

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-05>

УДК 621.396.671

ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ МНОГОКОЛЬЦЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ПРОИЗВОЛЬНЫМ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

Н.Н. Горобец, А.С. Лебедев

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

E-mail: nikolay.n.gorobets@karazin.ua

Поступила в редакцию 20 февраля 2019 г.

Актуальность. Поведение электромагнитных волн на конечном расстоянии от многокольцевых антенных решеток в их ближней и промежуточной зонах наблюдения до настоящего времени не исследовано в достаточной для современных запросов практики степени. Для многих приложений важно знать возможности формирования прожекторного луча в ближней зоне многокольцевых антенных решеток и амплитудные, фазовые и поляризационные характеристики полей в ближней зоне при изменении электрических размеров антенны и расстояния между излучателями.

Цель работы. Целью работы является теоретическое исследование амплитудных и фазовых характеристик электромагнитного поля в ближней и промежуточной зонах многокольцевых плоских эквидистантных антенных решеток изотропных излучателей.

Методы и методология. Исследования основаны на принципе суперпозиции, методах теории функций комплексного переменного и современных методах вычислительной математики. В результате компьютерного моделирования изучено поведение электромагнитных волн в ближней зоне многокольцевых антенных решеток при изменении диаметра раскрытия антенны, расстояния между излучателями и длины рабочей волны.

Результаты. Разработано математическое обеспечение для расчета амплитудных и фазовых характеристик электромагнитных полей в ближней зоне многокольцевых эквидистантных антенных решеток изотропных излучателей. Рассчитаны амплитуды и фазы вектора напряженности электрического поля при изменении диаметра раскрытия от 0,5 до 200 длин волн. Расстояние между излучателями выбиралось равным половине длины волны для классических фазированных антенных решеток, 0,9 длины волны для нефазированных решеток с глобальным максимумом КНД и 1,23 длины волны для нефазированных решеток с глобальным минимумом КНД. Показано, что при диаметрах раскрытия, меньших 1 – 1,5 длины волны, амплитуда поля в направлении нормали к раскрытию с увеличением расстояния уменьшается монотонно, что характерно для линейных решеток. При больших диаметрах апертуры в ближней зоне образуется прожекторный луч, в котором имеют место большие осцилляции амплитуды поля («мертвые зоны» в ближней зоне антенны). Обнаружено явление аномального увеличения амплитуды поля вне прожекторного луча в ближней зоне разреженных кольцевых решеток.

Выводы. Разработанное математическое обеспечение решения задачи нахождения характеристик электромагнитных полей в ближней зоне многокольцевых антенных решеток, полученные результаты и обнаруженные физические закономерности поведения полей необходимо учитывать при создании радиоэлектронных устройств и систем, в которых используются электромагнитные поля в ближней зоне антенн. Результаты статьи могут быть обобщены на случай многокольцевых и других решеток слабонаправленных излучателей любого известного типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромагнитные поля; кольцевые антенные решетки; ближняя, промежуточная, дальняя зона; прожекторный луч.

ПОЛЯ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ БАГАТОКІЛЬЦЕВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК З ДОВІЛЬНОЮ ВІДСТАННЮ МІЖ ВИПРОМІНЮВАЧАМИ

М.М. Горобець, А.С. Лебедев

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

Актуальність. Поведінка електромагнітних хвиль на кінцевій відстані від багатокільцевих антенних решіток в їх ближній і проміжній зонах спостереження до теперішнього часу не досліджено в достатній для сучасних запитів практики ступені. Для безлічі додатків важливо знати умови формування прожекторного променя в ближній зоні багатокільцевих антенних решіток і амплітудні, фазові та поляризаційні характеристики полів в ближній зоні при зміні електричних розмірів антени і відстані між випромінювачами.

Мета роботи. Метою роботи є теоретичне дослідження амплітудних і фазових характеристик електромагнітного поля в ближній і проміжній зонах багатокільцевих плоских еквідистантних антенних решіток ізотропних випромінювачів.

Методи та методологія. Дослідження засновані на принципі суперпозиції, методах теорії функцій комплексного змінного і сучасних методах обчислювальної математики. В результаті комп'ютерного моделювання вивчено поведінку електромагнітних хвиль в ближній зоні багатокільцевих антенних решіток при зміні діаметра розкрива антени, відстані між випромінювачами і довжини робочої хвилі.

Результати. Розроблено математичне забезпечення для розрахунку амплітудних і фазових характеристик електромагнітних полів в ближній зоні багатокільцевих еквідистантних антенних решіток ізотропних випромінювачів. Розраховані амплітуди і фази вектора напруженості електричного поля при зміні діаметра розкрива від 0,5 до 200 довжин хвиль. Відстань між випромінювачами вибиралася рівною половині довжини хвилі для класичних фазованих антенних решіток, 0,9 довжини хвилі для нефазованих решіток із глобальним максимумом КСД і 1,23 довжини хвилі для нефазованих решіток із глобальним мінімумом КСД. Показано, що при діаметрах розкриву, менших 1 - 1,5 довжини хвилі, амплітуда поля в напрямку нормалі до розкриву зі збільшенням відстані зменшується монотонно, що характерно для лінійних решіток. При великих діаметрах апертури в ближній зоні утворюється прожекторний промінь, в якому мають місце великі осциляції амплітуди поля («мертві зони» в ближній зоні антени). Виявлено явище аномального збільшення амплітуди поля поза прожекторним променем в ближній зоні розріджених кільцевих решіток.

Висновки. Розроблене математичне забезпечення вирішення задачі знаходження характеристик електромагнітних полів в ближній зоні багатокільцевих антенних решіток, отримані результати і виявлені фізичні закономірності поведінки полів необхідно враховувати при створенні радіоелектронних пристроїв і систем, в яких використовуються електромагнітні поля в ближній зоні антен. Результати статті можуть бути узагальнені на випадок багатокільцевих і інших решіток слабкоспрямованих випромінювачів будь-якого відомого типу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електромагнітні поля; кільцеві антенні решітки; ближня, проміжна, дальня зона; прожекторний промінь.

FIELDS IN THE NEAR ZONE OF THE MULTIPLE RING ANTENNA ARRAYS WITH ARBITRARY DISTANCE BETWEEN RADIATORS

N.N. Gorobets, A.S. Lebedev

V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background. The behavior of electromagnetic waves at a finite distance from multi-ring antenna arrays in their near and intermediate observation zones has not yet been studied to a degree sufficient for modern practice queries. For many applications, it is important to know the formation of the searchlight beam in the near zone of multi-ring antenna arrays and the amplitude, phase, and polarization characteristics of the fields in the near field when the electrical dimensions of the antenna and the distance between the radiators change.

Objectives: The aim of the work is a theoretical study of the amplitude and phase characteristics of the electromagnetic field in the near and intermediate zones of multi-ring flat equidistant antenna arrays of isotropic radiators.

