



УДК 621.396.67

Д. О. Хабилов, М. А. Удров

ОАО "Научный центр прикладной электродинамики" (Санкт-Петербург)

Методика определения координат центра излучения антенны и практические аспекты ее применения

Представлено теоретическое обоснование и описание практического применения метода расчета координат фазового центра (центра излучения) антенн на примере синфазной антенной решетки. Метод основан на определении координат центров кривизны фазового фронта волны в зависимости от угла поворота антенны и в приведении координат всех найденных центров кривизны к единой системе координат, привязанной к оси вращения антенны.

Антенна, фазовый центр, центр излучения, эволюта

При применении излучателей электромагнитных волн в различных системах (антенные решетки (АР), зеркальные антенны) важно иметь информацию о реальных координатах их фазового центра (ФЦ) или центра излучения. Ввиду значительного разнообразия конструкций антенн необходимо разработать удобную для практического использования методику определения координат ФЦ, результат применения которой не зависит от типа антенны.

В большинстве случаев антенны не имеют ФЦ в строгом смысле [1], поскольку поверхности равных фаз не являются сферами. Однако на практике обычно важно проанализировать фазовую диаграмму направленности (ДН) в каком-либо ограниченном секторе (например, в пределах главного лепестка). В большинстве случаев в таком ограниченном телесном угле поверхности равных фаз можно аппроксимировать сегментами поверхностей сфер [2].

В этом случае следует говорить о частичном фазовом центре, т. е. центре кривизны поверхности равных фаз в направлении, заданном углами φ (азимут) и θ (угол места). Центр кривизны поверхности – точка математически определенная; она представляет собой центр сферы, совпадающей с поверхностью равных фаз в точке, определенной направлением, заданным указанными углами.

С практической точки зрения задача определения координат центра излучения включает следующие этапы:

– поиск математических соотношений, позволяющих определять центр кривизны плоской ли-

нии равных фаз, полученной сечением поверхности равных фаз заданной плоскостью;

– объединение решений для координат центра излучения, полученных в плоских сечениях фазовой ДН, в единой трехмерной системе координат (данный этап в настоящей статье не рассмотрен).

Линия равных фаз описывается уравнением [3]

$$\rho(\varphi) = r + \psi(\varphi)/k,$$

где r – расстояние от точки пересечения оси симметрии антенны и оси ее вращения до ФЦ измерительной антенны (при этом предполагается, что ФЦ измерительной антенны расположен на продольной оси симметрии рассматриваемой антенны, т. е. обе антенны находятся на одной высоте относительно горизонтальной поверхности (пола)); ψ – фаза электромагнитного поля; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, причем λ – длина волны излучения.

Рис. 1 иллюстрирует связь данных параметров. Начало координат O располагается в точке пересечения плоскостей симметрии антенны (если для какой-либо антенны плоскости симметрии отсутствуют, начало координат можно расположить в произвольной точке антенны). Оси координат η и ξ означают, соответственно, продольное и поперечное смещения в плоском сечении, в котором известна фазовая ДН $\psi(\varphi)$. Сплошной кривой показана линия равных фаз $\rho(\varphi)$, штриховой – окружность с центром в точке (ξ_0, η_0) и радиусом-вектором ρ_0 , совпадающая с кривой

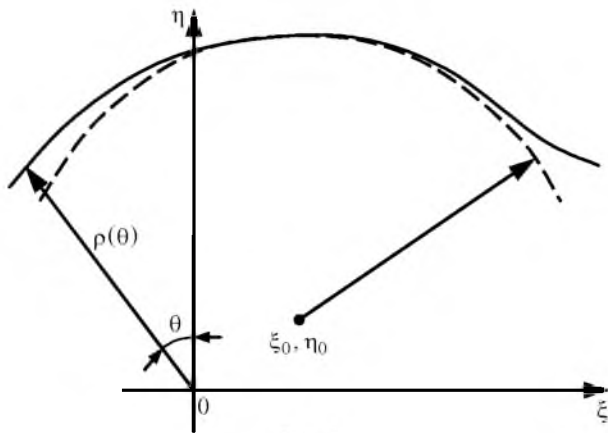


Рис. 1

$\rho(\varphi)$ по критерию минимального среднеквадратичного отклонения в направлении, характеризуемом углом φ_0 (на рис. 1 не показан). Таким образом, $\rho_0 = \rho(\varphi_0)$, а точка (ξ_0, η_0) является центром кривизны линии равных фаз в направлении φ_0 .

