

УДК 534.26

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛОВ СВЯЗИ ИСТОЧНИКА И ПРИЕМНИКА В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

А. Ю. Зорин, И. П. Смирнов, А. И. Хилько

Исследованы временные трансляционные свойства каналов связи источника и приемника в неоднородной среде. Для этого введены специальные характеристики: среднее время распространения, временная дисперсия прихода сигналов, вероятность нормального прихода сигнала и вероятность разделения сигналов, прямого и рассеянного, неоднородностями.

Построены пространственные карты распределения характеристик на примере билинейного плоскослоистого волновода. Приводятся рекомендации по использованию таких карт для решения различных практических задач.

В плавно-неоднородных средах энергия источника распространяется в область наблюдения различными путями. Наглядным примером этого явления может служить набор лучей, соединяющих источник и приемник, вдоль которых распространяются высокочастотные поля [1]. Если в однородной среде лишь один луч соединяет источник и приемник, то в неоднородной среде таких лучей может быть очень много. В зависимости от характеристик неоднородной среды, энергонесущие лучи образуют сложные пространственные структуры различной конфигурации. Примером таких структур являются хорошо известные каналы распространения энергии в плоскослоистых волноводах в атмосфере и океане [1-3].

Сложность пространственной структуры каналов распространения энергии в неоднородной среде отражается и на временных характеристиках принятых сигналов. Поскольку длины различных лучей могут заметно отличаться, в точке приема вместо одного задержанного импульса, как это имеет место в однородной среде, будет наблюдаться большой набор импульсов, соответствующих различным лучевым траекториям. Такие импульсы могут как разделяться во времени, так и пересекаться, накладываясь друг на друга и образуя сложный сигнал.

Анализ указанных выше пространственно-временных структур, характеризующих каналы распространения энергии от источника к точке наблюдения в однородных средах, представляет значительный интерес как в научном плане, так и с точки зрения решения широкого круга практических задач. Так, исследование подобных структур необходимо при построении систем видения в неоднородных средах, где поле зрения может быть существенно неоднородным [5, 6], а также при решении обрат-

ных задач рассеяния в океанических и атмосферных волноводах, в частности, томографическими методами [6–8]. Другой областью приложения таких исследований является экранирование шума в заданной области неоднородной среды при известных источниках шума [9]. Кроме того, конфигурация и временная структура каналов распространения энергии в неоднородной среде играют важную роль при анализе помехозащищенности систем связи и навигации.

Исследование таких структур осуществлялось различными авторами чаще всего применительно к океану и атмосфере [1, 2]. При этом основное внимание уделялось изучению прямых каналов связи источника и приемника в случае, когда в неоднородной среде отсутствовали локальные возмущения. Такие каналы связи будем далее называть каналами связи первого рода. Вместе с тем, с точки зрения перечисленных выше прикладных задач, большой интерес представляют каналы связи второго рода, возникающие в случае, когда в неоднородной среде присутствуют либо локализованные неоднородности (тела, неоднородности границ, случайные неоднородности), либо криволинейные границы. В основе анализа каналов второго рода лежит более сложная физическая задача о рассеянии поля на локализованных неоднородностях в неоднородных средах. Решению этой задачи также посвящено достаточно много работ (хотя существенно меньше, чем решению прямой задачи распространения), в частности, можно для примера указать работу [10] и обзорную статью [11], в которой перечислены большая часть известных работ и систематизированы методы решения задачи.

В настоящей работе основное внимание будет уделено изучению пространственно-временной структуры первичных и вторичных каналов связи в рамках приближения геометрической акустики [1]. Для исследования характеристик каналов связи используется решение задачи о рассеянии на пробном теле, помещаемом во все возможные точки неоднородной среды. Это позволяет построить пространственные карты трансляционных характеристик неоднородной среды. Такой подход был использован в работе [3], где исследовались "трансляционные карты" коэффициентов энергетической связи и анизотропии неоднородных сред. Построение таких карт основывалось на использовании специально разработанных методов решения задачи рассеяния коротковолновых полей на телах в неоднородных средах [12, 13]. С точки зрения решения подобных задач представляет также большой интерес работа [14]. Однако, временная структура наблюдаемых полей не рассматривалась.

Прежде, чем приступить к исследованию временных характеристик, остановимся еще на одном важном аспекте проблемы. Он заключается в том, что высокочастотное поле в области наблюдения формируется большим числом сигналов, соответствующих лучам с различными траекториями, временами прихода и энергетикой. В этих условиях более естествен-

ным представляется отказаться от попытки динамического описания временных характеристик и обратиться к статистическому описанию. Этот метод описания обосновывается и удобством практического использования результатов анализа, поскольку при сравнении расчетов и натурных данных приходится иметь дело с усредненными при измерениях характеристиками. Такого рода усреднение неизбежно из-за нестационарности среды, а также влияния многочисленных случайных факторов, имеющих место в реальных условиях. Практика натурных измерений в океане и атмосфере убеждает в эффективности статистического подхода.

Отметим еще одно обстоятельство: результаты, полученные в [2, 7, 10, 15] и других работах, показывают, что во многих практических случаях поля, соответствующие различным лучевым траекториям, можно считать некогерентными. Следовательно, для анализа временной структуры достаточно осуществлять энергетическое сложение сигналов, соответствующих отдельным лучевым траекториям (условия применимости такого описания обсуждаются в работе [10]).

