

ЗАДАЧА ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Постановка задачи обнаружения в акустическом зондировании

В отличие от радиолокации в акустическом зондировании атмосферы эхосигнал, подлежащий изучению, всегда или почти всегда присутствует во входной смеси сигналов и помех. Трудно представить себе ситуацию, при которой атмосферный воздух полностью неподвижен и при этом стратифицирован только в поле силы тяжести. Как показывают эксперименты, проведенные автором, даже при полностью вынужденной конвекции существуют мелко-масштабные пульсации температуры, которые создают пространственно-временное распределение эхосигнала (эхограмму) особого «неорганизованного» вида. Пример такого вида распределения, полученного в летнее время пасмурным утром при слабом ветре, приведен на рис. 1 в виде эхограммы. В дальнейшем такой тип распределения будем определять как «рассеянное эхо». Горизонтальные линии на рис.1 – отражения от местных предметов. Вертикальные светлые линии – отметки времени.

Приведенное положение о процессе рассеяния эхосигнала тем более справедливо в зоне мегаполисов, где помимо естественных источников тепла всегда присутствуют также и искусственные источники.

В общем случае можно считать, что предельно малый эхосигнал создается рассеянием акустической волны на тепловых «шумах» молекул, из чего следует, что мощность эхосигнала «снизу» ограничена только внешними помехами и внутренними шумами приемника.

«Сверху» мощность эхосигнала также ограничена, при этом причиной ограничения является предельная величина «мгновенного» градиента температуры на границе турбулентного моля (цели акустического локатора), и, очевидно, что этот градиент не может быть бесконечным.

Следовательно, можно считать, что зона граничных значений мощности эхосигналов для данной модели локатора в виде функции высоты зондируемого слоя атмосферы, априори известна.

Исходя из физического принципа, который реализуется в системах акустического зондирования, основной прикладной областью рассматриваемого метода может быть изучение процессов теплообмена между подстилающей поверхностью и атмосферой на основе использования информации о процессах рассеяния акустических волн в приземном и пограничном слоях атмосферы. Следовательно, одной из основных задач акустического зондирования является разработка методов обнаружения и измерения параметров движения турбулентных молей поля температуры.

Согласно модели турбулентного теплообмена [1, 2] «плотность» турбулентных молей уменьшается с ростом высоты над поверхностью Земли. Следовательно, существование эхосигнала как отклика на одиночное зондирование ограничено некоторой областью высот $h_i = [h_0, h_d]$, причем в пределах этой области, несмотря на то, что для зондирования атмосферы используется принцип импульсной локации, сигнал имеет вид реализации случайной

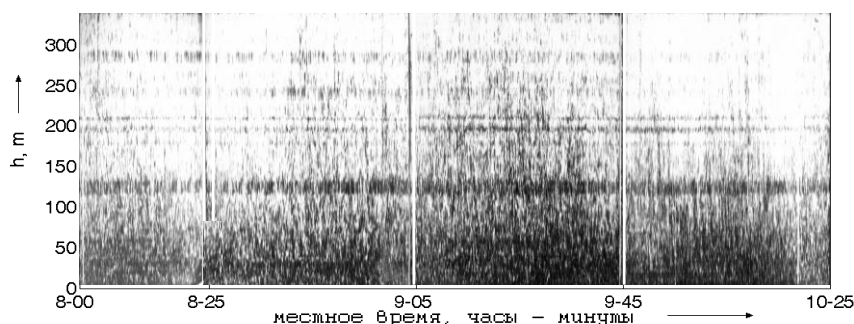


Рис. 1

функции $s_j(h_i)$, где $h_i = 0,5c_s \cdot t_i$; j – номер зондирования; t_i – время прихода эхосигнала от рассеивающего объекта, c_s – скорость звука.

Значение h_d содержит информацию о высоте проникновения турбулентных молей в приземный слой атмосферы и есть величина случайная, каждое конкретное значение которой определяется мгновенным состоянием процесса турбулентного теплообмена в области зондирования.

В среднем $s_j(h_i)$ имеет вид убывающей функции, что объясняется также и уменьшением плотности потока мощности $P_i(h) \approx 1/h_i^2$ акустической волны по мере ее распространения в атмосфере.

