

УДК 528.8

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ИЗЛУЧАЮЩЕГО РАСКРЫВА НА ХАРАКТЕР ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ВБЛИЗИ АНТЕННЫ

**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 12 июля 2013 г.

Методом векторизованного интеграла Кирхгофа исследовано влияние электрических размеров и формы излучающего раскрыва на пространственное распределение электрического поля в ближней зоне апертурных антенн. Показано, что при размерах апертуры, меньших одной длины волны, амплитуда поля убывает при увеличении расстояния равномерно, как в случае линейных проволочных антенн. При больших размерах раскрыва квадратной или прямоугольной формы в ближней зоне формируется прожекторный луч, который в случае раскрыва прямоугольной формы вырождается в слабоосциллирующую убывающую с увеличением расстояния функцию

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** микроволны, электрическое поле, векторизованный метод Кирхгофа, апертурные антенны, ближняя зона, прожекторный луч

Методом векторизованного интеграла Кірхгофа досліджено вплив електричних розмірів і форми випромінюючого розкриття на просторовий розподіл електричного поля в ближній зоні апертурних антен. Показано, що при розмірах апертури, менших однієї довжини хвилі, амплітуда поля збуває при збільшенні відстані рівномірно, як у випадку лінійних дротових антен. При великих розмірах розкриття квадратної або прямокутної форми в ближній зоні формується прожекторний промінь, який у випадку розкриття прямокутної форми вироджується в слабоосцилюючу спадаючу зі збільшенням відстані функцію

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** мікрохвилі, електричне поле, векторизований метод Кірхгофа, апертурні антени, ближня зона, прожекторний промінь

The influence of electrical size and shape of the radiating aperture to the spatial distribution of the electric field in the near field aperture antennas was investigated by vectorized Kirchhoff integral method. It is shown that when the aperture size smaller than the wavelength field amplitude decreases evenly as in the case of linear wire antennas. For large aperture sizes of square or rectangular shape in the near zone searchlight beam (which for a rectangular shaped aperture degenerates into weakly oscillating decreasing function at increasing distance) is formed

**KEY WORDS:** microwave, electric field, vectorized method Kirchhoff, aperture antennas, the near zone, searchlight beam

### ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени хорошо известно, что пространственное распределение поля вблизи линейных и апертурных излучающих систем отличается качественно в зависимости от электрических размеров и формы излучающего раскрыва антенны [1]. В частности, в случае диполя Герца, т.е. очень короткой по сравнению с длиной волны ( $l \ll \lambda$ ) тонкой ( $d \ll l$ ) проволочной антенны, в направлении нормали к нему (совпадающем с направлением главного максимума диаграммы направленности) амплитуда вектора напряженности электрического поля непосредственно вблизи диполя уменьшается обратно пропорционально расстоянию в третьей степени, а магнитного – во второй. В случае резонансной (полуволновой) проволочной антенны, как показано в [2], амплитуда вектора  $\vec{E}$  почти не изменяется до расстояния 0,3 длины волны, а дальше убывает пропорционально первой степени расстояния. Амплитуда вектора  $\vec{H}$  в этом случае уменьшается по закону  $1/R$  начиная с очень малых расстояний (порядка 0,01 длины волны) от излучателя.

В случае апертурных антенн больших электрических размеров вблизи раскрыва и в ближней зоне формируется так называемый прожекторный луч, в котором амплитуды векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  и мощность электромагнитного поля изменяются по осциллирующим закономерностям вокруг некоторого близкого к постоянному значению. В [3] показано, что в случае апертуры прямоугольной формы регулярный характер осцилляций нарушается. При этом, как показано в [4] на примере рупорных антенн, можно

обеспечить близкое к однородному распределение амплитуды и мощности поля на некоторой ограниченной площади или в ограниченном объеме в ближней зоне антенны апертурного типа надлежащим выбором формы излучающего раскрыва и амплитудно – фазового распределения источников поля на антенне. В [5] показано, что в апертурных антеннах с малыми электрическими размерами раскрыва прожекторный луч в ближней зоне не формируется.

Все это разнообразие волновых процессов в ближней и промежуточной зонах наблюдения при изменении размеров и формы раскрыва антенны в широких пределах изучено недостаточно. Целью настоящей статьи является изучение физических закономерностей формирования пространственного распределения электромагнитного поля вблизи антенн с раскрывом прямоугольной формы.

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ АНТЕННЫ С РАСКРЫВОМ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Поставленная задача относится к внешним задачам электродинамики, решение которых в общем виде в настоящее время достаточно хорошо разработано. В частности, Ю.В. Шубарин убедительно показал, что наиболее удобным методом решения задачи нахождения векторов напряженности электрических и магнитных полей во всем пространстве наблюдения является метод векторизованного интеграла Кирхгофа, согласно которому в случае апертурных антенн с площадью раскрыва  $S$  искомые векторы в дальней зоне равны [6]:

$$\vec{E} = \frac{ik\psi(R)}{4\pi} \int_S \left\{ W_0 \left[ \vec{R}^\circ \left[ \vec{R}^\circ \vec{j}_n^\circ \right] \right] + \left[ \vec{R}^\circ \vec{j}_n^M \right] \right\} e^{ik\vec{r}_s \cdot \vec{R}^\circ} ds; \quad (1)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{W_0} \left[ \vec{R}^\circ \vec{E} \right]; \quad (2)$$

где  $\vec{j}_n^\circ = \left[ \vec{z}^\circ \vec{H}_S \right]$  и  $\vec{j}_n^M = -\left[ \vec{z}^\circ \vec{E}_S \right]$  – эквивалентные электрические и магнитные токи на раскрыве антенны, а  $\vec{H}_S$  и  $\vec{E}_S$  – соответственно магнитные и электрические поля, возбуждающие раскрыв антенны. В [7] и [3] идеи метода векторизованного интеграла Кирхгофа развиты на теорию ближней зоны апертурных антенн с произвольной формой излучающего раскрыва и получены все компоненты электрического и магнитного полей в ближней и промежуточной зонах наблюдения в сферической системе координат. Решение задачи в декартовой системе координат получено в [8].

