

М.В. Лантев, А.Н. Алаев, Г.А. Петров

**МЕТОДЫ ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРИЕМА
И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СОДАРАХ**

Аннотация: в данной статье рассмотрены области применения вертикальных профилометров, актуальность их использования, а также устройство и принципы их работы. Проанализированы характерные особенности различных видов содаров и их программного обеспечения. Выявлены и обоснованы основные недостатки современных содаров и пути решения этих проблем. На основе проведенного исследования сделаны краткие выводы.

Ключевые слова: акустика, эхозонд, содар, акустическое зондирование, фазированная решетка.

M.V. Laptev, A.N. Alaev, G.A. Petrov

METHODS OF EMISSION, RECEIVING AND PROCESSING SIGNALS IN SODAR

Abstract: in this article the application of vertical profilers is discussed, the relevance of their use, as well as a device itself and how it works. Authors analyzed characteristics of different types of sodars and its software. Also there was revealed and substantiated main disadvantages of modern sodars and solutions of these problems. On the basis of the study conclusions are made.

Keywords: acoustic, ehozond, sodar, acoustic sensing, phased array.

Погода всегда играла важную роль в жизни человека. Так знание об атмосферных явлениях нужны не только обывателю, выходящему утром из дома, но и на предприятиях, связанных с большим риском.

В последние годы, наряду с традиционными методами измерения метеорологических параметров, таких как метеомачты и радиозонды, совершенствуются методы дистанционного зондирования (Содары, Лидары и Системы радиоакустического зондирования) для получения характеристик атмосферной турбулентности. Эти данные используются при синоптическом прогнозировании,

а также при решении вопросов анализа распространения электромагнитного и акустического излучений в атмосферном пограничном слое [1; 2], а также диффузии частиц примесей [3]. Актуальность использования содаров состоит в возможности получения длинных и непрерывных временных рядов наблюдений турбулентности как горизонтальных, так и вертикальных профилей ветра.

Содар (*SODAR, аббревиатура от SONic Detection And Ranging* – акустический детектор и дальномер) или как его еще называют Ветровой профилометр – это система, которую используют для дистанционного измерения структуры вертикальной турбулентности и профиля ветра в нижних слоях атмосферы. Содары называют также акустическими зондами, эхозондами или акустическими радарами.

Область применения акустических содаров весьма обширна. Так кроме использования содаров метеослужбами для наблюдения за скоростью и направлением ветра, его применяют для измерения профилей ветра в аэропортах, для обеспечения безопасности АЭС и любых других потенциальных источников аварийных ситуаций, а также в военной сфере.

Принцип действия содара во многом подобен радару или сонару. То есть, прибор посылает звуковые колебания в атмосферу и принимает их после отражения от слоев с различной плотностью воздуха и скоростью движения. Интенсивность взаимодействия акустической волны с атмосферными неоднородностями очень велика, примерно в миллион раз сильнее, чем для электромагнитных волн. Поэтому в результате взаимодействия происходит не только рассеяние волн, но и их сильное поглощение и рефракция. Это приводит к тому, что высота акустического зондирования обычно не превышает 1000 метров. Перечисленные эффекты очень сильно зависят от частоты излучения (примерно пропорционально квадрату частоты), поэтому при высоте зондирования до 300 м используются частоты 5–10 кГц, а для достижения высоты в 1000 м частоту снижают до 1 кГц [4].

При акустическом зондировании в атмосферу излучается короткая пачка звуковых волн, которая при распространении рассеивается на акустических неоднородностях атмосферы. Источником акустических неоднородностей в атмосфере являются неоднородности поля ветра и температуры, которые в первую очередь связаны с турбулентными движениями.

