

# Антенные и фидерные измерения

УДК 621.396.67.012.12

## Измерение диаграмм направленности антенн в планарном сканере без измерения фазы

© Авторы, 2015

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015

Ю. Н. Калинин – к.т.н., вед. науч. сотрудник, ООО «НПП «ТРИМ» СШП Измерительные системы»

E-mail: kallnin\_yurl@mail.ru

Рассмотрены алгоритмы обработки, позволяющие при измерениях антенн в ближней зоне с помощью планарного сканера получить диаграмму направленности без непосредственного измерения фазового распределения поля. Фазовое распределение поля восстанавливается по результатам измерений только амплитудного распределения на двух параллельных плоскостях. Приведены результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** ближнее поле, планарный сканер, амплитудно-фазовое распределение, диаграмма направленности, алгоритм восстановления фазы.

Processing algorithms that allow obtaining a directional pattern while measuring antennas in the near field by a planar scanner without measuring the field phase distribution directly have been reviewed. The field phase distribution is retrieved following the results of amplitude distribution measurements only in two parallel planes. The results of experimental research have been provided.

**Keywords:** near field, planar scanner, amplitude-phase distribution, phase retrieval algorithm.

**Введение.** Для измерения характеристик крупногабаритных зеркальных антенн и фазированных антенных решеток в настоящее время широко используется метод измерений в ближнем поле на основе использования планарного сканера. Современные антенные измерительно-вычислительные комплексы (АИВК) ближнего поля характеризуются большими размерами области сканирования (десятки метров) и широким частотным диапазоном (до 50 ГГц). При этом требования по габаритным размерам и частотному диапазону неуклонно растут.

При создании таких комплексов возникает ряд технических проблем, обусловленных применением протяженных высокочастотных трактов, а именно: высокое затухание сигналов и фазовый дрейф, вызванный колебаниями температуры в ходе продолжительных многочасовых измерений больших антенн. Применение длинных кабельных линий обусловлено необходимостью использования для измерения фазового распределения поля в раскрыве антенны ответвленного опорного сигнала генератора. Поскольку генератор и приемник должны быть связаны трактом опорного сигнала, при любой конфигурации оборудования АИВК и в любом режиме измерения (прием/передача) исследуемой антенны либо измерительный, либо опорный сигнал будут распространяться по кабелю большой длины.

Преобразование частоты, применяемое в векторных анализаторах цепей, принципиально не решает проблемы, поскольку в этом случае проблема ослабления и фазового дрейфа возникает для сигнала гетеродина. Даже при работе на низших гармониках частоты гетеродина затухание может достигать десятков децибел при использовании самого современного кабельного оборудования. В некоторых случаях это является препятствием для реализации технических требований, предъявляемых к АИВК.

В связи с этим является актуальным исследование возможных путей получения диаграмм направленности (ДН) антенн без непосредственного измерения фазового распределения поля в раскрыве. В статье рассматриваются алгоритмы восстановления фазового распределения по результатам измерений только амплитудного распределения на двух соседних параллельных плоскостях вблизи раскрыва антенны.

**Расчет амплитудно-фазового распределения на заданной плоскости.** В основе алгоритма восстановления фазы по измерениям амплитуды на двух параллельных плоскостях лежит алгоритм преобразования амплитудно-фазового распределения (АФР) с одной плоскости на другую параллельную плоскость как в направлении распространения поля, так и в направлении раскрыва антенны.

Тангенциальные составляющие вектора электрического поля  $E_x(x, y)$ ,  $E_y(x, y)$  на некоторой плоскости  $z = 0$  вблизи апертуры антенны связаны с составляющими угловых спектров плоских волн  $A_x(k_x, k_y)$ ,  $A_y(k_x, k_y)$  преобразованием Фурье [1]:

$$A_{x,y}(k_x, k_y) = \mathfrak{F}\{E_{x,y}(x, y, z = 0)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{x,y}(x, y, z = 0) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy, \quad (1)$$

$$E_{x,y}(x, y, z = 0) = \mathfrak{F}^{-1}\{A_{x,y}(k_x, k_y)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_{x,y}(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y,$$

где  $k_x = k_0 \sin \theta \cos \varphi$ ;  $k_y = k_0 \sin \theta \sin \varphi$ ;  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ;  $\theta, \varphi$  – углы сферической системы координат.

Если расстояние  $d$  между измерительной плоскостью 1 ( $z = 0$ ) и измерительной плоскостью 2 ( $z = d$ ) составляет порядка нескольких длин волн, то ослаблением поля при распространении от плоскости 1 до плоскости 2 можно пренебречь. Тогда два угловых спектра плоских волн, полученные по измерениям поля на плоскостях 1 и 2 (рис. 1), будут отличаться только фазовым множителем  $e^{-j\varphi_d}$ , где

$$\varphi_d = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta = k_z d. \quad (2)$$

Тогда

$$E_{x,y}(x, y, z = d) = \mathfrak{F}^{-1}\{A_{x,y}(k_x, k_y) e^{-jk_z d}\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_{x,y}(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z d)} dk_x dk_y. \quad (3)$$

Таким образом, если известно поле на плоскости 1, то поле на параллельной плоскости 2, находящейся на расстоянии  $d$ , может быть получено как

$$E_{x,y}(x, y, z = d) = \mathfrak{F}^{-1}\{\mathfrak{F}\{E_{x,y}(x, y, z = 0)\} e^{-jk_z d}\}. \quad (4)$$

Соотношение (4) является основой алгоритма восстановления фазы. Оно справедливо как для расчета поля в направлении распространения волны, так и в направлении антенны. Поэтому его можно использовать, в частности, для восстановления АФР поля на апертуре (рис. 2). В зарубежной литературе преобразование, определяемое (4), часто обозначают РТР (plane-to-plane) [3].

