

Антенные и фидерные измерения

УДК 621.396.67.012.12

Измерение координат фазового центра антенны

© Авторы, 2014

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2014

Ю. Н. Калинин – к.т.н., вед. научный сотрудник, ООО «Научно-производственное предприятие «ТРИМ» (Санкт-Петербург)
E-mail: kalinin_yuri@mail.ru

Разработан алгоритм расчета пространственных координат фазового центра антенны. Частный случай алгоритма использован для расчета двумерных координат фазового центра по отдельным сечениям фазовой диаграммы направленности. Рассматриваются особенности измерения и необходимые предварительные преобразования объемных фазовых диаграмм направленности антенн с линейной и круговой поляризацией при измерениях в различных сферических системах координат. Приведены результаты экспериментальных измерений. Разработанные методы и алгоритмы измерения реализованы в программном обеспечении автоматизированных антенных измерительных комплексов и успешно применяются на многочисленных предприятиях.

Ключевые слова: фазовый центр, фазовая диаграмма направленности.

A computation algorithm for the antenna phase center spatial coordinates measuring was developed. The special case of this algorithm is used to calculate the two-dimensional coordinates of phase center using the separate cuts of antenna phase pattern. The measurement features and necessary preliminary transformations of the antenna phase patterns with linear and circular polarization are considered during measurements in various spherical coordinate systems. Experimental measurement results are provided. The developed measurement methods and algorithms have been implemented in the software for automated antenna measuring systems and are successfully applied at many enterprises.

Keywords: phase center, phase antenna pattern.

Введение. Фазовым центром (ФЦ) антенны называется центр эквифазной сферической волновой поверхности, образованной излучаемой антенной электромагнитной волной [1]. Определение координат ФЦ является одной из важных и актуальных задач антенных измерений. Практические аспекты измерений недостаточно освещены как в отечественной, так и в зарубежной литературе.

Знание координат ФЦ необходимо для облучателей зеркальных антенн, облучателей компактных антенных измерительных полигонов (коллиматоров), фазовых пеленгаторов, интерферометров и т.п. Особую актуальность задача измерения координат ФЦ приобрела в последнее время в связи с бурным развитием и повышением точности глобальных навигационных систем.

В настоящее время для определения координат ФЦ чаще всего используется способ подбора положения исследуемой антенны на опорно-поворотном устройстве (ОПУ). Путем механического перемещения и многократного измерения

фазовой диаграммы направленности (ФДН) добиваются такого положения антенны, при котором ее ФДН будет наиболее равномерна в заданном угловом секторе (визуально или в соответствии с некоторым математическим критерием). При этом, как правило, измеряются только отдельные сечения ФДН в азимутальной плоскости, а перемещение осуществляется по одной продольной координате, которая и определяет положение ФЦ.

В работе рассматривается алгоритм расчета координат ФЦ в трехмерном пространстве по однократно измеренной объемной ФДН. Рассматриваются особенности применения понятия ФЦ и алгоритма обработки для антенн с круговой поляризацией. Приводятся результаты экспериментальных измерений.

Рассмотренные алгоритмы реализованы в программно-алгоритмическом обеспечении автоматизированных антенных измерительных комплексов, выпускаемых ООО «Научно-производственное предприятие «ТРИМ».

Рассматривая понятие ФЦ с точки зрения антенных измерений, целесообразно привести еще одно определение, данное А. Р. Вольпертом в одной из первых работ, посвященных этому вопросу [2]: фазовым центром антенны является точка, относительно которой фаза поля в точке наблюдения не зависит от углов θ и ϕ сферической системы координат (или изменяется скачком на 180°).

Измеренная пространственная ФДН антенны $\Phi(\theta, \phi)$ соответствует форме эквифазной волновой поверхности, построенной в системе координат (СК), начало которой расположено в центре вращения ОПУ. Если ФЦ антенны совпадает с центром вращения ОПУ, то измеренная ФДН повторяет форму волнового фронта и, по крайней мере, в пределах некоторого сектора углов будет представлять собой относительно равномерную поверхность. Если ФЦ смещен относительно центра вращения ОПУ, то форма ФДН искажается.

Строго говоря, фазовый центр имеют лишь некоторые идеализированные антенны, излучающие сферический волновой фронт, например, точечный изотропный источник или линейный раскрыв с равномерным амплитудно-фазовым распределением [3]. Для реальных антенн задача измерения (расчета) координат ФЦ – это, по сути, задача аппроксимации измеренной ФДН сферической поверхностью в заданном секторе углов в смещенной системе координат. Решение этой задачи принципиально является приближенным и зависит от заданных условий: в первую очередь – от сектора углов, в котором аппроксимируется ФДН; возможно – то выбранного критерия оптимальности; от использованных при решении весовых функций и др.

Первое допущение, принимаемое при постановке задачи измерения координат ФЦ, состоит в том, что фазовый центр существует, и в пределах заданного сектора углов антenna излучает сферический волновой фронт.

Второе допущение связано с векторным характером поля, т.е. с наличием, в общем случае, двух ортогональных составляющих поля антены в некотором поляризационном базисе. Для антенн с произвольной эллиптической поляризацией, характеристики которой меняются в зависимости от направления, каждая ортогональная составляющая поля определяет свою ФДН и, соответственно, свое положение ФЦ. Фазовые диаграммы для различных ортогональных составляющих будут совпадать только в случае линейной поляризации и отличаться на постоянную ве-

личину в идеальном случае, когда характеристики эллиптичности не зависят от углового направления.

Из этого следует, как непосредственно отмечается в работах [2, 3], что понятия фазовой диаграммы направленности и фазового центра следует рассматривать применительно только к одной из составляющих вектора напряженности электрического поля.