Отраженные звуковые волны регистрируются акустическим приемником, расположенным, как правило, вблизи источника излучения. По времени задержки отраженного сигнала определяют дальность рассеивателей, по мощности отраженного сигнала можно судить об интенсивности турбулентности, а по доплеровскому сдвигу частоты можно определить проекцию ветра на направление зондирования. Длительность излучаемого импульса обычно лежит в интервале 0,05–0,3 секунды. Учитывая, что скорость распространения звука составляет $C=340$ м/с, получим, что разрешение по дальности такой системы будет весьма высоким: от 8 до 55 метров.

Основным компонентом системы является антенна. Именно типом антенны различаются различные типы содаров. Существует несколько подходов. Первоначально использовались параболические тарелки, имеющие, как правило, диаметр в 1,2 м, с направленной вверх фокальной точкой. Громкоговоритель устанавливается в фокальной точке, сигнал направлен вниз, к поверхности параболической тарелки, что обеспечивает защиту громкоговорителя от прямых осадков. Вообще, оболочка, использованная вокруг параболических тарелок, необходима для уменьшения боковой интерференции, а также для экранирования антенны от шума ветра и постороннего шума. В многоосевой системе обычно используются три параболических антенны, одна из которых направлена вертикально, а другие – под небольшим углом (обычно 20–30°). Во время работы содара все три антенны могут быть использованы последовательно или одновременно. При одновременном использовании всех трех антенн они работают с различной частотой, поэтому рассеянные сигналы не влияют друг на друга

Согласно современному подходу к проектированию содаров, в них используется решетка из множества небольших элементов, от 16 до 100 или более, состоящих из пьезоэлектрических источников звуковых сигналов. Несмотря на то, что такая конструкция значительно сложнее параболических тарелок, она имеет некоторые преимущества. В отличие от параболической антенны, которая имеет ограничения по мощности, связанное с применением мощных громкоговорителей, мощность антенны с решетками может быть увеличена за счет добавления элементов. Однако, реальной движущей силой в развитии содаров с антенной решеткой является использование технологии фазированной решетки. Эта технология предоставляет возможность управления полосой звуковых колебаний в любом направлении. Это означает, что система с фазированной решеткой может быть использована для получения данных по многим осям.

Одной из основных проблем в использовании антенн с фазированной решеткой является защита элементов антенны от атмосферных осадков. Для этого выработано два основных подхода: 1) использование специально спроектированных источников сигнала закругленной формы, присоединенных к каждому элементу решетки; 2) использование платы рефлекторов таким образом, чтобы элементы решетки не были направлены вверх. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки. При использовании закругленных источников решетка может быть установлена горизонтально. Может также потребоваться небольшой экран вокруг решетки. При использовании платы рефлектора решетка, как правило, располагается вертикально, и пакеты колебаний отражаются от платы рефлектора. Это защищает от проникновения осадков в излучатели решеток и делает возможным применение стандартных громкоговорителей в качестве элементов решетки. Недостатком этой системы является то, что применение платы рефлектора и оболочки приводит к тому, что система становится более громоздкой. В условиях холодного климата закругленные источники должны подогреваться для расплава снега, в то время как в системе с платой рефлекторов должна подогреваться плата, что предоставляет некоторые преимущества.

В способе обработки сигналов у содаров различных типов также есть существенные различия. Большинство содаров сейчас используют метод быстрого преобразования Фурье (FFT) для получения доплеровского сдвига. Но до и после обработки по методу FFT могут применяться различные методики. Основное их назначение – улучшить детектирование сигнала. Одной из таких методик является усреднение сигнала. Усреднение может быть использовано по времени и по частоте с целью уменьшения шума и улучшения пропорции сигнал/шум, что обычно является основным критерием приемлемости данных.

Имеются два главных подхода в плане обработки данных:

- 1) усреднение спектра всех последовательных пакетов пульсаций с выделением района с максимальной спектральной энергией;
- 2) локализация района с максимальной энергией в каждом пакете с последующим усреднением результатов.

