

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОВЕЛИЧИН  
ПРИ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ  
СИСТЕМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ****Сообщение 1****Введение**

Метод радиоакустического зондирования (РАЗ) атмосферы разрабатывается для дистанционной регистрации вертикальных профилей метеорологических величин. Авторами [1] предложен, в отличие от доплеровского способа [2], корреляционный способ обработки радиосигнала, отраженного от акустического пакета. Этот способ предположительно позволяет снизить зависимость погрешности измерения температуры воздуха от точности поддержания условия Брэгга. Информацию о скорости распространяющегося в атмосфере акустического пакета в этом способе несет параметр расстройки условия Брэгга. В работах [3 – 7] выполнены оценки инструментальных погрешностей измерения основных метеорологических величин (температуры и влажности воздуха, вертикальной и горизонтальной составляющих скорости ветра) при применении корреляционной обработки сигналов системы РАЗ. Сделанные оценки подтверждают ожидаемое предположение.

Данная же работа посвящена оценке методических погрешностей, возникающих за счет априорной неопределенности высотного распределения метеорологических величин, при регистрации вертикальных профилей той или иной метеорологической величины с использованием корреляционной обработки принятых сигналов систем радиоакустического зондирования.

**1. Общие соображения****1.1. Методика зондирования и обработка сигналов**

Методические погрешности измерений основных метеорологических величин методом и аппаратурой РАЗ с применением корреляционной обработки принятых радиосигналов могут быть вызваны как принятой методикой зондирования атмосферы, так и отсутствием априорной информации о реальных значениях метеорологических величин, влияющих на информационный параметр принятого радиосигнала. При корреляционной обработке принятых радиосигналов таким параметром является их амплитуда. Поэтому для обеспечения

необходимой точности измерений метеовеличин необходимо тщательно исследовать влияние различных факторов (метеорологических величин и их пространственно-временных изменений, методики зондирования, технических параметров аппаратуры, используемой для зондирования и т.д.) на мощность принимаемых радиосигналов. В частности, амплитуда принятых радиосигналов определяется и формой главного лепестка функции

$\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ , описывающего существенное брэгговское рассеяние, в зависимости от количества длин волн  $N$  в зондирующем акустическом пакете [2]. Вид этой функции закладывается в генератор опорных сигналов, необходимых для корреляционной обработки принятых сигналов. Значение методической погрешности регистрации температуры воздуха в зависимости от числа опорных сигналов и необходимого разрешения сигналов по параметру расстройки условия Брэгга оценено в работе [3].

В сравнительных экспериментах по зондированию атмосферы короткими и длинными акустическими пакетами нами обнаружено [2], что при использовании длинных пакетов заметно увеличиваются флуктуации принимаемых сигналов, не связанные с пульсациями

параметра Брэгга  $q$ . Такой характер принимаемых сигналов затруднит корреляционную обработку сигналов и приведет к увеличению погрешности определения этого параметра.

## 1.2. Влияние метеорологических величин и атмосферных процессов на РАЗ

Многочисленные натурные эксперименты, выполненные в ходе оценки возможностей метода и аппаратуры РАЗ для организации мониторинга атмосферы различного назначения [2], указали на безусловную необходимость использования информации о вертикальном распределении основных метеорологических величин. В этих экспериментах замечено сильное влияние основных метеорологических величин и атмосферных процессов на результаты зондирования (погрешность измерений, высоту регистрации, время измерений и т.д.). Прежде всего, это диктуется задачей достижения инструментальной точности измерения регистрируемой величины.

Пространственно-временная неоднородность метеорологических величин, определяющих условия распространения звука в реальной атмосфере, приводит к следующим эффектам.

1. Общее поступательное движение воздушных масс (мезомасштабные движения) обуславливает горизонтальный перенос звуковой энергии.

2. Флуктуации скорости воздушного потока воздействуют на распространяющийся звук двояко:

– крупномасштабные неоднородности потока ( $L \gg \lambda$ ) вызывают рефракцию звуковых лучей;

– мелкомасштабные неоднородности ( $L \ll \lambda$ ) – рассеяние звука, причем интенсивность такого рассеяния зависит от степени турбулизации потока (здесь  $L$  – размер неоднородности, а  $\lambda$  – длина волны звука).

