

ЛЮ ЧАН, PhD, И.К. ИБРАИМОВ, А.Ю. ПАНЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ РРВ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗОНДИРОВАНИЯ АПС

Введение

Современный уровень развития спутниковых систем передачи информации и позиционирования решает много задач. Но по-прежнему остаются востребованными традиционные средства связи и навигации. Они занимают свою нишу в общей номенклатуре радиотехнических средств, оставаясь незаменимыми в системах экстренного оповещения, навигации на ограниченных территориях, в аварийно-опасных ситуациях. Эффективность работы этих средств во многом зависит от оперативной информации о состоянии трасс распространения радиоволн (РРВ). Одним из наиболее сложных объектов для оценки условий РРВ является атмосферный пограничный слой (АПС). Его состояние в значительной степени определяется состоянием подстилающей поверхности, которое в свою очередь зависит от времени суток, сезона, количества осадков и прочих факторов. Несмотря на значительные усилия специалистов-метеорологов, до настоящего времени удалось создать лишь ограниченные теоретические модели динамики для некоторых состояний АПС [1]. Поэтому для текущей оценки требуется большой объем информации о пространственном распределении метеопараметров. Наиболее перспективным решением этой задачи является использование дистанционных неконтактных методов зондирования основанных на том или ином виде волновых процессов. Акустические волны существенно более чувствительны к изменениям параметров воздуха, чем иные виды излучений [2]. Кроме того, учитывая востребованность информации о состоянии АПС в таких областях, как метеорология, экология, транспорт, особенно авиационный, сельское хозяйство и прочие, проблема развития акустических методов и средств дистанционного зондирования нижнего слоя атмосферы остается актуальной.

Цель работы – представление комплексной методики использования дистанционных, неконтактных методов зондирования, теоретических представлений динамики АПС и современных программных средств для решения задач оперативного определения условий РРВ на приземных трассах и оценка наиболее перспективных путей развития методов и средств получения этой информации.

1. Современное состояние и перспективы методов акустического зондирования

Ряд фирм и университетов создают акустические локаторы – содары (SODAR – SOnic Detection And Ranging) и системы радиоакустического зондирования (Radio Acoustic Sounding System – RASS). Принцип работы содаров полностью соответствует принципу работы радиолокатора. Системы радиоакустического зондирования (РАЗ) используют зондирующую акустическую посылку как сенсор, изменяющий свои характеристики в зависимости от параметров воздушной массы. Далее облучают эту посылку электромагнитными волнами, которые, отражаясь, переносят информацию к принимающему устройству системы РАЗ. Особенностью этого метода является фокусировка отраженных волн сферической поверхностью акустической посылки. Так как коэффициент отражения от посылки мал, то принимаемый сигнал имеет достаточный уровень только вблизи фокуса. Методики метеоизмерений в RASS основаны на том, что скорость акустических волн в воздухе зависит от температуры, затухание – от влажности, смещение фокуса – от скорости и направления движения воздушной массы. Таким образом, при соответствующей конструкции антенного устройства RASS и методик обработки принимаемого сигнала возможно дистанционное неконтактное измерение основных метеопараметров. Существенной проблемой метода является ветровой сдвиг фокуса отраженных электромагнитных волн за пределы апертуры приемной антенны [3].

Проблемы содарного зондирования (СЗ) заключаются в нерешенных теоретических задачах извлечения информации при рассеянии волн в случайно неоднородной движущейся среде. Это показано и теоретически, и экспериментально [4]. До настоящего времени удовлетворительное решение имеют лишь прямые задачи о средних значениях параметров рассеянных волн [2]. Причем основные проблемы возникают при описании рассеивающего объекта – турбулентного, температурно-неоднородного потока. Аппарат теории динамических систем еще недостаточно хорошо развит, чтобы модели, созданные на его основе, точно отражали свойства реальных турбулентных течений [5]. Более того, физические механизмы рассеяния акустических волн в неоднородной движущейся среде существенно более сложные, чем механизмы рассеяния, например, электромагнитных волн [6].

Таким образом, непосредственное получение информации, необходимой для оценки пространственных распределений индекса показателя преломления воздуха N возможно лишь в ограниченном числе случаев. Это заставляет исследователей искать компромиссные пути, использующие комбинации признанных теоретических методик и наиболее совершенных измерительных комплексов.

