

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВЕТРА НА АМПЛИТУДНУЮ СТРУКТУРУ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Введение

Авторами работы [1] предложен корреляционный способ обработки отраженного сигнала при радиоакустическом зондировании (РАЗ) атмосферы, предположительно позволяющий снизить зависимость погрешности регистрации профилей метеорологических величин от точности поддержания условия Брэгга. В работе [2] оценена инструментальная погрешность измерения температуры воздуха аппаратурой РАЗ, где показано, что применение корреляционной обработки сигналов в системах РАЗ позволяет снизить этот вид погрешности почти на порядок по сравнению с доплеровской. Там же, однако, указывается и на возможное сильное влияние атмосферных условий зондирования на результат измерения информационного параметра – параметра расстройки условия Брэгга и, как следствие этого, появление методических погрешностей измерения метеорологических величин методом РАЗ с использованием корреляционной обработки принятых радиосигналов.

Данная работа посвящена количественной оценке влияния горизонтального ветра на методическую погрешность регистрации вертикальных профилей температуры воздуха, обусловленную искажением амплитудной структуры отраженного радиосигнала, при зондировании атмосферы методом РАЗ с использованием корреляционной обработки сигналов.

Атмосферные факторы, влияющие на погрешность оценки информационного параметра при применении корреляционной обработки

Как следует из работы [1], информационным параметром при извлечении сведений о метеорологических величинах методом РАЗ атмосферы с использованием корреляционной обработки данных зондирования является радиосигнал, амплитудная и фазовая структуры которого соответствуют некоторому значению параметра расстройки Брэгга – q . Чаще всего, экспериментаторы оперируют значениями мощности принятых радиосигналов, регистрируемых на выходе приемных устройств. Оценки уровня мощности принятых радиосигналов проводились рядом исследователей и представлены в хорошо известных работах, например [3 – 6]. Наиболее полно, на наш взгляд, выполнен теоретический учет влияния различных моментов (физических, атмосферных, технических) на интенсивность рассеяния электромагнитных волн на периодической структуре диэлектрической проницаемости воздуха, созданной в исследуемом слое атмосферы проходящим в нем акустическим пакетом, в работе [5]. Приведенное в этой работе обобщенное уравнение для мощности принятого радиосигнала (хотя и несколько упрощенное) будет использовано нами для анализа некоторых экспериментальных данных.

Тщательный анализ эффективности длительного использования аппаратуры РАЗ для зондирования атмосферы в различных метеоусловиях и обстоятельствах [6] позволил авторам выделить целый ряд факторов (атмосферных, технических, социальных и пр.), ограничивающих возможности этого метода. Отдельные из них влияют на точность регистрации метеорологических величин. Поскольку информацию о значении параметра расстройки условия Брэгга при корреляционной обработке предполагают получать на основе амплитудных радиотехнических измерений, то в данном исследовании будет интересно выделить те атмосферные процессы и их действие на радиоакустическое зондирование, в результате которых появляются погрешности таких измерений. Как полагают авторы, это такие атмосферные процессы реальной атмосферы и вызываемые ими эффекты:

- вынос горизонтальным ветром акустического пакета из диаграмм направленности антенн радиоканала и соответствующее ему “соскальзывание” пятна рассеянных сигналов с апертуры приемной радиоантенны;
- смещение пятна из-за поворота фазового фронта звуковых волн под действием вертикальных градиентов температуры воздуха и скорости ветра;
- наличие в атмосфере вертикального градиента скорости ветра, что приводит к нарушению условия Брэгга;
- молекулярное поглощение и турбулентное рассеяние энергии звуковых волн;
- разрушающее действие турбулентности атмосферы на зондирующий пакет (нарушение продольной и поперечной когерентности фазовых фронтов звуковых волн);
- существование в атмосфере осадков различного агрегатного состояния, а также примесей природного и антропогенного происхождения;
- различие условий рассеяния радиоволн от исследуемого слоя атмосферы при двухчастотном (или многочастотном) ее зондировании методом РАЗ.

Практически все эти процессы приводят к заметному искажению амплитудной и фазовой структуры радиосигналов по сравнению с сигналами, отраженными при зондировании стандартной спокойной атмосферы, когда справедлива запись для функции рассеяния, принятая в работе [1].