3. Температурные неоднородности, как и ветровые, вызывают рефракцию или (и) рассеяние звуковых волн (тоже в зависимости от масштаба этих неоднородностей).

Основные метеорологические факторы, вызывающие появление методических погрешностей измерения основных метеорологических величин методом и аппаратурой РАЗ, достаточно полно перечислены в работе [8].

## 2. Оценка влияния атмосферы на измеряемые метеорологические величины.

### Регистрация вертикальных профилей температуры воздуха

Расчетное выражение для вычисления температуры воздуха при корреляционной обработке данных вертикального зондирования имеет вид [3]:

$$T, K = \left[ \frac{2\pi f_n}{a \left( \frac{4\pi f}{c} - q \right)} \right]^2, \quad (1)$$

где  $f_n$  – частота синусоидального заполнения акустического пакета;  $f$  – рабочая частота радиолокатора;  $c_e$  – скорость распространения радиоволн;  $a$  – коэффициент, зависящий от состава воздуха (для сухого воздуха  $a = 20,0789 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1/2}$ ).

В работе [8] выполнена корректная оценка методической (за счет переноса акустического пакета горизонтальным ветром) погрешности регистрации вертикальных профилей температуры воздуха для такого вида обработки сигналов системы РАЗ. Однако на мощность принимаемых радиосигналов, являющейся информационным параметром, оказывают существенное влияние и другие метеорологические величины и процессы. В частности, важной метеорологической величиной в этом контексте является водяной пар и его количественные характеристики. Существование турбулентности, наличие вертикальных

градиентов температуры воздуха и скорости ветра, а также пульсации метеорологических величин приводят к снижению принимаемой мощности радиосигналов.

При распространении звуковых волн в реальной атмосфере наблюдается явление дисперсии скорости звука, т.е. зависимость фазовой скорости звуковых волн от частоты. Дисперсия скорости звука может быть обусловлена как физическими свойствами среды, так и присутствием в ней посторонних включений. Для атмосферного воздуха таким включением является водяной пар. Дисперсия скорости звука сопровождается повышенным поглощением звука сравнительно с поглощением, вызванным сдвиговой вязкостью и теплопроводностью (т. н. классическим поглощением) [9]. Хорошо известно, что при радиоакустическом зондировании зависимость принимаемой мощности радиосигнала  $P$  от поглощения энергии звуковых волн атмосферными газами описывается экспонентой вида [10]

$$P \approx P_0 \cdot \exp(-2\alpha R), \quad (2)$$

где  $P_0$  – принимаемая мощность в отсутствие поглощения,  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $R$  – высота, с которой принимается радиосигнал.

Коэффициент поглощения  $\alpha$  звука в воздухе обычно представляют в виде суммы двух функций: от частоты и от влажности; расчетные формулы приведены в работах [10, 11].

Оценим методическую погрешность регистрации вертикального профиля температуры воздуха при отсутствии априорной информации о вертикальном распределении влажности воздуха в исследуемом слое атмосферы по методике, изложенной в работе [8]. Для 10-сантиметровой системы РАЗ [2] частота зондирующего звука  $f_n = 7,15$  кГц. В метеорологической ситуации, при которой температура воздуха  $T$  °С = 0 и относительная влажность воздуха  $h = 50\%$ , коэффициент поглощения звука  $2\alpha \cdot 10^2 \text{ м}^{-1} = 3,19$  [10]. Если для сухого воздуха мощность радиосигнала, полученного с высоты 50 м, равна 0,1 мВт, и  $q = 1,517$ , то при существовании в воздухе влажности  $h = 50\%$  значение принятого сигнала будет снижено в  $\exp(-2\alpha R)$  раз, а параметр Брэгга будет равен уже  $q = 2,351$ . Используя формулу (1) для двух значений  $q$ , найдем, что методическая погрешность регистрации температуры воздуха на заданной высоте в данных метеорологических условиях составит примерно 4,4 К. Еще более значительной будет эта погрешность при зондировании в засушливых географических районах (например, в условиях, когда температура воздуха имеет значение 30 °С, а относительная влажность – 10 %) [10].