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Введем временные характеристики каналов связи неоднородной среды в рамках статистического подхода с учетом предположений, упомянутых выше. Пусть в точке S неоднородной среды находится источник импульсного сигнала $U_0(t) = V(t) \cos \omega t$, где ω — несущая частота, $V(t)$ — медленная огибающая. В точку приема R сигнал приходит по отдельным энергонесущим лучам: $U_i(t) = C_i V(t - \tilde{T}_i) \cos \omega(t - \tilde{T}_i)$, где $i = 1 \dots N$, N — число энергонесущих лучей, $\tilde{T}_i = T_i + \tau_i$, T_i — время распространения звука по i -му лучу, τ_i — случайная задержка, обусловленная случайными неоднородностями и другими причинами. Будем считать, что $|\tau_i| \ll T_i$ и $|\omega \tau_i| \geq \pi$. Набеги фаз на различных лучах считаем статистически независимыми [10]. Случайная амплитуда i -го импульса $C_i = \lambda_i \sqrt{\frac{F_i}{\rho^2}}$, где ρ — рассеяние между S и R в горизонтальной плоскости, F_i — фактор фокусировки луча, λ_i — множитель, учитывающий влияние случайных неоднородностей.

Предполагая статистическую независимость параметров отдельных лучей, для интенсивности суммарного сигнала имеем

$$\langle U^2(t) \rangle = \sum_i^N \langle U_i^2(t) \rangle = \sum_i^N \langle C_i^2 \rangle \langle V^2(t - \tilde{T}_i) \cos^2 \omega(t - \tilde{T}_i) \rangle.$$

Учитывая медленность $V(t)$, окончательно получим:

$$\langle U^2(t) \rangle = \frac{1}{2\rho^2} \sum_i^N \langle V^2(t - \tilde{T}_i) \rangle F_i \langle \lambda_i^2 \rangle.$$

Это выражение можно представить в следующем виде:

$$\langle U^2(t) \rangle = A \int_{-\infty}^{\infty} v(t-\tau) f_J(\tau) d\tau = A \langle v(t-J) \rangle_J, \quad (1)$$

где $f_J(\tau) = \sum_i^N P_i f_i(\tau - T_i)$, $P_i = F_i \langle \lambda_i^2 \rangle \left(\sum_i^N F_i \langle \lambda_i^2 \rangle \right)^{-1}$, $A = \frac{1}{2\rho^2} \sum_i^N F_i \langle \lambda_i^2 \rangle$,

$v(t) = V^2(t)$, $f_i(\tau)$ — плотность распределения случайной величины τ_i .

Будем далее считать, что все τ_i распределены одинаково с нулевым средним и дисперсией $\sigma^2 (\sigma \ll T_{\min})$. Тогда:

$$f_J(\tau) = \frac{1}{\sigma} \sum_i^N P_i f \left(\frac{\tau - T_i}{\sigma} \right), \quad (2)$$

где $f(\tau)$ — плотность распределения нормированной величины $\frac{\tau_i}{\sigma}$. Функция $f_J(\tau)$ является плотностью распределения величины J , которую мы назовем временем распространения импульсного сигнала по трассе SR . Так как $\sigma \ll T_{\min}$, то величина J распределена в окрестности интервала (T_{\min}, T_{\max}) . При этом она с большей вероятностью принимает свои значения в тех частях указанного интервала, где всего плотнее группируются значения времен T_i с максимальными весами P_i , что соответствует импульсам с максимальными интенсивностями.

Введенная таким образом характеристика (2) в определенном смысле универсальна и способна описать различные среды. Например, для однородной среды $P_1 = 1$, $f_J(\tau) = \frac{1}{\sigma} f \left(\frac{\tau - T_1}{\sigma} \right)$. В однородном пространстве $z \leq 0$, с абсолютно отражающей поверхностью $z = 0$, $f_J(\tau) = \sigma^{-1} (d_s^2 + d_s^{*2})^{-1} \left\{ d_s^{*2} f \left(\frac{c\tau - d_s}{c\sigma} \right) + d_s^2 f \left(\frac{c\tau - d_s^*}{c\sigma} \right) \right\}$, где d_s , d_s^* — расстояния соответственно от точки R до точки S и ее зеркального, относительно поверхности $z = 0$, изображения S^* . В случае однородной полосы $-h \leq z \leq 0$ с абсолютно отражающими границами $z = -h$, $z = 0$

$$f_J(\tau) = c \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{d_{S_k}^{*2}} f \left(\frac{c\tau - d_{S_k}}{c\sigma} \right) + \frac{1}{d_{S_k}^2} f \left(\frac{c\tau - d_{S_k}^*}{c\sigma} \right) \right\}, \quad (3)$$

где

$$c = \frac{1}{\sigma} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{d_{S_k}^2} + \frac{1}{d_{S_k}^{*2}} \right\}, \quad d_{S_k}^{*2} = \rho^2 + (z_R \pm z_S - 2hk)^2.$$

На рис. 1 качественно показано распределение (3).

