

АНАЛИЗ ТЕЛ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРОСТЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ РАДИОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Функция неопределенности радиоакустических сигналов

Повышение эффективности работы радиотехнических систем неразрывно связано с поиском, синтезом и улучшением алгоритмов обработки применяемых сигналов. Радиоакустические системы в этом плане имеют ряд специфических особенностей, что делает такую задачу еще более интересной и сложной одновременно.

Специфика радиоакустических систем заключается, прежде всего, в особенности объекта локации, который представляет собой объемно-распределенную цель, характеристики которой непрерывно меняются на трассе распространения и интегральным образом связаны с измеряемыми параметрами атмосферы. По мере движения акустической волны в атмосфере, под влиянием температуры, влажности, скорости ветра и других метеопараметров меняется ее амплитудная и фазовая структуры, что неизбежно приводит к изменению параметров рассеянного сигнала. Вследствие изменения амплитудных и фазовых свойств рассеянного электромагнитного сигнала, его спектр становится несимметричным, что, как известно, имеет место в случае совместной амплитудно-угловой модуляции колебаний [1, 2].

В настоящее время в системах радиоакустического зондирования атмосферы применяются классические алгоритмы обработки принятых сигналов, которые характерны, например, для радиолокации. Они строятся в предположении, что форма зондирующего сигнала в процессе отражения от точечной цели не меняется, а изменяются лишь значения его параметров. Оценка величины этих изменений и позволяет извлечь полезную информацию из принятого колебания. В таких системах устройства обработки содержат корреляторы и фильтры, согласованные с излучаемым сигналом [3, 4].

Для радиоакустических систем классические алгоритмы обработки сигналов можно применять только при условии использования простых акустических импульсов и точном выполнении условия Брэгга $q = 0$. При таких условиях имеет место только искажение огибающей рассеянного колебания, без нарушения его тонкой внутренней структуры. Если же условие Брэгга на трассе распространения радиоакустического сигнала перестает выполняться ($q \neq 0$), то даже для простых зондирующих сигналов возникает систематическая погрешность измерения параметров атмосферы, которая возрастает с увеличением значения параметра q .

Одним из методов уменьшения систематической погрешности измерения параметров атмосферы является способ подстройки частоты несущей акустического и электромагнитного колебаний. Причем медленные суточные изменения параметров атмосферы на трассе распространения зондирующих сигналов могут быть компенсированы подстройкой частоты акустической волны, а быстрые изменения – подстройкой частоты электромагнитного сигнала. Например, как показано в [5], чтобы обеспечить выполнение условия Брэгга при изменении температуры атмосферы с высотой на 10°C необходимо иметь возможность перестройки частоты радиосигнала в пределах 1,5 % с точностью порядка 0,05 % и скоростью порядка 0,1 % за 0,1 с. Такая задача оказывается очень сложной для реализации с технической стороны в основном из-за несовершенства существующих средств подстройки частоты зондирующих сигналов.

Таким образом, как следует из изложенного, применяемые сегодня в расдарах алгоритмы обработки сигналов не адекватны процессам, происходящим в локационном канале. Поэтому возникает задача получения алгоритмов обработки сигналов радиоакустических систем, которые должны учитывать преобразование радиоволны в канале и позволять осуществлять качественные измерения параметров атмосферы не только при выполнении условия Брэгга, но и при $q \neq 0$, а также в случае использования сложных звуковых импульсов.

Поэтому главная задача повышения точности, уменьшения систематической погрешности измерений параметров атмосферы радиоакустическими системами должна решаться путем создания адекватных алгоритмов обработки рассеянных радиосигналов.

Как показано в [6 – 8], способ решения возникших трудностей, описанных ранее, возможен при использовании корреляционных устройств обработки, алгоритм работы которых рассмотрим далее.