Отсюда и вытекает второе допущение, принимаемое при постановке задачи измерения координат ФЦ, которое состоит в том, что антenna излучает одну составляющую поля в некотором ортогональном поляризационном базисе. Данный поляризационный базис определяется поляризационным базисом вспомогательной антены, используемой при измерениях.

Алгоритм расчета координат фазового центра относительно центра вращения ОПУ. Рассмотрим алгоритм расчета координат фазового центра по результатам измерений объемной фазовой диаграммы направленности.

Пусть имеется фазовая диаграмма $\Phi(\theta, \phi)$. Система координат для расчета положения ФЦ показана на рис. 1,а. Если ФЦ антены расположен в точке с координатами (x_0, y_0, z_0) , то выражение для ФДН имеет вид [3]:

$$\Phi(k_x, k_y, k_z) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_0 k_x + y_0 k_y + z_0 k_z) + \Phi_0, \quad (1)$$

где k_x, k_y, k_z – проекции единичного вектора, ориентированного в направлении (θ, ϕ) , на оси прямоугольной системы координат; Φ_0 – постоянный фазовый сдвиг, определяемый расстоянием, на котором измеряется ФДН; λ – длина волны.

Учитывая, что $k_x = \sin \theta \cos \phi$, $k_y = \sin \theta \sin \phi$, $k_z = \cos \theta$, выражение (1) можно записать в виде

$$\Phi(\theta, \phi) =$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} (x_0 \sin \theta \cos \phi + y_0 \sin \theta \sin \phi + z_0 \cos \theta) + \Phi_0. \quad (2)$$

Выражение (2) содержит постоянный член Φ_0 . Для того, чтобы определить x_0 , y_0 и z_0 из выражения (2), необходимо задать Φ_0 таким образом, чтобы эта величина не влияла на результаты расчетов. Иными словами, речь идет о выборе опорного значения фазы, которое исключается из измерений и относительно которого измеряется ФДН $\Phi(\theta, \phi)$.

Примем в качестве опорной (нулевой) фазы значение ФДН при $\theta = 0$. Тогда $\Phi_0 = -(2\pi/\lambda)z_0$ (при $\theta = 0$ искажение ФДН обусловлено только

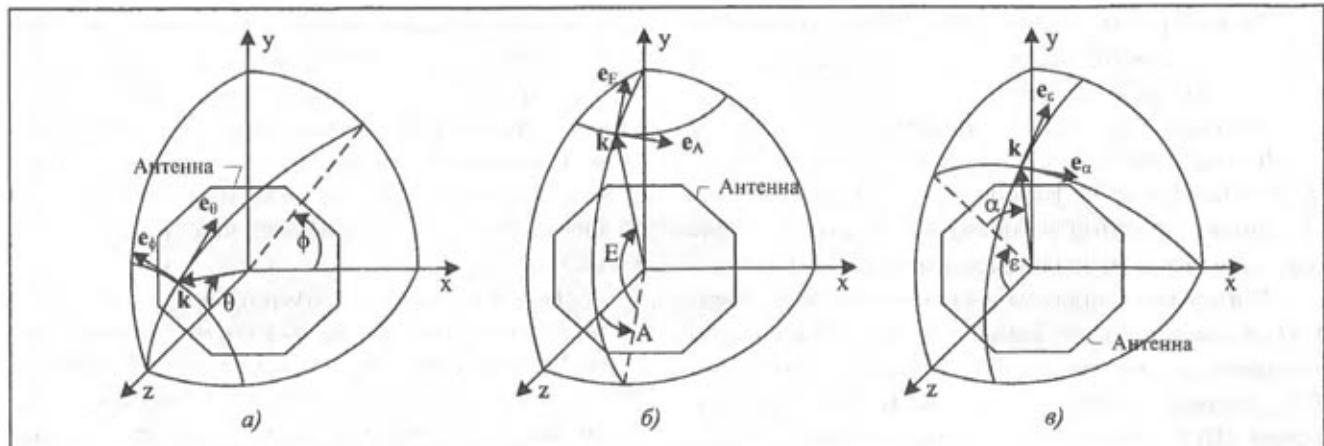


Рис. 1. Сферические системы координат, используемые при измерении диаграмм направленности антенн: а – «азимут–крен» (θ, ϕ); б – «азимут над элевацией» (A, E); в – «элевация над азимутом» (α, ε)

составляющей смещения ФЦ z_0), и (2) можно записать в виде

$$\Delta\Phi(\theta, \phi) = \frac{2\pi}{\lambda} [x_0 \sin \theta \cos \phi + y_0 \sin \theta \sin \phi + z_0 (\cos \theta - 1)], \quad (3)$$

где $\Delta\Phi(\theta, \phi) = \Phi(\theta, \phi) - \Phi(\theta = 0)$ – фазовая диаграмма направленности, приведенная к нулевому уровню при $\theta = 0$.

На основании (3) можно составить систему уравнений для оценки координат (x_0, y_0, z_0) по дискретным значениям ФДН, измеренным при дискретных углах (θ_i, ϕ_j) ($i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N$):

$$\Delta\Phi = \mathbf{H}\mathbf{r}, \quad (4)$$

где $\Delta\Phi = [\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \dots, \Delta\Phi_{M \times N}]^T$ – вектор значений ФДН, измеренных при дискретных углах (θ_i, ϕ_j) ($i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N$) и приведенных к нулевому уровню при $\theta=0$;

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \cos \phi_1 & \sin \theta_1 \sin \phi_1 & \cos \theta_1 - 1 \\ \sin \theta_1 \cos \phi_2 & \sin \theta_1 \sin \phi_2 & \cos \theta_1 - 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \sin \theta_1 \cos \phi_N & \sin \theta_1 \sin \phi_N & \cos \theta_1 - 1 \\ \sin \theta_2 \cos \phi_1 & \sin \theta_2 \sin \phi_1 & \cos \theta_2 - 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \sin \theta_M \cos \phi_N & \sin \theta_M \sin \phi_N & \cos \theta_M - 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{r} = (2\pi/\lambda)[x_0, y_0, z_0]^T.$$

Оценка вектора \mathbf{r} из уравнения (4) по методу наименьших квадратов (МНК) [5] имеет вид:

$$\hat{\mathbf{r}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \Delta\Phi. \quad (5)$$

Этим выражением можно пользоваться для оценки координат ФЦ по любому участку ФДН, включающему направление $\theta = 0$. Как правило, измерения ФДН выполняются в симметричной области в угловых интервалах $\theta = [0 \dots \theta_{\max}], \phi = [-\pi \dots \pi]$.