Центр тяжести распределения $\langle J \rangle$ естественно принять за среднее время распространения сигнала от источника импульсов к области на-

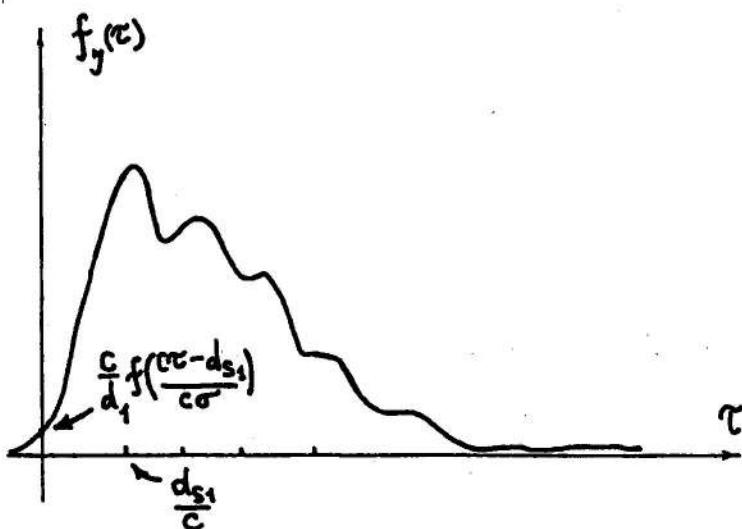


Рис. 1. Качественная зависимость распределения времени распространения сигнала для однородной полосы.

блуждания, а удвоенный стандарт $2\sigma_J$ можно назвать затягиванием импульса:

$$\langle J \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \tau f_J(\tau) d\tau \sum_k P_k T_k, \quad (4)$$

$$\sigma_J^2 = \sigma^2 + \sigma_0^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (\tau - \langle J \rangle)^2 f_J(\tau) d\tau = \sigma^2 + \sum_k P_k T_k^2 - \left(\sum_k P_k T_k \right)^2. \quad (5)$$

Полученные таким образом временные характеристики сигналов в неоднородной среде (4) и (5) позволяют анализировать свойства каналов связи первого рода, в частности, построить $\langle J \rangle$ и σ_J^2 в зависимости от координаты точки наблюдения. Подобно известным величинам потерь на распространение, рассчитываемым для атмосферы и океана [2, 10, 15], среднее время распространения и затягивание импульса могут быть использованы при решении различного рода задач синтеза и анализа полей. Учитывая практические потребности, расчеты величин (4) и (5) проводились на примере плоскослоистых волноводов рефракционного типа. В частности, в билинейном плоскослоистом волноводе пространственное распределение искомых величин зависит от положения источника поля. Так, если источник расположен вдали от оси волновода, все пространство (по глубине и удалению) делится на две части, в одной из которых затягивание импульсов мало, а в другой — велико. В случае, когда источник расположен вблизи оси волновода такое разделение сделать трудно. Как и

для потерь на распространение, можно осуществить классификацию часто встречающихся в натурных условиях волноводов, что представляет интерес с точки зрения исследования атмосферы и океана, однако, ввиду ограниченности объема работы, уделим большое внимание исследованию каналов связи второго рода, возникающих из-за наличия локализованных неоднородностей в плавно-неоднородной среде.

Рассмотрим сигнал в точке наблюдения R , появляющийся из-за рассеяния на локализованной неоднородности, расположенной в точке Q . Все вышеприведенные соображения относительно характера принимаемого сигнала остаются справедливыми и в этом случае, однако, в (1) следует заменить величины $F_i \langle \lambda_i^2 \rangle$ на $F_i^{(1)} F_i^{(2)} S_i \langle \lambda_i^2 \rangle$, где $F_i^{(1)}$, $F_i^{(2)}$ — факторы фокусировки лучей SQ и QR , соответственно, S_i — эффективное сечение рассеяния локальной неоднородности в точке отражения луча (в приближении геометрической оптики $S_i = |\Gamma_i^2| |K_i^{-1}|$, где Γ_i — коэффициент Френеля, K_i — гауссова кривизна поверхности неоднородности в точке отражения [1]. В частности, для тестовой неоднородности в виде абсолютно отражающей поверхности с постоянной гауссовой кривизной:

$$f_{J_1}(\tau) = \frac{1}{\sigma} \sum_k^M q_k f \left(\frac{\tau - T_k^{(1)}}{\sigma} \right), \quad (6)$$

$$q_k = F_k^{(1)} F_k^{(2)} \langle \lambda_k^2 \rangle \left(\sum_k^M f_k^{(1)} f_k^{(2)} \langle \lambda_k^2 \rangle \right)^{-1}, \quad (7)$$

где J_1 — время распространения сигнала на трассе SQR , $T_k^{(1)}$ — время прохождения сигнала по k -му лучу, соединяющему точки S и R и отражающемуся от поверхности неоднородности, M — число лучей, рассеянных неоднородностью и попавших в область наблюдения (поиск таких лучей — задача нацеливания, рассмотрена в работах [3, 13, 14]).

Среднее значение $\langle J_1 \rangle$ и затягивание σ_1

$$\langle J_1 \rangle = \sum_k^M q_k T_k^{(1)}, \quad (8)$$

$$\sigma_1^2 = \sigma^2 + \sum_k^M q_k \left(T_k^{(1)} \right)^2 - \left(\sum_k^M q_k T_k^{(1)} \right)^2, \quad (9)$$

при заданных положениях точек S и R являются функциями точки Q , задающей положение локальной неоднородности. Ниже будет более подробно исследована зависимость функций (8) и (9) от параметров неоднородной среды. Однако, прежде обратим внимание еще на одну характеристику сигнала, важную с точки зрения практических приложений, —

вероятность разделения во времени сигнала, распространяющегося по каналам первого рода (прямой сигнал) и по каналам второго рода (вторичный рассеянный сигнал).

