

## АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА ПРИ СОДАРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ УСТОЙЧИВОГО АПС

### Введение

Современные теоретические задачи описания физических объектов обычно формулируются в прямой постановке. Но для получения практических результатов более ценными являются решения обратных задач. Поэтому обычный путь имеет два этапа. На первом решается прямая задача, а затем каким-либо способом проводят обращение полученного решения. Если при решении не было упрощений, то переход от прямой задачи к обратной будет эквивалентным. Но сложность физических объектов не позволяет избежать упрощений уже при решении прямой задачи. Поэтому при обращении все приближения, как правило, переходят в постановку обратной задачи. Это существенно снижает практическую ценность полученных решений.

Для развития метода акустического зондирования (АЗ) атмосферы наиболее актуальным является решение задач извлечения информации [1]. Традиционные теоретические наработки основывались на решениях прямых задач [2 – 5].

Цель работы – определение состава спектральных компонент принимаемого сигнала на основании решения обратной задачи при минимизации неэквивалентности перехода к ней от прямой. Это позволит дать более точную оценку информационным параметрам сигнала.

### Постановка задачи

Обратная задача АЗ атмосферного пограничного слоя (АПС) предполагает определение пространственно-временного распределения коэффициента отражения акустических волн  $k(\vec{r}, t)$ . В постановке задачи можно ограничиться однолучевым содаром. Поэтому постановка обратной задачи может производиться на плоскости в координатах пространства-времени (рис.1). Анализ работы многолучевого содара можно провести на основании полученных соотношений для однолучевого. В постановке не будем рассматривать поперечные эффекты, так как современные теории не дают их подробного описания, а сделанные предположения требуют экспериментальной проверки [6, 7]. Поэтому будем считать, что при движении по

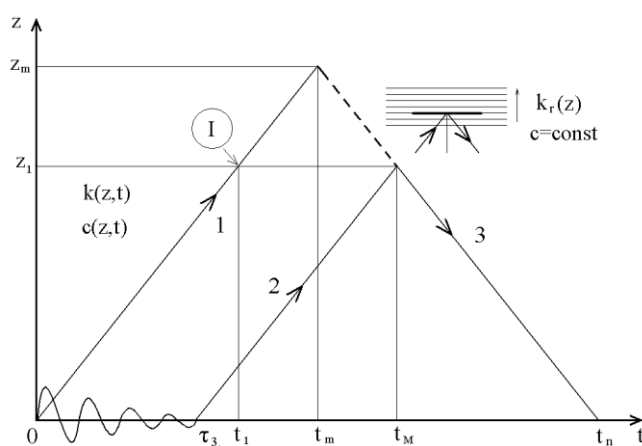


Рис. 1. Схема движения акустического луча

трассе зондирующий пакет акустических волн не меняется, но он движется вместе со средой, поэтому трассы прямого и отраженного луча будут отличаться даже при совмещенном и неподвижном относительно поверхности земли приемопередатчике.

Каждая точка пространства будет характеризоваться скоростью движения акустических волн –  $c(z, t)$ , и коэффициентом отражения –  $k(z, t)$ . В стратифицированном АПС при вертикальном зондировании отраженный сигнал каждого элемента зондирующей посылки оп-

ределяется распределением коэффициента отражения по вертикали  $k_z(z, t)$ . Тогда результирующий сигнал

$$u = \sum_{m=1}^M U(t_m) k_z(z(t_m)) \Delta z, \quad (1)$$

где

$$z(t) = \int_0^t c(z(t), t) dt. \quad (2)$$

Однако распределение скорости  $c(z(t), t)$  здесь тоже неизвестно. Для устойчивых слоев  $k(z)$ ,  $c(z)$  связаны через абсолютную температуру  $T$ . Но в общей постановке задача не имеет решений.

### Обоснование допустимых приближений

В задачах зондирования АПС используется приближение однократного рассеяния. Кроме того можно пренебречь, во-первых, изменением  $k$  и  $c$  за время прохождения пакетом пространственно-временной области, соответствующей его протяженности, во-вторых, при устойчивой стратификации можно считать  $v_z = 0$ . Тогда при вертикальном зондировании скорость звука в вертикальном направлении равна  $c = 20.05\sqrt{T}$  [м/с], где  $T$  – абсолютная температура ( $^{\circ}\text{K}$ ).

