

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ СИСТЕМ

к.т.н. В.А. Губарь, И.И. Литвинчук, К.П. Нестеров  
(представил д.т.н., проф. В.И. Замятин)

Рассматривается методика измерения характеристик антенных систем с использованием сверхширокополосных импульсных сигналов, а также приводятся результаты математического моделирования.

В настоящее время всё большую актуальность приобретают работы, связанные с метрологическим обеспечением антенных систем сложных радиотехнических комплексов. Это обусловлено тем, что в настоящее время основные области использования радиоэлектроники невозможны без применения антенн с разными характеристиками. В процессе развития теории и техники антенно - фидерные устройства стали более сложными, появились принципиально новые их классы, расширились функции, которые они выполняют.

Для определения характеристик антенных систем применяют две большие группы методов: методы, основанные на измерении и обработке амплитудно-фазового распределения (АФР) электромагнитного поля в дальней зоне исследуемой антенны, и методы, основанные на измерении и обработке АФР ближнего поля исследуемой антенны. Эти группы методов измерений предполагают использование гармонических сигналов. Для определения параметров антенны на каждой частоте необходимо производить отдельный цикл измерений значений АФР поля в ближней или дальней зоне и затем производить их обработку. Вследствие этого контроль характеристик антенных систем обладает низкой оперативностью.

В настоящее время одним из перспективных направлений является разработка радиолокационных станций (РЛС), в которых используются сверхширокополосные (СШП) импульсные сигналы. Поэтому возникает необходимость разработки новых методов измерения параметров антенных систем, основанных на использовании СШП импульсных сигналов.

Задача определения динамических характеристик антенн с использованием СШП сигналов сводится к решению задачи идентификации динамической системы или объекта. Выражение, описывающее реакцию

напряжённости поля  $\mathbf{E}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{r})$  в дальней зоне исследуемой антенны, имеет вид

$$\mathbf{E}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{H}(\mathbf{t} - \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{r}) \cdot \mathbf{S}(\boldsymbol{\tau}) \, d\boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{S}(\boldsymbol{\tau})$  – входной сигнал;  $\mathbf{H}(\mathbf{t} - \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{r})$  – пространственно-временная импульсная переходная функция.

Перейдя к комплексным амплитудам, можно определить частотную характеристику антенны  $\dot{\mathbf{H}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{r})$  как отношение комплексной амплитуды вектора излучённого поля  $\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{r})$  к комплексной амплитуде входного сигнала антенны  $\dot{\mathbf{S}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega})$

$$\dot{\mathbf{H}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{r}) = \frac{\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{r})}{\dot{\mathbf{S}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega})}. \quad (2)$$

Определив частотные характеристики антенны для различных угловых ориентаций  $\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}$  и постоянной дальности  $r$ , можно построить совокупность диаграмм направленности антенны в заданном диапазоне частот.

Частотную характеристику антенны можно представить в виде двух составляющих [1]: частотной характеристики потребления антенны  $\dot{\mathbf{H}}_{\text{п}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega})$  и частотной характеристики излучения антенны

$$\dot{\mathbf{H}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{r}) = \dot{\mathbf{H}}_{\text{п}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega}) \cdot \dot{\mathbf{H}}_{\text{и}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{r}). \quad (3)$$

Как показано в [1], частотная характеристика потребления антенны определяется её входным сопротивлением  $\dot{\mathbf{Z}}_{\text{а}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega})$  и входным сопротивлением питающего фидера  $\rho_{\text{ф}}$

$$\dot{\mathbf{H}}_{\text{п}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega}) = \frac{2 \cdot \sqrt{\mathbf{R}_{\text{а}}(\boldsymbol{\omega}) \cdot \rho_{\text{ф}}}}{\rho_{\text{ф}} + \dot{\mathbf{Z}}_{\text{а}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega})}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{R}_{\text{а}}(\boldsymbol{\omega}) = \text{Re}\{\dot{\mathbf{Z}}_{\text{а}}(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega})\}$ .

