

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ФОРМИРУЮЩИХ ОТРАЖЕННЫЙ ЗВУКОВОЙ СИГНАЛ В АПС

Слипченко Н.И., Лю Чан, Панченко А.Ю.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

61166, Харьков, пр.Ленина,

E-mail: panchenko-a-yu@yandex.ru

The modern state of systems and methods for the atmosphere acoustic sounding is analyzed. Physical factors forming the reflected acoustic signal are generalized. The problems, which are the most urgent at present, are formed. Possible ways of performing the sounding methods and systems are considered.

Введение. Решение экологических проблем и проблем обеспечения продовольствием в настоящее время выходит на первый план. Это требует создания новых систем контроля природной среды, среди которых важное место занимают системы микрометеорологического обеспечения. При этом выделяются две задачи: оценка текущей метеообстановки и составление прогноза.

Акустическое зондирование (АЗ) позволяет получить общую картину локальной метеообстановки [1]. Но до настоящего времени АЗ не позволяет ее детализировать и выделить основные метеопараметры. Это связано с отсутствием адекватного математического описания, как динамики атмосферного пограничного слоя (АПС), так и условий рассеяния звука в нем.

Необходимым условием успешной работы информационно-измерительных систем и отдельных приборов, предназначенных для исследования сложных объектов, является наличие адекватных моделей функционирования самого объекта. Эта необходимость вызвана тем, что определение всех без исключения параметров, описывающих сложный объект технически, а в ряде случаев, физически невозможно.

Атмосферный пограничный слой является весьма сложным объектом. Приближения, традиционно используемые в современных теориях, исключают из рассмотрения ряд факторов [2]. К таким относится, например, предположение несжимаемости турбулентного потока, что не позволяет построить адекватную модель отражения звука в АПС при отсутствии источников тепла на поверхности. Сложившаяся практика конструирования акустических локаторов (содаров) также имеет ряд укоренившихся положений, которые требуют анализа, а в некоторых случаях серьезной доработки. Необходимость этого определяется еще и тем, что акустические волны во много раз чувствительнее к изменениям параметров воздуха, чем иные виды излучений. А с учетом технических, экономических и эксплуатационных факторов содары являются наиболее перспективным средством оценки локальной метеообстановки.

Таким образом, необходимо выделить задачи, которые нужно решить для повышения эффективности содаров и систем зондирования на их основе. Для этого следует поэтапно выделять наиболее существенные препятствия, ограничивающие получение полезной информации. Ряд таких препятствий показан в [3,4,5]. Целью данной работы является их комплексный анализ и выработка предложений по дальнейшему совершенствованию систем зондирования.

Развитие представлений о информационных компонентах сигнала АЗ АПС.

В настоящее время существует значительное количество моделей, описывающих состояние АПС. На основании многолетнего опыта проведения комплексных метеоизмерений с использованием наземного комплекса метеодатчиков Одесского гидрометеорологического института, системы радиоакустического зондирования РАЗ-10-20, созданной в ПНИЛ зондирования атмосферы ХИРЭ, метеомачты (50м) и акустического локатора ИРЭ РАН, а также анализа данных приведенных в литературе другими авторами можно выделить три состояния АПС, которые наиболее значимы для решения задач повышения эффективности методов выделения полезной информации при АЗ. Это устойчивое состояние харак-

терное для ночных инверсий, далее развитая термическая турбулентность – наиболее часто встречающаяся в период антициклонов и, наконец, динамическая турбулентность, характерная для циклональных условий. Но и для этих условий остаются малоизученные факторы, например, влияние влагосодержания воздуха.

В настоящее время наиболее совершенные модели созданы для динамической турбулентности [2]. Однако при конструировании систем АЗ наработки в данной области учитываются не полностью. В частности многие современные содары имеют широкую диаграмму направленности (ДН), например, созданный в С.-Петербур. ООО «СЕНС-ОПТИК» (2008г.) VT-1 (http://www.ecmoptec.ru/index.php?device&cat_device_id) и ряд других.

В [3] на основании устоявшихся положений теории антенн и волновой оптики обоснована необходимость учета волновых свойств пучков отраженных акустических волн. Среди практических результатов этой работы можно отметить, что для содаров более эффективны узкие ДН акустических излучателей. Они лучше соответствуют задачам определения параметров атмосферы, как по энергетическому, так и по информационному критериям. При анализе используется современная теория подобия, в соответствии с которой максимальный размер вихря в пограничном слое равен расстоянию до границы потока. Минимальный – можно оценить в соответствии с гипотезой Рейнольдса, согласно которой турбулентность возникает при превышении соотношением $Re = Lv/\nu$ где L – характерный размер потока; ν – скорость; η – кинематическая вязкость, равная $\eta = \mu / \rho$; μ – динамическая вязкость, или просто вязкость; ρ – плотность среды, величины порядка 10^7 . Вязкость воздуха $1,8 \cdot 10^{-4}$ Пуаз = $0,18 \cdot 10^{-4}$ Па*с, плотность $1,3$ кг/м³. Устойчивый турбулентный вихрь образуется при числах Рейнольдса $>10^7$ [2]. Тогда минимальный размер вихря в АПС равен:

$$L = \frac{10^7 \cdot 0,18 \cdot 10^{-4}}{1,3 \cdot 2 \cdot \nu} = \frac{70}{\nu[\text{м/с}]} [\text{м}] . \quad (1)$$