Следует отметить, что, так как эхосигнал имеет случайный характер, конкретный вид каждой отдельно взятой реализации $s_j(h_i)$ не может содержать достаточный объем информации для определения модели термодинамического процесса, протекающего в атмосфере на момент зондирования. Наиболее полное описание термодинамического состояния может быть получено из анализа ансамбля реализаций акустического зондирования – эхограммы. Цифровой аналог эхограммы представляет собой $(m \times n)$ матрицу-выборку S_e эхосигналов, при этом информативная длительность сеанса зондирования находится в пределах $T_S \cong [0,5; 1]$ час.

Следовательно, в системах акустического зондирования полезная информация извлекается апостериорно путем анализа матрицы-выборки, что позволяет использовать несколько методик анализа.

Необходимость решения задачи обнаружения возникает всякий раз, когда информационный сигнал исчезающе мал и когда сигнал принимается в смеси с помехой. В системах акустического зондирования присутствуют оба указанных фактора. Кроме того, динамический диапазон D_N акустических помех составляет величину $D_N \cong 100 \text{ dB}$, при этом помехи характеризуются явно выраженной нестационарностью статистических моментов [3, 4].

Акустические помехи в зоне мегаполиса можно представить в виде совокупности трех компонент:

- акустические шумы, которые создаются ветром, и шумы, возникающие в результате процесса жизнедеятельности человека (фоновый шум), в черте города такие помехи имеют явно выраженный суточный ход;
- спонтанные кратковременные помехи большой интенсивности в виде ударов или коротких сигналов;
- отражения от местных предметов, как правило, их интенсивность много больше интенсивности эхосигналов.

Рассмотренная пространственно-временная структура интенсивности эхосигналов и помех приводит к необходимости постановки задачи обнаружения, решение которой имеет целью выявить области существования эхосигналов с достаточным для измерений соотношением сигнал/шум, например $q_S \geq 10 \text{ dB}$, при этом будем интересоваться только обнаружением эхосигналов, возникающих за счет рассеяния распространяющейся волны турбулентными молями температурного поля.

Обнаружение эхосигналов по всему ансамблю значений сеанса зондирования

Рассмотрим решение задачи обнаружения на примере анализа результата одного сеанса зондирования продолжительностью $T_S = 1 \text{ час}$, эхограмма которого в виде изображения приведена на рис.2. На рис.3 приведен небольшой фрагмент этой же записи, продолжительностью $T_S = 15 \text{ мин}$ для большей наглядности визуального анализа смеси сигналов и помех.

Визуальный анализ записи показывает, что в структуре принятых сигналов присутствуют все три из выше перечисленных составляющих помехи и в нижней (приземной) области присутствует эхосигнал в виде вертикально ориентированных реализаций случайной функции, существующих в слое высотой $h_d \cong 100$ м. Поэтому можно считать, что приведенная запись является типичной для акустического зондирования в условиях мегаполиса при развитом процессе теплообмена.

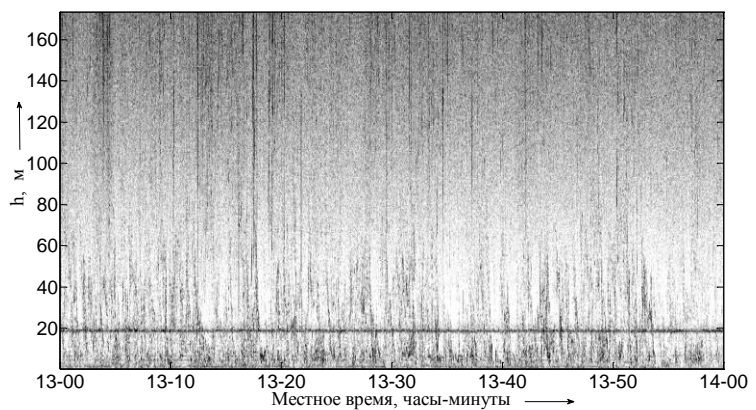


Рис. 2

Для расчета порога обнаружения E_0 воспользуемся методикой определения зоны «чистой» помехи, приведенной в работе [3].

На рис.4 приведены графики зависимости усредненной по каждому значению высоты (по строкам матрицы-выборки S_e) принятой смеси эхосигнала и помех, нормированной на максимум (штрихпунктирная линия). Как следует из графика, область «чистой» помехи с некоторым приближением может быть определена в интервале высоты $h_i = ([i_N, m]) \cdot \Delta h$. Тогда требуемый массив данных будет содержаться в матрице S_N , полученной из исходной матрицы S_e путем соответствующей выборки по указанной области высоты слоя.