Можно показать, что для симметричных угловых интервалов как в системе координат (θ, ϕ) , так и в других сферических системах координат матрица $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$ будет диагональной. Все элементы этой матрицы, лежащие вне главной диагонали, будут равны нулю, поскольку равны нулю интегралы (дискретные суммы) от соответствующих тригонометрических выражений.

В этом случае решение (4) не требует выполнения процедуры обращения матрицы, и МНК-оценка координат ФЦ имеет вид

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{2\pi} \begin{bmatrix} 1/h_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 1/h_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1/h_{33} \end{bmatrix} \mathbf{H}^T \Delta\Phi, \quad (6)$$

где

$$h_{11} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\sin \theta_i \cos \phi_j)^2,$$

$$h_{22} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\sin \theta_i \sin \phi_j)^2,$$

$$h_{33} = N \sum_{i=1}^M (\cos \theta_i - 1)^2.$$

Выражения для координат ФЦ получены в сферической СК (θ, ϕ) , которая соответствует из-

мерениям пространственной ФДН с помощью двухкоординатного ОПУ типа «азимут – крен». При использовании азимутально-угломестных ОПУ типа «азимут над элевацией» или «элевация над азимутом» аналогичным образом можно получить выражения для соответствующих систем координат: (A, E) (рис. 1, б) и (α, ε) (рис. 1, в). Для этого достаточно в (1) использовать выражения для проекций единичного вектора k (направляющих косинусов) в этих системах координат:

$$\begin{aligned} k_x &= \sin A \cos E = \sin \alpha, \\ k_y &= \sin E = \cos \alpha \sin \varepsilon, \\ k_z &= \cos A \cos E = \cos \alpha \cos \varepsilon. \end{aligned} \quad (7)$$

Приведем результаты расчета координат ФЦ конической логоспиральной антенны диапазона 1,5 ГГц с обтекателем, выполненного с помощью рассмотренного алгоритма. Проекция объемной ФДН антенны и ее сечения показаны на рис. 2, а, б.

Начало системы координат, относительно которого рассчитывались координаты ФЦ (точка пересечения осей вращения ОПУ) находилось внутри антенны на ее оси на расстоянии 60 мм от вершины обтекателя. В табл. 1 приведены координаты ФЦ (x_0, y_0, z_0), рассчитанные для различных по величине симметричных областей ФДН, задаваемых углом θ_{\max} , и расстояние $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$ от рассчитанного ФЦ до начала координат. Разброс положений ФЦ в секторах углов θ от $[0 \dots 30^\circ]$ до $[0 \dots 90^\circ]$ составляет около $0,1\lambda$. Актуальные значения координат ФЦ определяются рабочим сектором углов антенны. Для навигационных антенн, как правило, $\theta_{\max} = 60 \dots 80^\circ$.

Алгоритм расчета координат ФЦ по отдельным сечениям ФДН. Оценка положения ФЦ по отдельным сечениям ФДН применяется, в частности, при предварительных измерениях для выставления антенны на ОПУ перед измерением объемной ФДН. Кроме того, иногда бывает достаточно ограничиться оценкой координат ФЦ по одному или нескольким сечениям ФДН. Это имеет место, например, для симметричных антенн при высоком качестве изготовления, когда ФЦ антенны располагается на оси OZ .

Алгоритм расчета координат ФЦ по отдельным сечениям ФДН является частным случаем рассмотренного выше алгоритма для $\phi = 0$. Положив $\phi = 0$, из (3) получим:

$$\Delta\Phi(\theta) = \frac{2\pi}{\lambda} [x_0 \sin \theta + z_0 (\cos \theta - 1)]. \quad (8)$$