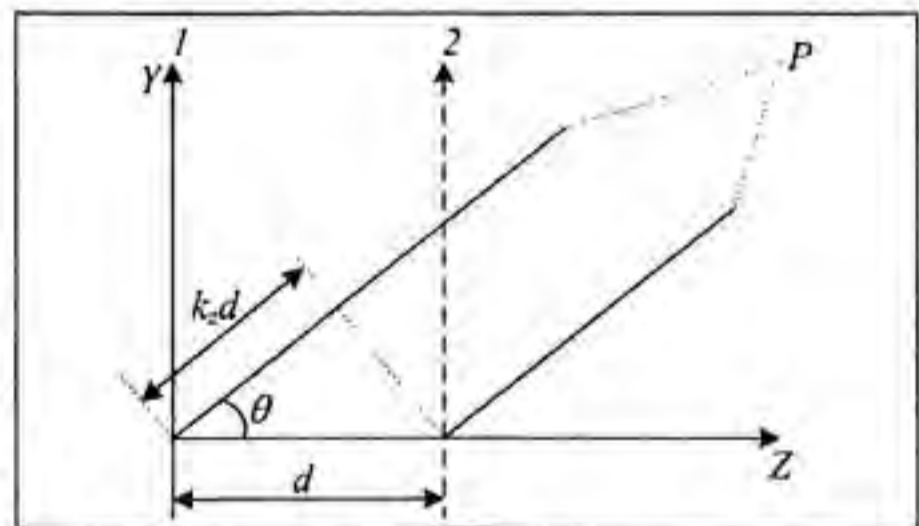


Рис. 1. Геометрия преобразования поля между двумя параллельными плоскостями

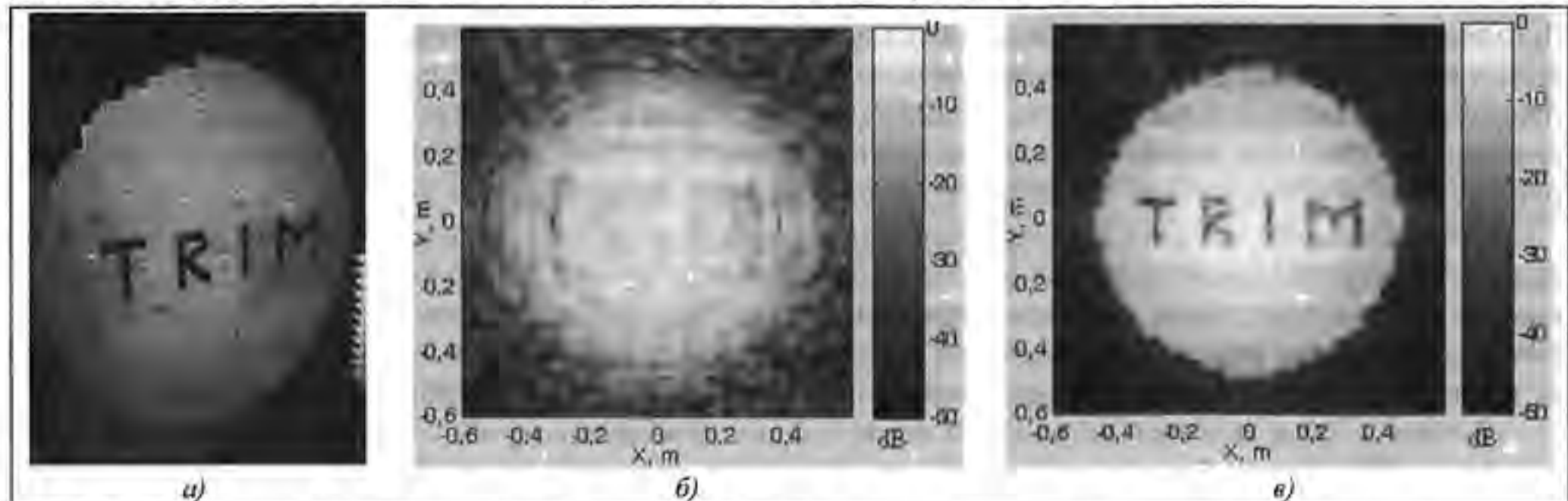


Рис. 2. Восстановление АФР на апертуре: а – фотография ФАР Х-диапазона, название компании «TRIM» нанесено металлической фольгой; б – амплитудное распределение поля, измеренное на расстоянии 0,4 м от апертуры; в – амплитудное распределение поля, восстановленное в плоскости апертуры

На рис. 3 приведено сравнение результатов измерения АФР Y-поляризованной фазированной антенной решетки (ФАР) в горизонтальном сечении на расстоянии 0,1 м от апертуры с результатами расчета по измерениям, выполненным на расстоянии 0,4 м. Расчет фазового распределения осуществляется с точностью до постоянного фазового сдвига.

Для расчета ближнего поля антенны можно также воспользоваться соотношением [2]

$$E_{x,y}(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{x,y}(x', y', z' = 0) G(x', y', z) dx' dy', \quad (5)$$

где  $G = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \right)$ ,  $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$ .

Выражение (5) представляет собой двумерную свертку распределения поля на плоскости  $z' = 0$  с ядром свертки – функцией  $G$ . Этим выражением удобно пользоваться для расчета ближнего поля антенны в вертикальных или горизонтальных сечениях вдоль оси  $z$  (рис. 4, а).

Для расчета ближнего поля на плоскостях, перпендикулярных оси  $z$  (рис. 4, б), можно также использовать выражение (5) в спектральной форме:

$$E_{x,y}(x, y, z) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F} \{ E_{x,y}(x', y', z' = 0) \} \mathfrak{F} \{ G(x', y', z) \} \right\}. \quad (6)$$

**Алгоритм восстановления фазы.** Пусть имеется два измерения амплитудного распределения (АР)  $|E_1(x, y, 0)|$  и  $|E_2(x, y, d)|$  на плоскостях 1 и 2 (рис. 5). Итерационный алгоритм восстановления фазы [3, 4] состоит из следующих шагов.

