

УДК 621.396.671

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

**Н.Н. Горобец, А.С. Лебедев**

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4; Харьков, 61022, Украина.*

*e-mail: Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 10 июня 2016 г.

Рассчитаны пространственные распределения амплитуд и фаз электрического поля в ближней и промежуточной зонах линейных эквидистантных однородных решеток изотропных излучателей при изменении числа излучателей и расстояния между ними в широких пределах. Показано, что в линейных решетках, в отличие от апертурных антенн, в ближней зоне прожекторный луч не формируется, а зависимость амплитуды поля от расстояния имеет убывающий осциллирующий характер. При увеличении расстояния между излучателями амплитуды осцилляций увеличиваются и нарушается их регулярный характер.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электромагнитные поля; антенные решетки; ближняя, промежуточная, дальняя зона антенны; прожекторный луч

Розраховані просторові розподіли амплітуд і фаз електричного поля в ближній і проміжній зонах лінійних еквідистантних однорідних решіток ізотропних випромінювачів при зміні числа випромінювачів і відстані між ними в широких межах. Показано, що в лінійних решітках, на відміну від апертурних антен, в ближній зоні прожекторний промінь не формується, а залежність амплітуди поля від відстані має спадаючий осцилюючий характер. При збільшенні відстані між випромінювачами амплітуди осциляцій збільшуються і порушується їх регулярний характер.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** електромагнітні поля; антенні решітки; ближня, проміжна, дальня зона антени; прожекторний промінь

The spatial distributions of the amplitudes and phases of the electric field in the near and intermediate zones for the linear equidistant homogeneous antenna arrays of the isotropic radiators, when the number of radiators and the distance between them have been changing in a wide range, were calculated. It is shown that in the linear antenna arrays, as opposed to the aperture antennas, searchlight beam is not formed in the near zone, and the dependence of the field amplitude on the distance has a downward oscillating character. The amplitudes of the oscillation are increased and disturbed their regular character with increasing the distance between the radiators.

**KEY WORDS:** electromagnetic fields; antenna arrays; near, intermediate and far zones of antenna array; searchlight beam.

### ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные поля и волны в ближней и промежуточной зонах наблюдения необходимо знать для многих приложений на практике. Отметим основные из них.

1. Повышение точности расчета характеристик остронаправленных параболических зеркальных антенн за счет использования более точной математической модели облучателя, учитывающей поля на конечных расстояниях от зеркала. Наиболее впечатляющие применения подобных антенн в мировой практике – плечи гигантских крестообразных и Т-образных радиотелескопов.

2. Обеспечение транспортной и мобильной радиосвязи в тоннелях (особенно в метрополитене) и в шахтах.

3. Системы обнаружения и защиты периметров охраняемых границ территорий, сооружений и зданий.

4. Ближняя радиолокация на транспорте.

5. Подповерхностная радиолокация.

6. Технологические микроволновые установки в промышленности.

7. Устройства для беспроводной бесконтактной передачи электрической энергии электромагнитным полем.

8. Датчики электромагнитных полей в панорамных радиоэлектронных системах и в системах неразрушающего контроля диэлектрических изделий и устройств.

9. Уточнения расстояния дальней зоны при прецизионных измерениях параметров и характеристик антенных систем.

10. Медицинские приборы для диагностики и лечения заболеваний.

Цель статьи – теоретическое исследование физических закономерностей формирования пространственных распределений электромагнитных полей на конечном расстоянии в ближней и промежуточной зонах наблюдения линейных антенных решеток при изменении их электрических размеров и расстояния между излучателями.

### ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Характеристики даже простейших антенных решеток – линейных зависят от большого количества описывающих их параметров, которые существенно влияют на пространственное распределение поля в ближней, промежуточной и дальней зонах наблюдения. Это прежде всего электрическая длина антенны, тип излучателя – элемента решетки, расстояние между излучателями, выраженное в долях длины волны, амплитудное и особенно фазовое распределения источников поля вдоль антенны, согласование излучателей со свободным пространством и с фидерным трактом и др. Большое значение имеют и элементы конструкции и крепления антенны, а также материальная среда вблизи антенны. При этом только в дальней зоне наблюдения, определяемой формулой  $R \geq 2L^2/\lambda$  ( $L$  – длина антенны,  $\lambda$  – длина волны), амплитуды векторов напряженности электрического и магнитного полей обычно зависят от расстояния от антенны до точки наблюдения как в сферической волне – обратно пропорционально первой степени расстояния. В ближней и промежуточной зонах эта зависимость описывается сложными и громоздкими формулами и может быть определена только расчетным путем. Таким образом, главной задачей исследования электромагнитных полей в ближней и промежуточной зонах наблюдения антенных систем является изучение физических закономерностей формирования зависимости амплитудных, фазовых и поляризационных характеристик полей от расстояния от антенны до точки наблюдения.