Нерешенные трудности при создании систем РАЗ и СЗ снижают интерес к данным методам и не позволяют им получить широкое распространение. Это можно проследить, например, по эволюции тем, обсуждаемых на International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing (ISARS), которые регулярно проводятся с 1982 г. Тем не менее, прогресс электронных устройств и компьютерной техники последних десятилетий открывает пути для качественного роста возможностей акустических средств зондирования АПС. То же можно отнести и к крайне громоздким вычислительным процедурам обработки результатов зондирования. Современная вычислительная техника и программные пакеты допускают их обработку в on-line режиме.

2. Аппаратура и условия экспериментов

Методы комплексного использования средств акустического зондирования атмосферы совместно с математическими моделями динамики АПС для оценки условий РРВ активно развивались в проблемной научно исследовательской лаборатории зондирования атмосферы (ПНИЛ ЗА) Харьковского института радиоэлектроники (ХИРЭ, ныне Харьковский национальный университет радиоэлектроники – ХНУРЕ). В 70-х – 80-х годах в ПНИЛ ЗА ХИРЭ был создан ряд систем РАЗ. Начиная с 1985 г. совместно с Институтом радиоэлектроники АН СССР (ИРЭ, г. Москва) проводились интенсивные работы по развитию методов оценки условий РРВ на приземных трассах. Наиболее интенсивные натурные эксперименты проводились на полигоне Одесского гидрометеорологического института (ОГМИ, ныне Одесский экологический университет) с участием сотрудников этого института [7].

Выбор места проведения экспериментов был обусловлен рядом факторов. Наличие границы суша-море является источником постоянной смены термодинамического состояния АПС. Это позволяло за короткий срок исследовать работу систем зондирования в разных условиях, получать большие объемы экспериментальных данных, необходимые для совершенствования систем и методов извлечения метеоинформации. Отсутствие сложной орографии упрощало анализ метеоситуаций при проверке и обосновании разработанных методик оценки условий РРВ. На равнинной местности необходимо было учитывать только различие свойств подстилающей поверхности. Кроме того, условия полигона допускали проведение консультаций со специалистами-метеорологами, ремонт и модернизацию аппаратуры, помощь при проведении сеансов метеонаблюдений.

Оборудование полигона составляли штатные приборы метеоизмерений, предоставленные ПНИЛ ОГМИ, и экспериментальные установки. Система РАЗ была создана в ПНИЛ ЗА ХИРЭ, содар – в ИРЭ. Расстояние от места расположения систем зондирования до береговой линии составляло около 800м. Система РАЗ позволяла измерять температуру T , влажность H , скорость и направление ветра V, φ . Измерения могли проводиться до высот 400 – 600м.

Но диапазон метеоусловий, который допускал высотные измерения, был ограничен. При увеличении скорости ветра более 5 – 7 м/с и при развитой турбулентности измерения T и V становились невозможными, по H условия были еще более жесткими. Содар позволял визуализировать стратификацию АПС путем факсимильной записи уровня отраженного сигнала и скорости вертикальных токов V_B , численно оценивать ее величину.

Несмотря на определенное несовершенство аппаратуры зондирования, был накоплен значительный экспериментальный материал для дальнейшего анализа метеоситуаций.

3. Методология расчетов

Для расчета N необходимо иметь значения T , H и давления p . Но дистанционные измерения не всегда позволяли получить эти значения по всей высоте АПС. Причем в большинстве случаев для их восполнения простой интерполяции было недостаточно. Это обусловило применение теоретических моделей динамики АПС. В качестве основной модели для расчета условий РРВ использовалась модель турбулентной диффузии, описывающую поток вблизи его границы. Поскольку в этом случае диффузантом являются элементарные объемы воздуха, то для расчетов N удобно использовать потенциальный модуль показателя преломления Π впервые введенный в [8], и который включает температуру и влажность. Применение Π для приземных градиентных метеоизмерений показало свою эффективность [9]. Поэтому в данной методике его применение также можно считать оптимальным.

Небольшие изменения $N(z, t)$ можно представить разложением N в ряд Тейлора:

$$N(z, t) = N(s_0, T_0, p_0) + \frac{\partial N}{\partial s}(s - s_0) + \frac{\partial N}{\partial T}(\theta - \theta_0) + \frac{\partial N}{\partial p}(p - p_0) + \frac{\partial N}{\partial T} \gamma_a z. \quad (1)$$

где T – абсолютная температура; θ – потенциальная температура: $\theta = T + \gamma_a z - 0,08 p_0 + 80$, град; γ_a – адиабатический градиент температуры, равный 0,01 град/м; p – парциальное давление, гПа; p_0 – приземное давление, гПа; s – удельная влажность: $s = 0,622 e p^{-1}$, гПа; e – парциальное давление водяного пара, гПа.