Влияние горизонтального ветра на методическую погрешность регистрации вертикального профиля температуры

Практикой радиоакустического зондирования реальной атмосферы исследователями данного метода установлено, что основной метеорологической величиной, ограничивающей эффективность применения систем РАЗ с использованием доплеровской обработки принятых радиосигналов (снижение предельной высоты зондирования, увеличение дисперсии результатов измерения метеорологических величин, рост временного интервала зондирования для обеспечения необходимой точности измерений и т.д.), является скорость горизонтального ветра. Для исключения сдвигающего влияния ветра на зондирующий акустический пакет ими был разработан ряд способов компенсации этого фактора:

- смещение приемной радиоантенны в то место на подстилающей поверхности, куда фокусируется пятно рассеянных сигналов [7, 8];
- построение антенного поля приемных радиоантенн [9];
- использование подвижного или распределенного акустического излучателя [10, 11];
- применение пассивной радиолокации пятна рассеянных сигналов [12].

На погрешность регистрации вертикального профиля температуры воздуха аппаратурой РАЗ с использованием корреляционной обработки данных зондирования из перечисленных выше атмосферных процессов, как представляется, могут оказывать влияние первые шесть. Поскольку сочетание одновременного существования указанных процессов в атмосфере может быть весьма разнообразным, то целесообразно рассмотреть влияние каждого процесса в отдельности. В дальнейшем можно рассматривать вносимые атмосферой методические погрешности для основных типов ее термодинамического состояния – нормального, изотермического или инверсионного.

В работе [13] экспериментально и наглядно показано, что основным атмосферным фактором, влияющим на уровень мощности принимаемых радиосигналов, является горизонтальный ветер: из-за вынесения зондирующего акустического пакета из диаграмм направленности антенн радиоканала мощность заметно снижается. Отделить такое снижение мощности от уменьшения мощности, возникающего при изменении параметра расстройки условия Брэгга, практически невозможно. Это и является одним из источников возникновения методической погрешности измерения метеорологических величин рассматриваемым способом обработки принятых радиосигналов. Отметим, что даже при компенсации сдвигающего действия ветра на акустический пакет все остальные факторы, указанные выше и также

уменьшающие уровень принимаемых сигналов, продолжают действовать на пакет при его распространении по трассе зондирования.

Хорошо известно, что зависимость принимаемой мощности радиосигнала P от параметра расстройки Брэгга q описывается экспонентой вида [5]

$$P \approx e\left(-q^2 l^2\right), \quad (1)$$

где $l = \lambda_a \cdot N$ – пространственная длительность акустического пакета, λ_a – длина волны синусоидального заполнения акустического пакета, N – количество длин волн в пакете. Поэтому

$$q = \sqrt{\frac{1}{l^2} \ln\left(\frac{1}{P}\right)}. \quad (2)$$

В реальных условиях и при выбранном режиме зондирования обычно $l \approx const$, поскольку она определяется техническими параметрами системы РАЗ, мало зависит от атмосферных величин, в процессе регистрации метеорологических величин не меняется и практически не влияет на принимаемую мощность. Тогда можно записать, что

$$q \cong \sqrt{\ln\left(\frac{1}{P}\right)}. \quad (3)$$

Для количественной оценки влияния горизонтального ветра на формирование амплитудной структуры принятых радиосигналов, предполагаемых для корреляционной их обработки, были взяты данные исследований на экспериментальном метеорологическом полигоне Одесского гидрометеорологического института, выполненные в работах по внедрению в практику зондирования распределенного акустического излучателя 20-сантиметровой системы РАЗ [6]. Разработанный акустический излучатель состоял из четырех отдельных модулей, размещаемых на горизонтальной (поворотной по азимуту) ферме на расстоянии друг от друга 0,5 – 1,0 м (в зависимости от скорости ветра, регистрируемой анеморумбометром, установленном на метеорологической вышке на высоте 50 м). В ходе эксперимента амплитуда отраженных импульсов, соответствующая принимаемой мощности радиосигналов, фиксировалась на фотопленку сериями. После оцифровки для каждого снимка амплитуду заднего фронта отраженного одиночного импульса от акустического пакета, излученного первым модулем акустической антенны, аппроксимировали соответствующей экспонентой методом наименьших квадратов. По точкам вершин максимумов амплитуды группы импульсов, отраженных от каждого из четырех пакетов, излученных всеми модулями распределенной акустической антенны, строилась другая экспонента. И затем производилось сравнение полученных отсчетов амплитуды на обоих экспонентах для выбранных участков трассы зондирования.

