

**Федеральное агентство по науке и инновациям  
Федеральное государственное научное учреждение «Научно-  
исследовательский радиофизический институт»  
(ФГНУ НИРФИ)**

**Препринт №500  
Особенности измерений характеристик антенн  
в системе координат  
поляризационного и азимутального углов.**

**Ю.И. Белов  
В.П. Иванов  
В.И. Турчин**

**Нижний Новгород  
2005**

Ю.И. Белов<sup>1</sup>, В.П. Иванов<sup>1</sup>, В.И. Турчин<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Научно исследовательский радиофизический институт (Нижний Новгород),

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН (Нижний Новгород).

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН  
В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО И АЗИМУ-  
ТАЛЬНОГО УГЛОВ.

Препринт № 500 – Нижний Новгород: НИРФИ, 2005, 34с.

УДК 537.0.092.6; 621.37.029.6

Рассмотрены особенности формирования заданных траекторий для сканирования испытываемыми антеннами определенной части пространства в системе координат поляризационных и азимутальных углов, специфика погрешностей измерений основных характеристик испытываемых антенн в ней.

## Введение

В работе рассматриваются некоторые вопросы испытаний характеристик антенн СВЧ диапазона, главным образом антенных решеток (АР) с помощью специализированного стендового оборудования, используемого в широком диапазоне волн и для различных конструкций испытываемых антенн (ИА), в том числе размещаемых на подвижных носителях. Стендовое оборудование, см. рис. 1, включает два позиционера (опорно-поворотных устройств) поляризационного типа. Один из позиционеров (стенд №1) размещен на вышке, может поворачиваться вокруг вертикальной (азимутальной оси, угол  $A$ ) и перемещаться вдоль своей оси по горизонтальным, горизонтируемым направляющим. Такое расположение уменьшает влияние отражений сигналов от пола камеры при испытаниях антенн. Второй поляризационный позиционер (угол  $\varphi_2$ ) размещен на стационарном возвышении и допускает небольшие регулировки перемещения по высоте размещения зондовой антенны ( $h$ ), а также по углам в угломестно-азимутальной системе (углы  $A_2, \beta$ ). Описываемые позиционеры обычно используются для антенн с симметрией 1-го (диполь) или 2-го типа (рупор с модой  $H_{11}$ ), согласно классификации [1], а координатная система для описания вращений испытываемых антенн известна как «Ludwig-3» [2].

Измерения характеристик многолучевых решеток, с использованием вращений по поляризационному и азимутальному углу имеют свои особенности. Малая ширина лучей и их разнесение в пространстве у таких антенн вводят жесткие ограничения на точности определения ориентации их локальных систем координат относительно лабораторной системы координат, физически связанной с осями позиционеров в определенных их положениях. Методология оценки погрешностей испытаний АР связана с измерениями систематических отклонений центров локальных систем координат от физической реализации лабораторной системы и учета этих результатов для оценки погрешностей характеристик испытываемых антенн. Также учитываются и взаимные положения поляризационных осей позиционеров (как предельные оценки), несущих испытываемую и измерительную антенны, их положение в пространстве. При этом многолучевые антенные структуры испытываются при фиксированном положении на позиционере с измерением так называемой трехмерной

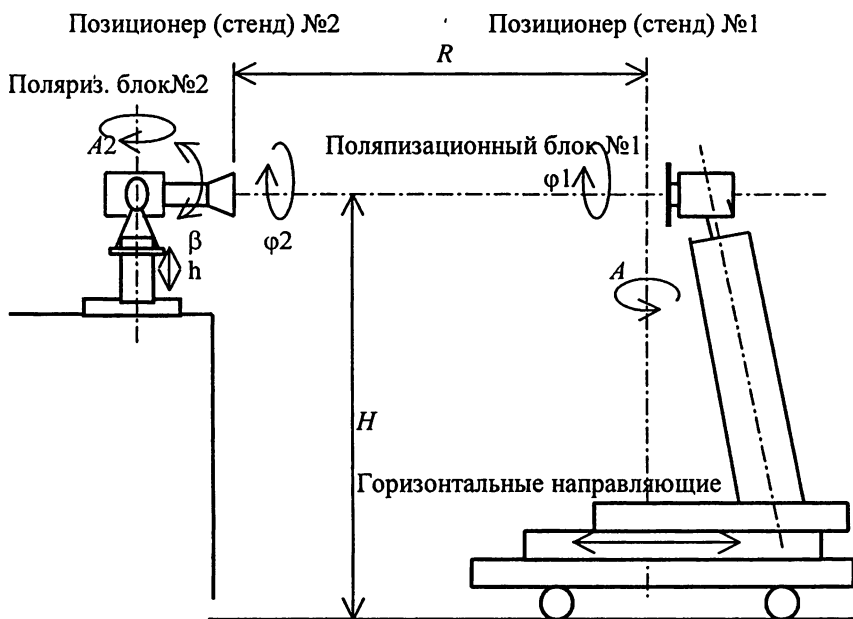


Рис.1

диаграммы направленности (ДН), а погрешности ориентации лучей в пространстве из-за смещений систем координат рассчитываются теоретически с учетом этих смещений.

Перечислим основные юстировочные характеристики стендов, которые могут быть контролированы с помощью обычных геодезических приборов.

1. Вертикальность азимутальной оси вращения стенда № 1 может быть установлена с точностью  $\pm 30''$ .
2. Горизонтальность поляризационной оси вращения стенда №1 может быть установлена с точность  $\pm 30''$ .
3. Непересечение поляризационной оси вращения с азимутальной осью вращения стенда №1 в разных местах испытательного полигона на расстояниях дальней зоны может быть установлено с точностью  $\pm 3\text{мм}$  (для конкретной реализации стендов).

4. Вертикальность цилиндрических направляющих ОПУ №2 может быть установлена с точностью  $\pm 30''$ . Они позволяют осуществлять вертикальное перемещение приемной антенны зонда на интервале порядка 50 см.
5. Горизонтальность поляризационной оси вращения стенда №2 может быть установлена с точностью  $\pm 1'$  (ухудшение в сравнении с п.2 из-за ограниченности базы геодезических измерений).
6. Несовпадение поляризационных осей вращения стендов №1 и №2 может быть установлено с точностью  $\pm 30''$ .

Ниже рассматриваются особенности формирования заданных траекторий для сканирования испытуемыми антеннами определенной части пространства в системе координат поляризационных и азимутальных углов, специфика погрешностей измерений основных характеристик испытуемых антенн в ней. Даны рекомендации по построению автоматизированных систем измерений параметров антенн, содержащих два поляризационных позиционера.

### **1. Система координат, используемая при измерениях.**

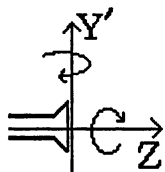
#### **Реализуемые траектории перемещений в поляризационно - азимутальной системе координат**

При разработке методик измерения ДН были использованы вышеупомянутые возможности опорно-поворотных устройств перемещения испытуемой и измерительной антенн. В данной схеме (см. рис.2) возможны повороты исследуемой антенны вокруг вертикальной (азимутальной) оси  $Y'$  и горизонтальной (поляризационной) оси  $Z'$ , которые используются для измерения отдельных сечений и двумерных распределений ДН. Измерительная антенна (зонд) имеет возможность вращения вокруг горизонтальной (поляризационной) оси  $Z'$  и перемещения вдоль вертикальной оси в диапазоне  $\Delta Y' = \pm 0.25$  м. <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> При юстировке возможны также повороты зонда по углу места и азимуту вокруг осей, параллельных осям  $X'$  и  $Y'$ , в секторе углов примерно  $\pm 10^\circ$ .

испытуемая  
антенна



измерительная  
антенна

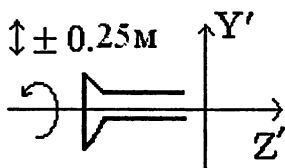


Рис. 2

Рассмотрим траектории перемещения зонда в связанной с испытуемой антенной системе координат  $XYZ$ , реализуемые при указанных вращениях.