Формула для функции неопределенности зондирующих радиоакустических сигналов имеет следующий вид

$$Z(r_d, q_0, q) = \int_{-\infty}^{\infty} F_y(r, q_0) \cdot F^*(r - r_d, q) dr, \quad (1)$$

где $q = 2k_e - k_s$ – параметр расстройки условия Брэгга; k_s – волновое число для звука; k_e – волновое число радиоволны; r – смещение акустического и электромагнитного сигналов по координате «дальность»; q_0 – величина расстройки условия Брэгга, при которой формируется рассеянный сигнал; r_d – относительное смещение принимаемого и опорного сигналов по дальности.

Формы принимаемого электромагнитного F_y и опорного F сигналов могут быть найдены с помощью функции рассеяния [9]

$$F(r, q) = \int_{-\infty}^{\infty} E(2r' - r) S^*(r') e^{jqr'} dr', \quad (2)$$

где $E(2r' - r)$ – пространственная огибающая радиосигнала; $S(r')$ – пространственная огибающая акустического сигнала.

Функция неопределенности (1) характеризует точность определения параметров атмосферы с помощью устройств обработки радиоакустических систем в случае смещения сигналов F_y и F в некотором диапазоне значений параметра расстройки q и пространственной координаты r , которая с временным запаздыванием сигналов связана соотношением $r = ct$, где c – скорость света, t – время.

Введенное представление функции неопределенности для радиоакустических систем отличается от ее определения в радиолокации. Классическая функция неопределенности характеризует разрешающую способность радиолокационной станции по дальности и радиальной скорости, а также точности измерения координат. Структура тела неопределенности будет одной и той же для выбранного зондирующего сигнала.

Для радиоакустических систем функция неопределенности представляет собой корреляционный интеграл рассеянного при некотором значении расстройки условия Брэгга принимаемого сигнала F_y и предварительно заданного опорного колебания F . Для корректной обработки опорный сигнал должен выбираться в соответствии с выражением для функции рассеяния (2) используемых зондирующих акустического и электромагнитного колебаний.

Графический вид функции неопределенности – тело неопределенности, представляет собой модуль интеграла формулы (1). Как нетрудно заметить, функция $Z(r_d, q_0, q)$ будет меняться в зависимости от величины взаимной расстройки условия Брэгга, относительного смещения сигналов вдоль пространственной координаты и значения величины q_0 , при которой формируется рассеянный сигнал. Существенное отличие введенной функции неопределенности заключается в том, что для различных значений величины расстройки условия Брэгга q_0 , при котором формируется рассеянный сигнал, структура тела неопределенности будет различной, даже в случае использования одной и той же пары зондирующих акустического и электромагнитного колебаний. По виду тела неопределенности, количеству и харак-

теру его центрального и боковых пиков, можно судить о потенциальной точности определения параметров атмосферы для выбранных сигналов радиоакустических систем.

Тела неопределенности простых радиоакустических сигналов

Использование представления функции неопределенности, заданного формулой (1), позволяет построить тела неопределенности различных пар акустического и электромагнитного сигнала и проанализировать их пригодность для практического применения. Вид тел неопределенности позволяет оценить перспективность использования тех или иных зондирующих сигналов с точки зрения получения наиболее точных данных о параметрах атмосферы. Поэтому интересно проанализировать, как меняется тело неопределенности для простых акустических и электромагнитных сигналов при различных значениях величины расстройки условия Брэгга q , чтобы оценить потенциальные возможности радиоакустической системы, использующей выбранные зондирующие колебания.

На рис. 1, *a – г* представлены тела неопределенности пары простых акустического и электромагнитного сигналов с прямоугольными огибающими для различных величин расстройки условия Брэгга $q_0 = 0$, $q_0 = 0.2$, $q_0 = 0.6$, $q_0 = -0.5$ соответственно.

