

Комбинируя аддитивную границу (4) с общей границей Бхаттачария (15), получаем, наконец, границу для вероятности ошибки m -го диагноза

$$P_{E_m} \leq \sum_{m' \neq m} P_E(m \rightarrow m') = \sum_y \sum_{m' \neq m} \sqrt{P_N(y|x_{m'}) / P_N(y|x_m)}. \quad (16)$$

Изменение порядка суммирования всегда законно, поскольку сумма по m' берется по конечному множеству.

Литература: 1. С.Н. Бурдаков, А.П. Верещак, В.Е. Гурьев, С.А. Кривенко. Цифровая модель системы технической диагностики с аддитивным гауссовским шумом // Радиоэлектроника и информатика. 2000. № 3. С. 12-15.

Поступила в редколлегию 27.04.2000

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Пресняков И.Н.

Бурдаков Сергей Николаевич, начальник отдела АО НИИРИ. Адрес: Украина, 61054, Харьков, ул. Академика Павлова, 271, тел. 26-52-60.

Верещак Александр Петрович, канд. техн. наук, директор АО НИИРИ. Адрес: Украина, 61054, Харьков, ул. Академика Павлова, 271, тел. 26-52-00.

Гурьев Владимир Ефимович, начальник отдела АО НИИРИ. Адрес: Украина, 61054, Харьков, ул. Академика Павлова, 271, тел. 26-13-10.

Кривенко Станислав Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, начальник сектора АО НИИРИ. Научные интересы: радиотехнические системы технической диагностики. Адрес: Украина, 61054, Харьков, ул. Академика Павлова, 271, тел. 26-95-36.

УДК 621.396.96'06

ДВУМЕРНАЯ ВЗАИМОКОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ АКУСТИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СИГНАЛОВ РАДИОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

КАРТАШОВ В.М.

Вводится двумерная пространственно-частотная корреляционная функция, позволяющая сравнительно легко определять основные информационные характеристики систем зондирования атмосферы. Указываются различные формы представления функции.

Теория анализа и синтеза радиолокационных сигналов строится в предположении точечного характера цели. Всякие отличия формы и характеристик рассеивающего объекта от принятых предположений приводят к изменениям структуры и параметров рассеянного сигнала.

В акустических и радиоакустических системах (РАС) зондирования атмосферы рассеяние излученных волн происходит на распределенных в пространстве объектах [1,2]. В РАС используются зондирующие колебания различной физической природы - акустические и электромагнитные. При этом рассеивающий объект, создаваемый акустическим сигналом, не является точечным частотно-независимым отражателем и, следовательно, изменяет при рассеянии форму излучаемых электромагнитных колебаний. В соответствии с этим задача анализа (синтеза) зондирующих сигналов для радиоакустических систем зондирования атмосферы должна состоять в совместном анализе (оптимизации) характеристик двух взаимосвязанных видов сигналов - электромагнитного и акустического.

Совместная способность излученных акустического $S(r', t)$ и электромагнитного $E(r', t)$ сигналов к формированию рассеянной радиоволны определя-

ется их близостью как в пространстве, так и в области волновых чисел (здесь E и S - комплексные огибающие сигналов; r' - пространственная координата; t - время). Первое условие очевидно и всегда выполняется в некотором диапазоне дальностей, если радиосигнал излучается с некоторой задержкой во времени после излучения акустического сигнала, а направления излучения обеих волн совпадают. Второе условие известно как условие Брэгга и характеризуется параметром расстройки двух сигналов в области волновых частот $q = 2k_e - k_s$, где k_e и k_s - волновые числа, соответствующие несущим частотам излучаемых электромагнитной и акустической волн. В соответствии с этим введем меру отличия двух сигналов как квадрат отклонения $E(2r')$ и $S(r'-r)e^{jq'r'}$:

$$\Delta^2(r, q) = \int_{-\infty}^{+\infty} [E(2r') - S(r'-r)e^{jq'r'}]^2 dr'. \quad (1)$$

Раскрывая подынтегральное выражение, получаем

$$\Delta^2(r, q) = \int_{-\infty}^{+\infty} |E(2r')|^2 dr' + \int_{-\infty}^{+\infty} |S(r'-r)e^{jq'r'}|^2 dr' - 2 \int_{-\infty}^{+\infty} E(2r')S^*(r'-r)e^{jq'r'} dr'. \quad (2)$$

Полагая, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} |E(2r')|^2 dr' = 1, \quad \int_{-\infty}^{\infty} |S(r'-r)e^{jq'r'}|^2 dr' = \int_{-\infty}^{\infty} |S(r'-r)|^2 dr' = 1,$$

и учитывая, что третий член в (2) - взаимокорреляционная функция сигналов

$$\int_{-\infty}^{+\infty} E(2r')S^*(r'-r)e^{jq'r'} dr' = Z(r, q),$$

запишем

$$\Delta^2(r, q) = 2[1 - Z(r, q)]^2. \quad (3)$$

Если сравнивать два сигнала, принимая во внимание только огибающую корреляционной функции, то под $Z(r, q)$ в (3) следует понимать

$$Z(r, q) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(2r') S^*(r' - r) e^{jqr'} dr' \right|. \quad (4)$$

