

## КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

### Введение

Метод радиоакустического зондирования (РАЗ) атмосферы в течение длительного времени развивался на базе доплеровской радиолокации пакета акустических волн, распространяющегося в атмосфере в направлении зондирования. Однако ряд особенностей, присущих только методу РАЗ и существенно отличающих такой метод от доплеровской радиолокации точечных целей, заметно затруднил внедрение его в практику метеонаблюдений. В частности, это необходимость непрерывного поддержания условия Брэгга при распространении акустического пакета по трассе зондирования; при этом достигается потенциальная точность регистрации температуры воздуха [1]. Существование высотного хода температуры воздуха в атмосфере, особенно заметного в пограничном ее слое, приводит к нарушению условия Брэгга, в результате чего снижается эффективность метода.

Известные способы поддержания условия Брэгга либо снижают оперативность регистрации профиля [2, 3] либо усложняют техническую реализацию метода [4]. Одним из способов, позволяющих в какой-то мере избежать трудности в поддержании условия Брэгга по трассе зондирования, является использование широкополосного акустического излучения [5]. Авторами работы [6] предложен корреляционный метод обработки отраженного от акустического пакета радиосигнала, предположительно позволяющий повысить эффективность метода: снизить зависимость погрешности регистрации профиля температуры от точности поддержания условия Брэгга и ускорить регистрацию профилей. Информацию о скорости акустического пакета в этом способе несет параметр расстройки условия Брэгга  $q$ . В отличие от доплеровского способа обработки сигналов, для которого разработаны и апробированы в экспериментах методики зондирования и алгоритмы извлечения метеорологической информации из данных РАЗ [2], для корреляционной обработки эти практические вопросы не решены.

Данная работа посвящена разработке методик и принципов построения аппаратуры обработки в системах температурного радиоакустического зондирования атмосферы.

### Разработка способов регистрации вертикальных профилей температуры

Для радиоакустических систем функция неопределенности, аналог известной из радиолокации, представляет собой корреляционный интеграл рассеянного при некотором значении параметра расстройки условия Брэгга сигнала  $F_e$  и предварительно заданного опорного колебания  $F$  [6]. В таких системах для корректной обработки опорный сигнал должен выбираться согласно функции рассеяния используемых зондирующих акустического и электромагнитного колебаний [7]. Графический вид функции неопределенности – тело неопределенности – представляет собой модуль интеграла

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

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

Следует отметить, что характер тела неопределенности будет меняться в зависимости от взаимной расстройки условия Брэгга, относительного смещения сигналов вдоль пространственной координаты и значения величины  $q_0$ , при которой формируется рассеянный сигнал. Для различных значений величины  $q_0$ , при котором формируется рассеянный сигнал, струк-

тура тела неопределенности будет различной, даже в случае использования одной и той же пары зондирующих акустического и электромагнитного колебаний, что является существенным отличием введенной функции неопределенности от классической. 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.

Процедура оценки параметра  $q$  в соответствии с предложенным алгоритмом требует вычисления совокупности модулей корреляционных интегралов (1) для некоторой фиксированной реализации входного сигнала  $F_e(r, q_0)$  и множества опорных сигналов  $F(r, q)$ . Максимальное значение модуля корреляционного интеграла будет соответствовать значению искомой оценки параметра  $q$ . Поскольку характер опорного сигнала  $F(r, q)$  будет различным для различных значений параметра  $q$  даже в случае использования одного и того же зондирующего радиоакустического сигнала, структура устройства обработки должна содержать совокупность корреляторов с различными опорными сигналами. Практическая реализация предложенного алгоритма обработки требует конечного числа дискретных изменений величины  $q$  в опорном сигнале. При этом количество дискретных значений параметра  $q$  должно соответствовать количеству опорных сигналов, изменяющих свою амплитудную и фазовую структуру при изменении  $q$ . Следовательно, число каналов обработки  $N$  при таком алгоритме равно числу оцениваемых значений  $q$ , или, в общем случае, числу значений  $q$ , неправильное оценивание которых недопустимо.

