

УДК 621.396.67

Преобразование спектральных характеристик широкополосного сигнала, излученного симметричной вибраторной антенной

А. И. Астайкин, В. Б. Профе, К. В. Троцюк, А. П. Мартынов
Российский Федеральный ядерный центр – ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

На основе общеизвестных выражений для симметричной вибраторной антенны рассмотрено искажение стационарного широкополосного сигнала с равномерным энергетическим спектром. Приведены результаты расчета входного сопротивления и парциальных диаграмм направленности симметричного вибратора, амплитудный и фазовый спектры поля в точке приема.

Определение характеристик широкополосных сигналов, прошедших через антенно-фидерные тракты, изучено недостаточно хорошо. При работе с широкополосными сигналами следует отказаться от использования понятия диаграммы направленности ввиду его малой информативности. Наиболее полную информацию о сигнале можно получить из пространственных амплитудного и фазового спектров, а также из пространственно-временных характеристик сигнала.

Постановка задачи и методика расчета

Пусть сигнал с энергетическим спектром, равномерным в некоторой полосе частот, снимается с генератора, согласованного с фидером. Первое искажение спектра происходит в точке соединения антенны с фидером. Если волновое сопротивление фидера Z_F , то мощность, прошедшая в антенну (за счет падающей волны), определяется выражением:

$$P_a(f_i) = P(f_i) \left(1 - \left| \frac{Z_a(f_i) - Z_F}{Z_a(f_i) + Z_F} \right|^2 \right), \quad (1)$$

где входное сопротивление антенны $Z_a(f_i) = Z_m(f_i) e_i^{\varphi(f)}$ и f_i – частота, модуль сопротивления равен $Z_m^2(f_i) = R_a^2(f_i) + X_a^2(f_i)$.

Приведем известные выражения для относительно тонких симметричных вибраторов

$$R_a(f_i) = \frac{R_S}{\left[\sin^2 kL + (R_S / \rho)^2 \cos^2 kL \right]};$$

$$X_a(f_i) = -\frac{\rho}{2} \frac{\left[1 - (R_S / \rho)^2 \sin 2kL \right]}{\left[\sin^2 kL + (R_S / \rho)^2 \cos^2 kL \right]};$$

$$\rho = 120 \left(\ln \frac{2L}{a} - 1 \right);$$

$$R_S = 30 [(Si4kL - 2Si2kL)\sin 2kL + (C + \ln kL + Ci4kL - 2Ci2kL)\cos 2kL + 2(C + \ln 2kL - Ci2kL),$$

где Si и Ci — интегральный синус и косинус, соответственно;

L — длина одного плеча вибратора;

a — радиус вибратора, $k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$.

Амплитуда составляющей тока определяется выражением:

$$I_a(f_i) = \sqrt{\frac{P_a(f_i)}{Z_m(f_i)}}, \quad (2)$$

а фаза составляющей тока: $\varphi_I(f_i) = \varphi(f_i) - 1/2 \arctan(X_a(f_i) / R_a(f_i))$.

Следующее искажение возникает из-за различного набега фазы $\varphi_I(f_i) = \varphi_I(f_i) + k_i L$ и различных диаграмм направленности для волн с разными волновыми числами. Диаграмма направленности для фиксированного значения $k_i L$ определяется выражением:

$$E = \frac{60I \cos(kL \cos \vartheta) - \cos kL}{r \sin \vartheta}. \quad (3)$$

Учитывая (1), (2) и (3), определим напряженность поля в точке приема

$$E(Z_F, Z_a, f, \vartheta) = \sqrt{\frac{P(f_i) \left[1 - \left(\frac{Z_f - Z_a}{Z_j + Z_a} \right)^2 \right]}{Z_m(f_i)}} \times \frac{60I \cos(kL \cos \vartheta) - \cos kL}{r \sin \vartheta} e^{-i(kL + 1/2 \arctan(X_a/R_a))}.$$

Оптимально решить задачу можно численным методом. Разобьем спектр сигнала на большое количество участков, в пределах одного участка частоту можно считать постоянной. Рассчитав изменение амплитуды и фазы для каждой линии спектра в точке приема, можно определить полный спектр сигнала в этой точке. После того как найдены спектральные характеристики сигнала, можно восстановить сигнал и определить временные характеристики сигнала численным методом.