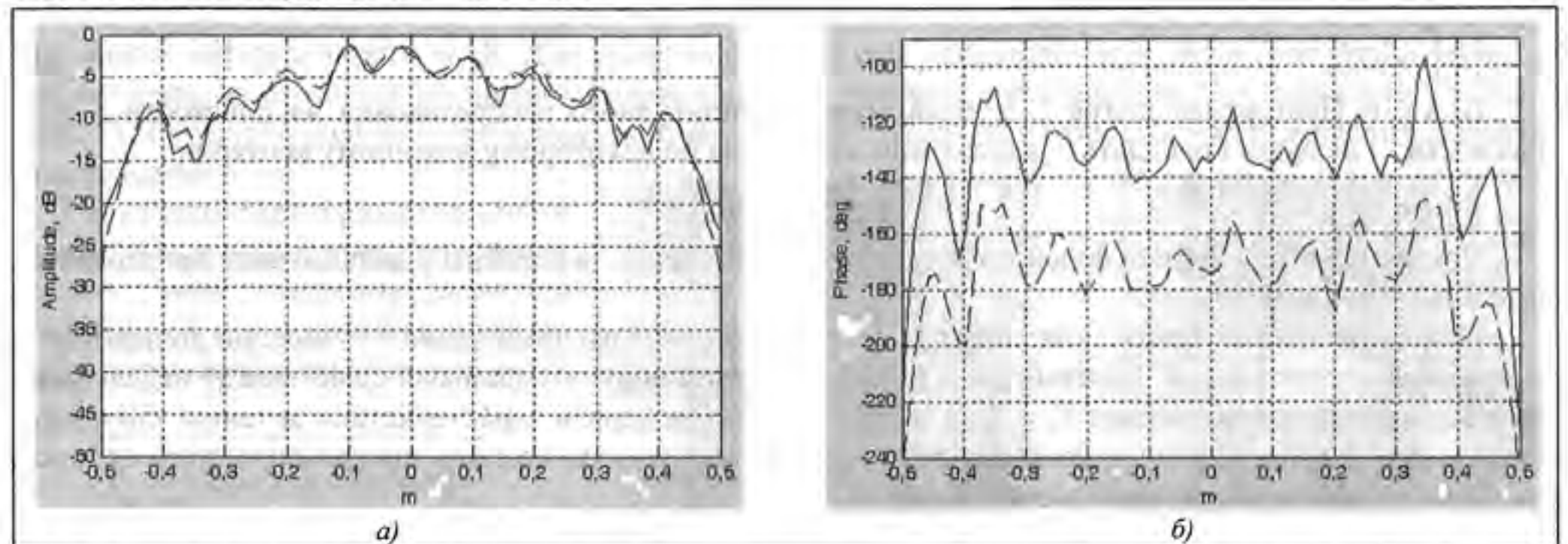


Рис. 3. Сравнение измеренного (—) и рассчитанного (----) амплитудного (а) и фазового (б) распределений ближнего поля ФАР в горизонтальном сечении на расстоянии 0,1 м от апертуры

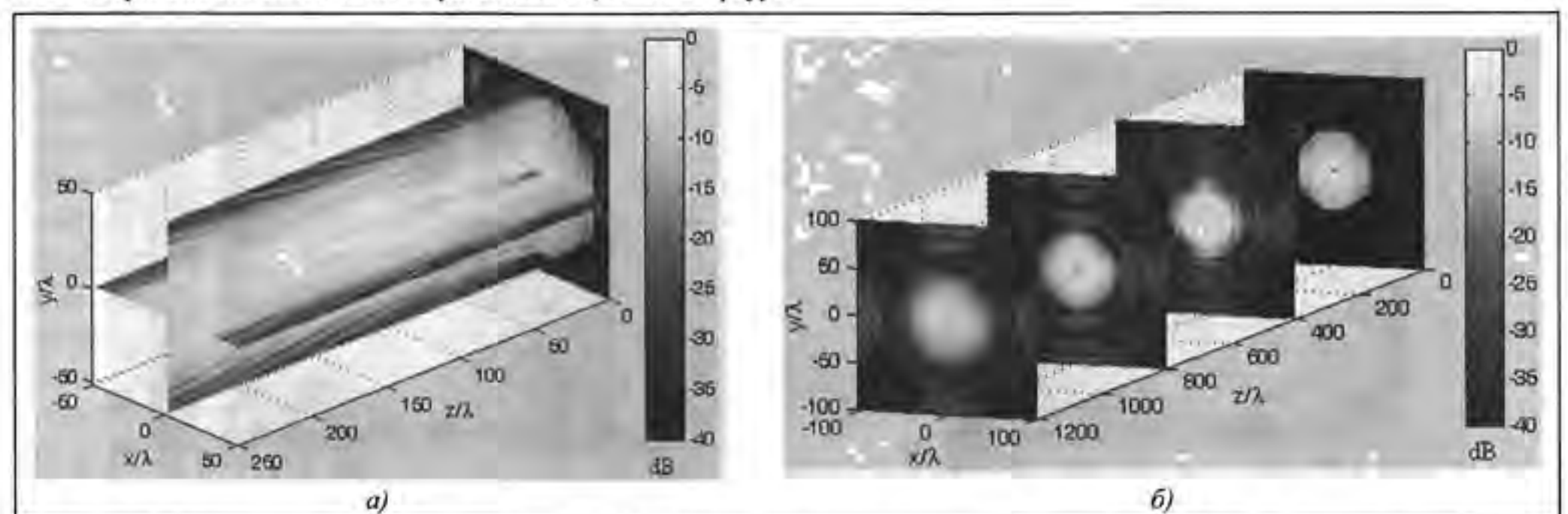


Рис. 4. Пространственная структура ближнего поля ФАР X-диапазона в сечениях, параллельных (а) и перпендикулярных (б) направлению распространения

