

УДК: 534.8, 681.3.01

OECD: 01.03. AA, 01.05.LE, 02.07.SR

Численное моделирование кинематических параметров движения акустических источников в атмосфере

Заславский Ю.М.¹, Заславский В.Ю.^{2*}

¹ в.н.с., ИПФ РАН, Н. Новгород, РФ

² с.н.с., ИПФ РАН, Н. Новгород, РФ

Аннотация

Обсуждается возможность диагностики координат и скорости источника звука, низколетящего в атмосфере, путем регистрации акустического сигнала на крестообразной решетке приемников, установленной на грунт или у поверхности водоема. Представлены результаты моделирования алгоритма обработки акустического отклика, порождаемого источником, движущимся вблизи земной границы в атмосфере с дозвуковой скоростью, а также «звуковым ударом» при воздействии волнового фронта, сопровождающего тело, летящее со сверхзвуковой скоростью. Используется взаимно-корреляционная обработка сигналов с выхода двухплечей решетки, результат которой демонстрируется в виде функции двух аргументов: координаты точки регистрации и длительности взаимной задержки. Зависимости иллюстрируются тоновой картиной двумерного рельефа и отражают информативные признаки, представляющие основу алгоритма удаленной диагностики кинематических параметров движения источника.

Ключевые слова: низколетящий источник звука, взаимная-корреляция акустических откликов, крестообразная решетка приемников, диагностика координат, диагностика скорости.

Numerical simulation of the kinematic parameters of the motion of acoustic sources in the atmosphere

Zaslavsky Yu.M.¹, Zaslavsky V.Yu.²

¹ *Leader scientist, IAP RAS, N. Novgorod, Russia*

² *Senior scientist, IAP RAS, N. Novgorod, Russia*

Abstract

The possibility of diagnosing the coordinates and velocity of a low-flying sound source in the atmosphere by recording an acoustic signal on a cruciform array of receivers installed near the boundary with the ground (reservoir) is discussed. The results of modeling an algorithm for processing an acoustic response generated by a source moving near the Earth's boundary in the atmosphere at subsonic speed, as well as a "sonic boom" under the influence of a wave front accompanying a body flying at supersonic speed, are presented. Cross-correlation processing of signals from the output of the two-arm array is used, the result of which is shown as a function of two arguments: the coordinates of the registration point – the duration of the mutual delay. The dependences are illustrated by a tone pattern of a two-dimensional relief and reflect informative features that are the basis of the remote diagnostics algorithm for the kinematic parameters of the source motion.

Keywords: *low-flying sound source, cross-correlation of acoustic responses, cruciform receiver array, position diagnostics, velocity diagnostics.*

Введение

Исследования характеристик акустического излучения движущихся источников актуальны и разноплановы. В качестве области их практического приложения следует указать, например, на проблему удаленной диагностики кинематических параметров приземляющихся метеоритов, быстро движущихся вблизи земной поверхности, решение которой возможно на основе регистрации порождаемого ими звука [1, 2].

Анализ акустических откликов, создаваемых источником, движущимся в атмосфере вблизи границы с резким перепадом импеданса, выполнялся в ряде работ, в которых, в частности, рассматривалась зависимость амплитуды или уровня сигнала от расстояния до микрофона или гидрофона, установленных в окрестности границы контактирующих сред [3–9]. Рассматриваемая область охватывает масштабы в сотни (или тысячи) длин волн, тем не менее, среда подразумевается однородной, ввиду направленности анализа на решение задачи локализации источника на незначительных по удаленности (в условиях «прямой видимости») дистанциях, постановка которой не требует выхода за рамки однородной модели и учета стратификации атмосферы. Реальная изменчивость по скорости и плотности в зависимости от высоты на километровых масштабах является причиной многолучевого распространения и связанных с ним эффектов, кардинально влияющих на распространение, учет которых существенно осложнил бы проводимое исследование. Ниже при указанных ограничениях рассматривается возможность дистанционной диагностики кинематических параметров движущегося источника звука на основе регистрации акустических сигналов.

1. Дозвуковой режим

1.1. Постановка задачи и расчетные соотношения

Обратимся к анализу акустического сигнала, излучаемого движущимся источником звука (гармонический режим излучения) и регистрируемого на ровной плоской границе с атмосферой. Прием ведется на воздушную акустическую или гидроакустическую двухплечую антенну в виде крестообразной решетки, размещенную на ровной горизонтальной жесткой границе с атмосферой, либо на малой глубине под поверхностью водоема (рис. 1). В качестве источника звука предполагается монополь с объемной производительностью пульсаций Q и частотой ω_0 , движущийся по горизонтальной траектории в атмосфере с высотой над поверхностью в сотни длин волн $h \sim 10^2 - 10^3 \lambda$ при различных скоростях, в том числе, достигающих скорости звука $V/c \rightarrow 1$. Для регистрации акустического поля в воздухе (с плотностью ρ и скоростью звука c) или в воде (с плотностью $\tilde{\rho}$ и скоростью звука C) предполагается использовать крестообразную решетку приемников с апертурой L каждого плеча, превышающей длину волны λ . При анализе предполагается плотное (в идеальном случае непрерывное) заполнение апертуры датчиками, а также совпадение ориентации одного из плеч крестообразной антенной решетки с осью x , соответствующей направлению движения, при ориентации другого плеча по перпендикуляру – вдоль оси y , параллельной линии траверса. Расположение антенны представлено на Рис 1 а, б. Последнее условие оправдано применительно к рассмотрению задачи охраны периметра (упреждение вторжения) в виде прямолинейной протяженной границы (также параллельной линии траверса). Направление подхода движущегося источника предполагается перпендикулярным к границе при априори неизвестном пункте ее пересечения по y . Мгновенная система координат, связанная со средой, имеет своим началом границу раздела сред, а вертикальная ось z проходит в атмосфере через источник. Физическими и геометрическими параметрами являются безразмерные величины: $\omega_0 h/c$, число Маха V/c ,

причем далее предполагаются также нормированными на высоту трассы h координаты антенны x, y и ее апертура L , т.е. $x/h, y/h, L/h$, что позволяет выполнить пересчет к абсолютным значениям параметров, требуемых для контроля условий проведения реального эксперимента.

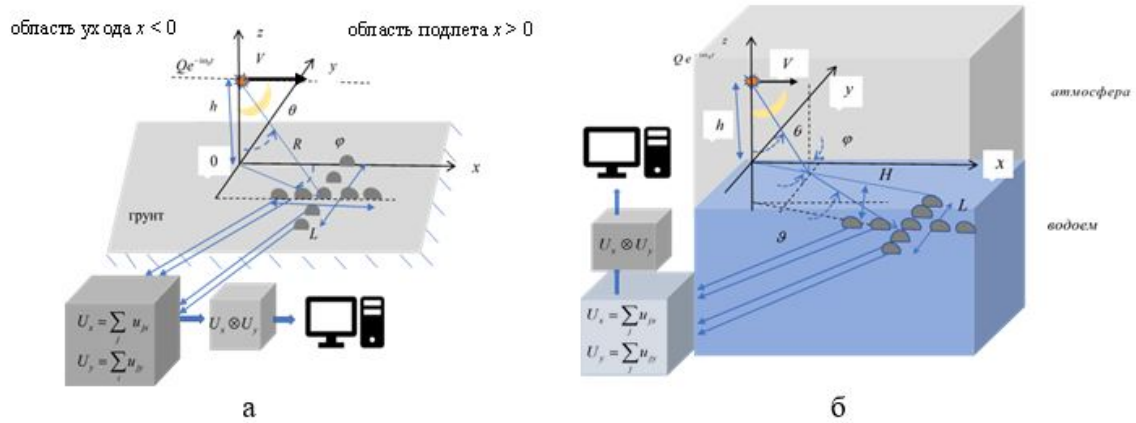


Рис. 1. Схема регистрации и обработки акустического отклика, регистрируемого приемной антенной у границы: а – с грунтом, б – водоем-атмосфера

Уравнение, описывающее распространение звука в воздухе и его возбуждение гармоническим монополем, пульсирующим на частоте ω , движущимся параллельно горизонтальной границе, имеет вид:

$$\Delta u_r - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_r = \frac{Q e^{-i\omega t}}{c} \delta(x - Vt) \delta(y) \delta(z), \quad (1)$$

где u_r – радиальная компонента упругих перемещений, Q – объемная производительность источников с размерностью $[Q] = \text{м}^3/\text{с}$, c – скорость звука в воздухе.