На рис.1 приведена фотография группы отраженных сигналов на экране осциллографа, полученной при одновременном использовании четырех модулей и запитанных одинаковой мощностью, причем одна клетка развертки осциллографа соответствует 34 м трассы зондирования. В данной серии эксперимента параметр расстройки условия Брэгга $q=0$ был установлен таким образом, чтобы максимум принимаемой мощности имел место тогда, когда пакет акустических волн (точнее, его середина) был на высоте 13,6 м от верхнего среза антенн радиоканала. Экспонента же, построенная по вершинам одиночных импульсов, соответствует экспоненте, имеющей место, как полагали, при полном отсутствии ветра. Сравнение экспонент показывает, что наблюдаемое уменьшение мощности принятых радиосигналов за счет выноса акустического пакета из диаграмм радиоантенн при скорости ветра $v \approx 6$ м/с на высоте 50 м в условиях проведения экспериментов достигает четырех раз уже на высоте 51 м.

Воспользовавшись приближенным выражением (3) для расчета параметра расстройки условия Брэгга q по значению мощности на входе приемника системы РАЗ, лежащей в пределах $P=0,1 - 10 \text{ мкВт}$ [6], можно определить изменение параметра q при изменении значений принимаемой мощности от $P_1=0,1 \text{ мкВт}$ до $P_2=0,4 \text{ мкВт}$. Значения параметра расстройки q , соответствующие принятым значениям мощности, равны соответственно $q_1=1,517$ и $q_2=0,3$.

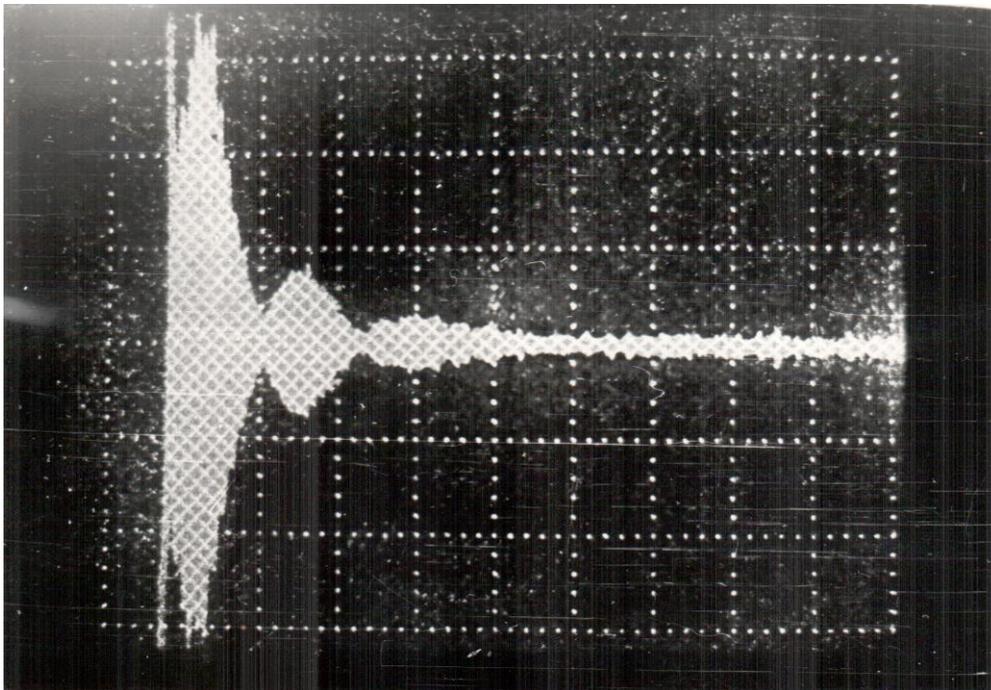


Рис.1

Для расчета температуры воздуха по полученным значениям параметра q_1 и q_2 для двух мощностей радиосигналов, принятых с компенсацией сдвигающего действия ветра P_1 и без такой компенсации P_2 , используем выражение, приведенное в работе [2]:

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

где f_n – частота синусоидального заполнения акустического пакета; f – рабочая частота радиолокатора; c – скорость распространения радиоволн; a – коэффициент, зависящий от состава воздуха; для сухого воздуха $a = 20,0789 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1/2}$. Значения температуры воздуха, соответствующие значениям q_1 и q_2 : $T_1=303,484 \text{ К}$ и $T_2=291,78 \text{ К}$.

Таким образом, методическая погрешность оценки параметра расстройки q , возникающая за счет сдвигающего действия ветра на акустический пакет, в данном эксперименте составила $\Delta q = q_1 - q_2 = 1,217$, а соответствующая ей методическая погрешность измерения температуры воздуха составляет $\Delta T = 11,7 \text{ К}$.

Естественно полагать, что такое значение методической погрешности измерения температуры воздуха методом РАЗ с применением корреляционной обработки принятых радио-

сигналов для практики метеорологических наблюдений, по крайней мере в тропосфере, является неприемлемым (см., например, [14]).

Если ранее для определения количества каналов корреляционной обработки сигналов задавались шагом изменения параметра расстройки Брэгга q и вызванным этим изменением температуры T [2], то теперь целесообразно узнать, какую методическую погрешность оценки параметра расстройки Δq_v вызывает каждый метр за секунду среднего ветра в зондируемом слое. В отличие от доплеровской обработки радиосигналов сигналов, при которой методическая погрешность определялась для метода РАЗ, при корреляционной обработке сигналов данная погрешность измерения температуры воздуха за счет сдвигающего действия ветра на акустический пакет должна рассчитываться для конкретной системы радиоакустического зондирования. Такой вывод следует из вида обобщенного уравнения для мощности принятого радиосигнала, которое содержит технические параметры системы РАЗ. В соответствии с этим уравнением мощность принятых радиосигналов в зависимости от соотношения реальных скоростей акустического пакета и среднего ветра в зондируемом слое можно определить, используя четвертый член экспоненты этого уравнения:

$$P \approx P_0 \cdot \exp\left(-\frac{2M^2 R^2}{2r_a^2 + r^2}\right), \quad (5)$$

где P_0 – мощность отраженного сигнала в точке трассы, где $q=0$; $M = \frac{v}{c}$ – среднее значение поперечного числа Маха в слое атмосферы $0 \div R$ метров, v – средняя скорость горизонтального ветра, c_a – скорость акустического пакета, $2r_a$ и $2r$ – эффективные диаметры акустического излучателя и передающей радиоантенны соответственно.

Например, у 20-сантиметровой системы РАЗ высота верхнего среза антенн радиоканала равна 4 м эффективные диаметры акустического излучателя и передающей радиоантенны равны соответственно $2r_a=1,6$ м, $2r=2,4$ м. Если принять, что $P_0=1$ мкВт, а средний ветер в нижнем слое 50 м $v_1=6$ м/с, то для стандартной атмосферы [15]

$$P_3 \approx P_0 \cdot \exp(-0,57) \approx \frac{P_0}{e^{0,57}} = 0,56 \text{ мкВт}$$

при тех же технических параметрах и среднем ветре в слое 50 м, равном $v_2=7$ м/с, то мощность принятых сигналов уже будет

$$P_4 \approx P_0 \cdot \exp(-0,77) = 0,46 \text{ мкВт}.$$

Соответствующие мощностям P_3 и P_4 значения параметров расстройки – $q_3=1,323$ и $q_4=1,473$. Методическая погрешность оценки параметра расстройки q , возникающая за счет каждого метра за секунду среднего ветра в зондируемом слое атмосферы, для упомянутой выше системы РАЗ составила $\Delta q_v = q_3 - q_4 = 0,85$, а соответствующая ей методическая погрешность измерения температуры воздуха – $\Delta T_v \approx 1,5$ К.