По полученным решениям и алгоритмам разработаны компьютерные программы для расчетов всех компонент электрического поля излучения апертурной антенны с раскрывом прямоугольной формы, в которых амплитудные и фазовые распределения источников поля, размеры и форма апертуры задаются без каких-либо ограничений. Точки наблюдения полей задаются вне излучающего раскрыва в ближней, промежуточной и дальней зонах наблюдения также без ограничений.

Исследуемые физические эффекты влияния размеров и формы излучающего раскрыва на пространственное распределение электромагнитного поля вблизи антенны наиболее сильно будут проявляться при постоянном амплитудном и фазовом распределении источников поля на антенне, так как в этом случае действующая площадь раскрыва антенны равна его геометрической площади. Очевидно также, что именно в этом случае протяженность области прожекторного луча будет максимальной. Поэтому необходимо, прежде всего, исследовать зависимость амплитуды поперечной компоненты вектора напряженности электрического поля излучения однородного синфазного раскрыва от расстояния от середины раскрыва, т.е. от начала координат, до точки наблюдения, в направлении нормали к раскрыву, т.е. в направлении оси  $OZ$ . В рассматриваемом случае в этом направлении формируется главный максимум диаграммы направленности антенны.

Как будет показано далее, волновые процессы в ближней зоне отличаются качественно в случаях излучающих систем малых электрических размеров апертуры – не больше двух-трех длин волн, когда ширина главного лепестка диаграммы направленности больше  $30^\circ$ ; средних электрических размеров – порядка 5-10 длин волн, когда ширина главного лепестка равна примерно  $5^\circ-10^\circ$ , и больших электрических размеров, например, больше 20 длин волн, когда ширина главного лепестка меньше  $2^\circ$ . Рассмотрим далее эти достаточно типичные случаи.

### ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН МАЛЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

Как было отмечено выше, волновые процессы в ближней зоне волноводных и рупорных излучателей малых электрических размеров исследованы в [5] и [4]. В результате показано, что расстояние дальней зоны таких излучателей равно  $R_{\lambda c} \geq 1,5 \dots 2,0$  длины волны. Показано также, что прожекторный луч в ближней зоне таких излучателей не формируется. Последнее легко объясняется, если процесс формирования прожекторного луча связать с образованием зон Френеля [9]: при малых электрических размерах апертуры ближняя зона сосредоточена в первой зоне Френеля, так что амплитуда вектора напряженности электрического поля не осциллирует при увеличении расстояния от излучателя до точки наблюдения, а изменяется (обычно уменьшается) монотонно.

Рассмотрим далее идеализированную модельную задачу об излучении малых апертур в ближней зоне при постоянном амплитудном и фазовом распределении источников поля на антенне. В этом предельном случае особенности формирования пространственного распределения поля в ближней зоне и влияние формы раскрыва проявятся наиболее четко.

На рис. 1 приведены расчеты зависимости модуля вектора напряженности электрического поля излучения однородной синфазной апертуры квадратной формы от расстояния до точки наблюдения в

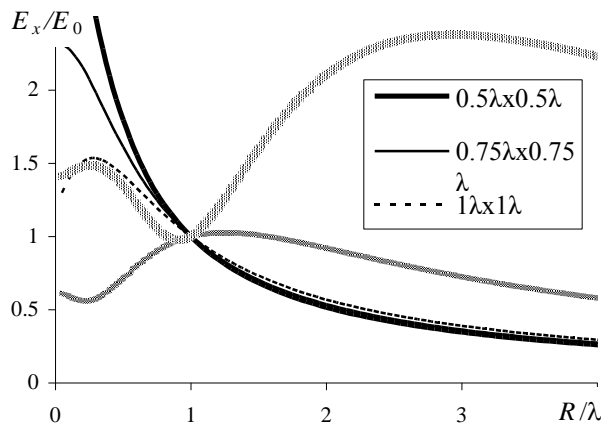


Рис. 1. Зависимости амплитуды вектора напряженности электрического поля излучателей с квадратным раскрывом малых электрических размеров от расстояния

направлении нормали к раскрыву при малых электрических размерах раскрыва. В расчетах принято, что амплитуда вектора напряженности электрического поля в середине раскрыва  $E_0 = 1 \text{ В/м}$ . Видно, что при очень малых размерах раскрыва излучателя — меньших одной длины волны — прожекторный луч не формируется, а амплитуда электрического поля равномерно убывает как в случае линейных проволочных антенн. Важно для практики, однако, что и в этом случае скорость убывания поля уменьшается при увеличении размеров излучающего раскрыва. При увеличении размеров до одной длины волны уже начинают появляться признаки прожекторного

луча — имеет место один экстремум (максимум) амплитуды поля вблизи излучателя на расстоянии 0,2 длины волны. Понятно, что при излучении электромагнитного поля большой мощности именно на этом расстоянии начинает развиваться электрический пробой антенны. Дальняя граница ближней зоны, определенная по известному соотношению

$$\frac{R_{БЗ}}{\lambda} \leq 0,25 \frac{L}{\lambda} + 0,5 \frac{L}{\lambda} \sqrt{\frac{L}{\lambda}}, \quad (3)$$

в этом случае равна 0,75 длины волны и находится существенно дальше расстояния, на котором амплитуда электрического поля имеет максимум.