Колебательные смещения (радиальная компонента) в точке расположения приемной антенны, соответствующие прямой падающей акустической волне, описываются следующим выражением:

$$u_r = \frac{Q}{4\pi c R (1 - (V/c) \sin \theta \cos \varphi)} e^{\frac{-i\omega_0(t-R/c)}{1 - (V/c) \sin \theta \cos \varphi}}. \quad (2)$$

Наличие жесткой границы в среде с резким по величине скачком импеданса, в непосредственной близости от которой располагаются микрофоны, приводит к удвоению амплитуды регистрируемых сигналов (в поле давлений), ввиду суммирования с отраженной волной, которая в точках на границе тождественна падающей. Предположение об идеально плотном расположении приемников в решетке подразумевает непрерывное ее заполнение и возможность выполнить интегрирование вдоль апертуры при вычислении суммарного отклика вместо суммирования по дискретным элементам, что представляет идеализацию, упоминаемую выше.

Располагая суммарным откликом с выхода каждого из двух плеч крестообразной антенны при их взаимно перпендикулярной ориентации, нетрудно получить выражение для функции корреляции (от времени задержки) между суммарными сигналами. Таким образом предполагается рассмотреть процедуру, которая может быть реализована современными устройствами обработки сигналов в режиме реального времени при локализации движущегося источника и диагностике его скорости:

$$W(t,x,y) = \int_0^{\Delta t} U_{(x)}(t',x,y)U_{(y)}^*(t'+t,x,y)dt'. \quad (3)$$

В этом выражении суммарный сигнал с плеча, попутного движению (по оси x), можно записать в виде:

$$U_{(x)}(t',x,y) = \frac{Q}{4\pi hc} \int_{-L/2h}^{L/2h} \frac{e^{\frac{-i\omega_0(t' - \frac{h}{c}\sqrt{(x+\xi)^2+y^2+1})}{1-(V/c)\frac{x+\xi}{\sqrt{(x+\xi)^2+y^2+1}}}} d\xi}{\left(1 - (V/c)\frac{x+\xi}{\sqrt{(x+\xi)^2+y^2+1}}\right) \sqrt{(x+\xi)^2+y^2+1}}, \quad (4)$$

а сигнал с плеча, перпендикулярного движению (по оси y), представить аналогичной записью:

$$U_{(y)}^*(t'+t,x,y) = \frac{Q}{4\pi hc} \int_{-L/2h}^{L/2h} \frac{e^{\frac{i\omega_0(t'+t - \frac{h}{c}\sqrt{x^2+(y+\eta)^2+1})}{1-(V/c)\frac{x}{\sqrt{x^2+(y+\eta)^2+1}}}} d\eta}{\left(1 - (V/c)\frac{x}{\sqrt{x^2+(y+\eta)^2+1}}\right) \sqrt{x^2+(y+\eta)^2+1}}. \quad (5)$$

Функция взаимной корреляции вычисляется в соответствии со следующим выражением:

$$W(\tau,x,y) = \left(\frac{Q}{4\pi hc}\right)^2 \int_{-L/2h}^{L/2h} d\xi \int_{-L/2h}^{L/2h} d\eta \frac{e^{i\Omega\left(\frac{\sqrt{1+(x+\xi)^2+y^2}}{1-\frac{V(x+\xi)}{c\sqrt{1+(x+\xi)^2+y^2}}}\right) - i\Omega\left(\frac{\sqrt{1+(y+\eta)^2+x^2}-\tau}{1-\frac{Vx}{c\sqrt{1+(y+\eta)^2+x^2}}}\right)}}{\left(1 - \frac{V(x+\xi)}{c\sqrt{1+(x+\xi)^2+y^2}}\right) \left(1 - \frac{Vx}{c\sqrt{1+(y+\eta)^2+x^2}}\right) \sqrt{1+(y+\eta)^2+x^2} \sqrt{1+(x+\xi)^2+y^2}} \cdot \int_0^{\Delta t} e^{-i\Omega\tau' \left(\frac{1}{1-\frac{V(x+\xi)}{c\sqrt{1+(x+\xi)^2+y^2}}} - \frac{1}{1-\frac{Vx}{c\sqrt{1+(y+\eta)^2+x^2}}}\right)} d\tau', \quad (6)$$

где используются нормированные на h пространственные переменные - x, y и ξ, η , а также безразмерные время задержки и частота $\tau = ct/h, \Omega = \omega_0 h/c$, а $\Delta\tau$ - окно интегрирования по времени.

Вычисление производится в предположении малой длительности временного окна $\Delta\tau \ll 1$, когда последний из интегралов, входящий в (6), может быть заменен величиной $\Delta\tau$. В этом случае выражение (6) удобно записать для каждого квадратурного канала (sin / cos), которые используются в приборной реализации, а функция корреляции может быть представлена амплитудным рельефом на плоскости переменных: x - пространственная переменная вдоль движения тела, τ - длительность задержки:

$$W_{\cos}^{\sin}(\tau,x,y_k) = \left(\frac{Q}{4\pi hc}\right)^2 \Delta\tau \int_{-L/2h}^{L/2h} d\xi \int_{-L/2h}^{L/2h} d\eta \frac{\sin \cos \left| \Omega \left(\frac{\sqrt{1+(x+\xi)^2+y_k^2}}{1-\frac{V(x+\xi)}{c\sqrt{1+(x+\xi)^2+y_k^2}}} - \frac{\sqrt{1+x^2+(y_k+\eta)^2}-\tau}{1-\frac{Vx}{c\sqrt{1+x^2+(y_k+\eta)^2}}} \right) \right.}{\left(1 - \frac{V(x+\xi)}{c\sqrt{1+(x+\xi)^2+y_k^2}}\right) \left(1 - \frac{Vx}{c\sqrt{1+x^2+(y_k+\eta)^2}}\right) \sqrt{1+x^2+(y_k+\eta)^2} \sqrt{1+(x+\xi)^2+y_k^2}}. \quad (7)$$

Аналогично изложенному представим взаимно-корреляционную функцию суммарных сигналов двухплечей решетки гидрофонов, погруженных на небольшую глубину H под водную поверхность $\varepsilon = H/h = 0.1$, что соответствует применению апробируемого алгоритма в случае регистрации в условиях морской акватории (Рис. 1 б). Взаимно-корреляционная функция гидроакустических сигналов, регистрируемых обоими плечами крестообразной антенны, используемая при вычислениях, подобных предыдущим, имеет следующий вид:

$$W_{\cos}^{\sin}(\tau, x, y) = \left(\frac{0.862 \cdot Q}{2\pi h c m n^2} \right)^2 \Delta \tau \int_{-L/2h}^{L/2h} d\xi \int_{-L/2h}^{L/2h} d\eta$$

$$\sin \left| \frac{\Omega \left(\frac{\sqrt{1+(x+\xi)^2+y^2+\varepsilon} \sqrt{1+(x+\xi)^2+y^2} - (x+\xi)^2 - y^2}{\sqrt{1+(x+\xi)^2+y^2}} \right)}{\left(1 - \frac{(V/c)(x+\xi)}{\sqrt{1+(x+\xi)^2+y^2}} \right)} - \frac{\Omega \left(\frac{\sqrt{1+x^2+(y+\eta)^2+\varepsilon} \sqrt{1+x^2+(y+\eta)^2} - x^2 - (y+\eta)^2}{\sqrt{1+x^2+(y+\eta)^2}} \right) - \tau}{\left(1 - \frac{(V/c)x}{\sqrt{1+x^2+(y+\eta)^2}} \right)} \right| \quad (8)$$

$$\frac{\left(1 + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1+(x+\xi)^2+y^2}} \right) \left(1 - \frac{(V/c)(x+\xi)}{\sqrt{1+(x+\xi)^2+y^2}} \right) \left(1 + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1+x^2+(y+\eta)^2}} \right) \left(1 - \frac{(V/c)x}{\sqrt{1+x^2+(y+\eta)^2}} \right)}$$

Результаты вычислений демонстрируются далее в обоих случаях – при регистрации на границе атмосфера-грунт и под поверхностью раздела атмосфера-водоем.

