

Нормируемые электрические параметры антенн навигационной аппаратуры потребителей глобальной навигационной спутниковой системы

В. А. ТИЩЕНКО, В. И. ТОКАТЛЫ, С. А. КОЛОТЫГИН

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: otd200@vniiftri.ru

Выведена формула для комплексного коэффициента передачи между приемной и передающей антеннами. Приведенные формулы определяют номенклатуру нормируемых параметров антенн спутниковой системы и являются основой для оценки погрешности измерения расстояний между электрическими фазовыми центрами антенн.

Ключевые слова: антенна, электрический фазовый центр, фазовая диаграмма, групповое время запаздывания.

The derivation of formula for the complex coefficient of transmission between the receiving and the transmitting antennas was carried out. The presented formulas determine the normalizable parameters of GNSS antennas and are the basis for estimating the errors of measurement of distances between the antennas electrical phase centers.

Key words: antenna, electrical phase center, phase diagram, group delay time.

В связи с требованиями по повышению точности местоопределения навигационной аппаратурой потребителя (НАП) с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) возникла необходимость уточнения некоторых понятий, связанных с измерением дальности до навигационного космического аппарата (КА). В стандартах [1, 2], относящихся к ГНСС, не указано, что для измерения расстояния между КА и НАП должны быть стандартизованы точки, между которыми его находят. Дело в том, что дециметровая точность определения координат НАП стала соизмеримой с геометрическими размерами КА и НАП, которые теперь нельзя считать точечными объектами.

В механике, где оперируют с протяженными материальными телами, задача измерения расстояния решается введением понятий «материальная точка» и «центр масс». Для обеспечения единства измерений в радионавигационных системах, претендующих на точность нахождения координат, соизмеримую с геодезическими системами, требуется использовать понятие «электрического центра» для антенн ГНСС и разработки средств и методов его определения.

Рассмотрим схему функционирования ГНСС, приведенную на рисунке. Антенна A_g с генератором электромагнитных колебаний Γ , соединенные линией передачи, установлены на спутнике и образуют генератор электромагнитного

поля (ЭМП). Антенна A_m с приемником Π , также соединенные линией передачи, образуют измеритель ЭМП. Точки O_g , O_m — электрические центры антенн генератора и измерителя; r_{gm} — радиус-вектор, соединяющий точки O_g и O_m ; $r_{gm} = |r_{gm}|$ — расстояние между электрическими центрами антенн генератора и измерителя. Определение этого расстояния возможно путем измерений коэффициента передачи между входным и выходным сечениями антенн:

$$K_U = \frac{|U_m|}{|U_g|} \exp \left[i \left(\Phi_{U_m} - \Phi_{U_g} \right) \right] = K \exp \left[i \left(\Phi_{U_m} - \Phi_{U_g} \right) \right], \quad (1)$$

где U_m , U_g — напряжения на входе антенны измерителя и выходе антенны генератора ЭМП, соответственно; Φ_{U_g} , Φ_{U_m} — фазы напряжений.

Далее не конкретизируются типы антенн (дипольная, рупорная) и линий передачи (коаксиальная линия, волновод), так как проводимый ниже анализ от этого не зависит. Будем полагать, что выполняются следующие условия:

1. Генератор и измеритель параметров ЭМП расположены в свободном пространстве, т. е. пренебрегаем влиянием Земли и окружающих объектов на процессы генерации и измерений параметров ЭМП.

2. Расстояние между генератором и измерителем таково, что, во-первых, можно использовать приближение дальней зоны, а во-вторых, пренебречь взаимодействием между ними.

3. Внешние проводящие поверхности генератора и измерителя идеально проводящие.

4. Антенна измерителя обладает свойством взаимности. Это означает, что к его антенне вместо приемника можно подключить генератор электромагнитных колебаний, сохранив при этом без изменений внешнюю поверхность измерителя, и тем самым превратить измеритель в генератор. В этом случае можно рассматривать работу антенны измерителя в режиме генерации.

