



УДК 621.396.67
ГРНТИ 78.25.41

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ И ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ КОЛЬЦЕВОЙ РЕШЕТКИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН

*С.Н. РАЗИНЬКОВ, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
А.В. ФЕДОРОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье с использованием интегральных уравнений Халлена и численного метода Крылова-Боголюбова для частичного обращения их операторов построена электродинамическая модель кольцевой решетки несимметричных логопериодических вибраторных антенн диапазона высоких частот, расположенной на земной поверхности. Выявлены закономерности возбуждения вибраторов, образующих активные области антенн с учетом электромагнитных связей в решетке через токи распределительных линий и поля вторичного излучения. Проведен анализ зависимостей диаграмм направленности и обратного рассеяния решетки от числа и электрических размеров антенн.

Ключевые слова: логопериодическая вибраторная антенна; диаграмма направленности антенны; диаграмма обратного рассеяния антенны; интегральное уравнение Халлена.

THE ELECTRODYNAMIC ANALYSIS OF DIAGRAMS OF THE ORIENTATION AND RETURN DISPERSION OF THE RING LATTICE OF ASYMMETRICAL LOGOPERIODICHESKY DIPOLE AERIALS

*S.N. RAZIN'KOV, Doctor of Physico-mathematical sciences, senior researcher
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
A.V. FEDOROV, Candidate of Technical Sciences
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

In article with use of integrated equations Hallena and Krylov-Bogolyubov's numerical method for the partial reference of their operators the electrodynamic model of a ring lattice asymmetrical logoperiodic dipole aerials of a range of the high frequencies, located on a terrestrial surface is constructed. Laws of excitation of the vibrators forming active areas of aerials taking into account electromagnetic communications in a lattice through currents of distributive lines and a field of secondary radiation are revealed. The analysis of dependences of diagrammes of an orientation and return dispersion of a lattice from number and the electric sizes of aerials is carried out.

Keywords: logoperiodic dipole aerial; the diagramme of an orientation of the aerial; the diagramme of return dispersion of the aerial; integrated equation Hallena.

Введение. При разработке систем мониторинга, функционирующих в условиях радио-электронно-информационного конфликта, необходимо выполнять оптимизацию приемных и рассеивающих свойств их антенн для одновременного обеспечения требуемых показателей пространственно-энергетической доступности обслуживаемых целей и радиолокационной заметности. Решение данной задачи включает в себя разработку математических моделей антенн, позволяющих исследовать и выбирать рациональные значения характеристики приема и рассеяния электромагнитных волн.



Как показано в [1], для приема сигналов диапазона высоких частот в секторе углов азимута целесообразно применять кольцевые решетки несимметричных логопериодических вибраторных антенн (ЛПВА). Конфигурация решетки обеспечивает круговой обзор пространства с высоким коэффициентом направленного действия [2]; при этом ЛПВА, построенные по принципу инвариантности соотношений размеров вибраторов и координат точек их подключения к распределительной линии, характеризуются хорошим качеством согласования с фидерным трактом в широкой полосе частот [3].

Вследствие электромагнитных связей между вибраторами [4, 5] рациональные варианты построения таких антенных систем требуется определять по результатам решения краевых задач при граничных условиях для суперпозиции полей многоэлементных конструкций [1, 4].

В предлагаемой работе с использованием интегральных уравнений (ИУ) Халлена в приближении проволочной модели [5] построена электродинамическая модель кольцевой решетки несимметричных ЛПВА диапазона высоких частот, развернутой на земной поверхности. На основе частичного обращения оператора краевой задачи методом Крылова-Боголюбова [6] исследованы закономерности формирования диаграмм направленности (ДН) обратного рассеяния (ДОР) решетки.

Цель работы – анализ приемных и рассеивающих свойств кольцевой решетки ЛПВА.

Антенны данного класса выполняются в виде системы вертикальных штырей монотонно изменяющейся длины, подключенных к распределительной линии в точках закрепления на земной поверхности [3].