1.2. Иллюстрация результатов расчета

1.2.1. Граница атмосфера – грунт

Представим модуль взаимно-корреляционной функции, построенной по формуле (7), в виде тоновой картины на плоскости переменных x, τ , изображая его (в плане – вид сверху) как горизонтальное сечение рельефа при нескольких удалениях линии регистрации на границе грунт-атмосфера ($-15 \leq x \leq 15$) от трассы движения источника звука $y_k, k = 1, 2, \dots$. Амплитудные значения передаются цветовой гаммой – красный цвет соответствует максимальному уровню, при этом присутствующая калибровочная цвето полоска снабжена столбцом цифровых значений уровня. Трасса и линия траверса взаимно перпендикулярны.

Тоновые картины функции корреляции (рельеф – вид в плане) изображены на плоскости аргументов x, τ : координата – время задержки на Рис. 2 а, а', а" ($y_1 = 1$), Рис. 2 б, б', б" ($y_2 = 4$) для значений скорости $V/c = 0.3, V/c = 0.6, V/c = 0.9$. Движению источника по трассе соответствуют точки на рисунках, смещающиеся (по мере движения) от $x > 0$ (область подлета) к $x < 0$ (область ухода), а последовательность рисунков с $y_k, k = 1, 2$ соответствует двум значениям y_k – удаления пункта регистрации (центра антенны) от трассы движения (вдоль линии траверса). Максимумы корреляционного отклика приходятся на координаты $x \leq 0$ (область ухода), примыкающие к нулю. Видно, что с увеличением скорости движения (переход от $V/c = 0.3$ к $V/c = 0.9$) длительность максимума взаимно-корреляционной функции сокращается, при этом с удалением от эпицентра $x \approx 0, y = 0$, т.е. с ростом y_k , длительность отклика корреляционной функции возрастает. Это позволяет делать оценку отклонения центра антенны от трассы движения по траверсу по виду рельефа.

Наиболее характерным является рельеф, соответствующий движению с околосвуковой скоростью, что демонстрируется на Рис. 2 а", б" при $V/c = 0.9$. В этом случае максимум корреляционной функции имеет минимальную длительность по

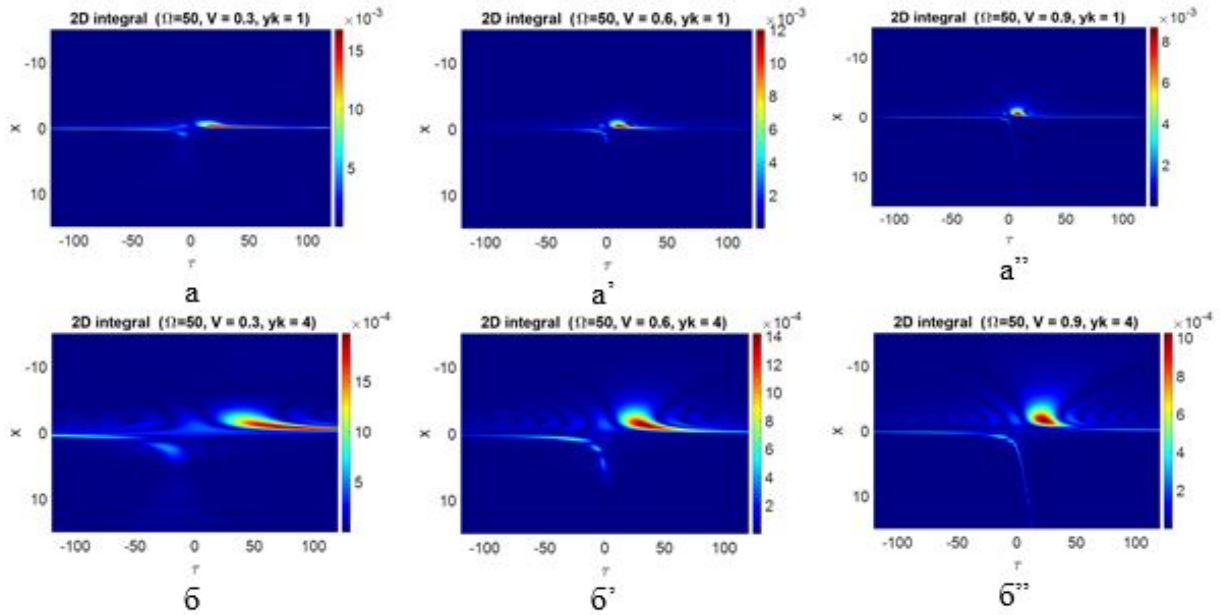


Рис. 2. Рельеф взаимно-корреляционной функции сигналов между двух плеч микрофонной антенны на плоскости аргументов: x - координата вдоль движения, τ - длительность задержки, $a - V/c = 0.3$, $a' - V/c = 0.6$, $a'' - V/c = 0.9$, $y_1 = 1$, $б - V/c = 0.3$, $б' - V/c = 0.6$, $б'' - V/c = 0.9$, $y_2 = 4$, $\Omega = 50$, $L/h = 0.2$

времени задержки. Указанную особенность следует рассматривать как признак движения с высокой околосвуковой скоростью $V/c = 0.9$.

Вместе с тем, использование одной только плоскости x, τ недостаточно для надежной диагностики кинематических параметров движущегося источника, в том числе удаления от трассы по траверсу места, на котором располагается приемная антенна. При смене значения y_k (сдвиге от трассы), наблюдается плавное перестроение в сечении x, τ .

Подобно изложенному выше проанализируем взаимно-корреляционную функцию, полученную по формуле (7), представив ее рельеф в виде тоновой картины на плоскости переменных y, τ , вдоль по нескольким траверсным линиям (в пределах $-10 \leq y \leq 10$), пересекающим трассу при $x_k, k = 1, 2, \dots$ (с тем же шагом по x , как и в предыдущем – по y). Такое представление рельефа на плоскости переменных y, τ , реализуется апостериорно, в то время как в прежнем случае съем данных осуществляется непосредственно при пролете вдоль трассы движения источника (вдоль оси x).

Демонстрируемые на Рис. 3 а, б, в, Рис. 4 а, б, в рельефы имеют различный характер на участках подлета и ухода. При всех скоростях движения после прохода источником над антенной на линии траверса и на параллельных ей линиях, образуется однотипный рельеф серповидной вогнутой формы. При околосвуковых скоростях в области подлета форма рельефа меняется – вместо вогнутой она становится выпуклой (Рис. 4 б, в). Указанный характерный признак представляет интерес для классификации источников, их селекции по типу.

Следует сделать замечание о неполной корректности при моделировании взаимно-корреляционной функции сигналов, принимаемых на все более значительных дистанциях от источника, уже выходящих из ближней окрестности эпицентральной зоны. При суммировании сигналов на апертуре каждого плеча решетки, вообще говоря, следует учитывать распределение чувствительности приемных элементов,

включая антенный весовой множитель, устраняющий боковые лепестки диаграммы направленности антенны. Поэтому представленные двумерные рельефы без учета реального фактора направленности приемной антенны следует рассматривать как некое приближение. Аналогичное замечание касается зависимости корреляционной функции от времени задержки. Поскольку в реальных условиях исходные сигналы источников могут быть существенно не гармоническими, фактическая зависимость от задержки по времени усложняется. Поэтому представленная на иллюстрациях функция корреляции в известном смысле также является идеализацией.

