

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

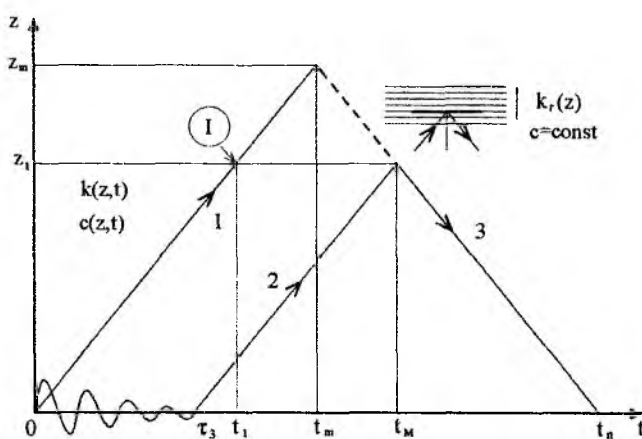


Рис. 1. Схема движения акустического луча

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 определяется 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 $10...15^{\circ}\text{C}$. Вследствие этого вертикальная скорость изменится не более, чем на $1...2\%$. 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.

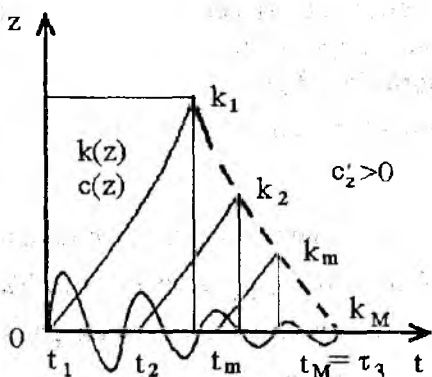


Рис. 2. Суммирование отраженного поля

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°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 Δz 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 τ_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 τ_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 Δz 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 τ_{\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 радиозлектроники

Поступила в редколлегию 10.05.2012