

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.  
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.87;551.463.2

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ  
В КАНАЛАХ МЕЛКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ  
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ: ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ

© 2022 г. А. И. Малеханов<sup>a, b, \*</sup>, И. П. Смирнов<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Федеральный исследовательский центр “Институт прикладной физики Российской академии наук” (ИПФ РАН),  
ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603155 Россия

<sup>b</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (ННГУ),  
просп. Гагарина 23, Нижний Новгород, 603950 Россия

\*e-mail: [almal@appl.sci-nnov.ru](mailto:almal@appl.sci-nnov.ru)

Поступила в редакцию 02.03.2022 г.

После доработки 28.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Цель работы – сравнительный анализ эффективности методов согласованной и оптимальной пространственной обработки сигналов в звуковом канале мелкого моря в условиях неточного знания его параметров. Предполагается, что сигнал удаленного локализованного источника принимается вертикальной антенной решеткой (АР) на фоне интенсивной помехи, также создаваемой локализованным источником, при этом вертикальный профиль скорости звука и глубина канала, скорость звука в донных породах и их плотность известны с произвольными отклонениями от реальных значений в пределах заданных интервалов. Эффективность обработки характеризуется коэффициентом усиления АР по величине отношения сигнал/(шум + помеха), нормированным на число элементов АР. Методом стохастического моделирования показано, что с ростом априорной неопределенности в оценке указанных параметров потери эффективности для этих двух методов обработки имеют не только существенно различные величины, но могут обнаруживать немонотонный характер соответствующих зависимостей. Определены допустимые уровни ошибок в оценке параметров канала, при которых потери усиления не превышают заданный уровень (3 дБ) для каждого из методов. Результаты представляются важными с точки зрения количественной оценки требований к средствам оперативной океанографии, обеспечивающих функционирование приемных антенных систем в реальных морских условиях.

*Ключевые слова:* звуковой канал мелкого моря, вертикальная антенная решетка, многомодовый сигнал, пространственная обработка сигналов, коэффициент усиления (выигрыш) антенной решетки, рассогласование модели канала

DOI: 10.31857/S0320791922040086

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в последние несколько десятилетий в исследовании и практическом применении различных методов пространственной обработки акустических сигналов в океанических волноводах, в явном виде учитывающих характерные физические особенности формирования сигналов удаленных источников на входе приемной антенной решетки (АР) (например, [1–3]), остаются вопросы, которые все еще требуют своего углубленного рассмотрения. В целом, такие методы обработки часто трактуются как методы, “согласованные со средой”, при этом многими отечественными авторами проводится параллель с теми методами, которые в англоязычной литературе получили на-

звание “согласованной с полем” обработки (matched-field processing) [4, 5].

Отметим в этой связи некоторые принципиальные аспекты, касающиеся, в том числе, терминологии. Сам этот термин – “согласование с полем” – и его трактовка возникли как обобщение хорошо известной в теории обнаружения согласованной (корреляционной) обработки в контексте существенно более сложного формирования сигнального поля удаленного локализованного источника на входе приемной АР при ее размещении в реальном океане. Вместо одной сигнальной волны, принимаемой элементами АР от отдельного удаленного источника в свободном пространстве (в простейшем случае – плоской волны), в океаническом волноводе необходимо учитывать целый набор пространственных гар-

моник (нормальных волн или лучей), т.е. осуществлять согласование с полем сигнала в значительно более сложной постановке. Однако, принципиальный смысл самой операции согласованной обработки как обработки, обращенной (в смысле комплексного сопряжения) по отношению к амплитудно-фазовому распределению (АФР) сигнального поля на входе АР, остается при этом тем же. Условия ее приближения к оптимальной обработке также хорошо известны – детерминированный (полностью когерентный в пределах АР) сигнал и пространственно-белый аддитивный шум. Если же АФР сигнала в результате распространения в случайно-неоднородном канале становится случайным, т.е. частично-когерентным, и (или) прием сигнала осуществляется на фоне сильно анизотропных помех, также содержащих, как и сигнал, некоторый набор пространственных гармоник, то процедура согласования с сигнальным полем заведомо не обеспечивает высокой эффективности в сравнении с оптимальной обработкой. При этом относительные потери ее эффективности ожидаемо оказываются тем сильнее, чем более выражены указанные факторы – чем меньше масштаб когерентности полезного сигнала в сравнении с размером АР и (или) интенсивнее помеховые сигналы, занимающие “свою” область пространственного (модового, углового) спектра.

