

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ФОРМИРУЮЩИХ ПАРАМЕТРЫ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Стремительно возрастающая техногенная нагрузка на окружающую среду обуславливает необходимость развития методов и средств ее мониторинга. В Харьковском институте радиоэлектроники в течение многих десятилетий под руководством проф. Кащеева Б.Л., проф. Прошкина Е.Г., проф. Лагутина М.Ф. проводились работы по созданию систем и развитию методов зондирования атмосферы, изучению ее свойств в широком диапазоне высот и условий. Данная работа является продолжением начатых ранее исследований.

Введение

Дистанционное зондирование атмосферы является одним из приоритетных направлений экспериментальных исследований окружающей среды. Значительные размеры контролируемого объекта, его временная изменчивость делает неэффективным применение локальных контактных измерителей. Поэтому наиболее перспективными являются методы, основанные на применении волновых полей – электромагнитного и акустического [1]. Использование электромагнитного поля дает принципиальную возможность получения метеоинформации с больших расстояний за короткий промежуток времени, но требует значительных энергетических затрат и высокочувствительной приемной аппаратуры [2]. Поэтому в настоящее время наибольший интерес представляет развитие акустических методов, в частности создание средств активной акустической локации [3]. Однако широкому внедрению акустического зондирования в практику метеоизмерений препятствует недостаточное развитие его теоретических основ. Несмотря на то, что исследования в области теории движения сплошной среды продолжают уже несколько столетий, и они дали мощные толчки для развития других направлений физики и математики, сложность данной проблемы до настоящего времени не позволяет получить решения, в достаточной мере удовлетворяющие нуждам практики.

Проблемы современной теории АЗ

В настоящее время имеется множество технически совершенных акустических локаторов (АЛ) и значительное количество работ, посвященных методам обработки сигналов при акустическом зондировании (АЗ) атмосферы. Тем не менее, единой, общепризнанной методики извлечения полезной информации при АЗ не существует. Обусловлено это незамкнутостью обратной задачи. Кроме того, в турбулентной атмосфере соотношение вкладов случайных и детерминированных факторов в принятый сигнал велико, поэтому сложно подобрать методику выделения средних и, особенно, флуктуационных значений метеовеличин, например скорости ветра. Аналогичная ситуация складывается при зондировании стратифицированной атмосферы, в этом случае трудно разделить влияние изменений влажности и температуры [4].

Несмотря на совершенную аксиоматику современного теоретического представления динамических процессов в сплошной среде, в настоящее время при анализе используются традиционные подходы, сформированные ранее для решения более простых задач [5, 6]. Это не позволяет получить результаты, удовлетворяющие практическим нуждам на современном этапе. Попытки введения в исходные посылки значительного количества параметров, как основного потока, так и волнового поля, приводят к громоздким промежуточным выкладкам. Но в свою очередь это обуславливает существенное упрощение конечных результатов. Наглядно проследить этот путь можно по наиболее значительным, обобщающим работам, на пример, одной из последних таких работ является [7].

Целью данной работы является более глубокий анализ физических процессов, необходимый для уточнения путей построения адекватных математических моделей, описывающих поля акустических волн в неоднородной движущейся среде.

Анализ традиционного подхода

Традиционный подход в этой задаче основан на решении волнового уравнения в движущейся системе координат. Например, замкнутое уравнение для звукового давления p в трехмерно-неоднородной движущейся среде имеет вид [7]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{c^2 \rho} \frac{\partial p}{\partial t} \right) - \nabla \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\nabla p}{\rho} \right) + 2 \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} \right) = \\ = \frac{d}{dt} \frac{\partial Q}{\partial t} - \nabla \frac{\partial \bar{F}}{\partial t} + 2 \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \frac{\partial F_j}{\partial x_i}, \end{aligned} \quad (1)$$

где v_i – компоненты скорости среды, ρ – плотность, \bar{F} , F_j – вектор приложенных к среде сил и его компоненты, Q – источник массы, c – скорость звука в неподвижной среде.