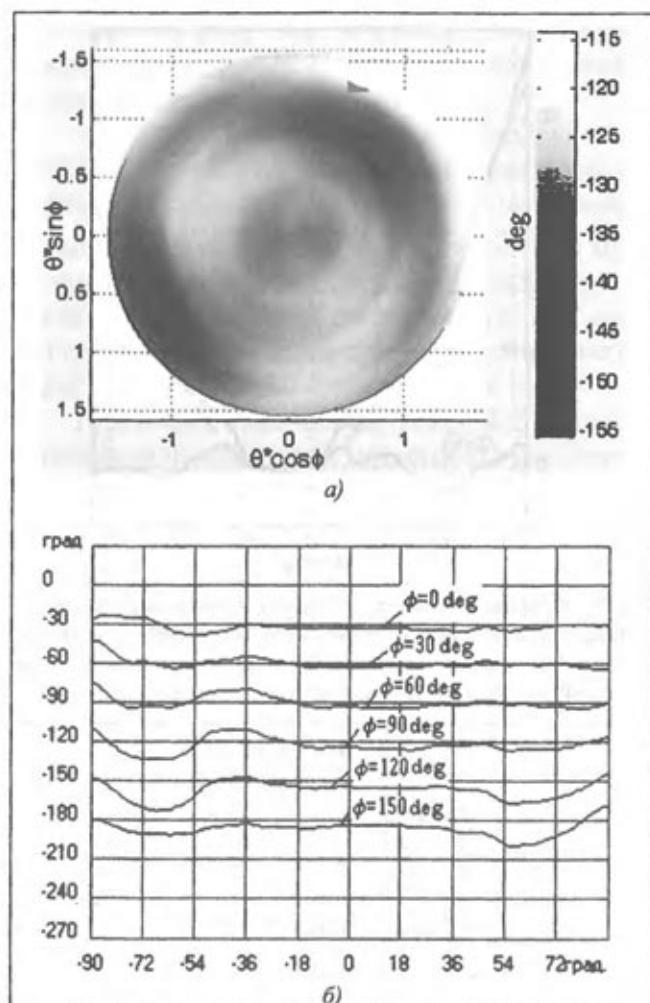


Рис. 2. Проекция объемной ФДН конической логоспиральной антенны диапазона 1,5 ГГц по круговой составляющей напряженности поля в кополярном поляризационном базисе Ludvig-3 (а) и ее сечения при различных углах ϕ (б)

Таблица 1. Координаты фазового центра логоспиральной антенны диапазона 1,5 ГГц

Координаты ФЦ	θ_{\max} , град						
	90	80	70	60	50	40	30
x_0 , мм	-0,1	0,9	1,5	1,5	0,6	-0,4	-1,1
y_0 , мм	1,2	0,4	-0,6	-1,4	-1,1	-0,5	0,1
z_0 , мм	-2,3	-1,2	-1,9	-4,5	-8,8	-15,0	-19,2
r_0 , мм	2,6	1,6	2,5	4,9	8,9	15,0	19,2

Угол θ в данном случае меняется в интервале $[-\pi/2 \dots \pi/2]$. Далее, аналогично (4), (5) получим решение задачи в виде

$$\hat{\mathbf{r}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \Delta\Phi, \quad (9)$$

где $\Delta\Phi = [\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \dots, \Delta\Phi_M]^T$ – вектор значений ФДН, измеренных при дискретных углах θ_i ,

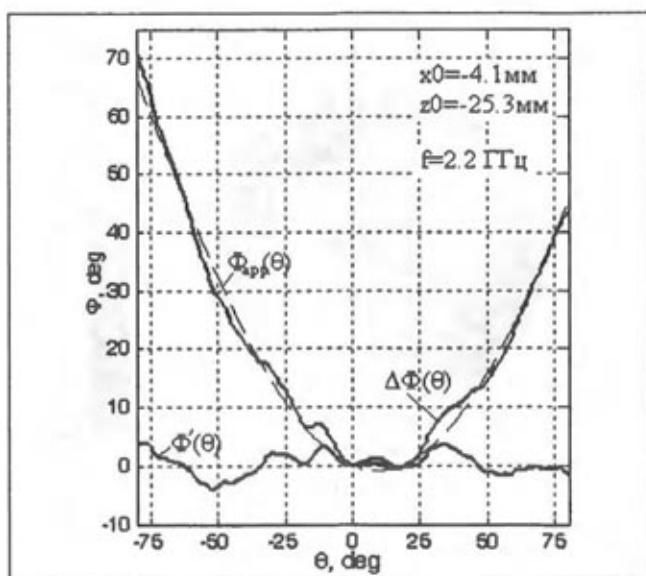


Рис. 3. Графики, иллюстрирующие компенсацию смещения фазового центра: $\Delta\Phi(\theta)$ – исходная ФДН; $\Phi_{app}(\theta)$ – аппроксимация сферическим волновым фронтом с центром в точке (x_0, z_0) ; $\Phi'(\theta)$ – ФДН относительно точки (x_0, z_0)



Рис. 4. Построение области размытого фазового центра

$i = 1, \dots, M$, и приведенных к нулевому уровню при $\theta = 0$:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 & \cos \theta_1 - 1 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 - 1 \\ \vdots & \vdots \\ \sin \theta_M & \cos \theta_M - 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{r} = (2\pi/\lambda)[x_0, z_0]^T.$$

Выражением (9) можно пользоваться для оценки координат ФЦ по любому участку ФДН в диапазоне углов $[\theta_{min} \dots \theta_{max}]$, включающему направление $\theta = 0$.

Если же угловой интервал симметричен, и ФДН обрабатывается на интервале $[-\theta_{max} \dots \theta_{max}]$, то матрица $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$ становится диагональной, и система уравнений может быть решена независимо для x_0 и z_0 . МНК-оценка координат смещения ФЦ в этом случае имеет вид

$$\hat{x}_0 = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sum_{i=1}^M \Delta\Phi_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^M \sin^2 \theta_i},$$

$$\hat{z}_0 = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sum_{i=1}^M \Delta\Phi_i (\cos \theta_i - 1)}{\sum_{i=1}^M (\cos \theta_i - 1)^2}. \quad (10)$$

После расчета координат ФЦ измеренную ФДН можно пересчитать относительно точки (\hat{x}_0, \hat{z}_0) . Это эквивалентно перемещению антенны на ОПУ так, чтобы рассчитанный ФЦ совпадал с осью вращения:

$$\Phi'(\theta) = \Delta\Phi(\theta) - \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{x}_0 \sin \theta + \hat{z}_0 (\cos \theta - 1)]. \quad (11)$$

Пример компенсации положения ФЦ в одном сечении ФДН показан на рис. 3. Откорректированная ФДН $\Phi'(\theta)$ существенно более равномерна. Дальнейшие расчеты, например, при моделировании поля излучения антенны, можно проводить по новой ФДН $\Phi'(\theta)$ относительно точки рассчитанного фазового центра.

