

## АНАЛИЗ ЗОНДИРУЮЩИХ РАДИОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕЛ РАССЕЯНИЯ

Известные методы анализа радиолокационных сигналов, основанные на использовании функций неопределенности [1], не могут быть применены для исследования свойств зондирующих сигналов акустических и радиоакустических систем зондирования атмосферы в силу специфики последних. Разработана методика анализа свойств акустических и электромагнитных сигналов данных систем, основанная на использовании функций и тел рассеяния.

Функцией рассеяния называется [2] двумерная пространственно-частотная функция взаимной корреляции зондирующих электромагнитного  $E(r')$  и акустического  $S(r')$  сигналов, которая записывается в следующих видах:

$$Z(r, q) = |F(r, q)| = \left| \int_0^{\infty} E(2r' - r) S^*(r') e^{jqr'} dr' \right|, \quad (1)$$

$$Z(r, q) = |F(r, q)| = \frac{1}{4\pi} \left| \int_{-\infty}^{\infty} S_E \left( \frac{k}{2} \right) S_S^*(k - q) e^{-j\frac{r}{2}k} dk \right|, \quad (2)$$

где  $r'$  - пространственная координата вдоль направления зондирования;  $k = 2\pi/\lambda$  - пространственная частота;  $r, q$  - расстройки сигналов соответственно по координате  $r'$  и в области волновых частот;  $S_S(k)$ ,  $S_E(k)$  - пространственные спектры соответствующих сигналов. Второе уравнение, где функция записана через пространственные спектры, получается из первого на основании теоремы Парсеваля, при этом используются следующие представления:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S(r') e^{-jkr'} dr' = S_S(k), \quad \int_0^{\infty} E(2r' - r) e^{-jkr'} dr' = e^{-j\frac{r}{2}k} \int_0^{\infty} E(2r') e^{-jkr'} dr' = \frac{1}{2} e^{-j\frac{r}{2}k} S_E \left( \frac{k}{2} \right).$$

Особенностью функции  $Z(r, q)$  является то, что она характеризует зондирующие и рассеянный сигналы в пространстве. Функции  $Z(r, q)$  и  $Z^2(r, q)$  удобно изображать в прямоугольной системе координат в виде поверхностей. Объем, заключенный между поверхностью функции  $Z(r, q)$  и плоскостью  $r, q$ , будем называть телом рассеяния. На рис.1 представлено тело рассеяния акустического импульса с гауссовской огибающей и электромагнитного импульса, имеющего огибающую прямоугольной формы (оба сигнала относятся к классу простых).

Тело рассеяния позволяет определять основные характеристики системы зондирования, использующей анализируемые сигналы. Оно 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.

Тело рассеяния можно характеризовать с помощью сечений вертикальными плоскостями  $q = \text{const} = q_0$ ,  $r = \text{const} = r_0$ . Форма сечения тела плоскостью  $q = q_0$  совпадает с огибающей рассеянного сигнала, когда несущие частоты электромагнитного и акустического сигналов расстроены на величину  $q_0$ . Анализ этих сечений позволяет установить влияние расстройки на степень уменьшения амплитуды рассеянного сигнала и, соответственно, на основные характеристики системы зондирования, зависящие от амплитуды. Протяженность

сечения на уровне  $Z = 0,5$  определяет разрешающую способность по дальности. Причем, следует заметить, что термин «разрешающая способность по дальности» применительно к радиоакустическим системам понимается несколько иначе, чем в радиолокации, поскольку определяется для двух используемых сигналов – электромагнитного и акустического. Сечения тела рассеяния, изображенного на рис.1, вертикальными плоскостями при различных значениях параметра  $q$  представлены на рис.2.