При повороте испытуемой антенны по азимуту на угол  $A$  и вокруг оси  $Z$  на угол  $\varphi$  (см. рис.3) координаты произвольной точки ( $X', Y'Z'$ ) в неподвижной системе преобразуются в повернутой системе следующим образом, см., например [3]):<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} X &= X' \cos A \cos \varphi + Y' \sin \varphi + Z' \sin A \cos \varphi, \\ Y &= -X' \cos A \sin \varphi + Y' \cos \varphi - Z' \sin A \sin \varphi, \\ Z &= -X' \sin A + Z' \cos A. \end{aligned} \quad (1.1)$$

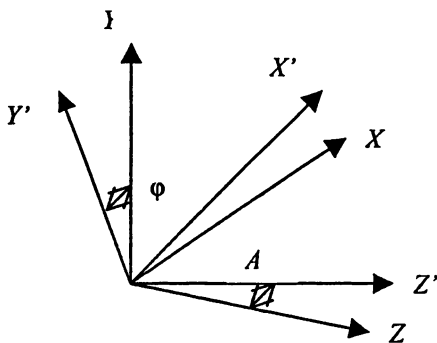


Рис. 3

<sup>2</sup> Для определенности считаем положительными направления вращения по часовой стрелке со стороны ИА (см. рис.2)

Соответственно проекции единичного вектора в направлении на зонд, имевшие в неподвижной системе значения  $c_x = 0$ ,  $c_y = 0$ ,  $c_z = 1$ , в повернутой системе координат записываются в виде

$$\begin{aligned}c_x &= \sin A \cos \varphi, \\c_y &= -\sin A \sin \varphi, \\c_z &= \cos A.\end{aligned}\tag{1.2}$$

Очевидно, что при используемых типах вращения наиболее просто реализуется полярная сетка отсчетов координат в плоскости  $XU$ . Например, для измерения двумерной ДН можно провести несколько раз сканирование испытуемой антенной по азимуту в заданном секторе при дискретных поворотах по углу  $\varphi$  между сканами. При реализации данной схемы сканирования могут быть определены положения главных максимумов ИА.

Для измерения отдельных сечений ДН, проходящих через центр системы координат выполняется сканирование по азимуту (по  $A$ ) при фиксированном значении угла  $\varphi$ . Так для измерения сечения ДН по координате  $c_x$  (по углу  $\alpha$  в азимутально-угломестной системе) должно выполняться сканирование по  $A$  при  $\varphi = 0$ . Для измерения сечения ДН вдоль координаты  $c_y$  (по углу  $\beta$  – угломестное сечение ДН) необходимо развернуть антенну на угол  $\varphi = \pm 90$  град. В принципе, при синхронном вращении ИА по обеим координатам  $A$  и  $\varphi$  с использованием соотношений (1.2) возможно измерение любых сечений ДН.

Возможно также измерение отдельных сечений ДН, проходящих параллельно осям  $X$  и  $Y$ , при вращении антенны только по азимуту. Это может потребоваться, в частности, при смещении максимума ДН ИА от оси  $Z$ . Например, по результатам измерения двумерной ДН ИА были определены координаты  $c_x^{\max}$ ,  $c_y^{\max}$  положения главного максимума и требуется измерить два ортогональных сечения, проходящих через этот максимум. Для измерения сечения, параллельного оси  $X$ , можно ввести смещение зонда по вертикали на величину  $\Delta Y' = R \operatorname{tg}(\arcsin c_y^{\max})$  и провести сканирование по  $A$  при значении  $\varphi = 0$ . При этом траектория движения зонда в системе координат, связанной с ИА, в соответствии с (1.1) запишется в виде

$$\begin{aligned}
 c_x &= \sqrt{1 - c_y^{\max 2}} \sin A \\
 c_y &= c_y^{\max} \\
 c_z &= \sqrt{1 - c_y^{\max 2}} \cos A.
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

Для измерения сечения ДН, параллельного оси  $Y$ , вводится смещение зонда по вертикали на величину  $\Delta Y' = R \operatorname{tg}(\arcsin c_x^{\max})$  и проводится сканирование по  $A$  при значении  $\varphi = 90$  град. В этом случае траектория движения зонда в системе координат, связанной с ИА, в соответствии с (1.1) записывается в виде

$$\begin{aligned}
 c_x &= c_x^{\max}, \\
 c_y &= -\sqrt{1 - c_x^{\max 2}} \sin A, \\
 c_z &= \sqrt{1 - c_x^{\max 2}} \cos A.
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Как уже было отмечено, смещение зонда по вертикали ограничено. Следовательно, рассмотренная методика применима при ограниченных значениях отклонений луча  $c_x^{\max}$ ,  $c_y^{\max}$  и используется довольно редко. Кроме того, при нормировке сечений ДН необходимо учитывать изменение расстояния между ИА и зондом, вызванное смещением зонда.

## 2. Требования по согласованию поляризации в используемой схеме измерений

Очевидно, что использование рассмотренной схемы вращения обуславливает дополнительные требования по согласованию поляризации испытываемой антенны и зонда (измерительной антенны). Измеряемые зондом компоненты поля  $E_x$  и  $E_y$  преобразуются в компоненты поля в повернутой системе координат в соответствии с соотношениями (1.1). Однако пересчет компонентов поля из одного базиса в другой невозможен из-за отсутствия информации о фазе измеряемого



сигнала (исходим из того, что приемник регистрирует лишь мощность). Поэтому, строго говоря, не могут быть измерены компоненты ДН ИА на отдельных поляризациях.

В общем случае (в широком угловом секторе) может быть измерена лишь диаграмма направленности по мощности испытываемой антенны. Поскольку известно, что поле в дальней зоне имеет лишь поперечные составляющие, измерение двух ортогональных компонентов поля в плоскости, параллельной  $X'OY'$ , даст возможность определить полную мощность, излучаемую в данном направлении. При этом зонд может принимать как две линейных, так и две круговых поляризации. В случае использования зонда с одной линейной поляризацией необходимо выполнять два последовательных измерения с поворотом плоскости поляризации зонда на 90 градусов.

В заключение заметим, что возможен также алгоритм измерения ДН ИА с согласованным поворотом зонда и испытываемой антенны вокруг горизонтальных осей  $Z$  и  $Z'$ . В этом случае в центральных точках сечений (центр полярной системы) взаимное положение зонда и испытываемой антенны остается неизменным, что дает возможность для использования данных, измеренных в центральных точках, в качестве калибровочных. Кроме того, при этом могут быть измерены сечения ДН ИА на отдельных поляризациях в узких угловых секторах.

### **3. Требования по точности установки испытываемой и измерительной антенн**

При выполнении измерений, связанных с угловым сканированием зонда испытываемой антенной (т.е. при измерении двухмерной ДН по мощности, ее сечений и поляризационных характеристик), должна быть введена отсчетная (картинная) плоскость, относительно которой приводятся все характеристики антенны, связанные с угловым сканированием. Используем введенную выше прямоугольную систему координат  $XYZ$ , в которой картинная плоскость определена уравнением  $Z = 0$ . Далее будем рассматривать два способа ее связи с опорно-поворотным устройством, имеющим две оси вращения: азимутальную (поворот на угол  $A$ ) и поляризационную (поворот на угол  $\varphi$ ); предварительно примем, что эти оси пересекаются в определенной точке и взаимно перпендикулярны. В обоих случаях начало ко-

ординат  $XYZ$  считаем совпадающим с точкой пересечения осей; далее при некотором начальном значении углов поворота (для определенности примем  $A = 0, \varphi = 0$ ) положим, что координатная ось  $Y$  совпадает с азимутальной осью и рассмотрим два случая:

- а) координатная ось  $Z$  совпадает с поляризационной осью,
- б) координатная ось  $X$  совпадает с поляризационной осью.

Соответственно на опорно-поворотном устройстве должны быть предусмотрены три реперных точки, находящиеся на определенном (точно известном) расстоянии от точки пересечения осей с учетом их ориентации. Посадочные места для каждого типа испытуемых антенн должны устанавливаться относительно этих реперных точек. Подчеркнем еще раз, что все результаты измерений будут приводиться относительно картинной плоскости в вариантах (а) или (б). Если потребуется в дальнейшем, может быть осуществлен пересчет результатов измерений, выполненных относительно картинной плоскости, в результаты измерений для некоторой указанной системы координат, связанной с испытуемой антенной при условии, что эта новая координатная система расположена известным образом относительно реперных точек.

Пусть далее единичный вектор  $\mathbf{c}'$ , направленный из начала координат  $XYZ$  к фазовому центру зонда, при начальных углах поворота имеет проекции:

$$\text{а) } \begin{cases} c'_x = \cos\beta' \sin\alpha', \\ c'_y = \sin\beta', \\ c'_z = \cos\beta' \cos\alpha', \end{cases} \quad (3.1a)$$

$$\text{б) } \begin{cases} c'_x = \cos\beta' \cos\alpha', \\ c'_y = \sin\beta', \\ c'_z = \cos\beta' \sin\alpha', \end{cases} \quad (3.1б)$$

где  $\beta'$  – угловая высота подъема зонда относительно поляризационной оси, а  $\alpha'$  – угловое смещение зонда относительно этой же оси в горизонтальной плоскости. Когда зонд находится точно на поляризационной оси,  $c'_x = c'_y = 0, c'_z = 1$ , в случае (а) и  $c'_x = 1, c'_y = c'_z = 0$  в случае (б).

