

СИНТЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА ОСНОВЕ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН ДЛЯ СИСТЕМ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА СТАНДАРТА IEEE802.11, IEEE802.16

О. А. Белоусов, Р. Ю. Курносков, П. А. Горшков, А. Г. Рязанова

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; jjour314@gmail.com*

Ключевые слова: диаграмма направленности; коэффициент стоячей волны; логопериодическая вибраторная антенна; стандарты беспроводного широкополосного доступа; цилиндрические фазированные антенные решетки.

Аннотация: Рассмотрена методика синтеза цилиндрической фазированной антенной решетки на основе логопериодических вибраторных излучателей для стандартов беспроводного широкополосного доступа IEEE802.11, IEEE802.16.

Современное развитие систем беспроводного широкополосного доступа повлекло увеличение диапазонов, отводимых для данных систем, совершенствование новых спецификаций стандартов IEEE802.11, IEEE802.16, разработку и внедрение сложных антенных системы и соответствующих методов обработки сигналов [1, 2]. В связи с этим предъявляются повышенные требования к окончательному оборудованию, в частности антенным системам. Поэтому применение эффективных антенн с хорошими массогабаритными и электродинамическими характеристиками позволит существенно расширить частотные диапазоны и зону покрытия сервисов, а также увеличить их пропускную способность.

Для решения поставленной задачи необходимо использовать антенные системы на основе антенных решеток и излучателей, работающих в широкой полосе частот и имеющих достаточный коэффициент усиления и коэффициент направленного действия (КНД).

Под данные критерии попадают антенные решетки (АР) на основе вибраторных излучателей, в частности логопериодические вибраторные антенны, которые имеют хорошие электродинамические характеристики в полосе частот, отводимых для систем беспроводного широкополосного доступа.

Логопериодическая вибраторная антенна (ЛПВА) – широкополосная направленная антенна, работающая в десятикратном и более широком диапазоне волн. По коэффициенту усиления антенна эквивалентна трех-четырёхэлементной антенне типа «волновой канал» и состоит из ряда параллельных вибраторов, подключенных к двухпроводной линии с последовательной переполюсовкой точек питания вибраторов, длины которых и расстояния между ними убывают в геометрической прогрессии в направлении к точкам подключения фидера. Позади самого длинного вибратора устанавливают короткозамыкающую перемычку, улучшающую согласование антенны с фидером и обеспечивающую симметрирование [3].

Для синтеза ЛПВА и впоследствии АР необходим расчет диаграммы направленности (ДН), входного сопротивления, коэффициента стоячей волны (КСВ)

и КНД. Форма ДН полностью определяет важнейшую энергетическую характеристику антенны – КНД. Воспользуемся выражением для КНД [1]

$$\text{КНД}(\Theta, \varphi) = |E(\Theta, \varphi)|^2 / |E_{\text{ср}}|^2, \quad (1)$$

где $|E(\Theta, \varphi)|^2$ – квадрат модуля полного вектора напряженности электрического поля в заданном направлении (Θ, φ) ; $|E_{\text{ср}}|^2$ – усредненное по полному телесному углу значение квадрата модуля полного вектора напряженности электрического поля.

Величину $|E_{\text{ср}}|^2$ свяжем с полной мощностью P_{Σ} , излучаемой антенной:

$$4\pi r^2 |E_{\text{ср}}|^2 / 2 = 120\pi P_{\Sigma}.$$

В свою очередь P_{Σ} в отсутствие потерь выразим через ток I на входе антенны и активную составляющую $Z_{\text{вх}}$ входного сопротивления:

$$P_{\Sigma} = I^2 \operatorname{Re} Z_{\text{вх}} / 2.$$

В этом случае выражение для КНД принимает вид

$$\text{КНД}(\Theta, \varphi) = r^2 |E(\Theta, \varphi)|^2 / (30I^2 \operatorname{Re} Z_{\text{вх}}). \quad (2)$$

Вынесем за знак модуля квадрат множителя $1/r$, который всегда присутствует в выражении для $E(\Theta, \varphi)$, и учтем, что в данном случае ток на входе антенны равен 1 А. Получим расчетное выражение для КНД по отношению к ненаправленному (изотропному) излучателю

$$\text{КНД}(\Theta, \varphi) = \frac{|f(\Theta, \varphi)|^2}{30 \operatorname{Re} Z_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

где $f(\Theta, \varphi)$ – ненормированная ДН.

