

АЛГОРИТМ АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА СИГНАЛА РАДИОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. М. Карташов

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*

Контактный тел. 097-736-06-65

E-mail: res@kture.kharkov.ua

Д. Н. Куля

Аспирант*

Контактный тел. 050-293-81-60

E-mail: d.kylyay@mail.ru

С. В. Пащенко

Инженер*

E-mail: res@kture.kharkov.ua

*Кафедра радиоэлектронных систем

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

У статті сформульовані особливості обробки сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери і їх основні недоліки, які ведуть до похибок у визначенні температури. Розглядається порядок усунення систематичної похибки і оптимізації радіоакустичної апаратури

Ключові слова: зондування, атмосфера, похибка, оптимізація

В статье сформулированы особенности обработки сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы и их основные недостатки, которые ведут к погрешностям в определении температуры. Рассматривается порядок устранения систематической погрешности и оптимизации радиоакустической аппаратуры

Ключевые слова: зондирование, атмосфера, погрешность, оптимизация

The article defines the features of signal processing algorithms of atmospheric radio acoustic sounding systems and describes their main drawbacks, which lead to systematic errors in determining temperature. The article describes how to troubleshoot the systematic error and the optimization procedure of radio acoustic sounding equipment is shown

Keywords: sensing, atmosphere, error, optimization

1. Введение

Системы радиоакустического зондирования (РАЗ) атмосферы предназначены для измерения температуры атмосферы.

Для этого в системах РАЗ осуществляется оценка скорости звука, которая функционально связана с температурой атмосферы [1].

В настоящее время в системах РАЗ атмосферы реализованы схемы многоканальной корреляционной обработки радиосигнала, которые выделяют и измеряют доплеровскую частоту колебаний, по которой производится оценка скорости звука.

Однако оценки скорости звука при использовании таких схем в системах РАЗ атмосферы характеризуются наличием значительных по величине систематических погрешностей (по температуре величина погрешности достигает единиц градусов) [1,2,3], а для формирования оценок скорости звука необходимо генерировать количество опорных сигналов соответствующее количеству каналов коррелятора.

В статье рассматривается порядок устранения систематической погрешности и уменьшения количества опорных сигналов, которые необходимо формировать для корреляционной обработки.

2. Разработка алгоритма оценки скорости звука в системах РАЗ

Принцип работы систем РАЗ состоит в том, что в атмосферу излучаются акустический и радиосигнал. Акустическая посылка создает в атмосфере систему неоднородностей. Электромагнитный сигнал отражается от системы неоднородностей и принимается радиоданной. По отраженному радиосигналу оценивается скорость звука и вычисляются неизвестные параметры атмосферы по формуле

$$c_s = a_k \sqrt{T_0} + \vec{V} \vec{n}$$

где \vec{V} – вектор скорости ветра; $\vec{n} = \vec{k}_s / |\vec{k}_s|$; $\vec{k}_s = 2\pi/\lambda_s$ – волновой вектор; a_k – коэффициент для воздуха, который слабо зависит от параметров атмосферы и на практике принято считать $a_k = \text{const}$.

При построении схемы, позволяющей оценить скорость звука по отраженному радиосигналу, в существующих системах РАЗ атмосферы предполагается, что у радиосигнала, отражающегося от акустической посылки, изменяется только частота. Поэтому для оценки скорости звука используют классическую схему многоканальной корреляционной обработки (рис. 1), которая измеряет доплеровский сдвиг частоты отраженного радиосигнала т.к. опорные сигналы

каждого канала коррелятора совпадают по форме с излученным радиосигналом, отличаясь от него лишь несущей частотой.

Принцип работы классической схемы описывается следующим выражением:

$$Z(f_i, f_m) = \frac{2}{N} \int_0^T \xi(t, f_m) \cdot s(t, f_n) dt, \quad i = \overline{1, n},$$

где $\xi(t, f_m)$ – принимаемый радиосигнал с некоторой неизвестной частотой f_m ; $s(t, f_n)$ – опорное колебание с частотой f_n .