Methods and methodology Research is based on the principle of superposition, methods of the theory of functions of a complex variable, and modern methods of computational mathematics. As a result of computer simulation, when changing the diameter of the aperture of the antenna, the distance between the radiators and the length of the working wave, the behavior of electromagnetic waves in the near zone of multi-ring antenna arrays is studied.

Results: The software has been developed for calculating the amplitude and phase characteristics of electromagnetic fields in the near zone of multi-ring equidistant antenna arrays of isotropic radiators. The amplitudes and phases of the electric field vector are calculated with a change in the aperture diameter from 0.5 to 200 wavelengths. The distance between the radiators was chosen equal to half the wavelength for classical phased antenna arrays, 0.9 wavelength for unphased arrays with a global maximum gain and 1.23 wavelength for unphased arrays with a global minimum gain. It is shown that for aperture diameters smaller than 1 - 1.5 wavelengths, the field amplitude in the direction normal to the aperture decreases monotonously with increasing distance, which is typical for linear gratings. With large aperture diameters, a spotlight beam is formed in the near zone, in which large field amplitude oscillations take place ("dead zones" in the near zone of the antenna). The phenomenon of an abnormal increase in the field amplitude outside the searchlight beam in the near zone of rarefied ring gratings was discovered.

Conclusions: The developed software for solving the problem of finding of the characteristic electromagnetic fields in the near zone of multi-ring antenna arrays, the results obtained and the discovered physical laws of field behavior must be taken into account when creating electronic devices and systems that use electromagnetic fields in the near zone of antennas. The results of the paper can be generalized to the case of multi-ring and other arrays of weakly directed radiators of any known type.

KEYWORDS: electromagnetic fields; ring antenna arrays; near, intermediate, far zone; searchlight beam

ВВЕДЕНИЕ

Кольцевые антенные решетки находят широкое и разнообразное применение в различных областях радиоэлектроники. Это обусловлено, прежде всего, удобной конструкцией антенны с круговой апертурой, ее высокими эксплуатационными характеристиками, высокими характеристиками направленности и низким уровнем боковых лепестков во всем пространстве (а не только в главных плоскостях) наблюдения. Для понимания физики явлений в отношении последнего, очень важного для

практики обстоятельства, обычно кольцевую решетку излучателей в каждой плоскости наблюдения $\varphi = const$ представляют эквивалентной линейной решеткой. Легко убедиться, что эквивалентная линейная решетка в любой плоскости наблюдения: а) неэквидистантна; б) имеет спадающее к краям амплитудное распределение источников поля на раскрыве даже в случае равномерного возбуждения кольцевых решеток; в) фазовое распределение поля на раскрыве постоянно. Все эти особенности формирования пространственного распределения излучения кольцевых решеток приводят к уменьшению уровня боковых лепестков диаграммы направленности.

К настоящему времени электромагнитные поля и волны на конечном расстоянии от раскрыва кольцевых дискретных и непрерывных антенн и их пространственное распределение в ближней и промежуточной зоне антенны в достаточной для практики степени не изучено. В частности, в [1] показано, что при размерах раскрыва любой формы, не превышающих $1 - 1,5$ длины волны, амплитуды векторов напряженности электрического и магнитного полей в ближней зоне по мере увеличения расстояния от излучателя убывают равномерно. В [2] показано, что непрерывные апертурные антенны с раскрывом круглой формы при диаметрах, больших $1 - 1,5$ длины волны, в ближней зоне формируют так называемый «прожекторный луч». Он представляет собой совокупность параллельных друг другу лучей в направлении главного максимума диаграммы направленности антенны, которая описывается плоской локальной слабо неоднородной бегущей волной. Протяженность и конфигурация прожекторного луча в пространстве определяется прежде всего электрическими размерами и формой излучающего раскрыва антенны, а также амплитудным и фазовым распределением источников излучения в раскрыве. В поперечных сечениях форма прожекторного луча вблизи антенны в большей или меньшей степени близка к форме и размерам раскрыва. В прожекторном луче сосредоточена почти вся мощность излучения антенны.

Целью настоящей статьи является теоретическое исследование физических закономерностей формирования амплитудных и фазовых характеристик электромагнитных полей кольцевых антенных решеток изотропных излучателей в их ближней и промежуточной зонах наблюдения при изменении размеров, расстояния между излучателями или длины рабочей волны.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для решения поставленной задачи – выявления самых общих закономерностей формирования пространственного распределения электромагнитного поля в ближней и промежуточной зонах наблюдения апертурных антенных решеток с раскрывом круглой формы: задачу упростим и сведем к самой простой физико-математической модели. В соответствии с принципом суперпозиции амплитуду и фазу векторов напряженности электрического и магнитного полей в каждой точке наблюдения будем определять из суммы комплексных амплитуд полей каждого излучателя в соответствующей точке наблюдения:

$$\dot{E}(\vec{R}) = \sum_{n=-N}^N \dot{E}_n(\vec{R}); \quad \dot{H}(\vec{R}) = \sum_{n=-N}^N \dot{H}_n(\vec{R}).$$

При этом будем учитывать состояние поляризации излучения каждого элемента решетки исследуемой антенны. Наиболее просто это сделать, разложив вектора электрического и магнитного полей каждого излучателя решетки в каждой точке наблюдения вне антенны в ортогональном трехмерном линейнополяризованном базисе. Таким образом будут адекватно учтены продольные компоненты электрического и магнитного полей в произвольной точке наблюдения в ближней и промежуточной зонах антенны. Отметим, что в исследуемом случае синфазных антенных решеток в направлении нормали к раскрыву антенны продольные компоненты и электрического и магнитного полей равны нулю при любом расстоянии точки наблюдения от раскрыва.

Для дальнейшего упрощения задачи и обеспечения наибольшей общности ее решения аналогично [3] примем в качестве излучателя – элемента решетки – точечный изотропный излучатель, электрические и магнитные поля которого описываются однородной сферической волной. Поляризацию его излучения примем для определенности линейной вертикальной. Взаимное влияние излучателей в решетке примем пренебрежительно малым. Амплитудное и фазовое распределение поля в раскрыве антенны примем постоянным. При этих предположениях результаты расчетов амплитуд, фаз и состояния поляризации электрического и магнитного полей в точках наблюдения на конечных расстояниях от антенны позволят изучить закономерности формирования прожекторного луча, его протяженность и конфигурацию в зависимости от электрических размеров раскрыва, числа излучателей и расстояния между ними.

ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ МНОГОКОЛЬЦЕВЫХ РЕШЕТОК МАЛЫХ И СРЕДНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ АПЕРТУРЫ

Исследование пространственного распределения амплитуд и фаз векторов напряженности электрических и магнитных полей и, в соответствии с теоремой Пойнтинга, мощности электромагнитного поля в ближней зоне кольцевых антенных решеток с малым числом излучателей и, следовательно, малых и средних электрических размеров диаметра излучающего раскрыва, имеет большое значение для практики, так как подобные решетки слабонаправленных антенн широко используются в качестве контактных и бесконтактных датчиков электромагнитных излучений в медицинском и биомедицинском приборостроении, в устройствах контроля технологических процессов в промышленности и в СВЧ – энергетике. При этом необходимо принимать во внимание тот факт, что для получения высокого пространственного разрешения информационных сигналов на больших расстояниях в дальней зоне антенны должны иметь как можно большие электрические размеры. В случае же необходимости работы на малых расстояниях - чем меньше физические размеры антенны-датчика электрического и/или магнитного поля, тем выше пространственное разрешение подобных радиоэлектронных систем. Очевидно, что в последнем случае для увеличения мощности полезного сигнала и повышения чувствительности радиоэлектронных систем можно использовать антенные решетки с небольшим количеством излучателей.

Поля в ближней зоне антенных решеток малых и средних электрических размеров необходимо знать для создания радиолокаторов ближнего действия для предупреждения столкновений наземного и водного транспорта, для технологической радиосвязи на железнодорожном транспорте, в офисных и кампусных телекоммуникационных сетях. Теория полей в ближней зоне малоэлементных решеток особенно важна в подповерхностной радиолокации на основе сверхширокополосных видеоимпульсных сигналов.

Для решения поставленных задач разработанное математическое обеспечение – расчетные формулы, алгоритмы и компьютерные программы [3] – развито на случай плоских антенных решеток с известным способом расположения излучателей на плоской поверхности заданой формы и с известным амплитудным и фазовым распределением источников электромагнитного поля на раскрыве. На электрические размеры раскрыва, число излучателей, расстояния между ними, а также на форму апертуры, амплитудное и фазовое распределение токов или полей в раскрыве не накладывается никаких ограничений.

Для проверки достоверности и точности разработанного математического обеспечения проведены расчеты амплитудных и фазовых характеристик полей в сферических и декартовых координатах на расстоянии дальней зоны антенны для нескольких вариантов размеров раскрыва (от 0,5 до 200 длин волн) и расстояния между излучателями (от 0,5 до 2 длин волн). В результате оказалось, что для направления нормали к раскрыву при его синфазном возбуждении поперечные компоненты поля во всех вариантах расчетов совпадают, а продольные равны нулю. Распределение полей в зависимости от угловых координат точек наблюдения в сферической системе координат в дальней зоне совпадает с диаграммой направленности антенны.

Рассмотрим электрическое поле на малых расстояниях от линейных и плоских эквидистантных однородных синфазных антенных решеток изотропных излучателей. Примем, как и ранее в [3], что каждый элемент решетки излучает сферическую волну. В каждой точке наблюдения электрические и магнитные поля синфазны. Поля в каждом излучателе одинаковы и имеют амплитуду E_0 . Поля в каждой точке наблюдения находим суммированием комплексных амплитуд полей каждого излучателя-элемента решетки в этой точке.

На Рис. 1 представлены расчеты зависимости амплитуды вектора напряженности электрического поля излучения кольцевой решетки из четырех изотропных излучателей от расстояния до точки наблюдения в направлении нормали к раскрыву. Подчеркнем, что это направление совпадает с направлением главного максимума диаграмм направленности исследуемых решеток. Расстояния между ближайшими излучателями приняты равными 0,5, 0,72 и 1,23 длины волны. В первом случае, как хорошо известно, характеристики направленности антенных решеток практически совпадают с одноименными характеристиками непрерывных антенн. Во втором при $d = 0,72\lambda$, как показано в [4], исследуемые решетки обеспечивают глобальный максимум коэффициента направленного действия антенны. В третьем случае при $d = 1,23\lambda$ исследуемые решетки имеют глобальный минимум КНД (эффект "ослепления" нефазированных антенных решеток).

Из Рис. 1 видно, что в случае кольцевых антенных решеток минимальных возможных диаметров, как и в случае непрерывных плоских апертурных антенн с раскрывом круглой формы при тех же

диаметрах раскрыва (см. Рис 1а в [2]), амплитуда электрического поля максимальна непосредственно вблизи раскрыва антенны и убывает равномерно по мере удаления точки наблюдения от раскрыва. В отличие же от непрерывных апертур малых электрических размеров максимальная амплитуда поля

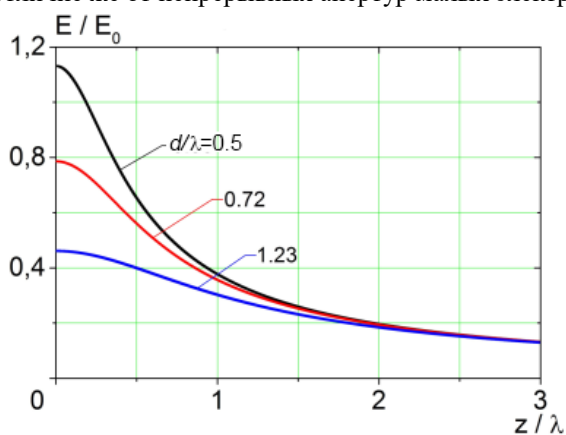


Рис. 1. Зависимость амплитуды поля кольцевой решетки 4-х излучателей от расстояния в направлении нормали к раскрыву.

вблизи решетки тем меньше, чем больше расстояние между излучателями, т.е. чем больший диаметр апертуры решетки. При этом скорость увеличения амплитуды поля по мере приближения точек наблюдения к антенне, следовательно, продольный градиент амплитуды поля антенных решеток, меньше, чем у непрерывных антенн. От линейных антенных решеток больших электрических размеров с большим числом излучателей, поля в ближней зоне которых исследованы в [3], полученные результаты отличаются качественно: в случае линейных решеток зависимость амплитуды электрического поля от расстояния представляет собой суперпозицию плавной монотонно убывающей функции, как и в случае малоэлементных круговых антенных решеток, и осциллирующей функции. При этом (см. Рис. 1 в [3]) число осцилляций и размах их амплитуд тем больше, чем больше длина линейной антенной решетки и расстояние между излучателями. Расчеты зависимости относительной амплитуды E/E_0 и фазы $\varphi - \varphi_0$ от поперечных координат x/λ и y/λ на разных расстояниях z/λ от антенны подтвердили вывод, что в ближней зоне кольцевых антенных решеток прожекторный луч не формируется. Отметим, что при увеличении d/λ до 1.23 признаки начала формирования прожекторного луча появляются, в частности, появляется осциллирующий характер зависимости амплитуды поля от поперечных координат.

ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ МНОГОКОЛЬЦЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК БОЛЬШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ АПЕРТУРЫ

Многослойные остронаправленные антенные решетки слабонаправленных излучателей находят широкое применение в качестве фазированных антенных решеток с электрически «мгновенно» управляемым положением главного максимума диаграммы направленности [5] в радиолокации, в качестве антенн радиотехнических систем различного функционального назначения для летательных аппаратов и транспортных средств, «искусственной луны» в радиоастрономических и антенных измерениях и множестве других применений. Применение антенных решеток для облучения каких-либо объектов в их ближней зоне перспективно не только из-за их удобной плоской конструкции, но и из-за возможности увеличения мощности излучаемого электромагнитного поля путем включения в каждый элемент решетки усилителя мощности.

По-видимому, впервые поля в ближней зоне апертурных антенн с круглым раскрывом исследованы в [6]. Однако исследования физических закономерностей формирования распределения амплитуд электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля, их фазовых характеристик, поляризации и мощности на конечном расстоянии в ближней и промежуточной зонах наблюдения антенны в [6] не проводились. Это обусловлено тем, что такие исследования, особенно на весьма малых расстояниях от апертуры, возможны только численно. Результаты довольно подробных исследований в случае непрерывных круглых апертур произвольных электрических размеров приведены в [2]. В [2] показано, что в ближней зоне однородных синфазных антенн прожекторный луч формируется только в случае, когда диаметр раскрыва превышает 1 – 1,5 длины волны. Зависимости амплитуд векторов напряженности электрического и магнитного полей от расстояния до точки наблюдения в направлении нормали к раскрыву имеет осциллирующий характер. При этом средняя амплитуда полей в прожекторном луче равна амплитудам полей E_0 и H_0 в середине раскрыва независимо от его диаметра. В глобальном максимуме поля апертуры диаметром 100 длин волн амплитуды полей в ближней зоне достигают удвоенного их значения в середине раскрыва (на расстоянии 25 диаметров раскрыва). В глобальном минимуме на расстоянии 12,5 диаметров раскрыва амплитуда поля уменьшается на -53дБ от его значения в центре раскрыва E_0 .

Очевидно, что эти проявления эффектов ближней зоны будут иметь место и в случае кольцевых антенных решеток реальных слабонаправленных излучателей, однако влияние расстояния между излучателями и их числа, определяющего электрические размеры апертуры, на распределение амплитудных, фазовых и поляризационных характеристик электромагнитных полей в ближней зоне требует дополнительного исследования.

Расчеты проведены при следующих предположениях, значительно упрощающих физико-математическую модель ближней зоны антенных решеток больших электрических размеров:

- эффекты ближней зоны каждого излучателя - элемента антенной решетки не учитываются, в частности, электрическое и магнитное поля приняты поперечными и синфазными, а отношение их амплитуд, имеющее физический смысл волнового сопротивления пространства в ближней зоне, постоянно;

- каждый излучатель – элемент решетки изотропный;
- поляризация излучения каждого излучателя линейная и для определенности принято, что вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости XOZ .

Для решения задачи в общем виде с антенной свяжем декартову и сферическую системы координат, причем начало координат расположим в центре раскрыва, раскрыв расположим в плоскости XOY , а ось OZ направим по внешней нормали к раскрыву. Амплитудные и фазовые распределения полей или токов в каждом излучателе в раскрыве примем постоянными. Все линейные размеры антенны, координаты излучателей и точек наблюдения определяются в долях длины волны.

Для изучения динамики формирования прожекторного луча при изменении числа излучателей, расстояния между ними и электрических размеров раскрыва антенны рассчитывались амплитуды и фазы вектора напряженности электрического поля в направлении нормали к раскрыву и на поперечных плоскостях для вариантов диаметров однородных кольцевых антенных решеток, примерно равных 2; 5; 10; 25; 50; 100 и 200 длин волн. Решетки моделировались так, чтобы расстояния от каждого излучателя до ближайших к нему излучателей были одинаковыми. Конкретно задавались расстояния $d=0,5$ длины волны - то есть для классических фазированных антенных решеток; $d=0,9$ длин волны - для нефазированных разреженных антенных решеток, которые обеспечивают глобальный максимум достижимого коэффициента направленного действия и коэффициента усиления и $d=1,1$ длины волны, при котором имеет место эффект "ослепления" нефазированных антенных решеток [4], как и в случае кольцевых антенных решеток малых электрических размеров. Отметим, что как показали расчеты, при малых электрических размерах раскрыва глобальный максимум КНД имеет место при меньших расстояниях между излучателями $d=0,72\lambda$, а глобальный минимум – при больших расстояниях $d=1,23\lambda$.

Отметим также, что из-за четкой определенности геометрической конфигурации антенных решеток и одновременно однозначно заданного расстояния между излучателями не удастся обеспечить одинаковые значения диаметра излучающего раскрыва антенны при разных расстояниях между излучателями. Поэтому брались ближайшие из возможных. Например, для диаметра раскрыва 100 длин волн при расстоянии между излучателями $d=0,9\lambda$ ближайший диаметр раскрыва оказался равным 100,8 длины волны, а при $d=1,1\lambda$ - равным 101,2 длины волны. Число излучателей в решетках изменялось соответственно. Например, при том же диаметре раскрыва 100 длин волн при $d=0,5\lambda$ число излучателей $N=30301$, при $d=0,9\lambda$ – $N=9577$ и при $d=1,1\lambda$ – $N=6487$. В первом случае все излучатели располагались на 100 окружностях, во втором – на 56 и в третьем – на 46.

Типичные результаты расчетов зависимости амплитуды электрического поля, отнесенной к ее значению в центре раскрыва E_0 , от продольной координаты z/λ и зависимостей относительных амплитуд и разности фаз полей в произвольной точке наблюдения и соответствующих расстояниях вдоль оси Oz от поперечной координаты x/λ в случае диаметра раскрыва 100 длин волн и расстояния между излучателями в решетке $d=0,5\lambda$ представлено на Рис. 2, 3.

Из приведенных результатов расчетов, как и из расчетов при других диаметрах раскрыва, следует, что при диаметре апертуры, большем двух длин волн, апертурные эквидистантные синфазные антенные решетки в ближней зоне формируют прожекторный луч, в котором электромагнитная волна имеет характер локальной слабо неоднородной плоской волны. В процессе распространения средняя амплитуда поля, которая определяется числом излучателей, незначительно уменьшается. Заметим, что в случае непрерывных апертурных антенн с раскрывом круглой формы средняя амплитуда поля в прожекторном луче равна амплитуде поля в центре раскрыва независимо от его электрических размеров [2].