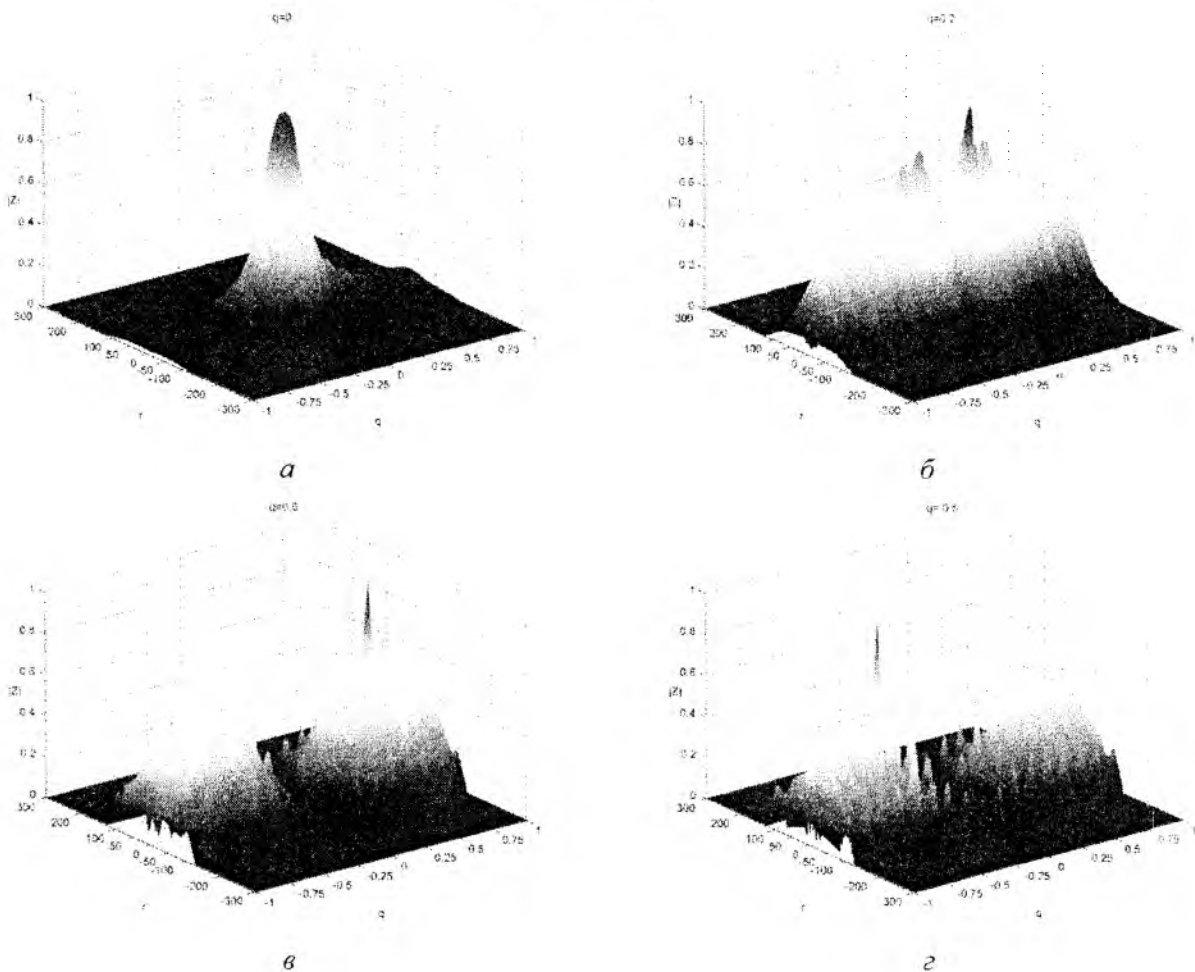


Рис. 1

Из представленных рисунков видно, насколько сильно меняется характер функции неопределенности при изменении q_0 для простых радиоакустических сигналов с прямоугольной огибающей. Тело неопределенности изменяется не только вдоль координат r и q , но и в зависимости от величины расстройки условия Брэгга q_0 , при котором формируется рассеянный сигнал. Это значит, что выбор зондирующих сигналов для радиоакустических систем

должен строиться не только по анализу «классического» вида тела неопределенности для $q_0 = 0$, но и с учетом изменения функции неопределенности при значениях $q_0 \neq 0$.