Для практических потребностей поля в ближней зоне необходимо знать на плоских, сферических или цилиндрических поверхностях или в определяемых объемах. В любом из этих вариантов теоретического решения задачи в итоге можно построить распределение амплитуд векторов напряженности электрического или магнитного полей или активной и реактивной мощности электромагнитного поля в пространстве вблизи антенны.

Из физических представлений, доминирующих в настоящее время, следует, что из всех электрических и геометрических параметров антенных решеток наиболее значительное влияние на характеристики электромагнитного поля в ближней зоне имеет электрическая длина антенны и расстояние между излучателями. В [1] показано, что количественный анализ электромагнитных полей и волн в ближней и промежуточной зонах наблюдения может быть сильно упрощен, если не требуется знание полей на очень малых расстояниях от антенны. Предлагается антенну больших электрических размеров разбить на множество малых по сравнению с длиной волны размеров, таких, что расстояние дальней зоны этих излучателей меньше или равно минимальному расстоянию, на котором рассчитываются поля и волны исследуемой антенны больших электрических размеров. В качестве электрически малых элементов могут быть изотропные излучатели, электрические и магнитные диполи Герца, излучатели Гюйгенса и их варианты, имеющие минимально возможные расстояния дальней зоны. В случае антенных решеток излучатели – элементы решетки могут быть любыми – проволочными вибраторами, щелевыми, волноводными, рупорными и т.д., но минимальное расстояние, на котором можно рассчитывать поля в ближней зоне антенных решеток любых электрических размеров, должно быть больше расстояния дальней зоны излучателя – элемента решетки.

Отметим, что предложенное в [1] решение задачи расчета полей вблизи антенн произвольных электрических размеров апробировали многие авторы [2, 3] и получили адекватные физическим процессам в ближней зоне количественные результаты.

Для изучения общих особенностей полей в ближней зоне антенных решеток с разным электрическим расстоянием между излучателями в ближней зоне дискретных антенных систем примем кроме отмеченных выше еще следующие упрощения задачи:

- в качестве излучателей – элементов решетки выберем гипотетические изотропные излучатели, излучение которых имеет характер однородной сферической волны;
- амплитудное и фазовое распределение источников поля в раскрыве антенны примем постоянным.
- взаимное влияние излучателей в решетке примем пренебрежительно малым.

При этих предположениях расчет пространственного распределения амплитуд и фаз электрического и магнитного поля на конечном расстоянии от антенной решетки сводится к суммированию полей от всех источников – элементов решетки в соответствующей точке наблюдения с координатами  $x, y, z$ .

В случае линейных антенных решеток

$$E(x, y, z) = \sum_{n=-N}^N E_n(x, y, z),$$

причем амплитуда и фаза поля  $E_n$  определяются расстоянием  $n$ -го излучателя до точки наблюдения.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Как отмечено выше, амплитуды электрического или магнитного поля в каждой точке наблюдения рассчитывались согласно принципу суперпозиции в электродинамике. Учет ближних полей реальных излучателей – элементов решетки при заданных амплитудах и фазах токов или полей в каждом излучателе не представляет особых затруднений. Несколько сложнее обстоит дело с адекватным учетом эффектов взаимного влияния излучателей и краевых эффектов в антенных решетках конечных размеров. Но эти задачи также к настоящему времени решены для основных используемых на практике вариантов излучателей – элементов антенных решеток. Однако, учет этих особенностей теории антенных решеток сильно усложняет решение поставленной задачи и возможен только для вполне конкретных типов излучателей, т.е. в определенных частных случаях. В то же время использование в качестве математической модели элемента решетки изотропного излучателя сферической волны и постоянного амплитудно-фазового распределения источников электромагнитного поля позволит изучить особенности полей в ближней и промежуточной зонах наблюдения, обусловленные дискретным расположением отдельных излучателей в антенне, т.е. изучить собственно «решеточные» эффекты в ближней зоне дискретных антенных систем.