При увеличении размеров раскрыва до двух длин волн формирование прожекторного луча характеризуется наличием минимума (на расстоянии 0,2 длины волны) и максимума (на расстоянии 1,25 длины волны) в исследуемой зависимости. Характерно также, что граница ближней зоны (3) смещается в сторону максимума максимум значения амплитуды электрического поля, т.е. ближе к антенне.

В случае размеров сторон раскрыва  $3\lambda \times 3\lambda$  число экстремумов зависимости амплитуды электрического поля от расстояния равно трем (два максимума и один минимум). При этом максимумы этой зависимости регулярно увеличиваются, а минимумы — регулярно уменьшаются, а протяженность области каждой последующей осцилляции увеличивается по мере удаления точки наблюдения от раскрыва. Граница ближней зоны в этом случае совпала с расстоянием, на котором имеет место максимум максимум амплитуды поля.

Как показали расчеты, в случае квадратного раскрыва с размерами  $4\lambda \times 4\lambda$  число экстремумов  $N$  совпадает с числом длин волн, укладывающихся на стороне раскрыва  $L/\lambda$ . Расстояние границы ближней зоны (3) смещается от точки максимума максимум амплитуды поля ближе к раскрыву излучателя.

Таким образом, анализ влияния размеров излучающего синфазного раскрыва квадратной формы при его однородном возбуждении приводит к следующим выводам:

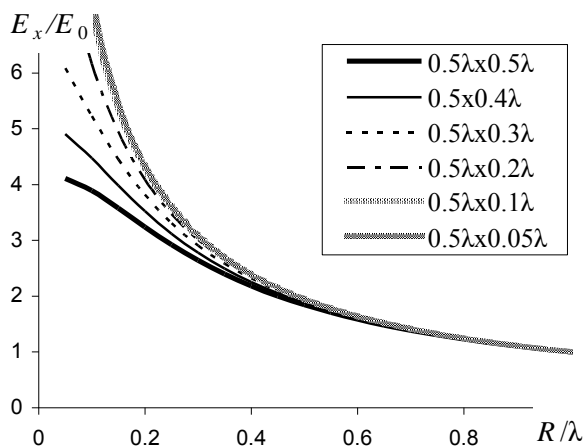
1. При размерах апертуры меньше одной длины волны в ближней зоне прожекторный луч не формируется, а амплитуда электрического поля в направлении нормали к раскрыву убывает равномерно – как в случае линейных проволочных или узких щелевых антенн.

2. При размерах раскрыва больше одной-двух длин волн в ближней зоне формируется прожекторный луч, причем число экстремумов (максимумов и минимумов) в зависимости амплитуды поля от расстояния от раскрыва равно числу длин волн, укладываемых на стороне раскрыва  $L/\lambda$ .

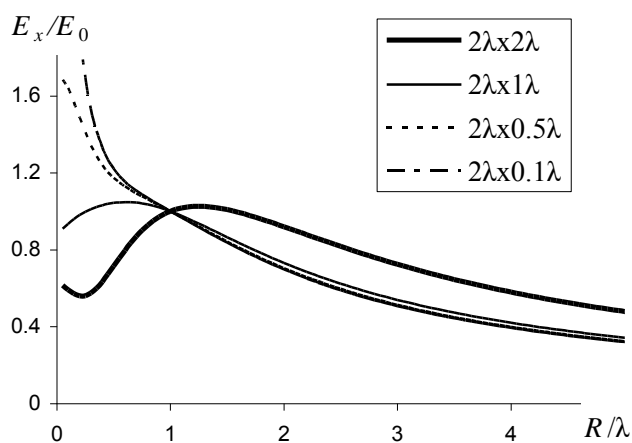
3. Значения максимумов амплитуды поля увеличиваются, а минимумов уменьшаются по мере удаления точки наблюдения от излучателя. При этом протяженность области каждого колебания амплитуды поля увеличивается по мере удаления от излучателя.

4. Внешняя граница ближней зоны (и ближняя граница промежуточной зоны наблюдения) апертурного излучателя с раскрывом квадратной формы совпадает с положением максимума максимумов амплитуды электрического поля при размере раскрыва  $3\lambda \times 3\lambda$ , больше этого расстояния при меньших размерах раскрыва и меньше его – при больших размерах.

