

УДК 621.396.671

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ ВБЛИЗИ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН БОЛЬШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

**Н.Н. Горобец, Е.Е. Овсянникова**

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

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

Поступила в редакцию 14 января 2014 г.

На основе решения внешней задачи электродинамики об излучении апертурных антенн в ближней и промежуточной зонах наблюдения теоретически исследовано амплитудные и фазовые характеристики электромагнитных полей в прожекторном луче квадратной синфазной апертуры с постоянным амплитудным распределением источников поля. Показано, что в прожекторном луче формируется локальная квазиплоская неоднородная волна, амплитуда и мощность которой изменяется в процессе распределения незначительно вплоть до расстояний, равных половине расстояния дальней зоны антенны. Определены пространственные границы прожекторного луча

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электромагнитные поля и волны; апертурные антенны; ближняя, промежуточная и дальняя зона; прожекторный луч

На основі рішення зовнішньої задачі електродинаміки про випромінювання апертурних антен в ближній і проміжній зонах спостереження теоретично досліджено амплітудні і фазові характеристики електромагнітних полів в прожекторному промені квадратної синфазної апертури з постійним амплітудним розподілом джерел поля. Показано, що в прожекторному промені формується локальна квазіплоска неоднорідна хвиля, амплітуда і потужність якої змінюється в процесі розповсюдження незначно аж до відстаней, рівних половині відстані дальньої зони антени. Визначено просторові межі прожекторного променя

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** електромагнітні поля і хвилі; апертурні антени; ближня, проміжна і дальня зона; прожекторний промінь

Based on the solution of the exterior problem of electrodynamics of radiation aperture antennas in the near and intermediate zones are theoretically investigated the amplitude and phase characteristics of electromagnetic fields in the searchlight beam phase square aperture with a constant amplitude distribution of field sources. It is shown that in the searchlight beam is formed by a local non-uniform quasi-plane wave whose amplitude and power which changes in the distribution slightly up to a distance equal to a half the distance far field antenna. The spatial boundaries of the searchlight beam determined

**KEYWORDS:** electromagnetic fields and waves; aperture antenna; near, intermediate and far field; searchlight beam

### ВВЕДЕНИЕ

Излучение электромагнитных волн антеннами больших электрических размеров до недавних пор в основном интересовало специалистов в дальней зоне, так как пространственное распределение полей в дальней зоне, так как пространственное распределение полей в дальней зоне, т.е. диаграмма направленности определяет коэффициент усиления и чувствительность, разрешающую способность и помехоустойчивость радиоэлектронных систем с такими антеннами. Однако в последние годы, появилось множество технических приложений, в которых необходимо знать поля и волны вблизи антенны. Это, прежде всего, ближняя и подповерхностная радиолокация, микроволновая энергетика, воздействие электромагнитных волн на различные материальные среды и на человека, медицинские диагностические и терапевтические приборы и др. К настоящему времени внешняя задача электродинамики об излучении апертурных антенн в общем виде без ограничений на размеры раскрытия антенны решена в сферической системе координат в [1], и в [2] в декартовых координатах.

В [3] представлены расчеты зависимости амплитуды вектора напряженности электрического поля, нормированного к амплитуде вектора напряженности электрического поля в середине излучающего раскрытия антенны, от расстояния от антенны до точки наблюдения в направлении нормали, т.е. в данном случае синфазного раскрытия – в направлении главного максимума диаграммы направленности антенны, для квадратных раскрытий с размерами 20×20; 50×50 и 100×100 длин волн (см. рис.5 в [3]). Показано, что вблизи раскрытия антенны в направлении нормали к нему формируется прожекторный луч, в котором

амплитуда электрического поля осциллирует вокруг ее значения в середине раскрыва с нарастающей величиной и увеличивающимся пространственным периодом по мере удаления точки наблюдения от антенны.

Целью настоящей статьи является изучение изменения амплитудных и фазовых характеристик электрического и магнитного полей, т.е. волновые процессы при излучении электромагнитных волн, на конечном расстоянии от излучающего раскрыва антенны в его ближней, промежуточной и дальней зонах наблюдения.

