

О роли коллективных эффектов рассеяния в задачах диагностики дискретных случайных неоднородностей

И. Ю. Грязнова,^{*} Е. Н. Иващенко,[†] Р. В. Сомов[‡]

Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского

Россия, Нижний Новгород, 603950, пр. Гагарина, д. 23

(Статья поступила 26.06.2017; Подписана в печать 11.09.2017)

Предложено описание возможной корреляции взаимного расположения дискретных донных неоднородностей. Показано, что наличие такой корреляции приводит к существенному изменению средней интенсивности обратного рассеяния. Исследовано, при каких условиях доминируют эффекты, возникающие при наличии разброса неоднородностей по размерам, а при каких — коллективные эффекты рассеяния.

PACS: 43.20.Fn, 43.30.Gv.

УДК: 534.2

Ключевые слова: обратное рассеяние, дискретные неоднородности, случайные поля, корреляция, гидроакустические сигналы.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование эффектов, возникающих при обратном рассеянии акустических волн на дискретных неоднородностях, имеет большое практическое значение, поскольку по измерениям интенсивности отраженной волны могут быть сделаны определенные выводы о характеристиках озвучиваемых объектов. Немаловажную роль в поведении функции интенсивности отраженной волны могут играть эффекты, возникающие при наличии некоторого распределения неоднородностей по размерам. Кроме того, в задачах дистанционной акустической диагностики океанических донных неоднородностей важно влияние статистики расположения дискретных рассеивателей на плоскости, поскольку их расположение на дне можно считать равномерным и статистически независимым лишь в первом приближении. Задачей дистанционной диагностики является определение концентрации донных неоднородностей по рассеянному в обратном направлении сигналу.

Целью данной работы является рассмотрение изменений поведения средней интенсивности поля обратного рассеяния, к которым могут привести наличие некоторого распределения неоднородностей по размерам и корреляция их взаимного расположения.

1. ОПИСАНИЕ ГРУППИРОВКИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Исследования [1, 2] показывают, что расположение рассеивателей на дне океана можно считать равномерным и статистически независимым лишь в первом приближении.

Для того, чтобы учесть возможную статистическую зависимость взаимного расположения рассеивателей, в бинарную функцию распределения неоднородностей по плоскости дна введем некоторую функцию $\mu(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m)$ [3]:

$$W(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m) = W(\mathbf{r}_l)W(\mathbf{r}_m)(1 + \mu(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m)). \quad (1)$$

Нетрудно найти её связь с корреляционной функцией концентрации n рассеивателей

$$\psi_n(\boldsymbol{\rho}) = \langle n(\mathbf{r})n(\mathbf{r} + \boldsymbol{\rho}) \rangle. \quad (2)$$

Эта связь будет выглядеть следующим образом [4]:

$$\psi_n(\boldsymbol{\rho}) = \langle n \rangle \delta_a(\boldsymbol{\rho}) + \langle n \rangle^2 (1 + \mu(\boldsymbol{\rho})), \quad (3)$$

где $\delta_a(\boldsymbol{\rho})$ — функция, описывающий ближний порядок в расположении частиц, $\mu(\boldsymbol{\rho})$ — функция, описывающий дальний порядок, то есть группировку рассеивателей.

Определённые ограничения, накладываемые на функцию $\mu(\boldsymbol{\rho})$, можно найти из условия согласованности бинарной функции распределения

$$W(\mathbf{r}_l) = \int_0^\infty W(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m) d\mathbf{r}_m. \quad (4)$$

Подставляя (1) в выражение (4), получим:

$$\begin{aligned} W(\mathbf{r}_l) &= \int_0^\infty W(\mathbf{r}_l)W(\mathbf{r}_m) d\mathbf{r}_m + \\ &+ \int_{-\infty}^\infty W(\mathbf{r}_l)W(\mathbf{r}_m)\mu(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m) d\mathbf{r}_m = \\ &= W(\mathbf{r}_l) + W(\mathbf{r}_l) \int_{-\infty}^\infty W(\mathbf{r}_m)\mu(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m) d\mathbf{r}_m. \end{aligned} \quad (5)$$

Очевидно, что равенство (5) будет выполняться, когда

$$\int_{-\infty}^\infty W(\mathbf{r}_m)\mu(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m) d\mathbf{r}_m = 0,$$

^{*}E-mail: gryaznova@rf.unn.ru

[†]E-mail: en.ivashchenko@gmail.com

[‡]E-mail: somovroman@mail.ru

что при постоянном значении одноточечного распределения и изотропном статистически однородном поле рассеивателей приводит к условию:

$$\int_0^{\infty} \mu(\rho) \rho d\rho = 0. \quad (6)$$

2. МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ПЛОСКОСТИ

Для дальнейшего описания взаимного расположения рассеивателей будем использовать следующие модели:

а) одномасштабную модель, описывающую группировку неоднородностей в скоплениях размером ρ_0 при расстояниях ρ между «пятнами»

$$\mu(\rho) = \mu_0 \exp\left(-\frac{\rho^2}{\rho_0^2}\right) \left(1 - \frac{\rho^2}{\rho_0^2}\right), \quad (7)$$

б) двухмасштабную модель, учитывающую не только размеры скоплений ρ_0 , но и средний радиус a_0 самих рассеивателей

$$\mu(\rho) = \mu_0 \left(\exp\left(-\frac{\rho^2}{a_0^2}\right) \cos\left(\frac{\rho^2}{a_0^2}\right) + \exp\left(-\frac{\rho^2}{\rho_0^2}\right) \cos\left(\frac{\rho^2}{\rho_0^2}\right) \right). \quad (8)$$

Обе модели удовлетворяют условию (6) и предложены авторами данного исследования, модель (7) впервые была использована в работе [5].

Параметр μ_0 показывает, насколько плотно расположены частицы внутри скоплений, иными словами, насколько мало их вне мест скоплений.

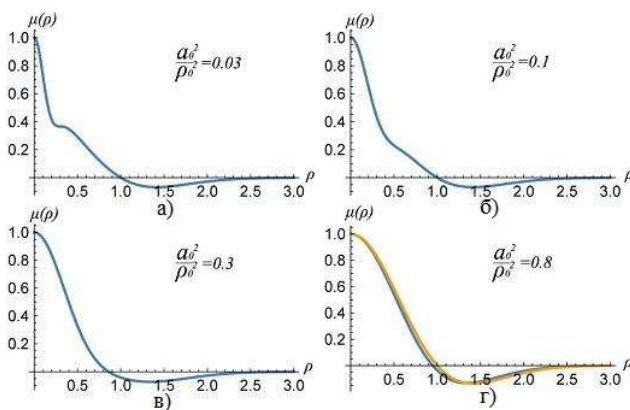


Рис. 1: Вид функции корреляции расположения рассеивателей $\mu(\rho)$ при различных соотношениях между средним размером неоднородностей и средним размером их скоплений

Оранжевой кривой на рис. 1, а, б, в, г показан вид одномасштабной функции $\mu(\rho)$, синими — вид двухмасштабной функции $\mu(\rho)$ при различных соотношениях

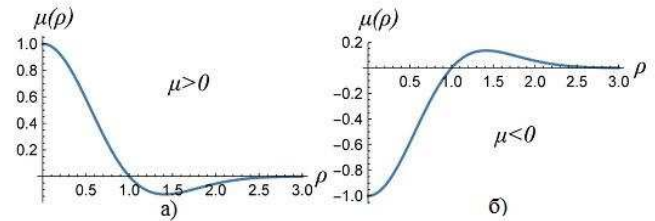


Рис. 2: Вид функции $\mu(\rho)$ при корреляции и антикорреляции»

между средним размером неоднородностей и средним размером скоплений.

Стоит отметить, что константа μ_0 может быть как положительной, так и отрицательной, что соответствует корреляции или антикорреляции взаимного расположения рассеивателей (рис. 2, а, б).

3. КОЛЛЕКТИВНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ СРЕДНЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Рассмотрим влияние группировки частиц на среднюю интенсивность обратного рассеяния акустических сигналов. Представив двухточечную функцию распределения в виде (1), несложно получить выражение для средней интенсивности обратного рассеяния, в котором наряду с когерентной и некогерентной компонентами появится ещё одно слагаемое, будем называть его коллективной составляющей:

$$I_{col} = \left(\frac{|a(ka)|p_0}{h^2} \right)^2 \langle n \rangle^2 \int_{-\infty}^{\infty} \mu(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m) \times e^{\left\{ -\left(\frac{r_l}{h}\right)^2 \left(2\left(\frac{d}{x}\right)^2 - ikh\right) - \left(\frac{r_m}{h}\right)^2 \left(2\left(\frac{d}{x}\right)^2 + ikh\right) \right\}} d\mathbf{r}_l d\mathbf{r}_m. \quad (9)$$

Расчеты показывают, что зависимости коллективная составляющая зависит от безразмерного параметра D/ρ_0 , где D — апертура преобразователя. Данный параметр который можно рассматривать как отношение диаграмм направленности зондирующего и переизлученного от области с характерным размером ρ_0 сигналов. Чем больше размер эффективной области переизлучения ρ_0 , тем уже диаграмма направленности обратного рассеяния и тем большая интенсивность рассеянного сигнала должна регистрироваться приемным устройством. На рис. 3, а, б, в, г синими кривыми показана зависимость коллективного слагаемого средней интенсивности при использовании модели (8), оранжевой — при одномасштабной модели (7).