В такой постановке задача имеет решение, но требует увеличения вычислительных затрат. Поэтому необходимы дальнейшие приближения. Точная величина абсолютного значения высоты отражения не несет существенной информации. Температура в АПС изменяется не более, чем на  $10 \dots 15^{\circ}\text{C}$ . Вследствие этого вертикальная скорость изменится не более, чем на  $1 \dots 2\%$ . Вертикальные токи даже при  $10$  м/с внесут погрешность  $< 3\%$ . Эти факторы внесут погрешность только в определение абсолютной высоты отражения. Но  $2 - 3\%$  погрешности определения высоты для метеорологии не имеют особого значения. Поэтому в объеме пакета при движении поля звуковых волн «вверх» и «вниз» вертикальную скорость можно считать постоянной  $c(t) = \text{const}$ .

Влияние вертикального изменения  $c(z)$  рассмотрим сначала в объеме пакета, а затем вдоль трассы. Для оценки погрешности переместим начало координат в точку I (рис.1) и представим схему суммирования сигнала для устойчивой стратификации, при которой вертикальная производная температуры положительна  $T'_z > 0$  и скорость звука  $c(z)$  увеличивается с высотой (рис.2). Сначала оценим погрешность, обусловленную изменением модуля отраженного сигнала.

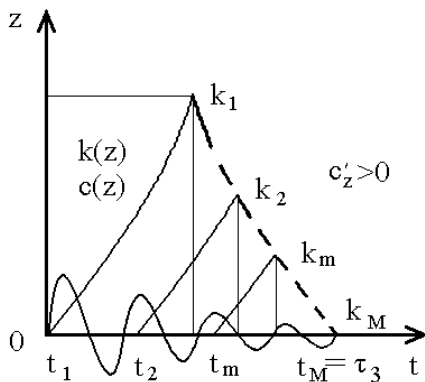


Рис. 2. Суммирование отраженного поля

Сначала оценим погрешность, обусловленную изменением модуля отраженного сигнала.

Коэффициент отражения при малом скачке температуры  $\Delta T \ll T_0$ :  $k_T = -0,25\Delta T/T_0$ . Для плавного изменения  $T(z)$  имеем

$$k_T(z) = -T'_z \frac{\Delta z}{4T_0}. \quad (3)$$

В области, занятой зондирующим пакетом, изменение температуры можно представить степенным рядом:

$$T(z) = T_0 + T'_z z + \frac{1}{2!} T''_z z^2 + \frac{1}{3!} T'''_z z^3 + \frac{1}{4!} T^{IV}_z z^4 + \dots \quad (4)$$

Если задать  $T_0 = 283^{\circ}\text{K}$  ( $10^{\circ}\text{C}$ ), длительность посылки  $\tau_3 = 0,1$  с и  $T'_z = 0,1$  град/м, то, опуская несложные расчеты, получим, что в первом приближении изменение высоты отражения, условие (2), вызванное изменением скорости, составит менее чем  $\Delta z' = 5$  см.

Очевидно, что изменение модуля коэффициента отражения при изменении  $\Delta z' = 5\text{см}$  в любых условиях будет столь незначительным, что его влиянием на результат суммирования амплитуд поля можно пренебречь. Но, чтобы получить основное соотношение для устойчивого АПС, нужно рассмотреть влияние  $\Delta z$  на фазовые соотношения, так как  $\Delta z' = 5\text{см}$  соответствует  $\sim 0,5\lambda$ .

### Отраженное поле в устойчивом АПС

В условиях устойчивого АПС за время движения пакета вверх и отраженного поля вниз, в сумме равном  $\tau_3$  (рис.2), модификации трассы не произойдет. То же можно сказать и о наклонном бистатическом зондировании при небольших углах. Поэтому момент отражения точно равен половине интервала между входом элемента зондирующего сигнала  $t_m$  в пространственно временную область рис.2 и моментом  $\tau_3$ . А высоту отражения с учетом малости  $\Delta z'$  можно выбрать на основании  $z(t_m) = 0,5c_0(\tau_3 - t_m)$ . Тогда сомножители  $k_z(z(t_m))$  и  $\Delta z$  в (1) можно взять в виде  $k_z(z(t_m)) = k_z(0,5c_0(\tau_3 - t_m))$ , и  $\Delta z = -0,5c_0\Delta t$ .

Подставляя зависимость коэффициента отражения от изменения температуры (3) и переходя к интегралу, для сигнала в момент окончания зондирующего пакета получаем выражение

$$u = \frac{c_0}{8T_0} \int_0^{\tau_3} U(t) \cdot T'_z(0,5c_0(\tau_3 - t)) dt . \quad (5)$$

Это выражение записано в координатах пространства-времени рис.2. Чтобы перенести его в координаты общей схемы зондирования (рис.1), достаточно произвести замену момента приема сигнала на  $t_n$ . Тогда окончательно получим

$$u(t_n) = \frac{c_0}{8T_0} \int_0^{\tau_3} U(t) \cdot T'_z(0,5c_0(t_n - t)) dt , \quad (6)$$

где  $t_n = \tau_3 \dots \infty$ .

