

7. Ціделко, В. Д. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання. [Текст] / В. Д. Ціделко, Н.А. Яремчук – Київ: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2002 – 176 с.
8. Неєжмаков, П. І. Калібрувальні та вимірювальні можливості національних метрологічних інститутів [Текст] /П. І. Неєжмаков // Український метрологічний журнал. – 2010. – №2. – 48-53 с.
9. Ефремова, Н. Ю. Особенности анализа данных межлабораторных сличений, проводимых в аккредитованных калибровочных лабораториях [Текст] / Н. Ю. Ефремова, С. А. Качур. // Системи обробки інформації. – 2006. – Випуск 7(56) – 22-25 с.
10. ISO 13528: 2005 Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons [Текст]. – Введ. 01.09.2005. – ISO TC 69/SC.
11. Шведова, В. В. Оцінювання результатів між лабораторних звірень за умов наявності систематичної похибки вимірювання [Текст] Запоріжжя / В. В. Шведова, Н.О. Руденко // тез. док. XXI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Інноваційний потенціал української науки – XXI век», 13-18 травня 2013.

*Виконано аналіз відомих методів адаптації систем радіоакустичного зондування атмосфери до метеорологічної обстановки, показані їх недоліки. Запропоновано новий удосконалений метод радіоакустичного зондування атмосфери, котрий враховує вплив метеорологічної обстановки на роботу системи та забезпечує підвищення основних якісних показників систем зондування*

*Ключові слова: радіоакустичне зондування, частотна адаптація, функція розсіювання*

*Выполнен анализ известных методов адаптации систем радиоакустического зондирования атмосферы к изменяющейся метеорологической обстановке, показаны их недостатки. Предложен новый усовершенствованный метод радиоакустического зондирования атмосферы, который учитывает влияние метеорологической обстановки на работу системы и обеспечивает повышение основных качественных показателей систем зондирования*

*Ключевые слова: радиоакустическое зондирование, частотная адаптация, функция рассеяния*

УДК 621.396.96

# АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ СИСТЕМ РАДИО- АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

**В. М. Карташов**

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой\*

E-mail: res@kture.kharkov.ua

**М. В. Кушнир**

Аспирант\*

E-mail: misua\_777@mail.ru

\*Кафедра радиоэлектронных систем  
Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники  
просп. Ленина, 14, Харьков, Украина, 61000

## 1. Введение

Системы радиоакустического зондирования атмосферы (РАЗ) используются для определения основных метеовеличин: температуры воздуха, скорости ветра, влажности, параметров турбулентности [1]. Определение температурных профилей основано на использовании зависимости скорости звука от температуры и скорости движения среды и на частичном отражении электромагнитных волн от периодических неоднородностей плотности, создаваемых распространяющейся звуковой волной [2 – 4].

Получение достаточного для обработки и регистрации уровня отраженного сигнала в системах РАЗ возможно только при выполнении условия Брэгга,

которое требует определенного соотношения между длинами акустической и электромагнитной волн. Поскольку длина звуковой волны существенным образом зависит от значений метеопараметров, то возникает необходимость частотной адаптации систем РАЗ к изменяющейся метеорологической обстановке.

Существующие методы частотной адаптации, основанные на подстройке частоты акустического сигнала, или подстройке частоты радиосигнала под условие Брэгга, не обеспечивают требуемой эффективности систем радиоакустического зондирования.

В соответствии с этим возникает необходимость разработки новых, более эффективных методов частотной адаптации систем РАЗ.

## 2. Физические основы частотной адаптации систем РАЗ

В методе РАЗ в атмосферу излучаются короткие посылки звуковых волн, скорость и направление которых измеряют с помощью доплеровского радиолокатора. На пути своего распространения звуковые волны создают периодические изменения диэлектрической проницаемости воздуха, которые способны рассеивать электромагнитные волны с когерентным сложением фаз в случае выполнения условия Брэгга

$$\lambda_e = 2\lambda_a \sin\theta, \quad (1)$$

где  $\lambda_a$  - длина звуковой волны;  $\lambda_e$  - длина электромагнитной волны;  $\theta$  - угол рассеяния электромагнитных волн.