Поскольку величина средней интенсивности принятого поля зависит от соотношения между D и ρ_0 , рассмотрим предельные случаи:

$D \gg \rho_0$, тогда $\left(\frac{D}{h\lambda\lambda_0}\right)^2 \gg \left(\frac{1}{h\lambda}\right)^2$. В этом случае корреляция между положениями рассеивателей не влияет на значение средней интенсивности рассеянного поля.

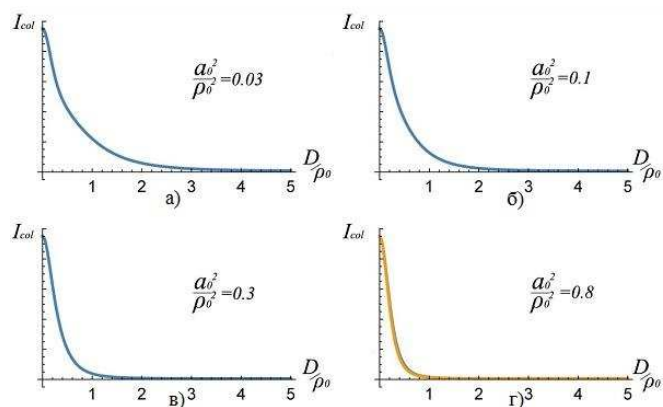


Рис. 3: Зависимость коллективной компоненты средней интенсивности от безразмерного параметра D/ρ_0

$D \ll \rho_0$, тогда $\left(\frac{D}{h\lambda\lambda_0}\right)^2 \ll \left(\frac{I}{h\lambda}\right)^2$. В этом случае на значение средней интенсивности принимаемого поля будет влиять знак и величина μ_0 . Если $\mu_0 > 0$,

то значение средней интенсивности будет больше, чем в случае отсутствия корреляции. При отрицательном значении μ_0 регистрируемая приемником средняя интенсивность, наоборот, уменьшится.

Данные расчеты подтверждаются результатами модельных экспериментов, проведенных ранее на кафедре акустики ННГУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе продемонстрировано влияние группировки дискретных случайных неоднородностей, расположенных на плоской звукопрозрачной поверхности дна, на среднюю интенсивность обратного рассеяния акустических сигналов. Показано, что сильная корреляция между положениями рассеивателей заметно сказывается на величине средней интенсивности принимаемого поля.

Работа выполнена в рамках базовой части госзадания № 3.5672.2017/8.9.

- [1] Бунчук А. В., Ивакин А. Н. Акуст. журн. 1989. **35**, № 1. С. 8.
- [2] Буланов В. А., Стороженко А. В. Техническая акустика. 2011. № 11.
- [3] Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику, часть II. Случайные поля

М.: Наука, 1978.

- [4] Гурбатов С. Н., Грязнова И. Ю., Иващенко Е. Н. Акуст. журн. 2016. **62**, № 2. С. 203.
- [5] Горская Н. В., Грязнова И. Ю., Гурбатов С. Н., Николаев Г. Н. Акуст. журн. 1990. **36**, № 4. С. 637.

About the role of collective effects of scattering in problems of diagnostics of discrete random inhomogeneities

I. Yu. Gryaznova^a, E. N. Ivashchenko^b, R. V. Somov^c

N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: ^a*gryaznova@rf.unn.ru*, ^b*en.ivashchenko@gmail.com*, ^c*somovroman@mail.ru*

It is proposed the description of the possible correlation of the relative position of discrete bottom inhomogeneities. It is shown that the presence of such correlation results in a significant change in the average backscattering intensity. It is investigated under what conditions the effects arising in the presence of scatter of inhomogeneities in terms of size dominate, and under what conditions the collective effects of scattering dominate.

PACS: 43.20.Fn, 43.30.Gv

Keywords: backscattering, discrete inhomogeneities, acoustic fields, correlation, hydroacoustic signals.

Received 26 June 2017.

Сведения об авторах

1. Грязнова Ирина Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры акустики; e-mail: *gryaznova@rf.unn.ru*.
2. Иващенко Елена Николаевна — аспирант кафедры акустики; e-mail: *en.ivashchenko@gmail.com*.
3. Сомов Роман Владимирович — магистрант кафедры акустики; e-mail: *somovroman@mail.ru*.