

ИЗМЕРЕНИЕ АПЕРТУРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АНТЕНН МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ФОКУСИРОВКИ

MEASUREMENT OF ANTENNA APERTURE DISTRIBUTION WITH USING OF MODIFY FOCUSING METHOD

I. Danilov

Annotation

The article deals with the conditions of antenna measurements in the near field of the radiated area and the key properties with numerical estimates.

Keywords: array, the area near the radiated field, a weight function, the focus area, the size of the focus area, the focal length.

Данилов Игорь Юрьевич
Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева

Аннотация

В статье рассматриваются условия проведения антенных измерений в зоне ближнего излученного поля и ключевые свойства с численными оценками.

Ключевые слова:

Антенная решетка, зона ближнего излученного поля, весовая функция, область фокусировки, размер области фокусировки, фокусное расстояние.

Введение

В настоящее время при разработке и испытаниях антенн радиоэлектроники специального назначения нередко возникает необходимость в осуществлении контроля апертурных распределений антенн, организуемого с использованием оборудования общего применения. Среди них следует отметить применение измерительных процедур с использованием планарных сканеров [1]. В работах [2–3] показано, что в указанных целях весьма эффективно использование метода фокусировки и его модификаций [4], позволяющего с приемлемой точностью находить апертурные распределения по данным измерений в зоне ближнего излученного поля. При этом важную роль играет выбор параметров весовой функции, а также параметров, определяющих условия проведения измерений: размеров области измерений, шага и величины расстояния от контролируемой апертуры до плоскости измерений. В настоящей работе рассматриваются данные вопросы.

Выбор условий проведения измерений в зоне БИП

Задачи выбора для линейной апертуры

Использование метода фокусировки позволяет с приемлемой точностью воспроизводить АФР в апертуре антенны по данным измерений ЭМП в зоне ближнего из-

лученного поля [4]. При этом важную роль играет выбор параметров весовой функции, а также параметров, определяющих условия проведения измерений: размеров области измерений, шага и величины расстояния от контролируемой апертуры до плоскости измерений. Указанный выбор основывается на свойствах сфокусированных ЭМП, рассмотренных в [5–6].

Поскольку "качество" определения АФР по данным измерений определяется мерой близости функции распределения сфокусированного поля к δ -функции, выбор условий проведения измерений и обработки полученных данных должен соответствовать фокусировке с минимальными значениями ширины области сфокусированного поля и уровнем боковых лепестков.

Однако при использовании типовых спадающих амплитудных распределения не удастся обеспечить низкое значение уровней боковых лепестков при малых относительных фокусных расстояниях, **рис. 1**.

При осуществлении обработки по методу фокусировки возможно использовать весовую функцию вида

$$J(x_a, y_a, x, y) = \left(\frac{z_0}{R(x_a, y_a, x, y)} \right)^m. \quad (1)$$

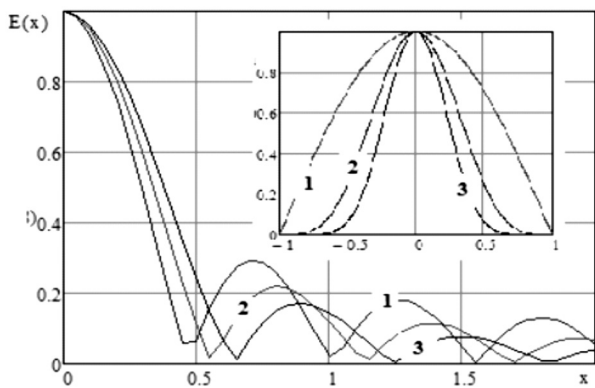


Рис. 1. Распределение типа $\text{Cos } x^m$, 1-3 степень $m=1,4,8$ соответственно. $Z_0/L=0,25$

Данная весовая функция позволяет осуществить фокусировку с приемлемыми значениями ширины сфокусированной области и уровней боковых лепестков и характеризуется следующими свойствами:

1. Для каждого z_0/L можно подобрать такое значение m , при котором УБЛ не превысит допустимого уровня (выбрано -20 дБ), рис. 2.