Будем считать распределение времен J и J_1 независимыми. Найдем вероятность событий $A = \{J_1 > J\}$ и $A_\tau = \{|J_1 - J| \geq \tau\}$. Первое из событий свидетельствует о "нормальном" характере распространения сигнала: рассеянный сигнал приходит позднее прямого. Заметим, что в неоднородной среде возможен и аномальный тип распространения, когда вероятность противоположного события \bar{A} заметно отлична от нуля. Выполнение события A_τ (τ — параметр) говорит о возможности надежного разделения прямого и рассеянного сигналов во времени. С учетом (4), (5), (8), (9) можно получить для искомых вероятностей следующие выражения:

$$\begin{aligned} P(A) &= \iint_{t_1 > t} f_{JJ_1}(t, t_1) dt dt_1 = \\ &= \frac{1}{\sigma^2} \sum_{k,i}^{N,M} P_k q_i \iint_{t_1 > t} f\left(\frac{t - T_k}{\sigma}\right) f\left(\frac{t_1 - T_i^{(1)}}{\sigma}\right) dt dt_1 = \quad (10) \\ &= \sum_{k,i}^{N,M} P_k q_i \Psi\left(\frac{T_k - T_i^{(1)}}{\sigma}\right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(A_\tau) &= 1 - \iint_{|t - t_1| < \tau} f_{JJ_1}(t, t_1) dt dt_1 = \\ &= 1 + \sum_{k,i}^{N,M} P_k q_i \left\{ \Psi\left(\frac{T_i^{(1)} - T_k + \tau}{\sigma}\right) - \Psi\left(\frac{T_i^{(1)} - T_k - \tau}{\sigma}\right) \right\}, \quad (11) \end{aligned}$$

где

$$\Psi(\gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(U - \gamma) d\Phi(U), \quad \Phi(U) = \int_{-\infty}^U f(t) d(t).$$

В частности, для нормального распределения $f(t)$ [1] получим для вероятностей (10) и (11):

$$P(A) = \frac{1}{2} \sum_{k,i}^{N,M} P_k q_i \left\{ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{T_i^{(1)} - T_k}{2\sigma}\right) \right\}, \quad (12)$$

$$P(A_\tau) = 1 + \frac{1}{2} \sum_{k,i}^{N,M} P_k q_i \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{T_i^{(1)} - T_k - \tau}{2\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{T_i^{(1)} - T_k + \tau}{2\sigma}\right) \right\}, \quad (13)$$

где

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp\{-t^2\} dt, \quad \tau = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2} + \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma^2}.$$

Заметим, что введенные выше характеристики не зависят ни от формы сигнала, ни от формы тестового рассеивателя (размеры тестового рассеивателя предполагаются удовлетворяющими условиям применимости геометрической акустики, и, вместе с тем, существенно меньшими характерных масштабов неоднородности среды [3, 12, 13]). Таким образом, величины (4), (5), (8)–(11) характеризуют только свойства неоднородной среды.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КАРТЫ ВРЕМЕННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СВЯЗИ

С точки зрения практики представляет интерес построение карт пространственного распределения введенных выше характеристик для часто встречающихся типов неоднородных сред, например, океанических и атмосферных плоскослоистых волноводов. Учитывая результаты, полученные в работе [13], где были построены пространственные карты коэффициентов энергетической связи, выберем в качестве примера, как и в [13], билинейный канал [2]. В таком канале скорость распространения C поля зависит от одной из поперечных координат (глубины или высоты) z . Пусть $C(z)$ задается таблицей пар чисел (C_i, z_i) — $(1500, 0; 1510, 200; 1550, 3000)$, где размерность чисел соответственно метр в секунду и метр. Рассчитаем для такого типа неоднородной среды среднее время прихода сигнала, его дисперсию и вероятности соответственно нормального прихода и разделения сигналов, приходящим по каналам связи первого и второго рода. Рассмотрим случай, когда источник и приемник разнесены на 10^5 м и расположены на горизонте $z_S = z_R = 180$ м. На рис. 2 показаны распределения рассматриваемых величин в горизонтальной плоскости (x, y) при $z = 180$ м, в квадрате $10^5 \times 10^5$ м, в яркостном виде (в интервале пятнадцати градаций яркости). Из расчетов видно, что среднее время прихода сигнала (рис. 2а) плавно нарастает по мере удаления от линии SR аналогично тому, как это происходит в свободном пространстве. Однако, уже на распределение дисперсии сигнала существенное влияние оказывает неоднородность среды (рис. 2б). Это проявляется в виде двух эллипсоидных систем колец больших и меньших значений дисперсии. Объясняется такое явление формированием в билинейных волноводах зон фокусировок для лучей, в которых собираются лучи с близкими траекториями. На рис. 2в и 2г показаны соответственно $P(A)$ и $P(A_\tau)$. Каждое из распределений нормировано на свою величину в целях удобства представления. Из сопоставления искомых распределений следует, что область

