МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕИВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В ДАЛЬНЕЙ ЗОНЕ

Никонова Л.В.
2 Центральный Научно-Исследовательский Институт Минобороны России, Тверь.
email: nikonova_l@mail.ru

Рассматривается пространственное представление импульсной и частотной характеристик рассеивающих объектов. Предлагается дискретное представление данных характеристик, учитывающее дисперсионные свойства объектов, а также метод расчета дискретного представления радиолокационных характеристик при моделировании на ЭВМ широкополосных сигналов.

При расчетах, измерениях и моделировании излучаемых и рассеиваемых сигналов требуется дискретизация радиолокационных характеристик (РЛХ), т.е. представление их в виде набора чисел, например проекций на некоторую совокупность базисных функций. Обычно методы дискретизации вводятся эвристически и связаны с рядом ограничений, например – требование монохроматичности сигнала (метод парциальных диаграмм [1]) или несогласованность количества, амплитуд и координат рассеивающих центров в случае метода локальных источников [2, 3, 4, 5].

Поэтому представляет интерес дискретизация РЛХ при произвольных соотношениях размеров объекта, длины волны и ширины полосы сигналов. Такое дискретное представление для дальней зоны строится по совокупности частотной (временной) и пространственных переменных и основано на понятии пространственной импульсной характеристики объекта, представленном в докладе.

Рассеянное поле в дальней зоне характеризуется функцией передачи $\mathbf{H}(\omega,\mathbf{n})$, определяющей амплитуду, фазу и поляризацию рассеянной гармонической волны [6]. Функция передачи является преобразованием Фурье от вещественной функции – импульсного отклика $\mathbf{h}(\tau,\mathbf{n})$:

$$\mathbf{H}(\omega,\mathbf{n}) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{h}(\tau,\mathbf{n}) \exp[-i\omega\tau] d\tau.$$

Можно ограничиться сужением функции передачи на положительную полуось и рассматривать ее как функцию волнового вектора $\mathbf{k} = \dfrac{\omega}{c}\mathbf{n}$:

$$\widehat{\mathbf{H}}(\mathbf{k}) \triangleq \widetilde{\mathbf{H}}\left(|\mathbf{k}|c, \frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}|}\right)$$

на E^3 (3-мерном евклидовом пространстве). Функцию $\widehat{\mathbf{H}}(\mathbf{k})$ можно назвать пространственной частотной характеристикой. Преобразование Фурье пространственной частотной характеристики:

$$\hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \widehat{\mathbf{H}}(\mathbf{k}) \exp[i(\mathbf{k},\mathbf{x})] d^3\mathbf{k}$$

назовем пространственной импульсной характеристикой (здесь $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3) \in E^3$). Аналитический сигнал, рассеянный объектом, равен

$$\tilde{y}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\mathbf{h}}(\tau,\mathbf{n}) \tilde{x}(t-\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) \tilde{x}\left(t - \frac{(\mathbf{n},\mathbf{x})}{c}\right) d^3\mathbf{x},$$

а спектр его комплексной амплитуды

$$\tilde{Y}(\omega) = \widehat{\mathbf{H}}\left(\frac{\omega}{c}\mathbf{n}\right) \tilde{X}(\omega)$$

где $\tilde{x}(t)$ – комплексная амплитуда зондирующего сигнала; $\tilde{X}(\omega)$ – ее спектр.

Т.е. отраженный сигнал образуется в результате свертки комплексной амплитуды зондирующего сигнала, имеющего плоский фронт, ориентированный в направлении $\boldsymbol{n}$ относительно цели, с пространственной импульсной характеристикой. Другими словами, формирование сигнала происходит путем отражения зондирующего сигнала в каждой из точек $\boldsymbol{x}$ независимо, без переотражений и затенений. Поворот цели оставляет отраженный сигнал без изменения, а смещение цели приводит к изменению задержки отраженного сигнала. Это означает, что ПИХ и ПЧХ можно считать жестко связанными с целью и повторяющими за ней все ее движения.

Для использования пространственных характеристик при расчетах отраженного сигнала или хранения в ЭВМ необходима их дискретизация. Удобным, с точки зрения вычисления свертки, являются представления функций рядами Фурье и Котельникова – Шеннона [7].