С учетом изложенного разработано математическое обеспечение и проведены расчеты амплитуд и фаз вектора напряженности электрического поля в зависимости от расстояния в направлении нормали к линейной антенной решетке, совпадающем с направлением главного максимума диаграммы направленности, а также в двух сечениях  $xOz$  и  $yOz$  на плоскостях  $z = const$  на разных удалениях от антенной решетки. Расчеты проведены для линейных решеток с числом излучателей, изменяющимся от двух до 420 при трех вариантах расстояния между излучателями в линейке. Первый вариант  $d=0,5\lambda$  соответствует классической фазированной антенной решетке с широкоугольным сканированием [4]. В [5, 6] показано, что в этом случае характеристики направленности, в частности диаграммы направленности и коэффициент направленности линейных и апертурных антенных решеток весьма близки к характеристикам непрерывных линейных и апертурных антенн. Второй вариант  $d=0,9\lambda$  соответствует случаю нефазированной антенной решетки с максимумом коэффициента направленного действия при заданном числе излучателей [5, 6]. Последний случай соответствует ситуации, когда в диаграмме направленности синфазной антенной решетки формируются кроме главного еще два дифракционных лепестка и увеличиваются уровни боковых лепестков, а коэффициент усиления антенны резко уменьшается (эффект «ослепления») нефазированных антенных решеток [5, 6]).

Расчетные напряженности поля нормированы к значению  $E_0$  напряженности поля в излучателе – элементе решетки, расположенном в середине антенны в начале системы пространственных координат (декартовых или сферических), связанной с антенной.

На рис.1 представлены зависимости относительных амплитуд напряженности электрического поля линейной антенной решетки длиной 10; 50 и 100 длин волн при указанных выше расстояниях между излучателями 0,5; 0,9 и 1,1 длины волны. Из рисунка следует важный для практики вывод: при любых длинах антенны и при любых расстояниях между излучателями в линейной решетке излучателей в ближней зоне с увеличением расстояния амплитуда поля убывает. Следовательно, линейные антенны в отличие от апертурных непрерывных и дискретных [7, 8], прожекторный луч не формируют. Видно, что в приведенных на рис. 1 вариантах антенн на равномерно убывающую зависимость  $E/E_0$  от  $z/\lambda$  накладывается осциллирующая зависимость, причем период и глубина осцилляций зависят и от электрических размеров антенны, и от расстояния между излучателями.