### АНАЛИЗ АМПЛИТУДНЫХ И ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ПРОЖЕКТОРНОМ ЛУЧЕ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН БОЛЬШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

По разработанным ранее алгоритмам и компьютерным программам аналогично [1-5] рассчитаны амплитудные и фазовые характеристики электрического и магнитного полей на конечном расстоянии от апертурной антенны. Расчеты проводились для квадратных синфазных апертур с постоянными амплитудными распределениями источников поля при их размерах  $20 \times 20$ ;  $50 \times 50$ ,  $75 \times 75$  и  $100 \times 100$  длин волн. Расчеты проводились как в направлении внешней нормали к раскрыву, так и в поперечных этому направлению плоских поверхностях при изменении их расстояния от раскрыва в широких пределах вплоть до половины расстояния дальней зоны, равного  $L^2/\lambda$ .

Результаты расчетов зависимостей амплитуд векторов напряженностей электрического и магнитного полей, нормированных к их значениям в середине излучающего раскрыва, от расстояния в направлении нормали к плоскости раскрыва, представлены на рис.1. В рассматриваемом случае синфазного раскрыва это направление совпадает с направлением главного максимума диаграммы направленности антенны.

Из рис. 1а, на котором показаны относительные амплитуды полей  $E$  и  $H$  на расстояниях от 0,05 до 10000 длин волн, т.е. до половины классического расстояния дальней зоны  $R_{AC} \geq 2L^2/\lambda$ , видно, что нормированные значения полей  $E/E_0$  и  $H/H_0$  совпадают между собой с графической точностью. В более крупном масштабе (см. рис.1б, на котором представлены поля  $E$  и  $H$  до расстояния, равного размеру стороны раскрыва, и рис. 1в, на котором расстояние  $z/\lambda$  изменяется от  $100\lambda$  до расстояния границы ближней зоны  $R_{AC}/\lambda \leq 0,25L/\lambda + 0,5L/\lambda \sqrt[3]{L/\lambda}$ , равной в рассматриваемом случае расстоянию 275 длин волн) отличия полей  $E$  и  $H$  также весьма малы.

Зависимости амплитуд полей  $E$  и  $H$  от расстояния от раскрыва до точки наблюдения имеют осциллирующий характер, причем размах амплитуд полей увеличивается по мере удаления точки наблюдения от раскрыва. Максимум амплитуды поля достигает  $1,8E_0$ , а минимум минимумом –  $0,6E_0$ . Увеличивается также и пространственный период осцилляции амплитуд полей при удалении точки от раскрыва [1]. Так в рассматриваемом случае период первой осцилляции на расстоянии 0,6 длины волны от раскрыва равен 0,8 длины волны, а последний на расстоянии 1122 длины волны равен 8320 длин волн, т.е. увеличился в 1400 раз. Понятно, что осциллирующий характер исследуемой зависимости обусловлен изменением числа синфазных и противофазных зон Френеля, дающих существенный вклад в суммарное поле в каждой точке наблюдения в ближней и промежуточной зонах наблюдения антенны, по мере удаления точки наблюдения от раскрыва [2].

В [1] показано, что при размерах раскрыва, больших  $50 \times 50$  длин волн, в зависимостях амплитуд полей  $E$  и  $H$  от расстояния в направлении нормали к раскрыву квадратной формы появляется локальная область с нарастающими и спадающими амплитудами с весьма малыми их изменениями – не более 4% от среднего значения.

Из изложенного следует, что в направлении нормали к раскрыву квадратной формы в ближней зоне возбуждается и распространяется плоская волна, в которой относительные амплитуды  $E$  и  $H$  полей совпадают, а абсолютные значения связаны через константу, равную волновому сопротивлению свободного пространства  $E/H = W_0$ . Оказалось также, что продольные компоненты векторов напряженности электрического и магнитного полей равны нулю. Расчеты разности фаз электрического и магнитного полей показали, что в направлении нормали к раскрыву эта разность фаз также равна нулю.