Что же касается термина “согласование обработки со средой”, то его естественно трактовать как значительно более общий, не ограничиваясь при этом указанным выше контекстом. Основной его смысл тогда заключается, по существу, в необходимости учета корректной информации относительно физических свойств и параметров канала распространения сигналов, которые могут быть не только априори плохо известными, но и нестационарными. Сам же метод пространственной обработки при этом может быть, вообще говоря, любой, и совсем не обязательно согласованный с полем полезного сигнала. В такой трактовке “центр тяжести” вопроса об эффективности обработки переносится на оценку качества тех моделей сигнала и помех, которые используются при ее построении, или, другими словами, на оценку влияния рассогласования этих моделей с принимаемыми (реальными) сигналами в целях поиска оптимальных решений для самой обработки в частично-определенных и нестационарных условиях. В натуральных морских экспериментах обеспечить достаточно точное согласование расчетной модели с волноводом реального океана практически невозможно (или возможно, но только на достаточно коротких временах наблюдения и коротких трассах распространения). Это обстоятельство и привело, по всей видимости, к определенному скепсису относительно практической значимости согласованной обработки, принципиально основанной на использовании некоторой *заданной* многопараметрической мо-

дели океанической среды [3, 6]. Подчеркнем, однако, что сами условия существенной априорной неопределенности среды стимулируют привлечение к пространственной обработке сигналов других подходов, а именно, на основе адаптивных алгоритмов, которые позволяют преодолеть частично эту проблему. За исключением небольшого числа работ (например, [2, 7, 8]), такие алгоритмы еще не нашли широкого применения в области низкочастотной гидроакустики.

Вместе с тем, если учитывать априорную неопределенность модели среды, то отмеченный выше вопрос о соотношении методов согласованной и оптимальной обработки становится не столь очевидным. Интуитивно можно ожидать, что согласованная обработка, в явном виде отличная от оптимальной и проигрывающая ей в условиях полной априорной определенности (точного согласования со средой), окажется при определенных условиях более устойчивой к рассогласованию и, следовательно, более эффективной (фактически, квазиоптимальной). В каких именно условиях, какие уровни рассогласования и по каким именно параметрам модели могут оцениваться как критические с точки зрения ослабления эффективности конкретного метода обработки сигналов? Попытке осветить эти вопросы применительно к работе вертикальной приемной АР в типичном канале мелкого моря посвящена данная работа.

Эффективность обработки сигналов мы определяем величиной коэффициента усиления (выигрыша) АР к отдельному ее элементу по величине отношения сигнал/(шум + помеха) (ОСШП). Эта величина стандартно характеризует эффективность АР как пространственного фильтра полезного сигнала, принимаемого на фоне шумов и помех, и его выигрыш в сравнении с одиночным элементом с точки зрения повышения вероятностных характеристик обнаружения/оценки параметров сигнала в результате повышения величины ОСШП на выходе сумматора АР. Сравнительный анализ методов оптимальной и согласованной обработки (такowymi они являются, строго говоря, только при точном знании параметров канала) проводится нами путем построения зависимостей выигрыша АР от интервала случайных ошибок (уровня неопределенности) в оценке того или иного параметра подводного канала. Такого типа зависимости позволяют дать количественный прогноз потерь эффективности обработки в условиях частичной априорной определенности, т.е. ответить на поставленные выше вопросы. Заранее можно ожидать, что методы обработки обладают существенно различной “чувствительностью” к объему и качеству априорной информации относительно параметров среды, и что результирующая “иерархия” методов обработки в условиях рассогласования есть, физически, отражение различной степени учета этой информации в их реализации. Следо-

вательно, критерии “согласования со средой” и оценки допустимых (критически значимых) уровней рассогласования тоже должны быть существенно различными для разных методов обработки сигналов, что будет показано в работе.