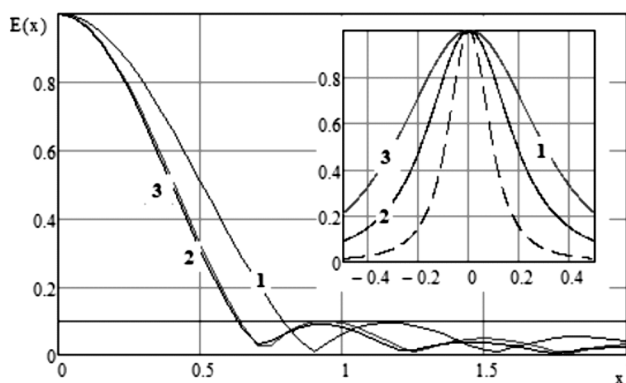


Рис. 2. К оценке уровня боковых лепестков: 1- $z_0/L=0,5$, $m=4,5$; 2- $z_0/L=0,25$, $m=3$; 3- $z_0/L=0,125$, $m=3$

Зависимость m (-20 дБ) приведена на Рис. 3.

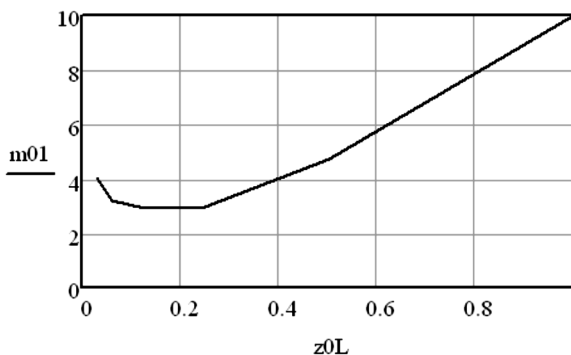


Рис. 3. Значения параметра m (для УБЛ -20 дБ)

2. В диапазоне относительных фокусных расстояний порядка $z_0/L=0,05 \dots 0,5$ при значениях параметра $m=2 \dots 4$ ширина сфокусированной области не претерпевает значительных изменений (Рис 4).

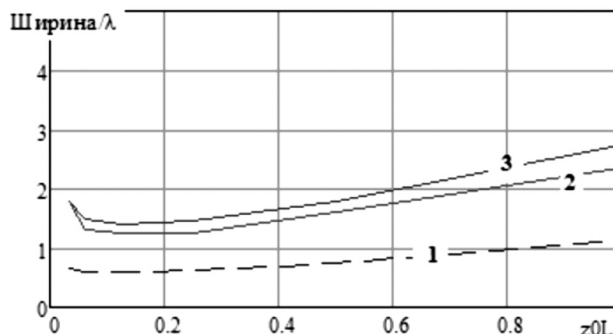


Рис.4. Ширина сфокусированной области по уровню 0,7, 0,1 и 0 соответственно.

Из приведенных данных следует:

- ◆ по критериям УБЛ не более 0,1 и минимуму ширины сфокусированного "пятна" наилучшие результаты достигаются при выборе относительного фокусного расстояния $z_0/L=0,1 \dots 0,3$;
- ◆ весовой функции вида (1) при параметре $m = 2,5 \dots 3$;
- ◆ размер разрешаемой области составляет (0,7 ... 0,75) длины волны.

Задачи выбора
для квадратной апертуры

Можно предположить, что общий характер требований к функции пространственного распределения поля, сфокусированного виртуальной апертурой и зависимостей, характеризующих ширину сфокусированной области и уровни боковых лепестков сохраняются и для случая квадратной апертуры. Весовая функция также выбирается в виде (1). Приведенные ниже данные расчетов служат тому подтверждением. С целью определения рациональных значений параметров весовой функции (1) и геометрических размеров L и z_0 проведена серия аналогичных расчетов для квадратной сфокусированной апертуры. Для оценки параметров сфокусированного поля производились расчеты распределения напряженности поля, создаваемого линейной и плоской квадратной апертурами вдоль плоскости, параллельной самой апертуре. В качестве элементарного излучателя использовался изотропный излучатель, поляризованный перпендикулярно апертуре. Результаты проведенных расчетов действительно показали следующее:

1. Параметры сфокусированного поля, создаваемого линейной апертурой и плоской апертурой того же размера очень близки.