Таким образом, анализ волновых процессов при излучении электромагнитных волн в ближней и промежуточной зонах апертурных антенн больших электрических размеров показал, что в этой области пространства в направлении главного максимума диаграммы направленности формируется и распространяется прожекторный луч, который с точки зрения физики явлений представляет собой

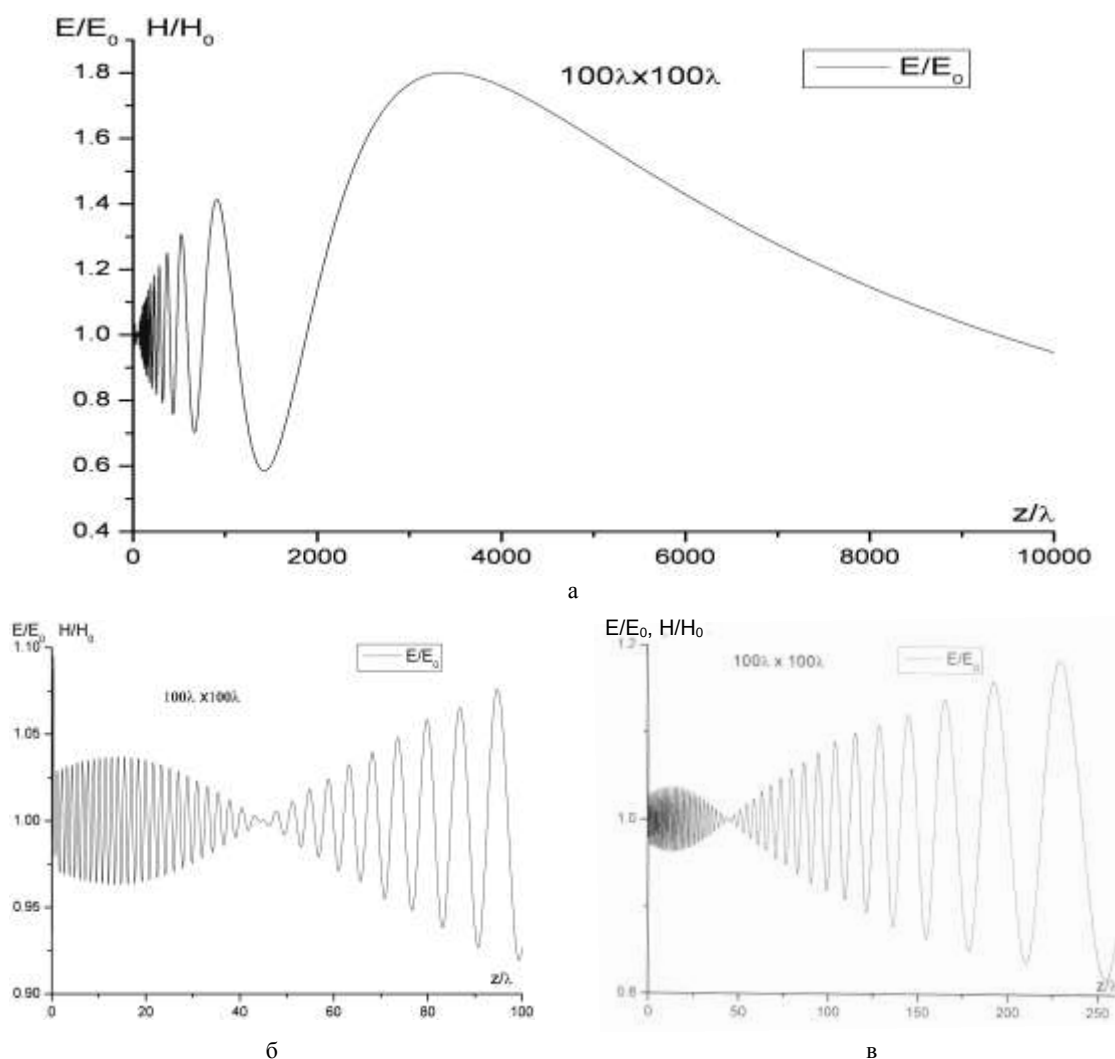


Рис. 1. Зависимость амплитуд электрического и магнитного полей квадратной апертуры с размерами  $100\lambda \times 100\lambda$  от расстояния в направлении нормали к раскрытию:

- а) на расстоянии до половины границы дальней зоны ( $R \leq 10000\lambda$ )
- б) на расстоянии размера стороны раскрытия ( $0 < R/\lambda \leq 100$ )
- в) на расстоянии до границы ближней зоны ( $R \leq 260\lambda$ )

локально плоскую неоднородную бегущую волну, сосредоточенную почти полностью в волновой трубке, поперечное сечение которой незначительно меньше размеров излучающего раскрытия.