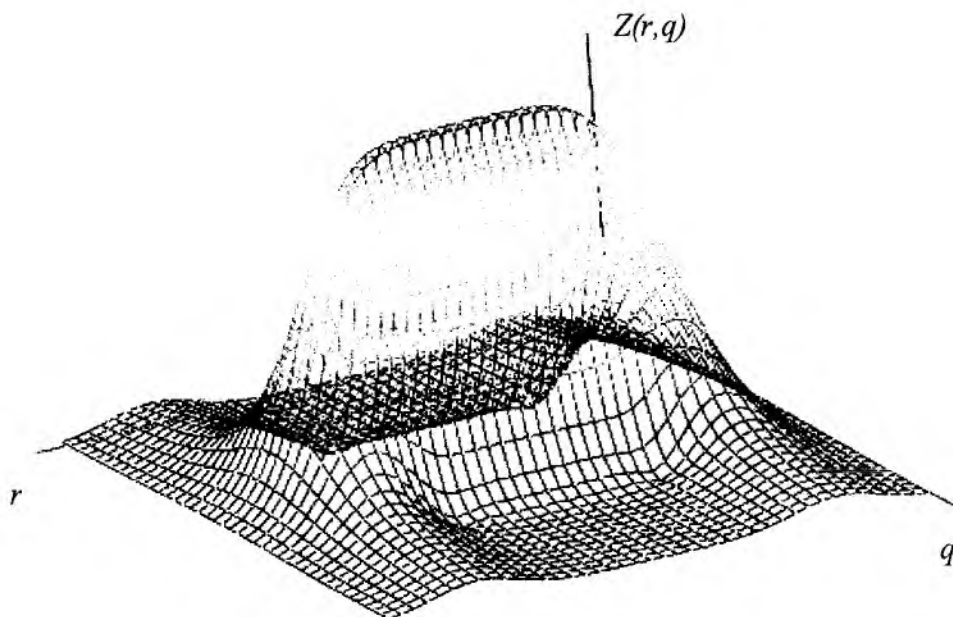


Рис. 1

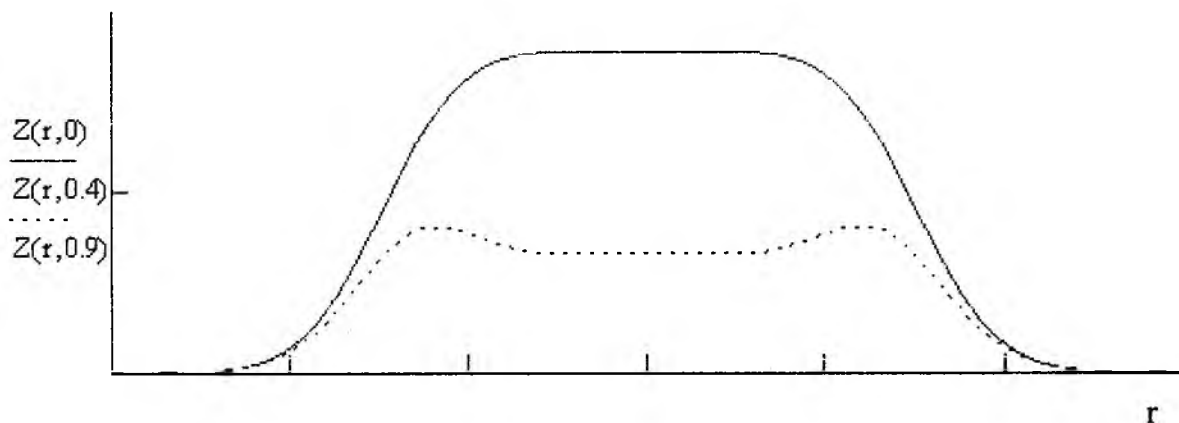


Рис. 2

Сечение тела рассеяния плоскостью  $r = 0$  характеризует область волновых чисел (диапазон расстроек), при которых происходит рассеяние. Оно показывает, как изменяется амплитуда рассеянного сигнала в зависимости от значения параметра  $q$ . Соответствующее сечение тела, изображенного на рис.1, показано на рис.3. Из (2) при  $r = 0$  получим

$$Z(0, q) = \frac{1}{2\pi} \left| \int_{-\infty}^{\infty} S_E \left( \frac{k}{2} \right) S_s^*(k - q) dk \right| \quad (3)$$

- корреляционную функцию спектров сигналов по пространственной частоте.

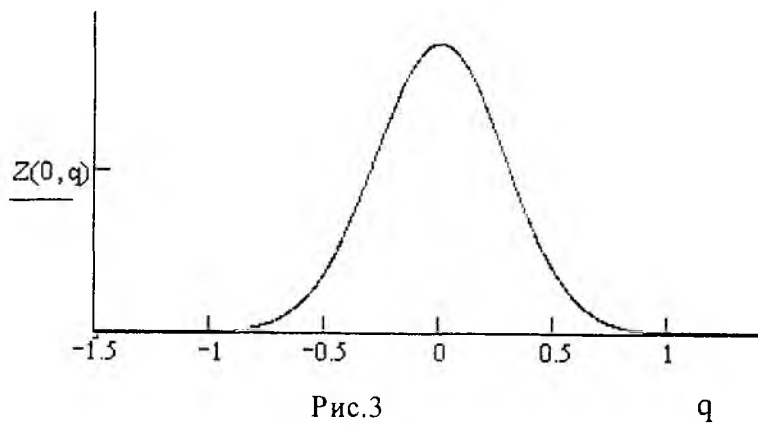


Рис.3

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 (3), 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 по РАЗ, 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.