При повороте на углы  $\varphi$  и  $A$  проекции единичного вектора  $\mathbf{c}$ , жестко связанного с картинной плоскостью, преобразуются, например, для варианта (б) с помощью матрицы<sup>3</sup>  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{c} = \mathbf{A}\mathbf{c}'$ ):

<sup>3</sup> Матрица преобразования для варианта (а) приведена в предыдущем разделе.

$$A = \begin{pmatrix} \cos A \dots\dots\dots - \sin A \dots\dots\dots 0 \\ \sin A \cos \varphi \dots \cos A \cos \varphi - \sin \varphi \\ \sin A \sin \varphi \dots \cos A \sin \varphi \dots \cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

На рис. 4 показаны сечения  $c_x$ ,  $c_y$  внутри единичного круга  $c_x^2 + c_y^2 < 1$  для переднего полупространства ( $c_z > 0$ ) для установки испытуемой антенны по типу (а) при  $\beta' = 0$ ,  $\alpha' = 0$  (слева) и  $\beta' = 5^\circ$  (справа).

Как очевидно из рис. 4, при способе (а) реализуется полярная сетка, т.е. равномерное покрытие всего переднего полупространства, однако при  $\beta' = 0^\circ$ ; при подъеме зонда над поляризационной осью в картинной плоскости образуется “дырка” с угловым радиусом  $\sin \beta'$ .

Аналогичная картина имеет место при способе (б), как показано на рис. 6 для зонда, находящегося на поляризационной оси и смещенного от нее в горизонтальной плоскости на угол  $\alpha'$ .

Как следует из рис.5, круг  $c_x^2 + c_y^2 < 1$  также не покрывается полностью, если зонд смещен относительно поляризационной оси, но уже в горизонтальной плоскости, причем образующиеся «дырки» относятся к области дальних лепестков, если считать, что главный максимум ДН испытуемой антенны находится вблизи центра картинной плоскости. Тем не менее, в обоих случаях целесообразно потребовать, чтобы перед началом измерений зонд был установлен строго на поляризационной оси.

Выше мы рассмотрели идеализированную схему угловых измерений, при которой оси вращения пересекаются и взаимно перпендикулярны, а отсчет углов выполняется точно. Кроме этого, мы получили, что для полного покрытия картинной плоскости зонд должен быть расположен точно на поляризационной оси. Из номенклатуры контролируемых юстировочных погрешностей позиционеров рассмотрим следующие основные составляющие суммарной угловой погрешности  $\Delta\psi$ :

- неперпендикулярность азимутальной и поляризационной осей, которую можно характеризовать, например углом  $\gamma$  в вертикальной плоскости, на который ориентация поляризационной оси отличается от перпендикуляра к азимутальной оси;
- непересечение осей, характеризуемое минимальным расстоянием между осями  $d$ ;

– смещение зонда в вертикальной плоскости относительно поляризационной оси на расстояние  $\Delta_{и}$  для варианта (а);

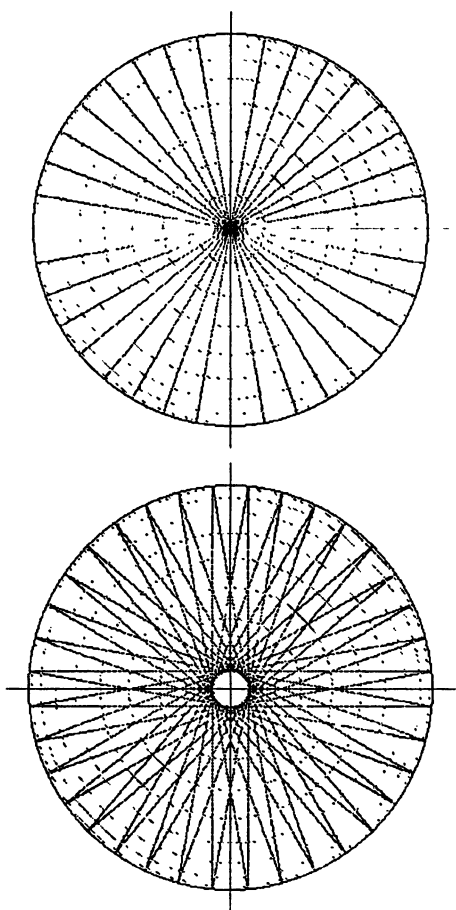


Рис. 4. Проекция единичного вектора  $s$  в картинной плоскости при непрерывном вращении испытуемой антенны по азимуту (сплошные линии) при фиксированных углах поворота относительно поляризационной оси с шагом  $10^\circ$  и при непрерывном вращении испытуемой антенны вокруг поляризационной оси (пунктирные линии) при фиксированных азимутальных углах, изменяющихся с шагом  $10^\circ$ ;  $\beta'=0^\circ$  и  $\beta'=5^\circ$

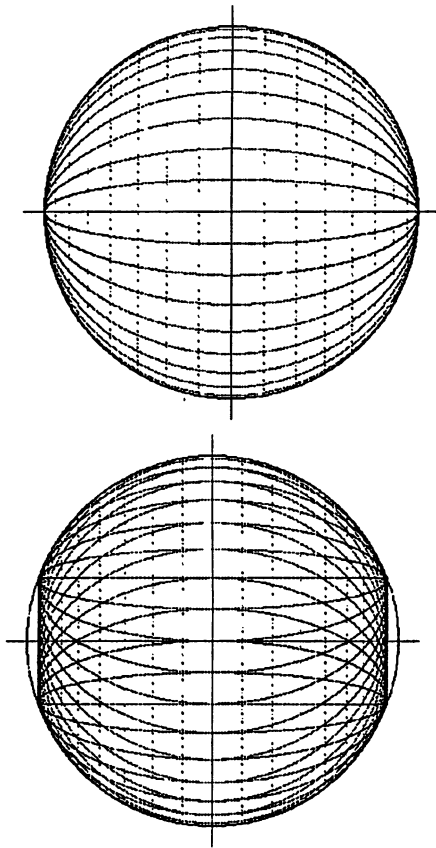


Рис.5. Проекция единичного вектора  $s$  в картинной плоскости при непрерывном вращении испытуемой антенны по азимуту (сплошные линии) и при непрерывном вращении испытуемой антенны вокруг поляризационной оси (пунктирные линии);  $\alpha' = 0^\circ$  и  $\alpha' = 20^\circ$

– погрешность угловых отсчетов  $\Delta\psi$  - погрешность измерителей текущих углов поворота  $\Delta\phi$ ,  $\Delta A$  (последняя характеризуется как конечной разрядностью датчиков "угол-код", так и систематической погрешностью измерения угловой координаты).

При рассмотрении систематических погрешностей, связанных с неточностью установки испытуемой и измерительной антенн, не пересечением и не перпендикулярностью осей стенда №1, т.е. величинами, определяемыми при юстировочных работах со стендами и ус-

танавливаемыми антеннами, вводятся две декартовых системы координат:  $(x', y', z')$  и  $(x, y, z)$ . Первая жестко связана с испытуемой антенной: положение антенны в этой системе координат не меняется при поворотах вокруг осей стенда №1. Вторая система координат (т.н. лабораторная система) привязана к неподвижному оборудованию этой системы; в ней, в частности, определяется ориентация осей стенда №1. Будем считать, что поляризационная ось в этой системе совпадает с осью  $z$  при некотором начальном угле поворота  $A$  вокруг азимутальной оси; этот начальный угол будем считать равным нулю. В штатной ситуации азимутальная ось в этой системе совпадает с осью  $y$ , начало координат находится в точке пересечения осей, а

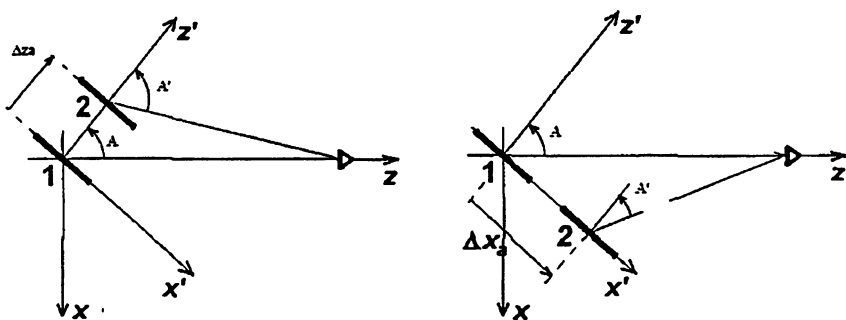


Рис. 6. К определению параллакса; 1— положение раскрыва испытуемой антенны с центром в начале координат, 2— положение смещенного раскрыва

координаты центра испытуемой антенны определены как  $(0,0,R)$ . Будем также полагать, что при некоторых начальных углах поворота  $A$  и  $\varphi$  соответственно вокруг азимутальной и поляризационной осей системы  $(x', y', z')$  и  $(x, y, z)$  совмещены (эти начальные углы будем полагать равными нулю).