2. При глубине расположения точки фокусировки соизмеримой с размером апертуры ($Z_0 \approx L$) достигнуть нужных параметров сфокусированного поля невозможно, т.к. увеличение величины m приводит к уменьшению УБЛ, но при этом расширяется ДН.

3. При меньшей глубине расположения точки фокусировки:

$$(z_0 \approx \frac{L}{8} \dots \frac{L}{4})$$

4. нужные параметры сфокусированного поля получаются при $m=5,6$.

5. При соблюдении условия

$$(z_0 \approx \frac{L}{8} \dots \frac{L}{4})$$

увеличение параметра $m > 7$ приводит к увеличению ШДН, и условие ШДН $0,5\lambda$ не выполняется.

6. Пропорциональное изменение всех геометрических размеров не приводит к изменению электрических характеристик.

Рисунки 5 и 6 служат иллюстрациями полученных результатов.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы: глубина расположения точки фокусировки должна выбираться из условия

$$\frac{L}{8} \leq z_0 \leq \frac{L}{4},$$

допустимое смещение точки фокусировки от центра по осям или под углом 45° к ним составляет:

$$x_0 \leq \frac{L}{4}, \quad y_0 \leq \frac{L}{4}$$

коэффициент $m=5, 6$.

Выбор размера сфокусированной апертуры

Приведенные выше данные относятся к случаю фокусировки в точку, расположенную на вертикальной оси в центре линейной или квадратной апертур. При изменении положения точки фокусировки, соответственно происходит смещение сфокусированной области в апертуре контролируемой антенны. (Рис. 6).

При использовании принципа фокусировки для контроля (измерения) апертурного распределения обследуемой антенны должны быть минимальными изменения формы функции пространственного распределения сфокусированного поля при сканировании, включая ширину

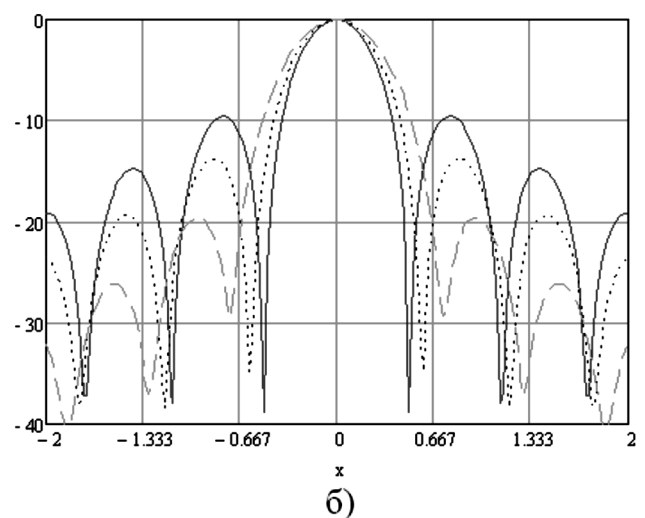
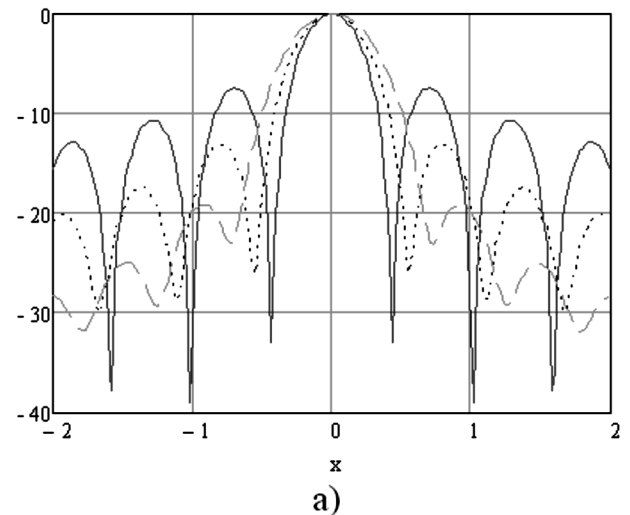


Рис. 5. Распределение сфокусированного поля вдоль оси, параллельной апертуре при $m=1$ (красная кривая), $m=3$ (синяя кривая), $m=5$ (зеленая кривая) для линейной апертуры (а) и квадратной апертуры (б).