Применяя корреляционную обработку сигналов системы РАЗ для регистрации вертикальных профилей температуры, скорость акустического пакета в атмосфере можно найти по формуле [6]

$$C_n = \frac{2\pi f_n}{\frac{4\pi f}{c} - q}, \quad (2)$$

где  $f_n$  – частота синусоидального заполнения акустического пакета;  $f$  – рабочая частота радиолокатора;  $c$  – скорость распространения радиоволн;  $q$  – параметр расстройки условия Брэгга.

Используя (2), можно найти выражение для расчета температуры воздуха:

$$T, K = \left[ \frac{2\pi f_n}{a \left( \frac{4\pi f}{c} - q \right)} \right]^2, \quad (3)$$

В формуле (3) предполагается, что вертикальная составляющая скорости ветра, во-первых, существенно ниже скорости звука и ею можно пренебречь, а, во-вторых, является знакопеременной величиной [8]. Выполнив в эксперименте оценку параметра расстройки  $q$  по всей трассе зондирования, можно провести регистрацию вертикального профиля температуры воздуха. Методика корреляционной обработки результатов температуры радиоакустического зондирования атмосферы изложена в работе [9] и заключается в следующем.

Рассеянные акустическим импульсом электромагнитные колебания принимают, усиливают, в дальнейшем последовательно перемножают в корреляторе с сигналами, сформированными в соответствии с функцией рассеяния, которая имеет вид

$$F(r, q) = \int E(2r' - r) S^*(r') e^{jqr'} dr', \quad (4)$$

где  $r$  – пространственная расстройка (смещение) сигналов;  $E, S$  – комплексные огибающие колебаний [10]. Затем для каждого уровня трассы зондирования последовательно сравнива-

ют амплитуду выходных сигналов коррелятора между собой и по результатам сравнения в компараторе амплитуд выходных сигналов коррелятора с каждого уровня трассы выделяют максимальный из них. Этот сигнал и определяет значение параметра расстройки  $q$  на данном уровне трассы зондирования. При использовании выражения (3) становится возможным, если известны технические параметры зондирующей системы и некоторые физические параметры атмосферы, провести расчет значения температуры атмосферного воздуха на этом уровне.

Однако традиционная корреляционная обработка при ее использовании для радиоакустических сигналов не позволяет получить потенциальную точность регистрации вертикальных профилей температуры воздуха. Причиной возникновения погрешности температуры при такой обработке является существование зависимости выходного сигнала коррелятора от выходных сигналов генераторов опорных сигналов, которые формируются в соответствии с функцией рассеяния (4). Как известно, например [11], оптимальная аппаратура обработки приемного устройства радиолокационной станции формирует сигнал, который имеет две составляющие: первая – отвечает за энергию принимаемого сигнала, вторая – за степень корреляции опорного напряжения и принимаемого сигнала. При радиоакустическом зондировании атмосферы зависимость мощности принимаемого сигнала от условия Брэгга описывается выражением вида  $E(q) = \int F^2(r, q) dr$  (5), вследствие чего первая составляющая принимаемого сигнала с заданного уровня трассы зондирования может изменяться от того, в какой мере на этом уровне выполняется условие Брэгга. В соответствии с устоявшейся методикой многоканальной корреляционной обработки радиолокационных сигналов вообще при радиоакустическом зондировании на один вход многоканального коррелятора необходимо подать принимаемый сигнал с избранного уровня трассы зондирования, и, одновременно, на 1, 2, ... N других входов коррелятора следует подать сигналы генератора опорных сигналов, энергия которых изменяется в соответствии с функцией  $E(q) = \int F^2(r, q) dr$ . Поскольку в общем случае вид огибающей энергии этих сигналов задается подобной резонансной кривой, то выходные напряжения сигналов коррелятора, или входные напряжения компаратора, будут зависеть не только от взаимной корреляции опорного напряжения и принимаемого сигнала (что является решающим для принятия положительного решения оптимального обнаружителя), но и от амплитуд выходных сигналов генератора опорных сигналов, которые должны отвечать функции рассеивания. В таком случае компаратор может ошибочно зафиксировать максимальный сигнал с выхода коррелятора, что приведет к возникновению ошибки определения  $q$ , и, соответственно, к погрешности измерения температуры на данном уровне трассы зондирования. Избежать возникновения погрешности подобного рода можно, исключив влияние амплитуды выходного сигнала генератора опорных сигналов на амплитуды выходных сигналов коррелятора с каждого уровня трассы зондирования, корректируя выходной сигнал каждого канала коррелятора сигналом, сформированным в соответствии с функцией  $E(q) = \int F^2(r, q) dr$  [12].