Задавая квадратичной мерой отличия сигналов в пространстве спектров волновых чисел, можно получить выражение, аналогичное (3), в котором корреляционная функция записывается в виде

$$Z(r, q) = \frac{1}{2\pi} \left| \int_{-\infty}^{\infty} S_E\left(\frac{k}{2}\right) S^*(k - q) e^{jkr} dk \right|, \quad (5)$$

где $S_s(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(r') e^{-jkr'} dr'$,

$S_E\left(\frac{k}{2}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} E(2r') e^{-jkr'} dr' = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} E(r') e^{-j\frac{k}{2}r'} dr'$ — пространственные спектры соответствующих комплексных амплитуд.

Таким образом, именно двумерная взаимокорреляционная функция определяет меру близости сигналов при их рассогласовании в пространстве и в области волновых частот.

Двумерная пространственно-частотная корреляционная функция характеризует основные свойства пары зондирующих сигналов, состоящей из акустического и электромагнитного колебаний. Она содержит в себе информацию о пространственной протяженности рассеянного радиосигнала, о диапазоне возможных значений параметра расстройки условия Брэгга, в котором амплитуда рассеянной волны не выходит за определенные рамки, и ряд других важных показателей.

Функцию $Z(r, q)$ будем называть “сигнальная функция рассеяния”, а тело, заключенное между поверхностью функции $Z(r, q)$ и плоскостью r, q , — телом рассеяния или телом рассеяния сигналов. Возможно название функции по фамилии автора.

Далее будем использовать также нормированное представление сигнальной функции рассеяния, которое на основе выражения (5) записывается в виде

$$Z_0(r, q) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} S_E(k/2) S_s^*(k - q) e^{jkr} dk \right|}{\left(\int_{-\infty}^{\infty} |S_E(k/2)|^2 dk \right)^{1/2} \left(\int_{-\infty}^{\infty} |S_s(k)|^2 dk \right)^{1/2}}.$$

Функции $Z(r, q)$ и $Z^2(r, q)$ (или соответствующие им нормированные функции) можно изображать в прямоугольной системе координат в виде поверхности. Рельеф тела рассеяния можно также характеризовать с помощью линий, получающихся при сечении тела рассеяния горизонтальными плоскостями на определенном уровне $Z(r, q) = \text{const} = Z_c$; эти линии будем называть диаграммами рассеяния.

Например, целесообразно использовать сечения на уровне $Z_c = 0,5(0,7)$ и $Z_c = 0,1$. Тогда $Z \geq 0,5$ будет представлять собой область высокой корреляции акустического и радиосигнала, $Z < 0,5$ — область низкой корреляции, а зона $Z < 0,1$ — область нулевой корреляции. Число используемых градаций при необходимости может быть увеличено.

Тело рассеяния можно характеризовать и с помощью сечений вертикальными плоскостями $r = \text{const} = r_0$, $q = \text{const} = q_0$. Форма его сечения плоскостью $q = q_0$ совпадает с огибающей рассеянного сигнала, когда электромагнитный и акустический сигналы расстроены на величину q_0 . Например, при $q_0 = 0$ из (4) получим выражение

$$Z(r, 0) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(2r') S^*(r' - r) dr' \right|,$$

определяющее пространственную корреляционную функцию двух сигналов при точном выполнении условия Брэгга.

Анализ этих сечений позволяет установить влияние расстройки на степень уменьшения амплитуды рассеянного сигнала и, соответственно, на основные характеристики системы, зависящие от амплитуды. Протяженность сечения на уровне $Z = 0,5$ определяет разрешающую способность по дальности, однако для радиоакустических систем этот параметр не так важен, как в радиолокации.

Очевидно, что чем меньше эффективная ширина сечения тела рассеяния вертикальной плоскостью $q = \text{const}$, тем больше вторая производная $Z''(r, 0)$ и соответственно меньше дисперсия ошибок измерения дальности $\sigma^2(r)$, которая связана с параметром обнаружения (отношением сигнал-шум) g^2 и $Z''(r, 0)$ выражением $\sigma_r^2 = \left[-g^2 Z''(r, 0) \right]^{-1}$.

Сечение тела рассеяния плоскостью $r = 0$ характеризует область волновых чисел (диапазон расстроек), при которых происходит (возможно) рассеяние. Функция

$$Z(0, q) = \frac{1}{2\pi} \left| \int_{-\infty}^{\infty} S_E\left(\frac{k}{2}\right) S_s^*(k - q) dk \right| \quad (6)$$

— корреляционная функция спектров сигналов по пространственной частоте, она показывает, как изменяется амплитуда рассеянного сигнала в зависимости от q . Определяющее значение на формирование области волновых чисел рассеяния имеет более короткий по пространству сигнал (при условии, что оба зондирующих сигнала относятся к классу простых). Так, если используется простой акустический импульс и непрерывное электромагнитное излучение, то, как следует из (6), функция $Z(0, q)$ представляет собой пространственный спектр огибающей звукового пакета. Заметим, что аналогичные зависимости, характеризующие уменьшение интенсивности рассеянного сигнала в зависимости от расстройки, в различных видах достаточно

часто приводятся в публикациях, но физическая интерпретация их далеко не всегда правильная. При этом также не уточняются характеристики сигналов, в качестве параметра расстройки используется отношение длин волн и т.д.