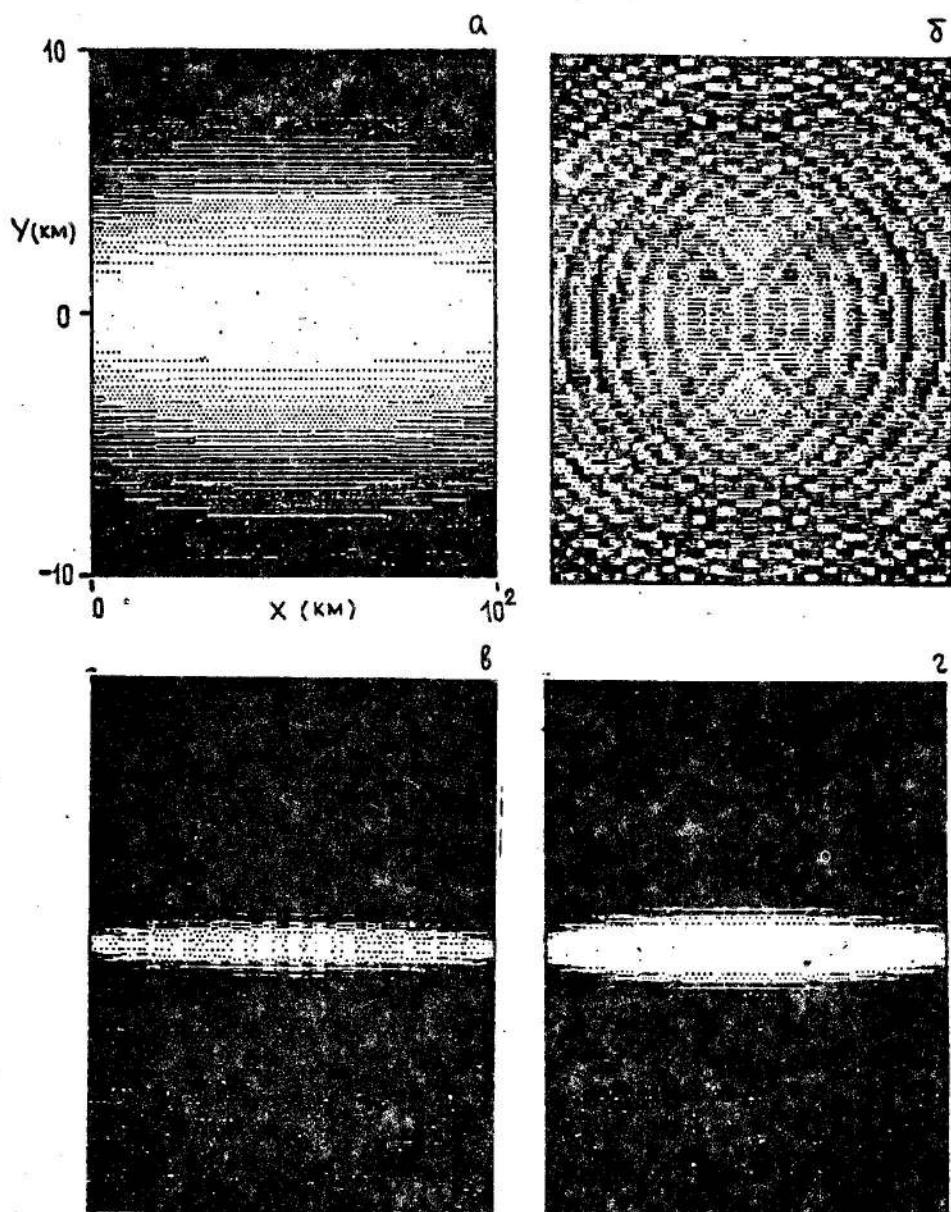


Рис. 2. Распределения трансляционных характеристик в горизонтальной плоскости в билинейном волноводе (а — среднее время прихода, б — дисперсия сигнала, в — вероятность нормального прихода сигнала, г — вероятность разделения прямого и рассеянного сигналов).

надежного разделения сигналов, распространяющихся по каналам первого и второго рода, объемлет область нормального прихода сигналов, таким образом, часть пространственной области разделения сигналов обуславливается аномальным приходом сигналов.

