holland, M. N. Vouvakis. – DOI : 10.1109/TAP. 2011.2167916 // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2012. – Vol. 60. – Issue 1. – P. 130–140.

Поступила в редакцию 09.04.2025

Во Ба Ау, аспирант, e-mail: bvo@sfnu.ru.
Юрий Владимирович Юханов, доктор технических наук, профессор,
 заведующий кафедрой антенн и радиопередающих устройств,
 т. 8 (863) 437-16-34, e-mail: yu_yukhanov@mail.ru.
 (Южный федеральный университет).

LOW-PROFILE PLANAR ULTRA-WIDEBAND ANTENNA ARRAY

Vo Ba Au, Yu. V. Yukhanov

The design of a low-profile, planar, ultra-wideband antenna array is considered. The main structural element is crossed dipoles printed on a 1 mm thick fiberglass substrate. To provide capacitive coupling between the array elements, metal disks galvanically connected to the ground plane are used. The length of the balun was reduced by shaping it as a damped oscillation, which made it possible to lower the profile height of the antenna array. The results of a numerical study of the characteristics of an elementary cell of the antenna array with periodic boundary conditions on the edges are presented. The voltage standing wave ratio versus frequency for the array element with various balun shapes is provided. The influence of the balun on the characteristics of the array element is studied for different values of the damped oscillation frequency and damping factor, which define the shape of the strip transmission line within the balun structure. The dependencies of radiation efficiency and gain on frequency for the proposed antenna array element are shown. The proposed antenna array element design has a profile height of 0,18 wavelengths at the lower end of the operating frequency band, while the voltage standing wave ratio does not exceed 2 within the frequency range from 0,5 to 2,1 GHz (4.2:1 ratio).

Key words: antenna array, dipole antennas, radiators, strip transmission lines, balun.

References

1. Low-profile and wide-angle scanning planar ultrawide-band modular antenna with ultra-thin loading window / Q. Xin, C. Zhenxin, Z. Huaimin [et al.]. – DOI : 10.1109/ACCESS.2022.3211393 // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 105556–105563.
2. A review of planar ultrawideband modular antenna (PUMA) arrays / J. T. Logan, S. S. Holland, D. H. Schaubert [et al.] // 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory ; IEEE ; 20 – 24 May 2013. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6565879> (date of access : 12.02.2025).
3. A low-profile broadband phased array antenna / B. Munk, R. Taylor, T. Durham [et al.]. – DOI : 10.1109/APS.2003.1219272 // Conference: Antennas and propagation society international symposium, 2003 ; IEEE Xplore. – 2003. – Vol. 2. – P. 448–451.
4. Lee, J. J. A low profile 10:1 (200 – 2000 MHz) wide band long slot array / J. J. Lee, S. Livingston, D. Nagata. – DOI : 10.1109/APS.2008.4619302 // Conference: Antennas and propagation society international symposium, 2008 ; IEEE Xplore. – August 2008.
5. Neto, A. Ultrawide-band properties of long slot arrays / A. Neto, J. J. Lee. – DOI : 10.1109/TAP.2005.863140 // IEEE transactions on antennas and propagation ; IEEE. – 2006. – Vol. 54. – Issue 2. – P. 534–543.
6. Patent 2012/0146869 United States. Planar ultrawideband modular antenna array : US 20120146869A1 : 14.06.2012 / S. S. Holland, M. N. Vouvakis ; University of Massachusetts Amherst, Boston, MA, United States.

7. Logan, J. T. Low cross-polarization ultra-wideband arrays (student submission) / J. T. Logan, M. N. Vouvakis. – DOI : 10.1109/ARRAY.2016.7832625 // 2016 IEEE International symposium on phased array systems and technology (PAST). – 2016.
8. Lee, J. J. A low-profile wide-band (5:1) dual-pol array / J. J. Lee, S. Livingston, R. Koenig. – DOI : 10.1109/LAWP.2003.812243 // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2005. – Vol. 2. – P. 46–49.
9. Merola, C. UHF planar ultra-wideband modular antenna (PUMA) arrays / C. Merola, M. N. Vouvakis. – DOI : 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072944 // Conference: 2017 IEEE International symposium on antennas and propagation & USNC/URSI National radio science meeting. – 2017.
10. Holland, S. S. The planar ultrawideband modular antenna (PUMA) array / S. S. Holland, M. N. Vouvakis. – DOI : 10.1109/TAP. 2011.2167916 // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2012. – Vol. 60. – Issue 1. – P. 130–140.

Vo Ba Au, postgraduate student, e-mail: bvo@sfedu.ru.
Yuriy Vladimirovich Yukhanov, doctor of technical sciences, professor,
head of the department of antenna and radio transmitter,
t. +7 (863) 437-16-34, e-mail: yu_yukhanov@mail.ru.
(Southern Federal University).