

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЛ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ РАДИОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Карташов В.М., Бабкин С.И., Волох А.В.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина, 14, каф. радиоэлектронных систем,
тел. +38-057-70-21-587; E-mail: res@kture.kharkov.ua

The classical algorithms of processing of recipient waves are applied to RASS which result in occurrence of hard errors of measurement of parameters atmosphere. The elimination of these metering error is possible at use of the algorithm processing of radioacoustic signals, described in this paper. The form of ambiguity function reference in this paper for signals of radioacoustic systems, allows to estimate qualitative measure of parameters of atmosphere.

Разработка и проектирование высокоэффективных радиотехнических систем невозможно без решения двух основных задач: синтеза используемых в системе сигналов и выбор наилучших методов их обработки после приема.

Естественно, системы радиоакустического зондирования атмосферы, как особый класс радиотехнических устройств, также требуют решения задачи синтеза сигналов и устройств их обработки.

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.

Для РАЗ процесс рассеивания электромагнитного сигнала на акустической посылке сопровождается значительным изменением формы излучаемого колебания. В результате принимаемый радиосигнал существенно отличается от опорного, подаваемого на коррелятор. Использование классических алгоритмов обработки в радиоакустических системах приводит к возникновению систематических погрешностей определения параметров атмосферы.

Следует заметить, что в случае использования простых акустических импульсов и точном выполнении условия Брэгга $q = 0$, где q – параметр расстройки условия Брэгга, применение классических алгоритмов обработки не приводит к возникновению систематических погрешностей. 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 .

На практике использование простых звуковых сигналов для РАЗ требует подстройки частоты акустического или электромагнитного сигналов под условие Брэгга, что позволяет уменьшить погрешность измерения параметров атмосферы, но, в то же время, существенно усложняет систему и процесс зондирования.

Использование сложных зондирующих сигналов в системах радиоакустического зондирования атмосферы, направленное на устранение процесса подстройки частоты колебаний для выполнения условия Брэгга, связано с невозможностью применения классических алгоритмов обработки. Причиной этого есть искажение амплитудной и фазовой структуры рассеянного на сложной акустической посылке электромагнитного колебания. Спектр рассеянного сигнала становится несимметричным. Вследствие этого принимаемый сигнал существенно отличается от излучаемого, а значит, использование простых

корреляционных приемников с одним опорным сигналом вызывает систематическую ошибку измерения скорости звука.

Таким образом, как следует из изложенного, применяемые на сегодняшний момент 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.

Работа радиоакустических систем основана на измерении величины доплеровского смещения частоты рассеянного на акустической посылке электромагнитного сигнала. Поскольку скорость движения звука c_s в атмосфере зависит от параметров атмосферы, таких как температура, скорость ветра, давление, влажность и т.д., то, по сути, в приемнике выполняется оценка значения c_s . С другой стороны скорость звука c_s может быть определена по значению величины расстройки условия Брэгга q , при котором формируется рассеянный сигнал, по следующей формуле

$$c_s = \frac{2\pi f_s}{4\pi f / c - q},$$

где f_s – частота акустического сигнала, f – частота радиосигнала, c – скорость света.

Далее показано решение задачи оценки величины расстройки условия Брэгга q , при котором был сформирован рассеянный сигнал.

Форму принимаемого сигнала в РАЗ можно определить по функции рассеяния

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

где $q = 2k_e - k_s$ – параметр расстройки условия Брэгга; $k_s = 2\pi f_s / c_s$ – волновое число для звука; $k_e = 2\pi f / c$ – волновое число; r – смещение сигналов по координате «дальность»; $E(2r' - r)$ – пространственная огибающая радиосигнала; $S(r')$ – пространственная огибающая акустического сигнала.

Из теории радиосистем известно, что синтез оптимального математического оператора измерительной системы и формирование оптимального решения основывается на использовании понятия функции правдоподобия. Если обозначить принимаемый радиоакустический сигнал как $F_y(r, q_0)$, то функцию правдоподобия можно будет записать в виде $w(F_y / c_s)$. Величина q_0 в обозначении принимаемого колебания показывает, что рассеянный сигнал соответствует некоторой заданной величине значения условия Брэгга. Функции $X(F_y / c_s)$, монотонно связанные с $w(F_y / c_s)$, именуемые достаточными статистиками, могут быть использованы при синтезе алгоритмов оценивания параметров принимаемых сигналов.

Следующая формула определяет плотность вероятности параметра q во входной реализации

$$p(F_y(r, q_0) | q) = C_y \exp\left[-\frac{2z(q) - E(q)}{N_0}\right], \quad (2)$$

где $z(q) = \int_0^R F_y(r, q_0) \cdot F^*(r, q) dr$ – корреляционный интеграл принятой реализации $F_y(r, q_0)$ с опорным сигналом $F(r, q)$; $E(q) = \int F^2(r, q) dr$ – энергия рассеянного сигнала $F(r, q)$; C_y – коэффициент, зависящий от $F_y(r, q_0)$.

Таким образом, определение значения параметра q должно происходить путем нахождения максимума интеграла $z(q)$, который достигается в точке наибольшего сходства принятого $F_y(r, q_0)$ и опорного $F(r, q)$ сигналов.