Невыполнение условия Брэгга на трассе распространения акустической посылки приводит к частотно-фазовым искажениям рассеянного радиосигнала, что обязательно должно быть учтено в алгоритме работы приемного устройства. Из рис. 1, в, г видно, что тело неопределенности принимает более изрезанный вид с острым главным максимумом для точек пространства, в которых принимается рассеянный радиосигнал формируется при $q_0 \neq 0$. В радиолокации такой вид тела неопределенности формируется, например, при использовании зондирующих сигналов модулированных одновременно по фазе и частоте.

Более острый пик главного максимума тела неопределенности для простых радиоакустических сигналов при условиях $q_0 \neq 0$ позволяет сделать вывод о повышении точности определения параметров атмосферы при увеличении расстройки условия Брэгга. Одновременно с этим заметно значительное повышение боковых лепестков тела неопределенности по сравнению с рис. 1, а, соответствующем случаю $q_0 = 0$, что может привести к неоднозначности измерения параметров атмосферы.

Интересно рассмотреть, как меняется характер тела неопределенности при изменении длительности зондирующих сигналов.

На рис. 2, а представлено тело неопределенности для $q_0 = 0$ акустического импульса с экспоненциальной огибающей и прямоугольного радиоимпульса. Рис. 2, б показывает вид тела неопределенности тех же сигналов при том же значении величины расстройки условия Брэгга, но при увеличении длительности акустической посылки в два раза.

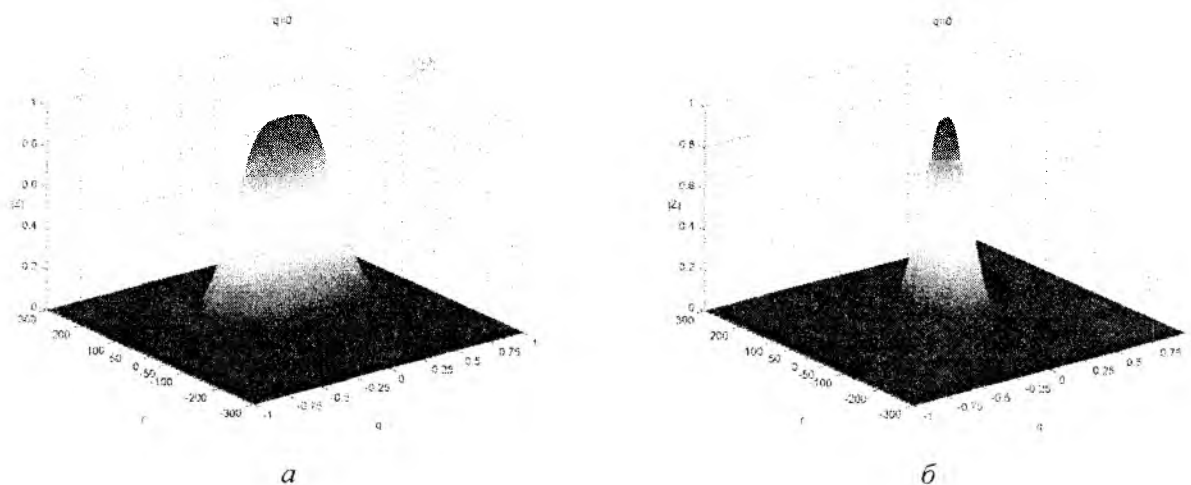


Рис. 2

Заметно, что увеличение длительности акустической посылки приводит к сужению главного лепестка тела неопределенности вдоль координаты q , что улучшает точность определения параметров атмосферы в точке выполнения условия Брэгга. Данный характер поведения тела неопределенности связан с уже известной закономерностью [5]: увеличение длительности акустической волны сужает диапазон значений дальности, в котором происходит синфазное сложение рассеянного на акустической посылке радиосигнала, поэтому амплитуда рассеянного сигнала убывает более резко при увеличении значения q .