Координаты центра кривизны линии равных фаз в направлении θ находятся по известным из [4] формулам для радиуса кривизны и центра кривизны кривой, заданной в полярной системе координат.

Учитывая, что $r \gg (1/k)\psi(\varphi)$, и пренебрегая малыми величинами, получим:

$$\xi_0(\varphi) = (1/k) [\cos \varphi \psi'(\varphi) - \sin \varphi \psi''(\varphi)];$$

$$\eta_0(\varphi) = (1/k) [\cos \varphi \psi''(\varphi) + \sin \varphi \psi'(\varphi)],$$

где $\psi'(\varphi) = d\psi(\varphi)/d\varphi$; $\psi''(\varphi) = d^2\psi(\varphi)/d\varphi^2$.

Приведенные формулы позволяют найти координаты частичного ФЦ (или, в общем случае, эволюты, т. е. геометрического места центров кривизны) одномерной фазовой ДН через производные функции, описывающие эту диаграмму. Эволюта представляет траекторию перемещения точки ФЦ исследуемой антенны в каком-либо плоском сечении, перпендикулярном оси вращения, при повороте антенны вокруг данной оси вращения (рис. 2). В общем случае расположение ФЦ не совпадает с местом пересечения продольной оси симметрии антенны (штрихпунктирная линия на рис. 2) и оси ее вращения на опорно-поворотном устройстве.

В рамках лабораторных исследований с помощью векторного анализатора цепей проведены измерения фазовых ДН синфазной АР, состоящей из четырех цилиндрических спиральных облучателей и экранной плоскости. Облучатели располагались в вершинах квадрата со стороной $0,7\lambda$.

На рис. 2 упрощенно показана схема проведения измерений значений фаз. Линии 1–3 представляют собой сечения экранной плоскости исследуемой АР плоскостью, перпендикулярной оси вращения, для различных углов поворота φ (ось вращения проходит через точку 0 перпендикулярно плоскости рисунка). Линия 1 соответствует исходному положению АР ($\varphi = 0$), линии 2 и 3 – повороту АР на углы $\varphi_1 = -25^\circ$ и $\varphi_2 = 25^\circ$ соответственно.

Положение ФЦ определялось в системе координат, связанной с экранной плоскостью АР: начало координат находилось в точке пересечения продольной оси симметрии АР и оси вращения, т. е. в центре экранной плоскости. По осям координат η и ξ (на рис. 2 не показаны) происходит продольное и поперечное смещения в сечении рисунка соответственно.

В рассмотренной схеме измерения предполагается, что ФЦ АР в исходном положении (ФЦ0) расположен с поперечным смещением ξ_0 и нулевым продольным смещением (значение $\eta_0 = 0$ принято для большей наглядности объяснения). При повороте АР на углы φ_1 и φ_2 точка ФЦ перемещается, оставаясь в ее экранной плоскости (значение $\eta_0 = 0$ сохраняется) и занимая позиции ФЦ1 и ФЦ2 соответственно. Эти позиции определяются значениями поперечных смещений ξ_1 и ξ_2 . В процессе поворота ФЦ перемещается по некоторой кривой, обозначенной на рис. 2 как "Траектория ФЦ". В общем случае указанная траектория не является дугой окружности с центром в точке 0, так как для различных углов поворота АР вокруг оси вращения положение точки частичного ФЦ может сместиться. Таким образом, в общем