Следующее замечание касается оценок реальных значений таких параметров как апертура плеча приемной решетки L (одинаковой для воздушного и для гидроакустического приема) и высоты трассы движения источника. Так, имея в виду соотношения $L/h = 0.2$, $\Omega = \omega_0 h/c = 50$, при которых выполнены вычисления, и принимая $f = 100$ Гц, получаем следующие оценки $h = 27$ м, $L = 5.4$ м. При этом высота трассы соответствует маловысотным режимам движения, например, гражданского авиатранспорта, типичным при посадке.

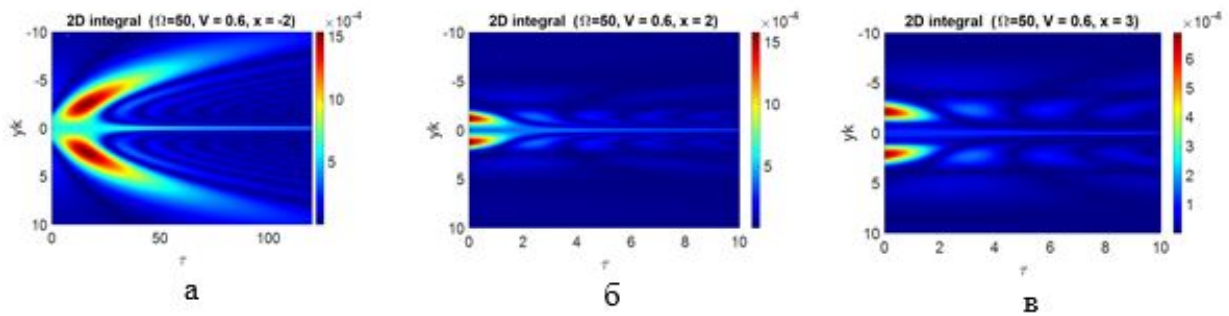


Рис. 3. Рельеф взаимно-корреляционной функции на плоскости аргументов: y – координата поперек движения, τ – длительность задержки: $V/c = 0.6$, $\Omega = 50$, $L/h = 0.2$, а – $x_{-2} = -2$, б – $x_2 = 2$, в – $x_3 = 3$

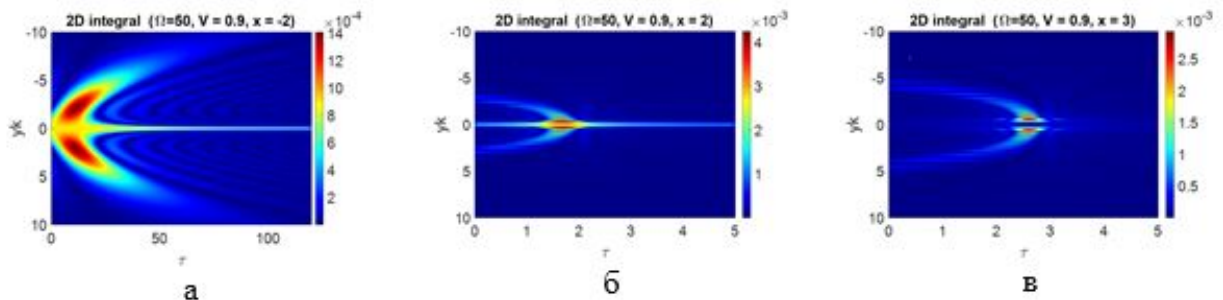


Рис. 4. То же, что на Рис. 3, при $V/c = 0.9$.

Обращаясь к гидроакустическому приему, рассмотрим Рис. 5 а, б, в (траверсная дистанция $y_1 = 1$) и Рис. 6 а, б, в (траверсная дистанция $y_4 = 4$). Демонстрируются сечения рельефа функций взаимной корреляции сигналов между разными плечами гидроакустической антенны при неглубоком ее погружении $\varepsilon = H/h = 0.1$ на плоскости x, τ при увеличивающейся скорости источника: а – $V/c = 0.3$, б – $V/c = 0.6$, в – $V/c = 0.9$. Видно, что воздушно акустические и гидроакустические отклики показывают качественную близость по форме при более низком уровне сигналов в случае гидроакустического приема.

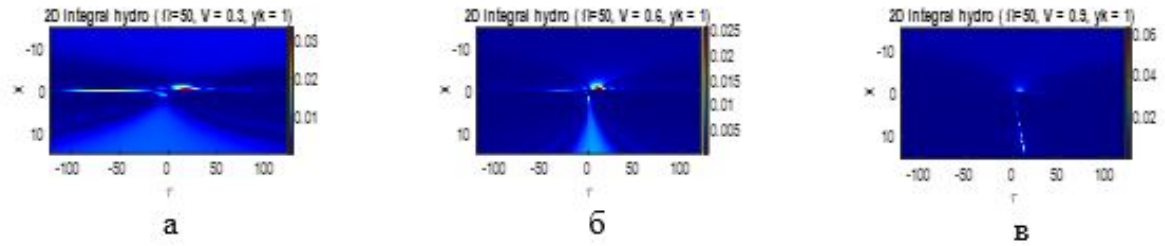


Рис. 5. Рельеф взаимно-корреляционной функции сигналов между двумя плечами гидроакустической антенны на плоскости аргументов: x координата вдоль движения, τ длительность задержки, $y_1 = 1$, $\Omega = 50$, $L/h = 0.2$, а – $V/c = 0.3$, б – $V/c = 0.6$, в – $V/c = 0.9$, $\varepsilon = H/h = 0.1$

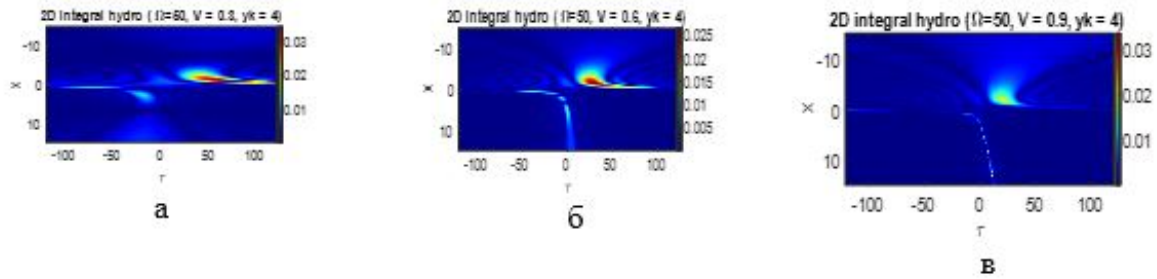


Рис. 6. То же, что на Рис. 5, при $y_4 = 4$

На Рис.7 а, б, в, Рис.8 а, б, в (тоновые картины, вид в плане) представлены рельефы взаимно-корреляционной функции сигналов между двумя плечами гидроакустической антенны на плоскости y, τ . Рельефы на Рис. 7 а, Рис.8 а соответствуют области ухода, а на Рис.7 б, в, Рис.8 б, в – области подлета. Форма сечений рельефов функций корреляции для гидроакустических сигналов и воздушно акустических сигналов качественно подобны друг другу. В частности, в области подлета они имеют выпуклую серповидность, а в области ухода – вогнутую. Различие проявляется в пониженном уровне отклика на значительных удалениях в области подлета в случае приема на гидроакустическую антенну, что не характерно для регистрации воздушно акустического сигнала, где уровень остается высоким. Вместе с тем практический интерес в этом случае диктуется малозаметностью погруженных приемников.