Длина электромагнитной волны от состояния атмосферы практически не зависит, в то же время длина волны акустического сигнала по мере распространения звукового импульса по трассе зондирования меняется из-за изменения температуры воздуха. В связи с этим возникает необходимость подстройки частоты зондирующих импульсов. При настройке можно изменять частоту как акустического, так и электромагнитного сигналов.

Существенное влияние на амплитуду рассеянного сигнала и на точность измерений оказывает изменение метеопараметров по трассе зондирования, что приводит к деформации (растяжению или сжатию) звуковой волны вдоль пространственной координаты  $r$ , а, следовательно, к перемещению спектра акустического сигнала по оси частот  $k$ , вследствие чего максимумы пространственных спектров взаимодействующих сигналов не совпадают, а диапазон перекрытия спектров сужается. Амплитуда результирующего рассеянного сигнала уменьшается. На рис. 1 представлены спектры акустического и электромагнитного сигналов, которые изображены один под другим, причем ось пространственных чисел звуковой волны сжата в два раза.

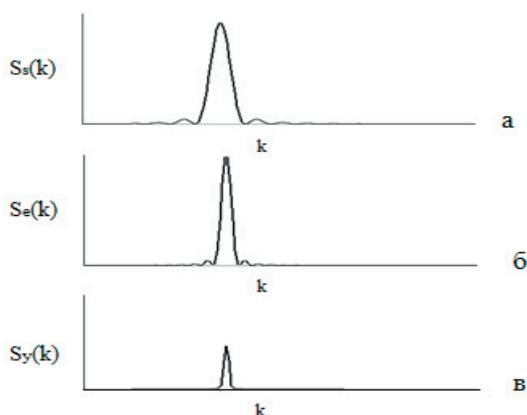


Рис. 1. Пространственные спектры зондирующих сигналов: а - акустический; б - электромагнитный; в - взаимные энергетические спектры этих сигналов

При  $q=0$  радиоволны, отраженные от различных участков акустического дуга, складываются синфазно, амплитуда суммарного отраженного радиосигнала будет максимальной.

При существовании расстройки условия Брэгга максимумы спектров  $S_s(k)$  и  $S_e(k)$  не совпадают, тогда максимум их взаимного энергетического спектра смещается дополнительно на величину  $\Delta k$ .

При переходе от пространственных к временным частотам, даже очень малое смещение  $\Delta k$  в виду большого значения скорости распространения электромагнитных волн  $A$ , трансформируется в ощутимую разность  $\Delta\omega = c \cdot \Delta k$ . Вследствие этого получаем отличие частотного сдвига от чисто доплеровского.  $\Delta\omega$  представляет собой систематическую ошибку при определении скорости звука по доплеровскому сдвигу частоты, что приводит к существенным погрешностям в определении температуры [5]. Это же явление негативно сказывается на процессе подстройки частот зондирующих сигналов.

Если под воздействием метеопараметров спектр акустического сигнала  $S_s(k)$  смещается настолько, что спектры  $S_s(k)$  и  $S_e(k)$  в пространстве волновых чисел не пересекаются вовсе, акустический сигнал в этом случае полностью прозрачен для радиосигнала.

## 3. Литературный обзор

При использовании простых акустического и электромагнитного зондирующих сигналов изменение с высотой температуры и радиальной скорости ветра приводит к нарушению соотношения Брэгга. Достаточно сильный отраженный сигнал существует только в некотором диапазоне высот, причем, чем больше длительность акустического импульса (число длин волн  $N_s$  в импульсе), тем меньше этот диапазон.