Изученное явление распространения электромагнитных волн на значительные расстояния практически без потерь при излучении апертурными антеннами больших электрических размеров может быть использовано на практике для многих приложений. По-видимому, наиболее интересными из них представляется беспроводная бесконтактная передача энергии на летательные аппараты, создание локальных сетей передачи информации, охранные и досмотровые радиоэлектронные системы и т.п. Во всех подобных случаях необходимо знать связь протяженности области прожекторного луча с электрическими размерами апертуры. Очевидно, что в общем виде эта задача не решается, так как структура поля в прожекторном луче сильно зависит не только от размеров антенны, но и от амплитудного и фазового распределения источников поля в раскрытии и формы самого раскрытия. Кроме того, само понятие прожекторного луча количественно не определено.

Для определенности будем считать точкой, в которой заканчивается область прожекторного луча, наиболее удаленную от раскрытия точку, в которой в направлении внешней нормали к раскрытию амплитуда вектора напряженности электрического и магнитного поля равна значению в середине

раскрыва антенны  $E_0$  и  $H_0$  (вариант 1), или значению минимума минимума  $E$  и  $H$  полей в прожекторном луче (вариант 2). На рис.2 представлены расчеты этих расстояний в зависимости от размера стороны раскрыва квадратной формы. Видно, что первый вариант определения протяженности прожекторного луча достигает половины расстояния дальней зоны  $R_1 \approx L^2 / \lambda$ , а второй – почти в полтора раза больше  $R_2 \approx 1,5L^2 / \lambda$ .

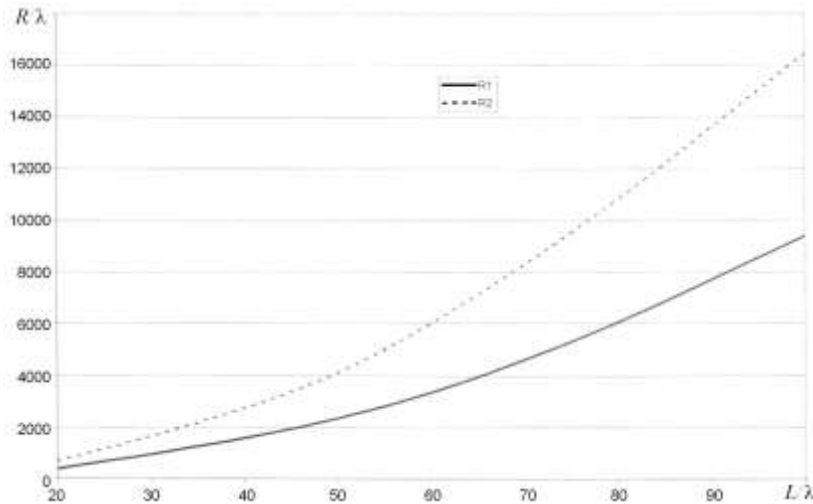


Рис. 2. Зависимость протяженности области прожекторного луча от размеров раскрыва антенны

Рассмотрим далее процессы в волновой трубке, которая собственно и является прожекторным лучом. На рис. 3 представлены расчеты зависимостей амплитуд поперечных компонент электрического и магнитного полей, нормированных к соответствующему значению в середине раскрыва антенны, от координат  $x$  точек наблюдения, которые находятся на параллельных излучающему раскрыву плоскостях на различных расстояниях  $z$  от  $25\lambda$  до  $5000\lambda$  от антенны. Из рис. 3а видно, что на расстоянии четверти стороны раскрыва амплитуды полей в поперечном сечении волновой трубки, соответствующем раскрыву антенны (на рисунке показано толстой серой линией), очень мало отличаются от их значения в раскрыве. Но в этом случае нормированные поля  $E/E_0$  и  $H/H_0$  отличаются друг от друга, причем амплитуда электрического поля несколько больше магнитного. На расстоянии уже половины размера стороны раскрыва (рис. 3б) поля  $E$  и  $H$  совпадают между собой как в дальней зоне антенны. Число осцилляций амплитуд полей уменьшается и их период увеличивается. При дальнейшем увеличении расстояния плоскости наблюдения от антенны число осцилляций амплитуд полей уменьшается, но перепад амплитуд полей увеличивается к краю плоскости наблюдения. При этом амплитуды полей вне прожекторного луча быстро убывают вплоть до расстояний, равных 5-10 размерам раскрыва (рис. 3е, ж). На расстоянии 50 размеров раскрыва, равном четверти расстояния дальней зоны, формируется главный лепесток диаграммы направленности антенны, хотя нули и боковые лепестки размыты.