Как видно из формулы (2), плотность вероятности параметра q в принятой реализации $F_y(r, q_0)$ определяется значением комплексного корреляционного интеграла $z(q)$. Таким образом, устройства обработки расдаров должны формировать корреляционный интеграл следующего вида

$$z(q) = \left| \int_0^R F_y(r, q_0) \cdot F^*(r, q) dr \right|. \quad (3)$$

Модуль значения интеграла (3) по сути, есть значением величины выходного эффекта устройств обработки для некоторой реализации входного рассеянного сигнала $F_y(r, q_0)$ и опорных сигналов, заданных функцией $F(r, q)$.

В общем случае результат обработки принятого радиосигнала будет зависеть не только от величины расстройки условия Брэгга, но и от взаимного временного смещения принятого и опорного колебаний. Поэтому интерес представляет анализ некоторой функции, которая будет характеризовать 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 дальности r , которая с временным запаздыванием сигналов связана соотношением $r = ct$, где c – скорость света, t – время.

Такой функцией для устройств обработки радиоакустических систем может выступать функция неопределенности, которая задается следующим выражением

$$\psi(r_d, q) = \int_{-\infty}^{\infty} F_y(r, q_0) \cdot F^*(r - r_d, q) dr, \quad (4)$$

где r_d – относительное смещение принимаемого и опорного сигналов по дальности.

Введенное понятие функции неопределенности для радиоакустических систем отличается от ее определения в радиолокации. Классическая функция неопределенности характеризует разрешающую способность радиолокационной станции по дальности и радиальной скорости. Тело неопределенности будет иметь один и тот же вид для заданного зондирующего сигнала.

Как видно из (4), 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 согласно функции рассеяния (1) используемых зондирующих акустического и электромагнитного колебаний.

Графический вид функции неопределенности – тело неопределенности, представляет собой модуль интеграла формулы (4). Как нетрудно заметить, характер тела неопределенности будет меняться в зависимости от величины взаимной расстройки условия Брэгг-

га, относительного смещения сигналов вдоль пространственной координаты и значения величины q_0 , при которой формируется рассеянный сигнал. Существенным отличием введенной функции неопределенности есть то, что для различных значений величины расстройки условия Брэгга q , 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 характеру его центрального и боковых пиков, можно судить о потенциальной точности определения параметров атмосферы для выбранных зондирующих радиоакустических сигналов.

На рис. 1 и 2 представлены рисунки тел неопределенности для пары акустического и электромагнитного сигналов с прямоугольной огибающей.

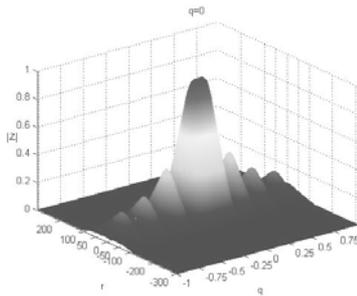


Рис. 1. Тело неопределенности при $q_0 = 0$

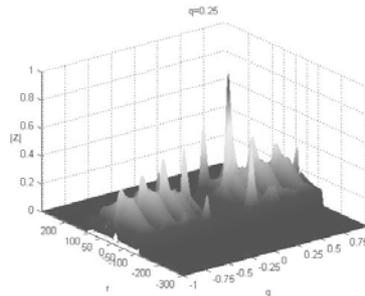


Рис.2. Тело неопределенности при $q_0 = 0.25$

По рисункам наглядно видно как существенно изменяется вид тела неопределенности для одного и того же радиоакустического сигнала при изменении величины расстройки условия Брэгга q_0 , при котором формируется рассеянный сигнал. С увеличением q_0 тело неопределенности становится более изрезанным, а ширина главного пика уменьшается, что характеризует повышения точности определения параметров атмосферы с использованием предложенного алгоритма для данных сигналов с увеличением q_0 . Это связано с тем, что при увеличении величины расстройки условия Брэгга, при которой формируется рассеянный сигнал, искажается как огибающая, так и фазовая структура колебания. Поэтому главный максимум тела рассеяния при $q_0 \neq 0$ имеет более острый пик, чем в точке выполнения условия Брэгга $q_0 = 0$.

Процедура оценки параметра q в соответствии с предложенным алгоритмом требует вычисления совокупности модулей корреляционных интегралов (4) для некоторой фиксированной реализации входного сигнала $F_y(r, q_0)$ и множества опорных сигналов $F(r, q)$. Практическая реализация предложенного алгоритма обработки требует конечно-го числа дискретных изменений величины q в опорном сигнале. Как можно заметить из (1) количество дискретных значений параметра q должно соответствовать количеству опорных сигналов, изменяющих свою амплитудную и фазовую структуру при изменении q . Следовательно и точность определения параметров атмосферы с помощью простых радиоакустических сигналов с прямоугольной огибающей выше для значений $q_0 \neq 0$.

Предложенный алгоритм обработки радиоакустических сигналов устраняет систематические погрешности измерения, позволяет повысить точность определения параметров атмосферы для РАЗ. На основе анализа тел неопределенности тех или иных колебаний можно провести оценку перспективности использования их в качестве зондирующих сигналов для радиоакустических систем еще на этапе проектирования без применения натурального моделирования, что удешевляет и ускоряет процесс разработки.