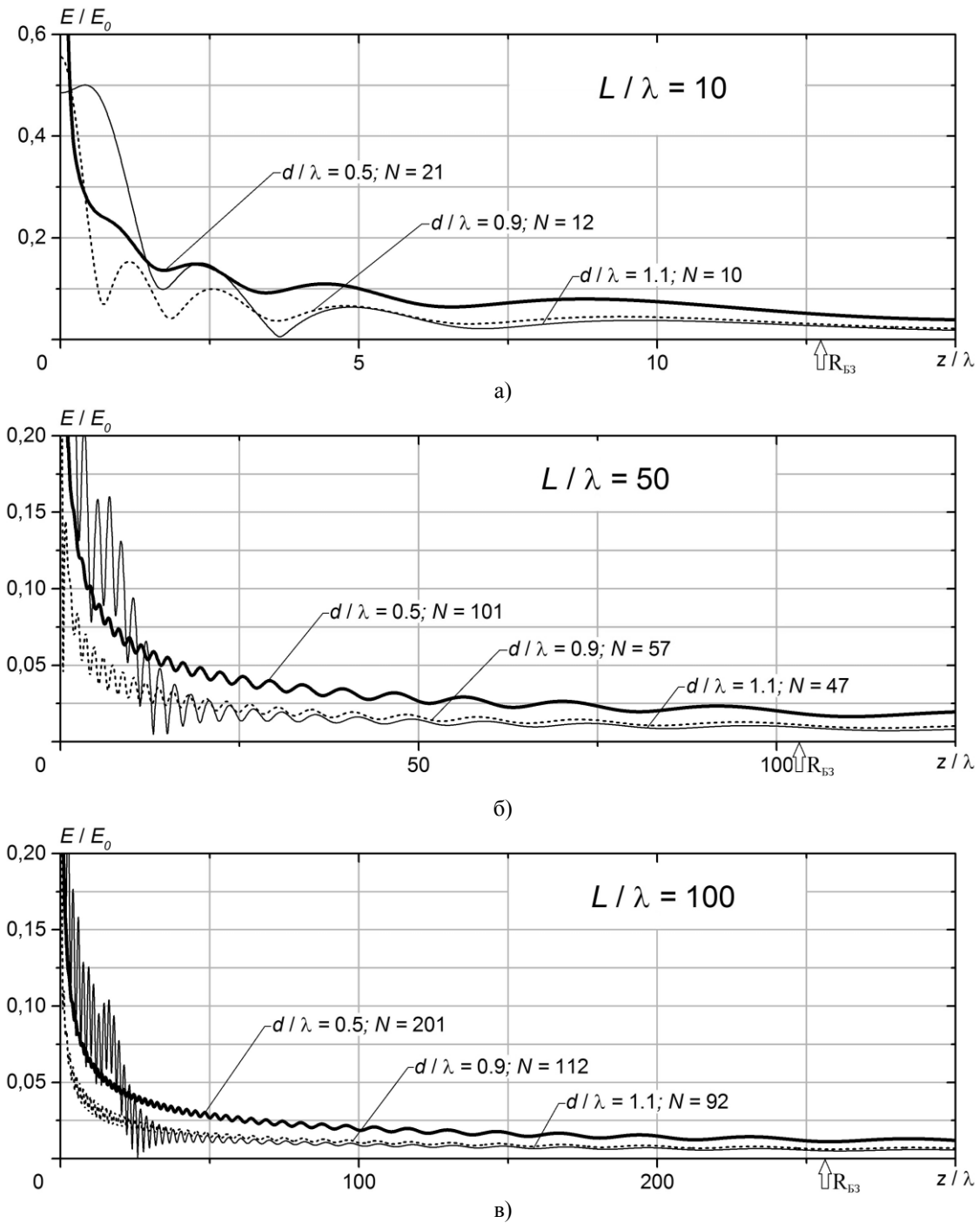


Рис. 1. Зависимость амплитуд вектора напряженности электрического поля линейных антенных решеток разной длины от расстояния в направлении нормали к антенне: а) – длина равна 10 длин волн; б) – 50 длин волн; в) – 100 длин волн

Отметим, что осциллирующий характер зависимости амплитуды поля от расстояния от середины антенной решетки до точки наблюдения в ближней и промежуточной зоне нарушается только при минимальных электрических размерах антенны. В [9] показано, что при  $N=2$  исследуемая зависимость в направлении нормали к антенне имеет равномерно убывающий характер при любом расстоянии между излучателями. Но уже при трех или четырех излучателях в этой зависимости появляются осциллирующие слагаемые, причем минимумы амплитуды поля тем ближе к антенне, чем меньше расстояние между излучателями в решетке.

Прейдем далее к анализу амплитудных и фазовых характеристик поля в пространстве вблизи линейной антенной решетки.

На рис. 2 представлены зависимости амплитуды и фазы электрического поля от поперечных координат  $x$  и  $y$  на плоскостях  $z_n = \text{const}$ . Зависимость от координаты  $x$  (утолщенные линии) рассчитана в плоскости  $\varphi = 0$ , в которой расположена линейная антенная решетка. Зависимость от координаты  $y$  (тонкие линии) рассчитана в ортогональной плоскости  $\varphi = 90^\circ$ . На рис. 2 приведены расчеты на расстояниях от антенны, примерно равных одной четверти ее длины (рис. 1а), половины длины (рис. 1б), одной длины (рис. 1в) и полторы длины (рис. 1г). Как и выше, амплитуды поля нормированы к  $E_0$ , а фазы поля – к ее значению в точке  $x=0; y=0; z=z_n$ . Из рисунка видно, что в плоскости  $\varphi = 0$ , в которой расположена линейная антенна, амплитудное и фазовое распределение поля близко к однородному распределению поля на антенне и в пространстве имеет столбобразную форму. При этом имеют место осцилляции и амплитуды, и фазы поля при изменении поперечной координаты точки наблюдения. По мере удаления точки наблюдения от антенны период осцилляций амплитуды и фазы поля уменьшается. Эта особенность поведения поля имеет место как по мере увеличения координаты  $x$  при  $z_n = \text{const}$ , так и по мере увеличения расстояния  $z_n$  от антенны до плоскости наблюдения  $z_n = \text{const}$ .

На рис. 2 по оси  $x/\lambda$  отмечена длина линейной антенной решетки. Видно, что в пределах представленных расчетов для плоскостей наблюдения  $z_n$  до полутора длин антенны на краю  $x/\lambda = L/2\lambda$  амплитуда поля уменьшается примерно в два раза. Фазовое распределение в тех же пределах весьма близкое к постоянному. В ортогональной плоскости наблюдения в зависимости от координаты  $y/\lambda$  и амплитуды, и фазы поля убывают либо с осцилляциями (до  $z_n \leq L$ ), либо равномерно при больших  $z_n$ .

Расчеты показали, что в плоскости наблюдения  $\varphi = 0$ , в которой находится линейная антенная решетка, равномерно убывающая амплитуда поля и квадратичное фазовое распределение наблюдаются на расстояниях  $z_n = \text{const}$ , не меньших половины расстояния дальней зоны, т.е. при  $z_n \geq L^2/\lambda$ .

Из сравнения данных, приведенных на рис. 2, с аналогичными расчетами полей в ближней зоне линейных антенн с непрерывным распределением источников вдоль антенны [10] следует, что при расстояниях между излучателями  $d = 0,5\lambda$  пространственные распределения поля вблизи линейных антенн с дискретным распределением источников поля весьма близки к таковым вблизи линейных непрерывных антенн.