К настоящему времени хорошо известно, что методическая погрешность, которую вносит каждый метр в секунду вертикальной компоненты скорости ветра при доплеровской обработке принятых радиосигналов, составляет 1,68 К [5,6]. Как следует из проведенных расчетов, при корреляционной обработке радиосигналов методическая погрешность измерений, возникающая за счет действия горизонтальной компоненты скорости ветра, имеет примерно то же значение, но только, подчеркнем, для конкретной системы РАЗ (в данном случае, для 20-сантиметровой системы [6]). В целом же, при радиоакустическом зондировании и корреляционной обработке радиосигналов для снижения методической погрешности этого вида

уже обязательно применять способы компенсации сдвигающего действия горизонтального ветра на зондирующий акустический пакет, перечисленные выше.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Заметная методическая погрешность измерения температуры воздуха с использованием корреляционной обработки принятых сигналов систем РАЗ возникает за счет влияния горизонтальной составляющей скорости ветра на амплитудную структуру сигнала.

2. Эта составляющая методической погрешности измерения температуры воздуха за счет сдвигающего действия горизонтального ветра на акустический пакет должна рассчитываться для конкретной системы радиоакустического зондирования.

3. Для снижения методической погрешности данного вида необходимо применять способы компенсации горизонтального ветра или привлекать данные либо аэрологических либо приземных метеорологических наблюдений (для проведения модельных расчетов вертикального распределения составляющих скорости ветра с целью дальнейшей коррекции конечных результатов зондирования).

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. *Бабкин С.И.* Анализ погрешностей регистрации профилей температуры воздуха доплеровским и корреляционным способами // Радиотехника. – 2012. – Вып. 169. – С. 72-78. 3. *Marshall J.M, Peterson A.M., and Barnes A.A., Jr.* Combined Radar-Acoustic Sounding System.- Appl. Opt. – 1972.т- v. 11, № 1. – pp.108-112. 4. *Lombardini P.P. and Bonino G.* Metodo radio akustico per la misura del profile termico verticale della bassa troposfera // Rivista italiana di geofisica e scienze affini, v.11.- Fase.1, 1975.- s. 23-26. 5. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М. : Наука, 1985. – 195с. 6. *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. 7. Frankel M.S., Chang N.J.E., and Sanders., Jr. A High-Frequency Radio-Acoustic Sounder for Remote Measuring of Atmospheric Wind and Temperature // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 1977. – №9. – P. 928-934. 8. *Бабкин С.И., Пахомов Ю.А., Ульянов Ю.Н. и др.* Влияние метеорологических условий на радиоакустическое зондирование атмосферы // Тез. докл. 5-го Всесоюз. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. – Томск : ИОА СО АН СССР, 1980. – Ч.2. – С. 185-188. 9. *Система дистанционного измерения высотных профилей и температуры / Всесоюз. Центр переводов. – Л-51132. Пер Исии Е., Яасаки Я., Кодзима Ю., Окумура С., Фукусима М. из журнала “Нихон мунсэн гихо”. – 1984. – № 22. – С.37-41. 10. АС № 832509. СССР МКИ⁴ G01S 13/95. Радиоакустическая система температурного зондирования / С.И. Бабкин, Куценко В.И., Пахомов Ю.А., Ульянов Ю.Н. (СССР). 11. *Е.Г.Прошкин, В.М.Карташов, С.И.Бабкин, А.В. Волох.* Современное состояние, проблемы и перспективы систем радиоакустического зондирования // Радиотехника. – 2007. – Вып. 150. – С. 5 - 16. 12. А.С. №1658105. СССР МКИ⁴ G01S 13/95. Радиоакустический способ зондирования атмосферы / С.И. Бабкин. (СССР). 13. *Е.Г.Прошкин, В.М.Карташов, С.И.Бабкин, А.В. Волох.* Современное состояние, проблемы и перспективы систем радиоакустического зондирования // Радиотехника. – 2007. – Вып. 150. – С. 5 -16. 14. *О составе, точности и пространственно- временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов ; под ред. М.А. Петросянца, В.Д.Решетова. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – 220 с. 15. Вопросы по авиационной метеорологии / Леценко Г.П., Коренной С.Н. – Кировоград : ГЛАУ, 2011. – 168 с.***

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 09.10.2013