При последующем вращении вокруг осей стенда №1 система  $(x', y', z')$  будет вращаться относительно системы  $(x, y, z)$ , а ее начало координат — смещаться относительно начала  $(x, y, z)$  при непересечении осей.

Рассмотрим параллакс, возникающий при смещении центра испытуемой антенны (ИА) относительно начала координат системы  $(x',$

$y', z'$ ). На рис.6 показаны две ситуации: смещение центра на  $\Delta z_a$  (слева) и на  $\Delta x_a$  (справа) вдоль осей  $z'$  и  $x'$  соответственно. Смещение ИА вдоль оси  $z'$  также определяет погрешности измерений, связанные с перемещением ИА вдоль тележки (цилиндрических направляющих) ОПУ-1. При смещении вдоль  $z'$  при повороте на угол  $A$  вместо направляющего косинуса  $\xi = \sin A$  будем иметь:

$$\xi' = \sin A' = \frac{\sin A}{\sqrt{1 + \delta_z^2 - 2\delta_z \cos A}} \quad (3.3a)$$

а при смещении вдоль оси  $x'$

$$\xi' = \sin A' = \frac{\sin A - \delta_x}{\sqrt{1 + \delta_x^2 - 2\delta_x \sin A}} \quad (3.36)$$

где  $\delta_x = \Delta x_a/R$ ,  $\delta_z = \Delta z_a/R$ . При малых  $|\delta_{x,z}| \ll 1^4$  имеем

$$\Delta\xi = \xi' - \xi = \begin{cases} \Delta_1 = 0,5\delta_z \sin 2A & \text{при смещении по } z' \\ \Delta_2 = -\delta_x \cos 2A & \text{при смещении по } x', \end{cases} \quad (3.4)$$

откуда  $|\Delta\xi| \leq 0,5|\delta_z|, |\delta_x|$ . Заметим, что если главный лепесток находится вблизи угловой ориентации  $A = 0$ , то смещение  $\delta_z$  практически не дает вклада в погрешность определения его положения.

Аналогично находятся погрешности, связанные с неточностью установки измерительной антенны: отклонения направляющих косинусов  $\Delta\xi, \Delta\eta$  равны  $\Delta\Delta_{x''}/R, \Delta\Delta_{y''}/R$  соответственно; погрешность  $\Delta_{z''}$  дает пренебрежимо малый вклад при ориентации главного мак-

<sup>4</sup> Для реализации этого допущения при измерениях ИА размещают на расстояниях от ИЗА больших или равных, чем определяемых по формуле  $R_{\text{ff}} = 2D^2/\lambda$

сумма приблизительно вдоль оси  $z'$ . Контроль этих величин осуществляется геодезическими инструментами. Учет их проводится расчетным путем, принимая во внимание допуски на изготовление устройства крепления ИзА:  $d_{\Sigma}^2 = \Delta_{a,(x,y)}^2 + \Delta_{u,(x,y)}^2 + d^2$ , где  $d$  – погрешность не пересечения азимутальной и поляризационной осей.

В общем случае (смещение антенн, не перпендикулярность осей и пр.) координаты некоторой точки, характеризуемой вектором  $x'_a$  в стартовом положении ( $A = 0, \varphi = 0$ ) при повороте вокруг осей стенда №1 на угол  $A$  и угол  $\varphi$  преобразуются как

$$\bar{x}_a = \mathbf{A}\bar{x}'_a + \bar{b}, \quad (3.5)$$

где вектор  $x_a$  определяет новое положение точки. Обратное к (3.5) преобразование есть, очевидно,

$$\bar{x}'_a = \mathbf{A}^{-1}\bar{x}_a - \bar{b}.$$

Поскольку направляющие косинусы по определению есть проекции на оси  $x', y', z'$  единичного вектора, направленного из начала координат  $(x', y', z')$  в точку  $x_n$  - центр измерительной антенны, они могут быть получены как компоненты единичного вектора  $\xi$ :

$$\xi = \frac{\mathbf{A}^{-1}(\bar{x}_u - \bar{b})}{|\mathbf{A}^{-1}(\bar{x}_u - \bar{b})|}. \quad (3.6)$$

При расчете  $\mathbf{A}$  и  $\bar{b}$  положим, что азимутальная ось отклонена на некоторый угол по отношению к оси  $y$  и пересекает плоскость  $xz$  в точке  $\bar{d} = (d_x, 0, d_z)$ . Опуская промежуточные выкладки, находим, что

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}_{\gamma}^{-1} \mathbf{U}_A \mathbf{U}_{\gamma} \mathbf{U}_{\varphi}, \quad \bar{b} = (\mathbf{I} - \mathbf{U}_{\gamma}^{-1} \mathbf{U}_A \mathbf{U}_{\gamma}) \bar{d}, \quad (3.7)$$



$I$  – единичная матрица, матрицы  $U_A$ ,  $U_\varphi$  описывают вращения вокруг азимутальной и угломестной осей соответственно,

$$U_A = \begin{bmatrix} \cos A & 0 & \sin A \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A & 0 & \cos A \end{bmatrix}, \quad U_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

а матрица  $U_\gamma$  описывает преобразования координат при повороте системы так, чтобы ось  $y$  была ориентирована параллельно азимутальной оси.

Нетрудно видеть, что слагаемое  $\vec{b}$  в (3.6) определяет параллакс аналогично (3.4). Учитывая сделанные выше оценки, можно считать, что не пересечение осей приводит к угловой погрешности, не превышающей  $d/R$  [рад], и может не рассматриваться при  $d_x$ ,  $d_z$  порядка нескольких миллиметров.

Оценить погрешность, связанную с не перпендикулярностью осей, можно, например, положив, что азимутальная ось повернута на угол  $\gamma$  относительно оси  $x$ . В этом случае

$$U_\gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

Заметим, что в штатной ситуации ( $d = 0$ ,  $\gamma = 0$ )  $A^{-1} = U_\varphi^T U_A^{T5}$ ,  $b = 0$  и

$$\xi = \sin A \cos \varphi, \quad \eta = -\sin A \sin \varphi, \quad \zeta = \cos A. \quad (3.8)$$

---

<sup>5</sup> Здесь учитывается унитарность матриц вращения

При наклоне азимутальной оси на угол  $\gamma$  получаем искаженные координаты в картинной плоскости  $\xi'$ ,  $\eta'$ ,  $\zeta'$ , которые удобно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}\xi' &= \cos \gamma [\xi + \sin \varphi \sin \gamma (1 - \zeta)], \\ \eta' &= \cos \gamma [\eta - \cos \varphi \sin \gamma (1 - \zeta)], \\ \zeta' &= \sin^2 \gamma + \zeta \cos^2 \gamma.\end{aligned}\tag{3.9}$$

Из (3.9) следует, что при малых углах наклона, когда  $\cos \gamma \sim 1$ , погрешности определения направляющих косинусов  $\Delta\xi$ ,  $\Delta\eta$  при вращении вокруг поляризационной оси перемещаются по окружности радиусом  $\sin \gamma (1 - \zeta)$ :

$$\sqrt{\Delta\xi^2 + \Delta\eta^2} \cong \sin \gamma (1 - \zeta).\tag{3.10}$$

Поскольку  $1 - \zeta = 2 \sin^2 A/2$ , погрешность снижается, когда главный лепесток примыкает к направлению поляризационной оси; например, если он не выходит из конуса с угловым раствором  $20^\circ$  ( $|A| \leq 20^\circ$ ), погрешность не превышает  $0,06 \sin \gamma$ .