Для корреляционной обработки радиоакустических сигналов необходимо формировать количество опорных сигналов, соответствующее количеству каналов. Число таких каналов определяется разрешающей способностью по значению  $q$ , в свою очередь зависящего от вертикального градиента температуры воздуха. Для регистрации вертикальных профилей температуры воздуха с разрешением по слоям, приемлемым для практики метеонаблюдений в пограничном слое, число каналов корреляционной обработки может достигать 80 [13].

С целью оптимизации аппаратуры РАЗ количество каналов корреляционной обработки принятых сигналов можно сократить до двух. Для этого необходимо обеспечить работу систем радиоакустического зондирования в следящем режиме, который используется в классической радиолокации. Особенностью классической следящей системы является использование значения оцениваемых параметров, определенных на предыдущих циклах наблюде-

ния, что позволяет упростить оптимальную схему обработки принимаемых сигналов [14]. Алгоритм работы классической следящей системы отвечает уравнению

$$\int_0^T x(t)u(t, a - \Delta a)dt - \int_0^T x(t)u(t, a + \Delta a)dt = 0, \quad (6)$$

где  $u(t, a - \Delta a)$  та  $u(t, a + \Delta a)$  – весовые функции [15].

Для работы в следящем режиме необходимо в системах РАЗ реализовать схему классической следящей системы, которая учитывает особенности формирования отраженного радиосигнала при радиоакустическом зондировании. Следящая система должна отвечать уравнению (6), где в качестве весовых функций должна выступать функция рассеяния.

Рассмотрим алгоритм работы, соответствующий уравнению (6), в случае его применения при радиоакустическом зондировании для слежения по параметру  $q$ . Известно, что функция правдоподобия параметра  $q$  при радиоакустическом зондировании имеет один четко выраженный максимум (рис.1), поэтому, если максимум наблюдается, например, при  $q = q_0$ , то существуют такие значения параметра  $q$  как

$$q_1 = q_0 - \Delta \text{ и } q_2 = q_0 + \Delta, \quad (7)$$

при которых функция правдоподобия имеет одинаковые значения (рис.2), то есть, если сигнал  $F(r, q_0)$ , который принимается с данного уровня трассы зондирования, характеризуется значением параметра  $q = q_0$ , то корреляционные интегралы принимаемого сигнала и опорных сигналов, сформированных с параметрами  $q_1$  и  $q_2$ , будут равными по значениям

$$\int_0^T F(r, q_0)F(r, q_1)dr = \int_0^T F(r, q_0)F(r, q_2)dr, \quad (8)$$

где  $F(r, q_1)$  и  $F(r, q_2)$  – опорные сигналы, сформированные с использованием функции рассеяния.

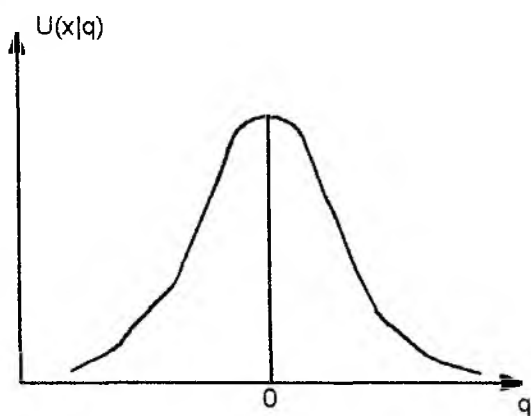


Рис. 1. Функция правдоподобия параметра  $q$  в случае если выполняется условие Брэгга при формировании рассеянного радиосигнала

