

АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Д. ф.-м. н. А. Ю. Панченко, И. К. Ибраимов

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Украина, г. Харьков
oleksandr.panchenko@nure.ua

Акустические системы зондирования являются эффективным средством мониторинга нижней части тропосферы. В докладе представлен анализ результатов радиоакустического зондирования и содарного мониторинга атмосферного пограничного слоя, описана методика оценки условий распространения радиоволн вблизи границы «суша — море». Проведен анализ результатов, на основании которого обосновывается выбор путей развития средств акустического зондирования и обработки полученной информации с учетом теории турбулентной диффузии и прогресса электронной техники.

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, радиоакустическое зондирование, содар, турбулентная диффузия, граница «суша — море», электронная техника.

Несмотря на развитие спутниковых систем передачи информации и позиционирования, 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 весьма ограниченные теоретические модели динамики для некоторых состояний АПС [1]. Для этого 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, остается востребованной информация о состоянии АПС в таких областях, как метеорология, экология, транспорт, особенно авиационный, сельское хозяйство и прочих, что делает актуальным решение проблемы развития акустических методов и средств дистанционного зондирования нижнего слоя атмосферы.

Целью данной работы является представление комплексной методики использования дистанционных, неконтактных методов зондирования, теоретических представлений динамики атмосферного пограничного слоя и современных программных средств для решения задач оперативного определения условий распространения радиоволн на приземных трассах и оценка наиболее перспективных путей развития методов и средств получения этой информации.

Ряд фирм и университетов создают акустические локаторы — содары (SODAR — sonic detection and ranging) и системы радиоакустического зондирования (RASS — radio acoustic sounding system). 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 эту посылку облучают 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, принимаемый сигнал имеет достаточный уровень только вблизи фокуса. Методики изме-

рений 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 системы РАЗ и методики обработки принимаемого сигнала возможно дистанционное неконтактное измерение основных метеопараметров. Существенной проблемой такого 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 в [4]. До настоящего времени удовлетворительное решение имеют лишь прямые задачи о средних значениях параметров рассеянных волн [2]. При этом 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 сложны, чем механизмы рассеяния, например, электромагнитных волн [6].

Таким образом, непосредственное получение информации, необходимой для оценки индекса показателя преломления воздуха N возможно лишь в весьма 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 проводятся регулярно, начиная 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. Для их online-обработки требуется современная вычислительная техника и программные пакеты.

Методы комплексного использования средств акустического зондирования атмосферы совместно с математическими моделями динамики АПС для оценки условий РРВ активно развивались в ПНИЛ зондирования атмосферы Харьковского института радиоэлектроники (ХИРЭ, ныне Харьковский национальный университет радиоэлектроники — ХНУРЭ). В 1970—80-х годах в лаборатории 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 позволяет за короткий срок исследовать работу систем зондирования в разных условиях, получать большие объемы экспериментальных данных, необходимые для совершенствования систем и методов извлечения метеоинформации. С другой стороны, отсутствие сложной орографии упрощало анализ метеоситуаций при разработке 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 зондирования атмосферы ХИРЭ, содар — в ИРЭ. Расстояние от места расположения систем зондирования до береговой линии составляло около 800 м. Система РАЗ позволяла измерять температуру (T), влажность (H), скорость и направление ветра (V , φ). Измерения могли проводиться до высоты 400—600 м. Однако 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,

численно оценивать ее величину (V_B).

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. Они опираются на теорию турбулентности, описывающую поток вблизи его границы. В качестве основной модели для расчета условий РРВ использовалась модель турбулентной диффузии. Она давала вполне достоверные результаты даже в тех случаях, когда интерполяция была принципиально невозможна [8]. Пример сеанса восстановления высотного распределения $N(z, t)$ по данным метеонаблюдений, проведенным на полигоне ОГМИ, иллюстрируется ниже.

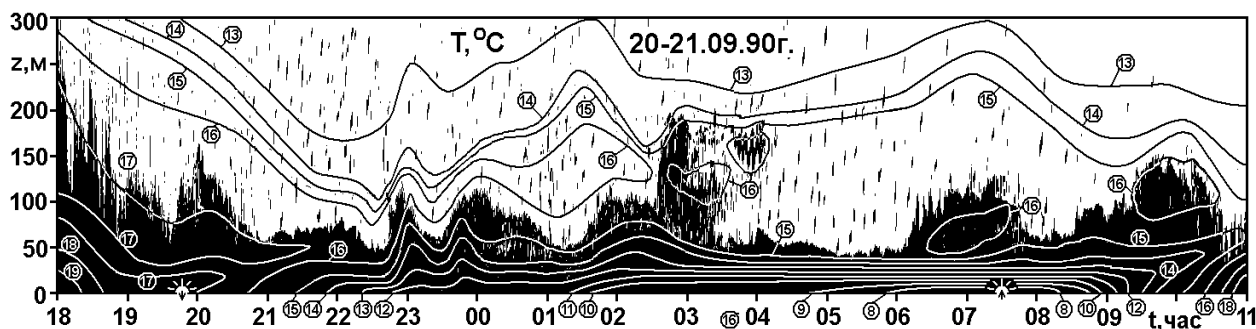


Рис. 1. Структура АПС (по данным содара) и поле температуры (по данным РАЗ)

На рис. 1 показана факсимильная запись сигнала содара с наложенным на нее пространственно-временным полем температуры, построенным по данным РАЗ.