"пятна" и уровень боковых лепестков. В принципе, использование весовой функции вида (1) соответствует этому требованию.

Полное отсутствие искажений имело бы место при сфокусированной апертуре с распределением (1) при бесконечных ее размерах. В реальности, минимальный размер апертуры определяется размерами обследуемой антенны и размерами области в сфокусированной антенне с достаточно высокими значениями функции амплитудного распределения (т.е. весовой функции $J(x_a, y_a, x, y)$).

Таким образом размеры сфокусированной сканирующей антенны определяются размером области скани-

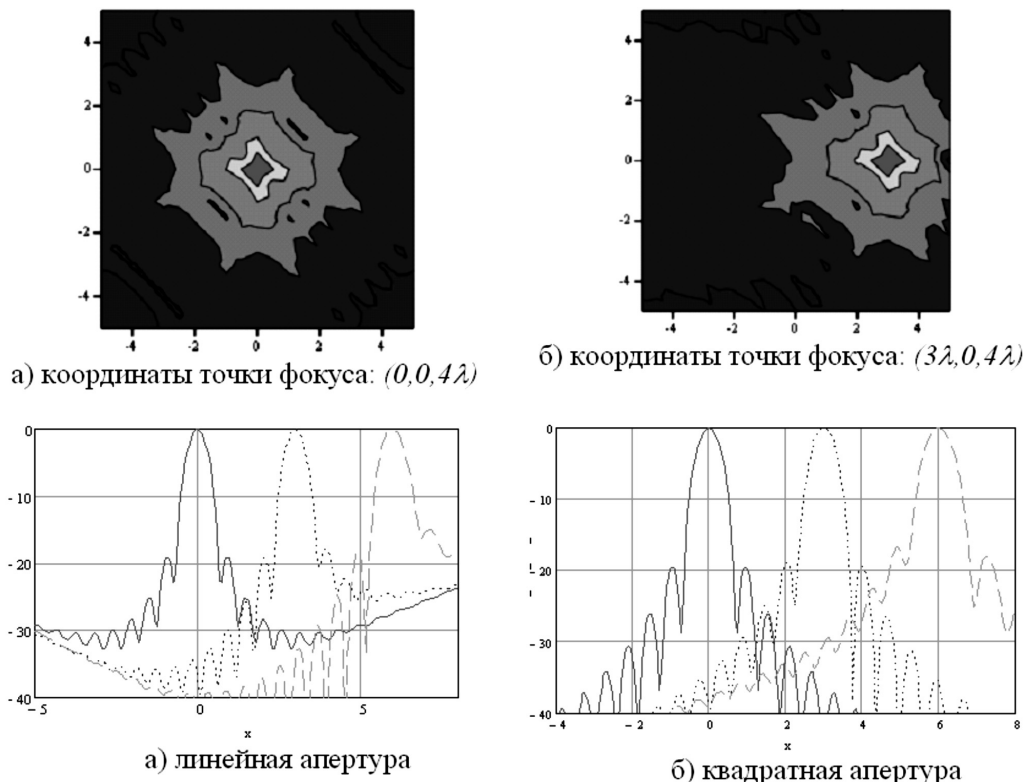


Рис. 6. Распределение сфокусированного поля при смещении точки фокусировки вдоль апертюры, координаты точки фокусировки: $(0, 0, 4\lambda)$ - красная кривая, $(3, 0, 4\lambda)$ - синяя кривая, $(6, 0, 4\lambda)$ - зеленая кривая.

рования, увеличенном на величину размера области, в которой уровень функции амплитудного распределения имеет значимую величину. Для получения количественной оценки проведена серия расчетов.