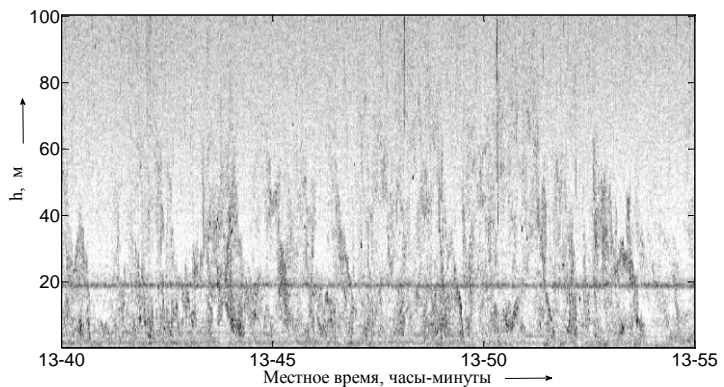


Рис. 3

Постоянное значение $M_N = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p v_i$ принято за среднее значение помехи по всей реализации S_e и получено усреднением сигналов по всему ансамблю значений S_N , при этом матрица S_N предварительно преобразована в вектор V_N с числом членов $p = (m - i_N + 1) \cdot n$.

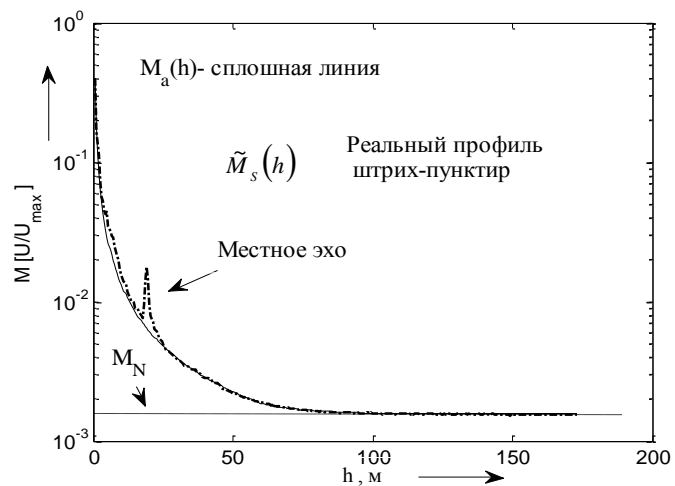


Рис. 4

Величину порога E_0 определим из распределения статистической вероятности $P^*[S_N]$, которую рассчитаем по массиву вектора V_N .

На рис. 5 приведена гистограмма распределения статистической вероятности помехи V_N , в правом верхнем углу рисунка приведено то же распределение, но в логарифмическом масштабе по ординате.

Как следует из рис.5, распределение явно неравномерно, основное количество значений приходится на относительно узкую область $0,001 \leq U/U_{\max} \leq 0,005$, на более широкую область значений $U/U_{\max} \geq 0,005$ приходится всего 0,33% от общего числа членов вектора V_N . Эта область значений приходится на спонтанные кратковременные помехи большой интенсивности в виде ударов или коротких сигналов. Если величину E_0 рассчитать с учетом этих данных (по всему ансамблю значений), то порог обнаружения будет завышен и высота возмущенного слоя атмосферы будет определена с неконтролируемой ошибкой. В то же время полезной информации в измерениях, содержащих такого вида помехи, скорее всего не содержится, так как амплитуды большого уровня перегружают приемный тракт локатора. В связи с этим помехи такого типа следует исключить из рассмотрения при расчете порога обнаружения.

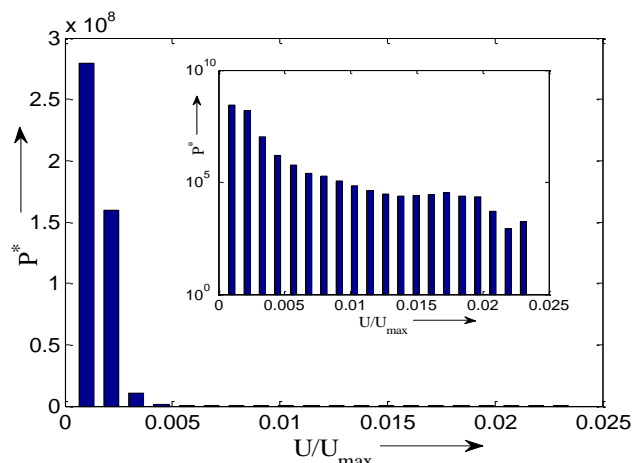


Рис. 5

Для реализации этой процедуры необходимо решить задачу обнаружения для «пиковых» сигналов (помех).