Наклон азимутальной оси, производимый путем поворота на угол  $\gamma$  относительно оси  $z$ , приводит просто к добавке этого угла  $\gamma$  к углу  $\varphi$  (при данном повороте сохраняется перпендикулярность осей); эта составляющая может быть найдена при юстировке ОПУ-1 и в дальнейшем не будет рассматриваться. Поскольку любой наклон поляризационной оси может быть произведен за счет двух поворотов вокруг осей  $x$  и  $z$ , результирующая погрешность разлагается на указанное дополнительное слагаемое при отсчете угла поворота вокруг поляризационной оси и на составляющую (3.10). Если ориентация отклонения азимутальной оси неизвестна (т.е. неизвестна доля, приходящаяся на углы поворота вокруг осей  $x$  и  $z$  в общей величине угла отклонения  $\gamma$ ), можно считать, что вся угловая погрешность определяется выражением (3.10).

Рассмотрим погрешность, определяемую случайной составляющей отсчета углов при вращении вокруг осей ОПУ-1. Поскольку случайные ошибки в угловых отсчетах эквивалентны случайной аддитивной составляющей погрешности измерения уровней ДН  $\Delta F$ :  $\Delta F(\xi) \cong F'(\xi) \Delta \xi$ , где  $\Delta \xi$  – случайная погрешность отсчета угловой

координаты  $\xi$  (направляющего косинуса),  $F'(\xi)$  – производная ДН по углу, то для погрешности (СКО) измерения положения главного максимума  $\sigma_{гл}$  получим

$$\sigma_{гл} = \beta \sigma_{\xi} \left( \frac{\Delta_{\xi}}{\Delta A_{0,5}} \right), \quad (3.11)$$

где  $\sigma_{\xi}$  – СКО погрешности отсчета углов,  $\Delta_{\xi}$  – угловой дискрет измерений,  $\Delta A_{0,5}$  – ширина главного лепестка ДН по уровню 0,5,  $\beta$  – численный коэффициент, зависящий от отношения сектора углов, внутри которого проводится уточнение положения главного максимума, к ширине ДН ( $\beta < 2$ ).

Суммарная относительная погрешность измерения положения главного максимума  $\delta_{ф_{гл}}$  вследствие неточности позиционирования испытуемой и измерительной антенн, не пересечения и не перпендикулярности осей ОПУ-1 и погрешностей в угловых координатах (суммируются соотношения (3.4), (3.10), (3.11)) определяется по соотношению:

$$(\delta_{гл})^2 = \left( \frac{d}{R \Delta A_{0,5}} \right)^2 + \left( s_{\alpha} \frac{\gamma}{\Delta A_{0,5}} \right)^2 + \beta^2 \left( \frac{\sigma_{\xi}}{\Delta A_{0,5}} \right)^2 \left( \frac{\Delta_{\xi}}{\Delta A_{0,5}} \right)^2, \quad (3.12)$$

где  $d$  – расстояние между осями ОПУ,  $s_{\alpha} = 2 \sin^2(\alpha/2)$ ,  $\alpha$  – отклонение направления главного максимума от поляризационной оси,  $\gamma$  – измеренный наклон азимутальной оси.

Из условия дальней зоны ( $D$  – размер раскрыва испытуемой антенны,  $\lambda$  – длина волны)  $R = 2D^2/\lambda$  и приближенного равенства  $\Delta \varphi_{0,5} \cong \lambda/D$  следует, что первое слагаемое в (16)  $\cong d/(2D)$ , поэтому для уменьшения этой составляющей погрешности рекомендуется размещать ИА на расстояниях, больших вышеописанного параметра дальней зоны.

#### 4. Рекомендуемый порядок работы при испытаниях антенн

При разработке информационно-измерительных систем (ИИС), для измерения характеристик вновь разрабатываемых антенных решеток, в программном обеспечении ИИС рекомендуется организо-

вывать следующий порядок выбора задач для повышения точности первичных испытаний антенн [4]. Подготовка параметров задачи является выделенной процедурой, которая заключается в предварительной подготовке определенных файлов, описывающих радиоизмерительную аппаратуру, испытываемую антенну, измерительную и вспомогательную антенны, специфических характеристик эксперимента (секторы измерений, частоты, диапазон измерений).

В начале испытаний по измерениям распределения мощности излучения исследуемой антенны в дальней зоне в окрестности главного луча (лучей), выполняемым по программе «Определение главного максимума», вычисляется «точное» положение главного (главных) максимума в системе координат позиционера ИИС. Размер окрестности измерений задается оператором как параметр, величина которого оценивается, исходя из расчетных значений ширины луча в картинной плоскости. «Точное» положение главного максимума определяется в процедуре двумерной полиномиальной интерполяции измеренных данных.

Выходные данные программы «Определение главного максимума» организованы и сохраняются в виде массива абсолютных значений мощности, измеренной антенной-зондом линейной поляризации для двух ортогональных положений зонда, а также в виде нормированной характеристики – значений мощности излучения в каждой точке измерений.

Нормировка производится дважды: как на измеренное максимальное значение мощности, так и на определенное интерполяцией «точное» значение мощности в главном максимуме.

В ходе измерений проводятся калибровки всего тракта путем измерений мощности в фиксированной угловой точке – предполагаемом главном максимуме.

Двумерный массив измеренных данных в координатах картинной плоскости выводится в виде цветовой картины на экран монитора для обозрения. Программа позволяет просмотреть также скорректированный, с учетом калибровок, массив. При этом коррекция вводится как линейный тренд в функции времени. Вертикальная ось картинной плоскости коллинеарна азимутальной оси позиционера, но может быть развернута в плоскости введением специального параметра для того, чтобы учесть геометрию крепления исследуемой антенны к фланцу позиционера.

Далее выбором задачи программного обеспечения «Измерение КУ» оператор получает возможность измерений коэффициента усиления исследуемой антенны в направлении главного максимума. Направление главного максимума определено в результате выполнения предыдущей тематической задачи, но может быть использовано и расчетное значение. В последнем случае неточное знание направления главного максимума определяет дополнительную погрешность измерения КУ.

Измерение главных сечений ДН по мощности (например, в Е и Н плоскостях) проводится после измерений КУ исследуемой антенны и после выполнения программы определения главного максимума. Программа может быть исполнена также для расчетного положения главного максимума. При этом измеренные сечения будут являться приближенными к главным сечениям. Траектории главных сечений рассчитываются проходящими через главный максимум (рассчитанный или определенный в испытаниях) и параллельными декартовым осям картинной плоскости. На экране монитора могут быть выведены как нормированные сечения ДН и ранее измеренное (или рассчитанное) значение КУ испытываемой антенны, так и ненормированные значения сечений ДН в логарифмическом масштабе с учетом значения КУ. Азимутальные сечения ДН являются естественными основными сечениями при измерениях диаграмм для описываемых позиционеров. Могут измеряться приближенно ортогональные сечения вращением ИА по поляризационному углу для лучей AP, отклоненных от поляризационной оси позиционера, несущего ИА.

В ходе измерений сечений также могут проводиться калибровки: в начале, в середине и конце измерений в определенном положении позиционера №1. Калибровки могут учитываться в значениях масивов измеренных сечений.

Степень кроссполяризации и поляризационная диаграмма в главном максимуме могут быть измерены с помощью измерительной антенны линсистой поляризации с достаточно малой степенью кроссполяризации, имеющей возможность вращения вокруг своей электрической оси на поляризационном позиционере №2 ИИС.

Для корректного определения поляризационной диаграммы необходимо предварительно определить положение главного максимума и ориентировать в этом направлении испытываемую антенну на антенно-зонд. В направлениях, отличных от главного максимума, при не

совпадении фазового центра испытываемой антенны с центром пресечения осей позиционера, линейный зонд будет измерять некоторую проекцию поляризационной диаграммы поля излучения данного направления, см. ниже оценки погрешностей. Использование в автономных измерениях поляризационной диаграммы расчетного положения главного максимума без предварительных измерений этого положения приводит к ошибкам измерений этой диаграммы.

Основой для вычислений коэффициента эллиптичности и степени кроссполяризации является массив измерений поляризационной диаграммы. В нем путем выполнения полиномиальной интерполяции отыскиваются максимальное и минимальное значения массива, регистрируемого при работе программы «Поляризационная диаграмма». Их отношение составляет коэффициент эллиптичности.

## 5. Измерения характеристик испытываемых антенн

Как уже упомянуто выше, специфика разрабатываемых АР зачастую не позволяет размещать их на опорно-поворотных устройствах с точной привязкой положений максимумов лучей к осям позиционеров. Кроме того, погрешности юстировки стендов также вносят свой вклад в измеряемые характеристики разрабатываемых антенн. Рассмотрим кратко некоторые особенности погрешностей параметров исследуемых решеток, связанные с этими обстоятельствами.