В проведенных исследованиях точка фокусировки смещалась:

- ◆ по осям симметрии апертюры на расстояния $L/4$, $L/2$;
- ◆ под углом 45° к осям симметрии апертюры на расстояния $L/4$, $L/2$.

Анализ результатов позволил сделать следующие выводы:

1. При смещении точки фокусировки вдоль осей симметрии апертюры, ШДН при определении в направлении под углом 45° к осям получается меньше, чем в направлении вдоль осей симметрии, а УБЛ меньше или примерно те же.

2. Смещение точки фокусировки от центра области наблюдения на величину

$$(x_0 \approx L/4, y_0 \approx L/4)$$

незначительно увеличивает ШДН и УБЛ.

Смещение же точки фокусировки от центра до значений

$$(x_0 \approx L/2, y_0 \approx L/2)$$

слишком велико, значения ШДН и УБЛ становятся недопустимыми.

При смещении на величину

$$(x_0 \approx L, y_0 \approx L)$$

недопустимо, т.к. ШДН становится кратной нескольким, боковые лепестки не определяются, сфокусированное поле "размывается".

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что допустимое смещение точки фокусировки от центра по осям или под углом 45° к ним составляет:

$$(x_0 \leq L/4, y_0 \leq L/4).$$

Это означает, что размер области измерений должен быть увеличен по сравнению с выбираемым из условия $z_0/L = [0.1..0.3]$ на величину не менее половины размера обследуемой апертюры.

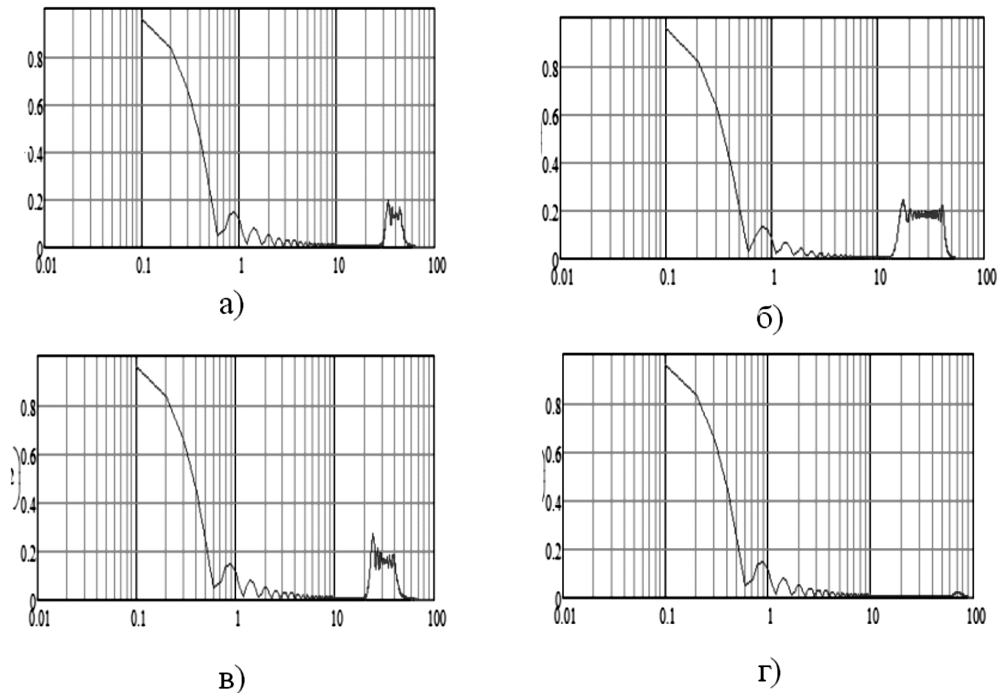


Рис. 7. Вторичные максимумы напряженности поля.

Выбор шага виртуальной сфокусированной антенны

Еще один практический аспект состоит в выборе шага при проведении измерений напряженности поля $E_{изм}$, т.е. шага виртуальной сфокусированной антенны. Общий характер влияния шага сфокусированной антенной решетки на параметры сфокусированного поля подробно рассмотрены в [6].

