

Практическое применение универсального расчетного метода определения координат центра излучения антенны

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

Ключевые слова: антенна, фазовый центр, центр излучения, эволюта.

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

В большинстве случаев антенны не имеют ФЦ в строгом смысле [1]. Это объясняется тем, что поверхности равных фаз не являются сферами. Однако в большинстве случаев практически важно проанализировать фазовую диаграмму направленности в каком-либо ограниченном секторе (например, в пределах главного лепестка). В большинстве случаев в таком ограниченном телесном угле поверхности равных фаз будут близко соответствовать поверхностям сфер [2].

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

С практической точки зрения представляет интерес найти формулы, позволяющие определять центр кривизны плоской кривой равных фаз, полученной путем сечения поверхности равных фаз заданной плоскостью.

Линия равных фаз описывается уравнением [3]

$$\rho(\theta) = r + \frac{1}{k} \psi(\theta),$$

где r – расстояние от точки пересечения оси симметрии антенны и оси ее вращения до фазового центра измерительной антенны (при этом предполагается, что фазовый центр измерительной антенны расположен на оси симметрии рассматриваемой антенны, т.е. обе антенны находятся на одной высоте относительно горизонтальной поверхности пола); $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число; $\psi(\theta)$ – зависимость измеренных значений фаз электромагнитного поля от угла поворота исследуемой антенны вокруг оси вращения.

Координаты центра кривизны линии равных фаз в направлении θ находятся исходя из известных формул для радиуса кривизны и центра кривизны кривой, заданной в полярной

системе координат. На рисунке 1 приведена иллюстрация связи данных параметров.

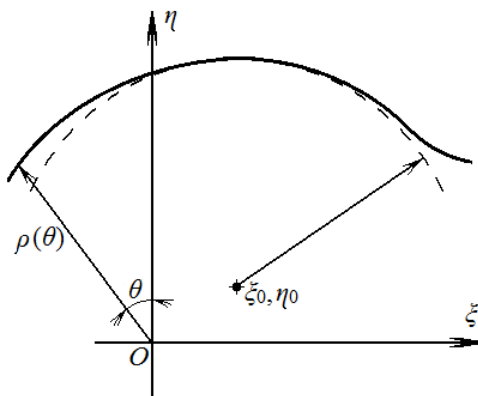


Рисунок 1. – К пояснению понятия частичного фазового центра

Учитывая, что $r \gg (1/k) \psi(\theta)$ и пренебрегая малыми величинами, можно получить:

$$\xi_0(\theta) = \frac{1}{k} [\cos \theta \psi'(\theta) - \sin \theta \psi''(\theta)];$$

$$\eta_0(\theta) = \frac{1}{k} [\cos \theta \psi''(\theta) + \sin \theta \psi'(\theta)].$$

Данные формулы позволяют найти координаты частичного фазового центра (или, в общем случае, эволюты, т.е. геометрическое место центров кривизны) одномерной фазовой диаграммы направленности через производные от функции, описывающей эту диаграмму. В общем случае расположение точки фазового центра не совпадает с местом пересечения оси симметрии антенны и оси ее вращения, а эволюты представляют собой траектории перемещения точки фазового центра исследуемой антенны при ее повороте вокруг оси вращения (рисунок 2). Если фазовые измерения проводить на дискретных (0° , 45° , 90° , 135° и т.д.) углах поворота антенны вокруг её оси симметрии, то каждое единичное измерение будет определять фазовый центр с точностью до координат точки на плоскости, через которую перпендикулярно проходит прямая, параллельная оси вращения антенны и составляющая соответствующий угол (0° , 45° , 90° , 135° и т.д.) с плоскостью отсчета, проходящей через ось симметрии антенны.

В рамках данной работы с помощью векторного анализатора цепей были проведены измерения фазовых диаграмм направленности антенны, представляющей собой 4-х спиральную решетку. На рисунке 2 упрощенно показана схема проведения измерений значений фаз. Линия, обозначенная на рисунке «Пл 0», представляет собой сечение экранной плоскости исследуемой антенной решеткой плоскостью, перпендикулярной оси вращения (ось вращения проходит через точку «O» перпендикулярно плоскости рисунка). При этом антенная решетка находится в исходном положении – угол поворота вокруг оси вращения равен 0° . Линии, обозначенные «Пл 1» и «Пл 2», представляют собой сечения экранной плоскости исследуемой антенной решеткой, повернутой относительно оси вращения на углы $\theta_1 = -25^\circ$ и $\theta_2 = 25^\circ$ соответственно.