Оценку структурной функции случайного поля турбулентных пульсаций скорости ветра можно сделать на основании «закона 2/3» Колмогорова–Обухова [2]. В данном случае, если при умеренной скорости ветра минимальный размер вихря непосредственно у поверхности земли около $L_{\min}(0) \approx 15\text{м}$, а коэффициент пропорциональности «закона 2/3» лежит в диапазоне 2,5...3, то на верхней границе АПС (~1000м) $L_{\min}(1\text{км}) \approx 300\text{м}$. Тогда на основании простых геометрических соотношений для эффективной оценки пространственных и энергетических характеристик турбулентности и флуктуаций параметров воздушной массы можно получить зависимость оптимальной ширины ДН от предполагаемой высоты зондирования (рис.1).

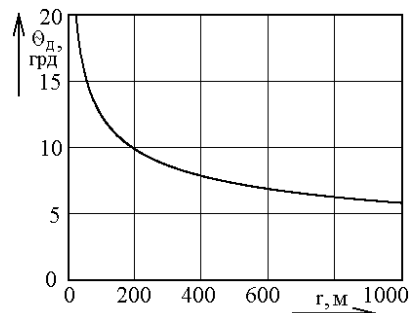


Рисунок 1 – Оценка необходимой ширины ДН содара

Не менее важным остается открытый до сих пор вопрос формирования отраженного сигнала. Отражающий объем имеет значительные размеры, которые увеличиваются при удалении от системы АЗ, поэтому приемник содара находится в основном в зоне Френеля, а в некоторых случаях и в ближней зоне отражателя. Волновые свойства поля в этом случае имеют определяющее значение. Анализ осложняется статистическим характером отражателя. Поэтому здесь необходимо использовать наработки в области статистической теории антенн, особенно той ее части, которая касается зоны Френеля. Но эта теория сама по себе достаточно сложная, ее переложение к данным задачам потребует немалых усилий. Но необходимость этой работы вызвана тем, что известные задачи оценки

параметров отраженных волн в турбулентной атмосфере сформулированы в условиях заданной турбулентности [2]. Непосредственное обращение их результатов для получения ответа в обратных задачах измерения параметров АПС по имеющимся сигналам в большинстве случаев будет некорректным, так как в процессе решений было сделано множество предположений и упрощений.

В соответствии с данной выше оценкой, ставший уже традиционным способ измерения скорости ветра трехкомпонентным содаром также недостаточно эффективен. Компоненты вектора скорости измеряются в точках, в которых их корреляция близка к минимальной, что, соответственно, приводит к значительной дисперсии рассчитанного значения скорости. В связи с этим в настоящее время существует ряд подходов к созданию методик получения среднего значения. Однако эти подходы имеют, в основном, эмпирическую базу. Анализ физических факторов формирования доплеровского сдвига частоты сигнала Δf_d , особенно его флуктуационной компоненты показан в [4].

В отличие от поперечных волн, для продольных волн, поле которых движется вместе со средой, механизм появления Δf_d значительно более сложный. Полная скорость движения акустических волн включает скорость движения среды, которая подвижна и заполняет все возможное пространство. Это приводит к тому, что граничные условия не могут включать движения материальной границы, поскольку при перемещении твердой границы, среда «увлекается» препятствием, и скорость движения среды V_0 вблизи границы равна скорости движения препятствия (рис.2).

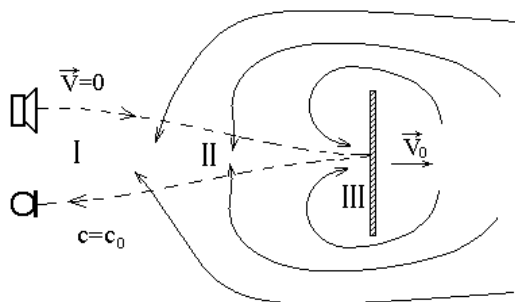


Рисунок 2 – Схема движения волн и среды при движении отражателя

В первой области (I) скорость распространения звуковых волн c_0 зависит от скалярных параметров среды: упругости и плотности. Скорость встречи звуковой волны с препятствием также равна c_0 . А относительно неподвижной системы координат она составит соответственно $c_{пад} = c_0 + v_0$ для падающей волны и $c_{отр} = c_0 - v_0$ для отраженной. Изменение скорости акустических волн относительно неподвижной системы происходит в области II, в которые поступает новые объемы среды, которые не прилегают непосредственно к препятствию.