Из результатов расчетов оказалось также, что протяженность области осцилляций и число осцилляций амплитуды поля в направлении нормали к раскрыву определяется диаметром апертуры D/λ и не зависит от расстояния между излучателями d/λ , числа излучателей и амплитудного распределения источников поля в апертуре. При этом число осцилляций поля в ближней зоне равняется числу длин волн, которые укладываются в диаметре раскрыва антенны. Принципиальным отличием поля в прожекторном луче антенных решеток с раскрывом круглой формы от других вариантов формы

раскрыва - линейной, квазилинейной, прямоугольной и квадратной - является очень большая глубина осцилляций, то есть очень большая величина продольных градиентов амплитуды векторов поля.

Качественно характер поля в ближней зоне при увеличении диаметра антенны сохраняется, однако появляются и новые эффекты:

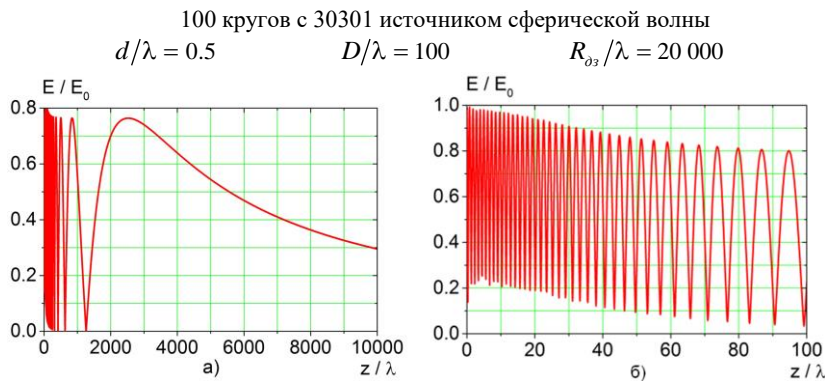


Рис. 2. Зависимость амплитуды поля решетки ($d = 0.5\lambda$) с круглым раскрывом с диаметром 100λ от расстояния в направлении нормали к раскрыву: а) - до расстояния половины расстояния дальней зоны; б) - до расстояния, равного размеру раскрыва

100 кругов с 30301 источником сферической волны.

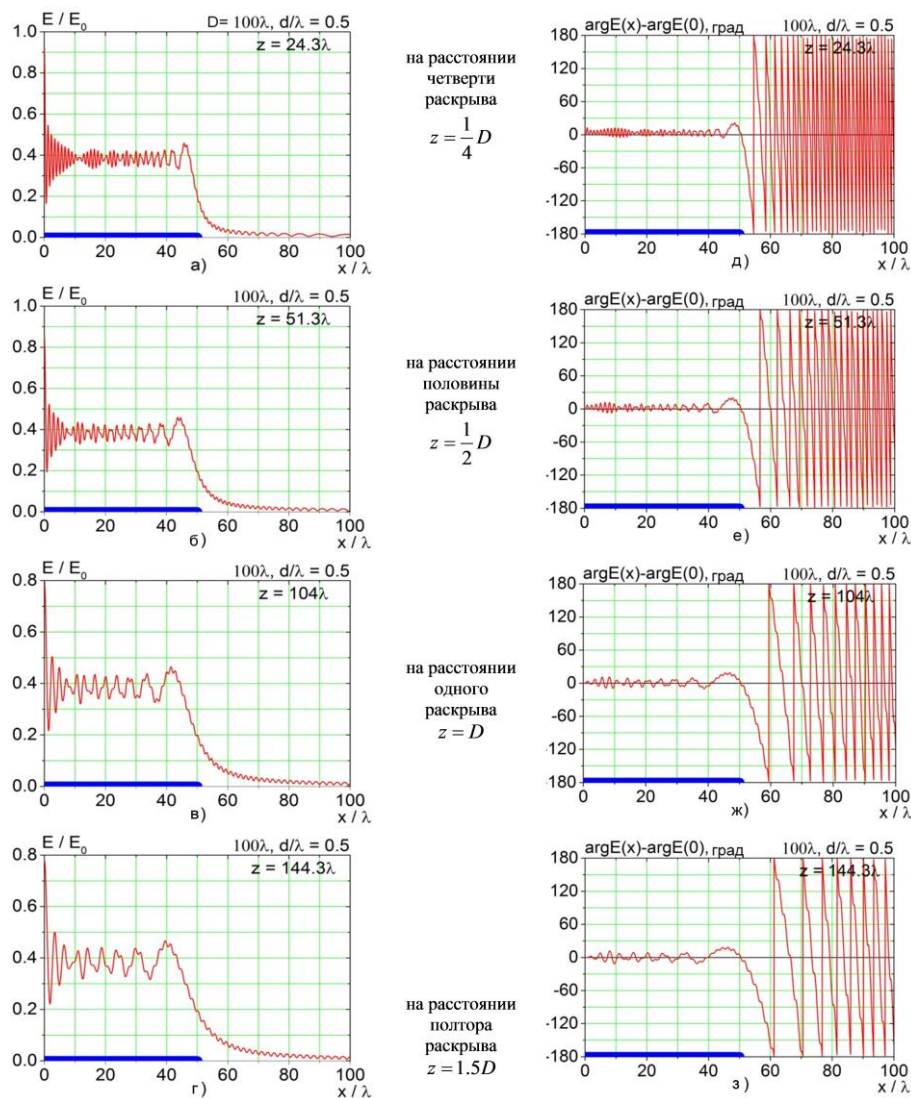


Рис. 3. Зависимость амплитуды и фазы поля решетки ($d = 0.5\lambda$) с круглым раскрывом 100λ от поперечной координаты x на разных расстояниях z от раскрыва антенны.

1. Увеличение диаметра антенны приводит к уменьшению амплитуды поля в его минимумах. Следовательно, в ближней зоне радиолокационных и телекоммуникационных радиоэлектронных систем с многокольцевыми антенными решетками образуются «мертвые зоны», которые необходимо учитывать на практике.

2. Протяженность прожекторного луча и области осцилляций амплитуды и мощности электромагнитного поля увеличивается с увеличением диаметра раскрытия антенных решеток приблизительно по квадратичному закону.

Рассмотрим далее особенности распределения амплитуд и фаз электромагнитных полей в пространстве в ближней зоне эквидистантных синфазных многокольцевых антенных решеток изотропных излучателей при изменении их диаметра и расстояния между излучателями. Расчеты, аналогичные представленным выше, проведены для диаметров раскрытия решеток от 2 до 200 длин волн при изменении расстояния между ближайшими излучателями от 0,5 до 2,0 длин волн. На Рис 4, 5 приведены расчеты распределения амплитуды и фазы электрического поля в ближней зоне наиболее важного для практики случая разреженной нефазированной эквидистантной антенной решетки с максимальным достижимым коэффициентом направленного действия при расстоянии между излучателями $d=0,9\lambda$. На Рис. 6, 7 приведены такие же расчеты для разреженной решетки при $d=1,1\lambda$. В этом случае, как показано в [4], КНД антенной решетки уменьшается за счет возникающих в пределах видимых углов дифракционных лепестков диаграммы направленности до минимального возможного значения. Как было отмечено выше, в расчетных вариантах антенных решеток диаметр раскрытия был выбран максимально близким к заданому $D=100\lambda$.