Главным результатом является то, что ширина сфокусированной области и уровни ближних боковых лепестков поля решетки и непрерывной антенны практически совпадают.

Однако, аналогично ДН разреженной решетки при большом значении шага в зоне ближнего излученного поля имеют место области с повышенной интенсивностью, отстоящие от точки фокуса тем дальше, чем меньше значение шага (Рис. 7).

Для решетки с шагом менее половины длины волны их не существует. Поскольку уменьшение шага увеличивает размерность задачи, его величина должна выбираться из условия отсутствия указанных всплесков интенсивности сфокусированного поля в области апертуры при фокусировке в направлении ее периферии. Это обстоятельство ограничивает максимально возможное значение шага.

При этом, как это следует из [6], протяженность области, в которой отсутствуют вторичные максимумы сфокусированного поля, увеличивается с ростом относительного фокусного расстояния.

На рис. 8. приведены расчетные зависимости, полученные из графиков, аналогичных показанным на рис. 7 для предельного расстояния в плоскости фокусировки от ее центра, при котором отсутствуют указанные вторичные максимумы напряженности поля.

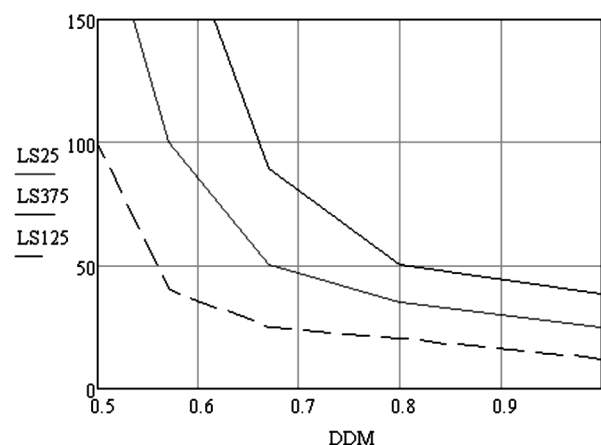


Рис. 8. Предельное расстояние при различных значениях относительного фокусного расстояния:
 $z_0/L=0.125$, $z_0/L=0.25$, $z_0/L=0.375$.

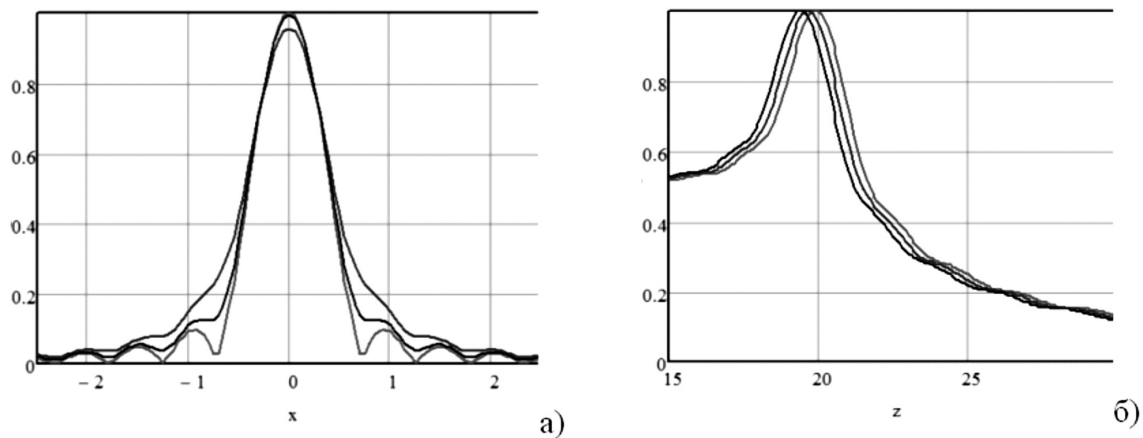


Рис. 9. Распределение напряженности поля апертуры длиной 80λ в плоскости, отстоящей на расстоянии 20λ при значениях фокусного расстояния 19.75, 19.5 и 20λ соответственно. Параметр весовой функции $m=3$