Рассмотрим далее влияние формы излучающего раскрыва при малых его размерах на распределение поля вблизи излучателя. На рис. 2а приведена рассмотренная выше зависимость амплитуды электрического поля от расстояния до точки наблюдения в направлении нормали к раскрыву при изменении его формы от квадратной с размерами  $0,5 \times 0,5$  длин волн до линейной с размерами  $0,5\lambda \times 0,05\lambda$ . Видно, что по мере приближения к антенне амплитуда поля увеличивается, причем наиболее медленно в случае



а)



б)

Рис. 2. Зависимости амплитуды электрического поля апертурного излучателя от расстояния при изменении формы раскрыва от квадратной  $0,5\lambda \times 0,5\lambda$  до линейной  $0,5\lambda \times 0,05\lambda$  (а) и от  $2\lambda \times 2\lambda$  до  $2\lambda \times 0,1\lambda$  (б)

квадратного раскрыва и со все большей скоростью по мере уменьшения одной из сторон. В частности, при отношении сторон раскрыва 10:1 (в рассматриваемом случае  $0,5\lambda \times 0,05\lambda$ ) эта зависимость практически совпадает с такой же зависимостью для линейной проволочной антенны в ближней зоне, пропорциональной  $1/R^3$ . Другими словами, при малых электрических размерах антенны она может считаться линейной при отношении размеров сторон больше 5:1...10:1.

На рис. 2б приведены такие же зависимости при изменении формы раскрыва от  $2\lambda \times 2\lambda$  до  $2\lambda \times 0,01\lambda$ . Видно, что уже при отношении размеров сторон раскрыва 2:1 в ближней зоне имеется всего один экстремум (максимум) поля. При дальнейшем уменьшении одной из сторон исследуемая зависимость становится регулярно убывающей – как для линейной антенны.

Расчеты пространственного распределения поля в ближней зоне однородных апертурных антенн малых электрических размеров показали, что эти распределения такие же, как и в случае волноводных и рупорных антенн в плоскости электрического вектора поля [5].

### ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН СРЕДНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

Для иллюстрации волновых процессов в ближней зоне апертурных антенн средних электрических размеров на рис. 3 приведены зависимости амплитуды электрического поля однородных синфазных апертурных антенн с раскрывом квадратной формы с размерами  $5\lambda \times 5\lambda$ ;  $10\lambda \times 10\lambda$  и  $15\lambda \times 15\lambda$ . Видно, что в рассматриваемом варианте средних электрических размеров излучающего раскрыва прожекторный луч четко формируется. При этом число экстремумов амплитуды поля в точности равно числу, равному электрической длине стороны раскрыва. Характер осцилляций поля в рассматриваемом случае качественно такой же, как при малых электрических размерах раскрыва (рис. 1). Однако, граница ближней зоны (3) сильнее смещается к антенне. Так, для раскрыва  $10\lambda \times 10\lambda$  эта граница сместилась к расстоянию минимума минимума амплитуды электрического поля, а для раскрыва  $15\lambda \times 15\lambda$  – к расстоянию предпоследнего максимума поля в прожекторном луче.

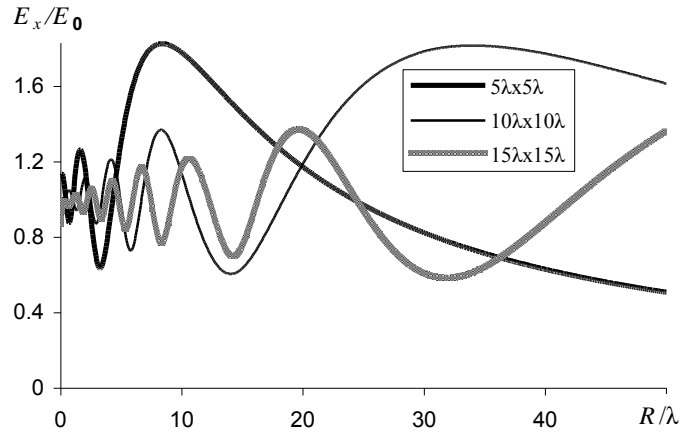
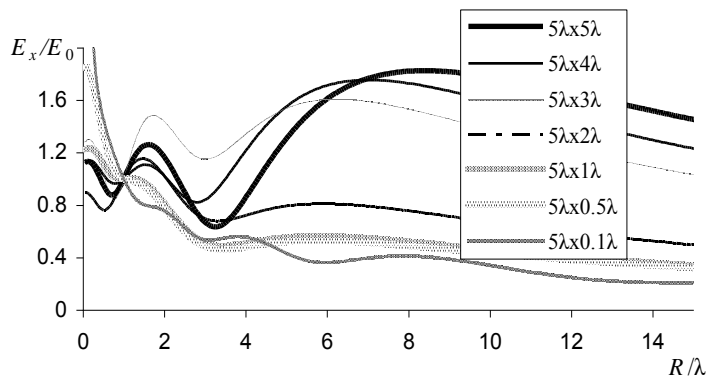
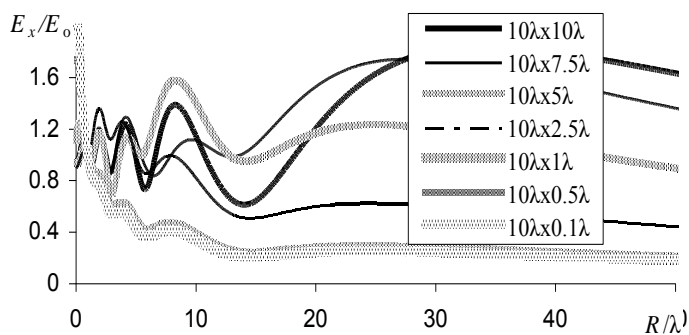


Рис. 3. Зависимости амплитуды электрического поля антенн с квадратным раскрывом средних электрических размеров от расстояния



а)



б)