Давление в АПС можно вычислить по барометрической формуле

$$p(z) = p_0 \exp\left(-\frac{gz}{R_c T}\right), \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения; R_c – газовая постоянная.

Собирая в (1) только члены, которые содержат переменные подверженные процессу турбулентной диффузии для Π , имеем:

$$\dot{I}(z, t) = N(s_0, T_0, p_0) + \frac{\partial N}{\partial s}(s - s_0) + \frac{\partial N}{\partial T}(\theta - \theta_0). \quad (3)$$

Тогда для Π справедливо уравнение диффузии:

$$\frac{\partial \dot{I}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \dot{I}}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где k_z – вертикальная компонента коэффициента турбулентной диффузии.

Обратное вычисление N производится по формуле

$$N(z, t) = \dot{I}(z, t) + \frac{\partial N}{\partial p}(p - p_0) + \frac{\partial N}{\partial T} \gamma_a z. \quad (5)$$

В соответствии с возможностями средств наземных средств метеоизмерений и дистанционного зондирования, полная схема граничных условий задачи восстановления $N(z, t)$ представлена на рис.1.

Зоны достоверного измерения (заштрихованные области) разбивают вертикальную координату на ряд областей с различными граничными условиями. В области 1 решение (4)

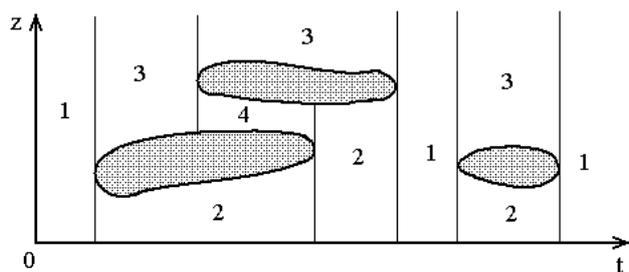


Рис. 1. Схема граничных условий в задаче восстановления

необходимо искать на полуограниченной прямой. В области 2 – на ограниченной прямой, у которой координата верхнего края изменяется во времени. Область 3 – полуограниченная прямая при переменной координате границы. Область 4 – ограниченная с двух сторон, и координаты обеих границ изменяются во времени. Граничное условие при $z=\infty$ можно, как и в [8, 9], определить постоянством градиента.

Наиболее проблематичным является выбор способа определения пространственно-временного распределения коэффициента турбулентной диффузии k . На высотах до 20 – 30м вычисления k производится по градиентным измерениям [8, 9]. На более высоких уровнях используются данные РАЗ и СЗ, и возможно применение различных методик [10]. Они развиты при проведении аэрологических исследований [11]. Выбор осуществляется по наилучшему совпадению с нижним участком, при этом учитывается наличие метеоинформации и проводится анализ общей метеообстановки. Если с помощью СЗ определено среднее значение скорости вертикальных потоков $\bar{\omega}$, то используется формула, полученная в 1927 г. Гессельбергом:

$$k = 0,5\bar{\omega}^2 t_{\omega} , \quad (6)$$

где t_{ω} – среднее время существования скорости одного знака.

Может использоваться формула, которая получена Ляпиным в 1948 г.:

$$k = 0,5\bar{\omega}'^2 t_{\omega} \bar{v} (\bar{v}')^{-1} , \quad (7)$$

где $\bar{\omega}'$ – среднее значение пульсаций вертикальной скорости; \bar{v} – средняя скорость воздушного потока; \bar{v}' – среднее значение пульсаций скорости.

Значение ω' можно определить по эмпирическим соотношениям среднеквадратических пульсаций вертикальной и горизонтальной скоростей для различных сезонов [11].

В ряде случаев расчет k производится с использованием соотношения полученного Сэттоном в рамках статистической теории турбулентности [12]:

$$k = \sqrt{-\frac{g}{T} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \gamma_a \right)} . \quad (8)$$

В сеансах, проводившихся в 1990 г. и позже, расчет k был сделан по Бызовой [13]:

$$k = \langle v_{\max} \rangle (\bar{v})^{-1} . \quad (9)$$

В этой формуле величина v_{\max} определялась на основании измеренного значения дисперсии v с коэффициентом, лежащим в пределах 2 – 2,5, что, согласно [13], соответствует двух- и 10-минутному интервалу осреднения при нормальном законе распределения флуктуаций скорости ветра.