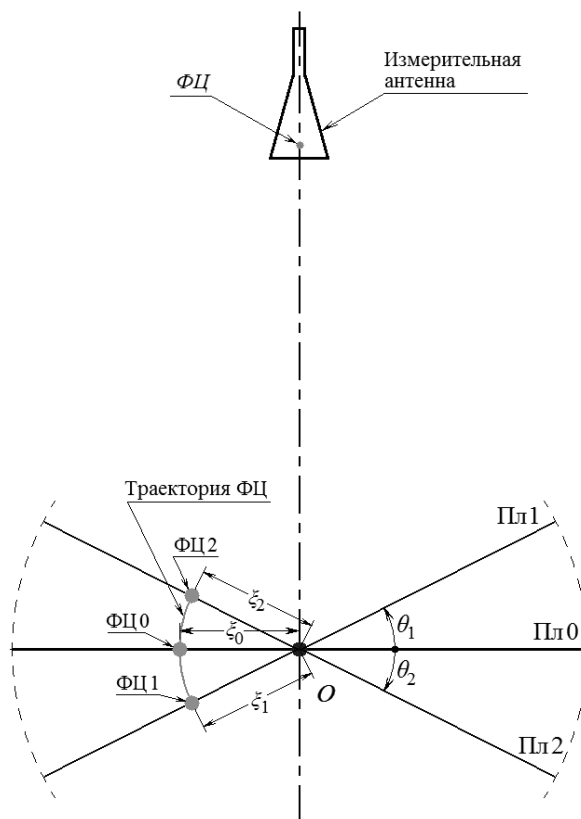


Рисунок 2. – Схема проведения измерений

Предполагается, что точка фазового центра антенной решетки в исходном положении («ФЦ 0») определяется значением поперечного смещения ξ_0 и нулевым значением продольным смещением (значение $\eta_0 = 0$ принято для большей наглядности объяснения). В процессе поворота антенной решетки до положений «Пл 1» и «Пл 2» перемещается и точка фазового центра, привязанная к плоскости антенной решетки (до точек «ФЦ 1» и «ФЦ 2», определяемых значениями поперечного смещения ξ_1 и ξ_2 соответственно) по траектории, обозначенной на рисунке как «Траектория ФЦ». В общем случае данная траектория не является дугой окружности с центром в точке «O», так как для различных углов поворота антенной решетки вокруг оси вращения положение точки частичного фазового центра может сместиться. Т.е., в общем случае $\xi_0 \neq \xi_1 \neq \xi_2$, и координаты точек фазового центра необходимо определять для каждого угла поворота антенной решетки отдельно.

На рисунке 3 представлены результаты измерений значений набега фазы электромагнитной волны от ФЦ до измерительной антенны при положениях оси исследуемой антенны: 0° , 45° , 90° и 135° .

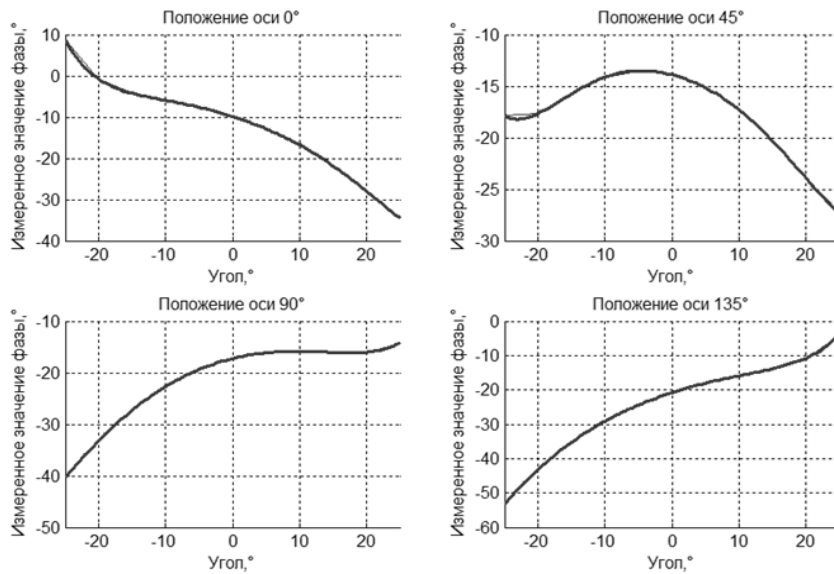


Рисунок 3. – Измеренные значения набега фазы

На рисунке 4 представлены построенные описанным выше способом эволюты (траектории частичного фазового центра)