Из результатов расчетов, в частности, из Рис. 4 – 7 видно, что в зависимости от расстояния от антенны до текущих точек наблюдения в ближней зоне амплитуда электрического поля изменяется по осциллирующим закономерностям, как и в случае фазированных кольцевых решеток (Рис. 2, 3) и непрерывных апертурных антенн с раскрытием круглой формы [2]. При этом, как и ранее, по мере удаления точки наблюдения от раскрытия, период осцилляций увеличивается. Объясняется это тем, что в любой точке наблюдения в ближней зоне антенной решетки амплитуда поля есть суммарный эффект интерференции электромагнитных волн, излученных каждым элементом решетки. При этом, как и ранее, по мере удаления точки наблюдения от раскрытия, период осцилляций увеличивается. Размах осцилляций в зависимости амплитуды поля от продольной координаты z в направлении нормали к раскрытию, т.е. продольные градиенты амплитуды поля, в рассматриваемых случаях довольно большие, близкие к градиентам поля в ближней зоне непрерывных апертурных антенн с круглым раскрытием, исследованным в [2]. Существенные отличия в поведении поля имеют место непосредственно вблизи раскрытия антенной решетки. Из Рис. 2, 4, 6 видно, что амплитуда поля вблизи решетки уменьшается не только в минимумах поля, но и в его максимумах. Расчеты показали, что зависимости $E(z/\lambda)$, близкие к характерным для прожекторного луча без значительного изменения максимальных уровней амплитуды поля при увеличении расстояния, имеют место на расстояниях, больших диаметра раскрытия. Распределения амплитуды и фазы поля в поперечных сечениях $z = const$ при изменении расстояния между излучателями от 0,5 до 0,9 длины волны такие же, как в прожекторном луче (см. Рис. 3, 5). Заметим, что такие же зависимости имеют место и в случае линейных антенных решеток [3].

Рассмотрим далее поведение поля в ближней зоне разреженной антенной решетки при увеличении расстояния между излучателями больше одной длины волны, когда в диаграмме направленности в области реальных углов наблюдения появляются первые дифракционные лепестки. На Рис. 6, 7 представлены соответствующие расчеты в случае $d = 1,1\lambda$, из которых следуют важные для практики выводы:

1. В разреженных кольцевых антенных решетках мощность электромагнитного поля в ближней зоне концентрируется непосредственно вблизи раскрытия антенны как в случае линейных непрерывных и дискретных антенн, в отличие от непрерывных антенн с раскрытием круглой формы, в которых мощность концентрируется на существенном расстоянии от раскрытия [2].

2. На малых расстояниях от раскрытия разреженной решетки (не больше $0,25 D/\lambda$), как видно из Рис. 6б, амплитуда поля увеличивается почти в 9 раз по сравнению с амплитудой поля на излучателях.

Это явление «псевдофокусировки» электромагнитных полей в ближней зоне кольцевых разреженных антенных решеток может привести к электрическому пробое антенны, перегреву материальной среды в некоторой локальной области и другим нежелательным явлениям, поэтому должно учитываться на практике. В поперечных плоскостях на малых расстояниях от раскрытия поле переменноразное (Рис. 7д), а его амплитуда в зависимости от поперечной координаты изменяется по нерегулярным осциллирующим закономерностям (Рис. 7а).

56 кругов с 9577 источниками сферической волны
 $d/\lambda = 0.9$ $D/\lambda = 100.8$ $R_{03}/\lambda = 20\ 321$

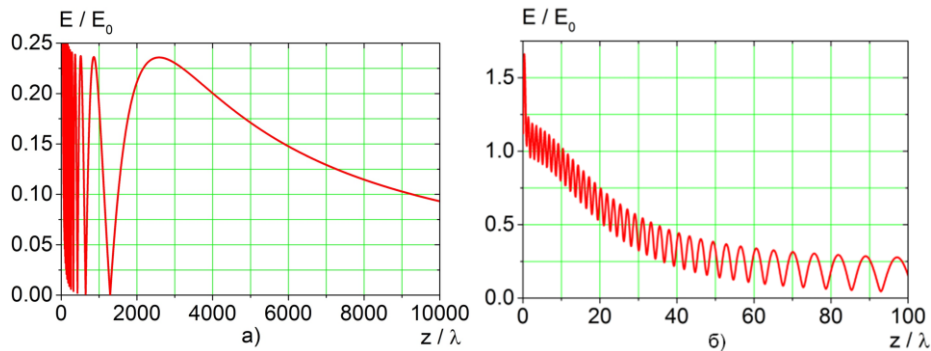


Рис. 4. Зависимость амплитуды поля решетки ($d = 0.9\lambda$) с круглым раскрывом с диаметром 100λ от расстояния в направлении нормали к раскрыву: а) – до половины расстояния дальней зоны ; б) - до расстояния, равного размеру раскрыва

56 кругов с 9577 источниками сферической волны.