На рис.6 приведена гистограмма распределения помехи для области значений $0.001 \leq U/U_{\max} \leq 0,005$ совместно с функцией распределения Релея (сплошная линия) с параметрами A_R и b_R :

$$f_R(v_i) = A_R \cdot \frac{(v_i - b_R)}{\sigma_v^2} e^{-\frac{(v_i - b_R)^2}{2\sigma_v^2}}, \quad (1)$$

где $A_R = 7,6 \cdot 10^5$, $b_R = 0,25 \cdot 10^{-3}$.

Сопоставление полученных зависимостей позволяет считать, что распределение помех описывается функцией Релея. Тогда порог обнаружения может быть получен из интегрального уравнения вида:

$$F_{л.м.} = \int_{E_0}^{\infty} f_r(v_i) dv_i, \quad (2)$$

решением которого относительно E_0 будет выражение

$$E_0 = \sigma_v \sqrt{-2 \ln F_{л.м.}} \quad \text{или} \\ E_0 = 0,8 M_v \sqrt{-2 \ln F_{л.м.}}, \quad (3)$$

где $F_{л.м.}$ – вероятность ложных тревог, σ_v и M_v – соответственно С.К.О. и среднее значение массива V_N .

В выражениях (2) и (3) неизвестным членом является значение $F_{л.м.}$.

В реальных задачах значение этой величины выбирается из физических или практических соображений. В рассматриваемом исследовании смысл величины $F_{л.м.}$ состоит, во-первых,

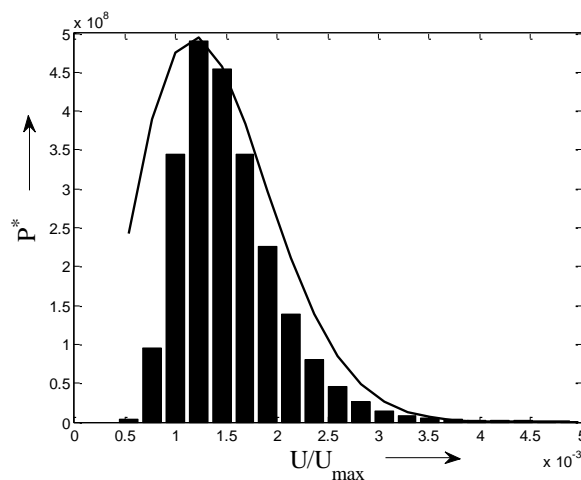


Рис. 6

в обеспечении обнаружения «пиковых» помех, при этом ложной тревогой будет вероятность превышения порога полезным сигналом и, во-вторых, в обнаружении полезных сигналов на фоне шумовой или «фоновой» помехи, при этом ложной тревогой будет превышение порога обнаружения фоновым шумом.

Кроме того, необходимо отбраковать сигналы, отраженные местным предметом (горизонтальная линия на эхограмме рис. 2).

Тогда, в первом случае порог обнаружения E_{0p} должен отвечать условию

$$E_{0p} = 0,8 M_S \sqrt{-2 \ln F_{л.м.}}$$

при $F_{л.м.} = 2 \cdot 10^{-4}$, где $M_S[S]$ – математическое ожидание эхосигналов.

Так как M_S есть функция высоты h_i зондируемого слоя атмосферы, то выражение для порога обнаружения следует записать в виде

$$E_{0p}(h) = 0,8 M_S(h) \sqrt{-2 \ln F_{л.м.}} \quad \text{при } h = [h_0, h_d] \quad (4)$$

Выражение (4) справедливо при условии, что распределение плотности вероятности сигнала $f(s)$ описывается функцией Релея. На рис. 7 приведена обобщенная гистограмма реального распределения статистической вероятности эхосигналов в области $h_i < h_d$ (данные рис.2) и функция распределения Релея (сплошная линия) при условии, что $M_S \cdot 0,8 = \mu_R$, где μ_R – параметр функции Релея.

Из результата рис. 7 следует, что распределение плотности вероятности эхосигналов близко к распределению Релея. Следовательно, выражение (4) может быть использовано для расчета порога обнаружения.

