

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА ПРИ АЗ

Панченко А.Ю., Алферов Н.Е., Марюх В.А.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

61166, Харьков, пр.Ленина,

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

Physical mechanisms defining the form of the signals being received at the atmosphere acoustic sounding are analyzed. The signal formation problem is being solved on the geometric relations basis. The derived relations can be used in the methods for gaining useful information at the atmosphere boundary layer acoustic sounding, the s inferred conclusions make it possible to perfect sodars circuits.

Введение. Акустические волны имеют высокую чувствительность к изменениям параметров воздуха, однако информационная способность систем акустического зондирования атмосферы (АЗ) остается невысокой. Акустические локаторы – содары, созданные на современной элементной базе и использующие компьютерные технологии, позволяют обеспечить достаточный технический уровень. Таким образом, основной становится задача создания методик преобразования полученного сигнала, позволяющих увеличить количество получаемой полезной информации.

Современные методы выделения информации предполагают согласование зондирующих посылок со свойствами исследуемого объекта. Однако, в данном случае это усложняется отсутствием достаточно полных знаний о структуре и динамике атмосферного пограничного слоя (АПС). Использование традиционных методов, разработанных для радиолокации, не всегда возможно. Во-первых, потому, что радиолокационные цели, как правило, имеют более простые параметры и в задачах требуется выделение их на фоне случайных помех. В настоящее время хорошо развито решение прямых задач. Практическая ценность их в том, что на основе их результатов, представленных в аналитической форме, решения обратных задач получить сравнительно просто. При локации естественных сред сам объект имеет случайные параметры и распределен в пространстве, что обуславливает непрерывность, случайный характер и длительное существование информационного сигнала. Во-вторых, даже методы метеорологической радиолокации не всегда можно использовать полностью, так как физические процессы при распространении акустических волн в неоднородной движущейся среде существенно сложнее, чем при распространении электромагнитных. Таким образом, для решения задач выделения информации при АЗ необходимы адекватные модели физических процессов, формирующих принимаемый сигнал.

В общем случае информация содержится в амплитуде и фазе коэффициента отражения, локализации места отражения, частотных свойствах отражателей, пространственной и временной связи их параметров. С учетом изменений свойств воздуха, флуктуаций скорости, конечными размерами зондирующей посылки, значительным диапазоном изменений параметров сложно сформулировать даже условия прямой задачи [1]. В течение длительного времени наиболее часто использовались «дедуктивные методы», исходящие из общей системы акустических уравнений. Этот путь предполагает весьма сложную методику решения, что серьезно затрудняет адекватное упрощение задач для конкретных условий. Поэтому в данном докладе рассматривается процесс формирования отраженного сигнала с иной стороны, при этом учитывается необходимость дальнейшего решения обратной задачи.

Анализ пространственно-временной схемы формирования сигнала. Атмосферная среда характеризуется плавным изменением параметров. Поэтому для зондирования идеальным является короткий импульс, но его энергия ограничена физическими свойствами воздуха, поэтому полученный сигнал сложно выделить на фоне помех. Для посы-

лок конечной длины полученный сигнал определяется коэффициентам отражения всех участков области, занятой зондирующим пакетом акустических волн.

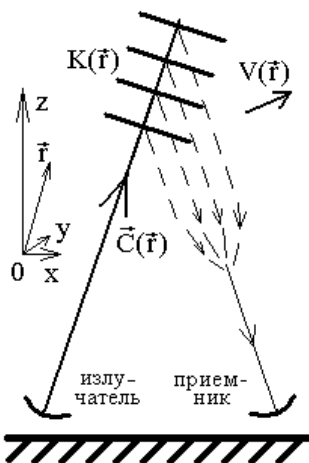


Рисунок 1 – Схема АЗ, приводящая к одномерной задаче

Наиболее простой случай получается для задачи в одном пространственном измерении при произвольных распределениях скорости распространения волн $C(r)$ и коэффициента отражения $K(r)$, где r – точка на трассе зондирования [2]. Такая линейная задача описывает и случай системы с разнесенными точками излучения и приема волн (рис.1).

Изменение $K(r)$ зависит от изменений плотности и давления, скорость движения волн относительно системы зондирования, размещенной на поверхности, зависит от температуры воздуха, влажности, и определяется скоростью ветра $V(r)$. Поэтому информации, полученной в линейном приближении, будет недостаточно для определения всех метеопараметров. Тем не менее, локационные методы пред-

полагают на первом этапе решение именно линейной задачи.