### 5.1. Измерения КУ

При использовании относительных методов измерений КУ испытываемой антенны определяется путем сравнения его с КУ измерительной антенны. Процедура измерений КУ по данному методу состоит в том, что излучающая подсистема (ИПС, позиционер №1) создает и измеряет мощность  $P_M$ , поступающую в ИА и излучаемую ею, а приемная подсистема (ППС, позиционер №2) измеряет мощности  $P_C$  и  $P_C^\perp$  измерительного сигнала, созданного ИПС на выходе приемной измерительной антенны (ИЗА, зонд) линейной поляризации при двух ортогональных ее положениях (углы  $\beta$  и  $\beta \pm \pi/2$ ).

Эти мощности равны [5]:

$$P_C(t_1) = \alpha K_{II}(t_1) = G_{IIA} G_{IIZA} P_M(t_1) \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 K_{ПП}^{\pm}(M_{IIA}, M_{IIZA}, \beta) \quad (5.1)$$

$$P_C^{\perp}(t_2) = \alpha^{\perp} K_{II}(t_2) = G_{IIA} G_{IIZA} P_M(t_2) \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 K_{ПП}^{\pm} \left( M_{IIA}, M_{IIZA}, \beta \pm \frac{\pi}{2} \right) \quad (5.2)$$

где:  $t_1, t_2$  – моменты времени измерения двух ортогональных компонент измерительного поля;  $\alpha, \alpha^{\perp}$  – отклики ППС, соответствующие принимаемым мощностям  $P_C(t_1)$  и  $P_C^{\perp}(t_2)$ ;  $K_{II}(t_1)$ ,

$K_{II}(t_2)$  – коэффициенты передачи ППС в соответствующие моменты времени;  $G_{IIA}$  – КУ испытуемой антенны;  $G_{IIZA}$  – КУ ИзА;  $\lambda$  – рабочая длина волны;  $R$  – расстояние между раскрывами ИА и ИзА при ориентации их друг на друга;  $K_{ПП}^{\pm}$  – коэффициенты поляризационных потерь при приеме измерительной антенной поля, излучаемого ИА;  $M_{IIA}, M_{IIZA}$  – коэффициенты эллиптичности по мощности ИА (расчетное значение) и ИзА (паспортное значение);  $\beta$  – угол между большой осью эллипса поляризации поля, излучаемого ИА, и большой осью поляризационного эллипса поля ИзА при ее работе на передачу (при измерении двух ортогональных компонент поля угол  $\beta$  для суммы  $(K_{ПП}^+ + K_{ПП}^-)$  может быть любым). Знак «+» соответствует совпадающим направлениям вращения векторов измеряемого поля и поля измерительной антенны при ее работе на передачу, знак «-» соответствует встречным направлениям вращения.

Для измерения КУ ИА берется суммарная мощность

$P_{\Sigma} = P_C(t_1) + P_C^{\perp}(t_2)$  ортогональных компонент поля. Из (5.1), (5.2) получим ее выражение в виде

$$P_{\Sigma} = P_C \left(1 + \frac{\alpha^{\perp}}{\alpha}\right) = G_{ИА} G_{ИЗА} P_M \left(\frac{c}{4\pi R f}\right)^2 \cdot \left[ K_{ПП}^{\pm}(\beta) + K_{ПП}^{\pm}\left(\beta \pm \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (5.3)$$

Если установка ОПУ стендов №1 и №2 с закрепленными на них ИА и ИЗА удовлетворяет условию: угол  $\beta = 0$ , т.е. большие оси эллипсов поляризации ИА и ИЗА параллельны, тогда абсолютная погрешность измерения мощности в ортогональном положении ИЗА при учете шумов ППС минимизируется и

$$M_{ИА} = \frac{\alpha^{\perp}}{\alpha}, \quad (5.4)$$

а формула определения КУ будет выглядеть так:

$$G_{ИА} = \frac{P_C(t_1)}{P_M} \cdot \left(\frac{4\pi R}{c}\right)^2 \cdot f^2 \frac{1}{G_{ИЗА}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha^{\perp}}{\alpha}\right) \frac{1}{K_{ПП}^{\pm}(\beta) + K_{ПП}^{\pm}\left(\beta \pm \frac{\pi}{2}\right)} \quad (5.5)$$

В случае  $M_{ИЗА} \approx 0$  коэффициенты поляризационных потерь  $K_{ПП}^+$  и  $K_{ПП}^-$  совпадают и равны:

$$K_{ПП}^{\pm} = \frac{\cos^2 \beta + M_{ИА} \sin^2 \beta}{1 + M_{ИА}}. \quad (5.6)$$

Кроме того, из (5.3) следует, что

$$K_{ПП}^{\pm}(\beta) + K_{ПП}^{\pm}\left(\beta \pm \frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (5.7)$$

и окончательно



$$G_{ИА} = \frac{P_C(t_1)}{P_M} \cdot \left( \frac{4\pi R}{c} \right)^2 \cdot f^2 \frac{1}{G_{ИЗА}} \cdot \left( 1 + \frac{\alpha^\perp}{\alpha} \right) \quad (5.8)$$

При использовании широкополосных антенн в качестве ИЗА максимум главного лепестка ДН может быть смещен относительно поляризационной оси стенда №2 на угол  $\gamma_1$ . Как функция рабочего диапазона частот угол  $\gamma_1$  изменяется в пределах  $0 \leq \gamma_1 \leq \gamma_{\max}$ . Таким образом, для ИЗА в направлении на центр раскрыва ИА выполняется:

$$G_{ИЗА} = G_{ИЗА}^0 \cdot F(\gamma_1), \quad (5.9)$$

где  $G_{ИЗА}^0$  – номинальное значение КУ ИЗА в направлении ее главного максимума;  $F_{ИЗА}(\gamma_1)$  – значение ДН ИЗА на угловом расстоянии  $\gamma_1$  от ее главного максимума,  $\gamma_1$  – угол между направлениями на главный максимум ДН ИЗА и на центр апертуры ИА из центра апертуры ИЗА. При повороте поляризационного угла ИЗА на  $90^\circ$  соотношение (5.9) сохраняется. Множитель  $F_{ИЗА}(\gamma_1)$  меняется с изменением частоты по не установленному закону и должен быть отнесен к числу не исключенных систематических погрешностей с равномерным распределением.

Как сказано выше, при юстировке координатной системы ИК АФС имеют место погрешности регулировки соосности поляризационных блоков стендов №1 и №2, перпендикулярности азимутальной и поляризационной осей; установка ИА и ИЗА на стендах №1 и №2 допускает отклонение центров апертур от штатных положений. Погрешности такого рода приводят к смещению максимума ДН ИЗА относительно центра апертуры ИА на угол  $\gamma_2$ . При несоосности осей поляризационных блоков стендов №1 и №2, а также нарушении перпендикулярности азимутальной и поляризационной осей смещение максимума ДН ИЗА зависит от ее поляризационного угла.

Обе границы составляющих погрешностей определяют погрешность использованного номинального значения КУ технологической (вспомогательной) антенны.

Отношение значений ДН ИзА при наличии смещений  $\Delta\gamma_1$  и  $\Delta\gamma_2$  для произвольных ее поляризационных углов является их функцией. Для суммарного отклонения обобщенного угла (синус угла между поляризационной осью и направлением на наблюдателя)  $\gamma_{ИЗА}$  значение ДН, с формой в виде гауссианы, отличается от единицы как

$$F(\gamma_{ТА}) = e^{-\frac{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}{(0.6\gamma_{05})^2}} \cdot e^{-\frac{2\gamma_1\gamma_2 \cos(\beta - \varphi)}{(0.6\gamma_{05})^2}}, \quad (5.10)$$

где в качестве  $\gamma_{05}$  принимается ширина ДН данного сечения по половинной мощности. Так как всегда выполняется условие малости смещений  $\Delta\gamma_1$  и  $\Delta\gamma_2$ , то граница погрешности отношений ДН, вычисляемых при исполнении всех задач измерений параметров антенн (не только при измерениях КУ), определяется показателями экспоненциальных сомножителей (5.10) и используется нами при оценках погрешностей результатов измерений.