Настройка на условие Брэгга для каждой из точек профиля («площадок») вручную путем изменения частоты излучаемого звукового сигнала занимает достаточно много времени, которое в зависимости от количества «площадок» может составлять 0,5 - 3 часа.

Используемый алгоритм измерений значительно ограничивает оперативность получения профилей метеопараметров - качество, являющееся одним из основных потенциальных достоинств метода. Кроме того, такое время соизмеримо со временем квазистационарности процессов в атмосфере, в течение которого можно производить усреднение.

Поэтому с самого начала развития метода РАЗ стали делаться попытки получения профилей «по одной звуковой посылке» с подстройкой частоты акустического излучения в среднем по трассе. На рис. 2 приведен график зависимости дисперсии температуры от изменения высоты для двух методик зондирования «точка» (сплошная линия) и «трасса» (пунктирная линия) [6].

Методика «точка» предполагает выполнение оптимального соотношения длин звуковых и радиоволн сначала на низкой высоте, проведение некоторого заданного числа зондирований атмосферы, измерение доплеровского сдвига частоты и последующее усреднение результатов измерения температуры на этой высоте.

Методика «трасса» включает излучение пакета звуковых волн и регистрацию величины доплеровского сдвига частоты через равные интервалы времени по мере распространения пакета звуковых волн по трассе

зондирования [6]. Зондирование производилось за время, принятое для усреднения полученных результатов (2, 3, 5, 10 мин.).

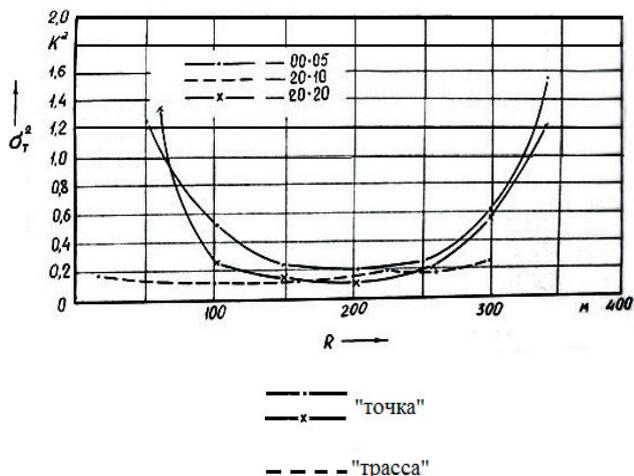


Рис. 2. График зависимости дисперсии температуры  $\sigma_T^2$  от высоты  $R$  для методик зондирования «точка» и «трасса»

Из рис. 2 видно, что при регистрации профилей температуры методом «трасса» дисперсия температуры имеет минимум в точке, где отношение сигнал/шум максимально, то есть в точке, где выполняется условие Брэгга.

При регистрации профиля по методике «точка», дисперсия растет по мере увеличения значения расстройки условия Брэгга.

В работе [7] встречается использование алгоритма частотной адаптации систем РАЗ с использованием фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Возможность автоподстройки частоты расдара основана на том, что при выполнении условия Брэгга доплеровский сдвиг частоты радиосигнала в точности равен несущей звуковой частоте  $f_s$ . Измеряя по мере распространения звукового импульса в направлении зондирования текущее значение разности  $\Delta$ , между значениями несущей частоты  $f_p$  и номинальной частоты задающего генератора, преобразуя ее в управляющее напряжение  $U_{упр}$  и управляя с помощью этого напряжения частотой задающего генератора, можно добиться выполнения условия Брэгга по всей трассе зондирования. При этом информация о скорости звука будет содержаться не в значении  $f_p$ , которое должно оставаться постоянным, а в изменении несущей частоты.

Схема ФАПЧ состоит из компаратора, фазового детектора и пропорционально-интегрирующего фильтра. Измерения значений текущей частоты генератора и сдвиг частоты рассеянного сигнала измерялись методом «счета нулей», затем эти значения вводились в микро-ЭВМ и вычислялось значение скорости звука, а затем значение температуры.