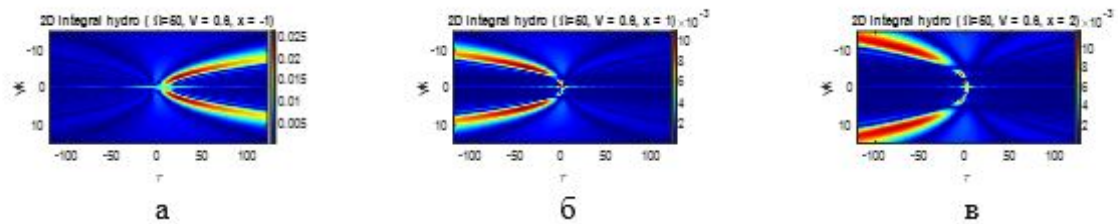


Рис. 7. Рельефы взаимно-корреляционной функции сигналов между двумя плечами гидроакустической антенны на плоскости аргументов: y координата поперек движения, τ – длительность задержки: $\Omega = 50$, $L/h = 0.2$, $V/c = 0.6$. а – $x_{-1} = -1$, б – $x_1 = 1$, в – $x_2 = 2$

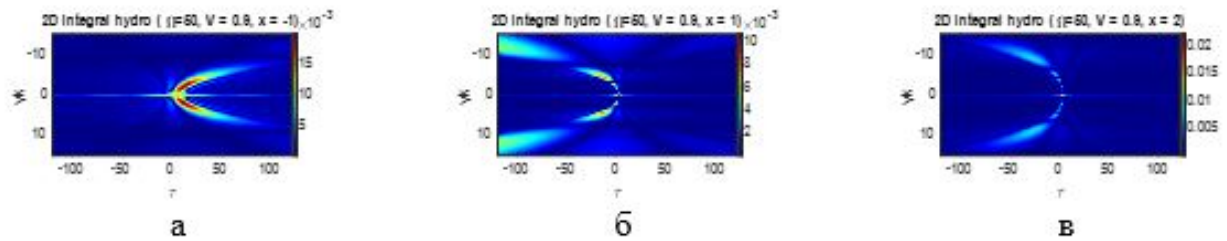


Рис. 8. То же, что на Рис. 7, при $V/c = 0.9$.

Сравнение рельефов взаимно-корреляционной функции суммарных сигналов между двумя плечами, регистрируемых на линиях вдоль и поперек направления движения источника и реализующих воздушно-акустический и гидроакустический прием, позволяет прийти к заключению:

1 Целесообразно применение пространственно-распределенных датчиков с расположением вдоль ортогональных приемных «линеек», с помощью которых возможна регистрация комплексных амплитуд акустических сигналов с последующим представлением взаимно-корреляционных функций в виде тоновых картин на плоскости переменных x, τ и y, τ (горизонтальные сечения рельефа).

2 Располагая реальными рельефами на плоскости x, τ и y, τ и сопоставляя их с характерными, представленными на рисунках, можно определить удаление эпицентра движущегося источника от линии траверса, на котором в текущий момент времени располагаются центры приемных антенн. В оперативном режиме возможно определение направления движения источника (азимутальный угол ориентации вектора скорости), текущее местоположение источника, оценка высоты траектории движения.

2. Сверхзвуковой режим

2.1. Расчетные соотношения для сигналов при сверхзвуковом режиме

В настоящем разделе представлены результаты анализа возможности удаленной диагностики кинематических параметров источника звука, движущегося вблизи земной или водной границы в приземной атмосфере со сверхзвуковой скоростью. В отличие от ранее выполненного моделирования регистрации волнового отклика, соответствующего условиям движения с дозвуковой скоростью $V < c$, представляет интерес провести поиск признаков, важных при диагностике параметров движения тела при сверхзвуковых скоростях $V > c$, когда вслед за источником тянется волновой фронт с уплотненной на нем средой, образующий фигуру кругового конуса (конус Маха) и вызывающий эффект звукового удара, воздействующего на предметы и организмы (способные к восприятию), заполняющие пространство, при его пересечении волновым фронтом. В значительном числе работ описаны характеристики фронта, профиль которого имеет форму N -волны [3-6]. При анализе далее используется упрощенная аппроксимация распределения волновых перемещений в области поперек фронта ударной N -волны, пересекающей границу атмосфера-грунт. Задача состоит в отыскании признаков, указывающих на параметры движения источника, причем аналогично предшествующему анализу подразумевается регистрация акустического отклика на крестообразную (двуплечую) решетку с последующей взаимно-корреляционной обработкой суммарных сигналов, регистрируемых на каждое плечо антенны (см. Рис.9). Суммирование сигналов с приемников вдоль плеча подразумевает интегрирование (как и в предшествующем анализе), ввиду непрерывного заполнения апертуры датчиками.

Исходными являются данные классических исследований [3-6], показывающие,

что возмущение, известное как звуковой удар, порождаемое быстро движущимся источником, представляет собой волновой фронт, имеющий геометрическую форму кругового конуса, сопровождающего это тело и с вершиной вблизи носовой его части – конус Маха. Линии-образующие конуса отходят от тела под углом полуоткрыва к оси $\phi = \arcsin(c/V)$ в сторону окружающей атмосферы (c – скорость звука, V – скорость тела). В рассматриваемом случае источником акустического возмущения среды является само движущееся тело, а на фронте сопровождающей его ударной волны образуется поперечный профиль с перепадом давления и плотности, имеющий N -образную форму.

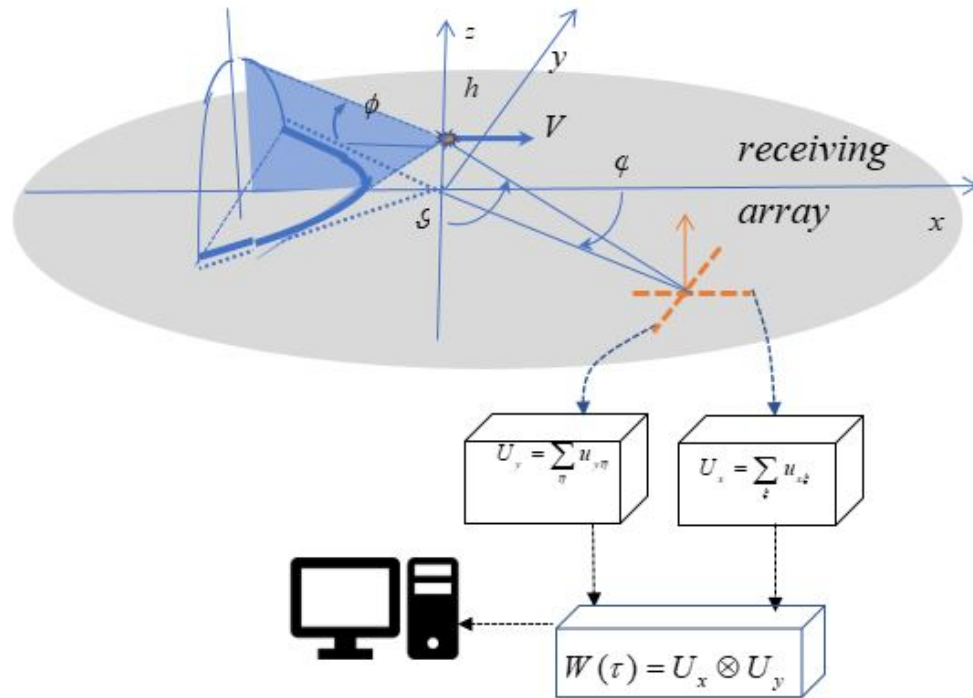


Рис. 9. Конусный волновой фронт, создаваемый быстро движущимся источником, и схема регистрации акустического сигнала двухлучей решеткой приемников у границы раздела сред

Из известных данных литературы следует, что линия пересечения волнового фронта с твердой границей, порождаемого телом, движущимся по траектории, параллельной границе со скоростью $V > c$ на высоте h , может характеризоваться координатами движущегося «центра» (на плоскости x, y ($z = 0$)) [3, 4]:

$$x' = Vt + h\sqrt{\gamma^2 - 1}, \quad y' = \pm \sqrt{\frac{x'^2}{\gamma^2 - 1} - h^2}, \quad \text{где } \gamma = V/c \geq 1. \quad (9)$$

В качестве отправной предпосылки далее в расчетах вместо сложного профиля N -волны используется упрощенная запись, характеризующая распределение волнового отклика в окрестности движущегося центра на границе раздела сред $z = 0$. Предполагается приближенное описание радиальных волновых смещений как функции координат:

$$u = \frac{1}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}} e^{-\frac{(x - x')^2 + (y - y')^2}{\sigma^2}}, \quad (10)$$

где σ – поперечный размер профиля фронта волны, а амплитуда отклика нормирована. Последнее объясняется тем, что количественные значения в амплитудном

перепаде в настоящем анализе не представляют принципиального интереса. Расчет относится к простейшему случаю с размещением двулучевой решетки приемников на горизонтальной границе раздела сред ($z = 0$), причем плечо с X ориентацией совпадает с направлением движения тела, а центр антенны имеет координаты x, y .