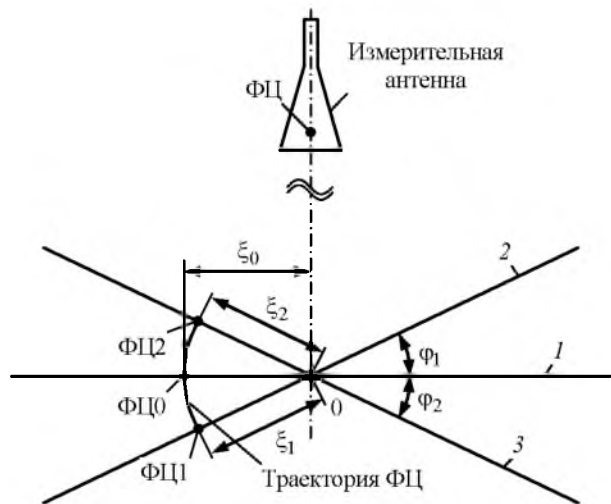


Рис. 2

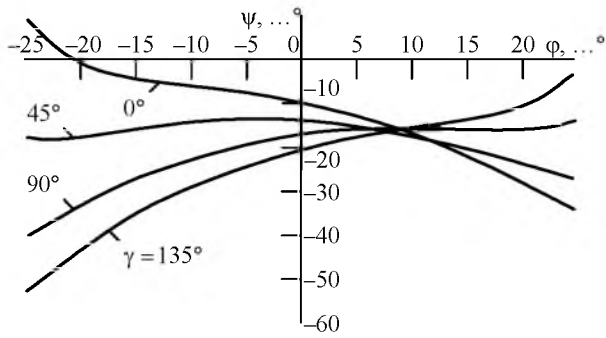


Рис. 3

случае $\xi_0 \neq \xi_1 \neq \xi_2$, а координаты точек ФЦ необходимо определять для каждого угла поворота АР.

На рис. 3 представлены результаты измерений набега фазы $\psi(\varphi)$ электромагнитной волны от ФЦ до измерительной антенны при углах поворота исследуемой антенны относительно продольной оси симметрии, равных 0, 45, 90 и 135°. Измерения выполнены на частоте 1246 МГц.

На рис. 4 представлены построенные описанным способом эволюты (траектории частичного ФЦ) для этих же углов поворота АР вокруг продольной оси симметрии. Система координат рис. 4 аналогична системе координат рис. 2. Круглыми маркерами на эволютах обозначены положения частичного ФЦ АР при $\varphi = 0$; маркеры в начале координат указывают проекцию оси вращения АР на опорно-поворотном устройстве.

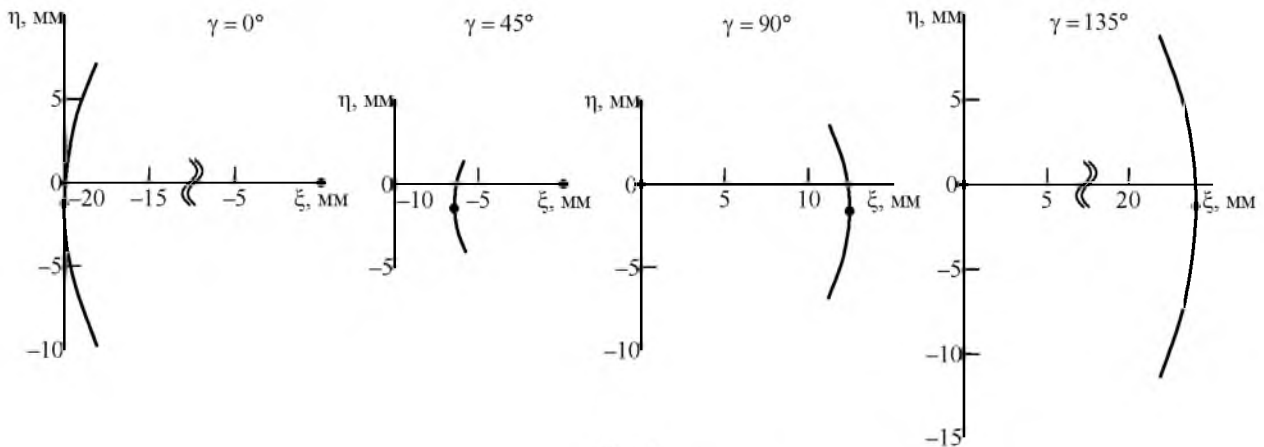


Рис. 4

При определении положения центра излучения (координаты $\xi_{Ц}$ и $\eta_{Ц}$) необходимо учитывать, что координаты частичного ФЦ (ЧФЦ) для угла поворота АР φ , отличного от нуля, следует относить не к исходной системе координат, а к системе, повернутой на этот угол вместе с экранной плоскостью АР (рис. 5). На рис. 5 указанные координаты обозначены как $\xi'_{Ц}$ и $\eta'_{Ц}$, остальные обозначения аналогичны принятым на рис. 2.