Однако в таких системах при наличии значительной начальной расстройки наблюдаются срывы слежения схемы АПЧ за  $f_s$ , поэтому требуется предварительная установка звуковой частоты под условия Брэгга в какой-нибудь точке трассы зондирования. При сильном порывистом ветре, когда имеются глубокие замирания сигнала на отдельных

участках трассы, устойчивость работы системы также нарушается.

При срывах системы АПЧ измеренное значение температуры на несколько градусов превышает значения в соседних точках.

#### 4. Влияние флуктуационных и динамических ошибок на точность измерения профиля температуры

Проанализируем основные особенности рассмотренных алгоритмов частотной адаптации. Заметим, что измерение скорости звука в устройствах радиоакустического зондирования, с подстройкой частоты радиосигнала под условие Брэгга, производят обычно в точках, разнесенных по высоте на величину  $\Delta H$ , которая представляет собой пространственное разделение, зависящее от длительности акустического импульса

$$\Delta H = C_a \tau_n, \tag{2}$$

где  $C_a$  - скорость звука,  $\tau_n$  - длительность акустического импульса. Если настройка на условие Брэгга выполняется по предыдущему результату измерения, то это приводит к существованию расстройки, вызванной градиентом температуры и радиального ветра. Степень расстройки условия Брэгга в текущей точке отклонения следует оценивать по следующей формуле:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_a + \Delta\lambda_a} = \frac{2C_a}{C_a + \Delta C_a}, \tag{3}$$

где  $\Delta C_a$  - величина ошибки скорости звука в точке отражения,  $\lambda_e$  - длина волны электромагнитного импульса,  $\lambda_a$  - длина волны акустического импульса.

Суммарная величина ошибки, с которой априорно известна скорость звука в точке рассеяния, определяется по формуле:

$$\Delta C_a = \Delta V + 0,6\Delta T^0 + \delta C_a, \tag{4}$$

где  $\Delta V$  - разница скоростей радиального ветра между соседними точками профиля;  $\Delta T^0$  - разница температур между соседними точками профиля;  $\delta C_a$  - составляющая ошибки, вызванная аппаратными погрешностями. Первые два члена в (4) составляют динамическую ошибку настройки, третий - флуктуационную.

Влияние флуктуационной и динамической ошибок на процесс подстройки под условие Брэгга, при распространении акустического пакета в атмосфере, показано на рис. 3.

Здесь представлен высотный профиль скорости звука и для 4-х точек профиля показаны кривые, определяющие интенсивность отраженного радиосигнала. Максимумы этих кривых совпадают со значениями скорости звука в соответствующих точках профиля.

Всякое отличие значения скорости звука, используемого для настройки на условие Брэгга, от истинной скорости звука в этой точке приводит к уменьшению интенсивности отраженного сигнала.

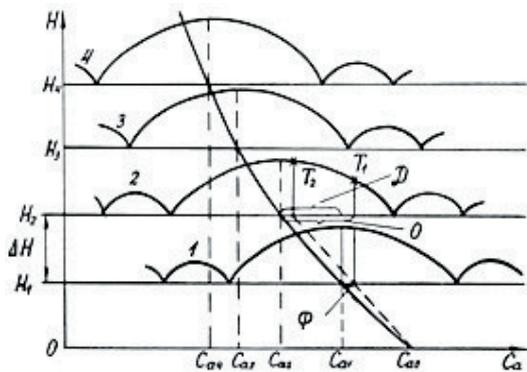


Рис. 3. Влияние флуктуационной и динамической ошибок на выполнение условия Брэгга, зависимость высоты Н от скорости звука  $C_a$

Предполагается, что скорость звука у поверхности земли известна точно и отсутствует ошибка настройки в первой точке профиля. Тогда значение скорости звука в этой точке, измеренное системой РАЗ, будет отличаться от истинного на величину флуктуационной ошибки  $\Phi$ . При настройке во второй точке профиля по этому значению попадаем в точку  $T_1$  на кривой отражения и имеем общую ошибку настройки  $O$ , которая равна сумме динамической  $D$  и флуктуационной  $\Phi$  ошибок.