Сигналы, регистрируемые датчиками, расположенными на плече антенны с X ориентацией, суммируются. После усреднения по апертуре $-L/2 \leq x \leq L/2$ выражение для суммарного сигнала U_x , с учетом $x' = Vt + h\sqrt{\gamma^2 - 1} + \xi$ и y' по формулам (9), может быть представлено в следующем виде:

$$U_x = \frac{\sigma^2 sh \left(L(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})/\sigma^2 \right)}{(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})} \frac{e^{-\frac{(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - y')^2}{\sigma^2}}}{\sqrt{(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - y')^2}}. \quad (11)$$

Аналогичная зависимость характерна для суммарного отклика U_y с плеча, ориентированного вдоль оси Y :

$$\begin{aligned} U_y &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{e^{-\frac{(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - y' - \eta)^2}{\sigma^2}}}{\sqrt{(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - y' - \eta)^2}} d\eta = \\ &= \frac{e^{-\frac{(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - y')^2}{\sigma^2}}}{\sqrt{(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - y')^2}} \int_{-L/2}^{L/2} e^{2\frac{(y - y')}{\sigma^2}\eta} d\eta = \\ &= \frac{e^{-\frac{(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - y')^2}{\sigma^2}}}{\sqrt{(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - y')^2}} \left| \frac{\sigma^2 e^{2\frac{(y - y')}{\sigma^2}\eta}}{2(y - y')} \right|_{-L/2}^{L/2} = \\ &= \frac{\sigma^2 sh \left(\frac{(y - y')L}{\sigma^2} \right)}{(y - y')} \frac{e^{-\frac{(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - y')^2}{\sigma^2}}}{\sqrt{(x - Vt - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - y')^2}} \end{aligned} \quad (12)$$

Алгоритм обработки предполагает взаимно-корреляционную свертку (по времени) суммарных сигналов, принятых на оба плеча решетки: $U_x(t)$ – с X -ориентацией в момент времени t (без задержки), и $U_y(t + t')$ – с Y -ориентацией в момент $t + t'$ (при задержке длительности $-t'$). Интегрирование по времени t выполняется в пределах малого «окна» Δt . Указанная операция выражается следующей записью для взаимно-корреляционной функции, подобно используемой в первой части работы:

$$W(t', x, y) = \int_0^{\Delta t} U_x(t, x, y) U_y^*(t + t', x, y) dt, \quad (13)$$

причем отклики U_x, U_y , описываются действительными функциями аргументов t, x, y .

В результате для функции взаимной корреляции нетрудно получить приближенное выражение:

$$\begin{aligned} W &= \Delta t \frac{\sigma^4 sh \left((x - h\sqrt{\gamma^2 - 1})L/\sigma^2 \right) sh \left((y - Vt')L/\sigma^2 \right)}{(x - h\sqrt{\gamma^2 - 1})(y - Vt')} \\ &\frac{e^{-\frac{(x - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + y^2}{\sigma^2}} - e^{-\frac{(x - Vt' - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - Vt')^2}{\sigma^2}}}{\sqrt{(x - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + y^2} \sqrt{(x - Vt' - h\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (y - Vt')^2}} \end{aligned} \quad (14)$$

Введем следующие обозначения:

$$\tau = ct'/L, X = x/L, Y = y/L, H = h/L, \Xi = \sigma/l, \quad (15)$$

используя которые перепишем (14) в виде:

$$W(\tau, X, Y) = \frac{sh\left(\frac{(X - H\sqrt{\gamma^2 - 1})}{\Xi^2}\right) sh\left(\frac{(Y - \gamma\tau)}{\Xi^2}\right)}{(X - H\sqrt{\gamma^2 - 1})(Y - \gamma\tau)} \cdot \frac{\Delta t \Xi^4 e^{-\frac{(X - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + Y^2}{\Xi^2}} - \frac{(X - \gamma\tau - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (Y - \gamma\tau)^2}{\Xi^2}}{\sqrt{(X - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + Y^2} \sqrt{(X - \gamma\tau - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (Y - \gamma\tau)^2}} \quad (16)$$

2.2. Иллюстрация результатов расчета – сверхзвуковой режим

2.2.1. Граница атмосфера-грунт

На основе формулы (16), построены двумерные рельефы $W(\tau, X)$ (вдоль трассы) при различных фиксированных значениях Y_j , а также $W(\tau, Y)$ (вдоль линий, перпендикулярных трассе – параллельных траверсному направлению) при разных фиксированных X_k , которые демонстрируются на представленных ниже иллюстрациях функции взаимной корреляции в виде двумерных рельефов.

В частности, имеем:

$$WX(\tau, X, j) = \frac{sh\left(\frac{(X - H\sqrt{\gamma^2 - 1})}{\Xi^2}\right) sh\left(\frac{(Y_j - \gamma\tau)}{\Xi^2}\right)}{(X - H\sqrt{\gamma^2 - 1})(Y_j - \gamma\tau)} \cdot \frac{\Delta t \Xi^4 e^{-\frac{(X - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + Y_j^2}{\Xi^2}} - \frac{(X - \gamma\tau - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (Y_j - \gamma\tau)^2}{\Xi^2}}{\sqrt{(X - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + Y_j^2} \sqrt{(X - \gamma\tau - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (Y_j - \gamma\tau)^2}} \quad (17)$$

На рис. 10 демонстрируются рельефы $WX(\tau, X)$, соответствующие $Y_j = 0.5, 1, 1.5, 2$ при $j = 1, 2, 3, 4$. В рельефе на плоскости τ, X , т.е. в зависимости от продольной координаты и от времени задержки присутствует максимум-экстремум. С ростом Y_j происходит сдвиг максимума в сторону возрастающих задержек τ и координаты X . Следовательно, все большие удаления траектории движущегося тела от точки регистрации на линии траверса можно отслеживать по времени задержки пика на плоскости τ, X . При увеличении скорости движения V (или $\gamma = V/c$) время задержки пика сокращается.

Рассмотрим также рельефы τ, Y в виде функции координаты Y вдоль по перпендикуляру к трассе (по линии траверса), построенные при все возрастающих фиксированных X_k , соответствующих удаляющимся позициям, проходимым телом в процессе его движения по траектории вблизи пункта регистрации.