Второе слагаемое в (11) по сути представляет собой аппроксимацию измеренной ФДН сферическим волновым фронтом с центром в точке (\hat{x}_0, \hat{z}_0) . Остаточная ФДН $\Phi'(\theta)$ (в терминах регрессионного анализа – невязка решения уравнения (4)) характеризует понятие *размытого* (или *плавающего*) фазового центра. Пересчитав эту ФДН в единицы расстояния и построив ее относительно точки (\hat{x}_0, \hat{z}_0) для соответствующих угловых направлений положения локальных фазовых центров, получим область размытого фазового центра антенны (рис. 4). Смещение локального ФЦ в направлении θ_i относительно точки (\hat{x}_0, \hat{z}_0) определяется как $\delta r_i(\theta_i) = (\lambda/2\pi)\Phi'(\theta_i)$.

Аналогичные преобразования и построения можно проделать и для пространственной ФДН. В этом случае

$$\Phi'(\theta, \phi) = \Delta\Phi(\theta, \phi) - \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{x}_0 \sin \theta \cos \phi + \hat{y}_0 \sin \theta \sin \phi + \hat{z}_0 (\cos \theta - 1)]. \quad (12)$$

ФДН $\Phi'(\theta, \phi)$ и соответствующий размер области размытого ФЦ определяют такую характеристику

антенны, как *стабильность фазового центра*. Стабильность фазового центра характеризуется радиусом области размытого ФЦ и для современных антенн спутниковых навигационных систем составляет порядка 0.5...1 мм в зависимости от частотного диапазона [6].

Особенности измерения объемных фазовых диаграмм антенн с линейной и круговой поляризацией. Мы рассмотрели алгоритмы расчета координат ФЦ по ФДН, представляющей собой некоторую гладкую функцию, не имеющую разрывов и неоднозначностей. На самом деле все сферические СК $[(\theta, \phi), (A, E), (\alpha, \varepsilon)]$ имеют узлы – направления неоднозначного определения угловых координат. Значения ФДН в этих направлениях также характеризуются неоднозначностью, которая приводит к искажению формы измеренной ФДН (рис. 5).

Чаще всего при измерении объемных диаграмм направленности используется ОПУ «ази-

мут – крен» (рис. 1, а), которому соответствует сферическая СК (θ, ϕ) . Эта СК имеет узел в осевом направлении исследуемой антенны $\theta = 0$.

Характерные объемные ФДН антенн с линейной поляризацией для двух ортогональных линейных составляющих $E_\phi(\theta, \phi)$ и $E_\theta(\theta, \phi)$ напряженности поля показаны на рис. 6, а, б. Вид ФДН антennы с круговой поляризацией, измеренной на согласованной круговой составляющей поля показан на рис. 6, в. При измерениях в линейном базисе характерный вид ФДН будет таким же.

При $\theta = 0$ с изменением угла ϕ ФДН антennы с линейной поляризацией меняется скачкообразно, ФДН антennы с круговой поляризацией меняется строго линейно по закону $\Phi(\phi) = \phi$ (при $\theta = \text{const}$ содержит линейную составляющую).

В обоих случаях функция $\Phi(\theta, \phi)$ при $\theta = 0$ ($k_x = k_y = 0$) имеет разрыв, из-за этого нельзя применять рассмотренные алгоритмы расчета координат ФЦ непосредственно к измеренным объемным ФДН.

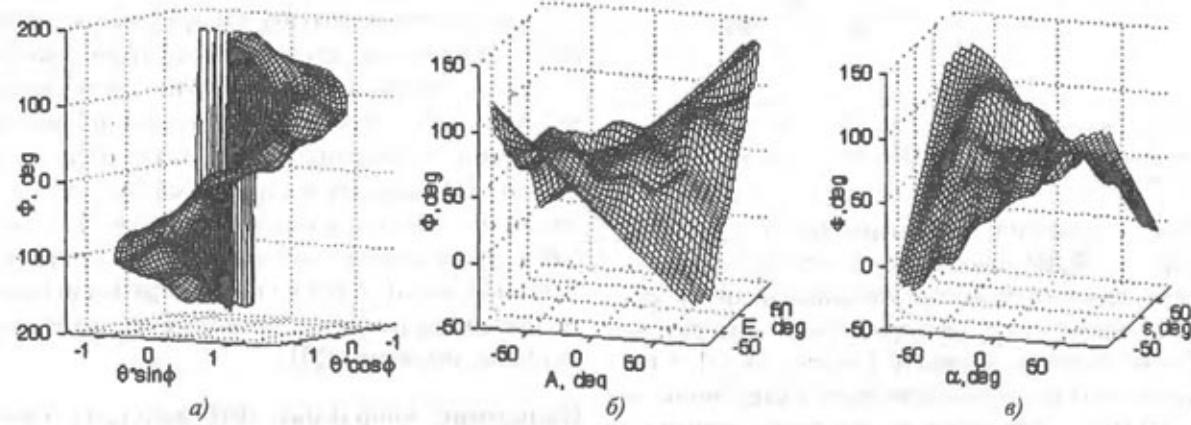


Рис. 5. ФДН антennы с круговой поляризацией в различных сферических системах координат: а – «азимут – крен» (θ, ϕ) ; б – «азимут над элевацией» (A, E) ; в – «элевация над азимутом» (α, ε)