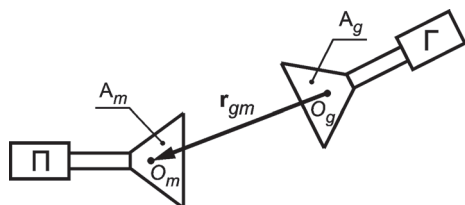


Схема функционирования ГНСС:

Γ — генератор; Π — приемник; A_g , A_m — антенны

Формула для вектора напряженности электрического поля (НЭП) $\mathbf{E}_g(\mathbf{r}_{gm})$, создаваемого генератором, в точке O_m имеет вид

$$\mathbf{E}_g(\mathbf{r}_{gm}) = \frac{kW_0L_gI_g}{4\pi r_{gm}} f_g(\mathbf{r}_{gm}^0) \mathbf{p}_g(\mathbf{r}_{gm}^0) \times \exp\left\{i\left[\pi/2 + \Phi_g(\mathbf{r}_{gm}^0) - \Phi_g(\mathbf{r}_{g0}^0) - kr_{gm}\right]\right\}, \quad (2)$$

где k — волновое число; W_0 — волновое сопротивление свободного пространства; L_g, I_g — действующая длина антенны генератора и ток в ее входном сечении; $f_g(\mathbf{r}_{gm}^0), \mathbf{p}_g(\mathbf{r}_{gm}^0), \Phi_g(\mathbf{r}_{gm}^0)$ — амплитудная, поляризационная и фазовая диаграммы направленности антенны генератора, полученные относительно точки O_g ; $\mathbf{r}_{gm}^0 = \mathbf{r}_{gm}/r_{gm}$; $\mathbf{r}_{g0}^0$ — единичный вектор в направлении максимума амплитудной диаграммы направленности антенны генератора.

Напряжение U_m , измеряемое приемником (напряжение на выходе антенны измерителя), определяется по формуле

$$U_m = V_m Z_m / (Z_{am} + Z_m),$$

где Z_m — входное сопротивление вольтметра; V_m, Z_{am} — электродвижущая сила эквивалентного генератора и сопротивление антенны измерителя,

$$V_m = \mathbf{E}_g(\mathbf{r}_{gm}) \mathbf{p}_m(\mathbf{r}_{mg}^0) f_m(\mathbf{r}_{mg}^0) L_m \exp\left[i\left(\Phi_m(\mathbf{r}_{mg}^0) - \Phi_m(\mathbf{r}_{m0}^0)\right)\right]; \quad (3)$$

L_m — действующая длина, $f_m(\mathbf{r}_{mg}^0), \mathbf{p}_m(\mathbf{r}_{mg}^0), \Phi_m(\mathbf{r}_{mg}^0)$ — амплитудная, поляризационная и фазовая диаграммы направленности, $\mathbf{r}_{m0}^0$ — единичный вектор в направлении максимума амплитудной диаграммы направленности антенны измерителя ЭМП.

С учетом того, что напряжение на входе антенны генератора ЭМП U_g связано с током I_g и сопротивлением антенны Z_g соотношением $U_g = I_g Z_g$, подставив (2) в (3), получим

$$K_U = K \exp\left[i\left(\Phi_{K_0} - kr_{gm}\right)\right], \quad (4)$$

где $K = \frac{kW_0|Z_m|}{4\pi r_{gm}|Z_g||Z_{am}+Z_m|} f_g(\mathbf{r}_{gm}^0) f_m(\mathbf{r}_{mg}^0) |\mathbf{p}_g(\mathbf{r}_{gm}^0) \mathbf{p}_m(\mathbf{r}_{mg}^0)| \times \times |L_g| |L_m|$; $\mathbf{r}_{mg}^0 = -\mathbf{r}_{gm}^0$; $\Phi_{K_0} = \pi/2 + \Phi_g(\mathbf{r}_{gm}^0) - \Phi_g(\mathbf{r}_{g0}^0) + \Phi_m(\mathbf{r}_{mg}^0) - \Phi_m(\mathbf{r}_{m0}^0) + \Phi_{L_g} + \Phi_{L_m} + \Phi_{Z_m} - \Phi_{Z_g} - \Phi_{\Sigma Z} + \Phi_p$; $\Phi_{L_g}, \Phi_{L_m}, \Phi_{Z_m}, \Phi_{Z_g}, \Phi_{\Sigma Z}, \Phi_p$ — аргументы комплексных величин $L_g, L_m, Z_m, Z_g, (Z_{am} + Z_m), \mathbf{p}_g(\mathbf{r}_{gm}^0), \mathbf{p}_m(\mathbf{r}_{mg}^0)$, соответственно.