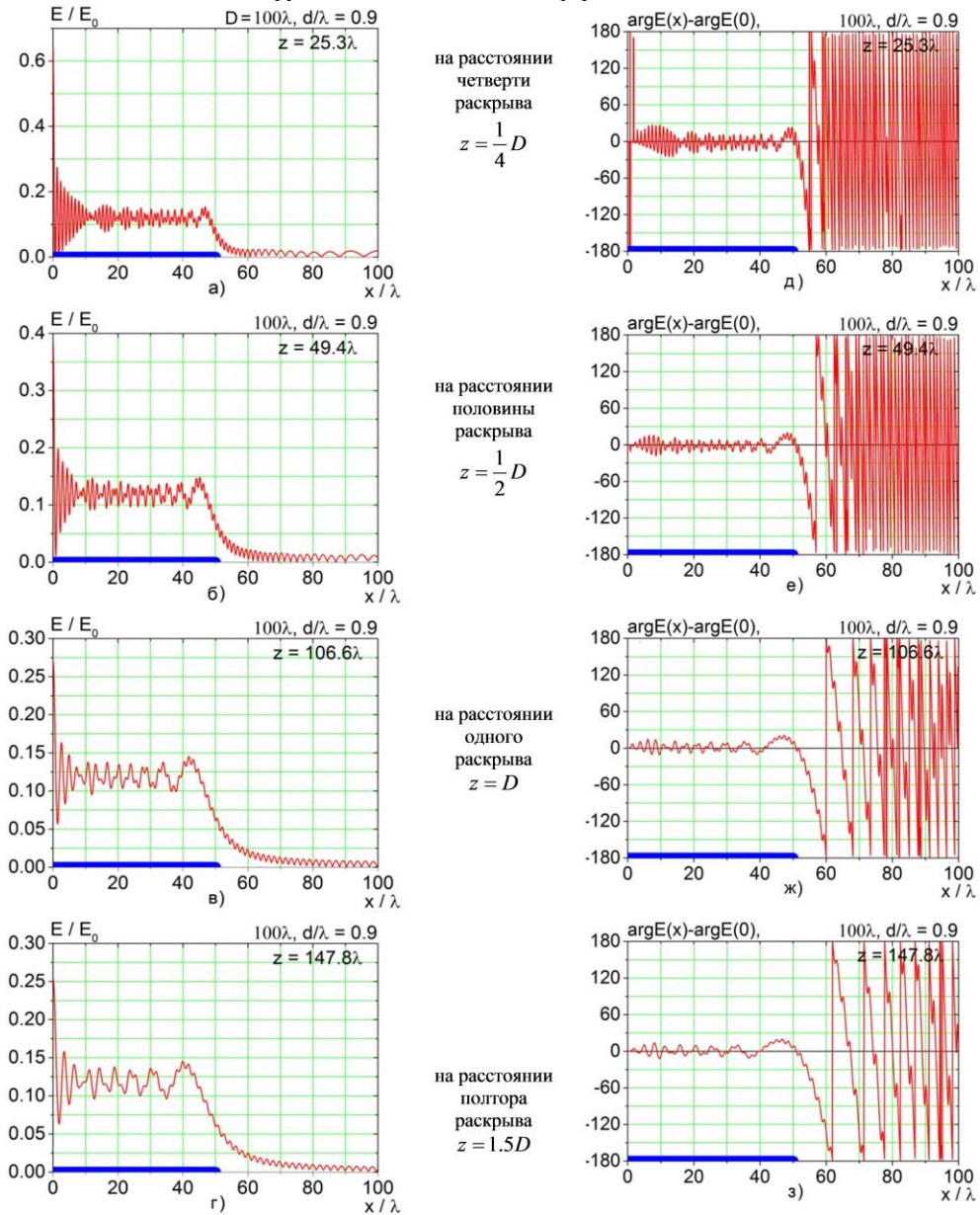


Рис. 5. Зависимость амплитуды и фазы поля решетки ($d = 0.9\lambda$) с круглым раскрывом 100λ от поперечной координаты x на разных расстояниях z от раскрыва антенны.

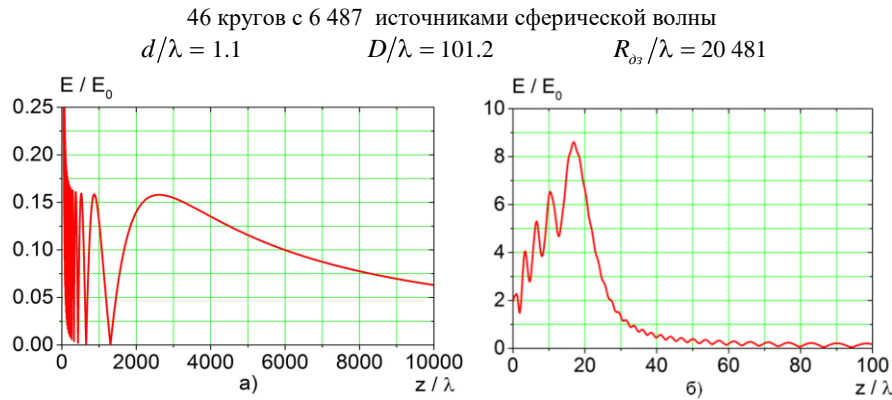


Рис. 6. Зависимость амплитуды поля решетки ($d = 1.1\lambda$) с круглым раскрытием с диаметром 100λ от расстояния в направлении нормали к раскрытию: а) – до половины расстояния дальней зоны; б) – до расстояния, равного размеру раскрытия.

