

Групповое время запаздывания сигнала в тонкой биконической антенне

В. А. ТИЩЕНКО, Н. Р. БАЖЕНОВ

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

Для оценки задержки в антеннах дипольного типа рассчитаны фазочастотные характеристики тонкой биконической антенны. На их основе получено аналитическое выражение, определяющее групповое время запаздывания через параметры антенны.

Ключевые слова: групповое время запаздывания, биконическая антенна.

To assess the delays of the dipole type antenna the phase-frequency characteristics of thin biconical antenna have been calculated. The analytical expression determining the group delay time (group delay) through the antenna parameters has been obtained.

Key words: group delay time (group delay), biconical antenna.

В антеннах, являющихся неотъемлемой частью радиолинии, при распространении сигнала происходит его задержка в области рабочих частот. В глобальных навигационных системах по времени задержки распространения радиочастотного сигнала находят координаты потребителя глобальных навигационных спутниковых систем. Необходимость учета задержки в антеннах связана с требованиями по повышению точности определения координат потребителя. Задержка сигнала в 1 нс соответствует изменению расстояния на 0,33 м.

Предметом данной статьи является определение фазочастотных характеристик тонкой биконической антенны, на основе которых получено аналитическое выражение, определяющее групповое время запаздывания (ГВЗ) через параметры антенны.

Антенну, не содержащую активных элементов, можно использовать в режиме как генерации, так и измерения. В режиме измерения в эквивалентную схему антенны дополнительно войдет сопротивление нагрузки, поэтому для простоты рассмотрим антенну в режиме генерации. Согласно [1] комплексная амплитуда напряженности электрического поля (НЭП) в дальней зоне при временной зависимости $\exp(i\omega t)$, где ω — круговая частота, t — время, определяется по формуле

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{ikW_0L_aI_a}{4\pi r} f(\mathbf{r}^0) \mathbf{p}(\mathbf{r}^0) \exp\{-i[kr - \Phi(\mathbf{r}^0)]\},$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны; $W_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ — волновое сопротивление свободного пространства; ϵ_0 , μ_0 — электрическая и магнитная постоянные; L_a — действующая длина антенны; I_a — ток на входе антенны; $r = |\mathbf{r}|$; $\mathbf{r}$ — радиус-вектор, соединяющий электрический центр антенны с точкой наблюдения; $f(\mathbf{r}^0)$, $\mathbf{p}(\mathbf{r}^0)$, $\Phi(\mathbf{r}^0)$ — нормированные амплитудная, поляризованная и фазовая диаграммы направленности (ДН); $\mathbf{r}^0$ — единичный вектор, направленный на главный максимум амплитудной ДН, $\mathbf{r}^0 = \mathbf{r}/r$.

В сферической системе координат, ось Z которой совпадает с осью тонкой биконической антенны, а начало координат — с геометрическим центром антенны, напряженность поля в направлении максимума ДН представляется в виде

$$E_\vartheta = \frac{kW_0L_a|U_a|}{4\pi r|Z_a|} \exp[i(-kr + \Phi_{L_a} + \Phi_{U_a} - \Phi_{Z_a} + \pi/2)], \quad (1)$$

где ток на входе антенны выражен через напряжение U_a на ее входе и входной импеданс Z_a , т. е. $I_a = U_a/Z_a$.

Из (1) следует, что разность фаз между E_ϑ и напряжением на входе антенны определяется формулой

$$\Delta\Phi = -kr + \pi/2 + \Phi_{L_a} - \Phi_{Z_a} = -kr + \Delta\Phi_a. \quad (2)$$

Величина $\Delta\Phi$, которую можно назвать фазовой задержкой, состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое не зависит от свойств антенны и определяется расстоянием до точки наблюдения от электрического центра антенны, совпадающего для биконической антенны с геометрическим. Его можно трактовать как набег фазы при распространении сферической волны от электрического центра. Второе слагаемое зависит только от свойств антенны.

Приведенные выше формулы относятся к случаю, когда на вход антенны подается гармонический сигнал. Рассмотрим случай, когда на вход антенны поступает узкополосный сигнал. Тогда НЭП в дальней зоне будет также узкополосным сигналом с той же самой огибающей, но сдвинутой на время задержки T , равное ГВЗ, которое определяется по формуле

$$T = -d\Delta\Phi/d\omega. \quad (3)$$

Подставив (2) в (3), получим

$$T = d(kr)/d\omega + T_a,$$

где $T_a = -d(\Phi_{L_a} - \Phi_{Z_a})/d\omega$ — ГВЗ сигнала в антенне.

В случае резонансной тонкой биконической антенны для временной задержки T_a можно получить приближенные формулы. Согласно [2] входное сопротивление и действующая

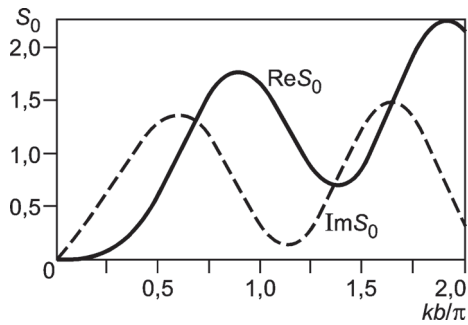


Рис. 1. Значения действительной и мнимой частей ряда Щелкунова

щая длина тонкой биконической антенны определяются по формулам

$$Z_a = -i \frac{\Omega W_0}{\pi} \times$$

$$\times \left[\cos kb + i \frac{S_0(kb)}{\Omega} \sin kb \right] \left[\sin kb - i \frac{S_0(kb)}{\Omega} \cos kb \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$L_a \approx \frac{2}{k} \left\{ (1 - \cos kb) - \frac{i}{\Omega} \left[S_0(kb) \sin kb - \int_0^{kb} S_0(x) dx \right] \right\} \times \\ \times \left[\sin kb - i \frac{S_0(kb)}{\Omega} \cos kb \right]^{-1},$$

где $S_0(x)$ — ряд Щелкунова, выражающийся через интегральные синусы и косинусы, график которого приведен на рис. 1; $\Omega = \ln[\cotg(\vartheta_0/2)]$; ϑ_0 , b — угол раствора и длина образующей конуса биконической антенны.