Или точное уравнение для звуковых волн в однородной равномерно движущейся среде [7]:

$$\left[\frac{1}{c^2(R)} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}(\vec{R}) \nabla \right)^2 - \Delta \right] p = \rho(\vec{R}) \left(\frac{dQ}{dt} - \nabla \bar{F} \right). \quad (2)$$

Введение скорости перемещения координатной системы приводит к появлению в дифференциальном уравнении операторов вида $(\vec{v}, \nabla)u$, $(\vec{\omega}, \nabla)\vec{v}$, где $\vec{\omega}$ – вектор скорости акустического движения, или аналогичных в тензорной форме. Решение этих уравнений, например (2), при движении отражателя дает добавку в фазовый множитель, обусловленную изменением расстояния между приемопередатчиком и отражателем, что приводит к появлению сдвига $\Delta f = -2f \frac{v}{c}$.

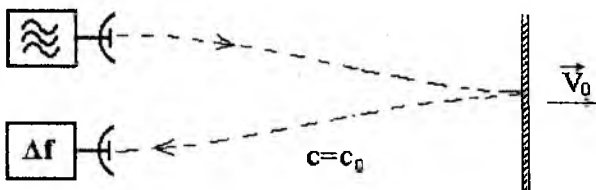


Рис. 1. Схема доплеровской радиолокации

для описания эффекта Доплера при зондировании поперечными волнами (рис. 1). Для акустических волн ситуация существенно отличается.

Особенности отражения продольных волн

Скорость движения акустических волн относительно среды зависит от ее скалярных параметров: упругости и плотности. Особенности физической природы акустических волн состоят в том, что полная скорость их движения включает скорость движения среды. Это приводит к тому, что граничные условия не могут включать движение материальной границы, поскольку при перемещении твердой границы среда увлекается препятствием, поэтому скорость движения среды вблизи границы равна скорости движения препятствия. Изменение скорости акустических волн относительно неподвижной системы, связанной с излучателем, или подвижной, связанной с отражателем, может происходить только на тех участках трассы, в которые поступает новые объемы среды, и которые не прилегают непосредственно к

Уточнение, сделанное в [7], где предложено рассчитывать скорость ветра по формуле $v = \Delta f c / (f_1 + f_2)$, где f_1 и f_2 – частоты излученного и рассеянного сигнала, ненамного улучшает ситуацию, поскольку столь упрощенный подход не позволяет адекватно провести анализ случайных факторов, действующих как при отражении волн, так и при прохождении ими трассы. Данный подход достаточен

препятствию (рис. 2). Здесь штриховыми линиями показана траектория движения акустических волн, сплошными – линии тока среды, вызванного движением препятствия.

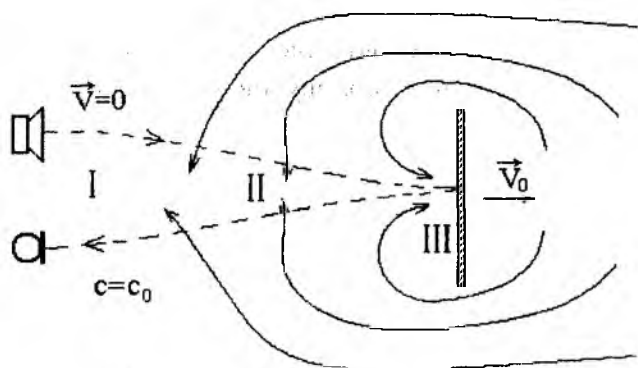


Рис. 2. Отражение акустических волн движущимся отражателем

Если препятствие сплошное и движется под действием внешней силы со скоростью \vec{v}_0 , а излучатель и приемник находятся в неподвижной среде, то путь движения падающей и отраженной акустической волны можно разделить на три области. В первой области скорость распространения звуковых волн равна c_0 . Вторая область промежуточная. В ней происходит весьма сложное изменение скорости движения среды, так что здесь $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$, $\text{div } \vec{v}$ и $\text{rot } \vec{v}$ не равны нулю. Очевидно, что и вектор скорости распространения акустических колебаний в этой области

изменяется тоже достаточно сложным образом, то есть $\frac{\partial \vec{c}}{\partial t}$, $\text{div } \vec{c}$ и $\text{rot } \vec{c}$ здесь также не равны нулю. Кроме того, можно утверждать, что, несмотря на следствия реологического уравнения, которые получены при известных допущениях, в этой области и $\text{rot } \vec{\omega} \neq 0$.

Третью область составляет ламинарный слой, непосредственно прилегающий к препятствию. Скорость встречи звуковой волны с препятствием определяется как $\sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$ и с точностью до небольших изменений плотности и давления, вызванных движением препятствия, равна c_0 . Эта область перемещается вслед за препятствием, и ее размер с точностью до флуктуаций турбулентного следа остается постоянным. Скорость движения акустических волн относительно неподвижной системы координат в этой области составляет $c_1 = c_0 + v_0$ для падающей волны и $c_2 = c_0 - v_0$ для отраженной. Но само ее изменение произошло в области II.