Электродинамическая модель антенной решетки. Учитывая высокие электропроводящие свойства типовых видов земной поверхности [3, 5], в соответствии с методом зеркальных отображений [5], при постановке краевой задачи N – элементную ЛПВА будем рассматривать как линейную решетку симметричных вибраторов с двухпроводной распределительной линией с перекрещивающимися проводниками, расположенную в однородном изотропном пространстве [3, 4].

Для задания конфигурации и распределения токов решетки используем декартову систему координат $XYOZ$, а для расчета поля, ДН и ДОР – сферическую систему координат (r, φ, θ) , начало которой совпадает с точкой O . Угол θ отсчитывается от оси Oz , угол φ – от оси Ox против часовой стрелки.

Земную поверхность совместим с плоскостью $z=0$ таким образом, чтобы s – я ЛПВА, $s=1\dots S$, располагалась на луче, отклоненном от оси Ox на угол $\varphi_s = \frac{2\pi}{S}(s-1)$. Вибраторы представим идеально проводящими трубками длиной L_n , $n=1\dots N$, с радиусом поперечного сечения a_0 , бесконечно тонкими стенками и бесконечно малыми поперечными разрывами в плоскости $z=0$ для подключения выходов распределительной линии, характеризующихся сопротивлениями $Z_{nm}^{(s)}$, $s=1\dots S$, $n, m=1\dots N$. Выражения для расчета сопротивлений выходов распределительной линии приведены в [3].

Первые элементы ЛПВА, обладающие наибольшей длиной L_1 , расположены на окружности радиуса r_1 . Следующие вибраторы удалены от точки O на расстояние $r_n = r_1 + \frac{L_1 - L_n}{2} \operatorname{ctg} \alpha$, где α – угол раскрыва антенны; их размеры удовлетворяют соотношению $L_n = L_1 \tau^{n-1}$, $n=1\dots N$, где τ – период антенны [3].

Электрическое поле облучающей волны с комплексной амплитудой $\dot{E}_0^{(i)}$ лежит в плоскости, содержащей вектор направления прихода и ось Oz . Длина волны λ изменяется в пределах от $2L_N$ до $2L_1$; электрические радиусы вибраторов a_0/λ являются малыми величинами для каждого значения λ .



Применяя приближение проволочной модели вибратора, азимутальными вариациями поверхностных токов решетки можно пренебречь, поперечные компоненты их распределения на каждой ЛПВА считать равными нулю, а продольные составляющие заменить эквивалентными токами $\dot{I}_n^{(s)}(z)$, $z \in [-L_n/2; L_n/2]$, $s=1...S$, $n=1...N$, бесконечно тонких нитей, расположенных на осях вибраторов. Указанные токи непрерывны в областях зазоров и обращаются в нуль при $z = \pm L_n/2$, $n=1...N$. В областях зазоров касательные составляющие вектора электрического поля приравниваются тангенциальным компонентам полей токов $\dot{I}_n^{(s)}(0)$, $z \in [-L_n/2; L_n/2]$, $s=1...S$, $n=1...N$. Электромагнитные связи между элементами ЛПВА устанавливаются через токи распределительной линии путем применения закона Кирхгофа на соединительных клеммах [3], а также через вторичное излучение путем задания граничных условий возбуждения антенных элементов для суперпозиции облучающего и рассеянного полей [4]. Взаимное влияние ЛПВА в решетке определяется вторичным излучением электромагнитных волн [1].