При оценке влияния мелкомасштабной турбулентности на интенсивность рассеяния электромагнитных волн на звуковых волнах обычно связывают интенсивность рассеяния радиоволн при РАЗ атмосферы с параметром  $C_n^2$ , характеризующим интенсивность флуктуаций скорости звука в турбулентной атмосфере. Например, известно, что основным фактором, влияющим на среднюю принимаемую мощность приемником системы РАЗ в дециметровом диапазоне длин волн, является нарушение поперечной когерентности фазового фронта акустической волны. Это нарушение характеризуется радиусом поперечной когерентности  $\rho_c$ , который в приближении геометрической оптики ( $l_0 \ll \lambda$ , где  $l_0$  – внутренний масштаб турбулентности) определяется выражением [12]:

$$\rho_c = \left( 2,91 \cdot C_n^2 \cdot k^2 \cdot R \right)^{-3/5}, \quad (3)$$

где  $C_n^2$  – структурная характеристика флуктуаций акустического показателя преломления,  $\text{м}^{-2/3}$ ;  $k = 2\pi / \lambda$  – волновое число акустических колебаний,  $\text{м}^{-1}$ ;  $R$  – высота зондирования, м.

Ослабление турбулентностью принимаемой мощности характеризуется отношением  $R_0 / \rho_c$  [13]:

$$\frac{\langle P_R \rangle}{P_R} = \left( 1 + \frac{R_0^2}{\rho_c^2} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $\langle P_R \rangle$  – средняя принимаемая мощность;  $P_R$  – мощность сигнала в нетурбулентной атмосфере;  $R_0$  – эффективный поперечник взаимодействия акустического и радиопучка.

В зоне дифракции Фраунгофера [12]:

$$R_0^2 = \frac{2R^2}{k_e k (2a_s^2 + a_e^2)}, \quad (5)$$

где  $k_e = 2\pi/\lambda_e$ ,  $2a_s$  и  $2a_e$  – диаметры апертур акустической и радиоантенны.

При расчете значений структурной постоянной  $C_n^2$  учитывают ее зависимость от структурных постоянных флуктуаций температуры воздуха  $C_T^2$  и скорости ветра  $C_W^2$  [12]:

$$C_n^2 = \frac{C_T^2}{4T^2} + \frac{C_W^2}{C^2}, \quad (6)$$

где  $C$  – скорость звука.

Для оценки ослабления принимаемой мощности используем эмпирические высотные зависимости для структурных постоянных:

а) для сильной турбулентности –

$$C_T^2 = 2,9 \cdot R^{-4/3} \text{ и } C_W^2 = 0,04 + 0,33 \cdot R^{-2/3} [12]; \quad (7)$$

б) для слабой (термической) –

$$C_T^2 = 2,9 \cdot R^{-4/3} [14]. \quad (8)$$

В результате расчетов по выражениям (4) – (8) получаем, что на частоте  $f_n = 1 \text{ кГц}$  и на высотах 50 – 500 м и для антенн размеров  $2a_s = 2a_e = 1,8$  м ослабление принимаемой мощности составит при сильной турбулентности:

$$\langle P_R \rangle / P_R \cong 0,85 \div 3 \cdot 10^{-3},$$

при слабой:

$$\langle P_R \rangle / P_R \cong 1 \div 0,77.$$

Применяя методику расчета методических погрешностей работы [8], найдем, что, например, в случае существования в пограничном слое только термической турбулентности методическая погрешность регистрации температуры воздуха системой РАЗ с корреляционной обработкой принятых сигналов на высоте 500 м составит около 15 К. Если же в слое регистрации вертикального профиля температуры воздуха имеет место сильная (динамическая) турбулентность, то примерно такого значения будет методическая погрешность уже на высоте 50 м.

Полученные результаты показывают, что при корреляционной обработке радиосигналов влияние турбулентности атмосферы на методическую погрешность измерений существеннее, чем при доплеровской.