Обратная задача определения  $T(z)$  сводится к определению градиентов  $T'_z(t_n)$  в каждый момент времени с последующим интегрированием, начиная с приземного значения.

Выделение информации в зондирующих системах наиболее эффективно, в случаях, когда ее разрешающая способность выше, чем расстояние корреляции параметров среды. В этом случае можно уверенно принять, что в выражении (5)  $T'_z(0,5c_0(\tau_3 - t)) = \text{const}$  и выделение информации возможно только при модулированных сигналах.

### Оценка ширины информационного спектра

Ограничение высоты зондирования  $Z_{\max}$  наступает вследствие того, что интенсивность сигнала уменьшается и становится ниже уровня шумов. Обычно  $Z_{\max}$  менее 1 км. Таким образом, время существования сигнала  $\tau_{\max}$  не более 6 с. Поэтому оценку спектральных компонент можно проводить не чаще, чем через  $\Omega_1 = 2\pi(\tau_{\max})^{-1}$ . Отдельная реализация (6) принятого сигнала существует все время движения зондирующего импульса по трассе. Поэтому плотность спектра можно определить как для случая бесконечного неповторяющегося сигнала:

$$S_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\tau_{\max}} u(t_n) \cdot \exp(i0,5\Omega_1 m t_n) dt_n ,$$

Подставляя в это выражение  $u(t_n)$  из (6), получаем

$$S_m = \frac{c_0}{16\pi T_0} \int_0^{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_3} U(t) \cdot T'_z(0,5c_0(t_n - t)) \cdot \exp(i0,5\Omega_1 m t_n) dt dt_n .$$

Меняя порядок интегрирования, имеем

$$S_m = \frac{c_0}{16\pi T_0} \int_0^{\tau_3} U(t) \int_0^{\tau_{\max}} T'_z(0,5c_0(t_n - t)) \cdot \exp(i0,5\Omega_1 m t_n) dt_n dt , \quad (7)$$

Внутренний интеграл представляет собой спектр функции  $T'_z(0,5c_0(t_n - t))$ , –  $S_m^T$ . В качестве аргумента в нем может быть представлено время, как в (7), или высота  $z$ . Обозначая вертикальную координату внутри области, занятой зондирующим пакетом (рис.2) как  $z'$ , получаем выражение для пространственного спектра температурного профиля АПС:

$$S_m^T = \int_0^{Z_{\max}} T'_z(z - z') \cdot \exp(i0,5\Omega_z m z) dz , \quad (8)$$

где  $\Omega_z = 2\pi(Z_{\max})^{-1}$  – первая пространственная гармоника.

В этом выражении нумерация гармоник сохраняется аналогичной нумерации в (7), поскольку в процессе измерений более точного деления получить невозможно.

Заметим, что если  $T'_z(z - z')$  в (7) не меняется в области, занятой пакетом, –  $T'_z(z - z') = T'_z(z)$ , то при зондировании прямоугольными импульсом с монохроматическим заполнением компоненты спектра равны нулю. Таким образом, выражения (7) и (8), так же как и (5), (6) указывают на то, что при зондировании атмосферы необходимо использовать модулированный сигнал.

### Выводы

Информация содержится в спектре  $T'_z$ , представляющем собой либо внутренний интеграл в (7), либо выражение (8). Для определения хода  $T'_z$  достаточно использовать обратное преобразование Фурье от  $S_m^T$ . Спектр  $S_m^T$  не может быть шире, чем единицы герц. Более широкая полоса пропускания приемника необходима только для прохождения компонент модулированного зондирующего импульса, которые позволяют выделить сигнал на фоне шумов, и лишь дополняют энергию информационных компонент.

Проведенная оценка показывает, что можно существенно сузить полосу пропускания приемного устройства содаров, что позволит повысить их энергетический потенциал.

**Список литературы:** 1. *Красненко, Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя / Н.П. Красненко. – Томск : Изд. СО РАН, 2001. – 277 с. 2. *Блохинцев, Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды / Д.И. Блохинцев. – М. : Наука, 1981. – 208 с. 3. *Монин, А.С., Яглом, А.М.* Статистическая гидромеханика / А.С.Монин, А.М.Яглом. – М. : Наука, 1965. – Ч. 1. – 640с. ; 1967. – Ч. 2. – 720с. 4. *Татарский, В. И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере / В. И. Татарский. – М. : Наука, 1967. – 548с. 5. *Осташев, В.Е.* Распространение звука в движущихся средах / В.Е. Осташев. – М. : Наука, 1992. – 208 с. 6. *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. 7. *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.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 10.05.2012