Если при зондировании используется радиосигнал с меньшей, чем звуковой пакет, пространственной протяженностью, то преобладающее значение в формировании области волновых чисел рассеяния принадлежит радиосигналу.

При одинаковых формах огибающих и соотношении пространственных длительностей сигналов как $l_e = 2l_s$ (где l_s, l_e – пространственные протяженности акустического и радиосигнала соответственно) функция $Z(0, q)$ представляет собой спектр квадрата огибающей акустического пакета.

Следует отметить, что в общем случае сечение $Z(0, q)$ не определяет разрешающую способность по частоте и точность оценивания частоты, как в классическом теле неопределенности. Эти свойства сигнала определяются из тела рассеяния по характеристикам преобразования Фурье от сечения $Z(0, r)$.

Особый интерес вызывает рассеяние при одинаковых формах огибающих акустического и радиосигнала и соотношении их пространственных протяженностей как $l_e = 2l_s$, когда на акустическом волновом пакете реализуется согласованный с излучаемым радиосигналом оптимальный фильтр. Рассеянный сигнал в этом случае представляет собой автокорреляционную функцию излучаемых электромагнитных колебаний, а сигнальная функция рассеяния совпадает по виду с классической функцией неопределенности радиосигнала. Реализация согласованного фильтра на пространственной неоднородности интересна сама по себе и может быть использована также практически, например, для обнаружения на больших высотах излучаемого акустического возмущения на фоне слабо коррелированных по пространству естественных неоднородностей диэлектрической проницаемости, представляющих собой, по существу, пространственный белый шум.

Тела рассеяния сигналов для данного случая (когда формы огибающих совпадают, а их пространственные длительности соотносятся как $l_e = 2l_s$) повторяют классические тела неопределенности используемых радиоимпульсов (с прямоугольной, гауссовой или некоторой другой формой огибающей), которые приведены в соответствующей литературе. По мере увеличения длительности зондирующего радиосигнала (при неизменной протяженности акустического пакета) тела рассеяния вытягиваются вдоль оси r и для непрерывного радиосигнала сечения вдоль оси q будут одинаковыми, не зависящими от значения r и повторяющимися сечения при $r = 0$.

Сигнальная функция рассеяния может быть представлена и в других формах, одна из которых получается замещением координаты r частотной переменной k в результате следующего преобразования:

$$Z(k, q) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(r, q) e^{-jkr} dr$$

Сечение $Z(k, q)$ вдоль оси k при фиксированном q определяет пространственный спектр рассеянного сигнала, соответствующий временному спектру. Две другие формы представления получаются из имеющихся функций их обратным преобразованием Фурье по координате q :

$$Z(k, l) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(k, q) e^{-jql} dq, \quad Z(r, l) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(r, q) e^{-jql} dq$$

Каждое из этих представлений имеет определенные особенности, проявляющиеся при решении различных задач синтеза и анализа сигналов. При решении конкретных задач необходимо использовать наиболее удобные и соответствующие физическому содержанию задачи представления.

Применение сигнальной функции рассеяния позволяет характеризовать процесс рассеяния не только на объектах, используемых при зондировании атмосферы, но и на других. Например, классическая точечная цель является δ -функцией в пространстве, а ее пространственный спектр постоянен и неограничен во всем диапазоне пространственных частот от $-\infty$ до $+\infty$. Соответственно корреляционные интегралы в пространстве и в области волновых частот будут иметь следующий вид:

$$Z(r, q) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(2r') \delta(r' - r) e^{jqr'} dr' \right|, \quad (7)$$

$$Z(r, q) = \frac{1}{2\pi} \left| \int_{-\infty}^{\infty} S_E\left(\frac{k}{2}\right) N_{0s}(k - q) e^{jkr} dk \right|,$$

где N_{0s} – двусторонняя спектральная плотность пространственных частот рассеивающего объекта.

Тогда, как видно из (7), сечения тела рассеяния точечного объекта вдоль оси r будут представлять собой копии зондирующего сигнала независимо от значения параметра расстройки q , а сечения вдоль оси q – прямые, параллельные плоскости r, q , т. е. некоторые постоянные значения во всем диапазоне q .

Таким образом, двумерная взаимокорреляционная функция зондирующих акустического и электромагнитного сигналов радиоакустических систем достаточно полно отображает характерные особенности данной совокупности сигналов и может использоваться при решении соответствующих задач как “портретная” функция, определяющая их совместные свойства.

Литература: 1. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука. 1985. 200 с. 2. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука. 1986. 165с.

Поступила в редколлегию 15.09.2000

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Сухаревский О.И.

Карташов Владимир Михайлович, канд. техн. наук, докторант ХТУРЭ. Научные интересы: методы дистанционного зондирования атмосферы. Увлечения: спорт, автомобиль. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-95-87.