Здесь существенно заметить, что алгоритм выбора длительности тех или иных зондирующих колебаний на этапе разработки радиоакустических систем должен быть основан на изучении поведения тела неопределенности пары акустического и электромагнитного сигналов не только для значения условия Брэгга $q_0 = 0$, но и для величин $q_0 \neq 0$. Изменяя длительность выбранных зондирующих колебаний и анализируя при этом ширину главного пика

тела неопределенности вдоль координаты q , можно достичь минимальной погрешности измерения параметров атмосферы для заданной пары звуковой и электромагнитной волны.

Анализ тел неопределенности для условия $q_0 = 0$ позволяет оценить точность определения параметров атмосферы для существующих сегодня «классических» алгоритмов обработки радиоакустических сигналов, причем, еще на этапе разработки системы, без проведения дорогостоящих практических экспериментов. Поэтому функция неопределенности может быть использована для анализа уже существующих комплексов радиоакустического зондирования атмосферы с точки зрения поиска наиболее оптимальных сигналов без существенной модернизации самих устройств обработки.

Как и в радиолокации, по виду тел неопределенности и его вертикальных и горизонтальных сечений можно оценить точность и однозначность определения параметров атмосферы. На рис. 3, а показано вертикальное сечение тела неопределенности вдоль координаты q для пары акустического и радиосигнала с экспоненциальной огибающей при условии формирования рассеянного колебания $q_0 = 0$. На рис. 3, б представлены сечения в виде линий равного уровня того же тела неопределенности для значений уровней $|Z| = 0.5, 0.7, 0.9$.