Более ярко неоднородность среды проявляется в приведенных на рис. 3 вертикальных распределениях рассматриваемых характеристик. Приведенные распределения нормированы таким образом, что белое поле соответствует областям, в которых отсутствует энергетическая связь источника и области наблюдения [3]. В приведенных расчетах источник и точка наблюдения находились на горизонте $z_S = z_R = 2500$ м. Вертикальная плоскость построения (x, z) проходила через источник и точку наблюдения. Видно, что в отличие от предыдущего расчета, область энергетической связи сформирована в более локализованной форме, поскольку источник и приемник находятся вдали от оси билинейного канала. В пределах этой области среднее время прихода (рис. 3а) максимально в центре областей конвергенции, что определяется структурой формирующих соответствующие поля лучевых траекторий, проходящих, в основном, через области с повышенной скоростью распространения. Сравнение с распределением дисперсии сигнала (рис. 3б) позволяет утверждать, что поле в рассматриваемых областях формируется лучами, имеющими различную конфигурацию, что приводит к "размазыванию" сигнала. Пространственное распределение вероятности правильного прихода сигналов (рис. 3в) весьма близко распределению среднего времени прихода сигналов. Вероятность уверенного разделения мала, за исключением узких областей, для которых величина коэффициента энергетической связи мала [3]. Сопоставление расчетных данных показывает, что в вертикальной плоскости, проходящей через источник и область наблюдения, несмотря на то, что сигнал по каналу первого рода приходит раньше, разделение сигналов маловероятно. Указанная закономерность нарушается в случае, когда вертикальная плоскость, в которой строится карта (пространственное распределение параметров), не проходит через источник и область наблюдения. Это следует из совместного анализа вертикальных и горизонтальных распределений. Результаты расчетов пространственного распределения при симметричном расположении источника и области наблюдения в определенной степени можно предсказать из общефизических соображений. В противном случае, когда источник и область наблюдения располагаются на различных горизонтах (рис. 4, $z_S = 500$ м, $z_R = 1650$ м), пространственное распределение является более сложным и менее предсказуемым. На рис. 4 приведено пространственное распределение характеристик в случае, когда плоскость построения находится на расстоянии $y = 1500$ м от плоскости источника и области наблюдения. Из расчетов видно, что позже всех в область наблюдения придут сигналы, рассеянные неоднородностями, расположенными вблизи (по координатам (x, z))

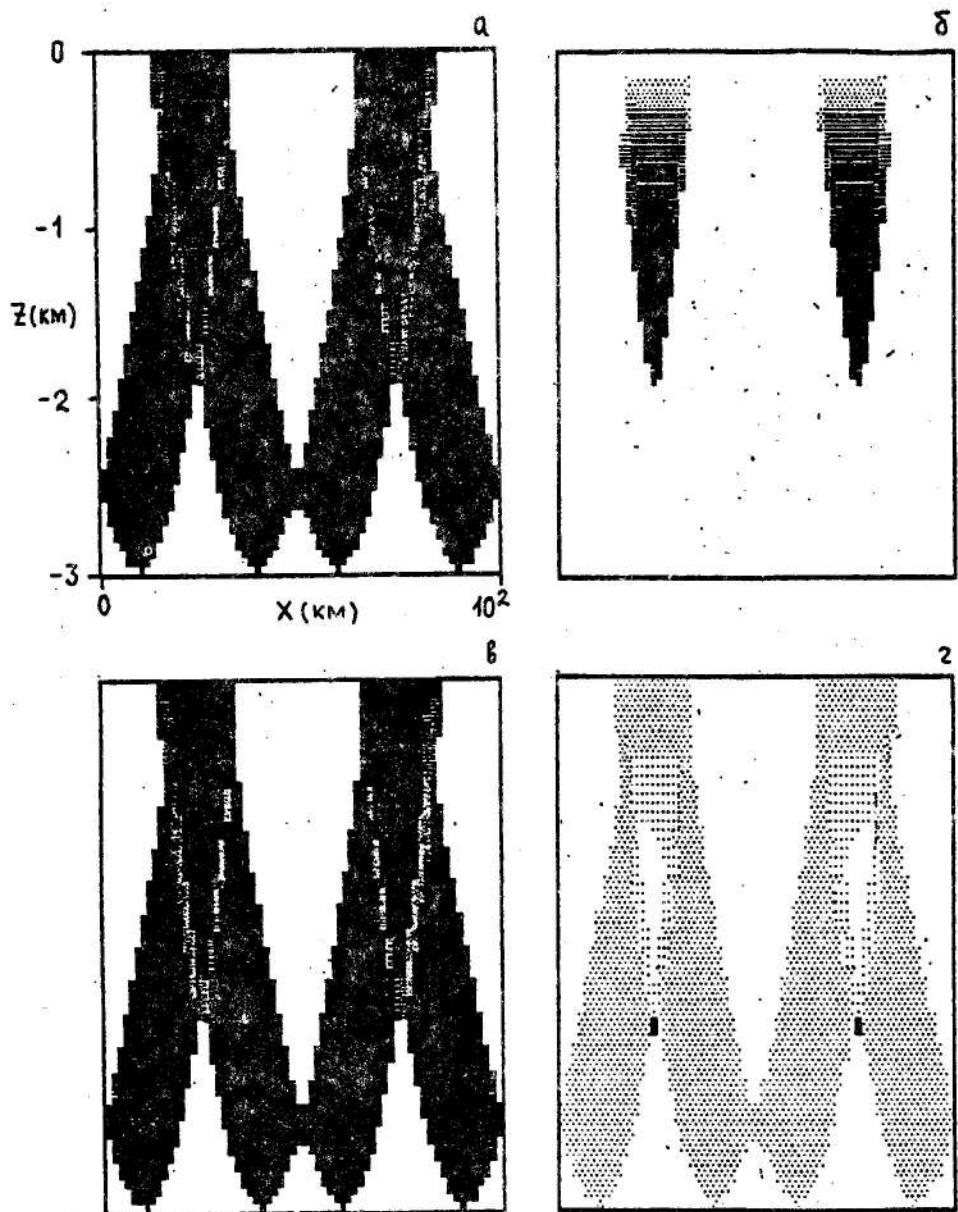


Рис. 3. Распределения соответствующих рис. 2 характеристик в вертикальной плоскости.