Отметим, что в контексте анализа обсуждаемых эффектов рассогласования ряд авторов разделяют влияние параметров, различных по своей природе: детерминированных (таких, например, как параметры дна) и случайно флуктуирующих (таких, как скорость звука в водной толще или положение АР в случае ее свободного подвеса или буксировки) (см. [3] и цитированную там литературу). Такое разделение имеет определенный смысл с точки зрения классификации возможных эффектов, однако, для оценки конечного результата рассогласования оно представляется не столь важным. Более важно то, что обработка принимаемых сигналов заведомо осуществляется в условиях априорной неопределенности относительно ключевых параметров среды распространения, и допустимый уровень этой неопределенности на практике может быть сильно различным для разных параметров. Поэтому мы не делаем особых различий между параметрами канала по признаку их детерминированности либо случайности и исследуем эффекты рассогласования в рамках единого подхода на основе стохастического моделирования, исходя из того, что априорная неопределенность модели канала есть, по сути, заранее неизвестные и произвольные (в этом смысле – случайные) вариации значений ее параметров.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ

Итак, мы рассматриваем вопрос об эффективности пространственной обработки многомодовых сигналов в канале мелкого моря в предположении, что полезный сигнал и помеха на входе АР создаются удаленными точечными источниками (их координаты задаются в качестве параметров задачи), при этом помеха предполагается значительно более интенсивной. Параметры канала, позволяющие рассчитать реализации полей на входе АР заданной геометрии, предполагаются известными с некоторыми ошибками, величины которых априори неизвестны и могут принимать любые значения в заданных интервалах. Такими “рассогласованными” параметрами являются именно те, значения которых в природных условиях, как правило, являются известными наименее точно: значения скорости звука на отдельных горизонтах водного слоя, скорость звука и плотность пород в подстилающем дне (дно моделируется однородным жидким полупространством), глубина водного слоя.

Модельный расчет звуковых полей выполняется нами в рамках модового формализма, известные условия применимости которого [9, 10]

предполагаются выполненными (задаваемые глубина канала, частотный диапазон и расстояния до источников им не противоречат). Канал предполагается горизонтально-однородным вдоль трасс распространения сигнала и помехи, взаимодействие мод не учитывается. Статистические эффекты распространения звука в данной работе также не учитываются, т.е. мы рассматриваем сценарий приема полностью когерентных (пространственно-коррелированных в пределах АР) сигналов и используем известные для такого сценария выражения для АФР (векторного) АР, соответствующие указанным двум методам обработки. Физически, это означает ограничение сверху на расстояния до соответствующих источников – например, не более нескольких десятков километров для диапазона низких частот (первые сотни Гц), который предполагается рабочим. Именно в таких детерминированных, в смысле условий распространения, постановках проблема рассогласования рассматривалась ранее большинством авторов [3, 5].

Приемная АР предполагается прямолинейной и вертикальной, с точно известными и стационарными координатами элементов. Положение АР, как и другие указанные ниже параметры моделирования – глубина канала, профиль скорости звука, рабочая частота, характерные расстояния до источников – отвечают условиям одного из натуральных экспериментов, ранее выполненного сотрудниками ИПФ РАН в Баренцевом море [11].