Если измерительная антенна аттестована как линейно поляризованная, то за пределами ограничения ее паспортной величины кросс поляризации  $M_{ИЗА} \leq M_{ИЗА}^{нач}$  поляризация ИзА может рассматриваться и как эллиптическая. В этом случае

$$K_{ПП}^{\pm}(\beta) + K_{ПП}^{\pm}\left(\beta \pm \frac{\pi}{2}\right) = 1 \pm \frac{4\sqrt{M_{ИА} \cdot M_{ИЗА}}}{(1 + M_{ИА})(1 + M_{ИЗА})}. \quad (5.11)$$

Величина  $\delta_K = \frac{4\sqrt{M_{ИА} \cdot M_{ИЗА}}}{(1 + M_{ИА})(1 + M_{ИЗА})}$  достигает максимума, равного

0.2 при  $M_{ИА} = 1$ ,  $M_{ИЗА} = 0.01$ . Учитывая, что  $\frac{1}{1+x} \approx 1-x$  при  $x \ll 1$ ,

имеет место

$$\frac{1}{K_{ПП}^{\pm}(\beta) + K_{ПП}^{\pm}\left(\beta \pm \frac{\pi}{2}\right)} \approx 1 \mp \frac{4\sqrt{M_{ИА} M_{ИЗА}}}{(1 + M_{ИА})(1 + M_{ИЗА})} \quad (5.12)$$

и после подстановки в (5.5) соотношений (5.9), (5.12) получим выражение, определяющее погрешность измерения усиления, связанную с кроссполяризационной составляющей ИЗА:

$$G_{ИЗА} = \frac{P_C(t_1)}{P_M} \cdot \left( \frac{4\pi R}{c} \right)^2 \cdot f^2 \frac{1}{G_{ИЗА}^0 \cdot F(\gamma)} \cdot \left( 1 + \frac{\alpha^\perp}{\alpha} \right) \cdot (1 \mp \delta_K). \quad (5.13)$$

## 5.2. Измерения диаграмм направленности

Рассмотрим измерения азимутального сечения ДН, в системе ОПУ из двух поляризационных позиционеров, как наиболее простой операции в исполнении, не требующей интерполяционных процедур при расчете заданных координат при малом шаге по азимуту.

Вычисляя из (5.1) и (5.2) суммарные мощности при ортогональных положениях ИЗА, для последовательных по индексу « $n$ » моментов времени, соответствующих расчетным азимутам  $A_n$  получим:

$$P_{\Sigma n} = P_{Cn}(t_{2n}) + P_{Cn}^\perp(t_{2n}) = \xi \cdot P_{Cn}(t_{1n}) \cdot (1 + \eta_n), \quad (5.14 \text{ а})$$

$$P_{\Sigma \max} = P_{C \max}(t_{2 \max}) + P_{C \max}^\perp(t_{2 \max}) = \xi \cdot P_{C \max}(t_{1 \max}) \cdot (1 + \eta_{\max}) \quad (5.14 \text{ б})$$

где  $\eta_n = \frac{P_{Cn}^\perp(t_{2n})}{\xi \cdot P_{Cn}(t_{1n})}$ ;  $\eta_{\max} = \frac{P_{C \max}^\perp(t_{2 \max})}{\xi \cdot P_{C \max}(t_{1 \max})}$ ;  $\xi$  – коэффициент не-стабильности отклика ППС на сигнал ИПС для случайных моментов времени измерения равный

$$\xi = \frac{K_{II}(t_{2n})}{K_{II}(t_{1n})} \text{ или } \xi = \frac{K_{II}(t_{2 \max})}{K_{II}(t_{1 \max})}.$$

Из отношения  $\frac{P_{\Sigma n}}{P_{\Sigma \max}}$  получим уравнение измерения ДН:

$$F_{ИА}(A_n, \phi) = \eta \cdot \xi \cdot \frac{1 + \eta_n}{1 + \eta_{\max}} \cdot \frac{\left[ K_{ПП}^{\pm}(\beta) + K_{ПП}^{\pm}\left(\beta \pm \frac{\pi}{2}\right) \right]_{\max}}{\left[ K_{ПП}^{\pm}(\beta) + K_{ПП}^{\pm}\left(\beta \pm \frac{\pi}{2}\right) \right]_n}, \quad (5.15)$$

где  $\eta = \frac{P_{Cn}(t_{1n})}{\xi \cdot P_{C\max}(t_{1\max})}$  – отношение мощностей, измеряемое ППС на основной поляризации ИзА, при излучении ИА мощности ИПС в направлениях  $A_n$  и  $A_{\max}$  соответственно.

В отличие от измерений КУ относительный характер измерений ДН уменьшает влияние вышеописанных смещений положения максимума ИзА до значения, также вычисленного для лепестка гауссовой формы:

$$\delta(h) \approx \pm \frac{2\sqrt{2}\gamma_{1ИзА}\gamma_{2ИзА}}{(0.6\gamma_{05})^2}. \quad (5.16)$$

Граница погрешности, связанной с конечным значением кросс поляризационной составляющей ИзА  $\delta_{КП}$  определяется выражением

$$\delta_{КП} = \pm \frac{4\sqrt{M_{ИзА}}(\sqrt{M_{ИА}^{\max}} - \sqrt{M_{ИА}}) \cdot (1 - \sqrt{M_{ИА}^{\max}} \cdot \sqrt{M_{ИА}})}{(1 + M_{ИА}^{\max}) \cdot [(1 + M_{ИзА})(1 + M_{ИА}) \pm 4\sqrt{M_{ИА}} \cdot \sqrt{M_{ИзА}}]}. \quad (5.17)$$

### 5.3. Измерения поляризационных диаграмм

Нормируя (5.1) на максимальное из измеренных значений мощности  $P_C^{\max}$ , как функции поляризационного угла позиционера №1, получим выражение для измеряемой поляризационной диаграммы:

$$\frac{P_C(t_m)}{P_C^{\max}} = \frac{G_{ИЗА}(m)}{G_{ИЗА}(m_0)} \cdot \frac{K_{ПП}^{\pm} [M_{ИА}, M_{ИЗА}, \beta(m)]}{K_{ПП}^{\pm} (M_{ИА}, M_{ИЗА}, 0)} \quad (5.18)$$

или

$$\frac{P_C(t_m)}{P_C^{\max}} = \frac{\alpha(m)}{\alpha_{\max}}, \quad (5.19)$$

$\alpha(m)$  – отклики ППС, соответствующие принимаемым мощностям  $P_C(t_m)$ ;  $\beta(m)$  – угол между направлениями главных осей поляризационных эллипсов ИА и ИЗА принимает дискретные значения, соответствующие  $m$  – й установке ОПУ №2 по поляризационному углу,  $m = 0 \dots M-1$ ;  $\alpha_{\max}$  – максимальной отклик ППС, соответствующий измеряемой мощности  $P_C^{\max}$ ;  $t_{\max}$  – момент времени измерения мощности  $P_C^{\max}$ ;  $m_0$  – номер позиции ОПУ №2, соответствующий значению  $P_C = P_C^{\max}$ .

Когда ИА и ИЗА согласованы по поляризации (угол  $\beta = 0$ ), значение поляризационного угла 2-го позиционера в согласованном положении обозначим  $\phi 2_{\text{согл}}$ . В процессе сканирования поляризационный угол ОПУ №2 с закрепленной на нем антенной ИЗА должен последовательно увеличиваться, принимая ряд значений  $\phi 2(m) = \phi 2_{\text{нач}} + \Delta\phi 2 \cdot m$ .

Тогда  $\beta = \phi 2 - \phi 2_{\text{согл}} = m \cdot \Delta\phi 2 - \phi 2_{\text{согл}}$ . Измерение поляризационной диаграммы выполняется в пределах  $0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$ . Если выполняется  $G_{ИЗА}(m) = G_{ИЗА}(m_0)$ , то

$$\begin{aligned} \frac{\alpha(m)}{\alpha_{\max}} &= (1 - M_{ИА}) \cdot \cos^2 \beta(m) + M_{ИА} = \\ &= \frac{1 + M_{ИА}}{2} + \frac{1 - M_{ИА}}{2} \cdot \cos 2\beta(m) \end{aligned} \quad (5.20)$$

Максимумы выражения (5.20) достигаются при  $\beta = 0, \pi$ ; минимумы при  $\beta = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$ . В максимумах  $\frac{\alpha(m)}{\alpha_{\max}} \approx 1$ , в минимумах

$\frac{\alpha(m)}{\alpha_{\max}} \approx M_{\text{ИА}}$ . Уточненные значения (вне дискретные) координат  $\phi_2$ , соответствующие двум максимумам и двум минимумам поляризационной диаграммы, а также отношений  $\frac{\alpha(m)}{\alpha_{\max}}$  в максимальных и минимальных положениях, определяются из аппроксимации квадратичными полиномами данных измерений  $\frac{\alpha(m)}{\alpha_{\max}}$  в интервалах углов  $\pm 30^\circ$  относительно точек глобальных максимумов и минимумов.