Из сравнения (4) с (1) находим

$$kr_{gm} = \Phi_{K_0} + \Phi_{U_g} - \Phi_{U_m}, \quad (5)$$

откуда расстояние между электрическими центрами антенн

$$r_{gm} = \lambda (\Phi_{K_0} + \Phi_{U_g} - \Phi_{U_m}) / (2\pi),$$

где λ — длина волны.

После замены $k = \omega/c$, где $c^{-1} = \sqrt{\epsilon\mu}$ — скорость света, ϵ, μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, в которой распространяется электромагнитная волна, запишем (5) в виде

$$\omega r_{gm} = (\Phi_{K_0} + \Phi_{U_g} - \Phi_{U_m}) c. \quad (6)$$

Дифференцируя (6) по ω , получаем еще одну формулу измерения расстояния:

$$r_{gm} = (d\Phi_{K_0}/d\omega + d\Phi_{U_g}/d\omega - d\Phi_{U_m}/d\omega) c \quad \text{или} \quad r_{gm} = (T_{U_{gm}} - T_{K_0}) c, \quad (7)$$

где $T_{U_{gm}} = -(d\Phi_{U_m}/d\omega - d\Phi_{U_g}/d\omega)$ — групповое время запаздывания (ГВЗ) при распространении радиосигнала от выходного сечения антенны генератора ЭМП до входного сечения измерителя; $T_{K_0} = -d\Phi_{K_0}/d\omega$ — сумма ГВЗ при распространении радиосигнала от входного сечения до электрического центра антенны генератора и ГВЗ при распространении радиосигнала от электрического центра до выходного сечения антенны измерителя.

Таким образом, приведенные формулы описывают два способа измерений расстояния между электрическими центрами антенн: измерения разности фаз и ГВЗ. В первом случае измеряемой величиной является разность фаз

$\Phi_{U_g} - \Phi_{U_m}$, а во втором случае — ГВЗ $T_{U_{gm}}$. Параметры системы Φ_{K_0} и T_{K_0} вычисляются через характеристики системы, не зависящие от измеряемого расстояния. Отметим, что Φ_{K_0} выражается через известные параметры антенн (действующую длину, сопротивление антенны, поляризационную и фазовую характеристики) и входное сопротивление приемника. Никаких новых параметров для антенн вводить не потребовалось. Все эти параметры не зависят от расстояния между электрическими центрами антенн, и их можно

разделить на две группы: параметры $\Phi_g(\mathbf{r}_{gm}^0) - \Phi_g(\mathbf{r}_{g0}^0), \Phi_m(\mathbf{r}_{mg}^0) - \Phi_m(\mathbf{r}_{m0}^0), \Phi_p$ в общем случае обусловлены взаимной ориентацией антенн, а параметры $\Phi_{L_g}, \Phi_{L_m}, \Phi_{Z_m}, \Phi_{Z_g}, \Phi_{\Sigma Z}$ зависят только от частоты.

Полученные формулы по существу определяют номенклатуру нормируемых параметров антенн ГНСС и являются основой для оценки составляющих погрешности результата измерения расстояния между электрическими центрами антенн. Из них также следуют рекомендации, которым должны соответствовать антенны с линиями передачи для повышения точности измерений. Например, фазовые и поляризационные диаграммы антенны должны слабо зависеть

от угловых переменных, кабели линии передачи должны быть фазостабильными и т. д.

Таким образом, электрические центры антенн определены как точки, относительно которых измеряли диаграммы направленности антенн. Приведем некоторые рекомендации по их выбору с учетом специфических особенностей антенн.

Вернемся к формуле (2). Наиболее простой фазовой характеристикой антенны является постоянная функция

$$\Phi_g(\mathbf{r}_{gm}^0) - \Phi_g(\mathbf{r}_{g0}^0) = \Phi(\theta, \varphi) = \Phi_0 \pm \pi, \text{ где } \Phi_0 \text{ — константа. В этом}$$

случае поверхности равной фазы имеют вид сфер. Для них можно ввести понятие «фазового центра» антенны, который в сферической системе координат (r, θ, φ) совпадает с ее началом в точке O_g . Если же функция $\Phi(\theta, \varphi)$ непостоянна, то возможно антенна имеет фазовый центр, не совпадающий с началом координат, или антенна вообще не имеет фазового центра. В обоих случаях удастся упростить вид фазовой характеристики путем надлежащего переноса начала координат.