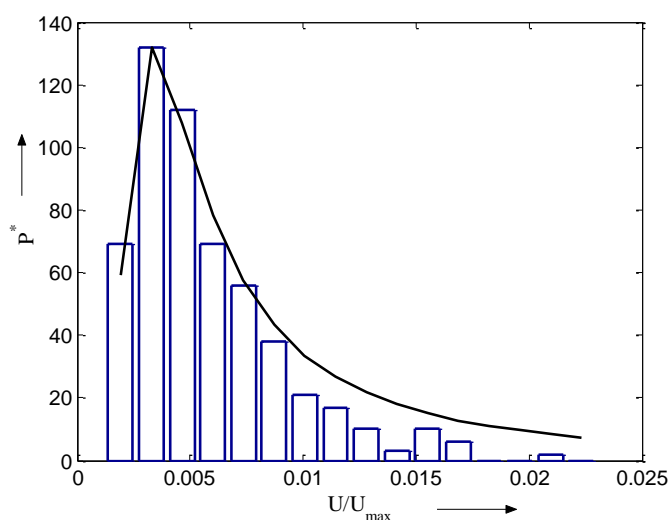


Рис. 7

В качестве функции $M_S(h)$ используем аппроксимацию $M_a(h)$ реальной зависимости $\tilde{M}_S(h)$ (см. рис.4) среднего значения эхосигнала от высоты. Функцию $M_a(h)$ составим из трех участков кусочной аппроксимации, где первые два участка представлены функцией вида $y = A \cdot x^{-\beta}$.

Первый участок описывает измерение эхосигнала в области значений $q > 10 \text{ dB}$. Для этой области приняты значения $A_1 = \tilde{M}_S(h_0)$ и $\beta_1 = 1,14$. Второй участок описывает переходную область при $q < 10 \text{ dB}$. Для этой области приняты значения $A_2 = 2,21 \cdot 10^{-3}$ и $\beta_2 = 7,5 \cdot 10^{-2}$, причем в аппроксимирующей функции не используется начальный участок где скорость изменения функции велика. Для этого область изменения аргумента $x_2 = [h_d, h_2]$ сдвигается на величину $\Delta x = c_2$, или $x_2 = [h_d, h_2] + c_2$ где принимается $c_2 = 10(m)$.

Третий участок функции $M_a(h)$ это область фонового шума и соответственно принимается $M_a(h) = M_N = \text{const}$.

Качество аппроксимации оценим величиной среднего абсолютного отклонения ΔM_a нормированного на исходный профиль $M_S(h_i)$:

$$\Delta M_a = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\tilde{M}_a(h_i) - M_S(h_i)}{M_S(h_i)} \cdot 100\% \right) \quad (5)$$

и среднеквадратичным отклонением разности:

$$\tilde{\sigma}_{\Delta M} [\tilde{M}_a(h_i) - M_S(h_i)] \cdot 100\% . \quad (6)$$

Результаты расчета выражений (5) и (6) $\Delta M_a \cong -1\%$ и $\tilde{\sigma}_{\Delta M} \cong 6\%$ показывают вполне приемлемое качество аппроксимации.

Процедура обнаружения и отбраковки «пиковых» помех состоит из принятия решений:

$$s_e = 0 \quad \text{при} \quad s_{ij} > E_{0p}(h_i) \quad \text{и} \quad s_e = s_{ij} \quad \text{при} \quad s_{ij} \leq E_{0p}(h_i) \quad (7)$$

Далее производится процедура отбраковки отражений от местного предмета (горизонтальная линия на рис.2, 3). Для этого выполняются аналогичные условия:

$$s_e = 0 \quad \text{при} \quad s_{ei,j} > E_{0m.n.}(h_i) \quad \text{и} \quad s_e = s_{ei,j} \quad \text{при} \quad s_{ei,j} \leq E_{0m.n.}(h_i), \quad (8)$$

где $E_{0m.n.}(h_i) = 0,8 \cdot M_{m.n.} \sqrt{-2 \ln F_{л.м.}}$,

при $F_{л.м.} = 2 \cdot 10^{-4}$,

$$M_{m.n.} = \frac{[2 \cdot \tilde{M}_a(h_i) - M_S(h_i)] - m_{\min}}{\tilde{M}_a(h_1)} \quad \text{— модифицированный усредненный профиль эхосигнала, нормированный на максимум модели профиля } \tilde{M}_a(h_i);$$

m_{\min} — минимальное значение функции $M_{mod}[h_i] = 2 \cdot \tilde{M}_a(h_i) - M_S(h_i)$.

На рис.8 график функции $M_{m.n.}$ приведен, для наглядности, в виде $\sqrt{M_{m.n.}}$. Вид функции показывает возможность избирательного подавления отражений от местного предмета.