Таким образом, краевая задача запишем для антенной решетки определяется системой интегральных уравнений (ИУ) Халлена:

$$\sum_{q=1}^S \sum_{m=1}^N \int_0^{L_m/2} \dot{I}_m^{(q)}(z') K_{nm}^{(sq)}(z; z') dz' + \dot{I}_m^{(q)}(0) \frac{\dot{Z}_{nm}^{(q)}}{2W_0} \sin(k|z|) = C_{n1}^{(s)} \cos(kz) + C_{n2}^{(s)} \sin(k|z|) + \frac{J}{2W_0} [\dot{I}_n^{(s)}(0) \dot{Z}_{n1}^{(s)} \sin(k|z|) - J_n^{(s)}(z) \sin \theta], \quad z \in [-L_n/2; L_n/2], \quad (1)$$

где

$$K_{nm}^{(sq)}(z-z') = \frac{1}{4\pi} \frac{\exp\left(-ik\sqrt{(z-z')^2 + (\Delta_{nm}^{(sq)})^2}\right)}{4\pi\sqrt{(z-z')^2 + (\Delta_{nm}^{(sq)})^2}} \quad (2)$$

– ядро интегрального уравнения [7], $C_{n1}^{(s)}$, $C_{n2}^{(s)}$ – постоянные интегрирования эквивалентных токов n -го вибратора s -й антенны, $s=1...S$, $n=1...N$, определяемые из условия $\dot{I}_n^{(s)}(\pm L_n/2) = 0$, $s=1...S$, $n=1...N$,

$$J_n^{(s)}(z) = \int_{-L_n/2}^{L_n/2} \sin(k|z-z'|) \exp(ik(z' \cos \theta + r_n \sin \theta \sin(\varphi - \varphi_s))) dz', \quad (3)$$

– распределение облучающего поля на поверхности n -го элемента s -й ЛПВА, $n=1...N$, $s=1...S$,

$$\Delta_{nm}^{(sq)} = \begin{cases} a_0 & \text{при } s=q, n=m, \\ \sqrt{r_n^2 + r_m^2 - 2r_n r_m \cos(\varphi_s - \varphi_q)} & \text{при } s \neq q, n \neq m \end{cases}$$

– расстояние от m -й нити эквивалентного тока до поверхности n -го вибратора, $n, m=1...N$, $W_0 = 120\pi$ – волновое сопротивление свободного пространства, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Для численного решения системы ИУ (1) методом Крылова-Боголюбова аппроксимируем эквивалентные токи ЛПВА последовательностями:

$$\dot{I}_n^{(s)}(z) = \sum_{p=1}^{P_n} \dot{I}_{np}^{(s)} f_p^n(z), \quad (4)$$

кусочно-постоянных базисных функций [8]:



$$f_p^n(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } -L_n/2 + \sum_{u=1}^{p-1} \Delta z_u^n \leq z \leq -L_n/2 + \sum_{u=1}^p \Delta z_u^n, \\ 0 & \text{при } z < -L_n/2 + \sum_{u=1}^{p-1} \Delta z_u^n, \quad z > -L_n/2 + \sum_{u=1}^p \Delta z_u^n \end{cases}, \quad (5)$$

где Δz_p^n – интервал дискретизации n -й нити тока, с весовыми коэффициентами $i_{np}^{(s)}$ в точках $z_p^n = -L_n/2 + \sum_{u=1}^{p-1} \Delta z_u^n + \Delta z_p^n/2$, $p=1 \dots P_n$, $n=1 \dots N$, $s=1 \dots S$.

При замене в (1) функций $j_n^{(s)}(z)$, $z \in [-L_n/2; L_n/2]$, $s=1 \dots S$, $n=1 \dots N$, последовательностями (4) из условия обращения в нуль токов на краях вибраторов получим:

$$C_{n1}^{(s)} = \frac{\left(\sum_{q=1}^S \sum_{m=1}^N \sum_{v=1}^{P_m} \alpha_{n1mv}^{(sq)} i_{mv}^{(q)} - j \frac{2\pi}{W_0} |\dot{E}_0^{(i)}| j_n^{(s)}(z_1^n) \sin \theta_0 \right) \sin(k|z_{P_n}^n|) - \left(\sum_{q=1}^S \sum_{m=1}^N \sum_{v=1}^{P_m} \alpha_{nP_nmv}^{(sq)} i_{mv}^{(q)} - j \frac{2\pi}{W_0} |\dot{E}_0^{(i)}| j_n^{(s)}(z_{P_n}^n) \sin \theta_0 \right) \sin(k|z_{P_n}^n|)}{\sin(k|z_{P_n}^n - z_1^n|)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\left(\sum_{q=1}^S \sum_{m=1}^N \sum_{v=1}^{P_m} \alpha_{n1mv}^{(sq)} i_{mv}^{(q)} - j \frac{2\pi}{W_0} \left(|\dot{E}_0^{(i)}| j_n^{(s)}(z_1^n) \sin \theta - i_{np}^{(s)}(0) Z_{nm}^{(s)} \sin(k|z_{P_n}^n - z_1^n|) \right) \right) \sin(k|z_1^n|)}{\sin(k|z_{P_n}^n - z_1^n|)}, \quad (6)$$

$$C_{n2}^{(s)} = \frac{\left(\sum_{q=1}^S \sum_{m=1}^N \sum_{v=1}^{P_m} \alpha_{nP_nmv}^{(sq)} i_{mv}^{(q)} - j \frac{2\pi}{W_0} |\dot{E}_0^{(i)}| j_n^{(s)}(z_{P_n}^n) \sin \theta_0 \right) \cos(kz_1^n) - \left(\sum_{q=1}^S \sum_{m=1}^N \sum_{v=1}^{P_m} \alpha_{n1mv}^{(sq)} i_{mv}^{(q)} - j \frac{2\pi}{W_0} \left(|\dot{E}_0^{(i)}| j_n^{(s)}(z_1^n) \sin \theta - i_{np}^{(s)}(0) Z_{nm}^{(s)} \sin(k|z_{P_n}^n - z_1^n|) \right) \right) \sin(k|z_1^n|)}{\sin(k|z_{P_n}^n - z_1^n|)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\left(\sum_{q=1}^S \sum_{m=1}^N \sum_{v=1}^{P_m} \alpha_{n1mv}^{(sq)} i_{mv}^{(q)} - j \frac{2\pi}{W_0} \left(|\dot{E}_0^{(i)}| j_n^{(s)}(z_1^n) \sin \theta - i_{np}^{(s)}(0) Z_{nm}^{(s)} \sin(k|z_{P_n}^n - z_1^n|) \right) \right) \sin(k|z_1^n|)}{\sin(k|z_{P_n}^n - z_1^n|)},$$

где

$$\alpha_{n1mv}^{(sq)} = \int_{z_v^m - \Delta z_v^m/2}^{z_v^m + \Delta z_v^m/2} K_{nm}^{(sq)}(z_p^n - z') dz' \quad (7)$$

– коэффициент пропорциональности эквивалентного тока на v -м участке m -й нити q -й антенны, $v=1 \dots P_m$, $m=1 \dots N$, $q=1 \dots S$, и поля на p -м интервале дискретизации n -го вибратора q -й ЛПВА, $p=1 \dots P_n$, $n=1 \dots N$, $s=1 \dots S$.

В результате подстановки (4), (6) в (1) с учетом (7) система ИУ Халлена преобразуется в блочную систему $\tilde{K} = S \sum_{n=1}^N P_n$ линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно \tilde{K} неизвестных значений $i_{np}^{(s)}$, $s=1 \dots S$, $n=1 \dots N$, $p=1 \dots P_n$

$$\left[A_{n1mv}^{(sq)} \right] \times i_{mv}^{(q)} = \gamma_{np}^{(s)}, \quad (8)$$



где

$$A_{n\text{pmv}}^{(sq)} = \alpha_{n\text{pmv}}^{(sq)} + \frac{\alpha_{n\text{P}_n\text{mv}}^{(sq)} \sin(k|z_1^n - z_p^n|) - \alpha_{n1\text{mv}}^{(sq)} \sin(k|z_p^n - z_{\text{P}_n}^n|)}{\sin(k|z_{\text{P}_n}^n - z_1^n|)} - j \frac{2\pi}{W_0} \dot{Z}_{nm}^{(q)} \left[\sin(k|z_p^n|) - \frac{\sin(k(z_{\text{P}_n}^n - z_p^n)) \sin(k|z_1^n|) + \sin(k(z_p^n - z_1^n)) \sin(k|z_{\text{P}_n}^n|)}{\sin(k|z_{\text{P}_n}^n - z_1^n|)} \right] \delta_{pg} \quad (9)$$