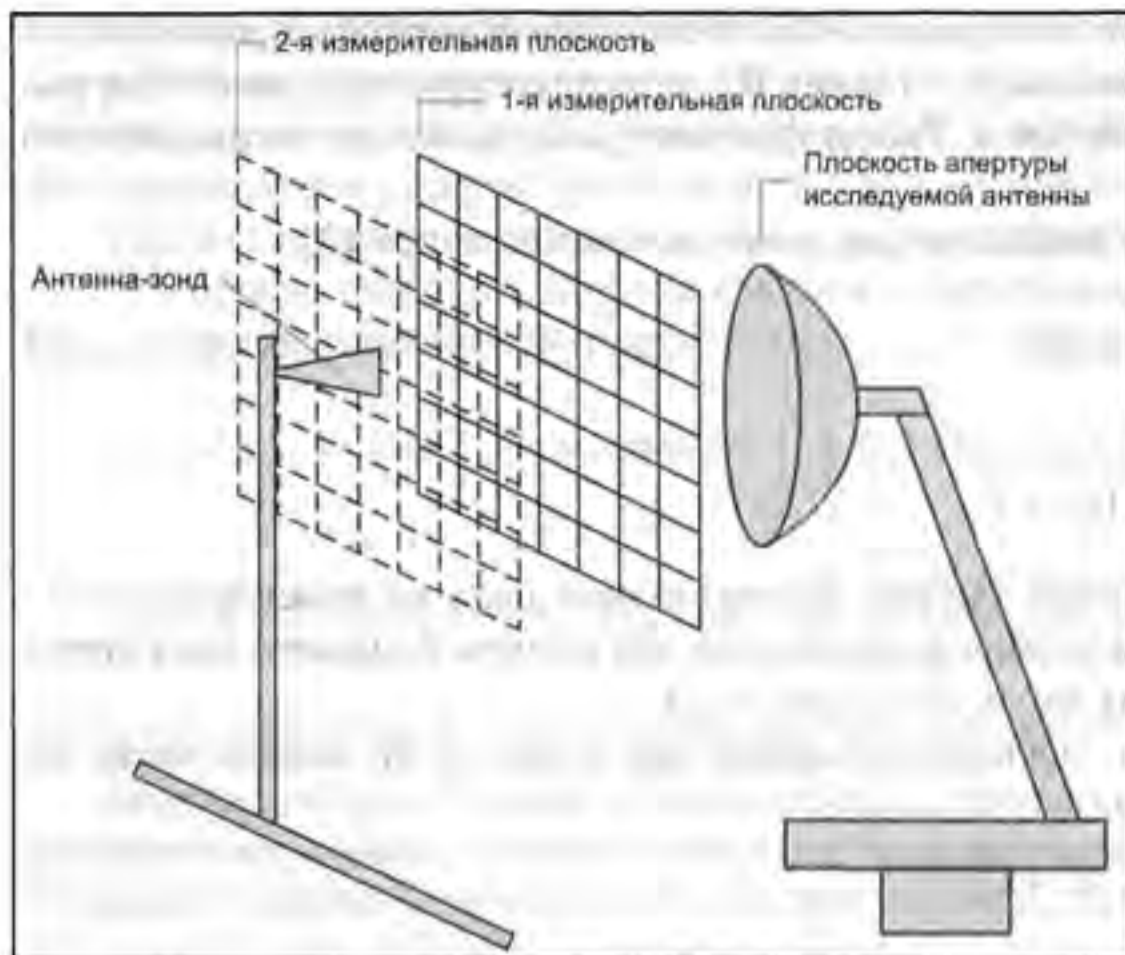


Рис.5. Конфигурация измерений для алгоритма восстановления фазового распределения

Шаг 1. Установка начального (нулевого) приближения фазового распределения на плоскости 1:

$$\hat{\varphi}_1(x, y, 0) = 0. \quad (7)$$

Шаг 2. Расчет АФР на плоскости 2 (обозначения координат в аргументах функций опускаем):

$$\hat{E}_2 = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F} \left\{ |E_1| e^{j\hat{\varphi}_1} \right\} e^{-jk_z d} \right\}. \quad (8)$$

Шаг 3. Замена оценки амплитудного распределения, полученной на шаге 2, измеренным амплитудным распределением на плоскости 2:

$$|\hat{E}_2| \rightarrow |E_2|. \quad (9)$$

Шаг 4. Расчет АФР на плоскости 1 по измеренному амплитудному распределению на плоскости 2 и оценке фазового распределения на плоскости 2, полученной на шаге 2:

$$\hat{E}_1 = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F} \left\{ |E_2| e^{j\hat{\varphi}_2} \right\} e^{jk_z d} \right\}. \quad (10)$$

Шаг 5. Замена оценки амплитудного распределения, полученной на шаге 4, измеренным амплитудным распределением на плоскости 1:

$$|\hat{E}_1| \rightarrow |E_1|. \quad (11)$$

Шаг 6. Повторение шагов 2–5, пока оценка амплитудного распределения на плоскости 1 (или плоскости 2) не будет совпадать с результатом измерения по некоторому заданному критерию:

$$\left\| |E_{1(2)}| - |\hat{E}_{1(2)}| \right\| \leq \varepsilon. \quad (12)$$

После получения оценки фазового распределения расчет поля антенны в дальней зоне производится известными методами [3, 5].

Рассмотренный алгоритм позволяет восстановить фазовое распределение с точностью до некоторой постоянной составляющей. Поэтому с его помощью нельзя получить фазовый сдвиг между отдельными ортогональными компонентами  $E_x$  и  $E_y$  и, соответственно, измерить характеристики антенны, связанные с векторным характером поля (коэффициент эллиптичности, угол наклона поляризационного эллипса, уровень кроссполяризации развязки и др.).

На рис. 6 показаны амплитудные распределения ФАР X-диапазона размером порядка  $30\lambda$ , измеренные на расстояниях  $z = 0,1$  м и  $z = 0,398$  м от апертуры. Расстояние между измерительными плоскостями составило примерно  $9\lambda$ . Измерение фазового распределения не проводилось. Амплитудные распределе-

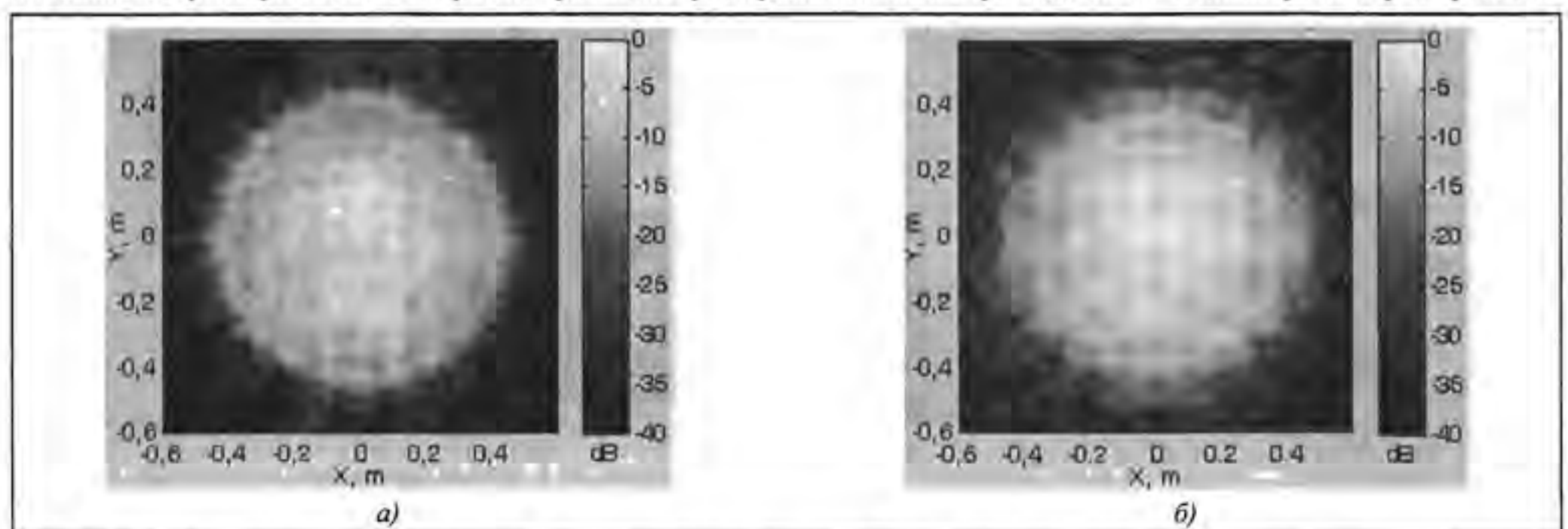


Рис. 6. Амплитудные распределения ФАР, измеренные на расстояниях  $z = 0,1$  м (а) и  $z = 0,398$  м (б) от апертуры