Выражение для ненормированной ДН ЛПВА не зависит от выбора системы базисных функций и имеет вид ДН антенной решетки

$$f(\Theta, \varphi) = 60 \sum_{n=1}^N f_n(\Theta, \varphi) \exp(-ikl_n \sin \Theta \sin \varphi), \quad (4)$$

где $f_n(\Theta, \varphi)$ – ДН n -го вибратора антенны.

Выражение ДН одиночного вибратора полностью определяется выбранным законом распределения тока по вибратору. Для синусоидального приближения

$$f(\Theta, \varphi) = I_n \frac{\cos(kh_n \sin \Theta \cos \varphi - \cos kh_n)}{\sin kh_n \sqrt{1 - (\sin \Theta \cos \varphi)^2}}. \quad (5)$$

где k – коэффициент фазы; h_n – длина плеча n -го вибратора.

Диаграмма направленности вибратора с трехчленным законом распределения тока выражается формулой

$$f(\Theta, \varphi) = \sin \gamma \left\{ I_n^1 \frac{\cos \gamma [1 - \cos kh_n \cos(kh_n \cos \gamma)] - \sin kh_n \cos \gamma}{\sin^2 \gamma \cos \gamma} + \right. \\ \left. + I_n^2 \frac{\cos \gamma \sin kh_n \cos(kh_n \cos \gamma) - \cos kh_n \sin(kh_n \cos \gamma)}{\sin^2 \gamma \cos \gamma} + \right. \\ \left. + I_n^3 \frac{2 \cos \gamma \sin \frac{kh_n}{2} \cos(kh_n \cos \gamma) - \cos \frac{kh_n}{2} \sin(kh_n \cos \gamma)}{\cos \gamma (1 - 4 \cos^2 \gamma)} \right\}, \quad (6)$$

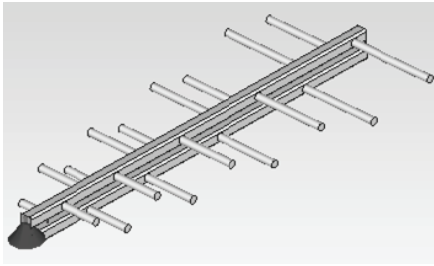


Рис. 1. Модель ЛПВА

Входное сопротивление антенны в данном случае удобно выразить через Z-параметры распределительного фидера. Отметим, что если ток на входе антенны принят равным 1 А, то входное сопротивление численно равно напряжению V_n на входе антенны:

$$Z_{\text{вх}} = V_n = Z_{NN}^{\phi} - \sum_{m=1}^N Z_{Nm}^{\phi} \sum_{\mu=1}^Q I_m^{\mu} \Phi_m^{\mu}(0), \quad (7)$$

где Z_{NN}^{ϕ} , Z_{Nm}^{ϕ} – волновые сопротивления всех излучателей и m -го соответственно.

Для синусоидального приближения (7) упрощается и принимает вид

$$Z_{\text{вх}} = Z_{NN}^{\phi} - \sum_{m=1}^N Z_{Nm}^{\phi} I_m.$$

По вышеприведенным формулам оценим характеристики ЛПВА и произведем ее моделирование (рис. 1).

Результаты моделирования показали, что антенна имеет девять пар вибраторов, средний КСВ в рабочем диапазоне составляет 1,3...1,4, максимальный КСВ в рабочем диапазоне – 1,44 (рис. 2), КНД в рабочем диапазоне – 9,3 дБ; входное сопротивление – 50 Ом, волновое сопротивление фидерной линии – 60,7 Ом.