– нормированный на волновое сопротивление свободного пространства элемент матрицы обобщенных импедансов решетки, связывающий эквивалентный ток v -го участка m -й нити q -й антенны, $v=1\dots P_m$, $m=1\dots N$, $q=1\dots S$, и поля на p -м интервале дискретизации n -го вибратора s -й ЛПВА, $p=1\dots P_n$, $n=1\dots N$, $s=1\dots S$,

$$\gamma_{np}^{(s)} = j \frac{2\pi}{W_0} |\dot{E}_0^{(i)}| \sin \theta_0 \left(j_n^{(s)}(z_p^n) - \frac{j_n^{(s)}(z_1^n) \sin(k|z_{\text{P}_n}^n - z_p^n|) + j_n^{(s)}(z_{\text{P}_n}^n) \sin(k|z_p^n - z_1^n|)}{\sin(k|z_{\text{P}_n}^n - z_1^n|)} \right) \quad (10)$$

– элемент вектора-столбца эквивалентных потенциалов, характеризующий возбуждающее поле на p -м участке n -го вибратора s -й антенны, $p=1\dots P_n$, $n=1\dots N$, $s=1\dots S$, δ_{pg} – символ Кронекера, $g = [P_n/2] + 1$ – порядковый номер точки дискретизации вибратора в области разрыва для подключения распределительной линии, T – знак транспонирования, $[\xi]$ – целая часть числа ξ . Нормировка на W_0 в (8) используется для повышения точности расчета элементов (9), существенно различных по значениям при равных и различных порядковых номерах парных индексов, устраняющей линейную зависимость строк $[A_{n\text{pmv}}^{(sq)}]$, $p, v=1\dots P_n$, $n, m=1\dots N$, $s, q=1\dots S$, при которой исключается нахождение обратной матрицы [7–9].

Частичное обращение матричного оператора СЛАУ (8) позволяет получить строгое решение задачи возбуждения ЛПВА плоской монохроматической волной (1) при конечном числе функций (5) в (4), определяемом требуемой точностью расчета токов [9, 10].

По распределению токов (4) с весовыми коэффициентами, являющимися корнями системы (8), находится поле решетки ЛПВА как суперпозиция полей на интервалах дискретизации многоэлементной вибраторной структуры. При этом в отличие от задач возбуждения решеток вибраторов равной длины [7, 8], устойчивость численного решения СЛАУ (8) и сходимости (4) обеспечиваются при различном числе P_n , $n=1\dots N$, базисных функций (5) тока каждого элемента ЛПВА.

В соответствии с [5], ДН решетки вычисляется как сумма абсолютных значений результатов преобразования Фурье токов каждой ЛПВА, нормированных на их максимальные по углам φ и θ величины; ДОР решетки находится как нормированное распределение суперпозиции полей всех вибраторов в дальней зоне решетки.

По результатам контроля числа обусловленности [9] матрицы обобщенных импедансов решетки [1] установлено, что при расчете токов ЛПВА из $N=17$ элементов с углом раскрыва $\alpha=10^\circ$, периодом $\tau=0,83$ и электрическими размерами наименьшего вибратора на максимальной длине волны диапазона $L_{17}/\lambda_{\text{max}}=0,025$ и $a_0/\lambda_{\text{max}}=2\cdot 10^{-4}$ интервалы дискретизации поверхностей требуется выбирать в пределах $(2\dots 10)\%$ от L_n , $n=1\dots N$.