В действительности при отражении радиосигнала от акустической посылки его форма не будет изменяться только в случае, если будет соблюдаться условие Брэгга

$$\lambda_e = 2\lambda_s \sin \theta,$$

где λ_e – длина электромагнитной волны; λ_s – длина волны акустического колебания; θ – угол между фронтом акустической волны и направлением распространения радиоволны. В остальных случаях процесс рассеяния радиосигнала на акустической посылке сопровождается значительным изменением формы излучаемого радиосигнала, который приобретает в процессе рассеяния дополнительную амплитудную и угловую модуляцию [1,4].

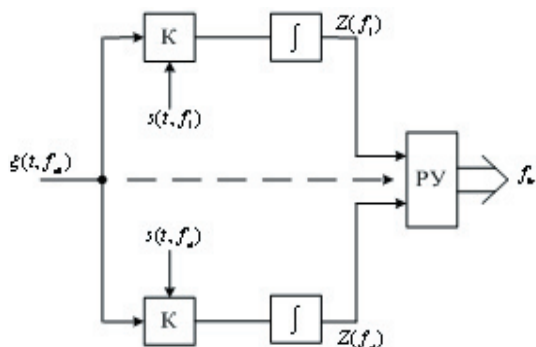


Рис. 1. Корреляционный приемник для оценки доплеровского сдвига частоты

В результате изменения формы радиосигнала в процессе рассеяния, оценки скорости звука, получаемые в соответствии с используемыми в системах РАЗ алгоритмами обработки сигналов, основанных на измерении доплеровской частоты колебаний, характеризуются наличием значительных по величине систематических погрешностей.

Форма отраженного от акустической посылки радиосигнала зависит от скорости звука в атмосфере, т.е. при определенной скорости звука будет формироваться определенная структура отраженного радиосигнала. Определив формы отраженных радиосигналов в зависимости от скорости звука можно производить оценку скорости звука, при которой был сформирован рассеянный радиосигнал в атмосфере, путем сравнения формы принимаемого радиосигнала с формами радиосигналов, свойственными для разной скорости звука. Такое сравнение можно произвести, воспользовавшись схемой многоканальной корреляционной

обработки, где в качестве опорных сигналов каналов коррелятора необходимо использовать сигналы, формы которых соответствуют формам отраженных радиосигналов, формирующихся при разной скорости звука. В таком случае становится возможным устранение систематической погрешности в оценках скорости звука, присущей алгоритмам обработки сигналов, которые основаны на измерении доплеровской частоты колебаний.

Форма электромагнитного сигнала рассеянного на акустической волновой посылке определяется и описывается совместной функцией рассеяния (1) используемых звукового и радиосигнала [2,3].

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

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

При разных фиксированных значениях параметра q форма кривой функции $F(r, q)$ различная и соответствует форме рассеянного в атмосфере радиосигнала при скорости звука, определяемой выражением:

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

где f_s – частота звука; f – частота радиосигнала; c – скорость распространения радиоволн.

Таким образом, функция рассеяния (1) позволяет определить форму, которую будет иметь рассеянный в атмосфере радиосигнал при различных скоростях звука.

Формируя опорные сигналы с использованием функции рассеяния, которая определяет форму электромагнитного сигнала рассеянного на акустической волновой посылке и, сравнивая с ними принимаемый из атмосферы рассеянный радиосигнал, с целью определения опорного сигнала наиболее идентичного принимаемому сигналу, можно оценить скорость звука, при которой был сформирован принимаемый радиосигнал. Оценка скорости звука в таком случае становится возможной, т.к. для всех опорных сигналов известны значения параметра q , при которых они были сформированы, где параметр q однозначно функционально связан со скоростью звука выражением (2).