Перейдем к анализу фазовых соотношений полей в прожекторном луче. На рис. 4 представлены расчеты зависимости от поперечной координаты  $x$  точки наблюдения разности фаз  $\arg E(x, z = z_n) - \arg E(x = 0, z = z_n)$  и  $\arg H(x, z = z_n) - \arg H(x = 0, z = z_n)$ , где  $z_n$  – соответствующая координата поперечной плоскости наблюдения  $z = const$ . По-существу графики на рис. 4 представляют собой фронт волны, распространяющейся от антенны, в пределах размеров раскрыва. Видно, что фронт волны электрического и магнитного поля отличаются (весьма незначительно) только на расстоянии плоскости наблюдения от раскрыва, равном 25 длин волн, т.е. четверти размера раскрыва. На больших расстояниях отношение фазы полей  $E$  и  $H$  совпадают, как в плоской бегущей волне. Осцилляции фаз полей на плоскостях наблюдения  $z_n = const$  в большей части поперечного сечения прожекторного луча незначительны, причем по мере удаления плоскости наблюдения от антенны пространственный период осцилляций увеличивается. Таким образом, бегущая волна в прожекторном луче строго говоря квазиплоская.

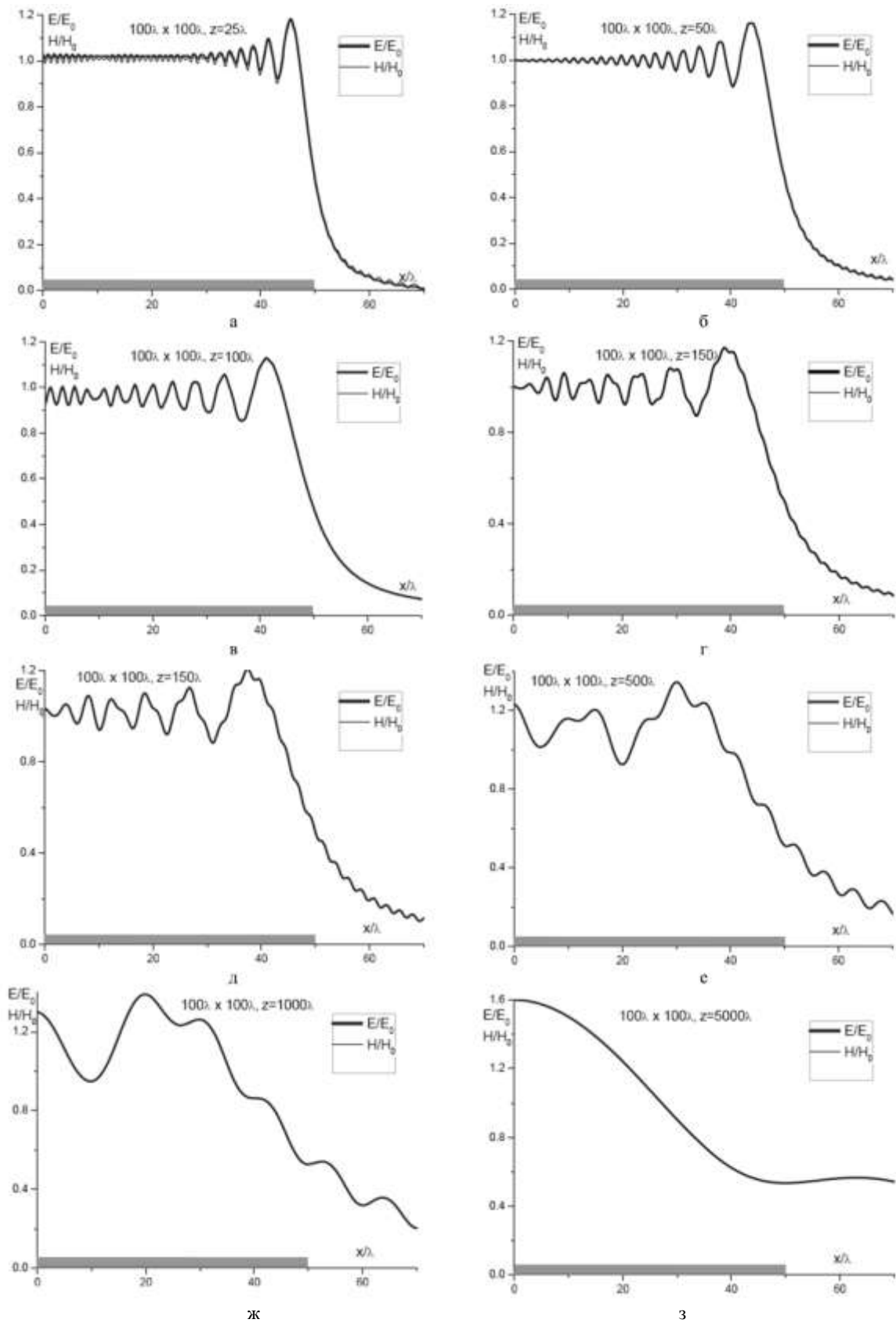


Рис. 3. Зависимость амплитуд электрического и магнитного полей от поперечной координаты  $x$  на разных расстояниях от раскрыва антенны