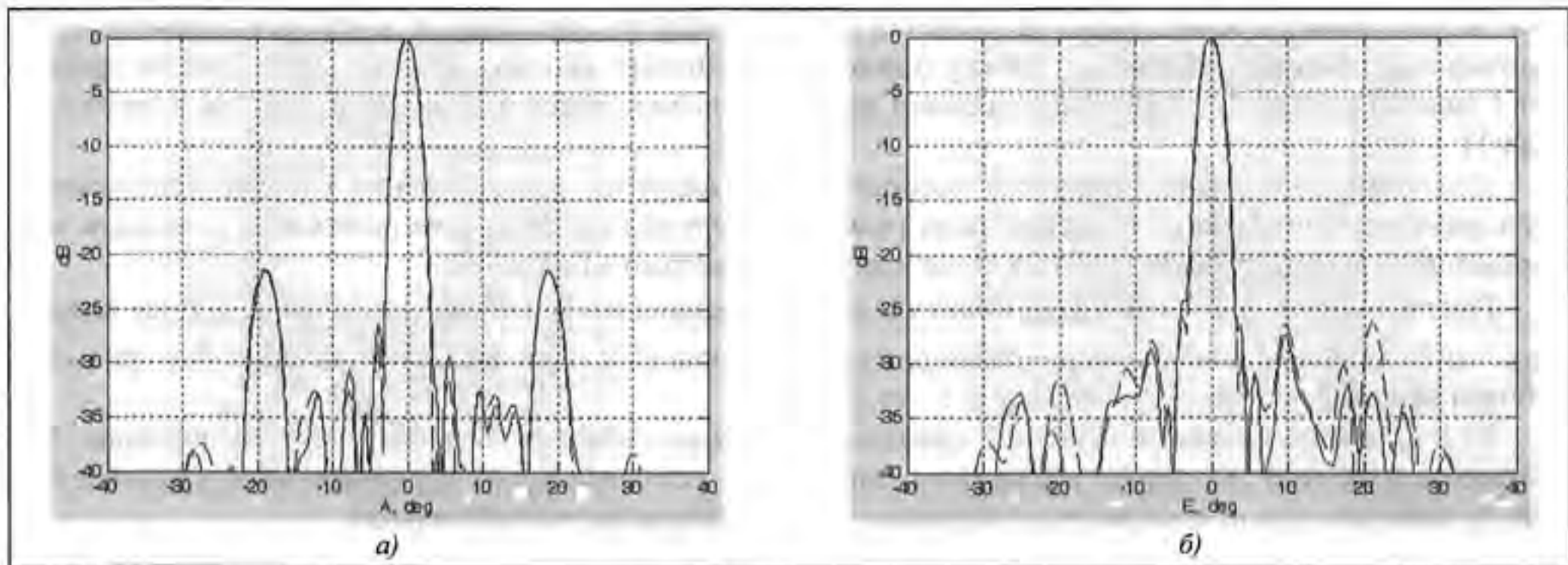


Рис. 7. Сравнение сечений диаграммы направленности ФАР по азимуту (а) и углу места (б), полученных по непосредственным измерениям АФР (—) и с помощью итерационного алгоритма восстановления фазового распределения (----)

ния получены при использовании векторного анализатора цепей в режиме измерения абсолютной мощности (в стандартном случае – при измерении комплексного АФР – векторный анализатор цепей используется в режиме измерения параметра  $S_{21}$  или  $S_{12}$ ).

В результате обработки этих амплитудных распределений с помощью рассмотренного итерационного алгоритма была получена оценка фазового распределения на плоскости  $z = 0,1$  м. На основе этой оценки фазового распределения и реальных измерений амплитудного распределения была рассчитана диаграмма направленности ФАР. Для сравнения диаграмма направленности была рассчитана также на основе непосредственных измерений амплитудного и фазового распределений на плоскости  $z = 0,1$  м (рис. 7). Результат получен при использовании  $n = 5000$  итераций алгоритма восстановления фазового распределения.

В качестве критерия сходимости алгоритма использовалась нормированная сумма квадратов разностей измеренного и рассчитанного амплитудных распределений на плоскости  $z = 0,1$  м:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_x \sum_y [|E_1(x,y)| - |\hat{E}_1(x,y)|]^2}{\sum_x \sum_y |E_1(x,y)|^2}} \quad (13)$$

**Алгоритм восстановления фазы с ограничением поля областью апертуры.** Рассмотренный пример относится к измерению антенн с высоким коэффициентом усиления, у которых ближнее поле распространяется в виде «прожекторного луча». Попытка применить этот алгоритм для пирамидальной рупорной антенны с коэффициентом усиления порядка 20 дБ, фазовое распределение поля которой имеет в области измерения выраженную фазовую структуру сферической волны (рис. 8, в и г), оказа-