Анализ диаграммы направленности антенной решетки. На рисунке 1 представлены ДН решеток из $S=3$ (а) и $S=6$ (б) ЛПВА с указанными выше размерами при $\lambda/\lambda_{\text{max}}=0,68$.

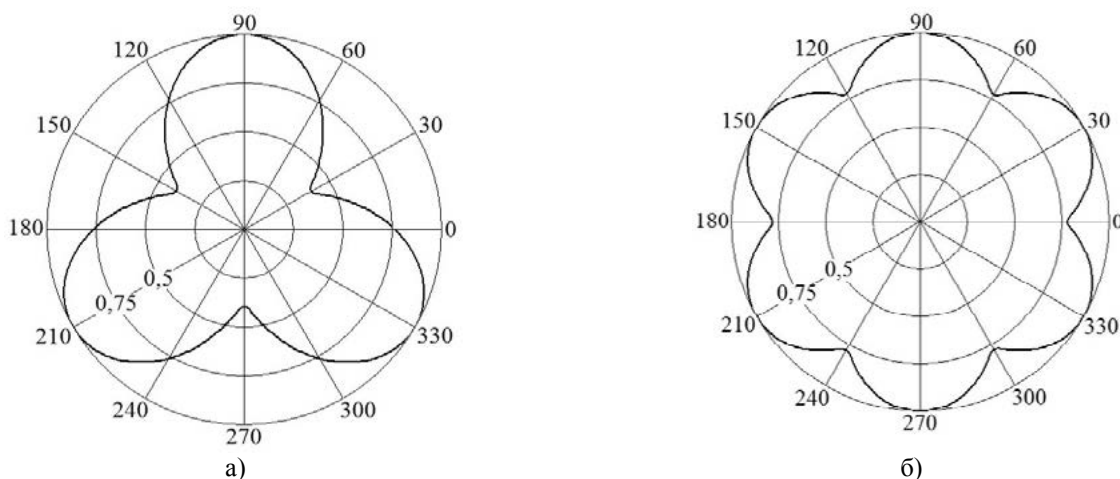


Рисунок 1 – ДН решетки из 3 (а) и 6(б) ЛПВА

При облучении антенны эффективно возбуждаются элементы резонансной длины и расположенные вблизи них. Для других вибраторов наблюдается эффект автоматической отсечки токов, амплитуды которых не превышают (1...2)% от наибольшего значения. Соотношение длин волн, являющихся резонансными для различных элементов, равно периоду ЛПВА. При этом амплитуда тока вибратора с резонансным возбуждением на длине волны λ_{\max} в 4,2...5,5 раз превосходит амплитуды токов вибраторов с резонансными размерами при $\lambda/\lambda_{\max} = 0,1...0,5$. При сохранении пропорции между размерами отдельных вибраторов и резонансной длины волны ДН ЛПВА остается неизменной, ее активная зона перемещается вдоль распределительной линии. С уменьшением периода до $\tau = 0,55$ ширина ДН ЛПВА увеличивается в 1,2 раза [4] вследствие сокращения числа вибраторов, входящих в активную область; при изменении α с 10° до 5° – уменьшается в 1,3 раза [4] за счет расширения активной области антенны, обусловленного увеличением расстояния между элементами [4, 5]. При увеличении активных областей антенн наблюдается расширение главных лучей и существенное изменение структуры ДН в области боковых лепестков.

Ширина главного луча ДН антенны, включенной в состав решетки, практически не изменяется по сравнению шириной основного лепестка ДН одиночной ЛПВА [1, 4]. Значительные изменения направленных свойств характерны для области боковых лепестков, где достаточно велико взаимное влияние вибраторов наибольших размеров.

Анализ диаграммы обратного рассеяния антенной решетки. На рисунке 2 приведены ДОР решетки из $S = 3$ ЛПВА при $\lambda/\lambda_{\max} = 0,1$ (а) и из $S = 6$ антенн при $\lambda/\lambda_{\max} = 0,07$.