Задачу сравнения сигналов, сформированных с использованием функции рассеяния, с принимаемым из атмосферы сигналом для оценки скорости звука можно реализовать, воспользовавшись схемой многоканальной корреляционной обработки, в которой в качестве опорных сигналов корреляторов необходимо применять сигналы, сформированные с использованием функции рассеяния. В таком случае в схеме многоканальной корреляционной обработки будет осуществляться вычисление корреляционных интегралов принимаемого и опорных сигналов. Значения этих интегралов будут зависеть от степени сходства формы принимаемого сигнала с формами опорных

сигналов в случае, когда энергии опорных сигналов будут равны между собой. Если энергии опорных сигналов не будут равны между собой, то значения корреляционных интегралов будут зависеть не только от степени сходства форм опорного и принимаемого сигналов, но и от энергии опорного сигнала.

Опорные сигналы, сформированные с использованием функции рассеяния, имеют различную энергию в зависимости от значения параметра q , поэтому значения корреляционных интегралов в схеме обработки будут зависеть не только от степени сходства форм опорного и принимаемого сигналов, но и от энергии опорного сигнала, что будет вносить дополнительную неточность в оценку скорости звука. Для устранения такой неточности значения корреляционных интегралов, представляющих собой выходной сигнал схемы корреляционной обработки сигналов, необходимо подвергать коррекции согласно функции $E(q) = \int F^2(r, q) dr$, где $F(r, q)$ – опорный сигнал.

Поэтому, улучшенное устройство обработки радиосигнала, устраняющее систематическую ошибку, присущую алгоритмам обработки сигналов, основанных на измерении доплеровской частоты колебаний (рис. 1), представляет собой схему (рис. 2), состоящую из N -канального коррелятора, где в качестве опорных сигналов используются колебания, сформированные согласно функции рассеяния. После коррелятора стоит N -канальное устройство коррекции, подвергающее сигнал с коррелятора коррекции согласно функции $E(q) = \int F^2(r, q) dr$. После устройства коррекции стоит решающее устройство, которое определяет канал с наибольшим из полученных после коррекции значением сигнала за счет чего принимается решение о величине параметра q , которым характеризуется опорный сигнал, наиболее близко совпавший по форме с принимаемым сигналом. Оценив q , определяется скорость звука по формуле (2).

Таким образом, по сравнению с алгоритмами обработки сигналов, основанных на измерении доплеровской частоты колебаний, схема обработки сигналов (рис. 2) учитывает особенности отражения радиосигнала от акустической посылки за счет применения опорных сигналов, сформированных с использованием функции рассеяния и введения коррекции согласно функции $E(q) = \int F^2(r, q) dr$, что повышает качество оценок скорости звука, при использовании такой схемы в системах РАЗ атмосферы.

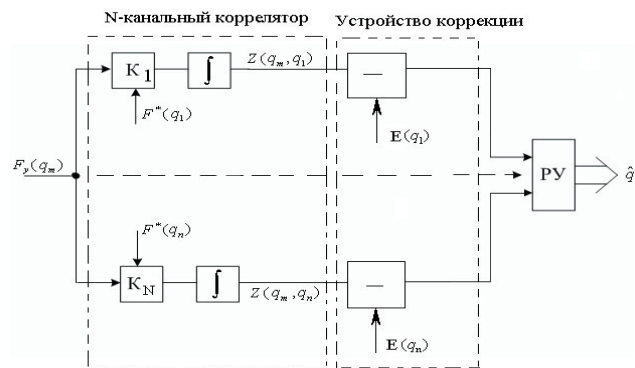


Рис. 2. Схема обработки без систематической погрешности

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.

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.

3. Следящая схема в системах РАЗ

В классических измерительных радиосистемах помимо оптимальных приемников, представляющих собой схемы многоканальной корреляционной обработки, существуют следящие измерительные схемы (схемы автосопровождения), которые представляют собой упрощенную оптимальную схему обработки сигнала, где упрощение достигается за счет использования значения оцениваемого параметра, определенного на предыдущих циклах наблюдения [5].