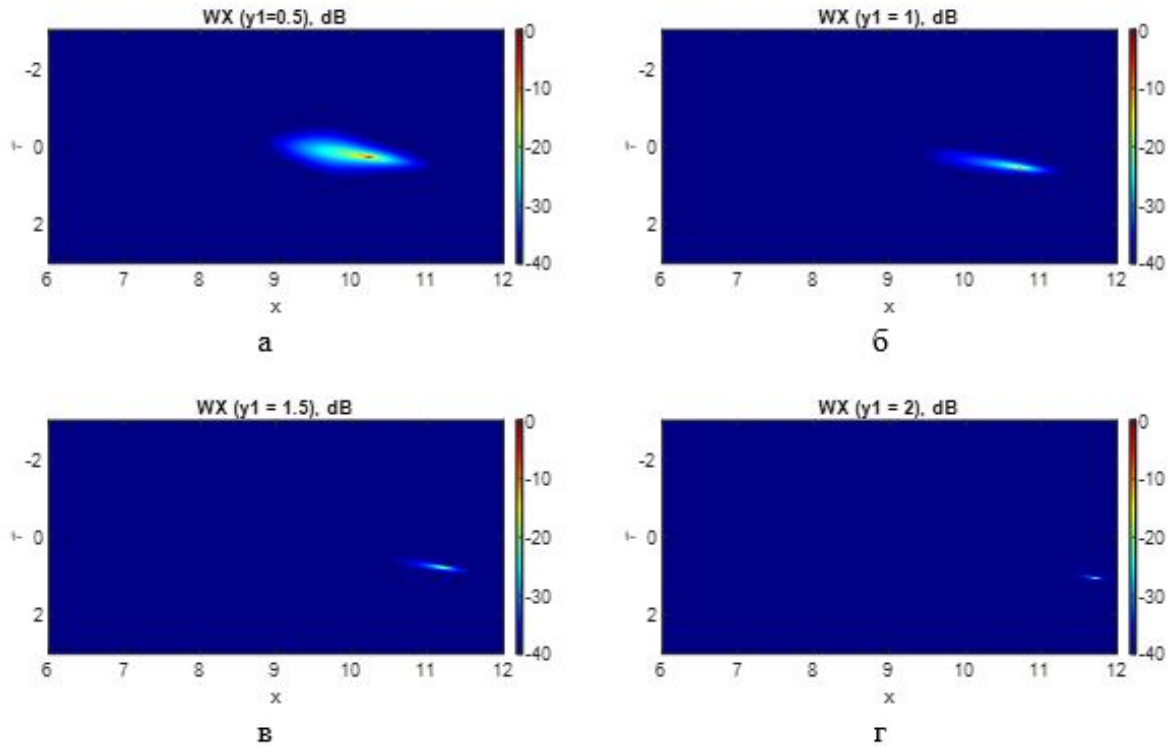


Рис. 10. Рельефы $WX(\tau, X)$ (лог.-масштаб), иллюстрирующие взаимно-корреляционный отклик на выходе двухлучевой антенны при увеличении Y : $\gamma = V/c = \sqrt{3.61}$, $H = h/L = 6$, $\Xi = \sigma/L = 3$, а – $Y_1 = 0.5$, б – $Y_2 = 1$, в – $Y_3 = 1.5$, г – $Y_4 = 2$

Для описания функции $WY(\tau, Y)$ используется следующая запись:

$$WY(\tau, Y, k) = \frac{sh\left(\frac{(X_k - H\sqrt{\gamma^2 - 1})/\Xi^2}{\Xi^2}\right) sh\left(\frac{(Y - \gamma\tau)/\Xi^2}{\Xi^2}\right)}{(X_k - H\sqrt{\gamma^2 - 1})(Y - \gamma\tau)} \cdot \frac{\Delta t \Xi^4 e^{-\frac{(X_k - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + Y^2}{\Xi^2}} - e^{-\frac{(X_k - \gamma\tau - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (Y - \gamma\tau)^2}{\Xi^2}}}{\sqrt{(X_k - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + Y^2} \sqrt{(X_k - \gamma\tau - H\sqrt{\gamma^2 - 1})^2 + (Y - \gamma\tau)^2}} \quad (18)$$

На основе вычислений по формуле (18) построены рельефы $WY(\tau, Y)$, представленные на Рис.11. В рельефе на плоскости τ, Y , т.е. в зависимости от координаты Y и от времени задержки τ присутствует максимум-экстремум. При увеличении скорости движения γ , а также с уменьшением Ξ – поперечного размера профиля фронта N -волны наблюдается уменьшение ширины пика вдоль по обеим координатам τ, Y без смещения его центра, в отличие от того, что имело место на плоскости τ, X .

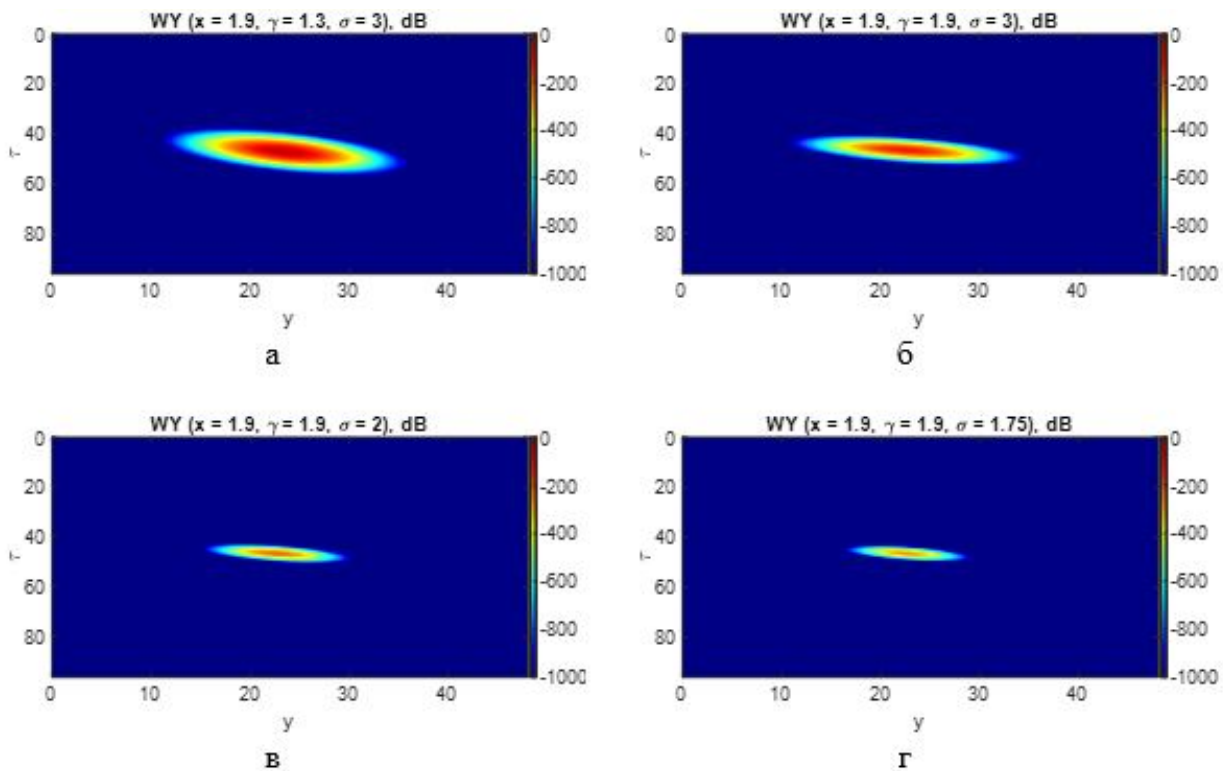


Рис. 11. Рельефы $WY(\tau, Y)$ (лог.-масштаб), взаимно-корреляционной функции при следующих значениях параметров движения: а – $X_4 = 1.9, \gamma = 1.3, \Xi = 3$, б – $X_4 = 1.9, \gamma = 1.9, \Xi = 3$, в – $X_4 = 1.9, \gamma = 1.9, \Xi = 2$, г – $X_4 = 1.9, \gamma = 1.9, \Xi = 1.75$.

Представленные рельефы $WX(\tau, X)$ и $WY(\tau, Y)$ демонстрируют зависимости от параметров γ и Ξ , характерны для сверхзвукового режима и могут способствовать возможности измерения и контроля скорости движения тела и высоты траектории над границей с повышенной точностью. Очевидно, что масштабный параметр профиля фронта ударной волны в области пересечения с границей раздела Ξ зависит от высоты траектории над этой границей и от линейного размера тела. Кроме того, параметр высоты траектории h входит явным образом в формулу (16) для W , а также в формулу (17) для WX и в формулу (18) для WY . В этой связи отметим, что выше при переходе к безразмерным величинам по формуле (15) в качестве нормировки используется масштаб L (в отличие от используемой в предыдущем разделе нормировки на h).