В этой области компоненты скорости движения среды $v - \frac{\partial v}{\partial t}$, $\text{div } v$ и $\text{rot } v$ не равны нулю. Очевидно, что и вектор скорости распространения акустических колебаний в этой области изменяется тоже достаточно сложным образом. Вероятно, что здесь даже $\text{rot } c \neq 0$, где c – скорость звуковых волн относительно среды.

Таким образом, задача определения флуктуаций Δf_d должна решаться в системе трех измерений (при упрощении задачи – в двух), и учитывать турбулентность следа, используя модели «дорожка Кармана» и прочие.

Кроме Δf_d для оценки состояния АПС используется амплитуда отраженного сигнала. Обычно строится поле значений амплитуд в координатах высота-время, например, <http://devio.us/~roux/IFA/> (содар ИФА РАН). По виду поля судят о происходящих в АПС процессах, Однако, такое использование этой информации также можно считать неполным. Модуль коэффициента отражения является информационным параметром для любых локационных систем, однако его физическое происхождение интерпретируется не всегда адекватно. Еще большей доработки требуют количественные соотношения.

При разработке методик выделения информации из сигналов АЗ доминирует представление об отражении звука, в основном, от температурных неоднородностей. Такой

подход хорошо описывает случай температурных инверсий, несколько хуже – случай термической турбулентности. Однако, модели отражения назад для динамической турбулентности развиты весьма слабо, а порой вообще отрицаются. Тем не менее, хаотическое движение сплошной среды возможно лишь при наличии хаотического поля сил, приводящих к локальным изменениям скорости. Если отсутствуют внешние силовые поля, то такое поле сил может быть обусловлено только хаотическим полем давления. В [5] на численном примере показано, что при характерных для турбулентного АПС флуктуациях скорости потока, сопутствующие им перепады давления и плотности приведут к появлению отраженного звукового сигнала, уровень которого соизмерим с сигналом отраженным от температурных неоднородностей. Но необходимо учитывать, что диапазон флуктуаций метеорологических величин в АПС: скорости ветра, содержания водяного пара, пульсации температуры, давления – может составлять несколько порядков. Поэтому и соотношение их вкладов при формировании принимаемого сигнала также меняется в широком диапазоне значений.

Выводы. Приведенный анализ показывает, что в дальнейшем необходимо ориентироваться на создание комплекса методик, адаптированных под различные состояния АПС. Вероятно, потребуется создание нескольких типов антенных систем и приемо-передающих трактов содаров, которые оптимизированы для различных условий и решения различных задач. В круг этих задач необходимо включить измерение параметров, которым в настоящее время уделяется необоснованно мало внимания, в частности, такому важному параметру, как влажность. Принципиальная возможность решения этого вопроса определяется достаточными отличиями условий распространения звука в сухом и влажном воздухе. Молекулы воды имеют существенно меньший молекулярный вес, чем основные компоненты воздуха ($M_{N_2} = 28$, $M_{O_2} = 32$, а $M_{H_2O} = 18$), и шесть степеней свободы (адиабатическая постоянная водяного пара – $\gamma_{H_2O} = 1,33$).

Сложность физических процессов обуславливает необходимость тщательного разделения процесса извлечения информации на ряд этапов, часть которых должна решаться аналоговыми, а часть цифровыми средствами.

В целом можно считать, что развитие теоретических основ динамики АПС, методов анализа акустических сигналов и прогресс технических средств зондирования позволит существенно увеличить количество информации, получаемой системами АЗ.

Литература

1. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя – Томск: Изд. СО РАН, 2001.–278 с.
2. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч.1. – М.: Наука, 1965. - 640с. Ч. 2. 1967. – 720с.
3. *Панченко А.Ю., Марюх В.А.* Влияние волновых свойств направленных звуковых пучков содаров при формировании поля отраженных волн в АПС // Системы управления навигации и связи, 2009, вып. 4(12). – с.42-46.
4. *Панченко А.Ю.* Анализ физических факторов, формирующих параметры отраженного сигнала при акустическом зондировании атмосферного пограничного слоя // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. - 2010. – Вып. 160. – С. 184-188.
5. *Панченко А.Ю.* К оценке интенсивности рассеянных акустических волн в АПС при отсутствии источников тепла на поверхности // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. - 2011. – Вып. 164. – С. 53-57.