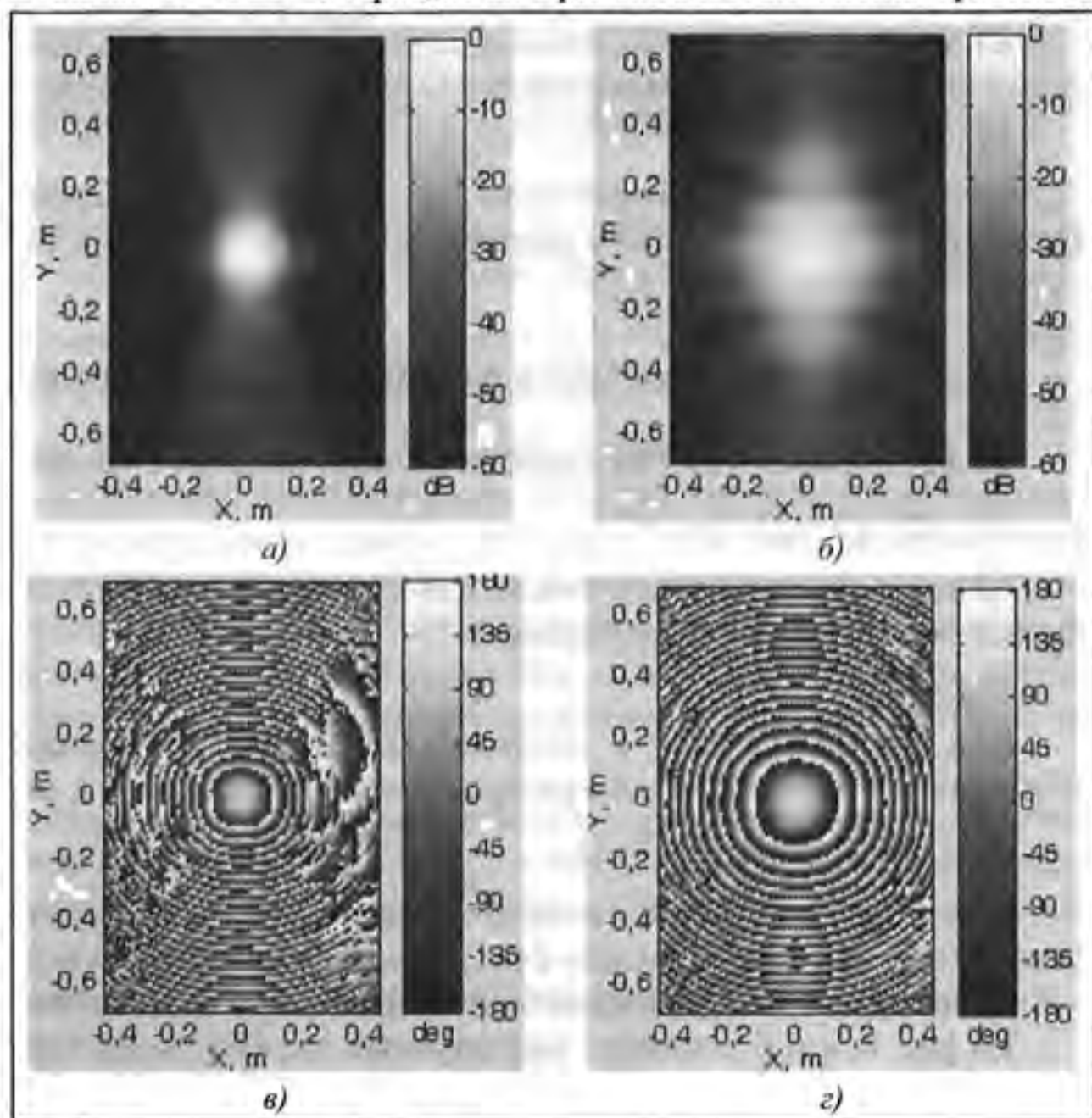


Рис. 8. Амплитудное (а и б) и фазовое (в и г) распределения поля рупорной антенны на частоте 12 ГГц на расстояниях 0,09 м и 0,29 м от раскрыва

лась безуспешной. В этом случае проявляется неединственность решения, полученного с помощью алгоритма восстановления фазы, поскольку близкое к истинному амплитудное распределение на плоскости 1 (или 2) получается при использовании неверной оценки фазового распределения на плоскости 2 (или 1).

Для устранения неоднозначности восстановления фазового распределения следует использовать априорную информацию о геометрических размерах апертуры антенны и ее положении в области сканирования. Алгоритм восстановления фазы при этом несколько изменяется.

Пусть имеется два измерения амплитудного распределения  $|E_1(x, y, d_1)|$  и  $|E_2(x, y, d_2)|$  на плоскостях 1 и 2, расположенных, соответственно, на расстояниях  $d_1$  и  $d_2$  от раскрыва антенны. Алгоритм обработки включает в себя следующие шаги.

**Шаг 1.** Формирование исходной (начальной) оценки АФР в плоскости апертуры антенны. Начальная оценка АФР в плоскости апертуры может быть получена путем пересчета АФР с плоскости 1 или 2 в предположении равномерного фазового распределения на этих плоскостях:

$$\hat{E}_0(x, y, 0) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F} \left\{ |E_{1(2)}| e^{j\hat{\varphi}_{1(2)}} \right\} e^{jk_z d_{1(2)}} \right\}. \quad (14)$$

В качестве начального приближения может быть также принято любое, в простейшем случае равномерное АФР:  $\hat{E}_0(x, y, 0) = 1$ .

**Шаг 2.** Ограничение АФР в плоскости раскрыва антенны геометрическими размерами апертуры:

$$\hat{E}_0^{trunc}(x, y, 0) = \Pi(x, y) \hat{E}_0(x, y, 0), \quad (15)$$

где  $\Pi(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \mathfrak{R}, \\ 0, & (x, y) \notin \mathfrak{R}, \end{cases}$ ;  $\mathfrak{R}$  – область апертуры антенны.

**Шаг 3.** Расчет АФР на плоскости 1:

$$\hat{E}_1 = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F} \left\{ \hat{E}_0^{trunc} \right\} e^{-jk_z d_1} \right\}. \quad (16)$$

**Шаг 4.** Замена оценки амплитудного распределения, полученной на шаге 3, измеренным амплитудным распределением на плоскости 1:

$$|\hat{E}_1| \rightarrow |E_1|. \quad (17)$$

**Шаг 5.** Расчет АФР в плоскости апертуры по измеренному амплитудному распределению на плоскости 1 и оценке фазового распределения на плоскости 1, полученной на шаге 3:

$$\hat{E}_0 = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F} \left\{ |E_1| e^{j\hat{\varphi}_1} \right\} e^{jk_z d_1} \right\}. \quad (18)$$

**Шаг 6.** Ограничение АФР в плоскости раскрыва антенны геометрическими размерами апертуры (15).

**Шаг 7.** Расчет АФР на плоскости 2 по оценке АФР на апертуре:

$$\hat{E}_2 = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F} \left\{ \hat{E}_0^{trunc} \right\} e^{-jk_z d_2} \right\}. \quad (19)$$

**Шаг 8.** Замена оценки амплитудного распределения, полученной на шаге 7, измеренным амплитудным распределением на плоскости 2:

$$|\hat{E}_2| \rightarrow |E_2|. \quad (20)$$

**Шаг 9.** Расчет АФР в плоскости апертуры по измеренному амплитудному распределению на плоскости 2 и оценке фазового распределения на плоскости 2, полученной на шаге 7:

$$\hat{E}_0 = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F} \left\{ |E_2| e^{j\hat{\varphi}_2} \right\} e^{jk_z d_2} \right\}. \quad (21)$$

**Шаг 10.** Повторение шагов 2–9, пока оценка амплитудного распределения на плоскости 1 (или плоскости 2) не будет совпадать с результатом измерения по некоторому заданному критерию.