Последняя из представленных формул наилучшим образом соответствовала метеорологической информации, полученной с помощью РАЗ, так как при измерении скорости ветра методом РАЗ, возможно оперативное, в течение 1 – 2 мин получение информации о ее дисперсии σ_v и законе распределения ее флуктуаций.

4. Обработка результатов и обсуждение

Для реального примера сеанса восстановления распределения $N(z,t)$ использованы данные наблюдений, полученные на метеополигоне ОГМИ в начале осени 1990 г.

На рис. 2 показана факсимильная запись сигнала содара с наложенным на нее пространственно-временным полем температуры, построенным по данным РАЗ.

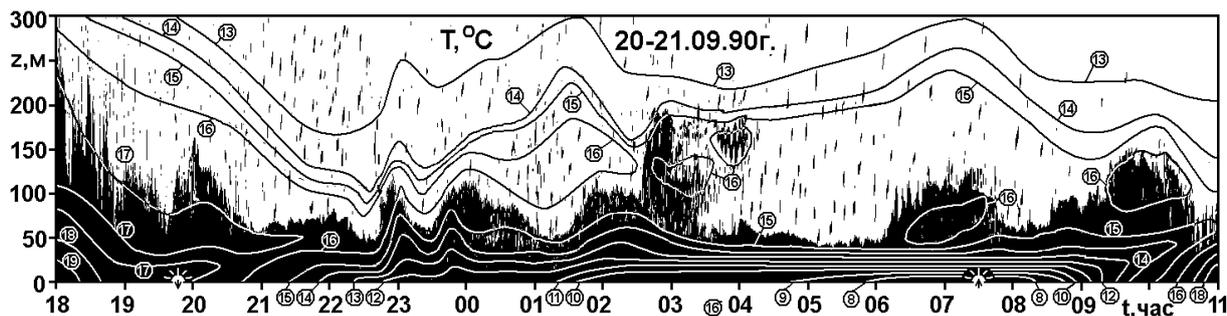


Рис. 2. Структура АПС (по данным содара), и поле температуры (по данным РАЗ)

Метеообстановка в ночь с 20 на 21.09.1990 г. характеризовалась изменчивостью температуры и ветра. Натекающий поток с северо-западного направления не позволил развиться ночной инверсии выше 50 м. Во время поворотов ветра образовывались зоны неустойчивости, изменялась температура. Плотность значений T была достаточной для интерполяции недостающих данных. Поле коэффициента турбулентной диффузии k определялось по пульсационным или градиентным характеристикам T и V или по V_B [13]. Его плотность также была достаточной. Плотность значений H была существенно ниже. Расчету подлежали высотные распределения потенциального модуля индекса показателя преломления N . Расчеты N и N проводились в системе MATLAB с привлечением пакета COMSOL Multiphysic.

Результаты восстановления высотных профилей N показаны на рис.3.

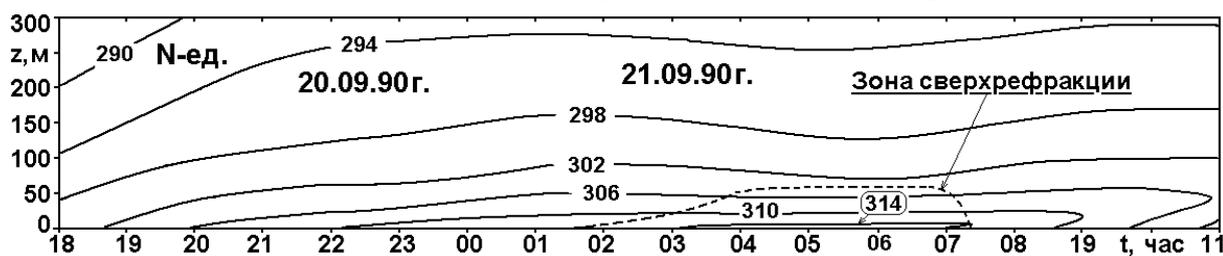


Рис. 3. Пространственно-временное поле индекса показателя преломления

На этом рисунке показана зона сверхрефракции ($dN/dz > 0,157 N\text{-ед./м}$).

Из сравнения изображений на рисунках можно сделать вывод, что разработанная методика вполне достоверно позволяет определять средние значения N , сглаживая его пульсации. Турбулентные зоны лишь немного изменяют вычисленные значения, а локальные неоднородности (точки на фак-записи) и волны плавучести (в пространственно временной области $t=04^{00}$, $z=200$ м, рис. 2) вовсе не получают отражения на поле N .