Обычно размеры носителя функции $\hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x})$, т.е. области $V = \operatorname{supp} \hat{\mathbf{h}} \in E^3$, где функция существенно отлично от нуля, ограничены величиной $\mathfrak{L}$, сравнимой с геометрическими размерами рассеивающего объекта, а границы области пространственных частот – W, в пределах которой требуется знать пространственную частотную характеристику $\widehat{\mathbf{H}}(\mathbf{k})$, определяются максимальной частотой в спектре сигналов ω_M.

Если область V аппроксимировать параллелепипедом $\prod_{i=1}^{3} \otimes [-L_i, L_i]$, где $L_i \simeq \mathfrak{L}$, можно пространственную импульсную характеристику представить рядом Фурье

$$\hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) = \prod_{j=1}^{3} (2L_j)^{-1} \sum_{\mathbf{l}} \exp[i\pi \sum_{j=1}^{3} x_j l_j / L_j] \cdot A_{\mathbf{l}}$$

с $A_{\mathbf{l}} = \int_V \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) \exp[-i\pi \sum_{j=1}^{3} x_j l_j / L_j] d^3\mathbf{x}$, а пространственную частотную характеристику – рядом отсчетов:

$$\widehat{\mathbf{H}}(\mathbf{k}) = \sum_{\mathbf{l}} A_{\mathbf{l}} \prod_{j=0}^{3} \operatorname{sinc}\left(k_j - \frac{\pi l_j}{L_j}\right).$$

Здесь $\mathbf{l} = (l_1, l_2, l_3)$ - мультииндекс, а коэффициенты $A_{\mathbf{l}}$ являются отсчетами функции $\widehat{\mathbf{H}}(\mathbf{k})$ в точках $\mathbf{k}_{\mathbf{l}} = (l_1\pi / L_1, l_2\pi / L_2, l_3\pi / L_3)$.

Если наоборот область W считать параллелепипедом: $W = \prod_{i=1}^{3} \otimes[-K_i, K_i]$ с $K_i \simeq \omega_m / c = K$ и пространственную частотную характеристику разложить в ряд Фурье

$$\widehat{\mathbf{H}}(\mathbf{k}) = \prod_{j=0}^{3}\left(\frac{\pi}{K_j}\right) \sum_{\mathbf{m}} a_{\mathbf{m}} \exp[-i\pi \sum_{j=1}^{3} k_j m_j / K_j],$$

то пространственная импульсная характеристика будет выражаться рядом отсчетов

$$\hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{m}} a_{\mathbf{m}} \prod_{j=1}^{3} \operatorname{sinc}(x_j - \pi m_j / K_j),$$

где $\mathbf{m} = (m_1, m_2, m_3)$ - мультииндекс;

$$a_{\mathbf{m}} = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_W \widehat{\mathbf{H}}(\mathbf{k}) \exp[i\pi \sum_{j=1}^{3} k_j m_j / K_j] d^3\mathbf{k}.$$

Числа $a_{\mathbf{m}}$ являются значениями функции $\hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x})$ в точках $\mathbf{x}_{\mathbf{m}} = \left(\frac{m_1\pi}{K_1}, \frac{m_2\pi}{K_2}, \frac{m_3\pi}{K_3}\right)$.

Данное разложение можно интерпретировать как представление рассеивающего объекта в виде совокупности эталонных (точечных) отражателей или рассеивателей, расположенных в узлах 3-мерной прямоугольной решетки с шагом $\pi(K_i)^{-1}$ по каждому из направлений $i = 1, 2, 3$.

Для численного моделирования пространственной импульсной характеристики необходим расчет комплексной амплитуды рассеяния в частотной области, который был проведен с помощью программы NEC [8] для проводящей сферы, куба и самолета. По полученной амплитуде для этих объектов был вычислен пространственный импульсный отклик.