Рис. 4. Зависимости амплитуды электрического поля апертурного излучателя от расстояния при изменении формы раскрыва от квадратной  $5\lambda \times 5\lambda$  до  $5\lambda \times 0,01\lambda$  (а) и от  $10\lambda \times 10\lambda$  до  $10\lambda \times 0,1\lambda$  (б)

Качественно новый характер в рассматриваемом случае приобретают исследуемые зависимости амплитуды поля от расстояния при прямоугольной форме излучающего раскрыва (рис. 4а, б). Прежде всего, отметим, что прожекторный луч формируется при изменении отношения сторон раскрыва от 1:1 до примерно 2:1. При этом монотонный характер осцилляций поля для квадратного раскрыва нарушается, последний максимум амплитуды поля в прожекторном луче не обязательно есть максимум максимум, как и последний минимум. Появляются также области пространства, в которых амплитуда поля изменяется мало (например, на участке от 7 до 13 длин волн кривой для раскрыва  $10\lambda \times 7,5\lambda$  (рис. 4б). Отметим, что это явление было обнаружено в [3] и более детально исследовано в [4] в случае рупорных антенн. При отношении сторон 5:1 и больше прожекторный луч не формируется, и исследуемая зависимость становится убывающей как в случае

линейных тонких проволочных антенн. Однако, в отличие от рассмотренного выше случая апертурных антенн малых электрических размеров, когда, как видно из рис. 2, амплитуда поля убывает регулярно, хотя и с разной скоростью в зависимости от ширины раскрыва, в случае антенн средних электрических размеров на эту регулярно убывающую зависимость накладываются высокочастотные колебания с увеличивающимся по мере увеличения расстояния периодом. Из рис. 4б видно, что при увеличении отношения сторон раскрыва антенны до 10:1...100:1 соответствующие зависимости практически сливаются.

### ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН БОЛЬШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

Расчеты показали, что исследуемая зависимость амплитуды электрического поля от расстояния от антенны в направлении главного максимума диаграммы направленности при увеличении электрических размеров раскрыва приобретает новые качества. Из рис. 5 видно, что даже при квадратной форме излучающего раскрыва вблизи антенны нарушается равномерность осцилляций амплитуды поля. (Из рис. 5а видно уменьшение амплитуды поля на расстоянии около двух длин волн от середины раскрыва). При этом максимум максимум амплитуды электрического поля смещается дальше от антенны и от границы ближней зоны, определенной соотношением (3). В случае размеров раскрыва  $20\lambda \times 20\lambda$  эта граница совпадает с положением предпоследнего максимума поля в прожекторном луче. Число максимумов и минимумов на 1-2 меньше числа  $L/\lambda$ .

При увеличении размеров раскрыва эти эффекты проявляются более четко. Например, при размерах раскрыва  $50\lambda \times 50\lambda$  нарушение равномерности осцилляций поля имеет место на расстоянии около трех длин волн, а граница ближней зоны смещается к расстоянию 105 длин волн (рис. 5б).

При увеличении размеров раскрыва до  $75\lambda \times 75\lambda$  вблизи раскрыва на расстоянии от его середины до 20 длин волн амплитуда поля вообще практически не изменяется. При размерах раскрыва  $100\lambda \times 100\lambda$ , как видно из рис. 5в, области минимальных осцилляций поля увеличиваются и могут иметь место на больших расстояниях от антенны. Эти обнаруженные локальные