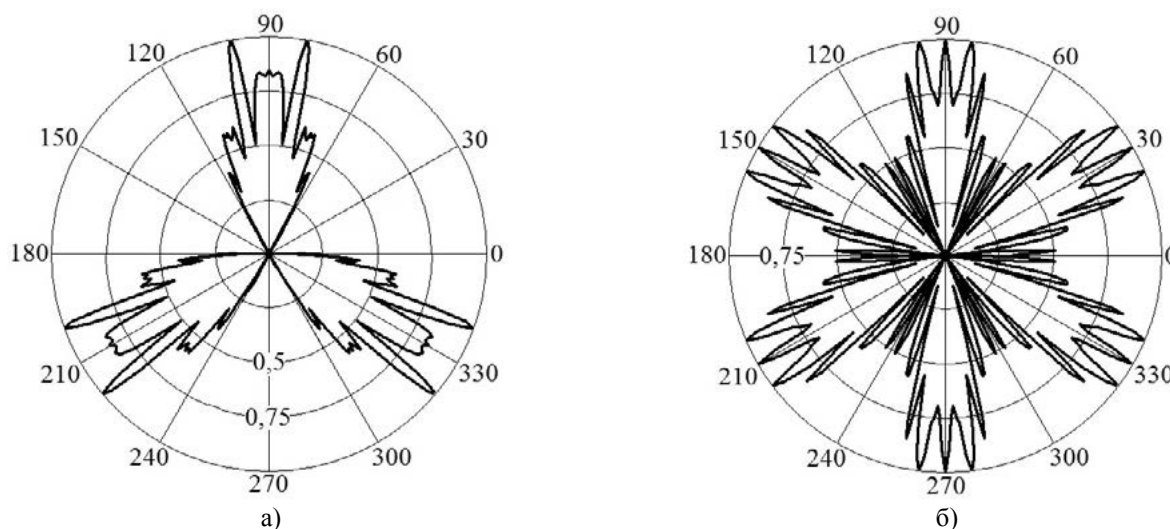


Рисунок 2 – ДОР решетки из 3 ЛПВА при $\lambda/\lambda_{\max} = 0,1$ (а) и 6 ЛПВА при $\lambda/\lambda_{\max} = 0,07$ (б)



Положение главных максимумов ДОР решетки совпадает с направлениями главных лучей ДН антенн. При этом ширина ДОР ЛПВА в диапазоне длин волн с коэффициентом перекрытия 20 изменяется в пределах от 25° до 12° . Сужение ДОР по мере уменьшения длины волны обусловлено возрастанием электромагнитного взаимодействия между штырями за счет повышения плотности потока вторичного поля.

Выводы. Таким образом, с использованием ИУ Халлена построена электродинамическая модель кольцевой решетки несимметричных ЛПВА диапазона высоких частот, расположенной на земной поверхности. Выявлены закономерности возбуждения вибраторов, образующих активные области антенн с учетом электромагнитных связей в решетке через токи распределительных линий и поля вторичного излучения. Проведен анализ зависимостей ДН и ДОР решетки от числа и электрических размеров антенн.

Показано, что при сохранении пропорции между размерами отдельных вибраторов и резонансной длины волны ДН ЛПВА остается неизменной, ее активная зона перемещается вдоль распределительной линии. Сохраняет свою инвариантность при включении в состав решетки форма ДН одиночной антенны в области главного луча; значительные изменения направленных свойств характерны для области боковых лепестков, где достаточно велико взаимное влияние вибраторов наибольших размеров.