Оценку вклада вертикальных градиентов температуры воздуха и скорости ветра в методическую погрешность регистрации вертикального профиля температуры воздуха проведем, опираясь на результаты работы [15]. Хорошо известно, что в реальной атмосфере всегда существуют вертикальные градиенты всех основных метеовеличин, как положительные, так и отрицательные [16]. В частности, при вертикальном РАЗ атмосферы и отрицательном градиенте температуры происходит сужение диаграммы направленности

акустического излучателя, что особенно существенно для сантиметровых систем зондирования. А в случае зондирования в условиях температурной инверсии ( $\gamma_T > 0$ ) диаграмма направленности излучателя, наоборот, расширяется. Вертикальный градиент скорости ветра обычно положителен ( $\gamma_W > 0$ ), что приводит к появлению угла между нормалью к звуковой волне у источника звука и нормалью в точке отражения  $\Delta\theta$  и, как следствие, к нарушению зеркальности отражения. Влияние перечисленных эффектов сводится к изменению уровня мощности принимаемого сигнала по сравнению с тем, который заложен для корреляционной обработки сигнала, что и приводит к появлению методической погрешности регистрации профиля температуры.

Для количественной оценки методических погрешностей используем экспериментальные данные о значениях вертикальных градиентов температуры воздуха и скорости ветра в нижней 300-метровой части пограничного слоя [17]. Для 7 часов утра  $\gamma_T = 1,7$  °C/100 м, для 15 часов –  $\gamma_T = -0,54$  °C/100 м и изменение ширины диаграммы направленности акустического излучателя 10-сантиметровой системы РАЗ ( $\Theta = 5^\circ$ ) [2] составит  $\Delta\Theta \approx 0,5^\circ$ . Такое изменение диаграммы направленности вызовет изменение интенсивности звука в луче до 10%. В свою очередь, изменение интенсивности звука в луче приведет к изменению принимаемой мощности радиосигнала и, как следствие, появление методической погрешности измерения температуры воздуха, примерно равной 0,23 К.

Действие ветра только в нижней части пограничного слоя с вертикальным градиентом скорости, равным  $\gamma_W = 5$  м/с<sup>-1</sup>/100 м [18], уже на высоте 100 м обусловит появление угла  $\Delta\theta = 5'$ , из-за чего фокус сферического акустического отражателя сместится от центра параболической антенны на расстояние  $d \approx 0,5$  м. Как следует из оптики [19], распределение интенсивности в геометрической фокальной плоскости пятна описывается формулой Эйри:

$$I(0, V) = I_0 \cdot \left[ \frac{2 \cdot J_1(V)}{V} \right]^2, \quad (9)$$

где  $I_0$  – интенсивность в геометрическом фокусе ( $U = V = 0$ );  $U$  и  $V$  – координаты точки наблюдения;  $J_1$  – функция Бесселя первого рода.

Здесь же [19] приведен график функции  $y = \left[ \frac{2 \cdot J_1(V)}{V} \right]^2$ , позволяющий определить снижение интенсивности в геометрической фокальной плоскости при смещении фокуса акустического отражателя относительно центра параболической антенны. Координата  $V$  рассчитывается в соответствии с выражением  $V = \frac{2\pi}{\lambda_e} \left( \frac{b}{f} \right) \cdot \sqrt{x^2 + y^2}$ . На высоте  $R = f = 100$  м диаметр акустического отражателя, вносящего основной вклад в отражение радиоволн,  $b \approx \frac{R}{\sqrt{G_e + G_s}}$  [10], при коэффициентах усиления радио  $G_e = 40$  и акустической  $G_s = 50$

антенн составляет 9,5 м, ( $y = 0$  для геометрического фокуса), тогда  $V \approx 0,3$ . Поэтому ослабление интенсивности в геометрическом фокусе будет равным  $I(0; 0,5)/I_0 = 0,98$ . Прибегая к выше использованной методике расчета, получим, что значение методической погрешности, возникающей за счет ветровой рефракции, для 10-сантиметровой РАЗ составит примерно 0,35К.

Следует заметить, что разворот фронта акустической волны ведет и к изменению формы пятна рассеянных сигналов на подстилающей поверхности (от круговой к эллиптической) и вызывает увеличение его площади. Такие изменения геометрических

параметров пятна дополнительно снижают уровень принимаемой мощности радиосигналов. Однако горизонтальный перенос акустического пакета средним ветром и его разворот вследствие существования вертикального градиента скорости ветра приводят к противоположным перемещениям фокуса сферического акустического отражателя, которые в некоторых метеоусловиях могут быть взаимно компенсированы.