Частотная характеристика излучения антенны выражает зависимость напряжённости электромагнитного поля от частоты в рассматриваемой точке пространства. Она может быть представлена в виде последовательного соединения двух четырёхполюсников. Первый четырёхполюсник описывает задержку и затухание излучённого сигнала и является как бы моделью свободного пространства, а второй выражает

направленные и дифференцирующие свойства антенны. Итак, в качестве модели, описывающей динамические характеристики антенны, можно принять последовательное соединение фильтров с частотными характеристиками:

$\dot{W}(j\omega) = \dot{H}_n(j\omega)$  — частотная характеристика потребления антенны;

$\dot{F}(j\omega, \theta, \varphi, r) = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r} \cdot \dot{f}(j\omega, \theta, \varphi)$  — частотная характеристика, выражающая направленные свойства антенны;

$\dot{N}(j\omega) = j\omega$  — частотная характеристика, описывающая дифференцирующие свойства антенны, где  $\dot{f}(j\omega, \theta, \varphi)$  — нормированная диаграмма направленности (ДН);  $P$  — значение ненормированной ДН в направлении максимума излучения;  $c$  — скорость света в свободном пространстве;  $r$  — расстояние между зондом и антенной.

Сигнал, принимаемый зондом, можно представить в виде

$$\tilde{y}(t, \theta, \varphi) = y(t, \theta, \varphi) + e(t, \theta, \varphi), \quad (5)$$

где  $e(t, \theta, \varphi)$  — шумы измерений;  $y(t, \theta, \varphi)$  — истинное значение сигнала.

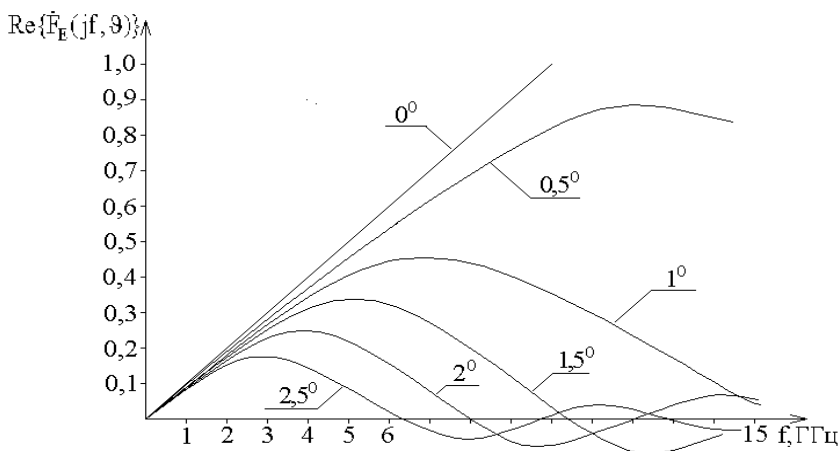
Так как для реальных сигналов значения амплитудно - частотных характеристик уменьшаются с увеличением частоты, то в области высоких частот они становятся соизмеримыми со значениями амплитудно-частотных спектров помех. Это приводит к возникновению неустойчивых решений в частотной области. Таким образом, в данной постановке задача идентификации некорректна. Среди известных методов, позволяющих решать некорректные задачи, наиболее удобен метод регуляризации А.Н. Тихонова [2], развитый применительно к современным динамическим системам в [3].

При оценке точности определения частотной характеристики оказывается, что существует некоторое оптимальное значение  $\alpha_0$  параметра регуляризации  $\alpha$ , при котором сумма среднего значения квадрата методической ошибки и дисперсии случайной составляющей ошибки оценивания достигает минимальной величины. Аналитическое определение величины  $\alpha_0$  представляет значительную трудность, так как требуется знание априорной информации об искомом решении. При практическом применении предложенного метода для определения  $\alpha_0$  используется метод невязки, который предусматривает минимизацию функционала качества [2].

Для качественной оценки эффективности определения параметров антенн методом, основанным на использовании СШП импульсных сигналов, проведено моделирование на ЭВМ процесса измерения парамет-

ров антенн. Решение получено для антенны типа параболоида вращения с облучателем в виде диполя Герца с плоским идеально проводящим экраном. Облучатель располагается в фокусе зеркала. Выражение для электрической составляющей поля антенны с выбранным видом облучателя в  $E$  – плоскости представлено в [4].

Результат расчёта нормированных частотных характеристик  $F_E(f, \vartheta)$  для различных значений  $\vartheta$ , где  $\vartheta$  – угол от оси антенны на точку наблюдения, приведён на рис.1. Таким образом, получено семейство зависимостей, характеризующих частотные свойства антенны в соответствии с её частотными характеристиками излучения в заданном



направлении.

Рис.1. Результат расчёта нормированных частотных характеристик

В качестве входного сигнала использовали импульсный сигнал, который описывается выражением

$$x(t) = A_x \cdot (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) \quad (6)$$

с параметрами  $\alpha = 6 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$ ,  $\beta = 4.8 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$  и  $A_x = 10 \text{ В}$ .