Работа классического следящего измерителя состоит в том, что когда на его вход поступает радиосигнал $x(t, a)$ с неизвестным значением параметра a , который необходимо оценить, в измерителе сравнивается принимаемый радиосигнал с опорными сигналами, сформированными с такими значениями оцениваемого параметра, при которых будет выполняться равенство

$$\int_0^T f(t, a_0) u(t, a_1 - \Delta a) dt - \int_0^T f(t, a_0) u(t, a_1 + \Delta a) dt = 0, \quad (3)$$

где $f(t, a_0)$ – радиосигнал принимаемый на предыдущем цикле измерения, $u(t, a_1 - \Delta a)$ и $u(t, a_1 + \Delta a)$ – опорные сигналы текущего цикла измерения.

В результате в измерителе формируется разность x

$$\int_0^T x(t, a) u(t, a_1 - \Delta a) dt - \int_0^T x(t, a) u(t, a_1 + \Delta a) dt = x. \quad (4)$$

По разности x определяется величина отличия оцениваемых параметров сигналов $f(t, a_0)$ и $x(t, a)$, исходя из которой, используя значения искомого параметра на предыдущем цикле измерения, вычисляется значение искомого параметра на текущем цикле измерения. Далее, используя найденное значение искомого параметра, вычисляются параметры опорных сигналов для следующего цикла измерения, и далее процесс повторяет описанный выше.

Для вычисления величины x схема следящего измерителя включает дискриминатор (рис. 3) [6], который вычисляет корреляционные интегралы принимаемого и опорных сигналов и сравнивает их между собой.

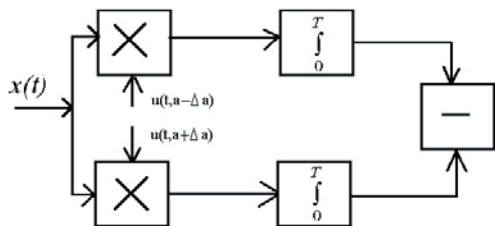


Рис. 3. Дискриминатор

Если сравнить следящую схему измерения со схемой измерения, реализованной на основе многоканальной корреляционной обработки, то из сравнения видно, что следящая схема оценки параметров более простая, т.к. в ней используется один двухканальный или два одноканальных коррелятора и формируется соответственно два опорных сигнала.

В настоящее время для оценки параметров атмосферы в системах РАЗ применяются алгоритмы многоканальной корреляционной обработки, основанные на измерении доплеровской частоты колебаний. Если в системах РАЗ реализовать следящий алгоритм измерения скорости звука, то для оценки скорости звука будет достаточно двухканального или двух одноканальных корреляторов, что существенно упростит схему оценки параметров атмосферы в системах РАЗ. Следящий алгоритм оценки скорости звука для систем РАЗ должен соответствовать классическому алгоритму и учитывать особенности отражения радиосигнала от акустической посылки, иначе будет возникать систематическая погрешность свойственная алгоритмам обработки сигналов, основанных на измерении доплеровской частоты колебаний.

Радиоакустическая следящая система должна соответствовать уравнениям (3,4) где в качестве опорных сигналов должны выступать сигналы, сформированные с использованием функции рассеяния. Опорные сигналы, сформированные с использованием функции рассеяния, имеют различную энергию в зависимости от значения параметра q, поэтому значения корреляционных интегралов необходимо скорректировать согласно функции $E(q) = \int F^2(r, q_{on}) dr$, где $F(r, q_{on})$ – опорный сигнал.