Учитывая зависимость продольной η и поперечной ξ составляющих смещения частичных ФЦ от угла поворота φ антенны вокруг оси вращения, выражения для определения координат центра излучения антенны можно записать следующим образом:

$$\xi_{Ц} = \int_0^{2\pi} \sqrt{\xi^2(\varphi) + \eta^2(\varphi)} \times \cos\{\varphi - \arctg[\eta(\varphi)/\xi(\varphi)]\} |\Phi(\varphi)| d\varphi; \quad (1)$$

$$\eta_{Ц} = \int_0^{2\pi} \sqrt{\xi^2(\varphi) + \eta^2(\varphi)} \times \sin\{\varphi - \arctg[\eta(\varphi)/\xi(\varphi)]\} |\Phi(\varphi)| d\varphi; \quad (2)$$

где $|\Phi(\varphi)|$ – амплитудная ДН, используемая в качестве весовой функции. Введение амплитудной ДН в формулы (1), (2) обеспечивает независимость точности расчета координат центра излучения от пределов интегрирования [3].

После преобразования [5] получим:

$$\xi_{Ц} = \frac{1}{k} \int_0^{2\pi} \sqrt{[\psi'(\varphi)]^2 + [\psi''(\varphi)]^2} \times \cos\left[\varphi - \arctg \frac{\psi''(\varphi) + \operatorname{tg} \varphi \psi'(\varphi)}{\psi'(\varphi) - \operatorname{tg} \varphi \psi''(\varphi)}\right] |\Phi(\varphi)| d\varphi;$$

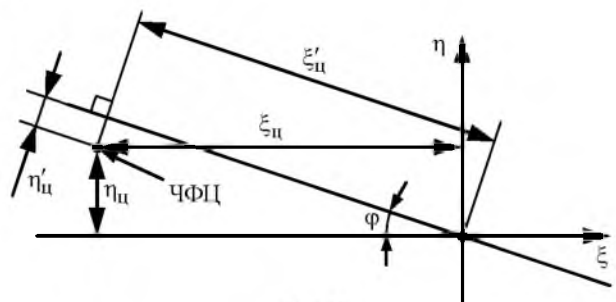


Рис. 5

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{1}{k} \int_0^{2\pi} \sqrt{[\psi'(\varphi)]^2 + [\psi''(\varphi)]^2} \times \\ \times \sin \left[\varphi - \arctg \frac{\psi''(\varphi) + \text{tg } \varphi \psi'(\varphi)}{\psi'(\varphi) - \text{tg } \varphi \psi''(\varphi)} \right] |\Phi(\varphi)| d\varphi.$$

Приведенные выражения позволяют определить координаты центра излучения антенны, для которой известна (получена по результатам измерений либо теоретических расчетов) одномерная амплитудно-фазовая ДН. При этом координаты определяются в плоскости сечения, перпендику-

лярной оси вращения антенны на опорно-поворотном устройстве (рис. 2, 4, 5).

Совокупность плоских сечений ДН, проходящих через одну ось, формирует объемную ДН [3], поэтому реальное положение центра излучения может быть определено сведением решений для координат центра излучения, полученных в плоских сечениях фазовой ДН, в единую трехмерную систему координат. Указанная операция может быть проведена как аналитическим, так и графическим методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольперт А. Р. О фазовом центре антенны // Радиотехника. 1961. Т. 16, № 3. С. 3–12.
2. Родс Д. Р. Введение в моноимпульсную радиолокацию. М.: Сов. радио, 1960. 160 с.
3. Вендик О. Г., Парнес М. Д., Бахрах Л. Д. Антенны с электрическим сканированием (введение в теорию). М.: Science Press, 2001. 252 с.
4. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1977. 872 с.
5. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для вузов. 13-е изд. М.: Наука. Гл. редакция физ.-мат. лит., 1985. Т. 1. 432 с.

D. O. Khabirov, M. A. Udrov

Open JSC "Scientific center of applied electrodynamics" (Saint Petersburg)

Antenna radiation center coordinates finding method and its applying practical aspects

The theoretical justification and original method of antenna phase center (radiation center) coordinates calculation practical application are presented by the example of four-helix array. The method is based on wave phase front curvature center coordinates finding as function of antenna rotation angle, and on found curvature centers coordinates transformation to single coordinate system, which is related to antenna rotation axis.

Antenna, phase center, radiation center, evolute

Статья поступила в редакцию 11 июня 2015 г.