Положение максимумов ДОР решетки совпадает с направлениями главных лучей ДН антенн. По мере уменьшения длины волны ДОР каждой ЛПВА сужается вследствие электромагнитного взаимодействия между вибраторами через поля вторичного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разиньков С.Н., Федоров А.В. Электродинамическая модель и анализ кольцевой решетки логопериодических вибраторных антенн // Антенны, 2016. № 5(237). С. 64–71.
2. Рыбалко А.М., Павлюк В.А. Предельная направленность кольцевой антенной решетки // Радиотехника и электроника. 1985. Т 30. № 1. С. 82-85.
3. Петров Б.М., Костромитин Г.И., Горемыкин Е.В. Логопериодические вибраторные антенны. М: Горячая линия – Телеком. 2005. 239 с.
4. Разиньков С.Н., Федоров А.В. Электродинамический анализ токов и диаграммы направленности логопериодической вибраторной антенны // Радиотехника. 2016. № 10. С. 165-170.
5. Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практические применения антенн / Под ред. В.А. Неганова. М.: Радиотехника. 2009. 720 с.
6. Малушков Г.Д. Методы решения задач электромагнитного возбуждения тел вращения // Известия вузов. Радиодифизика. 1975. Т. 18. № 11. С. 1563–1589.
7. Тихонов А.Н., Дмитриев В.И. Метод расчета распределения тока в системе линейных вибраторов и диаграммы направленности этой системы // Вычислительные методы и программирование. М.: МГУ. 1968. № 10. С. 3–8.
8. Пономарев Л.И., Степаненко В.И. Сканирующие многочастотные совмещенные антенные решетки / Под ред. Л.И. Пономарева. М.: Радиотехника. 2009. 328 с.
9. Яцкевич В.А., Каршакевич С.Ф. Устойчивость процесса сходимости численного решения в электродинамике // Известия ВУЗов. Сер. Радиоэлектроника. 1981. Т. 24. № 2. С. 66–72.
10. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 1986. 288 с.

REFERENCES

1. Razin'kov S.N., Fedorov A.V. 'Elektrodinamicheskaya model' i analiz kol'cevoj reshetki logoperiodicheskikh vibratornyh antenn // Antenny, 2016. № 5(237). S. 64-71.



2. Rybalko A.M., Pavlyuk V.A. Predel'naya napravlennoost' kol'cevoj antennoj reshetki // Radiotekhnika i `elektronika. 1985. T 30. № 1. S. 82-85.
3. Petrov B.M., Kostromitin G.I., Goremykin E.V. Logoperiodicheskie vibratornye anteny. M: Goryachaya liniya - Telekom. 2005. 239 s.
4. Razin'kov S.N., Fedorov A.V. `Elektrodinamicheskij analiz tokov i diagrammy napravlennosti logoperiodicheskoj vibratornoj anteny // Radiotekhnika. 2016. № 10. S. 165-170.
5. Neganov V.A., Tabakov D.P., Yarovoj G.P. Sovremennaya teoriya i prakticheskie primeneniya antenn / Pod red. V.A. Neganova. M.: Radiotekhnika. 2009. 720 s.
6. Malushkov G.D. Metody resheniya zadach `elektromagnitnogo vozbuzhdeniya tel vrascheniya // Izvestiya vuzov. Radifizika. 1975. T. 18. № 11. S. 1563-1589.
7. Tihonov A.N., Dmitriev V.I. Metod rascheta raspredeleniya toka v sisteme linejnyh vibratorov i diagrammy napravlennosti `etoj sistemy // Vychislitel'nye metody i programmirovaniye. M.: MGU. 1968. № 10. S. 3–8.
8. Ponomarev L.I., Stepanenko V.I. Skaniruyuschie mnogochastotnye sovmeschennye anteny reshetki / Pod red. L.I. Ponomareva. M.: Radiotekhnika. 2009. 328 s.
9. Yackevich V.A., Karshakevich S.F. Ustojchivost' processa shodimosti chislennogo resheniya v `elektrodinamike // Izvestiya VUZov. Ser. Radio`elektronika. 1981. T. 24. № 2. S. 66–72.
10. Tihonov A.N., Arsenin V.Ya. Metody resheniya nekorrektnyh zadach. M.: Nauka. 1986. 288 s.

© Разиньков С.Н., Федоров А.В., 2018

Разиньков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, melvf@bk.ru

Федоров Андрей Витальевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, a.fyodoroff@mail.ru