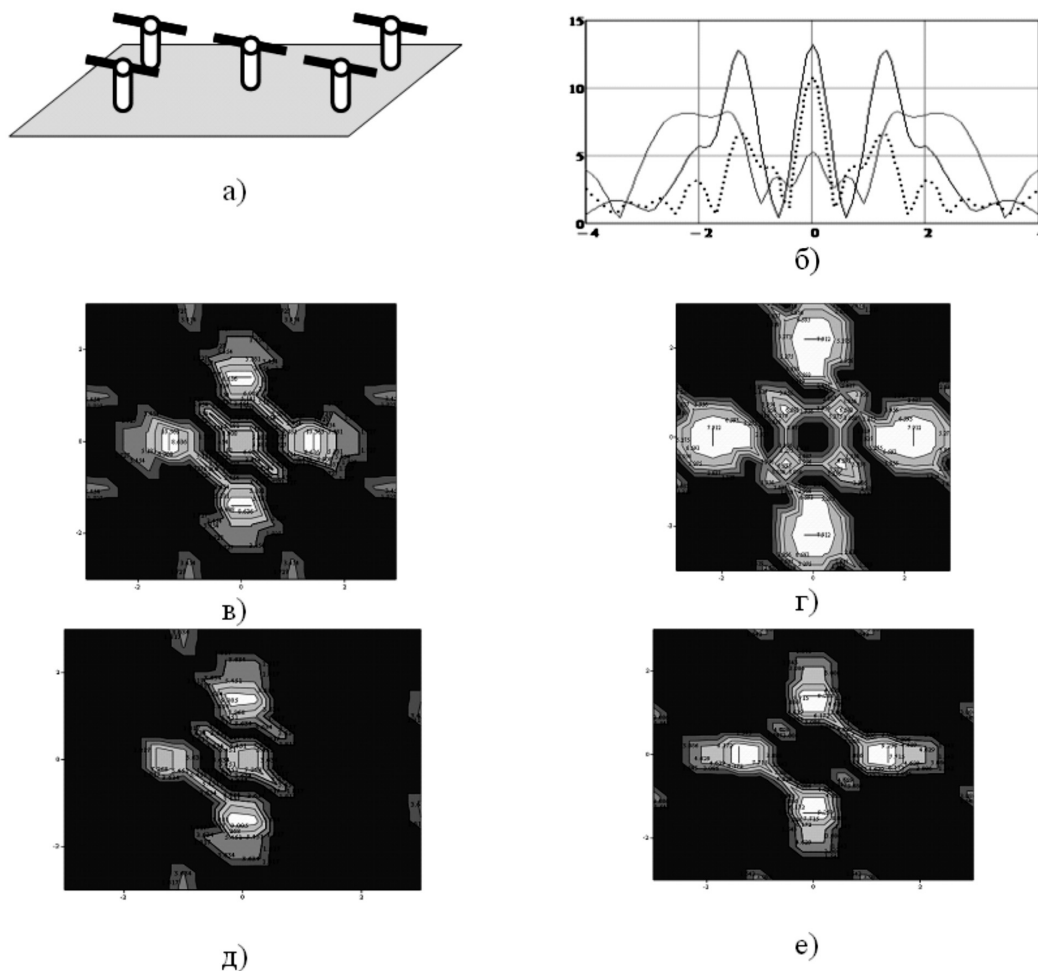


Рис. 10. Результаты нахождения апертурного АФН -решетка из 5 элементов с синфазным равномерным распределением: а) - решетка, б) - распределение вдоль оси при различных значениях z_0 и действительном расстоянии 2.5λ , в) - соответственно действительному $z_0 = 2.5\lambda$, г) - для значения $z_0 = 3.5\lambda$, д) - отсутствует крайний правый излучатель, е) - отсутствует центральный элемент.