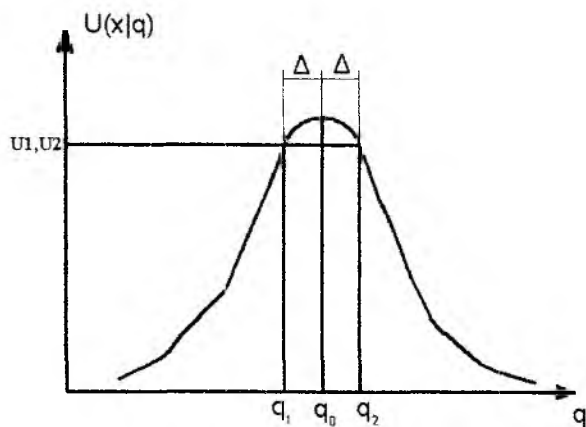


Рис. 2. Значения функции правдоподобия  $U_1, U_2$  в случае величин параметра расстройки условия Брэгга  $q_1$  и  $q_2$

Таким образом, принимая сигнал  $F(r, q_m)$  со следующего уровня трассы зондирования, который характеризуется, например, параметром  $q = q_m$ , корреляционные интегралы сигнала, который принимается с последующего уровня трассы зондирования, и опорных сигналов, сформированных с параметрами  $q_1$  и  $q_2$ , будут отличаться на некоторое значение (рис.3)

$$x = \int_0^T F(r, q_m) F(r, q_1) dr - \int_0^T F(r, q_m) F(r, q_2) dr, \quad (9)$$

которое зависит от того, на сколько параметр  $q_m$  следующего уровня трассы зондирования отличается от параметра  $q_0$  на предыдущем уровне трассы зондирования, то есть  $x$  зависит от значения  $y = q_m - q_0$  (рис. 3), где  $y$  – это разница между параметрами  $q$ , которыми характеризуются сигналы, принятые с двух соседних уровней трассы. Зная зависимость  $x(y)$  (рис. 4) и значение параметра  $q$  на данном уровне трассы зондирования, можно оценить значение параметра  $q$  на следующем уровне трассы, для чего, определив значение  $x$ , необходимо выбрать соответствующее значение  $y$  на зависимости  $x(y)$  и рассчитать по формуле

$$q_m = q_0 + y, \quad (10)$$

где  $q_0$  – это значения параметра  $q$  на данном уровне трассы зондирования,  $q_m$  – значения параметра  $q$  на следующем уровне.

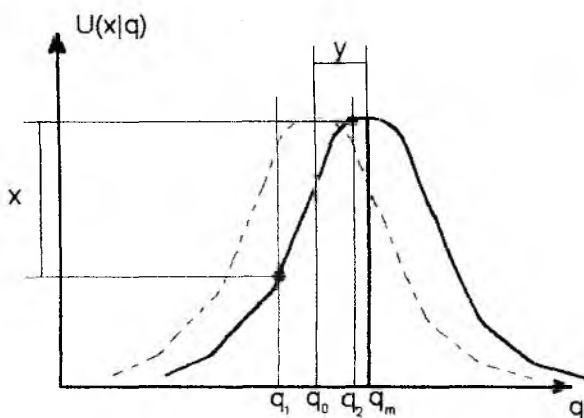


Рис. 3. Разница  $x$  между корреляционными интегралами принимаемого сигнала  $F(r, q_m)$  и опорными сигналами  $F(r, q_1)$  и  $F(r, q_2)$

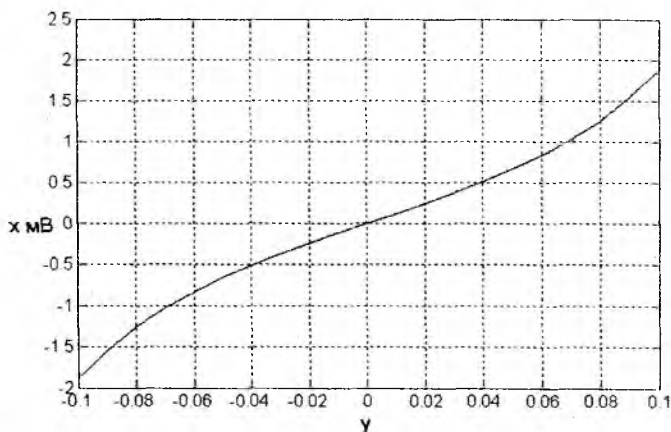


Рис.4. Пример зависимости  $x(y)$  в случае использования зондирующих сигналов с прямоугольными огибающими

Определив  $q_m$ , необходимо найти следующие значения параметров  $q$  двух опорных сигналов  $q_{1m}$  та  $q_{2m}$ , для которых верно уравнение

$$\int_0^T F(r, q_m) F(r, q_{1m}) dr - \int_0^T F(r, q_m) F(r, q_{2m}) dr = 0, \quad (11)$$

и которые используются для оценки  $x$  на следующем уровне трассы, аналогично формулам (7),  $-q_{1m} = q_m - \Delta$  и  $q_{2m} = q_m + \Delta$ .