Амплитуда рассеяния была рассчитана при помощи численного решения интегральных уравнений для токов, индуцированных на поверхности объекта при падении на него электромагнитной волны. Рассеивающий объект представляется в виде конструкции, состоящей из проволочных сегментов и плоских граней. Распределение тока в объекте рассчитывается, исходя из совместного решения интегрального уравнения электрического поля и интегрального уравнения магнитного поля с учетом граничных условий. Полученные объединенные интегральные уравнения для точки $\boldsymbol{r}$ на поверхностях проводов имеют следующий вид:

$$-\hat{s} \cdot \boldsymbol{E}^I(r) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_L \boldsymbol{I}(s') \left(k^2 \hat{s} \cdot \hat{s}' - \frac{\partial^2}{\partial s \partial s'}\right) g(r, r') ds' - \frac{j\eta}{4\pi k} \int_{S_1} \boldsymbol{J}_S(r') \cdot \left[k^2 \hat{s} - \nabla' \frac{\partial}{\partial s}\right] g(r, r') dA'$$

и для $\boldsymbol{r}$ на поверхностях за исключением проводов:

$$\hat{t}_2(r)\cdot \boldsymbol{H}^I(r) = -\frac{1}{4\pi}\hat{t}_2(r)\cdot \int_L \boldsymbol{I}(s')(\hat{s}'\times\nabla' g(r,r'))ds'$$

$$-\frac{1}{2}\hat{t}_1(r)\cdot \boldsymbol{J}_S(r) - \frac{1}{4\pi}v.p.\int_{S_1}\hat{t}_2(r)\cdot\left[\boldsymbol{J}_S(r')\times\nabla' g(r,r')\right]dA',$$

и

$$-\hat{t}_1(r)\cdot \boldsymbol{H}^I(r) = \frac{1}{4\pi}\hat{t}_1(r)\cdot \int_L \boldsymbol{I}(s')(\hat{s}'\times\nabla' g(r,r'))ds'$$

$$-\frac{1}{2}\hat{t}_2(r)\cdot \boldsymbol{J}_S(r) + \frac{1}{4\pi}v.p.\int_{S_1}\hat{t}_1(r)\cdot\left[\boldsymbol{J}_S(r')\times\nabla' g(r,r')\right]dA',$$

где $k=\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$, $\eta=\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$, $g(r,r')=\exp(-jk|r-r'|)/|r-r'|$, $\boldsymbol{E}^I$ и $\boldsymbol{H}^I$ – внешнее падающее электрическое и магнитное поле соответственно, $\boldsymbol{s}$ – параметр расстояния вдоль оси проволоки в точке $\boldsymbol{r}$, $\hat{s}$ – единичный вектор, перпендикулярный оси проволоки в точке $\boldsymbol{r}$, $\boldsymbol{I}$ – нитевой ток в проволоке, $\boldsymbol{J}_S$ – ток на поверхности, $\int_L$ обозначает интегрирование по проволоке, $\int_{S_1}$ – интегрирование по поверхностям, за исключением проводов [9]. Полученные интегральные уравнения решаются численно с помощью модифицированного метода моментов. По вычисленному таким образом распределению тока в конструкции рассчитывается рассеянное объектом электромагнитное поле, т.е. комплексная амплитуда рассеяния в частотной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зелкин Е. Г., Соколов В. Г.** *Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решетки и антенны с.* М. : Сов. радио, 1980.

2. **Варганов, М. Е. и др.** *Радиолокационные характеристики летательных аппаратов.* [ред.] Л. Т. Тучков. М. : Радио и связь, 1985.

3. **Штагер, Е. А.** *Рассеяние радиоволн на телах сложной формы.* М. : Радио и связь, 1986.

4. **Астанин, Л. Ю. и Костылев, А. А.** *Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений.* М. : Радио и связь, 1989.

5. *Сборник научных трудов 3-го международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ'2008).* **Зубков, А. Н. и Косовцов, Ю. Н.** 2008. К вопросу использования понятия «блестящая точка» в практике радиолокации распределенных целей. Т. 1, Международная конференция "Современные и преспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации" (СРРСН-2008), Часть 1.

6. **Исимару, А.** *Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах: Пер. с англ.* М. : Мир, 1982. Т. 1, 2.

7. **Опенгейм, А. и Джонсон, Д.** Дискретное представление сигналов. *ТИИЭР.* 1972, Т. 60, 6, стр. 37.

8. **Molteno, T.C.A.** *nec2++.* Dunedin, New Zealand, 2005. available from http://www.physics.otago.ac.nz/research/electronics/nec.

9. **Burke, G.J. and Poggio, A.J.** *Numerical electromagnetics code (NEC) - method of moments.* Lawrence Livermore Laboratory, 1981. Part I.