Метеообстановка в ночь с 20 на 21.09.90 г. характеризовалась изменчивостью температуры и ветра. Натекающий поток с северо-западного направления не позволил развиваться 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 [9]. Его плотность также была достаточной. Плотность значений H была существенно ниже. Расчету подлежали высотные распределения потенциального модуля индекса показателя преломления Π , который учитывает адиабатичность процессов и барометрическую зависимость давления p [8]. Расчет Π проводился в пакете COMSOL Multiphysic, дальнейший расчет N — в системе MATLAB.

Результаты восстановления высотных профилей N показаны на рис. 2.

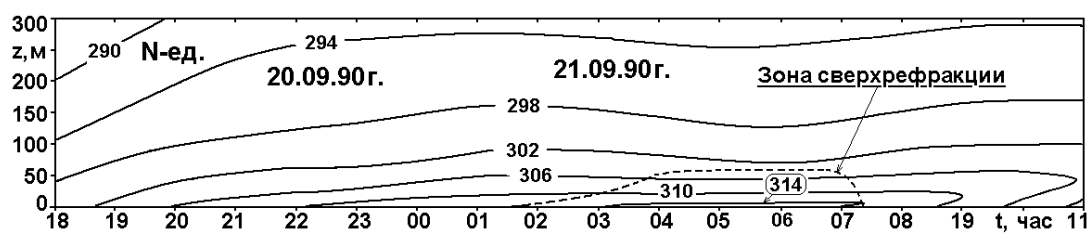


Рис. 2. Пространственно-временное поле индекса показателя преломления

На этом рисунке показана зона сверхрефракции ($dN/dz > 0,157$ N-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 ($t = 4$ ч, $z = 200$ м рис. 1) вовсе не получают отражения на поле N .

Дальнейшее развитие методики проводилось в направлении оценки дисперсии полученных значений N на основании пульсационных характеристик метео данных. Последующие расчеты показали хорошее совпадение результатов с известными представлениями. Однако целенаправленные эксперименты для подтверждения этих результатов пока не проводились, поэтому пока можно говорить о совпадении лишь на качественном уровне.

Таким образом, совершенствование методики требует совершенствования средств зондирования, математических моделей и алгоритмов и средств обработки информации. На данном этапе наиболее важным является оптимальный выбор дальнейших путей развития. Учитывая теоретические трудности, можно ограничиться следующим.

Выше уже было сказано, что современные электронные технологии позволяют значительно улучшить качественные показатели систем зондирования. Количество и вид дополнительно полученной информации позволят сформировать логику алгоритмов ее обработки, поэтому ключевым вопросом становится совершенствование технических средств. В частности, использование управляемых антенных решеток в системах РАЗ позволит расширить диапазон метеоусловий, в котором возможна уверенная работа [10]. При этом в качестве основы можно использовать решение дифракционной задачи полученной для бистатических систем радиоакустического зондирования [11]. Однако совершенствование систем РАЗ является экономически весьма затратным путем. Более приемлемым является не связанное с РАЗ совершенствование содаров. Один из вариантов развития в этом направлении представлен в [12]. 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]. Однако и этот путь может быть достаточно затратным.

Обобщая представленные выше факторы, можно заключить, что на данный момент первым и наиболее эффективным шагом в развитии этого направления является совершенствование теоретических основ методов радиоакустического зондирования и акустической локации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лайхтман Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы.— Л.: Гидрометеиздат, 1970.
2. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере.— М.: Наука, 1967.
3. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы.— М.: Наука, 1985.
4. Gerhard P., Bernd F., Hans-Juergen K. Sodar turbulence-profiles versus surface measurements // Proc. of the 9th Int. Symposium ISARS'98.—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. Восстановление высотных профилей показателя преломления радиоволн в пограничном слое атмосферы // Радиотехника и электроника.— 1978.— №10.— С. 2031—2038.
9. Бызова Н.Л., Гаргер Е.Л., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси.— Л.: Гидрометеиздат, 1991.
10. 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.
11. Панченко А.Ю. Дифракция электромагнитных волн на акустических при радиоакустическом зондировании атмосферы // Электромагнитные волны и электронные системы.— 1997.— №5.— С. 37—42.
12. Панченко А.Ю., Петулько М.С. Многолучевой акустический локатор для решения микрометеорологических задач в районе аэропорта // Тези доповідей НТК «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM.— Україна, м. Київ.— 2016.— С. 53.

A. Yu. Panchenko, I. K. Ibraimov

Acoustic methods for assessing radio propagation conditions

Acoustic sensing systems are an effective means of monitoring the lower troposphere. The paper presents an analysis of the results of radio-acoustic sensing and sodar monitoring of the atmospheric boundary layer and a method for assessing the propagation conditions of radio waves near the land-sea border. The analysis of the results allowed justifying the choice of the ways of development of acoustic sensing and processing of the obtained data taking into account the turbulent diffusion theory and the advancement of electronics.

Keywords: atmospheric boundary layer, radioacoustic sensing, sodar, turbulent diffusion, land-sea boundary, electronic equipment.