С высокой степенью точности можно считать, что потери в воздухе малы, тогда фаза $K(r)$ может быть только 0 или π , и $K(r)$ – действительная функция. Суммарный коэффициент отражения ($K_{\Sigma}(r)$) может иметь произвольную фазу, вследствие интегрирования по объему, занятым зондирующим пакетом волн. А принятый сигнал включает набег фазы при движении по трассе. Также с высокой степенью точности можно считать, что $K(r) \ll 1$, и пренебречь вторичными переотражениями (приближение однократного рассеяния) [3]. Обе эти причины позволяют пренебречь изменением амплитуды полей зондирующего и отраженного сигналов при движении по трассе.

Для линейных задач АЗ обычно, учитывается изменения коэффициента отражения вдоль пространственной оси (например z), а $C(z)$ включает изменение скорости звука в среде C_0 и движение самой среды – соответствующую компоненту $V(r)$ [1,2]. В первом приближении этого достаточно, однако, механизмы, обусловленные временной изменчивостью $K(z,t)$, $C(z,t)$ и независимость $K(z,t)$ и $C(z,t)$ учитываются не в полной мере. Коэффициент отражения и скорость C_0 зависят от давления и плотности и их изменений. Прямая связь этих параметров возможна только для адиабатических процессов в неподвижной атмосфере. Несмотря на малую теплопроводность воздуха, которой пренебрегают даже при анализе более медленных процессов, чем распространение акустических волн, само по себе это утверждение содержит взаимоисключающие компоненты. В АПС ламинарное движение воздуха обуславливает перенос объемов, имеющих различную температуру, а турбулентное – пульсации давления, которые также необходимо учитывать при АЗ [4]. Кроме того, изменение $C(z,t)$ определяется также изменением $V(r)$ по трассе.

Дополнение условиями независимости приводит к следующей формулировке задачи. Имеются независимые функции двух переменных $K(z,t)$ и $C(z,t)$, связь аргументов которых определяется интегральными уравнениями общего вида:

$$z(t) = \int_0^t C(z(t'), t') dt' \quad \text{и} \quad t(z) = \int_0^z \frac{dz'}{C(z', t(z'))} \quad (1)$$

Здесь точкой отсчета по времени можно выбрать начало излучения зондирующего импульса, по пространству – место размещения излучателя. Обычно, для моностатических содаров излучатель и приемник построены на основе одного электроакустического преобразователя. В таких системах прием сигнала может начаться только после излучения зондирующей посылки и длина трассы при прохождении волн в прямом и обратном направлении будет одинаковой. Для многопозиционных систем в одномерной задаче, в общем случае, длина трассы излученного и принимаемого сигналов будет различна. Но в данном докладе ограничимся анализом совмещенного приемопередатчика, тем более, что распространить полученные далее результаты на общий случай будет несложно.

Факторы, которые необходимо учесть при решении, поясняет схема процесса, изображенная на рис.2.

Здесь индексом k обозначена точка отражения на пространственной и временной координатах $K(z, t)$. Учитывается также, что скорость движения волн к точке отражения C_3 и обратно C_n может изменяться.

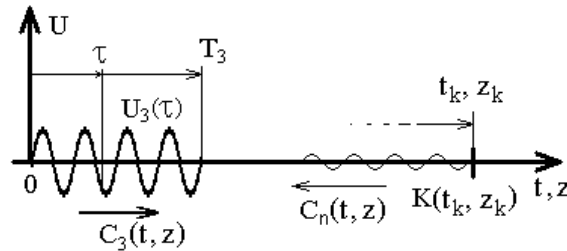


Рисунок 2 – Схема формирования сигнала АЗ

Тогда при излучении зондирующей посылки $U_3(t)$, длительностью T_3 , принимаемый сигнал при $t > T_3$ равен:

$$u(t) = \int_0^{T_3} U_3(\tau) K[z_k(\tau), t_k(\tau)] d\tau \quad (2)$$

Пространственно-временное положение точки рассеяния определяется тем, что расстояние проходимое зондирующим и отраженным полями должны быть одинаковыми – $z_k = z_{\uparrow} = z_{\downarrow}$, а сумма времен равна разности между моментами излучения и приема: $t_{\uparrow} + t_{\downarrow} = t - \tau$. Эти параметры определяются соотношениями, следующими из первого уравнения в (1):

$$z_{\uparrow}(t_k) = \int_{\tau}^{t_k} C_{\uparrow}(z(t'), t') dt' \quad \text{и} \quad z_{\downarrow}(t_k) = \int_{t_k}^t C_{\downarrow}(z(t'), t') dt' \quad (3)$$

Здесь индексы $\uparrow \downarrow$ при скорости в подынтегральных выражениях поставлены для наглядности, при разных значениях переменной интегрирования, согласно условию задачи, скорости разные.