При увеличении расстояния между излучателями до  $0,9$  длины волны вблизи нефазированной антенной решетки с максимальным коэффициентом направленного действия характер пространственного распределения поля в ближней зоне существенно изменяется:

- в направлении нормали к антенне амплитуда поля убывает с большей скоростью (рис. 1);
- число осцилляций в зависимости амплитуды поля от расстояния до точки наблюдения увеличивается (рис. 1);
- амплитуды осцилляций поля увеличиваются (рис. 1);
- протяженность области осцилляций амплитуды поля в зависимости от  $z/\lambda$  незначительно увеличивается;
- осцилляции амплитуды поля в направлении нормали к антенне появляются даже в случае минимального числа излучателей ( $N=2$ );
- в поперечных плоскостях наблюдения  $z = \text{const}$  осцилляции амплитуд и фаз поля увеличиваются, особенно на малых расстояниях от антенны (рис. 3);
- осцилляции амплитуды увеличиваются не только в плоскости  $XOZ$ , в которой расположена антенна (утолщенные линии на рис. 3), но и в ортогональной плоскости (тонкие линии на рис. 3);
- осцилляции амплитуды поля в поперечных сечениях исчезают и пространственное распределение поля в обеих плоскостях наблюдения приобретает монотонно убывающий вид, характерный для дальней зоны наблюдения, на больших расстояниях порядка половины расстояния дальней зоны.

При дальнейшем увеличении расстояния между излучателями описанные выше особенности поведения электромагнитных полей в ближней зоне линейных антенных решеток усиливаются. На рис. 1 приведены зависимости относительной амплитуды электрического поля от продольной координаты  $z/\lambda$ , а на рис. 4 – от поперечных координат  $x/\lambda$  и  $y/\lambda$  при расстоянии между излучателями в антенной решетке  $d=1,1\lambda$ . В этом случае, как было отмечено выше, в диаграмме направленности кроме главного лепестка формируются два дифракционных лепестка, увеличивается количество и уровень боковых лепестков и значительно уменьшается коэффициент направленного действия антенны.