Вид рельефов, демонстрируемых применительно к сверхзвуковому режиму, имеет принципиальное отличие от аналогичных для дозвукового режима движения источника звука, что позволяет оперативно классифицировать (идентифицировать) тип источника [10, 11]. Следует отметить, что совокупность демонстрируемых рельефов взаимно-корреляционных функций суммарных сигналов с выхода двуплечей приемной решетки показывает принципиальную возможность указанного подхода к оценке скорости движения и высоты траектории, к определению таких параметров как координаты пересечения движущимся телом контролируемого периметра. Совместный учет описанных особенностей в рельефах, демонстрируемых на иллюстрациях, может быть использован в алгоритмах работы устройств, предназначенных для удаленной диагностики параметров движения источника вблизи границы в атмосфере на сверхзвуковой скорости [1, 2].

Заключение

Не прибегая к непосредственной традиционной оценке скорости по разности частот, соответствующих преобладающим амплитудам в спектрах звука при приближении и удалении источника относительно точки регистрации, демонстрируется возможность удаленной диагностики кинематических параметров движения акустического источника с дозвуковой скоростью вблизи границы атмосфера-грунт, атмосфера-водоем (скорость, направление, высота траектории, удаление эпицентра от точки регистрации по траверсу). Используется алгоритм взаимно-корреляционной обработки гармонических сигналов, регистрируемых вблизи границы раздела сред на два плеча крестообразной решетки приемников, установленной на границе раздела сред, одно из плеч которой имеет ориентацию попутную движению, а другое – поперечную. Результаты демонстрируются в виде двумерных рельефов, соответствующих аргументам: пространственная координата – длительность взаимной задержки. Используется нормированное представление амплитудных зависимостей, поскольку анализируются качественные особенности, демонстрирующие принципиальную возможность диагностики.

С целью удаленной диагностики кинематических параметров тела, движущегося вблизи земной границы в атмосфере со сверхзвуковой скоростью, выполнены аналогичные модельные расчеты функции взаимной корреляции между суммарными акустическими сигналами с выхода двухплечей решетки приемников. Расчеты выполнены применительно к модели волнового возмущения в виде конуса уплотнения, сопровождающего тело, быстро движущееся в атмосфере. Взаимно-корреляционная функция в этом случае также представлена двумерными рельефами WX, WY на плоскости координата (X или Y) – время задержки τ . По особенностям формы рельефа также могут быть сформулированы признаки, характеризующие поперечный масштаб N -волны (σ), удаленность от пункта регистрации, высоту траектории тела, движущегося со сверхзвуковой скоростью. Таким образом, установлено соответствие между формой рельефа функции взаимной корреляции и перечисленными параметрами движения, что указывает на принципиальную возможность удаленной диагностики.

Список литературы

1. Добрынина А. А., Саньков В. А., Чечельницкий В. В., Черных Е. Н. Сейсмические эффекты метеорита Челябинск. В кн.: Метеорит Челябинск – год на Земле. Материалы Всероссийской научной конференции / Составитель А.Н. Антипин. Челябинск: Каменный пояс, 2014. С. 668-677.
2. Селезнев В. С., Лисейкин А. В., Еманов А. А., Белинская А. Ю. Метеороид Челябинск (взгляд сейсмолога). В кн.: Метеорит Челябинск – год на Земле. Материалы Всероссийской научной конференции / Составитель А.Н. Антипин. Челябинск: Каменный пояс, 2014. С. 678-681.
3. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981. -201с.
4. Авиационная акустика. Под ред. А.Г. Мунина, В.Е. Квитки – М.: Машиностроение, 1973. -448с.
5. Маков Ю.Н. Возможно ли проникновение импульса звукового удара от современного истребителя в водную среду с его дальнейшим волновым распространением в этой среде? - NOISE Theory and Practice, 2018. №4, 1, стр.18-29.
6. Altmann Jurgen Acoustic-Seismic Detection of Ballistic-Missile Launches for Cooperative Early Warning of Nuclear Attack // Science and Global Security, 2005, Volume

13, pp. 129-168.

7. Хоха Ю.В. Акустические характеристики узкополосного излучения от движущихся источников. Акуст. журн. 1985. 31, вып.6. С. 831-834.

8. Булдырев В.С., Григорьева Н.С. Акустическое поле в водном слое с неровным дном, возбуждаемое движущимся в атмосфере источником. Акуст. журн. 1993. 39, вып.6, С. 1014-1023.

9. Рабинович В.С., Булдырев В.С., Грудская О.Н. Грудский С.М., Левендорский С.З., Обрезанова О.А., Соколов А.В., Старков А.С. Математические аспекты распространения звука в океаническом волноводе от источника, движущегося в воздухе. РГУ 1995.

10. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Акустическое поле источника, движущегося по нормали и вдоль границы раздела сред с резким перепадом импеданса // Ученые записки физического факультета МГУ. 2022. №2, С. 1-10.

11. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Особенности акустических и упругих полей движущихся источников. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 5-1, С. 74-77.

References

1. Dobrynina A.A., San'kov V.A., Chechel'nitskiy V.V., Chernykh E.N. Seismicheskie efekty meteorita Chel'abinsk. V kn.: Meteorit Chel'abinsk – god na Zemle. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii / Sostavitel' A.N. Antipin Chel'abinsk Kamennyj pojas 2014. Str. 668-677.

2. Seleznev V.S., Liseikin A.V., Emanov A.A., Belinskaya A.Yu. Meteoroid Chel'abinsk (vzgl'ad seismologa). V kn.: Meteorit Chel'abinsk – god na Zemle. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii / Sostavitel' A.N. Antipin Chel'abinsk Kamennyj pojas 2014. Str. 678-681.

3. Blokhintsev D.I. Akustika neodnorodnoy dvizhushcheis'a sredy. M.: Nauka, 1981. - 201 Str.

4. Aviatsionnaya akustika. Pod redaktsiey A.G. Munina, V.E. Kvitki M.: Mashinostroenie, 1973. -448 Str.

5. Makov Yu.N. Vozmozhno li proniknovenie impul'sa zvukovogo udara ot sovremennogo istrebit'el'a v vodnuyu sredu s ego dal'neyshim volnovym rasprostraneniem v etoy srede? NOISE. Theory and Practice, 2018. №4, 1, Str.18-29.

6. Altman Jurgen Acoustic-Seismic Detection of Ballistic-Missile Launches for Cooperative Early Warning of Nuclear Attack // Science and Global Security, 2005, Volume 13, pp. 129-168.

7. Khokha Yu.V. Akusticheskie kharakteristiki uzkopolosnogo izlucheniya ot dvizhushchikhs'a istochnikov / Akusticheskiy zhurnal 1985. 31, vyp.6, Str.831-836.

8. Buldyrev V.S., Grigor'eva N.S. Akusticheskoe pole v vodnom sloe s nerovnym dnom, vzbuzhdaemoe dvizhushchims'a v atmosphere istochnikom / Akusticheskiy zhurnal 1993. 39, vyp.6, Str. 1014-1023.

9. Rabinovich V.S., Buldyrev V.S., Grudskaya O.N., Grudskiy S.M., Levendorskiy S.Z., Obrezanova O.A, Sokolov A.V., Starkov A.S. Matematicheskie aspekty rasprostraneniya zvuka v okeanicheskom volnovode ot istochnika, dvizhushchegos'a v vozdukh. RGU, 1995.

10. Zaslavskiy Yu.M., Zaslavskiy V.Yu. Akusticheskoe pole istochnika, dvizhushchegos'a po normali i vdol' granitsy razdela sred s reskim perepadom impedansa / Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta MGU. 2022. №2, Str. 1-10.

11. Zaslavskiy Yu.M., Zaslavskiy V.Yu. Osobennosti akusticheskikh i uprugikh poley dvizhushchikhs'a istochnikov. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo 2013. № 5-1, Str. 74-77.