Рельеф тела рассеяния можно также характеризовать с помощью линий, получающихся при сечении тела рассеяния горизонтальными плоскостями на определенном уровне  $Z(r, q) = const = Z_c$ , эти линии будем называть диаграммами рассеяния. Например, целесообразно использовать сечения на уровне  $Z_c = 0,5(0,7)$  и  $Z_c = 0,1$ . Тогда область  $Z \geq 0,5$  будет представлять собой область высокой корреляции акустического и радиосигнала, область  $Z < 0,5$  - область низкой корреляции, а зона  $Z < 0,1$  - область нулевой корреляции. Число используемых градаций при необходимости может быть увеличено, как это показано на рис. 4.

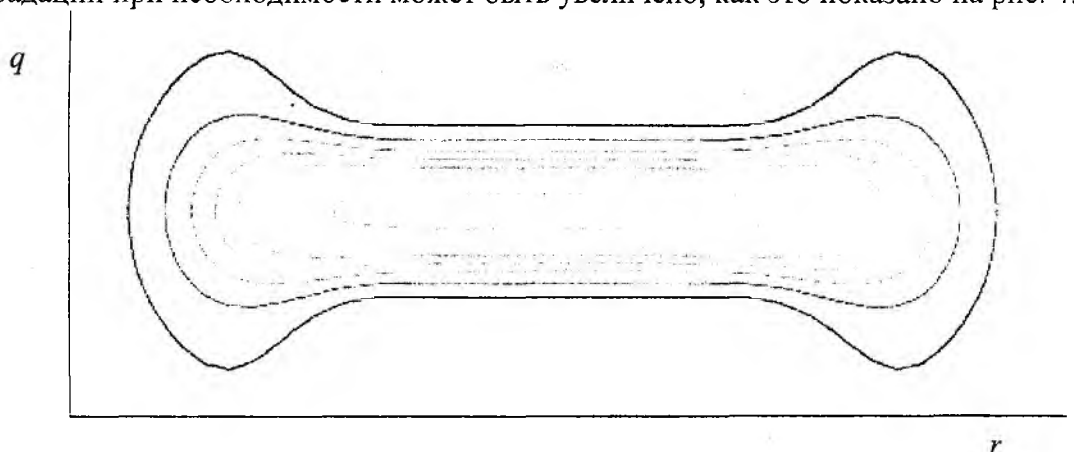


Рис. 4

Тело рассеяния простых акустического и электромагнитного импульсов с прямоугольными огибающими представлено на рис.5, а на рис.6 – соответствующее тело для импульсных сигналов, имеющих гауссовские огибающие.

Значительный интерес представляет исследование деформации тел рассеяния простых сигналов при изменении пространственной частоты в пределах акустического импульса, например, по линейному закону. Это изменение может быть вызвано как непостоянством метеопараметров по трассе зондирования, так и введением частотной модуляции в излучаемый

сигнал. На рис.7 представлено тело рассеяния линейно частотно модулированного акустического пакета и радиоимпульса, имеющего прямоугольную огибающую. С увеличением девиации частоты  $\Delta k$  главный лепесток тела расширяется вдоль оси  $q$  и становится «изрезанным», что объясняется появлением в пространственном спектре звуковых колебаний френелевских пульсаций. Происходит также поворот тела на угол, который растет с увеличением  $\Delta k$ .