При коротких зондирующих посылках можно считать, что за время прохождения посылкой любой точки на трассе скорость в этой точке не меняется. Тогда, если перенести начало координат в точку пространства, которую в данный момент достигло начало посылки, то частная задача будет существенно проще. В этом приближении коэффициент отражения и скорость становятся функциями одной переменной – $K(z)$ и $C(z)$. Для отраженного сигнала в этой точке верхний предел интеграла в (2) становится равным t . Условия для z_k и соотношения (3) приводят к тому, что $t_k = 0,5(t - \tau) + \tau$, а положение самой точки z_k определяется уравнением:

$$z_k(t, \tau) = \int_{\tau}^{0,5(t+\tau)} C(z(t')) dt' \quad (4)$$

В этом уравнении $0 \leq t \leq T_3$ и $0 \leq \tau \leq t$. Тогда

$$u(t) = \int_0^t U_3(\tau) K \left[\int_{\tau}^{0,5(t+\tau)} C(z(t')) dt' \right] d\tau. \quad (5)$$

Однако полностью сформированный сигнал – соответствующий исходной задаче, будет только в момент $t = T_3$. Если представить скорость $C(z)$ суммой среднего значения и флуктуирующей добавки, то для этого момента имеем:

$$u(T_3) = \int_0^{T_3} U_3(\tau) K \left[0,5 \bar{C}(T_3 - \tau) + \int_{\tau}^{0,5(T_3+\tau)} \Delta C(z(t')) dt' \right] d\tau. \quad (6)$$

Выражения (2) совместно с (3) и (5), (6) справедливы для частных случаев и соответствуют известным соотношениям [1-3]. Но они учитывают связь мгновенных значений сигнала с изменениями скорости и волнового сопротивления среды в точке на трассе. Поэтому при соответствующем выборе методик зондирования, способах формирования звуковой посылки и обработки отраженного сигнала они могут быть положены в основу алгоритма, который позволит выделить большее, чем в известных системах, количество полезной информации.

Предположение о постоянстве $K(z, t)$ и $C(z, t)$ во времени нельзя распространить на интервалы соизмеримые с периодом между зондирующими посылками. Это показывает как анализ литературных источников, так и имеющийся опыт зондирования [5]. Кроме того, зондирующий пакет формируется гармоническим сигналом $U_3(\tau)$, который, как правило, содержит десятки-сотни периодов [1,2]. Эти факторы существенно усиливают флуктуации амплитуды принимаемого сигнала, что соответствует [3]. В реальных условиях, даже при устойчивых состояниях АПС во время ночных инверсий, величина пульсаций температуры и скорости ветра в подавляющем большинстве случаев достаточна для изменений фазы на протяжении пакета на величину соизмеримую с длиной волны – $\Delta C(z)$ в (6). В некоторых случаях можно говорить об определенном постоянстве распределения волнового сопротивления и соответственно о временной стабильности функции $K(z, t)$. Тем не менее, данный механизм обуславливает практически случайный вид отраженного сигнала. Это существенно ограничивает возможности извлечения полезной информации и требует создания содаров, имеющих совершенную приемную часть и оснащенных мощным вычислительным комплексом.

Выводы. В докладе сформулирована линейная задача, решение которой определяет взаимосвязь мгновенных параметров принимаемого сигнала при АЗ с параметрами среды. Обоснованы допустимые приближения при решении. Показаны пути создания методик, позволяющих увеличить количество полезной информации при акустическом зондировании атмосферного пограничного слоя.

Литература.

1. *Осташев В.Е.* Распространение звука в движущихся средах. – М.: Наука, 1992. – 208 с.
2. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя – Томск: Изд. СО РАН, 2001. – 278 с.
3. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
4. *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.
5. *Ulyanov Yu. N., Maksimova N. G., Panchenko A. Yu.* On the Use of Acoustic and Radioacoustic Methods of ABL Remote Sensing for Assessment of Radiowave Propagation Conditions // J. Telecommunications and Radio Engineering, 2006, 12 p.