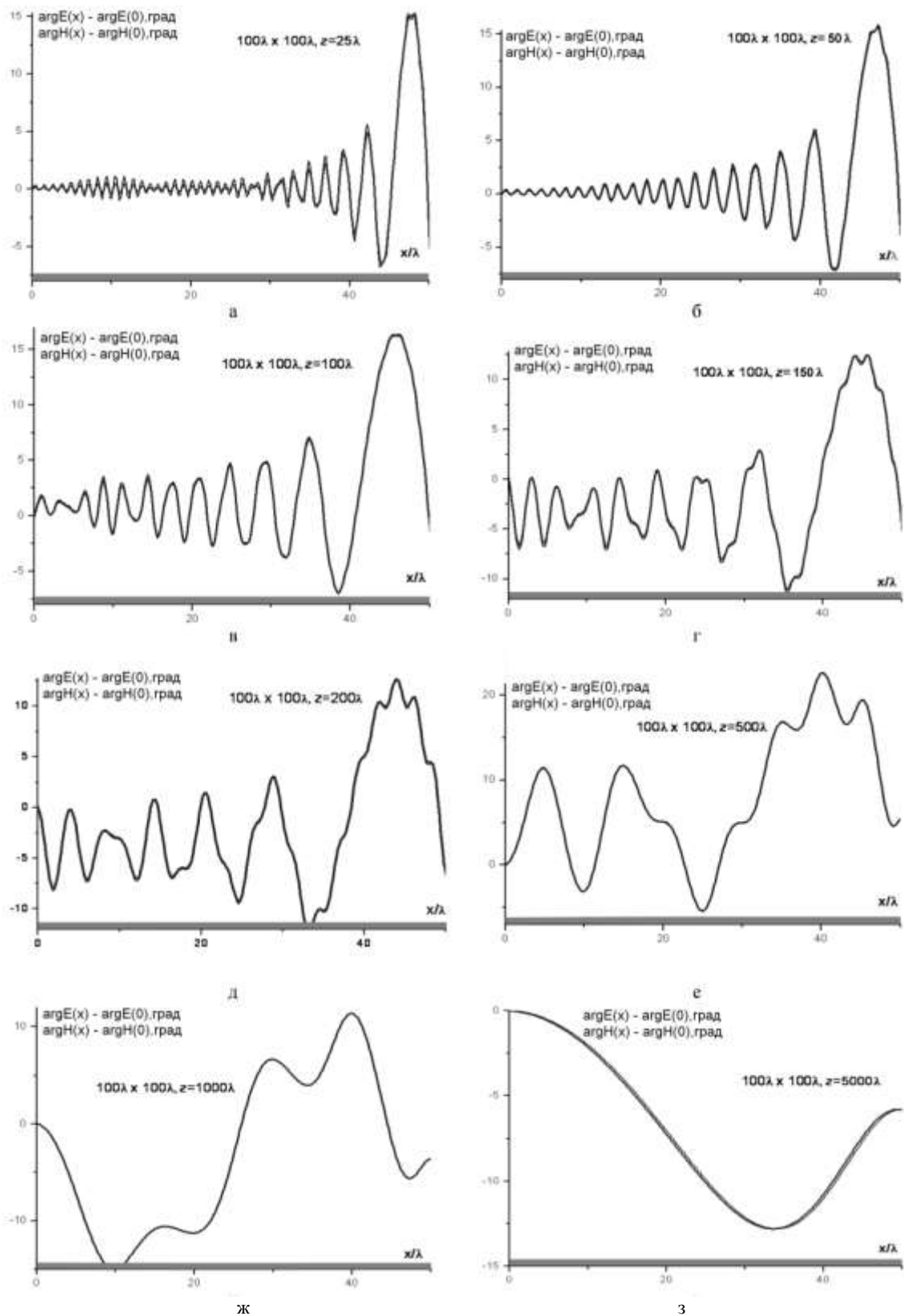


Рис. 4. Зависимость фаз электрического и магнитного полей от поперечной координаты  $x$  на разных расстояниях от раскрытия антенны

На рис 5 показаны зависимости разности фаз компонент электрического и магнитного полей  $\arg E_x - \arg H_y$ , рассчитанные в зависимости от поперечной координаты  $x$  для разных плоскостей наблюдения  $z_n = const$ . Как хорошо известно из теории волновых процессов в ближней зоне диполя Герца [3], в бегущей волне эта разность фаз равна нулю. Из рис. 5 видно, что в прожекторном луче в