Таким образом, происходит подстройка опорных колебаний при обработке сигнала с каждого последующего уровня трассы зондирования, используя значение  $q$ , определенное для предыдущего уровня трассы, чтобы оценивать разницу между параметрами  $q$  соседних уровней.

### Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Для регистрации вертикальных профилей температуры воздуха аппаратурой РАЗ с корреляционной обработкой отраженных сигналов и достаточным для практики метеонаблюдений разрешением по высоте необходимо заметно увеличивать количество каналов обработки по сравнению с числом каналов при доплеровской обработке.

2. Для оптимизации алгоритма и аппаратуры корреляционной обработки таких сигналов целесообразно применение схем слежения за параметром расстройки условия Брэгга  $q$ , которые позволят существенно упростить схему обработки принимаемых сигналов.

**Список литературы.** 1. *Каллистратова, М.А., Кон, А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М. : Наука, 1985. – 195с. 2. *Оценка погрешностей двух методик радиоакустического температурного зондирования атмосферы. Сообщение 1. Разработка эксперимента / Бабкин С.И., Куценко В.И., Максимова Н.Г. и др. // Радиотехника. – Харьков : Вища шк. – 1987. – Вып. 82. – С. 78-83.* 3. *Оценка погрешностей двух методик радиоакустического температурного зондирования атмосферы. Сообщение 2 / Бабкин С.И., Куценко В.И., Максимова Н.Г. и др. // Радиотехника. – Харьков : Вища шк. – 1988. – Вып. 84. – С. 98-105.* 4. *Горелик, А.Г., Жежерин, В.Р., Каллистратова, М.А. и др.* Оперативные измерения профиля температуры методом радиоакустического зондирования с автоматической подстройкой под условие Брега // XIV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн : тез. докл., Ленинград, октябрь 1984. – М. : Наука, 1984. – Ч. 2. – С.276-278. 5. *Патент України № 89342.* Спосіб дистанційної реєстрації вертикальних профілів температури повітря радіоакустичним зондуванням атмосфери / Карташов В.М., Бабкін С.І., Волох А.В., Семеняка А.В., Пашенко С.В., Яценко П.О. Опубл. бюл.№1 від 11.01.2010 р. 6. *Карташов, В.М., Волох, А.В., Радионова, В.В.* Тела неопределенности зондирующих сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. – Вып. 150. – С. 94 -99. 7. *Карташов, В.М.* Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы. – Харьков : ХНУРЭ, 2011. – 233 с. 8. *Хргиан, А.Х.* Физика атмосферы. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 647 с. 9. *Патент України № 89344.* Спосіб радіоакустичного зондування атмосфери для дистанційної реєстрації вертикального профіля температури повітря / Карташов В.М., Бабкін С.І., Волох А.В., Семеняка А.В., Пашенко С.В., Яценко П.О. Опубл. бюл.№1 від 11.01.2010 р. 10. *Карташов, В.М.* Розвиток теорії та удосконалення систем радіоакустичного і акустичного зондування атмосфери : автореф. дис. д-ра техн. наук. – Харків, 2003.- С.13-14. 11. *Теоретические основы радиолокации / под ред. В.Е.Дулевича – М. : Сов. радио, 1978. – С.70.* 12. *Патент України № 97612.* Спосіб радіоакустичного зондування атмосфери для реєстрації вертикального профілю температури / Карташов В.М., Бабкін С.І., Пашенко С.В., Куля Д.М. Опубл. бюл.№ 4 від 27.02.2012 р. 13. *Фалькович, С.Е., Хомяков, Э. Н.* Статистическая теория измерительных радиосистем. – М. : Радио и связь, 1981. – 287с. 14. *Дымова, А.И., Альбац, М.Е., Бонч-Бруевич, А.М.* Радиотехнические системы / под ред. А.И. Дымовой : учебник для вузов. – М. : Сов. радио, 1975. – 440 с.