Выбор фокусного расстояния

Как следует из результатов предыдущего рассмотрения эффективность решения задачи определения апертурного АФР по данным измерений в зоне ближнего излученного поля существенным образом определяется свойствами пространственных распределений сфокусированного поля в плоскости апертуры. Это означает, что при осуществлении расчетов согласно методу фокусировки должно задаваться значение фокусного расстояния между плоскостями измеряемой и виртуальной апертур. Существуют ситуации, когда это относительное расположение не удается считать достаточно точно известным. Примером может служить антенная решетка, состоящая из направленных излучателей, имеющих конечную протяженность в направлении нормали к апертуре. При неточном выборе значения фокусного расстояния имеет место "размывание" сфокусированного поля в плоскости апертуры. Иллюстрацией могут служить данные, приведенные на Рис. 9.

Здесь приведены пространственные распределения апертуры в параллельной и перпендикулярной плоскостях для электрических размеров и весовой функции согласно предыдущему разделу.

В ряде случаев исходные данные о необходимом значении фокусного расстояния известны не более чем ориентировочно. В тоже время из условия фокусировки, как это видно из рис. 9, значение z_0 должно задаваться с точностью не хуже $0.15...0.25\lambda$. В этих случаях требуется использование тех или иных приемов, имеющих целью определения необходимого значения фокусного расстояния.

По-видимому, единственным средством является повторение операций нахождения искомого АФР по измеренным данным с использованием ряда значений фокус-

ного расстояния, соответственно окрестности ожидаемого значения z_0 :

$$Z_0 = Z_{0min}, Z_{0min}, + (0.1...0.2\lambda) \dots Z_{0max},$$

За истинный результат измерения принимается найденной апертурное АФР, соответствующее наиболее "резкому" изображению.

В качестве иллюстрации приводится модельный пример. Рассматривается антенная решетка из 5 излучателей с равномерным синфазным распределением и шагом, равным 1.1 (Рис. 10 а). Там же показаны "точное" АФР и найденное при трех значениях фокусного расстояния.

Заключение

По результатам рассмотрения свойств сфокусированных полей можно сделать следующее заключение:

- ◆ рациональный выбор весовой функции позволяет сформировать сфокусированное поле с приемлемыми показателями для рассматриваемых задач определения апертурного АФР;
- ◆ значение относительного фокусного расстояния для этого должно выбираться в пределах $Z_0 / L = 0.1 \dots 0.3$
- ◆ значение параметра m весовой функции в зависимости от относительного фокусного расстояния должно составлять $m=2...3$ для линейной и $m=5...6$ для квадратной виртуальной апертуры;
- ◆ значение шага виртуальной решетки (т.е. шага в области измерений) при значительных размерах обследуемой апертуры (более 50...100 длин волн) не должно превышать значения

Увеличение шага до значений порядка длины волны возможно только при обследовании небольших апертур с размерами не более $\{10...20\}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комплекс для измерения параметров антенн в ближней зоне с использованием плоского сканера http://www.trimcom.ru/index.php?level=other_parts_russian&time=1177749492 Дата обращения 21.02.2016
2. Борисов С.Ю. Разработка методов, алгоритмов и устройств для определения амплитудно-фазовых распределений и внешних характеристик антенн в амплитудно-фазовом методе антенных измерений. Дисс. на соиск.уч. степ. канд. техн. наук, М.: МЭИ 1992 г.
3. Коротков В. С. Исследование и разработка методов реконструкции тока по измеренному полю излучающих систем Дисс. на соиск.уч. степ. канд. техн. наук. Горький, 1984 г.
4. Данилов И.Ю., Седелников Ю.Е. Диагностика апертурных распределений антенн путем измерений в зоне ближнего излученного поля. Журнал Радиотехники №1, 2016 г.
5. Vedenkin, D.A Antennas, focused in the near radiated field zone. Features and technical applications. / D.A. Vedenkin, O.V. Potapova, Y.E. Sedelnikov // В сборнике: 2013 9th International Conference an Antenna Theory and Techniques, ICATT, 2013. p. 560-565.
6. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля: монография / под общ. редакцией Ю.Е. Седелникова и Н.А. Тестоедова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2015. – 308 с.