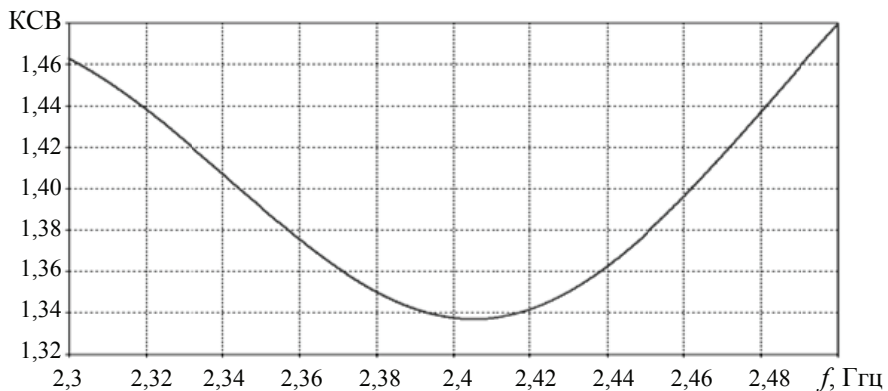


Рис. 2. Зависимость КСВ от частоты

На рисунке 3 представлена получившаяся ДН, из которой видно, что антенна имеет в горизонтальной плоскости ширину луча 60° и незначительные боковые лепестки. Это позволяет использовать данный тип антенн в составе антенной решетки.

Используя в качестве излучателя ЛПВА, построим цилиндрическую антенную решетку (ЦАР) – систему излучателей, размещенных на цилиндрической поверхности. Частным случаем цилиндрических решеток являются кольцевые (и дуговые) АР, излучатели в которых размещены по ок-

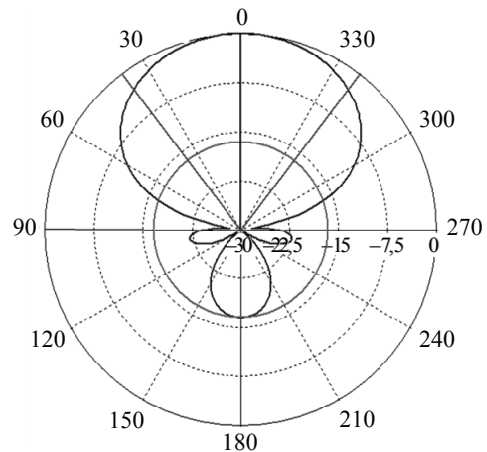


Рис. 3. Диаграмма направленности ЛПВА

ружности (или дуге). Пространственная ориентация излучателей такова, что направление максимума ДН каждого из них совпадает с направлением радиуса соответствующей антенной решетки в месте расположения излучателя [1].

Основными достоинствами цилиндрических АР являются: возможность широкоугольного (до 360°) сканирования лучом неизменных ширины и формы в азимутальной плоскости (в плоскости дуги); сканирование в угломестной плоскости (до $\pm 50^\circ$); слабая по сравнению с плоскими и линейными АР взаимная связь излучателей из-за пространственного разворота их осей; конструктивное удобство размещения выпуклых АР на ряде объектов [1].

К недостаткам следует отнести сложность системы возбуждения излучателей и некоторую избыточность их числа [1].

Диаграмма направленности кольцевой решетки в плоскости дуги при формировании луча в направлении $\theta_0 = \pi/2$, $\varphi_0 = 0$ с точностью до нормируемого множителя A может быть представлена в виде

$$F_k(\varphi) = A \int_{-\beta}^{\beta} I(\alpha) F_\alpha(\varphi) \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} R [\cos \varphi - \cos(\varphi - \alpha)]\right\} d\alpha, \quad (8)$$

где $F_k(\varphi)$ – ДН в азимутальной плоскости отдельного излучателя с координатой α ; R – радиус кольцевой АР.