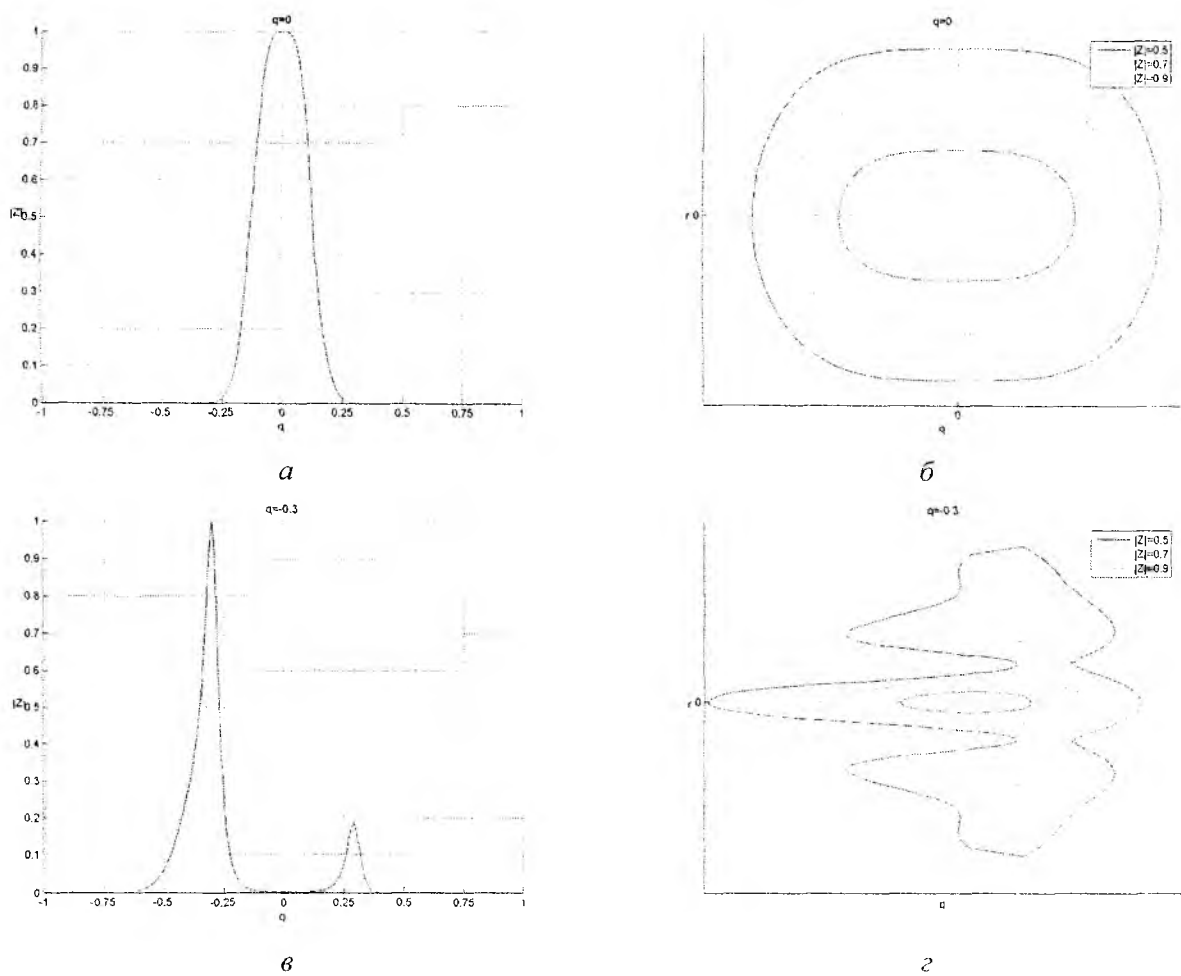


Рис. 3

Для сравнения рис. 3, в и г показывают аналогичные сечения тела неопределенности тех же сигналов, но для величины расстройки условия Брэгга, при котором сформировалась рассеянная волна $q_0 = -0.3$.

Данные рисунки служат дополнительным доказательством сложности процессов формирования рассеянного сигнала на объемно-распределенной цели, в результате которого могут возникать боковые максимумы тела неопределенности, которые должны быть учтены в

обрабатывающем устройстве для исключения систематических погрешностей измерений параметров атмосферы.

Ширина сечений главного максимума тела неопределенности на рис. 3, *а* и *б* позволяет оценить потенциальную точность определения параметров атмосферы для выбранных типов сигналов с заданной длительностью. Обратившись к рис. 3, *в* и *г*, мы замечаем, что при увеличении величины расстройки условия Брэгга, при котором формируется рассеянный сигнал, точность оценки метеопараметров возрастает. Однако сужение главного максимума тела неопределенности сопровождается появлением существенных по величине боковых выбросов (рис. 3, *г*), что может привести к увеличению вероятности ошибки определения параметров атмосферы.

Применение корреляционного алгоритма обработки [6, 8] принятых колебаний в радиоакустических системах позволяет исключить систематическую погрешность измерения параметров атмосферы, связанную с особенностями рассеяния электромагнитной волны на акустической посылке. Использование функции неопределенности, построение и анализ тел неопределенности различных радиоакустических сигналов является мощным и перспективным средством выбора зондирующих колебаний на первоначальном этапе проектирования данных радиотехнических систем, позволяющим исключить дорогостоящие натурные эксперименты.

Список литературы: 1. Френкс Л. Теория сигналов: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1974. 344 с. 2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1988. 448 с. 3. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320с. 4. Ширман Я.Д., Голиков В.Н., Бусыгин И.Н. и др. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Сов. радио, 1970. 560 с. 5. Калистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 200 с. 6. Карташов В.М., Волох А.В., Радионова В.В. Тела неопределенности зондирующих сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2007. № 125, С. 25 – 31. 7. Волох А.В. Функция неопределенности радиоакустических сигналов // 12-й Междунар. молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Сб. матер. форума. Харьков: ХНУРЭ, 2008. С. 27-28. 8. Карташов В.М., Волох А.В. Тела неопределенности зондирующих сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы. Россия., Туапсе. МНК «Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития», 2007. С. 49-52 9. Карташов В.М. Функции рассеяния сигналов систем зондирования атмосферы // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч. -техн. сб. 2001. №118. С. 61-65.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 11.11.2009