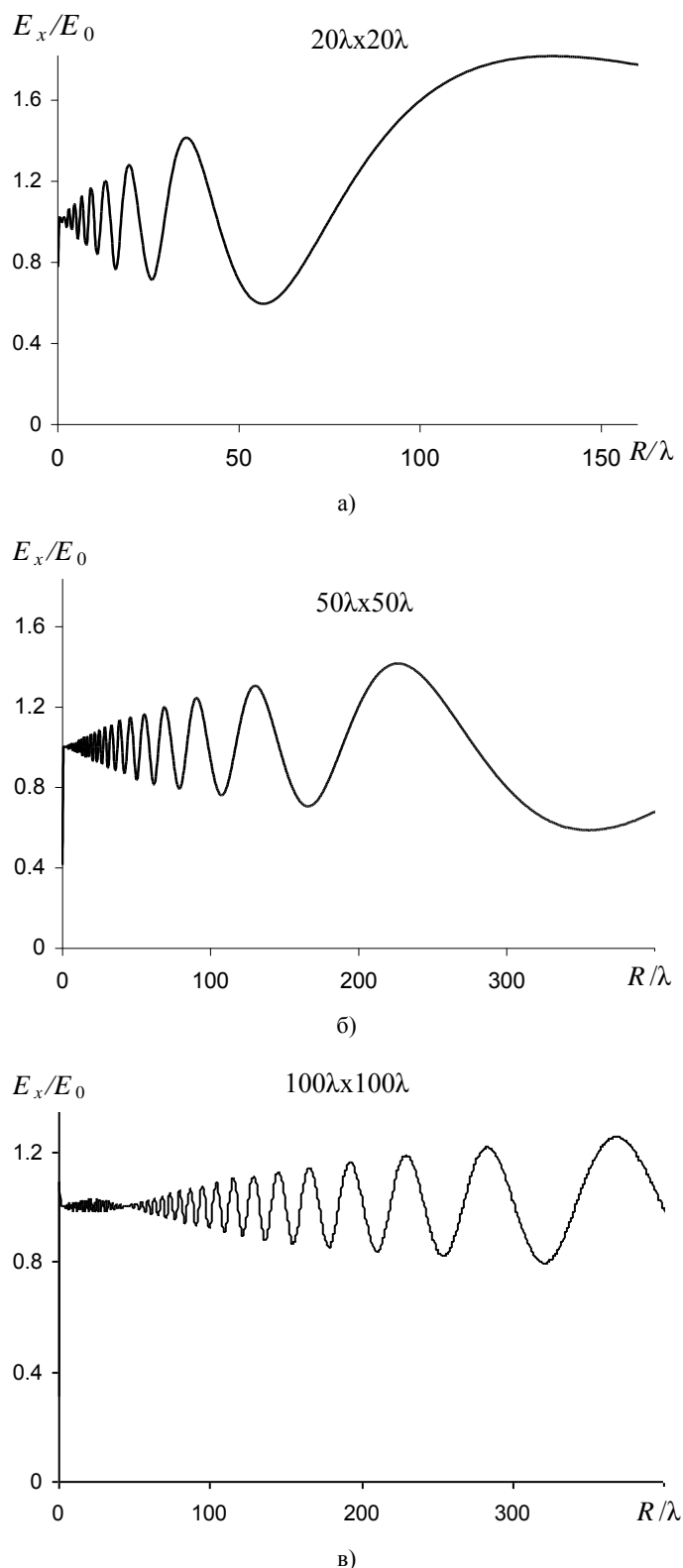


Рис. 5. Зависимости амплитуды электрического поля апертурного излучателя от расстояния для квадратных раскрывов: а)  $20\lambda \times 20\lambda$ ; б)  $50\lambda \times 50\lambda$ ; в)  $100\lambda \times 100\lambda$ .

бифуркации колебаний амплитуды электрического поля в ближней зоне апертурных антенн больших электрических размеров необходимо учитывать на практике.

Рассмотрим влияние формы излучающего раскрыва на поведение поля в ближней зоне апертурных антенн больших электрических размеров. На рис. 6 представлены зависимости амплитуды электрического поля от расстояния точки наблюдения от антенны при изменении размеров апертуры от  $50\lambda \times 50\lambda$  до  $50\lambda \times 0,1\lambda$ . Видно, что при отношении сторон раскрыва меньше 10:1 в ближней зоне таких антенн формируется прожекторный луч. При отношении сторон больше 50:1 прожекторный луч не наблюдается: как и в предыдущих случаях малых и средних размеров раскрыва антенны поле принимает равномерно убывающий характер как в случае линейных проволочных или узких щелевых антенн. Однако, в отличие от рассматриваемых выше случаев, полученные зависимости имеют совсем другой характер осцилляций: на низкочастотные осцилляции поля от меньших сторон излучающего раскрыва накладываются высокочастотные осцилляции поля от больших сторон раскрыва.

Для более подробного объяснения этого эффекта на рис. 7 приведены зависимости от расстояния амплитуды электрического поля трех апертурных антенн: с раскрывом  $10\lambda \times 10\lambda$ ;  $50\lambda \times 50\lambda$  и  $50\lambda \times 10\lambda$ . Четко виден эффект наложения низкочастотных осцилляций поля прожекторного луча антенны с квадратным раскрывом меньших размеров и высокочастотных осцилляций поля от раскрыва больших размеров. Отметим, что обнаруженные осцилляции амплитуды поля, связанные с суперпозицией волн, дифрагировавших на больших и меньших сторонах раскрыва, становятся существенными при отношении сторон меньших 2:1.

В заключении отметим, что в прожекторном луче амплитуда поля такая же, как в середине раскрыва независимо от его размеров. Это справедливо и для малых ( $L < \lambda$ ) антенн. В дальней зоне амплитуда поля определяется площадью излучающего раскрыва.

Отметим также, что сравнение с результатами расчетов ближних полей рупорных антенн с различными размерами и различными соотношениями сторон в раскрывах прямоугольной формы показало, что полученные выше физические закономерности и выводы имеют место и при спадающих к краям амплитудных распределениях источников поля в излучающем раскрыве антенны.

Обнаруженное явление образования однородной плоской волны в прожекторном луче в ближней зоне апертурных антенн больших электрических размеров может быть использовано в технике антенных измерений.

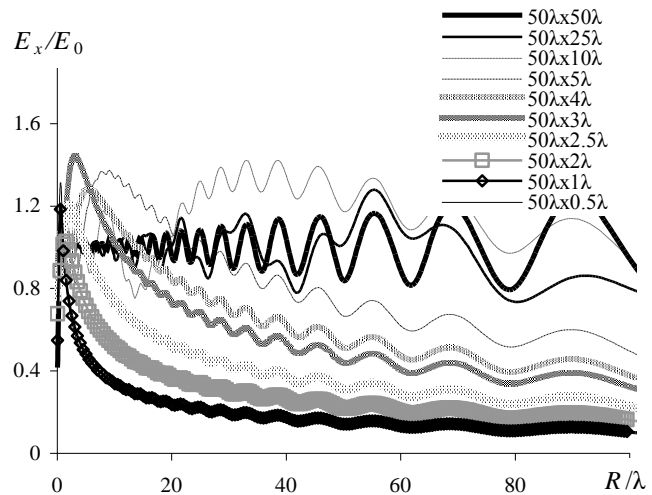


Рис. 6. Зависимости амплитуды электрического поля от расстояния точки наблюдения от антенны при изменении размеров апертуры от  $50\lambda \times 50\lambda$  до  $50\lambda \times 0,1\lambda$