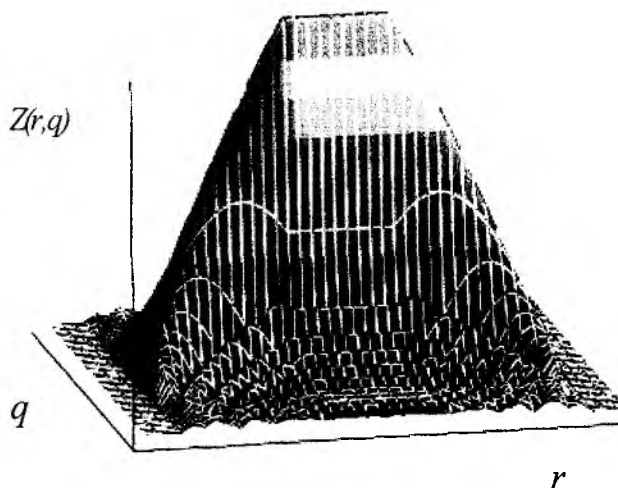


Рис. 5

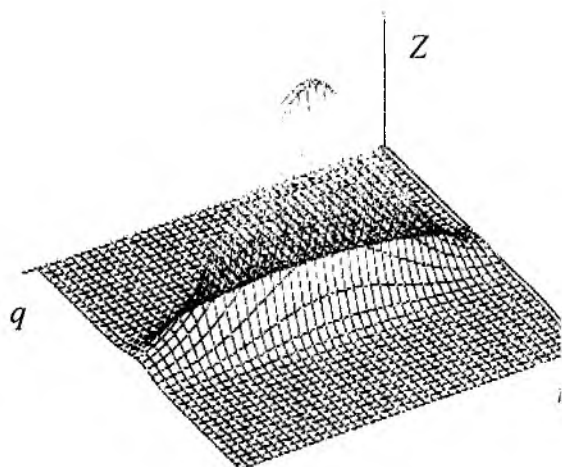


Рис. 6

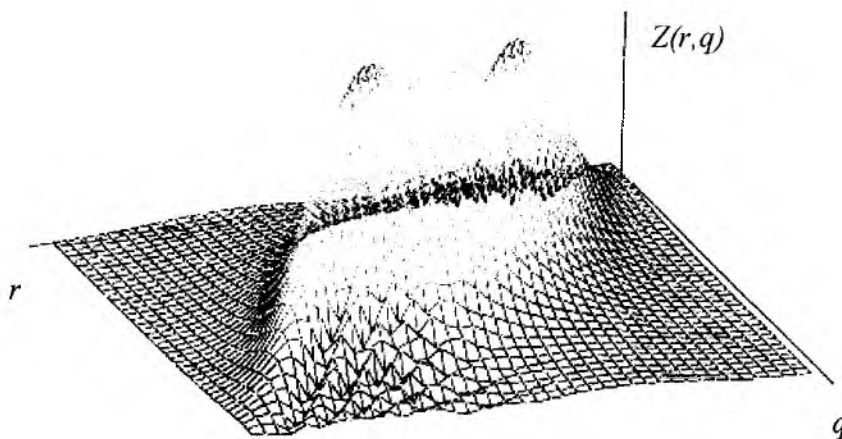


Рис.7

Аналогичный поворот имеет место и в теле неопределенности ЛЧМ радиоимпульса, однако сжатия рассеянного сигнала в данном случае не наблюдается. При наличии расстройки  $q \neq 0$  поворот тела проявляется как смещение максимума рассеянного сигнала во времени, определяющее ошибку измерения времени запаздывания или дальности до цели. Подобные ошибки расстройки свойственны процедурам, сводящимся к вычислению корреляционного интеграла [1].

Понятно, что рассматриваемая ошибка дальности по абсолютной величине не выходит за пределы пространственной протяженности акустического пакета  $l_s$  и возрастает с увеличением  $l_s$ ,  $\Delta k$  и  $q$ .

Характерные особенности формирования огибающей рассеянного сигнала в радиоакустических системах, длительностей фронтов получаемых импульсов удобно проанализиро-

вать, используя сечение тела рассеяния простых электромагнитного и акустического импульсов с прямоугольными огибающими (рис. 5) плоскостью  $q = 0$ , которое представлено на рис. 8.

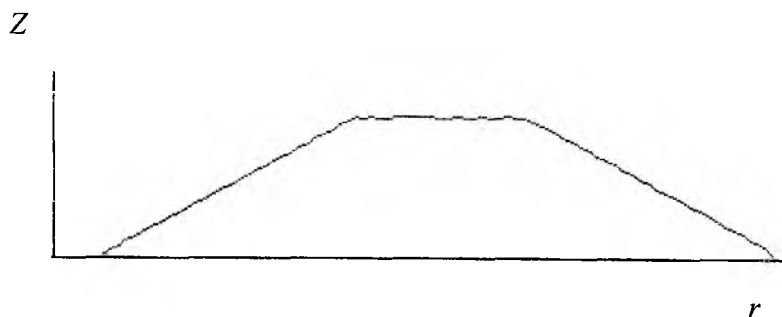


Рис. 8

Сечение, как видно, имеет трапециевидную форму. Протяженность плоской части трапеции  $l_p$  определяется соотношением  $l_p = |2l_s - l_e|$ , где  $l_e$  - пространственная протяженность радиоимпульса, а длительности переднего и заднего фронтов рассеянного сигнала равны и в зависимости от имеющихся условий составляют  $l_f = l_e$ , если  $l_e < 2l_s$ , либо  $l_f = 2l_s$ , если  $l_e > 2l_s$ . При  $l_e = 2l_s$  трапеция превращается в треугольник. В этом случае на акустическом волновом пакете реализуется согласованный с излучаемым радиосигналом оптимальный согласованный фильтр, соответствующее тело рассеяния совпадает с телом неопределенности излучаемого радиоимпульса, а сечение тела рассеяния плоскостью  $q = 0$  представляет собой автокорреляционную функцию такого сигнала.

**Список литературы:** 1. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1971. 367 с. 2. Карташов В.М. Функции рассеяния сигналов систем зондирования атмосферы // Радиотехника. 2001. №118. С. 61 – 65.

Харьковский национальный  
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 24.12.2001