Далее расчет поля в дальней зоне производится по полученной оценке АФР в апертуре антенны.

На рис. 8, а и б показаны амплитудные распределения вертикально поляризованной рупорной антенны с размерами раскрыва  $9,5 \times 13$  см, измеренные на расстояниях 0,09 м и 0,29 м от апертуры, на частоте 12 ГГц. С помощью рассмотренного алгоритма по этим амплитудным распределениям была получена оценка АФР в апертуре антенны (рис. 9). Сравнение сечений ДН в главных плоскостях, рассчитан-

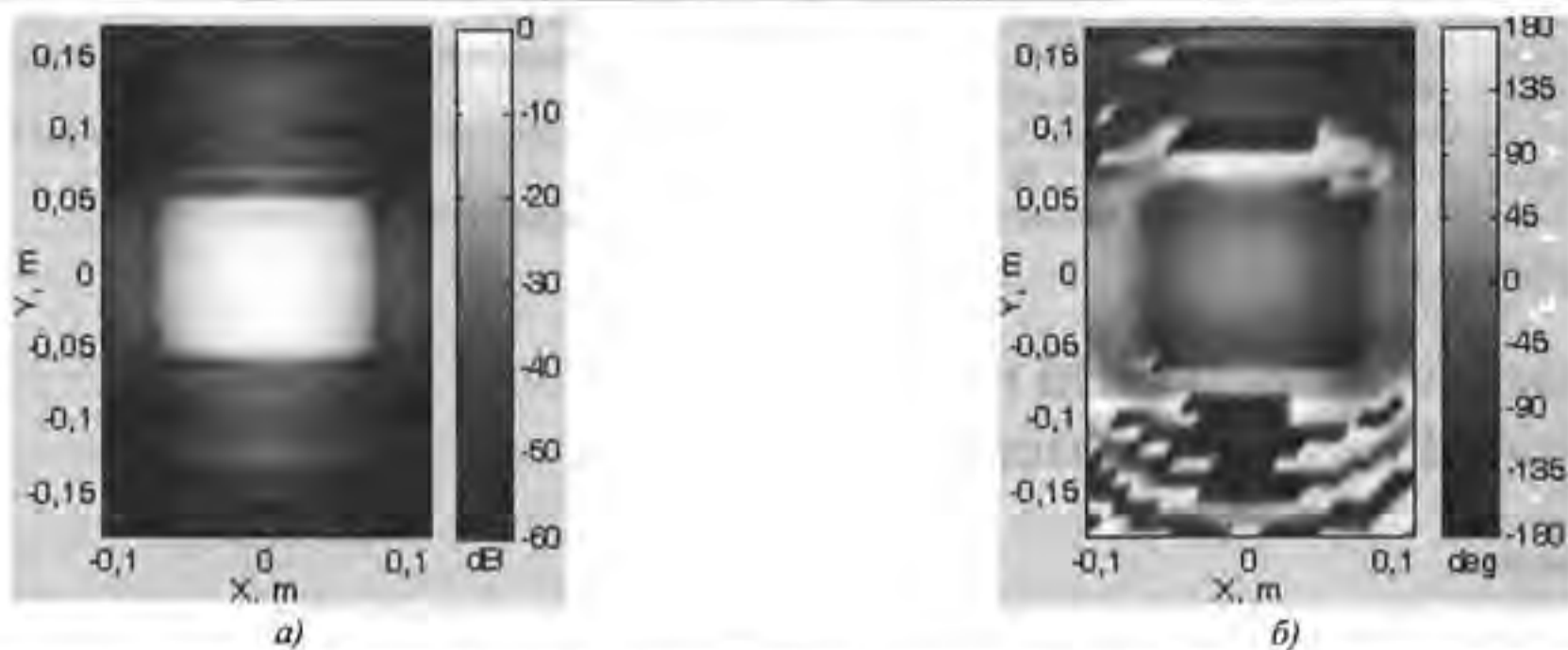


Рис. 9. Оценка амплитудного (а) и фазового (б) распределений поля в плоскости апертуры рупорной антенны размером 9×13,5 см на частоте 12 ГГц