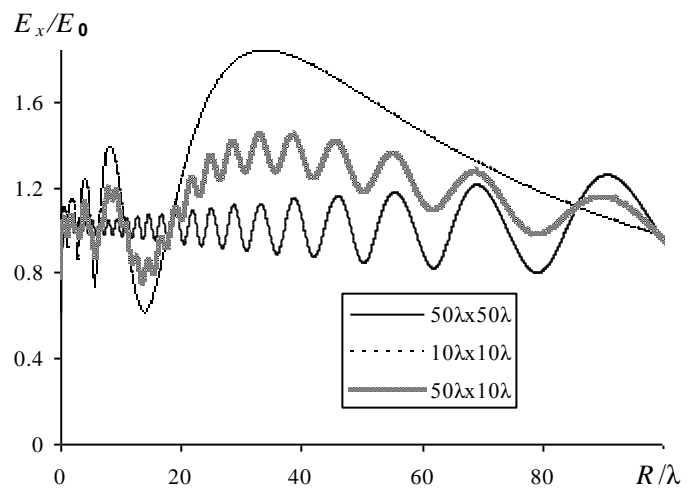
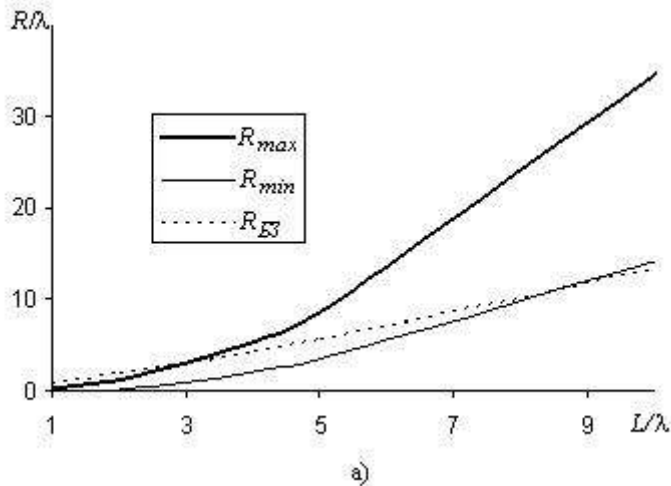


Рис. 7. Зависимости амплитуды электрического поля от расстояния трех апертурных антенн: с раскрывом  $10\lambda \times 10\lambda$ ;  $50\lambda \times 50\lambda$  и  $50\lambda \times 10\lambda$

Как было отмечено выше, поля в ближней зоне определяют электрическую прочность антенны. Действительно, из проведенных исследований видно, что в ближней зоне антенны амплитуды вектора напряженности переменного электрического поля может в два и больше раз превышать амплитуду электрического поля в излучающем раскрыве антенны. Очевидно, что электрический пробой наиболее вероятен в области пространства, в которой имеет место максимум максимум амплитуды электрического поля. С другой стороны, различного вида обтекатели и другие защитные оболочки антенны целесообразно размещать в областях пространства, в которых имеет место минимум минимум амплитуды электрического поля. В этом случае влияние защитной оболочки на параметры и характеристики антенны будет минимальным.

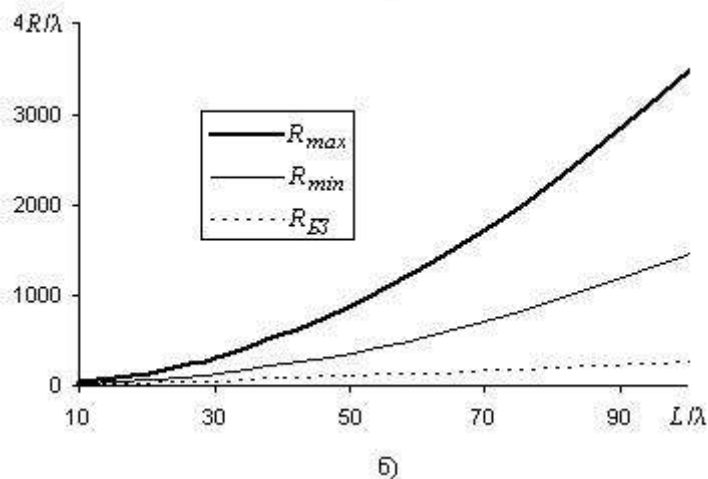
На рис. 8 приведены расчеты зависимости расстояния максимума максимуму и минимума минимуму амплитуды электрического поля от электрических размеров раскрыва квадратной формы. Здесь же приведена аналогичная зависимость расстояния внешней границы ближней зоны антенны, определенной формулой (3). Из расчетов следует, что протяженность области ближней зоны антенны больше расстояния максимума максимуму амплитуды электрического поля при размерах излучающего раскрыва не больше 3...4 длин волн.