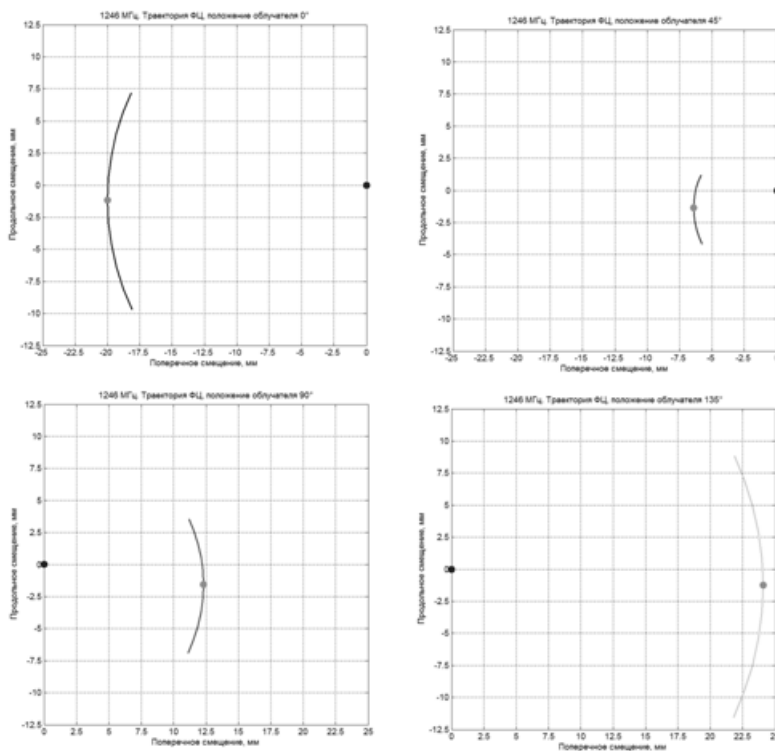


Рисунок 4. – Траектории частичных фазовых центров

При определении значений ξ_0 и η_0 необходимо учитывать, что координаты частичных фазовых центров для углов поворота антенной решетки, отличных от нуля, следует относить не к исходной системе координат (рисунок 5), а к системе, повернутой на соответствующий угол вместе с плоскостью решетки.

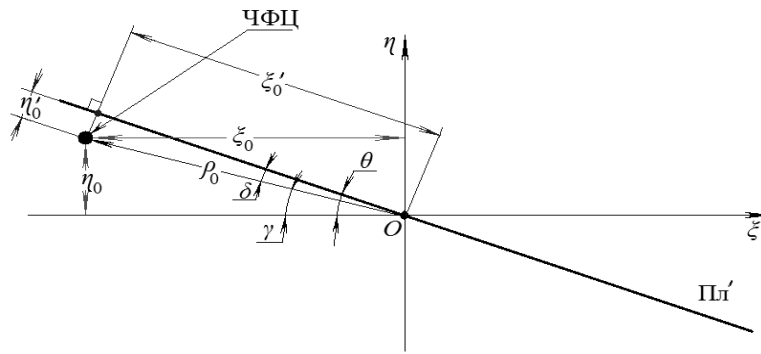


Рисунок 5. – Определения положения частичного ФЦ в локальной системе координат

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

$$\xi_0 = \int_0^{2\pi} \sqrt{(\xi_0(\theta))^2 + (\eta_0(\theta))^2} \cos\left(\theta - \arctan \frac{\eta_0(\theta)}{\xi_0(\theta)}\right) |\Phi(\theta)| d\theta;$$

$$\eta_0 = \int_0^{2\pi} \sqrt{(\xi_0(\theta))^2 + (\eta_0(\theta))^2} \sin\left(\theta - \arctan \frac{\eta_0(\theta)}{\xi_0(\theta)}\right) |\Phi(\theta)| d\theta.$$

После преобразования [5] получаются выражения:

$$\xi_0 = \frac{1}{k} \int_0^{2\pi} \sqrt{(\psi'(\theta))^2 + (\psi''(\theta))^2} \cos\left(\theta - \arctan \frac{\psi''(\theta) + \tan \theta \psi'(\theta)}{\psi'(\theta) - \tan \theta \psi''(\theta)}\right) |\Phi(\theta)| d\theta;$$

$$\eta_0 = \frac{1}{k} \int_0^{2\pi} \sqrt{(\psi'(\theta))^2 + (\psi''(\theta))^2} \sin\left(\theta - \arctan \frac{\psi''(\theta) + \tan \theta \psi'(\theta)}{\psi'(\theta) - \tan \theta \psi''(\theta)}\right) |\Phi(\theta)| d\theta.$$

Данное выражение позволяет определить координаты центра излучения антенны, для которой известна (получена по результатам измерений или теоретических расчетов) одномерная амплитудно-фазовая диаграмма направленности. При этом координаты определяются в плоскости сечения (рисунки 4, 5), перпендикулярной оси вращения антенны на опорно-поворотном устройстве. Для определения координат центра излучения антенны в целом следует провести расчеты координат в нескольких плоскостях, проходящих через ось симметрии антенны (штрихпунктирная линия на рисунке 2). Искомое положение центра излучения будет получено в результате объединения найденных решений.

Библиографический список

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