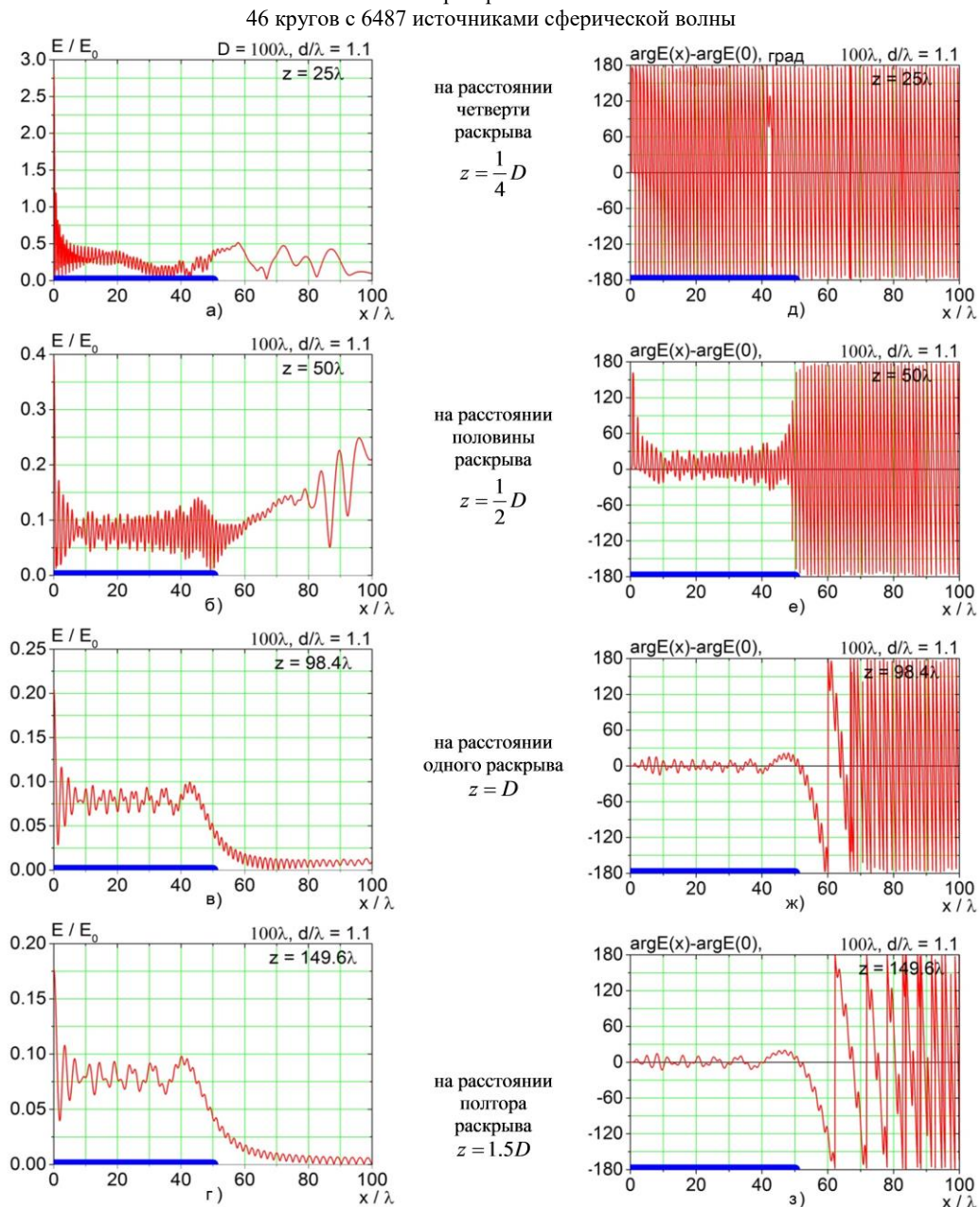


Рис. 7. Зависимость амплитуды и фазы поля решетки ($d = 1.1\lambda$) с круглым раскрытием диаметром 100λ от поперечной координаты x на разных расстояниях z от раскрытия антенны.

3. На расстоянии около половины раскрыва разреженной антенной решетки зависимость амплитуды поля от продольной координаты приняла регулярный характер (Рис. 6б), однако в поперечном сечении пространства наблюдения на этом расстоянии появилась аномалия – увеличение амплитуды поля вне кругового цилиндра с диаметром, равным диаметру раскрываемого кольцевой антенной решетки (Рис. 7б). Очевидно, что это явление связано с появлением дифракционных лепестков в диаграмме направленности исследуемой антенны. Фазовое распределение поля в этом сечении, как видно из Рис. 7е, осциллирующее в ограниченных пределах и в среднем близко к постоянному в пределах цилиндра, и переменноразное вне цилиндра.

4. На расстояниях, примерно равных и больших диаметра раскрыва разреженной антенной решетки пространственное распределение амплитуды и фазы поля в ближней зоне приобретает характер прожекторного луча. Отметим, что эти явления в ближней зоне разреженных многокольцевых антенных решеток – появление «следа» интерференционных лепестков диаграммы направленности в ближней зоне на расстоянии около половины длины антенны и формирование близкого к плоскому фронта волны в сечении, в котором расположена антенна, на расстояниях, равных или больших длины антенны, имеет место и в случае ближней зоны линейных разреженных антенных решеток больших электрических размеров (см. Рис. 1в и 4б, в, е, ж) в [3].

При увеличении расстояния между излучателями нарушается равномерный характер осцилляций амплитуды поля в ближней зоне антенны. В частности, в разреженных антенных решетках при $d=1,1\lambda$, по мере удаления точки наблюдения от раскрыва амплитуда поля увеличивается, а потом довольно быстро уменьшается. Также в этом случае, имеет место увеличение амплитуды и мощности поля в областях пространства вне прожекторного луча, чего не наблюдается в случаях непрерывных антенн с раскрывом круглой формы и в апертурных кольцевых антенных решетках с меньшими расстояниями между излучателями.

ВЫВОДЫ

1. Разработано математическое обеспечение решения внешней векторной задачи электродинамики об излучении эквидистантных однородных синфазных плоских многокольцевых антенных решеток с раскрывом круглой формы в ближней и промежуточной зонах наблюдения. Проведенные детальные расчеты амплитудных и фазовых характеристик электромагнитных полей как в направлении нормали к раскрыву, так и в зависимости от поперечных координат при изменении диаметра раскрыва от 0,5 до 200 длин волн и расстояний между излучателями от 0,25 до 2 длин волн, позволили изучить фундаментальные эффекты при формировании пространственного распределения электромагнитных полей в ближней зоне антенных решеток.

2. Из анализа результатов расчетов показано, что если размеры апертуры подобных антенн не превышают одной - полутора длин волн амплитуда поля в направлении нормали к раскрыву равномерно и довольно быстро уменьшается и прожекторные лучи не формируются, как и в случае линейных антенн. Расстояние дальней зоны таких антенн равно приблизительно двум длинам волн.

3. В случае апертурных антенных решеток с раскрывом круглой формы диаметром полторы – две и больше длин волн в ближней зоне формируется прожекторный луч, представляющий собой локально ограниченную слабонеоднородную плоскую волну, в которой в процессе распространения сохраняется неизменной средняя амплитуда поля. В отличие от непрерывных апертурных антенн с раскрывом круглой формы, в которых в прожекторном луче средняя амплитуда поля равна ее значению в центре раскрыва, в многокольцевых эквидистантных антенных решетках средняя амплитуда поля в ближней зоне зависит от числа излучателей, расстояния между ними и электрических размеров раскрыва.

4. Показано, что перепады амплитуды поля в прожекторном луче в направлении нормали к раскрыву, то есть продольные градиенты амплитуды поля, в случае многокольцевых антенных решеток значительно больше, чем в случае линейных, квазилинейных, прямоугольных и квадратных апертур. При увеличении диаметров круглых апертур значительно уменьшаются минимальные значения амплитуд полей в ближней зоне, т.е. образуются "мертвые зоны" в радиолокационных, телекоммуникационных и технологических радиоэлектронных системах, работающих в ближней зоне антенных устройств.

5. Увеличение расстояния между излучателями приводит к нарушению равномерного характера осцилляций амплитуды и мощности электромагнитного поля в ближней зоне однородных апертурных антенных решеток осесимметричной формы. Обнаружено явление увеличения амплитуды поля вне прожекторного луча в ближней зоне разреженных кольцевых антенных решеток

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Authors' ORCID ID

N.N. Gorobets  <https://orcid.org/0000-0003-3022-9044>

A.S. Lebedev  <https://orcid.org/0000-0002-7278-1447>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е. Волновые процессы в ближней зоне слабонаправленных апертурных излучателей электромагнитных волн. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». 2015. Вып. 183. С. 105–115.
2. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е. Волновые процессы в ближней зоне апертурных антенн с раскрывом круглой формы. Вісник Харківськ. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Серія “Радіофізика та електроніка”. 2017. Вип. 26. С. 24-34
3. Горобец Н.Н., Лебедев А.С. Электромагнитные поля в ближней зоне линейных антенных решеток. Вісник Харківськ. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна, Сер. Радіофізика та електроніка. 2016, Вип. 25. С.3-11.
4. Булгакова А.А., Горобец Н.Н., Катрич В. А., Лященко В. А. Коэффициент направленного действия антенных решеток. Радиофизика и радиоастрономия. 2016, Т. 21, № 4. С. 285–297.
5. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием (введение в теорию). М.: Антенны. 2002. № 2-3. 232 с.
6. Hu M.K. Fresnel Region Field Distribution of Circular Aperture Antennas // IRE Trans. Antennas and Propagation. 1960. V. 8. P. 344-346.