При больших размерах раскрыва расстояние максимума максимуму больше расстояния границы ближней зоны, причем тем больше, чем больше размеры антенны. Рассчитанная зависимость с высокой точностью аппроксимируется формулой



$$\frac{R_{\max}}{\lambda} = 0,38 \left( \frac{L}{\lambda} \right)^{1,98} - 0,29. \quad (4)$$

Из рис.8 видно также, что расстояние минимума минимуму амплитуды электрического поля меньше расстояния ближней зоны при размерах раскрыва, меньших 9...10 длин волн. При больших размерах антенны расстояние минимума минимуму амплитуды электрического поля превышает расстояние границы ближней зоны антенны. Исследованная зависимость аппроксимируется формулой



$$\frac{R_{\min}}{\lambda} = 0,14 \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 - 0,35. \quad (5)$$

Таким образом, чем больше размер излучающего раскрыва антенны, тем больше протяженность области проекторного луча превышает расстояние внешней границы ближней зоны.

Анализ волновых процессов при излучении электромагнитных волн на конечном расстоянии от антенны с раскрывом прямоугольной формы показал также, что расстояние дальней зоны для таких антенн определяется большей стороной излучающего раскрыва  $R_{ДЗ} \geq 2L_{\max}^2/\lambda$ .

Рис. 8. Зависимости расстояния максимума максимуму и минимума минимуму амплитуды электрического поля и границы ближней зоны от электрических размеров апертуры квадратной формы: а) апертуры малых и средних размеров; б) апертуры больших размеров

## ВЫВОДЫ

1. В результате анализа влияния размеров излучающего раскрыва квадратной формы антенн апертурного типа на характер распределения поля в их ближней зоне показано, что проекторный луч в



направлении главного максимума диаграммы направленности формируется при размерах раскрыва больших одной длины волны. При этом число экстремумов (максимумов и минимумов) амплитуды поля в случае малых и средних апертур равно числу волн, укладываемых на одной стороне раскрыва. В случае больших апертур это число уменьшается на единицу или двойку. Протяженность области каждой осцилляции амплитуды поля увеличивается по мере удаления точки наблюдения от раскрыва. Амплитуда электрического поля в прожекторном луче близка к амплитуде электрического поля в середине раскрыва независимо от размеров антенны. В дальней зоне амплитуда поля определяется площадью излучающего раскрыва. Максимум максимумов амплитуды электрического поля, как и ее минимум минимумов в ближней зоне формируется в самой дальней области прожекторного луча. В случае апертурных антенн больших электрических размеров в зависимостях амплитуды поля от расстояния области минимальных осцилляций амплитуды поля увеличиваются и при увеличении размеров раскрыва антенны их число увеличивается. При размерах раскрыва антенны, больших  $3 \dots 4$  длины волны, область прожекторного луча включает всю ближнюю зону и часть промежуточной зоны.

2. Анализ влияния отношения длины и ширины раскрыва апертурных антенн на волновые процессы в ближней зоне показал, что прожекторный луч в ближней и частично в промежуточной зонах формируется при квадратной и прямоугольной форме раскрыва антенны с отношением сторон меньше 2:1. При прямоугольной форме раскрыва нарушается равномерность осцилляций амплитуды электрического поля при изменении расстояния от антенны. В частности, появляются области пространства – ограниченные объемы или плоские участки в поперечном сечении прожекторного луча, в которых амплитуда поля близка к постоянной. Максимум максимумов амплитуды поля, как и его минимум минимумов, смещаются ближе к антенне. При больших отношениях длины раскрыва к ее ширине зависимость амплитуды поля от расстояния остается осциллирующей и убывающей. При отношении сторон раскрыва больше 5:1...10:1 убывающий характер этой зависимости преобладает и приближается к аналогичной зависимости для линейных тонких проволочных антенн. Однако, для случаев когда длина раскрыва больше  $3 \dots 5$  длин волн на эту убывающую зависимость накладываются осцилляции, характерные для квадратного раскрыва со стороной, равной длине прямоугольного раскрыва. При увеличении электрических размеров раскрыва антенны поле в ближней зоне приобретает характер суперпозиции двух колебаний – от квадратного раскрыва со стороной, равной длине прямоугольного, и от квадратного раскрыва со стороной, равной ширине прямоугольного. Характерный для ближней зоны линейных проволочных антенн убывающий закон изменения амплитуды поля при увеличении расстояния от антенны имеет место при больших отношениях длины и ширины апертуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горобец Н.Н. Анализ распределения поля вблизи линейных и апертурных антенн. // Вопросы обеспечения стойкости радиоэлектронных средств к воздействию электромагнитных излучений естественного и искусственного происхождения: Всесоюз. науч.– техн. конф., 14–16 мая 1991г.; Харьков : тез. докл. – Х., 1991. – Ч. 2. – С. 29-30.
2. Горобец Н.Н., Цехмистро Р.И. Эффекты ближней зоны резонансных проволочных антенн. // Вісник Харківського нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. № 513, Радіофізика та електроніка. – 2001. Вип. 1. – С. 112-118.
3. 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.
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. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е., Шишкова А.В. Расстояние дальней зоны волноводных излучателей. // Вісник Харківськ. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна №834, Сер. Радіофізика та електроніка. – 2008, –Вип.13. – С. 68-76.
6. Шубарин Ю.В. Антенны сверхвысоких частот. - Х.: Изд. Харьковского гос. университета. 1960. -283 с.
7. Волошин В.А., Горобец Н.Н. Поляризационные характеристики прямоугольного раскрыва в ближней зоне. // Антенно-фидерные и измерительные устройства сверхвысоких частот. Науч-техн сб. ХГУ. Х., 1971. – С. 29-36.
8. 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.
9. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. -М.: Сов. радио, 1972. - 464с.