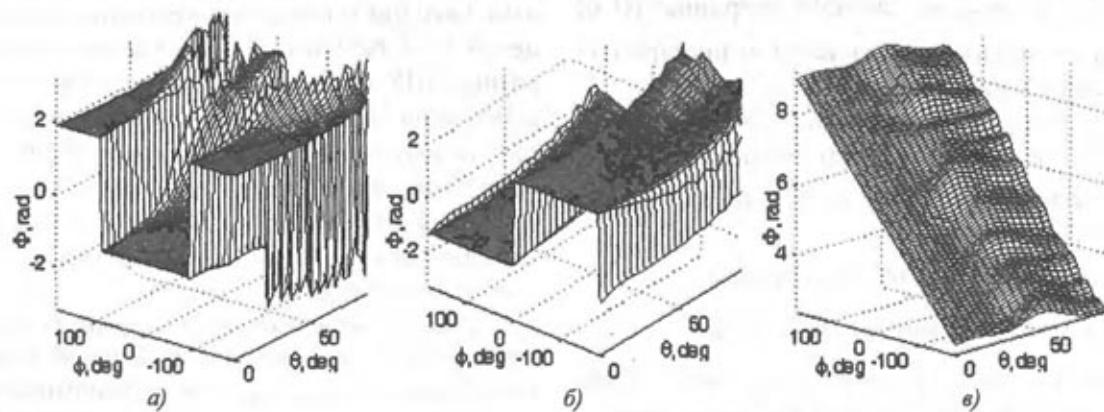


Рис. 6. Характерный вид объемных ФДН составляющих вектора напряженности поля антennы с линейной поляризацией (а – $\Phi_\phi(\theta, \phi)$; б – $\Phi_\theta(\theta, \phi)$) и круговой (в) поляризацией

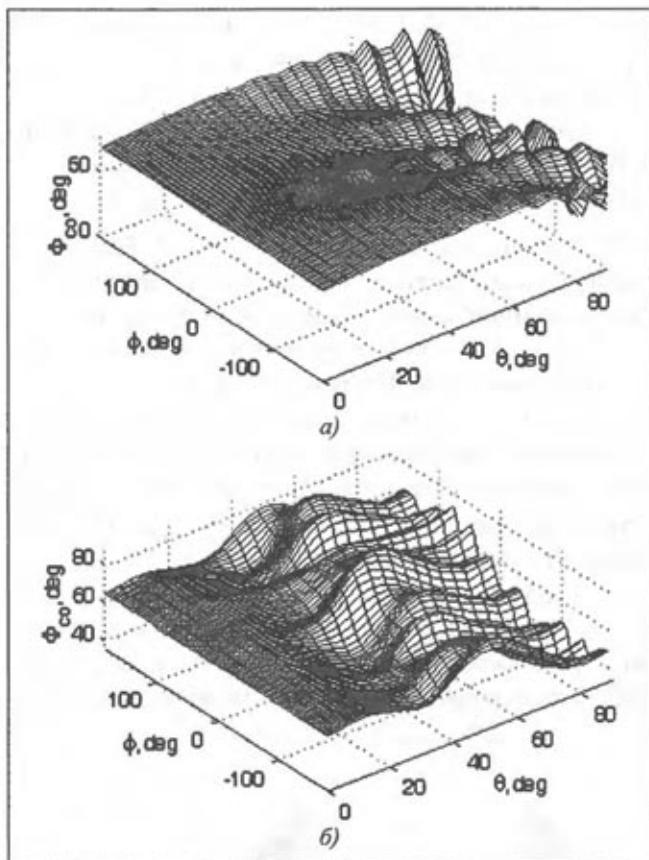


Рис. 7. ФДН антенн с линейной (а) и круговой (б) поляризацией, показанные на рис. 6, в кополярном поляризационном базисе Ludwig-3

Для устранения неоднозначности при $\theta = 0$ измеренную ФДН необходимо преобразовать в кополяризационно–кроссполяризационный координатный базис (v, h) (в зарубежной литературе этот базис принято называть Ludwig-3) [4]. Система координат (v, h) соответствует измерениям на ОПУ «азимут – крен» при синхронном вращении вспомогательной антенны по углу ϕ . Орты системы координат (v, h) e_v, e_h образуются путем поворота пары ортов e_θ, e_ϕ системы координат (θ, ϕ) на соответствующий угол ϕ в каждом пространственном направлении.

Формулы для пересчета составляющих $\dot{E}_\theta(\theta, \phi), \dot{E}_\phi(\theta, \phi)$ вектора напряженности поля в линейном базисе в составляющие $\dot{E}_v(\theta, \phi), \dot{E}_h(\theta, \phi)$ имеют вид [4]

$$\begin{aligned}\dot{E}_h(\theta, \phi) &= \dot{E}_\theta(\theta, \phi) \cos \phi - \dot{E}_\phi(\theta, \phi) \sin \phi; \\ \dot{E}_v(\theta, \phi) &= \dot{E}_\theta(\theta, \phi) \sin \phi + \dot{E}_\phi(\theta, \phi) \cos \phi.\end{aligned}\quad (13)$$

В качестве фазы круговой составляющей поля может быть принята фаза любой из линейных составляющих $\dot{E}_v(\theta, \phi)$ или $\dot{E}_h(\theta, \phi)$.

Учитывая, что $\dot{E}_\phi(\theta, \phi) = j\dot{E}_\theta(\theta, \phi)$, для фазы круговой составляющей получим

$$\dot{E}_v(\theta, \phi) = (\sin \phi + j \cos \phi) \dot{E}_\theta(\theta, \phi). \quad (14)$$

Соотношение (14) используется также в случае, если измерения выполняются непосредственно на круговой составляющей поля с помощью вспомогательной антенны с круговой поляризацией.

Объемные ФДН в координатном базисе Ludwig-3, полученные с помощью приведенных формул из результатов измерений в базисе (θ, ϕ) , показаны на рис. 7.

ФДН измеряется в системах координат (A, E) или (α, ε) с использованием соответственно ОПУ «азимут–элевация» или «элевация–азимут», то для перехода в базис Ludwig-3 сначала необходимо перейти в базис (θ, ϕ) , а затем воспользоваться соотношениями (13) или (14).

Отметим, что поскольку для антенн с вращающейся поляризацией фаза сигнала меняется в пределах $[0 \dots 360^\circ]$ синхронно с изменением угла ϕ системы координат (θ, ϕ) , то понятие фазового центра для таких антенн, строго говоря, неприменимо. Иногда его заменяют понятием *центра излучения*. Рассмотренные выше преобразования ФДН по сути означают учет взаимного пространственного положения второй антенны радиоканала, которая работает в паре с исследуемой антенной. Так, в системах спутниковой навигации набег фазы, соответствующий азимутальному углу спутника, вычитается из полной фазы сигнала. Оставшаяся часть фазы соответствует фазе сигнала антенны, имеющей ФЦ.