источника и приемника (рис. 4а). При этом, дисперсия таких сигналов относительно мала (рис. 4б). Эти же сигналы приходят раньше сигналов, распространяющихся по каналам первого рода, и надежно разделяются с ними (рис. 4в, г).

Аналогичные расчеты осуществлялись для слоисто-неоднородных волноводов других типов: с линейным профилем скорости распространения волн, канонического, изоскоростного волноводов [2]. В каноническом канале в более яркой форме проявляется деление всего пространства на две части. В одной из них коэффициент энергетической связи мал [3]. В другой — поле формируется лучами с близкими траекториями, и временные характеристики отражают в определенной степени закономерности, наблюдаемые в свободном пространстве. В изоскоростном волноводе поле формируется большим количеством лучей, отраженных от границ волновода, поэтому вертикальное распределение временных характеристик среды более плавное и однородное.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ КАРТ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В настоящей работе исследованы свойства статистических характеристик каналов связи в неоднородных средах, которые обусловливают временную зависимость наблюдаемых сигналов. Для этой цели введены специальные величины: среднее время распространения, затягивание импульса, вероятность нормального прихода сигнала и вероятность разделения прямого и рассеянного сигналов. Указанные величины определяются свойствами среды, являются ее характеристиками и могут быть использованы для классификации часто встречающихся в практике неоднородных сред путем построения своеобразных трансляционных карт введенных коэффициентов. В сочетании с аналогичными картами коэффициентов энергетической связи анизотропии [3], трансляционные временные характеристики карты могут являться важными априорными данными, облегчающими решение многих практических задач. Перечислим коротко такие задачи и укажем возможности использования карт при их решении.

1. Задачи построения изображений (видение) и томографии в неоднородной среде [4, 5]. Анализ трансляционных карт, построенных для рефракционных волноводов, показывает, что поле зрения систем наблюдения существенно неоднородно. В частности, существуют области, через которые отсутствует связь источника и области регистрации. Попытка реконструкции неоднородностей в этих областях приводит к возникновению неустойчивых решений и существенных помех. Следовательно, для регуляризации системы наблюдения в алгоритмах построения изображений необходимо учесть содержащиеся в трансляционных картах априорно рассчитанные данные.