### Выводы

1. Отсутствие априорной информации о влажности атмосферного воздуха приводит к большим значениям методической погрешности регистрации температурных профилей.
2. При корреляционной обработке радиосигналов влияние турбулентности атмосферы на методическую погрешность измерений существеннее, чем при доплеровской обработке.
3. При температурном зондировании пограничного слоя атмосферы рефракционные эффекты вызывают дополнительный рост методической погрешности.

**Список литературы:** 1. *Карташов, В.М., Волох, А.В., Радионова, В.В.* Тела неопределенности зондирующих сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. – 2007. – Вып. 150. – С. 94 -99. 2. *Радиоакустическое зондирование атмосферы / Прошкин Е.Г., Бабкин С.И., Г.В.Груша и др.* Разд.2 // Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли ; под ред. Кашеева Б.Л., Прошкина Е.Г., Лагутина М.Ф. – Харьков : Коллегиум, 2002. – С.44-98. 3. *Бабкин, С.И.* Анализ погрешностей регистрации профилей температуры воздуха доплеровским и корреляционным способами // Радиотехника. – 2012. – Вып.169. – С. 72-78. 4. *Карташов, В.М., Бабкин, С.И., Куля, Д.Н.* К вопросу о возможности регистрации влажности воздуха при корреляционной обработке сигналов системы радиоакустического зондирования // Радиотехника. – 2013. -Вып.172. – С. 67-71. 5. *Карташов, В.М., Бабкин, С.И., Кушнир, М.В.* Совершенствование технологий радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. – 2014. – Вып.178. – С. 5-12. 6. *Карташов, В.М., Бабкин, С.И., Кушнир, М.В.* Совершенствование технологии измерения метеовеличин радиоакустическим зондированием. 5-й Междунар. радиоэлектрон. форум “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы”. Т.1. Конференция “Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии”. Украина, Харьков, 14-17 окт. 2014. – С. 82-85. 7. *Карташов, В.М., Бабкин, С.И., Толстых, Е. Г.* Расширение возможностей систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. – 2014. – Вып.179. – С. 5-10. 8. *Бабкин, С.И., Кушнир, М.В.* Оценка влияния горизонтального ветра на амплитудную структуру сигналов системы радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. – 2013. – Вып.175. – С. 114 -119. 9. *Ультразвук.* Маленькая энциклопедия ; гл ред. И.П.Голямина. – М. : Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с. 10. *Каллистратова, М.А., Кон, А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М. : Наука, 1985. – 195 с. 11. *Физическая акустика ; под ред. У. Мэзона.* Свойства газов, жидкостей и растворов. Т. II, часть А. ; пер. с англ. под ред. И.Г.Михайлова. – М. : Мир, 1968. – 487 с. 12. *Татарский, В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. науки, 1967. – 549 с. 13. *Кон, А.И.* Мощность сигнала при радиоакустическом зондировании турбулентной атмосферы // Изв. АН СССР. ФАО. – 1984. – Т.20, № 2. – С. 178-185. 14. *Надеждина, Б.Д., Шкляревич, О.Б.* Модельные оценки характеристик турбулентности в пограничном слое атмосферы // Труды ГГО им. А.И.Воейкова. Вып. 530. Физика пограничного слоя атмосферы. – 1991. – С.88-99. 15. *Блохинцев, Д.И.* Акустика движущейся неоднородной среды. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. науки, 1981. – 208 с. 16. *Хргиан, А.Х.* Физика атмосферы. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 647 с. 17. *Лайтхман, Д.Л.* Физика пограничного слоя ; изд. второе, перераб. и доп. – Л. : Гидрометиздат, 1970. – 341 с. 18. *Бызова, Н.Л.* Пограничный слой атмосферы // Труды ИЭМ, вып.10 (53). – М. : Московское отделение Гидрометеиздат, 1975. – 165 с. 19. *Борн, М., Вольф, Э.* Основы оптики ; пер. с англ. под ред. Г.П. Мотулевич. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. науки, 1970. – 656 с.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.11.2015