Последняя операция последовательной обработки — это отбраковка фонового шума, для чего рассчитывается величина напряженности порога в соответствии с выражением $E_{0S} = 0,8 M_N \sqrt{-2 \ln F_{л.м.}}$ при $F_{л.м.} = 5 \cdot 10^{-4}$ и принимаются простые решения

$$s_e = 0 \quad \text{при} \quad s_{ij} \leq E_{0S},$$

$$s_e = 1 \quad \text{при} \quad s_{ij} > E_{0S}.$$

В результате проведенных процедур получаем матрицу бинарных решений, изображение которой в виде эхограммы приведено на рис.9.

Выводы

Основным результатом работы является обоснование необходимости постановки и решения задачи обнаружения в акустическом зондировании атмосферы.

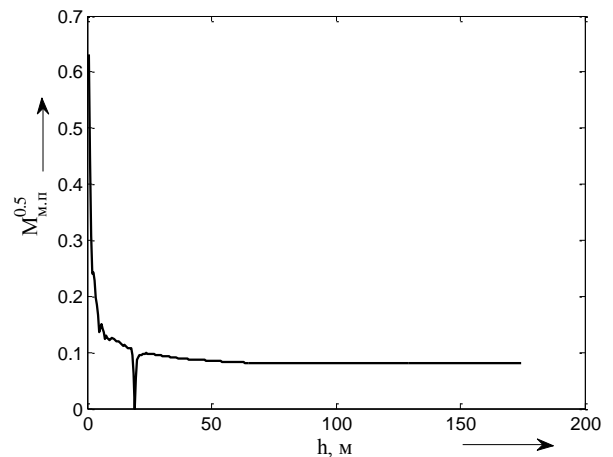


Рис. 8

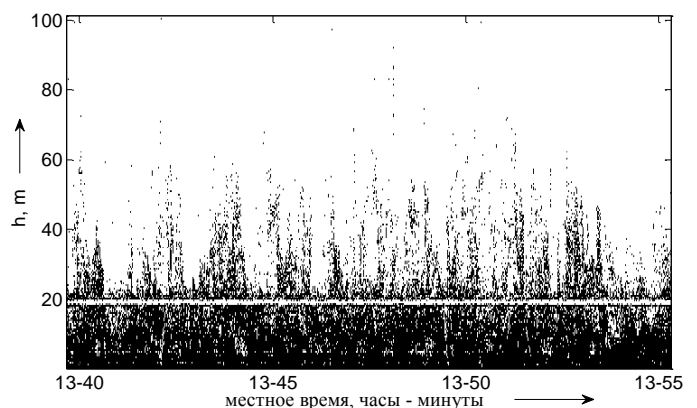


Рис. 9

Проанализирован подход к решению задачи обнаружения, построенный на анализе смеси сигналов и помех всего ансамбля реализаций зондирования, полученного за один сеанс, продолжительностью в один час.

Полученное распределение в виде матрицы бинарных решений дает координаты «мгновенного» места положения турбулентных молей поля температуры и, следовательно, дает возможность определить их параметры движения и рассеяния, используя для этого, в том числе, и матрицу исходных данных.

В работе не рассмотрена подробно формализация критериев определения вероятностей обнаружения, что послужит предметом последующих работ.

Примененный в работе подход к подавлению местных отражений нельзя считать универсальным и рекомендовать к использованию в любых других случаях, так как он использует особенность конкретного профиля средних значений эхосигналов.

Постановка и решение задачи обнаружения вносят определенность в процедуру дальнейшего анализа эхосигналов и позволяют развивать исследования в области разработки методов извлечения информации в системах акустического зондирования атмосферы.

Список литературы: 1. Семенец, В.В. Акустическое зондирование атмосферы в проблеме изучения процессов теплообмена в зоне мегаполиса / В.В. Семенец, В.И. Леонидов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – 6/8(54). – С.54. 2. Леонидов, В.И. Модельно-структурный анализ эхосигналов акустического зондирования атмосферы / В.И. Леонидов // Радиотехника. – 2012. – Вып. 171. 3. Леонидов, В.И. Статистические характеристики эхосигналов акустического зондирования в зоне мегаполиса / В.И. Леонидов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №6/4, (60). – С.46-50. 4. Леонидов, В.И. Акустическое зондирование в задаче обнаружения и регистрации термодинамических возмущений в приземном слое атмосферы / В.И. Леонидов // Радиотехника. – 2013. – Вып. 175. – С. 7 – 13.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 12.07.2014