Результаты расчета

По вышеизложенной методике были проведены численные расчеты парциальных диаграмм направленности, пространственных амплитудного и фазового спектров в меридиональной плоскости для симметричного вибратора. Угол оси вибратора $\vartheta = 0^\circ$. Волновое сопротивление фидера 75 Ом. Нормировочная частота 0,5 с/2L. На рис. 1 представлена зависимость активной и реактивной частей входного сопротивления фидера от нормированной частоты. На рис. 2 представлена фазовая характеристика сигнала на входе антенны.

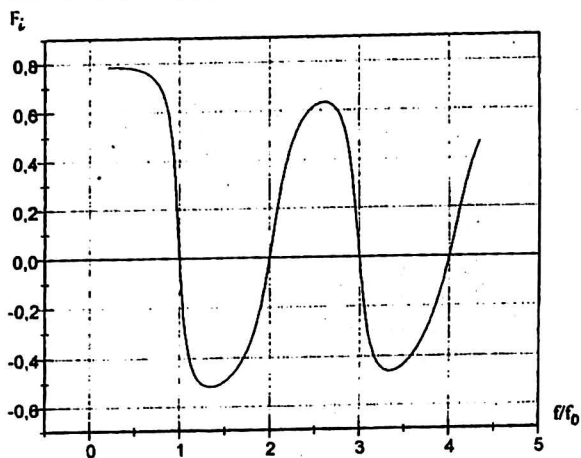


Рис. 1. Зависимость активной и реактивной частей входного сопротивления фидера от нормированной частоты

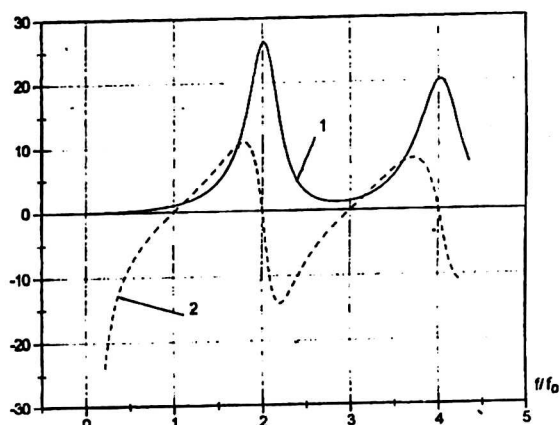


Рис. 2. Фазовая характеристика сигнала на входе антенны:
1 — R_n/Z_f , 2 — X_n/Z_f

Парциальные диаграммы направленности при различных отношениях L/λ показаны на рис. 3, а пространственный амплитудный спектр сигнала — на рис. 4.

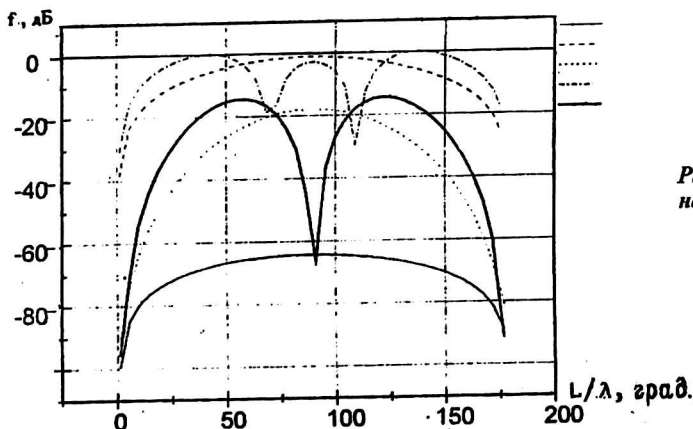


Рис. 3. Парциальные диаграммы направленности при различных отношениях L/λ

На рис. 5 показаны сечения амплитудного спектра для углов излучения $\theta = 10^\circ, 45^\circ$ и 90° . При условии решения задачи согласования вибратора на $f/f_0 \approx 2$ из результатов анализа пространственного спектра и его сечений следует, что максимально возможная ширина спектра, излученного вибратором, — $f/f_0 \approx 0,9 \div 2,5$. Увеличивать ширину спектра больше $f/f_0 \approx 0,9 \div 2,5$ не следует, так как в определенных направлениях отсутствуют некоторые спектральные составляющие, что может привести к потере информации.