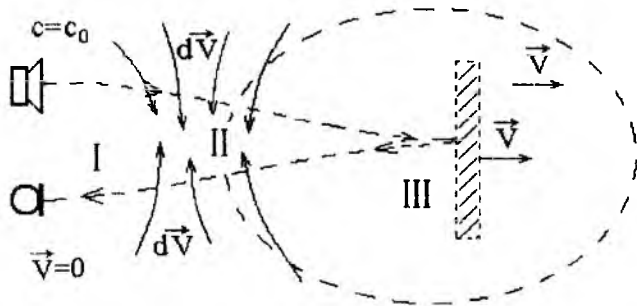


Рис. 3. Отражение акустических волн неоднородностью потока

На препятствиях, движущихся вместе с потоком (например, температурные или ветровые неоднородности турбулентного потока), скорость движения среды по условию равна скорости движения препятствия. Процесс отражения от неоднородностей движущейся среды поясняет рис. 3.

В этом случае ветровые и температурные неоднородности перемещаются вместе с прилегающими объемами, и всю трассу распространения волн также можно разделить на три области. Первая область неподвижна относительно системы отсчета, в которой находятся приемник и передатчик.

Во второй области происходит изменение скорости среды. Третья, движущаяся область, включает в себя неоднородность, от которой отражается акустический сигнал. Причем неоднородность может быть как температурная, так и неоднородность локального движения. Соотношение размеров областей будет соответствовать масштабам изменения скорости потока на всех участках трассы.

Таким образом, задача определения параметров отраженного поля всегда решается при условии падения волны из среды, неподвижной относительно границы отражающей неоднородности. Фазовый набег принимаемого сигнала, обуславливающий сдвиг частоты, возникает в середине трассы, на втором участке (рис. 2, 3). В момент прохождения этой области волновым пакетом, вследствие поступления или оттока воздуха с соседних с трассой участков происходит растяжение или сжатие акустических волн падающего и отраженного поля. Среднее значение времени регистрации отраженного сигнала определяется расстоянием до точки зондирования. Оно также изменяется вследствие флуктуаций протяженности волнового пути на втором участке.

Физическая интерпретация работы АЛ в АПС и пути их совершенствования

Атмосферный пограничный слой отличается наиболее сложной динамикой потоков воздуха. Это обусловлено наличием шероховатой, температурно-неоднородной подстилающей поверхности. В настоящее время в подавляющем большинстве исследований АПС методом АЗ используются АЛ вертикального или наклонного зондирования, хотя существует определенное количество работ по оценке параметров приземной волны. Но последний случай наиболее сложен для анализа, поскольку требует учета отражений акустических волн от шероховатой поверхности. Поэтому далее рассмотрим достаточно общий случай наклонного АЗ с помощью коротких зондирующих пакетов.

Обобщенная схема наклонного АЗ в АПС представлена на рис.4.