Таким образом, работа следящей системы должна отвечать уравнениям

$$\left(\int_0^T F(r, q_0) F(r, q_1) dr - E(q_1) \right) - \left(\int_0^T F(r, q_0) F(r, q_2) dr - E(q_2) \right) = 0 \tag{5}$$

$$\left(\int_0^T F(r, q) F(r, q_1) dr - E(q_1) \right) - \left(\int_0^T F(r, q) F(r, q_2) dr - E(q_2) \right) = x \tag{6}$$

где $F(r, q_1)$ и $F(r, q_2)$ – опорные сигналы, сформированные с использованием функции рассеяния, $F(r, q_0), F(r, q)$ – сигналы с соседних циклов измерения, E – разница, по которой определяется величина отличия между q_0 и q .

Схема следящего устройства обработки сигналов систем РАЗ атмосферы, работа которого соответствует уравнениям (5,6), показана на рис. 4.

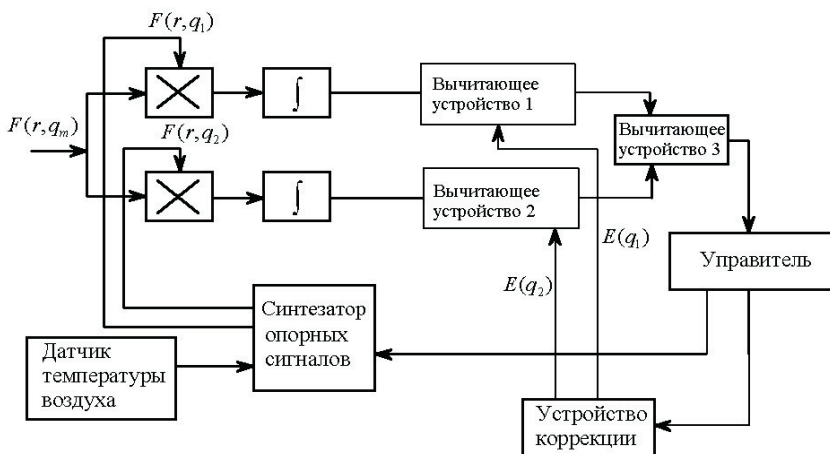


Рис.4. Следящее устройство обработки сигналов систем РАЗ атмосферы

Схема состоит из датчика температуры, дискриминатора, управителя, генератора опорных сигналов и устройства коррекции. Датчик температуры измеряет температуру на первом уровне трассы зондирования и в соответствии с измеренной температурой формирует управляющий сигнал. Сигнал с датчика температуры задает генератору опорных сигналов значения параметров расстройки условия Брэгга q_1 и q_2 , с которыми необходимо сформировать опорные сигналы для второго уровня трассы зондирования, такие, что разница между корреляционными интегралами сигнала принимаемого с первого уровня трассы зондирования и опорных сигналов равнялась нулю (5).

Опорные сигналы поступают на устройство коррекции, которое формирует корректирующий сигнал в соответствии с энергией опорных сигналов и на дискриминатор, состоящий из двухканального коррелятора и 3-х вычитающих устройств. Дискриминатор вычисляет разницу U (7) между корреляционными интегралами сигнала, принимаемого с некоторого уровня трассы зондирования, и опорных сигналов удовлетворяющих уравнению (5).

$$\left(\int_0^T F(r, q) F(r, q_1) dr - E(q_1) \right) - \left(\int_0^T F(r, q) F(r, q_2) dr - E(q_2) \right) = U \tag{7}$$

где $F(r, q)$ – сигнал, принимаемый с некоторого уровня трассы зондирования.

Дискриминатор определяется дискриминационной характеристикой (ДХ) (рис. 5). Дискриминационная характеристика – это характеристика, показывающая

зависимость напряжения U на выходе дискриминатора от разницы $y = q - q_0$, где q – расстройка условия Брэгга на некотором уровне трассы зондирования, q_0 – расстройка условия Брэгга на предыдущем уровне трассы зондирования. Наибольшая линейность и длина линейного участка ДХ для заданных зондирующих колебаний задаются величиной 2Δ , на которую отличаются параметры расстройки условия Брэгга q_1 и q_2 опорных сигналов.