Для приближенного вычисления ДН по (8) удобен метод эквивалентного линейного излучателя, заключающийся в том, что ДН кольцевой антенны рассчитывают как ДН синфазной линейной антенны, в которой амплитудное распределение соответствует проекции амплитудного распределения по кольцу (в пределах излучающего участка) на линейную антенну длиной $l_{\text{эКВ}}$, расположенную перпендикулярно направлению формируемого луча. В эквивалентной линейной антенне амплитудное распределение [1]

$$I_{\text{эКВ}}(y) = I\left(\arcsin \frac{y}{R}\right) F\left(\arcsin \frac{y}{R}\right) \frac{1}{\sqrt{R^2 - y^2}}. \quad (9)$$

С учетом этого ДН кольцевой антенны в азимутальной плоскости

$$F(\varphi) = A \int_{-y_2}^{y_2} I_{\text{эКВ}}(y) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} y \sin \varphi\right) dy, \quad (10)$$

где $y_2 = R \sin \beta$.

Область допустимых углов φ , в пределах которых можно рассчитывать ДН с погрешностью, не превышающей нескольких процентов, определяется неравенством [1]

$$|\varphi| \leq \arccos \left[1 - \frac{\lambda}{4R(1 - \cos \beta)} \right]. \quad (11)$$

Коэффициент направленного действия ЦАР будет зависеть от типа и числа излучателей на излучающем участке, расстояния между ними, а также вида амплитудно-фазового распределения на излучающем участке. Оптимальное амплитудное распределение по координате z равномерно, а по координате α существенно зависит от шага решетки и для $2\pi R/\lambda \gg 10$ при $d_\alpha < \lambda$ приближается к такому, которое при проецировании на эквивалентный линейный излучатель дает равномерное распределение [1].

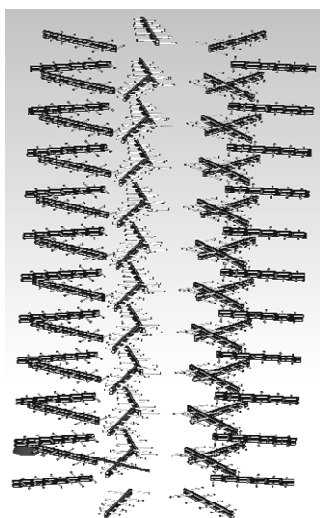


Рис. 4. Компьютерная модель ЦФАР на основе логопериодических излучателей

На основе вышеизложенного выберем в качестве объекта управления цилиндрическую АР, выполненную на базе ЛПВА.

На основе логопериодических вибраторных излучателей построим компьютерную модель цилиндрической фазированной антенной решетки (ЦФАР) (рис. 4), состоящей из шести панелей по 10 антенн в каждой (10 этажей в один ряд). Радиус данной ЦФАР примем 1 м, а расстояние между антеннами в панели – 0,07 м.

Смоделированная ЦФАР имеет коэффициент усиления главного лепестка 18 дБ. Коэффициент направленного действия составляет 20 дБ, средний КСВ в рабочем диапазоне – 1,11, максимальный КСВ – 1,35 (рис. 5).