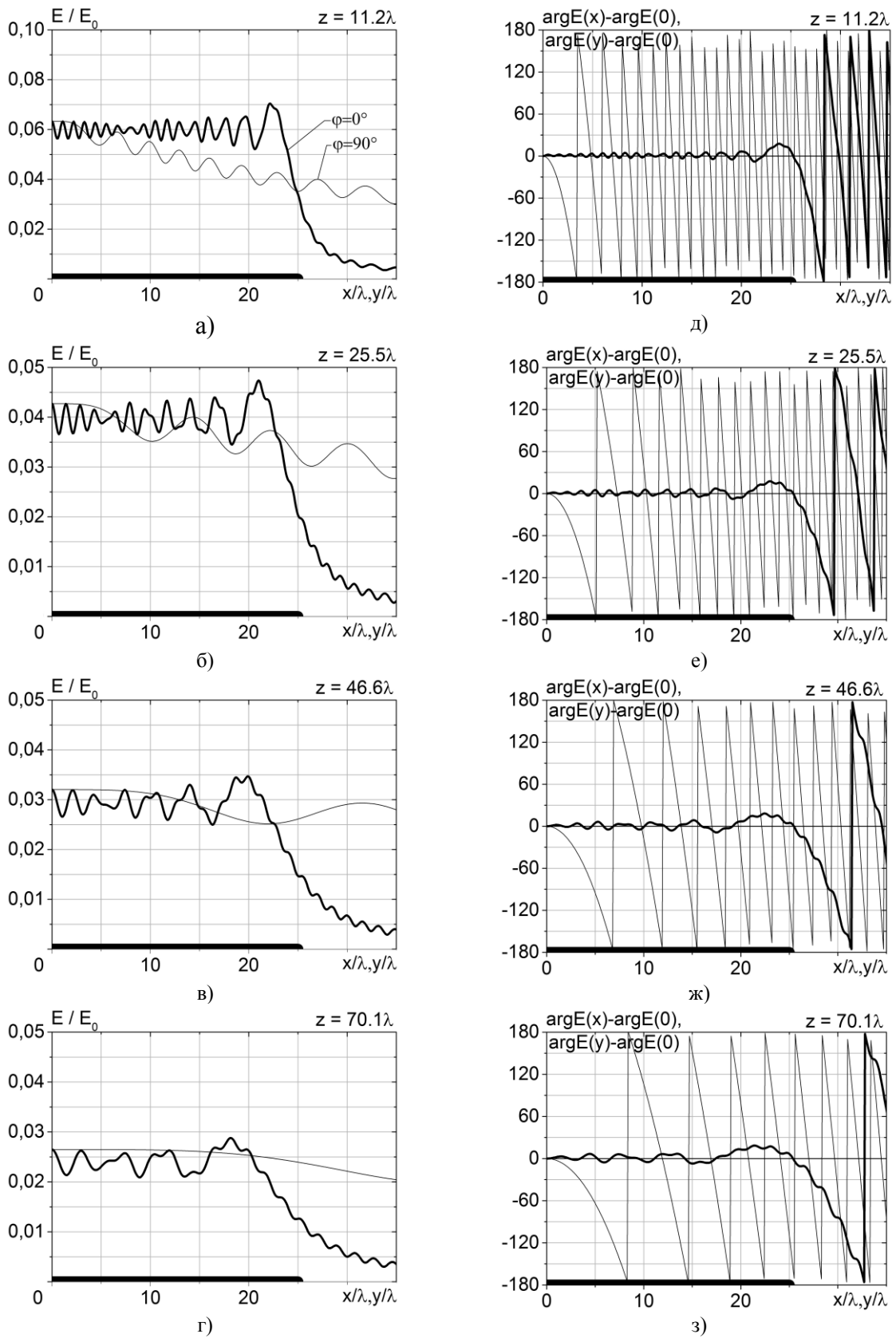


Рис. 2. Зависимость амплитуды и фазы поля решеток ( $d=0.5\lambda$ ) с линейным раскрытием длиной  $50\lambda$  от поперечных координат  $x$  и  $y$  на разных расстояниях  $z$  от раскрытия антенны