Обработка результатов данного сеанса, показала ограниченность методики, основанной на решении уравнения диффузии. Дальнейшее развитие методики требует привлечение других моделей динамики АПС. В частности, необходимо учитывать потоки скрытого тепла [14]. Необходимо более детально оценить информационное значение пульсационных характеристик метеоданных. Однако целенаправленные эксперименты для получения этих результатов не проводились. Поэтому пока можно говорить о теоретической разработке данного аспекта.

Выводы

Совершенствование методики требует совершенствования средств зондирования, математических моделей и алгоритмов обработки информации.

Современные электронные технологии позволят значительно улучшить качественные показатели систем зондирования. Количество и вид дополнительно полученной информации позволят сформировать логику алгоритмов ее обработки. Поэтому ключевым вопросом ста-

новится совершенствование технических средств. В частности, использование управляемых антенных решеток в системах РАЗ позволит расширить диапазон метеоусловий, в котором возможна уверенная работа [15]. При этом в качестве основы можно использовать решение дифракционной задачи, полученной для бистатических систем РАЗ [16]. Однако экономически совершенствование систем РАЗ – очень затратный путь. Более приемлемым является не связанное с РАЗ совершенствование содаров. Один из вариантов развития в этом направлении представлен в [17]. Принцип действия многолучевого содара, в основном, не отличается от обычного. Однако формирование лучей из единого фазового центра позволит использовать методы восстановления структуры объекта, развитые в голографии. Геометрические соотношения между лучами можно оптимизировать на основании «закона 2/3» Колмогорова – Обухова для вихрей в турбулентном потоке [2].

Обобщая представленные факты, можно указать, что на данный момент наиболее эффективным шагом в развитии этого направления является совершенствование теоретических основ метода РАЗ и акустической локации.

Список литературы:

1. Лайхтман Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970.
2. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. Москва : Наука, 1967.
3. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва : Наука, 1985.
4. Peters Gerhard, Fischer Bernd, Kirtzel Hans-Juergen. Sodar Turbulence-Profiles Versus Surface Measurements // Proceedings of the 9th International Symposium on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans (ISARS-9). Austria ; Vienna. 1998. P. 123-126.
5. Chorin Alexandre. Theories of Turbulence. Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer-Verlag, 1977.
6. Liu Chang, Panchenko A. Yu., Slipchenko M.I. Analysis of physical factors forming the received signal at sodar sounding of ABL // Proceedings of the 16th International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing (ISARS-16). USA, Boulder, Colorado. 2012. P. 161-164.
7. Ulyanov Yu.G., Maksymova Nina, Panchenko A. Yu. On the Use of Acoustic and Radioacoustic Methods of PBL Remote Sensing for Assessment of Radiowave Propagation Conditions // Telecommunications and Radio Engineering. 2006. №15. P. 1357-1369.
8. Андрианов В.А., Ракитин Б.В. Определение высотных профилей показателя преломления радиоволн в пограничном слое атмосферы по приземным метеоизмерениям. Москва : Препр. № 5(221) ИРЭ АН СССР, 1976. 35 с.
9. Андрианов В.А., Ракитин Б.В. Восстановление высотных профилей показателя преломления радиоволн в пограничном слое атмосферы // Радиотехника и электроника. 1978. №10. С. 2031-2038.
10. Герасюк Н.Е., Каллистратова М.А., Карюкин Г.А. и др. Акустический локатор для исследования атмосферной турбулентности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. Т.1. № 1. С.98-102.
11. Воронцов П.А. Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1966. 296 с.
12. Сэттон О.Г. Микрометеорология. Ленинград : Гидрометеиздат, 1958. 356 с.
13. Бызова Н.Л., Гаргер Е.Л., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Ленинград : Гидрометеиздат, 1991.
14. Зилитинкевич С.С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. 292 с.
15. Ch. Liu, A. Yu. Panchenko, Mykola I. Slipchenko, Y. N. Ulyanov. Atmospheric radio acoustic sounding systems with controlled array antennas. Part 1. Performance evaluation of controlled AA // Telecommunication and Radio Engineering. 2015. №17. P.1545-1552.
16. Панченко А.Ю. Дифракция электромагнитных волн на акустических при радиоакустическом зондировании атмосферы // Электромагнитные волны и электронные системы. 1997. №5. С. 37-42.
17. Панченко А.Ю., Петулько М.С. Многолучевой акустический локатор для решения микрометеорологических задач в районе аэропорта // Тези доповідей наук.-техн. конф. «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM. Київ, 2016. С.53.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 03.11.2019