Поляризационная ось стенда №2 может быть отклонена от направления на центр симметрии апертуры ИА на угол  $\gamma_2$ , и суммарное угловое отклонение главного максимума ДН ИзА от направления на центр апертуры ИА,  $\gamma$  зависит от поляризационного угла стенда №2 как

$$\gamma^2 = \gamma_1^2 + \gamma_2^2 - 2\gamma_1\gamma_2 \cos[\beta(m) - \varphi], \quad (5.21)$$

где  $\varphi$  – некоторый фазовый угол, функция  $\beta, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$ .

Для ИзА в направлении на центр апертуры ИА выполняется:

$$G_{\text{ИзА}} = G_{\text{ИзА}}^0 \cdot F(\gamma), \quad (5.22)$$

где  $G_{\text{ИзА}}^0$  – номинальное КУ ИзА в направлении ее главного максимума;  $F_{\text{ИзА}}(\gamma)$  – значение ДН ИзА на угловом расстоянии  $\gamma$  от ее главного максимума.

Моделируя ДН ИзА как и ранее гауссианой получим

$$F(\gamma) = e^{-\frac{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}{(0.6\gamma_{0.5})^2}} * e^{-\frac{2\gamma_1\gamma_2 \cos(\beta - \varphi)}{(0.6\gamma_{0.5})^2}} \quad (5.23)$$

и после разложения в ряд вида

$$e^{\frac{2\gamma_1\gamma_2 \cos(\beta-\varphi)}{(0.6\gamma_{0.5})^2}} \approx 1 + \frac{2\gamma_1\gamma_2}{(0.6\gamma_{0.5})^2} * \cos(\beta - \varphi) \quad (5.24)$$

поляризационная диаграмма может быть представлена выражением

$$\frac{G_{ИЗЛ}(m)}{G_{ИЗЛ}(m_0)} \approx 1 - \frac{2\gamma_1\gamma_2}{(0.6\gamma_{0.5})^2} * \cos \varphi + \frac{2\gamma_1\gamma_2}{(0.6\gamma_{0.5})^2} * \cos[\beta(m) - \varphi], \quad (5.25)$$

где  $\cos[\beta(m_0 - \varphi)] = \cos \varphi$ ,  $\beta(m_0) = 0$  соответствует поляризационному углу стенда №2 в первом максимуме поляризационной диаграммы. Максимумы поляризационной диаграммы имеют место при поляризационных углах стенда №2, равных соответственно  $\beta(m_0) =$

0 и  $\beta(m) = \pi$ , минимумы при  $\beta(m) = \frac{\pi}{2}$  и  $\beta(m) = \frac{3}{2}\pi$ . Подставляя

в (5.25) эти значения  $\beta(m)$ , имеем

$$\frac{G_{ИЗЛ}(\beta = 0)}{G_{ИЗЛ}(\beta = 0)} = 1 \quad (5.26 \text{ а})$$

$$\frac{G_{ИЗЛ}\left(\beta = \frac{\pi}{2}\right)}{G_{ИЗЛ}(\beta = 0)} \approx 1 - \frac{2\sqrt{2}\gamma_1\gamma_2}{(0.6\gamma_{0.5})^2} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \quad (5.26 \text{ б})$$

$$\frac{G_{ИЗЛ}\left(\beta = \frac{\pi}{2}\right)}{G_{ИЗЛ}(\beta = 0)} \approx 1 - \frac{4\gamma_1\gamma_2}{(0.6\gamma_{0.5})^2} \cos(\varphi) \quad (5.26 \text{ в})$$

$$\frac{G_{ИЗЛ}\left(\beta = \frac{\pi}{2}\right)}{G_{ИЗЛ}(\beta = 0)} \approx 1 - \frac{2\sqrt{2}\gamma_1\gamma_2}{(0.6\gamma_{0.5})^2} \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \quad (5.26 \text{ г})$$

Усредненные значения  $\frac{G_{ИЗА}(m)}{G_{ИЗА}(m_0)}$  в максимумах и минимумах поляризации диаграммы совпадают и равны

$$\begin{aligned} & \frac{G_{ИЗА}(\beta = 0) + G_{ИЗА}(\beta = \pi)}{2G_{ИЗА}(\beta = 0)} = \\ & = \frac{G_{ИЗА}\left(\beta = \frac{\pi}{2}\right) + G_{ИЗА}\left(\beta = \frac{3}{2}\pi\right)}{2G_{ИЗА}(\beta = 0)} = 1 - \frac{2\gamma_1\gamma_2}{(0.6\gamma_{05})^2} \cos\varphi, \quad (5.27) \end{aligned}$$

что и используется нами при вычислении степени кроссполяризации испытуемых антенн.

Степень кросс-поляризации линейно-поляризованных ИА, как и коэффициент эллиптичности эллиптически-поляризованных ИА  $M_{ИА}$ , определяется отношением интерполированных и усредненных, как сказано выше, значений  $\frac{\overline{\alpha_{\min}}}{\alpha_{\max}}$  поляризационной диаграммы:

$$M_{ИА} = \frac{\overline{\alpha_{\min}}}{\alpha_{\max}}. \quad (5.28)$$

Если необходимо учитывать кроссполяризационную компоненту ИзА на уровне ее паспортного значения  $M_{ИЗА} \neq 0$ , то коэффициент эллиптичности  $M_{ИА}$  эллиптически поляризованных ИА определяется из выражения



$$M_{HA} = \frac{\left( \sqrt{\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}} \mp \sqrt{M_{ИЗА}} \right)^2}{\left( 1 \mp \sqrt{\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}} \cdot \sqrt{M_{ИЗА}} \right)^2}, \quad (5.29)$$

где  $\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}$  — как сказано выше, отношение средних значений от двух минимумов и двух максимумов поляризационной диаграммы.

### Заключение

Рассмотрены особенности формирования заданных траекторий для сканирования испытуемыми антеннами определенной части пространства в системе координат поляризационных и азимутальных углов, специфика погрешностей измерений основных характеристик испытуемых антенн в ней.

Методология оценки погрешностей испытаний АР связана с измерениями систематических отклонений центров локальных систем координат от физической реализации лабораторной системы и учета этих результатов для оценки погрешностей характеристик испытуемых антенн. Также учитываются и взаимные положения поляризационных осей позиционеров (как предельные оценки), несущих испытуемую и измерительную антенну, их положение в пространстве.

Даны рекомендации по построению автоматизированных систем измерений параметров антенн, содержащих два поляризационных позиционера.

Авторы выражают благодарность А.А. Анисимову, Е.Л. Варсцову, А.Г. Серкину, С.О. Черниковой за участие в формировании методологической тактики измерений и программного обеспечения их.

## Литература

1. Kildal P.- S. *Foundations of antennas*. Studentlitteratur, Lund, Sweeden, 2000.
2. Newell A.C., Hindman G. *Antenna spherical coordinate systems and their application in combining results from different antenna orientations/* Proceeding of the 22-d ESTEC Antenna Workshop on Antenna Measurements. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 11-12 May 1999, p. 41 – 46.
3. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике*. М.: Наука, 1984.
4. Белов Ю.И., Серкин А.Г., Черникова С.О., Пасманик Л.А., Хейман М.Д., Косырев В.В., Кашин А. В., Мухарьямов М.Х. *«Информационно-измерительная система для измерений параметров антенн в БЭК. Программное обеспечение*. Международная специализированная выставка-конференция: «Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления» 4-5 апреля 2002 Нижний Новгород. Сборник тезисов.
5. Либин В.А.. *Некоторые характеристики антенн произвольной поляризации*. Радиотехника и электроника, 1960, №11, с. 1788 – 1796.

Belov Yu., Ivanov V.( Radiophysical Res. Inst., Nizhny Novgorod),  
Turchin V.(Applied Physics Res. Inst., Nizhny Novgorod)  
ON PECULIARITIES OF ANTENNA PARAMETERS MEASUREMENT IN THE COORDINATE SYSTEM OF POLARIZATION AND AZIMUTH ROTATIONS  
Preprint 500 – Nizhny Novgorod: RRI, 2005, 34 p.

### Summary

The basic features of scanning control forming for positioners operated in “Ludwig-3” coordinates system (polarization and azimuth angles) are described. A specificity of errors related to the coordinates are investigated for basic antenna parameters measurements.

Белов Юрий Иванович  
Иванов Валерий Павлович  
Турчин Виктор Игоревич

Особенности измерений характеристик антенн в системе  
координат поляризационного и азимутального углов

---

Подписано в печать 9.06.05г. Формат 60 x 84/16.  
Бумага писчая. Объем 2,1 усл. п.л.  
Тираж 50. Заказ 5550.

---

Отпечатано в НИРФИ  
Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25