Наиболее часто [5] в качестве модели шумов измерения принимают случайную функцию с гауссовским законом распределения вероятности и корреляционной функцией

$$R(\tau) = \sigma^2 \cdot e^{-\eta|\tau|} \quad (7)$$

Этот случайный сигнал формируется на выходе фильтра с переда-

точной функцией  $\mathbf{K}(p) = \frac{\eta}{p + \eta}$ , на вход которого подаётся белый шум.

Случайный процесс на выходе фильтра суммировался с полезным сигналом после окончания переходного процесса фильтра. Величина отношения ( $q$ ) сигнала к шуму определялась как отношение средней мощности сигнала к дисперсии шумов.

Результаты вычисления дискретного спектра импульсной передаточной функции при  $\vartheta = 1^\circ$  без использования регуляризации представлены на рис.2 (график 1) и на рис.3 (график 1) для  $q = 1000$  и  $q = 100$  соответственно. Заметим, что наибольшие ошибки при оценке амплитудно-частотной характеристики возникают в высокочастотной области.

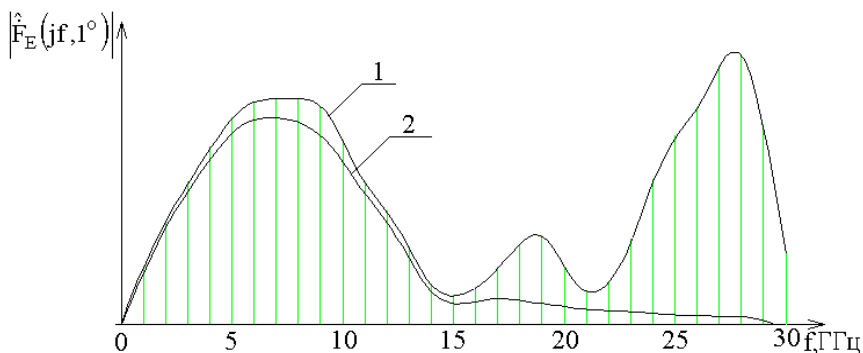


Рис.2. Дискретный спектр импульсной передаточной функции для  $q=1000$

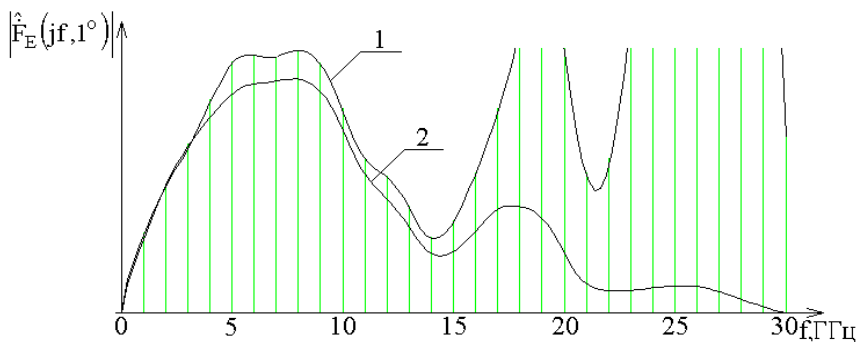


Рис.3. Дискретный спектр импульсной передаточной функции для  $q=100$

При использовании регуляризирующего алгоритма и величинах коэффициента регуляризации  $\alpha_0$ , близких к оптимальным, погрешность оценивания не превышает 0,51% при  $q=1000$  и 2,5% при  $q=100$ . Результаты расчёта в этом случае приведены на рис.2 (график 2) и на рис.3 (график 2).

Ошибка оценивания частотных характеристик рассчитывалась по формуле

$$\Delta_F = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \left[ \left| \dot{F}_0(k, \vartheta) \right| - \left| \hat{F}(k, \vartheta) \right| \right]^2}{\sum_{n=0}^{N-1} \left| \dot{F}_0(k, \vartheta) \right|^2}, \quad (8)$$

где  $\left| \dot{F}_0(k, \vartheta) \right|$  — истинное значение амплитудно-частотной характеристики;

$\left| \hat{F}(k, \vartheta) \right|$  — оцененное значение амплитудно-частотной характеристики.

Таким образом, результаты математического моделирования на ЭВМ процесса измерения параметров антенн с использованием СШП импульсных сигналов подтверждают эффективность оценки параметров антенн предложенным методом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. — М.: Радио и связь, 1989. — 192 с.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1986. — 288 с.
3. Бессонов А.А., Загашвили Ю.В., Маркелов А.С. Методы и средства идентификации динамических объектов. — Л.: Энергоатомиздат, 1989. — 280 с.
4. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот. — М.: Сов. радио, 1957. — 648 с.
5. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1971. — 206 с.