Измерение координат ФЦ антенны системы спутниковой навигации. Измерения проводились в безэховой камере и на оборудовании научно-производственного предприятия «ТРИМ» частотным методом с помощью векторного анализатора цепей PNA N5230A. Использовалось двухкоординатное ОПУ «азимут – крен» со слайдером для перемещения антенны в продольном направлении. Для обеспечения совпадения оси ϕ ОПУ и оси вспомогательной антенны, а также для симметричного выставления исследуемой антенны относительно оси ϕ и нанесения маркерной точки использовался лазерный нивелир.

Прямоугольная система координат, в которой производилось измерение положения ФЦ, была привязана к исследуемой антенне путем нанесения маркерной точки на вершине обтекателя. Ось OZ системы координат направлена навстречу наблюдателю.

В качестве вспомогательной антенны использовалась коническая логоспиральная антenna круговой поляризации с коэффициентом эллиптичности около 0,35 дБ. Измерения выполнялись в диапазоне 2,2 ГГц с угловым шагом $\Delta\theta = \Delta\phi = 2^\circ$.

Вначале исследуемая антenna была установлена так, что ее маркерная точка находилась в центре вращения ОПУ. По предварительным измерениям отдельных сечений ФДН с помощью алгоритма расчета координат ФЦ по отдельным сечениям было определено, что ФЦ находится приблизительно на расстоянии 20 мм от маркерной точки в отрицательном направлении оси OZ , т.е. внутри антенны. После этого антenna была передвинута на слайдере на 20 мм вперед, и дальнейшие измерения и расчеты проводились относительно этой точки. К рассчитанным координатам ФЦ добавлялась составляющая смещения $\Delta z_0 = -20$ мм.

На рис. 8,б показаны отдельные сечения ФДН, снятые через 30° по углу ϕ . При $\theta = 0^\circ$ соседние сечения смещены на 30° по фазе, что соответствует шагу поворота по углу ϕ . Проекция объемной ФДН в координатном базисе Ludwig-3 показана на рис. 8,а. В табл. 2 приведены результаты расчета координат ФЦ на средней частоте диапазона для различных секторов по углу θ .

В табл. 3 приведены результаты расчета координат ФЦ для заданного рабочего углового сектора $\theta_{\max} = 80^\circ$. Координаты приведены относительно маркерной точки на вершине обтекателя. Для расчета инструментальной погрешности измерения координат ФЦ была проведена серия из шести измерений. Инструментальная погрешность σ_r рассчитывалась по абсолютному расстоянию $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$ ФЦ от маркерной точки и составила 0,3 мм.

Измерение координат ФЦ при планарном сканировании в ближнем поле. При измерении характеристик направленных антенн в ближнем поле с помощью планарного сканера начало СК, эквивалентное точке пересечения осей двухкоординатного ОПУ при измерениях в дальней зоне, находится в центре области сканирования. Диаграммы направленности, как правило, рассчитываются в координатах (A, E) (рис. 1,б). Плоскость сканирования удалена от апертуры антены на расстояние нескольких длин волн. Поэтому измеренная ФДН всегда имеет вид вогнутой или выпуклой поверхности (рис. 9). Для пересчета ФДН к центру апертуры антены используется соотношение

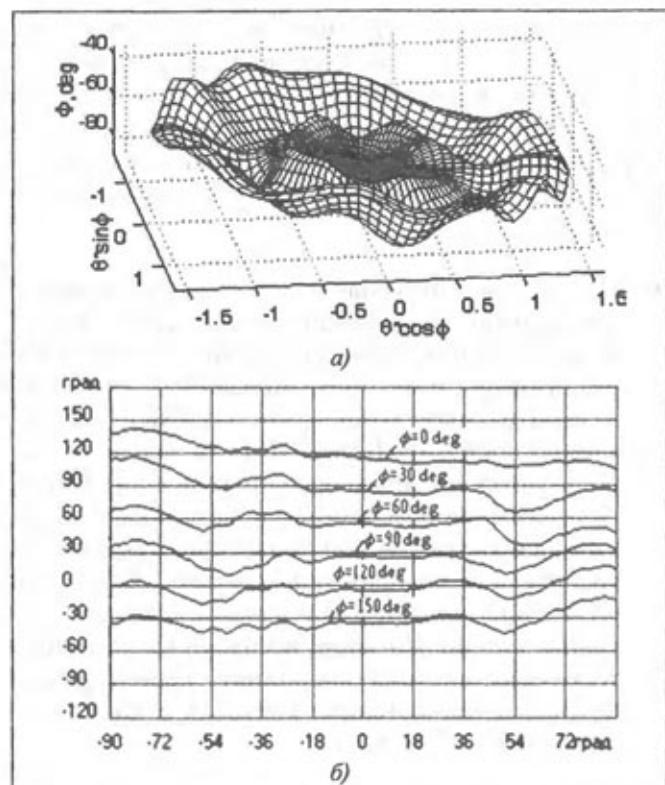


Рис. 8. Проекция объемной ФДН антенны системы спутниковой навигации на частоте $f = 2,2$ ГГц в поляризационном базисе Ludwig-3 (а) и ее сечения (б) по углу θ

Таблица 2. Результаты расчета координат ФЦ антенны системы спутниковой навигации

Координаты ФЦ	θ_{\max} , град						
	30	40	50	60	70	80	90
x_0 , мм	-3,7	-3,5	-3,1	-3,2	-3,5	-3,8	-4,1
y_0 , мм	1,8	1,5	1,2	0,8	0,5	0,5	0,5
z_0 , мм	-22,6	-22,6	-16,1	-13,8	-16,2	-19,1	-20,5
r_0 , мм	23,0	23,0	16,4	14,2	16,6	19,5	20,9