Согласно более поздним разработкам количество значимых проб (пакетов сигналов) для расчета периода усреднения можно использовать как дополнительный критерий для оценки приемлемости данных. В обоих случаях методика, известная как «bin averaging», часто используется для локализации указанного диапазона частот в пределах рабочей полосы содара. Это также позволяет улучшить спектральное разрешение FFT.

Возможности сохранения и представления данных также существенно различаются в зависимости от типа используемого содара. Большинство систем предоставляет возможность получения данных в виде текста и диаграмм, иллюстрирующих горизонтальный и вертикальный профили ветра, данные по интенсивности сигналов. Могут быть также представлены специфические характеристики ветра, что полезно для контроля качества работы системы. Вывод спектральных данных на дисплей также очень полезен с точки зрения эксплуатации системы, но не все содары имеют такую функцию [5]. Данные, характеризующие качество сигнала, обычно также выводятся на дисплей и сохраняются в отчетах. Как минимум, отслеживается соотношение сигнал/шум, но общих правил среди

производителей содаров нет. Из-за большого объема генерируемых содаром данных, сохраняются только усредненные значения, непрерывные ряды данных не сохраняются. Каждый содар имеет свой уникальный формат сохранения данных, что препятствует унификации оборудования. Даже если сохраняются только усредненные значения, для обработки и оценки достоверности, составления отчетов и архивирования потребуется специальное программное обеспечение.

Можно сделать вывод, что главным достоинством содаров является их относительная простота и невысокая стоимость. Они достаточно надежно обеспечивают измерение скорости и направления ветра в диапазоне высот от 20 до 200–800 метров при относительно высоком вертикальном разрешении (порядка 5–50 м). Но также следует отметить что у содара есть и свои недостатки. Так, например, предельная высота зондирования сильно зависит от метеорологических условий во время измерений – снижается при наличии температурных инверсий в атмосферном пограничном слое, при сильной турбулентности и сильных ветрах. Измерения весьма чувствительны к посторонним звукам, поэтому работу практически невозможно проводить при высоком уровне фоновых шумов и при наличии жидких осадков. Также к недостаткам следует отнести то, что излучаемый сигнал содара (обычно в диапазоне 1–10 кГц) является слышимым для человеческого уха и вызывает неприятные ощущения, поэтому содары рекомендуется использовать вне населенных пунктов.

Список литературы

1. Красненко Н.П. Пространственно-временная динамика характеристик атмосферной турбулентности по результатам акустического зондирования / Н.П. Красненко, Л.Г. Шаманаева // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2014. – №6 (14). – С. 146306-1–146306-8.

2. Шаманаева Л.Г. Содарные измерения ветровых и турбулентных характеристик атмосферы / Л.Г. Шаманаева, Н.П. Красненко // XI Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. – Томск, 2015. – С. 221–222.

3. Гараев В.М. Способ широкомасштабного контроля низковысотных температурных инверсий в городской атмосфере / В.М. Гараев // Контроль. Диагностика. – 2011. – №7. – С. 69–72.

4. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы / Н.П. Красненко. – Новосибирск: Наука, 1986. – 169 с.

5. Стерлядкин В.В. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы / В.В. Стерлядкин, А.Г. Горелик, Г.Г. Шукин // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: III Всероссийские Армандовские чтения: молодежная школа. – Муром, 2013. – С. 24–42.

6. Содары [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://esmoptes.ru/material/materials_id/14

Лаптев Максим Владимирович – студент ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Россия, Санкт-Петербург.

Laptev Maxim Vladimirovich – student of Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Russia, Saint Petersburg.

Алаев Андрей Николаевич – студент ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Россия, Санкт-Петербург.

Alaev Andrey Nikolaevich – student of Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Russia, Saint Petersburg.

Петров Глеб Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Россия, Санкт-Петербург.

Petrov Gleb Anatolevich – candidate of engineering science, assistant professor of Department of Electrical Acoustics and Ultrasonic Engineering Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Russia, Saint Petersburg.