Если через точки измеренное на высоте  $H_1$  значение скорости звука провести прямую, то получим экстраполированное значение скорости во второй точке профиля, которое соответствует точке  $T_1$  на кривой отражения.

Как видно из рис. 3, ошибка настройки в этом случае существенно меньше, чем в предыдущем, а это приведет к получению существенно большей амплитуды отраженного сигнала.

Все вышесказанное объясняет динамику процесса настройки системы РАЗ, влияние на этот процесс флуктуационных и динамических ошибок измерений и показывает необходимость их учета при разработке блока устройства управления частотой зондирующего радиосигнала.

### 5. Усовершенствованный алгоритм частотной адаптации

Оценку скорости звука в каждой точке профиля целесообразно производить с использованием корреляционной обработки. 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:

$$c_s = \frac{2\pi f_s}{4\pi f / c - q}, \tag{5}$$

где  $f_s$  – частота звука;  $f$  – частота радиосигнала;  $c$  – скорость распространения радиоволн. Таким образом, функция рассеяния [8] 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, можно оценить скорость звука, при которой был сформирован принимаемый радиосигнал.

Поскольку параметр  $q$  функционально связан со скоростью звука выражением (5) и для всех опорных сигналов известны значения параметра  $q$ , при которых они были сформированы, то в результате обработки определяется значения параметра  $q$  и далее вычисляется текущее значение скорости звука.

Используя текущее значение скорости звука, рассчитаем экстраполированное в следующую точку профиля значение скорости звука по формуле:

$$C_{as}^{(i)} = 2C_a^{(i-1)} - C_a^{(i-2)}, \tag{6}$$

где  $i$  – номер высотного уровня;  $C_a^{(i-1)}$  – оптимальное оценочное значение скорости звука на предыдущем уровне.

Далее вычисляется оптимальная оценка скорости звука на текущем уровне по формуле:

$$C_a^i = \left\{ \frac{C_{as}^{(i)}}{\sigma_e^2[C_a^{(i)}]} + \frac{C_{an}^{(i)}}{\sigma_n^2[C_a^{(i)}]} \right\} / \left\{ \frac{1}{\sigma_e^2[C_a^{(i)}]} + \frac{1}{\sigma_n^2[C_a^{(i)}]} \right\}, \tag{7}$$

где  $\sigma_e^2[C_a^{(i)}]$  – дисперсия экстраполированного значения;

$\sigma_n^2[C_a^{(i)}]$  – дисперсия измеренного значения скорости звука.

Значение  $C_a^i$  используется при расчете температуры на каждом высотном уровне. Экстраполированное значение  $C_{ae}^{(i+1)}$  используется для вычисления необходимого значения частоты генератора сигналов высокой частоты и для подстройки частоты радиопередатчика под условие Брэгга

$$f_e = \frac{C_e \left( \frac{2\pi f_s}{C_{ae}^{(i+1)}} - q \right)}{4\pi}. \tag{8}$$

Управление частотой зондирующего сигнала осуществляется по результатам линейной фильтрации [9, 10].

На рис. 4 показано сравнение исходного профиля оценок скорости звука с профилем, полученным после фильтрации, предполагая, что дисперсия маневра скорости звука  $D_\mu = 2 \text{ м/с}^2$ .

Профили, полученные после фильтрации (рис. 4), характеризуются меньшей дисперсией, что говорит об уменьшении флуктуационных ошибок.

Таким образом, в сравнении с алгоритмами обработки сигналов, основанных на измерении доплеровской частоты колебаний, алгоритм с применением корреляционной обработки, фильтрации и экстраполяции полученных оценок скорости звука, позволит повысить качество настройки на условие Брэгга в системах РАЗ, и обеспечит возможность получения полного профиля температуры в течение нескольких минут.