Преобразуем (4), выделив в явном виде действительную и мнимую части Z_a :

$$\text{Re} Z_a = \frac{\Omega^2 W_0}{\pi} \frac{\text{Re} S_0}{(\text{Re} S_0)^2 \cos^2 kb + (\Omega \sin kb + \text{Im} S_0 \cos kb)^2}; \quad (5)$$

$$\text{Im} Z_a = -\frac{\Omega W_0}{\pi} \frac{0,5(\Omega^2 - |S_0|^2) \sin 2kb + \Omega \text{Im} S_0 \cos 2kb}{(\text{Re} S_0)^2 \cos^2 kb + (\Omega \sin kb + \text{Im} S_0 \cos kb)^2}. \quad (6)$$

Используя соотношение $\Phi_{Z_a} = \arctg(\text{Im} Z_a / \text{Re} Z_a)$ из (5), (6), определим фазовую функцию Z_a :

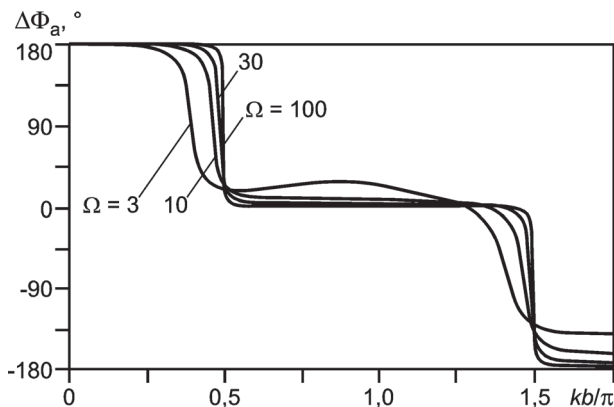


Рис. 2. Фазовая задержка в антенне в зависимости от безразмерной длины конуса для различных значений параметра Ω

$$\Phi_{Z_a} = -\arctg\{\Omega \times$$

$$\times [0,5(1 - |S_0|^2 / \Omega^2) \sin 2kb + \Omega^{-1} \text{Im} S_0 \cos 2kb] / \text{Re} S_0\}.$$

Аналогично определяется фазовая функция действующей длины Φ_{L_a} . График фазовой задержки в антенне $\Delta\Phi_a$ приведен на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что $\Delta\Phi_a$ на интервалах между резонансными длинами $kb_m = \pi/2 + m\pi$, где $m = 0, 1, 2, \dots$, практически постоянна. Поэтому ГВЗ в этих областях близко к нулю. Наоборот, вблизи резонансных длин $\Delta\Phi_a$ резко меняется и соответственно ГВЗ растет. При $\Omega^{-1} \ll 1$ находим

$$\Phi_{L_a} \approx \arctg \frac{\text{Re} G \sin kb - \text{Re} S_0(1 - \cos kb)}{\Omega(1 - \cos kb) \sin kb};$$

$$\Phi_{Z_a} \approx -\arctg \frac{\Omega \sin 2kb}{2 \text{Re} S_0}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что основной вклад в T_a даст $d\Phi_{Z_a}/d\omega$, тогда как относительный вклад $d\Phi_{L_a}/d\omega$ имеет порядок Ω^{-2} , откуда

$$T_a \approx T_{Z_a} = -d\Phi_{Z_a}/d\omega = -(b/c) d\Phi_{Z_a}/d(kb), \quad (8)$$

где c — скорость света.

Вблизи резонансных длин антенны $b = b_m$ для тонкой биконической антенны при $\Omega \gg 1$ из (8) получаем приближенную формулу для ГВЗ антенны в направлении главного максимума:

$$T_a \approx b_m \Omega / \{c \text{Re}[S_0(kb_m)]\}, \quad (9)$$

где $\text{Re}[S_0(kb_m)]$ определяется из рис. 1.

Для получения ГВЗ в наносекундах представим (9) в виде

$$T_a \approx kb_m \Omega / \{2\pi f \text{Re}[S_0(kb_m)]\},$$

где частота f выражена в гигагерцах.

На одной из рабочих частот ГЛОНАСС $L1 = 1,2$ ГГц при $\Omega = 10$ для первого резонанса антенны ГВЗ составит 3,4 нс, для второго — 10 нс.

Таким образом, на основе выражений для действующей длины и сопротивления тонкой биконической антенны рассчитаны ее фазочастотные характеристики в режиме излучения, из которых следует, что задержка сигнала происходит на частотах, соответствующих резонансным длинам антенны. Получено аналитическое выражение для оценки ГВЗ антенны вблизи резонанса, которое отвечает ее физическому представлению в качестве резонансного контура с добротностью, пропорциональной параметру Ω .

Л и т е р а т у р а

1. Тищенко В. А., Токатлы В. И., Колотыгин С. А., Лукьянов В. И. Уравнение измерения для метода двух (трех) антенн любого типа // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 33—36.

2. Тищенко В. А., Токатлы В. И., Лукьянов В. И. Поля и токи тонкой биконической антенны. Параметры и токи антенны в режиме измерения // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 55—58.

Дата принятия 07.04.2015 г.