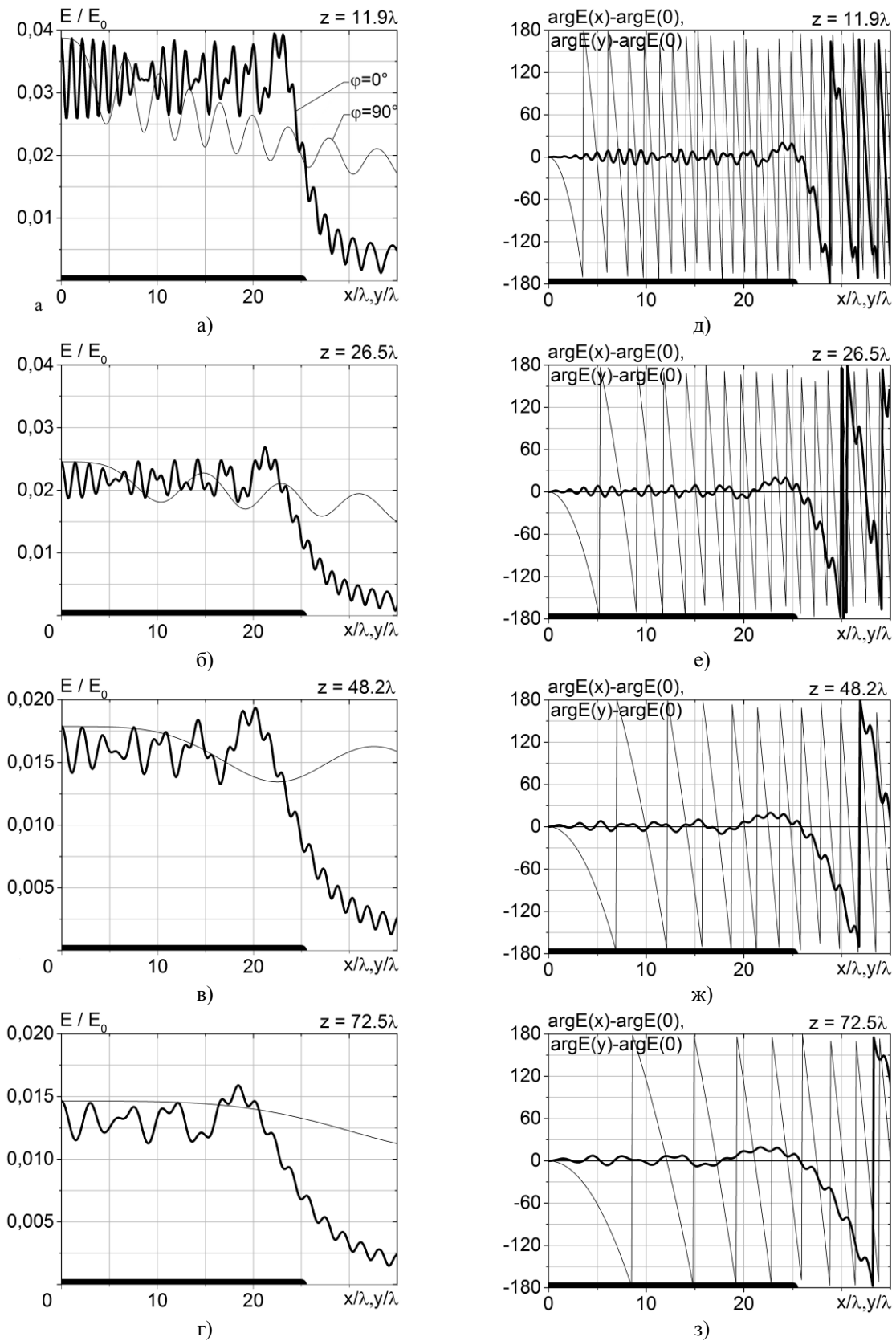


Рис. 3. Зависимость амплитуды и фазы поля решеток ( $d=0.9\lambda$ ) с линейным раскрытием длиной  $50\lambda$  от поперечных координат  $x$  и  $y$  на разных расстояниях  $z$  от раскрытия антенны

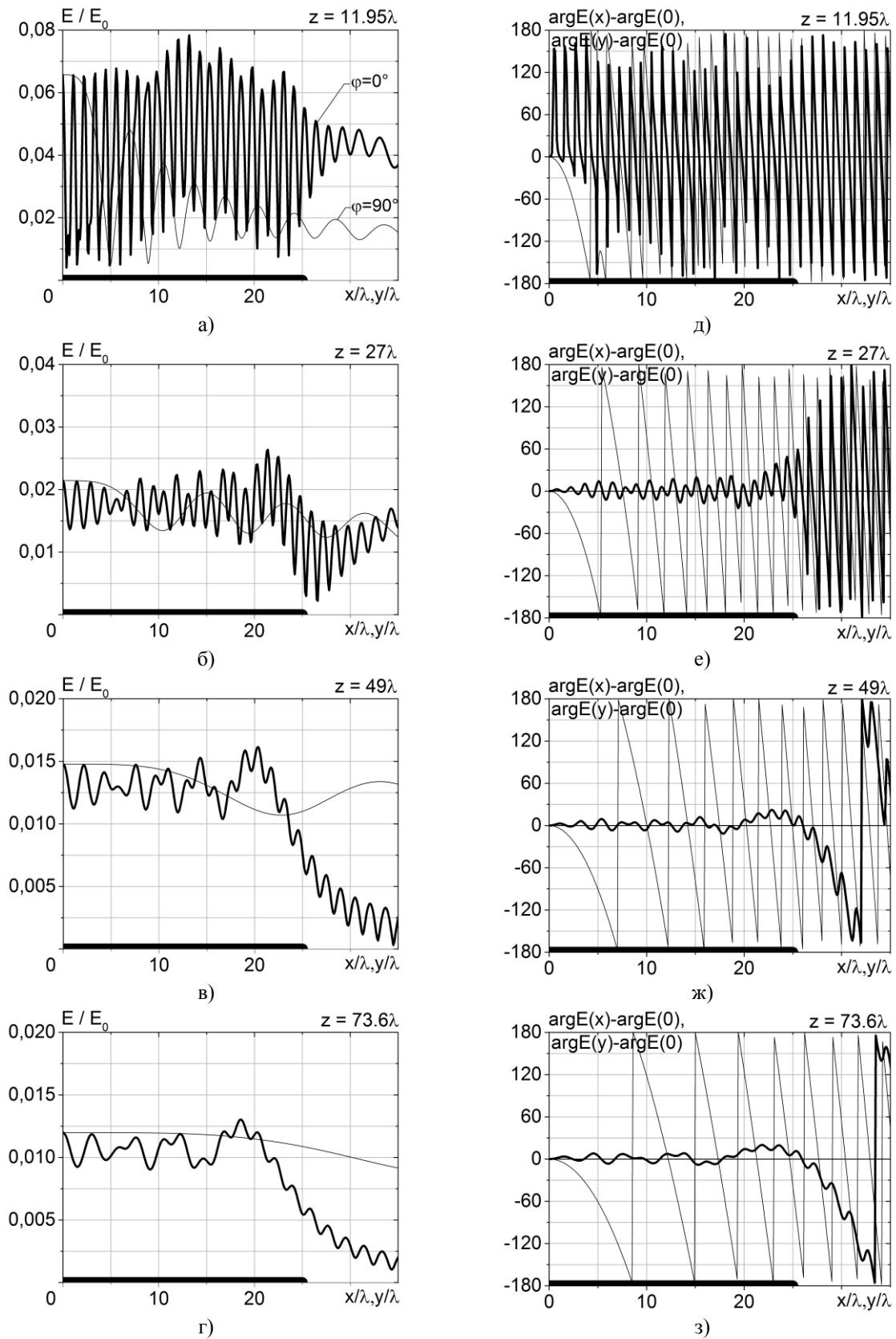


Рис. 4. Зависимость амплитуды и фазы поля решеток ( $d=1.1\lambda$ ) с линейным раскрытием длиной  $50\lambda$  от поперечных координат  $x$  и  $y$  на разных расстояниях  $z$  от раскрытия антенны