Таблица 3. Результаты расчета координат ФЦ для рабочего углового сектора $\theta_{\max} = 80^\circ$

Координаты ФЦ	№ измерения						Среднее значение
	1	2	3	4	5	6	
x_0 , мм	-3,8	-3,8	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,7
y_0 , мм	0,5	0,5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	0,0
z_0 , мм	-19,1	-20,4	-20,6	-19,9	-20,2	-20,1	-20,1
r_0 , мм	19,5	20,8	20,9	20,2	20,5	20,4	20,4

$$\Phi'(\theta, \phi) = \Delta\Phi(\theta, \phi) - \frac{2\pi}{\lambda} \left[-\frac{L_x}{2} \sin A \cos E - (L_y/2) \sin E - R_z (\cos A \cos E - 1) \right], \quad (15)$$

где L_x, L_y – размеры области сканирования; R_z – расстояние от плоскости сканирования до апертуры. Соотношение (15) учитывает смещение начала СК

в угол области сканирования при обработке дискретных массивов амплитудно-фазового распределения. Для расчета координат ФЦ относительно центра области сканирования или, после пересчета ФДН, относительно центра апертуры используются соотношения (1)–(6), где k_x , k_y , k_z определяются в соответствии с (7).

- На основе материалов статьи разработаны программное обеспечение и методика измерения координат фазового центра антенн. Они реализованы в автоматизированных антенных измерительных комплексах (АИВК), выпускаемых ООО «НПП «ТРИМ», и успешно используются на многочисленных предприятиях. Программное обеспечение и методика измерений адаптируются под конкретные задачи потребителя и условия применения АИВК: тип ОПУ, вид поляризации вспомогательной антенны, вид поляризации исследуемой антенны, требуемая система координат, используемые потребителем методики контроля и настройки параметров антенн и т.п.

Автор выражает благодарность П. В. Мильеву за полезное обсуждение результатов работы, М. А. Чавдарь за выполнение измерений антенн и В. Л. Мореву за разработку программного обеспечения.

Литература

- Драбкин А.Л. и др. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио. 1974.
- Вольперт А.Р. О фазовом центре антенн. Радиотехника. 1961. Т. 16. № 3.
- Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Под ред. Н.М. Цейтлина. М.: Радио и связь. 1985.
- Newell A.C. Spherical coordinate systems for defining directions and polarizations components in antenna measurements./ Proc. of the Antenna measurement techniques association conference, 1998, Montreal, Ontario, Canada.
- Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика. 1986.
- Antenna catalog. The Microwave Vision Group. SATIMO. 2013.

Поступила 9 февраля 2014 г.

Measuring of antenna phase center coordinates

© Authors, 2014
© Radiotekhnika, 2014

Yu. N. Kalinin

Ph.D. (Eng.), Leading Research Scientist, «Scientific and Production Enterprise «TRIM» Co., Ltd. (St. Petersburg)
E-mail: kalinin_yuri@mail.ru

The subject of measuring the antenna phase center coordinates is one of the most important and actual tasks of antenna measurements. However, this topic is not covered in detail both in national and foreign literature. Recently this task has gained special relevancy in connection with the rapid development and enhanced accuracy of global navigation systems.

At present time the method of selecting the positions of an antenna on the positioner is most commonly used to determine the phase center coordinates. In this case, only separate cuts of phase pattern in azimuth plane are measured as a rule and the change of positions occurs in one longitudinal coordinate, which, as a result, determines the PhC position.

This article describes the computation algorithm for phase pattern three-dimensional spatial coordinates using a singly measured tridimensional phase pattern. This algorithm can be used during measurements in various spherical coordinate systems corresponding to various types of two-coordinate positioners. It can be used to calculate the phase center coordinates by a random phase pattern section. However, the processing algorithm is greatly simplified during measurements on symmetrical angular intervals relative to zero direction. The special case of this algorithm is used to calculate the phase center two-dimensional coordinates by phase pattern separate cross-sections.

The relationships for compensating the phase center displacement during measurements of tridimensional phase patterns and their cuts are provided. The measurement features of antenna tridimensional phase patterns with linear and circular polarization and necessary transformations of these diagrams to eliminate uncertainties and discontinuities in the spherical coordinate system nodes are considered. The peculiarities of phase center application for antennas with circular polarization are considered. The experimental measurement results of spatial phase center coordinates of a satellite navigation system antenna are provided. The computation features of phase center coordinates in measuring the antenna characteristics by the planar scanning method in the near field are considered as well.

The software and antenna phase center measurement method have been developed on the basis of materials stated in this articles. They have been implemented in automated antenna measuring systems (AAMS) produced by research and production enterprise TRIM (Saint Petersburg) and successfully applied at many enterprises. This software and measurement method are tailored to user's certain tasks and AAMS application conditions (positioner type, auxiliary antenna polarization type, polarization type of antenna under test, required coordinate system, tuning and monitoring methods for antenna parameters applied by the user etc.).

References

- Drabkin A.L. i dr. Antenno-fidernye ustrojstva. M.: Sov. radio. 1974.
- Vol'pert A.R. O fazovom centre antenn. Radioteknika. 1961. T. 16. № 3.
- Metody izmereniya xarakteristik antenn SVCh / Pod red. N.M. Czejtлина. M.: Radio i svyaz'. 1985.
- Newell A.C. Spherical coordinate systems for defining directions and polarizations components in antenna measurements./ Proc. of the Antenna measurement techniques association conference, 1998, Montreal, Ontario, Canada.
- Dreijper N., Smit G. Prikladnoj regressionnyj analiz. M.: Finansy i statistika. 1986.
- Antenna catalog. The Microwave Vision Group. SATIMO. 2013.