Когда антенна не имеет настоящего фазового центра, то вводится понятие «частичный фазовый центр», под которым понимается центр кривизны поверхности равных фаз для выбранного направления в точку наблюдения θ, φ [3]. Фактически это центр сферы, соприкасающейся с поверхностью равных фаз в точке, определяемой направлениями θ, φ .

Антенны, используемые в ГНСС, можно разделить на две большие группы: спутниковые и антенны НАП. Они отличаются требованиями к диапазонам углов. Спутниковые антенны должны создавать навигационное поле в пределах телесного угла 40° , а антенны НАП предназначены для измерений навигационных параметров и определения местоположения в пределах 170° .

Спутниковые антенны сконструированы таким образом, что фазовая характеристика в пределах рабочих углов почти постоянна, и поэтому антеннам такого типа можно вполне обоснованно приписать фазовый центр, относительно которого измерять диаграммы направленности. В этом случае электрический и фазовый центры антенны будут совмещены. С точки зрения обеспечения единства измерений, ситуацию со спутниковыми антеннами также можно считать вполне благополучной, так как их производит одна фирма. Поэтому при соблюдении технологии и методики измерений должна гарантироваться однозначность определения фазового центра.

Иначе обстоят дела с антеннами НАП. В рабочем диапазоне углов их фазовая характеристика может заметно меняться, т. е. будут изменяться положения частичных фазовых центров относительно начала системы координат, связанной с конструкцией антенны. Тем не менее, для таких антенн можно указать точку, относительно которой поверхность равных фаз меньше всего отклоняется от сферической, а фазовая характеристика наиболее близка к постоянной. Согласно [3] для нахождения такой точки среднее квадратическое отклонение фазовой характеристики $\Phi(\theta, \varphi)$ исследуемой антенны от эталонной фазовой характеристики Φ_0 представляют в виде функционала с варьируемыми параметрами x_0, y_0, z_0, ρ , которые находят из условия его минимума:

$$\delta^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi [\Phi(\theta, \varphi) - \Phi_0]^2 F^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (8)$$

Точку, полученную из (8), определяют как O_m — электрический центр антенны измерителя. В этом случае электрический центр будет совпадать с частичным фазовым центром.

В таком выборе существует определенный физический смысл. Фазовый центр иногда называют «центром излучения», подразумевая, что по законам геометрической оптики он определяет начало сферической волны радиочастотного сигнала, которая распространяется в пространстве со скоростью, определяемой параметрами среды.

Отклонение фазовой диаграммы от постоянного значения, пересчитанное в длину, которое в зарубежной литературе принято называть «вариацией фазового центра» (phase center variations, PCV), находят по формуле

$$PCV = \lambda(\Phi(\theta, \varphi) - \Phi_0)/(2\pi). \quad (9)$$

Выражение (9) для оценки отклонения положений частичных фазовых центров от электрического центра также можно использовать и при необходимости введения угловых поправок. Значение PCV зависит от конструкции антенны и диапазона задаваемых углов.

Радиочастотный сигнал имеется не только в пространстве, но и в электрической цепи антенны, заканчивающейся выходным разъемом. Поэтому существует запаздывание сигнала между электрическим центром и сечением выходного разъема. Если для измерения расстояния пользоваться формулой (7), то эту характеристику антенны НАП также необходимо определять и нормировать.

Так как количество используемых в ГНСС антенн НАП несоизмеримо больше, чем спутниковых антенн, и их производят разные фирмы, то для соблюдения единства измерений положение электрического центра требуется нормировать в системе координат, связанной с конструкцией антенны, и относительно него измерять фазовую характеристику и ГВЗ каждого типа антенн НАП. Характеристики НАП следует определять в условиях, максимально приближенных к условиям свободного пространства с помощью амплифазометрической установки с оценкой точности измеряемого параметра. Требования к оборудованию, средствам и условиям измерений изложены в стандарте [4], разработанном во ВНИИФТРИ.

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ Р 52928—2000.** Система спутниковая навигационная глобальная. Термины и определения.
2. **ГОСТ Р 52865—2009.** Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний.
3. **Марков Г. Т., Сазонов Д. М.** Антенны. М.: Энергия, 1975.
4. **ГОСТ Р 8.773—2011.** ГСИ. Антенны навигационной аппаратуры потребителей глобальной навигационной спутниковой системы. Нормируемые электрические параметры и методы их измерений.

Дата принятия 10.11.2014 г.