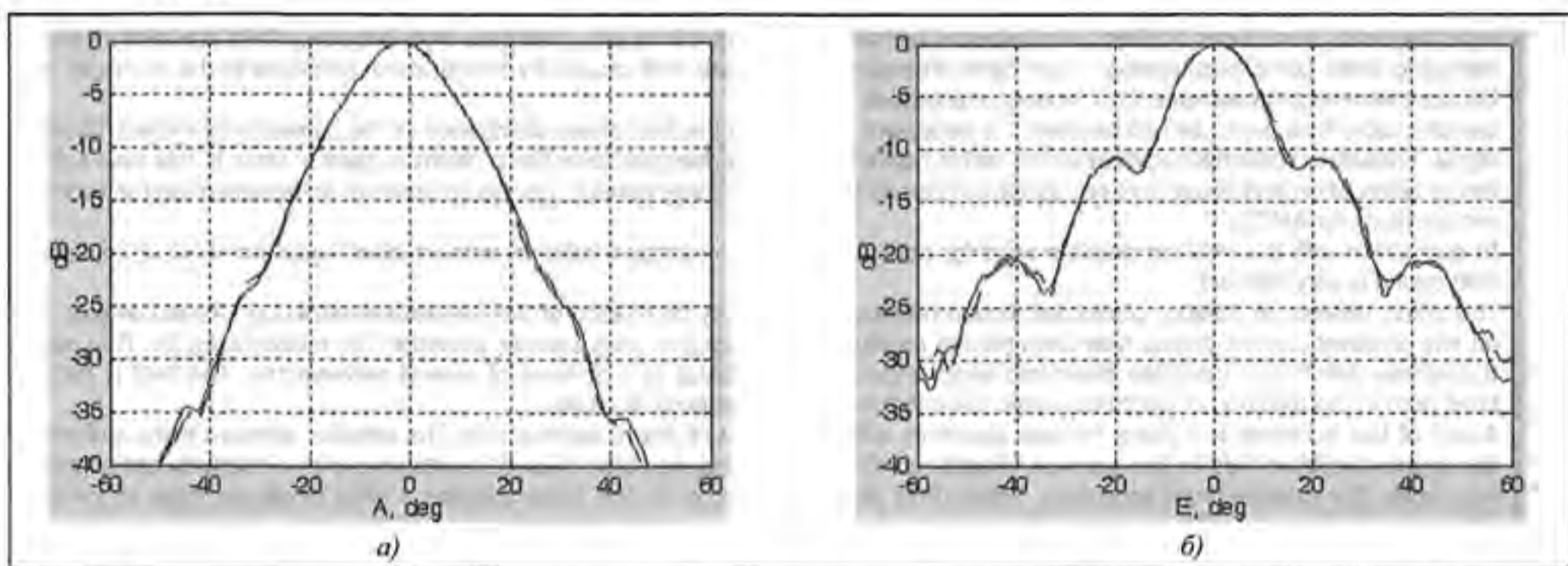


Рис. 10. Сравнение диаграмм направленности рупорной антенны на частоте 12 ГГц в плоскости  $H$  (а) и в плоскости  $E$  (б), полученных по непосредственным измерениям АФР (—) и с помощью алгоритма восстановления фазового распределения (-----)

ных по непосредственным измерениям комплексного АФР на плоскости  $z = 0,09$  м и по оценке АФР в раскрыве антенны, полученной с помощью рассмотренного алгоритма, показано на рис. 10.

- Рассмотренные алгоритмы обработки позволяют при измерениях антенн в ближней зоне с помощью планарного сканера получить диаграмму направленности антенны без измерения фазового распределения поля. Данные алгоритмы могут быть использованы, если на входе приемника невозможно обеспечить опорный сигнал с требуемыми для измерения фазы уровнем и фазовой стабильностью. Такая проблема, несмотря на применение самых современных кабелей, может иметь место в планарных сканерах больших размеров и/или на высоких частотах измерений. Точность измерения ДН рассмотренными методами можно оценить как вполне приемлемую для большинства практических задач.

Данная работа выполнена в ходе исследований по совершенствованию программно-алгоритмического обеспечения автоматизированных антенных измерительных комплексов, выпускаемых научно-производственным предприятием «ТРИМ» *Сверхширокополосные Измерительные системы* (г. Санкт-Петербург).

Автор выражает благодарность П.В. Миляеву за полезное обсуждение результатов работы, а также М.А. Чавдарь за выполнение измерений антенн.

### Литература

1. Kerns D.M. Plane-wave scattering-matrix theory of antennas and antenna-antenna interactions // National Bureau of Standards. Monograph 162. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. 1981.

2. Вычислительные методы в электродинамике / под ред. Р. Митры. М.: Мир. 1977.
3. Gregson S., McCormic J., Parini C. Principles of planar near-field antenna measurements // Electromagnetic waves series. V. 53. Institution of Engineering and Technology. London. 2007.
4. Razavi S.F., Rahmat-Samii Y. Phaseless techniques in antenna near-field measurements: algorithms, simulations and experiments // Прикладная радиоэлектроника. 2010. Т. 9. № 1.
5. Бахрах Л.Д. и др. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. Л.: Наука. 1985.

Поступила 20 мая 2014 г.

## Phaseless planar near-field measurements of antenna directional patterns

© Authors, 2015

© Radiotekhnika, 2015

**Yu. N. Kalinin** – Ph.D. (Eng.), Leading Research Scientist, Scientific and Production Enterprise TRIM

E-mail: kalinin\_yuri@mail.ru

Nowadays, a method of measuring antennas in the near field using a planar scanner is widely applied. Modern antenna measuring and computing complexes (AMCC) operating in the near field are known for their big sizes of scanning area (tens of meters) and a wide frequency band (over 50 GHz). A number of technical problems arising out of lengthy high-frequency links are encountered in designing these complexes, namely: high signal attenuation and phase drift caused by temperature variations in the course of continuous many-hour measurements of large-size antennas.

Lengthy cable lines are to be laid because it is necessary to measure the field phase distribution of the generator branched reference signal. Frequency conversion applied in the vector network analyzers does not solve the problem in general since in this case a problem of attenuation and phase drift occurs for a heterodyne signal. In some cases it may be an obstacle in implementing the technical requirements for AMCC.

In connection with it a study of possible ways for obtaining antenna directional patterns without direct measurements of field phase distribution is very relevant.

The article reviews an iterative phase distribution retrieval algorithm by the results of field amplitude distribution measurements only on two adjacent parallel planes near the antenna aperture. This algorithm uses another algorithm for recalculating the field amplitude-phase distribution from one plane into another parallel plane being at a distance of several wavelengths. The field is recalculated both in the direction of electromagnetic wave distribution and antenna aperture.

A kind of this algorithm is a phase retrieval algorithm with calculation of phase distribution in the antenna aperture plane and limitation of the calculated field by the aperture geometrical dimensions. This algorithm is used for antennas with a relatively low amplification factor (for example horn antennas), whose field phase distribution on the plane contains a vivid phase structure of spherical wave.

The results of experimental measurements are provided for two types of antennas: X-range phased-array antenna about 30· in diameter and pyramidal horn antenna sized 9×13,5 cm at the frequency of 12 GHz. The directional patterns obtained using the phase retrieval algorithm are compared to the diagrams obtained following the results of complex amplitude-phase distribution measurements in a direct way.

### References

1. Kerns D.M. Plane-wave scattering-matrix theory of antennas and antenna-antenna interactions // National Bureau of Standards. Monograph 162. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. 1981.
2. Vychislitel'nye metody v e'lektrodinamike / pod red. R. Mitry. M.: Mir. 1977.
3. Gregson S., McCormic J., Parini C. Principles of planar near-field antenna measurements // Electromagnetic waves series. V. 53. Institution of Engineering and Technology. London. 2007.
4. Razavi S.F., Rahmat-Samii Y. Phaseless techniques in antenna near-field measurements: algorithms, simulations and experiments // Prikladnaya radioe'lektronika. 2010. Т. 9. № 1.
5. Bakhrakh L.D. i dr. Metody izmerenij parametrov izluchayushchikh sistem v blizhnej zone. L.: Nauka. 1985.