Из приведенных на рис. 1 и 4 результатов расчетов видно, что в этом случае поведение поля в ближней зоне антенны изменяется качественно. В частности, на расстоянии четверти длины антенны и



амплитуда, и фаза поля изменяются по сильно осциллирующим зависимостям, весьма отличающимся от заданного постоянного амплитудного и фазового распределения источников поля на антенне. При увеличении расстояния от антенны до половины ее длины осцилляции амплитуды поля значительно уменьшаются, а фазовое распределение (фронт волны) близок к плоскому с незначительными осцилляциями.

### ВЫВОДЫ

1. Прожекторный луч, наблюдаемый в ближней зоне апертурных антенн и с непрерывным, и с дискретным расположением источников поля в излучающем раскрыве, характерным признаком которого являются отсутствие затухания и малые изменения амплитуды напряженности поля в ближней зоне в процессе распространения волны в направлении главного максимума диаграммы направленности, в линейных антеннах не формируется при любых количествах излучателей и электрических длинах антенны и любых расстояниях между излучателями – элементами решетки.

2. В плоскости, в которой расположена антенная решетка, близкое к постоянному распределение амплитуд и фаз напряженности электрического поля имеет место вплоть до расстояний, равных расстоянию ближней зоны антенны, определяемому максимальной длиной антенны соотношением  $R_{AC} \leq 0,25L + 0,5L(L/\lambda)^{1/3}$ .

3. В ближней зоне линейной эквидистантной антенной решетки амплитуда поля в направлении главного максимума диаграммы направленности имеет быстро убывающий характер с осцилляциями, пространственный период которых увеличивается при увеличении расстояния между антенной и точкой наблюдения.

4. При расстоянии между излучателями решетки, не превышающем половину длины волны, характер пространственного распределения поля в ее ближней зоне такой же, как и в ближней зоне линейной антенны с непрерывным распределением источников.

5. При увеличении расстояния между излучателями, т.е. в разреженных антенных решетках, характер пространственного распределения поля в ближней зоне линейных антенных решеток отличается увеличением уровня осцилляций амплитуды и фазы поля и более сложным нерегулярным характером.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hansen R. C. and Bailin L. L. A new method of near field analysis // IRE Trans. Antennas Propagat., December 1959. – Vol. 7. – P. 458-467.
2. Microwave Scanning Antennas. Edited by R. C. Hansen. Vol. 1 – Apertures. New York, London: Academic Press, 1964. – 442 p. (Перевод на русский язык: Москва: Сов. Радио. 1966. – 563p.).
3. Walter C. H. Traveling Wave Antennas // McGraw-Hill, New York, 1965. – 429 p. (Перевод на русский язык: Москва: Энергия. 1970. – 448 p.).
4. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием (введение в теорию). – Москва. : Антенны, 2002. – № 2-3. – 232 с.
5. Горобец Н.Н., Булгакова А.А. Характеристики направленности разреженных антенных решеток. // Вісник Харківськ. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. – №834. – Радіофізика та електроніка. – 2008. Вип.13. – С. 89-94.
6. Bulgakova A.A., Gorobets N.N., Katrich V.A., Lyaschenko V.A. Directivity of large antenna arrays. 9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW-2016), June 20-24, 2016: Proc. - Kharkiv, 2016.
7. Gorobets N. N., Lebedev A.S. Electromagnetic waves in the searchlight beam of antenna arrays large electrical size // 9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW-2016), June 20-24, 2016: Proc. - Kharkiv, 2016.
8. Gorobets N. N., Ovsyannikova Ye. Ye. Wave processes in the near-field zone of large aperture antenna // 9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW-2016), June 20-24, 2016: Proc. - Kharkiv, 2016.
9. Gorobets N. N., Lebedev A. S. Electromagnetic waves near the antenna arrays small electric size // 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'2016). September 05 – 11, 2016. Odessa, Ukrain. – p. 225-227.
10. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е. Влияние размеров и формы излучающего раскрыва на характер пространственного распределения поля вблизи антенны // Вісник Харківськ. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. – № 1094. – “Радіофізика та електроніка”. – 2013, вип. 23. – С. 51-59.