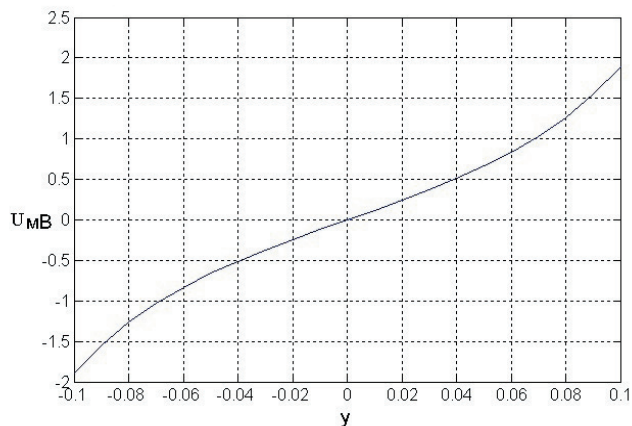


Рис. 5. Пример зависимости $U(y)$ в случае использования зондирующих сигналов с прямоугольными огибающими

Напряжение с дискриминатора поступает на управитель, который в соответствии с дискриминационной характеристикой дискриминатора вычисляет расстройку условия Брэгга на текущем уровне трассы зондирования и формирует управляющий сигнал, который задает генератору опорных сигналов значения

параметров расстройки условия Брэгга, при которых напряжение на выходе дискриминатора для сигнала с текущего уровня трассы зондирования будет стремиться к нулю.

7. Выводы

В статье синтезирован оптимальный алгоритм обработки сигналов и рассмотрена возможность его аппаратного упрощения. Сформулированы предложения по совершенствованию существующих систем РАЗ. Они состоят в реализации следящего алгоритма в системах РАЗ и формировании опорных сигналов для корреляционной схемы в соответствии с преобразованиями, которым сигнал подвергается в локационном акустическом канале. Эти опорные сигналы формируются с помощью функции рассеяния.

Оценка скорости звука в предложенном алгоритме производится по энергетическому параметру сигнала, в связи с чем, значения корреляционных интегралов в двухканальной схеме корректируются с учетом энергий формируемых опорных сигналов. Оценка скорости звука по энергетическому параметру достаточно непривычна, поскольку в радиолокации утвердилась точка зрения, что определение скорости движения объекта осуществляется посредством оценки неэнергетических параметров сигнала, чаще всего частоты колебания.

Следуя сформулированным предложениям по совершенствованию возможно достижение повышения эффективности работы существующих систем РАЗ за счет увеличения точности оценки параметров атмосферы.

Литература

1. Каллистратова, М.А. Радиоакустическое зондирование атмосферы [Текст] / М.А. Каллистратова, А.И. Кон. – М.: Наука, 1985. – 200 с.
2. Карташов, В.М. Функции рассеяния сигналов систем зондирования атмосферы [Текст] / В. М. Карташев // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.–техн. сб. – Харьков, 2001, №118, с. 61-65.
3. Карташов, В.М. Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы [Текст] / В.М. Карташов. – Харьков: ХНУРЭ, 2011. – 233 с.
4. Куля, Д.Н. Анализ показателей качества систем радиоакустического зондирования атмосферы [Текст] / Д.Н. Куля // Радиотехника. 15-й Юбилейный Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума Т.3. – Харьков, ХНУРЭ, 2011. – с. 185 – 186.
5. Фалькович, С. Е., Статистическая теория измерительных радиосистем [Текст] / С. Е. Фалькович, Э. Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
6. Дымова, А.И. Радиотехнические системы [Текст] : учебник для вузов / А.И. Дымова, М.Е. Альбац, А.М. Бонч-Бруевич; под ред. А.И. Дымовой. – М., «Сов. радио», 1975. – 440 с.