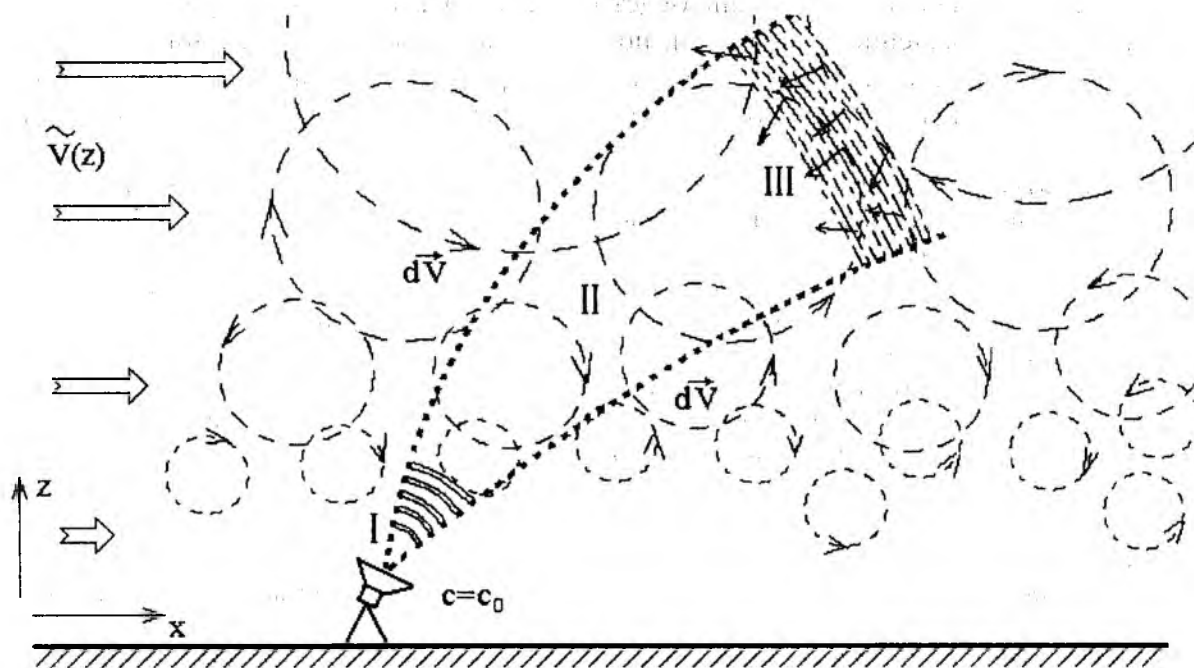


Рис. 4. Схема отражения акустических волн в атмосферном пограничном слое

Область основного потока мощности зондирующего акустического поля показана пунктирной линией, штрихом показаны турбулентные вихри, размер которых увеличивается по мере удаления от границы потока, которой является поверхность земли. Среднее значение ветра показано в левой части рисунка, в АПС оно возрастает с высотой. Прием отраженных волн может производиться как одной антенной (моностатическая схема), так и разнесенными приемниками (на рисунке не показаны).

Формирование отраженного поля $\dot{A}_o(\vec{r})$ происходит в области III. Текущее изменение $\dot{A}_o(\vec{r})$ в наибольшей степени определяется поступательным движением зондирующего пакета

та и в меньшей – изменением взаимного расположения неоднородностей в области уже занятой полем падающих акустических волн.

Динамические процессы в области II и ее размер определяют временную задержку принятого сигнала и сдвиг его частоты. В первом случае для оценки параметра необходима регистрация первой производной фазы принятого сигнала, во втором – второй.

Первая область представляет собой объем воздуха, связанный с приемо-передатчиком или излучателем и приемниками в случае многостатической системы. В условиях ночной инверсии размер I области может достигать ее верхней границы, в дневное время, в условиях развитой турбулентности, ее размер можно ограничить блендой акустической антенны. В этом случае для оценки параметров второй области может быть полезна информация приподнятых метеодатчиков.

Дальнейшее развитие аналитических представлений АЗ потребует существенного усиления внимания к разработке математических моделей процессов во второй области.

Выводы

В настоящее время АЗ является наиболее предпочтительным методом дистанционного зондирования в АПС. Проведенный анализ физических факторов показал, что необходима дальнейшая теоретическая разработка физических и математических моделей процесса рассеяния акустических волн в неоднородной движущейся среде. При этом описание может оказаться существенно более сложным, чем при используемом в настоящее время, традиционном подходе, хотя основывается оно будет также на классических постулатах.

Более строгое решение этой задачи, позволит также уточнить описание процессов при диагностике «на просвет», что используется для определения ослабления приземной звуковой волны. Но эта задача не является следствием описанных выше процессов отражения.

Список литературы: 1. *Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли* / Под ред. Кашеева Б.Л., Прошкина Е.Г., Лагутина М.Ф. Харьков: ХНУРЭ, 2002. 426 с. 2. *Кашеев Б.Л., Олейников В.Н., Слипченко Н.И. и др.* Радиолокационный ветровой профилометр «Харьков» // Радиотехника. 2001. Вып. 120. С. 42-49. 3. *Содар VT-1*. [Электронный ресурс] / С.-Петербург. ООО «СЕНС-ОПТИК» Режим доступа: [www/ URL: http://www.ecmoptec.ru/index.php?device&cat_device_id.10](http://www.ecmoptec.ru/index.php?device&cat_device_id.10) 2008 г. Загл. с экрана. 4. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: СО РАН, 2001. 278 с. 5. *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Гостехиздат, 1946. 208 с. 6. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с. 7. *Осташев В.Е.* Распространение звука в движущихся средах. М.: Наука, 1992. 208 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 16.01.2010