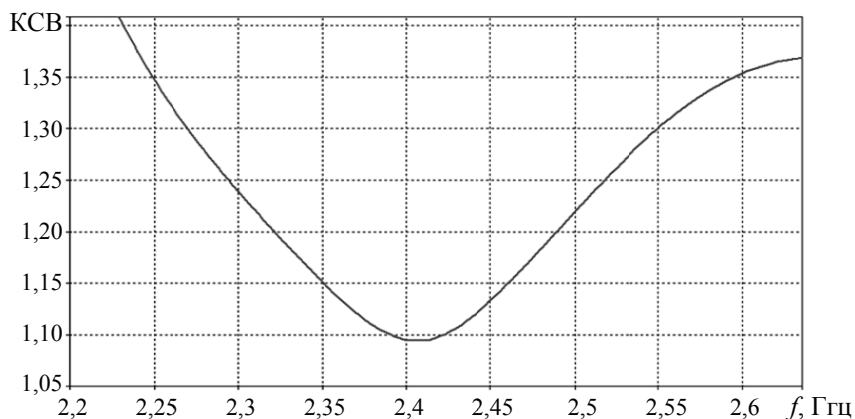


Рис. 5. Коэффициент стоячей волны ЦФАР

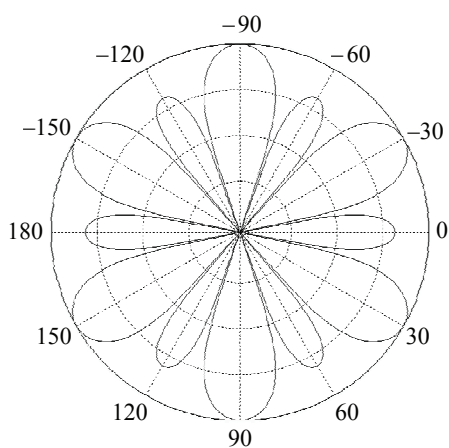


Рис. 6. Диаграмма направленности ЦФАР

Диаграмма направленности ЦФАР представлена на рис. 6.

Таким образом, применение ЦФАР для стандартов IEEE802.11, IEEE802.16 позволит формировать несколько лучей ДН с соответствующей секторизацией и значительно расширить зону покрытия благодаря высокому КНД во всех направлениях, увеличить емкость системы в целом, повысить пропускную способность и энергоэффективность оконечного оборудования. За счет применения современных алгоритмов диаграммообразования совместно с базовыми станциями имеется возможность интеграции в интеллектуальные беспроводные широкополосные самоорганизующиеся сети.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 14-08-00198, № 14-08-00489.

Список литературы

1. Воскресенский, Д. И. Проектирование фазированных антенных решеток / Д. И. Воскресенский. – М. : Радиотехника, 2003. – 632 с.
2. Широкополосные сети передачи информации / В. М. Вишнеvский [и др.]. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
3. Петров, Б. М. Логопериодические вибраторные антенны: справочное издание / Б. М. Петров, Г. И. Костромитин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2011. – 240 с.

Synthesis of Cylindrical Phased Array Based on Log-Periodic Dipole Antennas for Broadband Access Standard IEE802.11, IEE802.16

O. A. Belousov, R. Yu. Kurnosov, P. A. Gorshkov, A. G. Ryazanova

Department "Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems", TSTU;
jiour314@gmail.com

Keywords: cylindrical phased array antenna radiation pattern; log-periodic dipole antennas; standing wave ratio; radiated pattern; wireless broadband standards.

Abstract: The authors considered the method of synthesis of a cylindrical phased array antenna based on the log-periodic dipole radiators standards for broadband wireless access IEE802.11, IEE802.16. The main analytical expressions for the construction of a cylindrical phased array with different configurations were produced. The basic models of a single log-periodic dipole antenna radiator and antenna array were built. The features of the above antenna systems for various broadband standards were described.

References

1. Voskresenskii D.I. *Proektirovanie fazirovannykh antenykh reshetok* (Design phased arrays), Moscow: Radiotekhnika, 2003. – 632 s.
2. Vishnevskii V.M., Lyakhov A.I., Portnoi S.L., Shakhnovich I.V. *Shirokopolosnye seti peredachi informatsii* (Broadband information transmission network), Moscow: Tekhnosfera, 2005, 592 p.
3. Petrov B.M., Kostromitin G.I. *Logoperiodicheskie vibratornye anteny* (Log-periodic dipole antennas), Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2011, 240 p.

Synthese des zylindrischen phasierten Antennengitters auf der Grundlage der logoperiodischen Dipolantennen für die Systeme des Breitbandzuganges des Standards IEE802.11, IEE802.16

Zusammenfassung: Es ist die Methodik der Synthese des zylindrischen phasierten Antennengitters auf der Grundlage der logoperiodischen Dipolstrahler für die Standards des drahtlosen Breitbandzuganges IEE802.11, IEE802.16 betrachtet.

**Synthèse de la grille d'antenne cylindrique multiélément à la base
des antennes logopériodiques vibratoires pour les systèmes de l'accès
à large bande du standart IEE802.11, IEE802.16**

Résumé: Est examinée la méthode de la synthèse de la grille d'antenne cylindrique multiélément à la base des irradiateurs pour un large accès sans fil standardisé IEE802.11, IEE802.16.

Авторы: *Белоусов Олег Андреевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Курносков Роман Юрьевич* – инженер кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Горшков Павел Андреевич* – студент; *Рязанова Александра Георгиевна* – студентка, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Иванов Александр Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