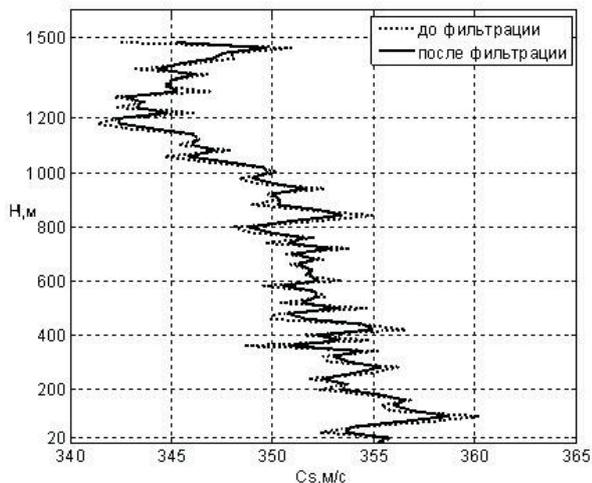


Рис. 4. Профили скорости звука до и после фильтрации, зависимость высоты  $H$  от скорости звука  $C_a$

## 6. Выводы

Анализ известных методов радиоакустического зондирования атмосферы показал следующие недостатки. Смещение максимумов пространственных спектров взаимодействующих сигналов друг относительно друга приводит к уменьшению амплитуды результирующего рассеянного сигнала, а также к отличию частотного сдвига от чисто доплеровского сдвига, что вносит в результаты измерений дополнительную, систематическую погрешность. Существенное влияние на точность измерений оказывают флуктуационные и динамические ошибки. В статье рассмотрены существующие методы частотной адаптации систем РАЗ, проанализированы их недостатки. Предложен новый усовершенствованный алгоритм управления частотами зондирующих сигналов, который позволит повысить качественные показатели таких систем, а именно, точность измерений профиля температуры и дальность действия, а так же повысит оперативность зондирования.

## Литература

1. Каллистратова, М. А. Радиоакустическое зондирование атмосферы [Текст] / М. А. Каллистратова, А. И. Кон. – М.: Наука, 1985. – 200 с.
2. Красненко, Н. П. Акустическое зондирование атмосферы [Текст] / Н. П. Красненко. – Новосибирск: Наука, 1986. – 167 с.
3. Качурин, Л. Г. Методы метеорологических измерений [Текст] / Л. Г. Качурин. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 441 с.
4. Степаненко, В. Д. Радиолокация в метеорологии [Текст] / В. Д. Степаненко. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 244 с.
5. Карташов, В. М. Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы [Текст]: монография / В. М. Карташов. – Харьков: ВЦ ХНУРЕ, 2011. – 230 С. – ISBN 978-966-659-181.
6. Бабкин, С. И. Экспериментальные результаты температурно-ветрового зондирования атмосферы радиоакустическим методом [Текст] / С. И. Бабкин, Е. Г. Прошкин, Ю. Н. Ульянов // Изв. АН СССР. Физико-астрономич. Обсерватория. – 1984. – №6. – С. 495-500.
7. Горелик, А. Г. Радиоакустическое зондирование атмосферного пограничного слоя с автоподстройкой частоты [Текст] / А. Г. Горелик, В. Р. Жежерин, М. А. Каллистратова // Метеорологические исследования. – М. – 1987. – №10. – 28 с.
8. Карташов, В. М. Алгоритм автосопровождения изменений информационного параметра сигнала радиоакустических систем / В. М. Карташов, Д. Н. Куля, С. В. Пашенко [Текст] / Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2012. – 4/9(58). – С. 57-61.
9. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех [Текст] / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
10. Ширман, Я. Д. Теоретические основы радиолокации [Текст] / Я. Д. Ширман. – М.: Советское радио, 1970. – 560 с.