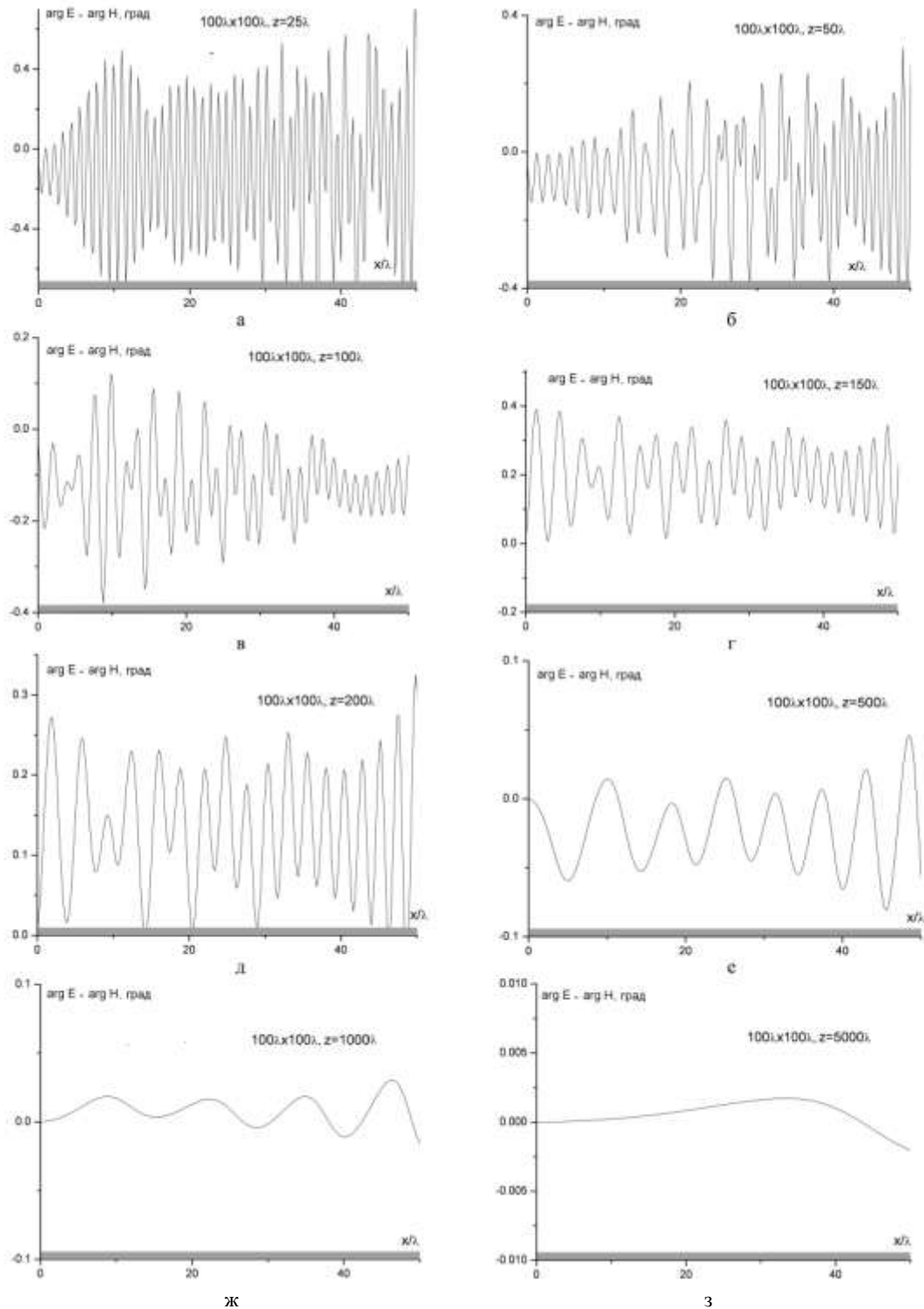


Рис. 5. Зависимость разности фаз поперечных компонент электрического и магнитного полей от поперечной координаты  $x$  на разных расстояниях от раскрытия

пределах размеров апертуры антенны даже на самом малом расстоянии  $z = 25\lambda$  отличие этой разности фаз от нуля пренебрежимо мало – не больше  $\pm 0,6^\circ$ . Отсюда следует, что реактивная мощность электромагнитного поля в ближней зоне апертурных антенн больших электрических размеров в прожекторном луче пренебрежимо мала.

Рассчитывались также зависимости отношения амплитуд электрического и магнитного полей, имеющие физический смысл волнового сопротивления пространства в прожекторном луче, в разных плоскостях наблюдения. Оказалось, что даже на минимальном расстоянии  $z = 25\lambda$  отличие  $W = E/H$  от  $W_0$  - волнового сопротивления свободного пространства не превышает 2%.

Таким образом, детальный анализ волновых процессов вблизи апертурных антенн больших электрических размеров показал, что такие антенны формируют прожекторный луч, представляющий собой квазиплоскую неоднородную электромагнитную волну, которая распространяется практически без уменьшения амплитуды до расстояний, равных половине расстояния дальней зоны антенны.

### ВЫВОДЫ

На основании расчетов амплитудных и фазовых характеристик электромагнитных полей вблизи синфазных апертурных антенн с раскрытием квадратной формы и размерами, изменяющимися от  $20 \times 20$  до  $100 \times 100$  длин волн показано, что такие антенны формируют прожекторный луч, представляющий собой бегущую квазиплоскую неоднородную волну, амплитуды электрического и магнитного полей