Рис. 4. Пространственный амплитудный спектр сигнала

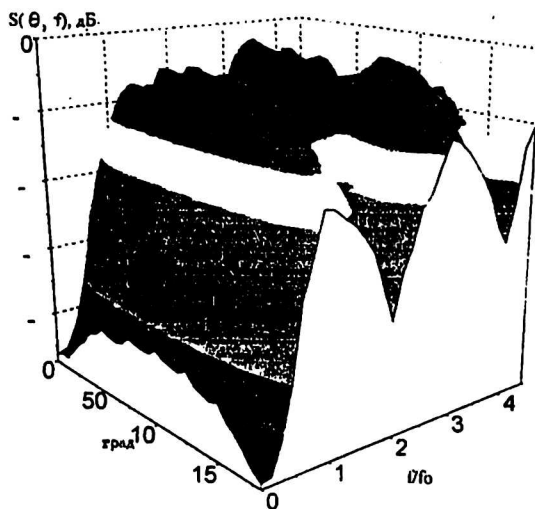
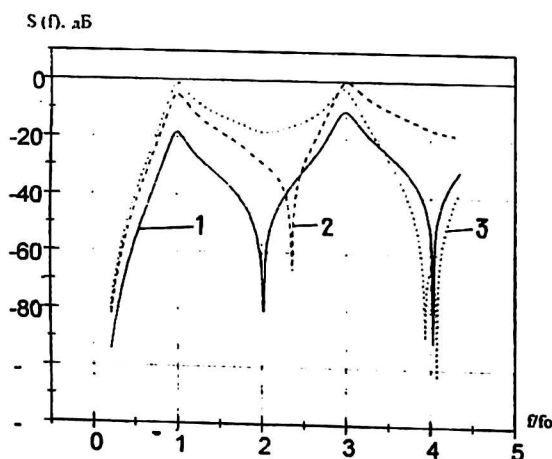


Рис. 5. Сечения амплитудного спектра для различных углов излучения θ :
1 - $\theta = 10^\circ$; 2 - 45° ; 3 - 90°



Выводы

Предложенная методика определения искажений спектра сигнала применима для любых излучателей с известными характеристиками направленности и входного сопротивления в полосе частот сигнала.

Получены зависимости трансформации спектра сигнала, излученного симметричным вибратором в зависимости от входного сопротивления излучателя и пространственного расположения точек приема. Получены зависимости искаженных амплитудного и фазового спектров сигнала и их "сечения". После определения искаженного спектра сигнала, последний можно восстановить и определить его пространственно-временные характеристики. По полученным результатам можно корректировать АЧХ и ФЧХ выходных каскадов широкополосной передающей аппаратуры для наименьшего искажения сигнала в точке приема. Предложенная методика и полученные результаты верны, если длительность сигнала не слишком мала ($dt \cdot c \gg L$). Для коротких импульсов или широкополосных сигналов следует коренным образом пересматривать теорию излучения.

Transformation of spectral characteristics of broadband signals influence by vibrator antenna

A. I. Astaikin, V. B. Profe, K. V. Trotsuk, A. P. Martynov
Russian Federal Nuclear Center – RSRI of Experimental Physics, Sarov, Russia

On the base of all known formulas for vibrator antenna transformation of stationary broadband signal with one level energy spectrum are considered. There are results of accounting of input impedance and partial diagram of vibrator antenna, amplitude and phase spectrum of electromagnetic field in far zone.