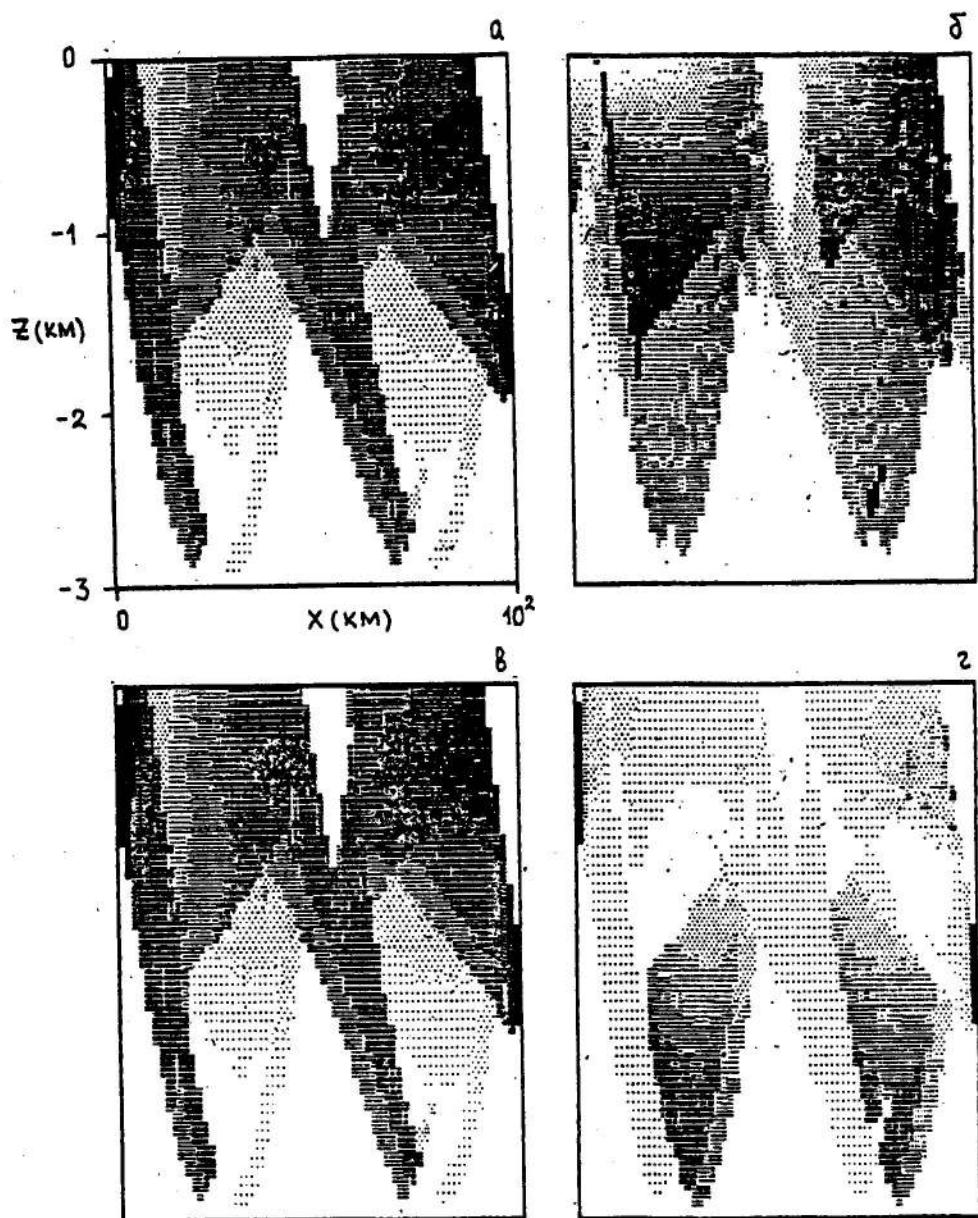


Рис. 4. Вертикальное распределение трансляционных характеристик (см. рис. 2) в случае, когда источник и область наблюдения расположены на разных горизонтах.

2. Дифференциальная диагностика океанических волноводов [6, 7]. Этот метод основан на селекции мод либо лучей с различными эффективными скоростями распространения при последующем временном стробировании, что позволяет диагностировать различные области океанического волновода. Временные трансляционные карты, по существу, дают пространственную конфигурацию области поля зрения метода дифференциальной диагностики для различных интервалов временных задержек. Следует отметить, что в работах [6, 7] рассмотрение метода осуществлялось в модовом приближении. Относительно лучевого подхода указывалось лишь на принципиальную возможность использования метода дифференциальной диагностики в случае коротковолновой акустики, где более эффективно лучевое описание. Это связано с трудностями расчета энергетических характеристик вторичных каналов связи [12, 13]. Анализ трансляционных карт показывает, что элементы разрешения в поле зрения имеют сложную форму, однако, соответствующее усложнение алгоритма реконструкции, с учетом априорной информации в виде трансляционных карт, позволяет осуществлять диагностику среды.

3. Экранирование шума [9]. Поскольку в неоднородной среде, как показывает анализ трансляционных карт, существуют области концентрации поля, для подавления шума в заданных областях необходимо помещать экраны именно в такие области. В принципе, совокупность трансляционных карт позволяет решать задачу о необходимом подавлении шума в заданной области и в заданное время.

4. Связные задачи. Анализ трансляционных карт позволяет разработать рекомендации по передаче информации в неоднородных средах, в частности, определить скорость и помехоустойчивость связи.

В заключение отметим, что для расчета трансляционных коэффициентов было использовано приближение геометрической акустики, однако, расчет можно осуществить и в низкочастотном приближении, используя, например, модовое представление для расчета полей в волноводах [2, 11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред. — М.: Наука, 1980. 304 с.
2. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 262 с.
3. Зорин А. Ю., Смирнов И. П., Хилько А. И. // Изв. вузов. Радиофизика, 1992. Т. 35.
4. Бородина Е. Л., Горская Н. В., Горский С. М. и др. В сб. Формирование акустических полей в океанических волноводах / Под ред. В. А. Зверева. — Н. Новгород: ИПФ АН, 1991. С. 174–200.

5. Бородина Е. Л., Горская Н. В., Горский С. М. и др. // Акуст. журн., 1992.
6. Нечаев А. Г., Хилько А. И. // Акуст. журн., 1988. Т. 34. № 4. С. 694–699.
7. Картникова И. Р., Нечаев А. Г., Хилько А. И. // Изв. вузов. Радиофизика, 1990. Т. 13. № 12. С. 1370–1378.
8. Nechaev A. G., Khil'ko A. I. Acoustical diffraction tomography of the Ocean / Dynamic and Stochastic wave phenomena. Proc. of the International Scientific School-Seminar in N. Novgorod. — N. Novgorod: University Press, 1992. P. 177–180.
9. Зорин А. Ю., Смирнов И. П., Хилько А. И. Подавление шума экранами в неоднородной среде / Сб. докладов 1-ой Сессии Российского Акустического общества, 1992. — М.: ВНИИФТРИ.
10. Распространение звука во флуктуирующем океане / Под ред. С. Флата. — М.: Мир, 1982.
11. Горский С. М., Зверев В. А., Хилько А. И. В сб. Формирование акустических полей в океанических волноводах / Под ред. В. А. Зверева. — Н. Новгород: ИПФ АН, 1991.
12. Смирнов И. П., Хилько А. И. // Акустика и ультразвуковая техника, 1990.
13. Смирнов И. П., Хилько А. И. // Акустика и ультразвуковая техника, 1991.
14. Пермитин Г. В., Шарова А. Л. Нацеливание лучей в геометрической оптике. — Н. Новгород: ИПФ АН, 1990. Препринт № 278. 29 с.

Институт прикладной физики
РАН

Поступила в редакцию
5 октября 1992 г.

**TEMPORAL CHARACTERISTICS OF COMMUNICATIONS CHANNELS
BETWEEN SOURCE AND RECEIVER IN INHOMOGENEOUS MEDIUM**

A. I. Khil'ko, I. P. Smirnov, A. Yu. Zorin

The temporal translation properties of the communication channels between source and receiver was investigated. In this aims, special characteristics such as average time of reaching, reaching time dispersion, normal reaching probability and direct and scattered signals separate probability was introduced. Spatial map of characteristics distribution for the example of bilinear layer waveguide was build. The manual to use the maps for the solution of various practical problems was represented.