в которой примерно равны их амплитудам в середине излучающего раскрытия независимо от его размеров. В этом состоит принципиальное отличие пространственного распределения полей в дальней зоне, в которой амплитуды полей определяются расстоянием и площадью излучающего раскрытия антенны. Область прожекторного луча, в которой амплитуда поля изменяется мало, простирается вплоть до половины расстояния дальней зоны антенны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горобец Н.Н. Амплитудные, фазовые и поляризационные диаграммы апертурных антенн в ближней, промежуточной и дальней зонах. // Вестник Харьковского ун-та. №203, Радиофизика и электроника. – 1980. Вып. 9. – С. 26-34.
2. Овсянникова Е.Е., Шишкова А.В., Горобец Н.Н. Влияние вида амплитудного распределения на характеристики полей в ближней зоне апертурных антенн. // Вестник Харьковского университета. №853. Радиофизика электроника. 2009. Вып. 14. – С.28-36.
3. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е. Влияние размеров и формы излучающего раскрытия на характер пространственного распределения поля вблизи антенны. // Вісник Харківськ. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. № 1094. Радіофізика та електроніка. – 2013. Вип. 23. – С. 51-59.
4. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е., Шишкова А.В. Формирование равномерного распределения электромагнитного поля в ближней зоне Е-секториальных рупорных антенн // Вісник Харківськ. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна: № 1038, Сер. Радіофізика та електроніка. – 2012. Вип. 21. – С. 17-24.
5. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. - М.: Сов. радио, 1972. - 464с.