Таким образом, при моделировании мы задаем:

1) вертикальный профиль скорости звука в мелководном канале глубиной  $H = 160$  м на основе линейной интерполяции данных измерений скорости в 32 точках, который показан на рис. 1 (типичный профиль для мелкого моря в северных широтах, обладающий выраженным сезонным термоклинном в летний период [10]);

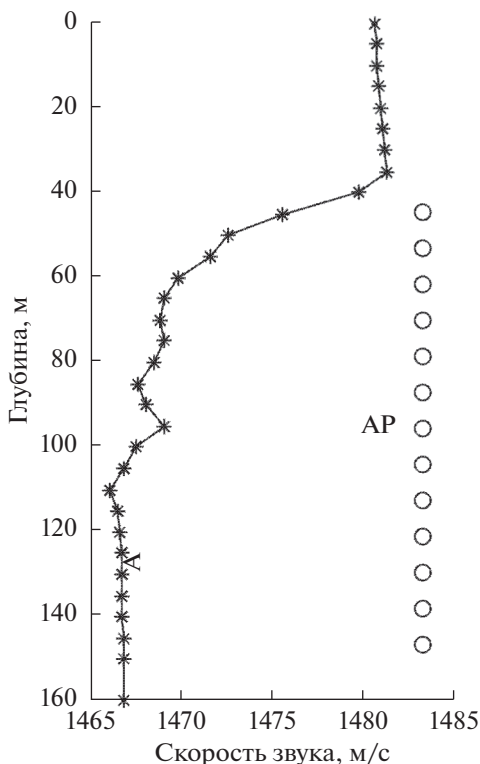
2) параметры подстилающего дна в виде жидкого полупространства: плотность  $\rho_b = 1.8$  г/см<sup>3</sup>, скорость звука  $c_b = 1750$  м/с, декремент затухания звука 0.07 дБ/км Гц;

3) положение АР: число элементов  $N = 13$ , расположены эквидистантно через 8.5 м в интервале глубин от 44.5 до 146.5 м (положение АР показано на рис. 1);

4) рабочую частоту источников полезного сигнала и помехи: 240 Гц; на данной частоте полное число мод дискретного спектра в канале с указанными параметрами равно 28;

5) координаты источников: глубина источника сигнала – 80 м, глубина источника помехи – 10 м, расстояния от АР до источников выборочно меняются в интервале от 10 до 30 км;

6) аддитивный фоновый шум: пространственно-белый, единичной мощности на каждом элементе АР (входные мощности обоих источников нормированы на мощность шума);



**Рис. 1.** Опорный профиль скорости звука (32 точки измерения скорости отмечены звездочками) и положение приемной АР в канале мелкого моря (условия эксперимента [11]).

7) априори неизвестные (случайные) отклонения скорости звука в водном слое от измеренных значений:

$$c_i = (c_0)_i + \text{var}(c)\xi_i, \quad i = 1, \dots, 32,$$

где  $c_i$  – случайные реализации скорости звука на каждом  $i$ -м горизонте измерения,  $(c_0)_i$  – измеренное значение (см. рис. 1),  $\xi_i$  – статистически независимые случайные величины, равномерно распределенные на интервале  $[-1, 1]$  (число их реализаций выбирается достаточно большим для последующего усреднения по ансамблю),  $\text{var}(c)$  – амплитуда отклонений, которая задается в качестве переменной величины в интервале значений от 0 м/с (отсутствие отклонений) до 3 м/с;

8) аналогично, априори неизвестные отклонения от указанных выше значений скорости звука в дне ( $\Delta c_b$ ), плотности дна ( $\Delta \rho_b$ ), глубины канала ( $\Delta H$ ); максимальные интервалы относительных отклонений составляют для них 15, 45 и 3%, соответственно.

Расчетные выражения для интересующих нас характеристик АР имеют вид:

1) входное ОСШП:

$$SNR_{in} = \frac{\sigma_S^2}{N + \sigma_N^2}, \tag{1}$$

где  $\sigma_S^2, \sigma_N^2$  – суммарные по элементам АР интенсивности сигнала и помехи, соответственно, которые также являются параметрами моделирования (фактически, при этом моделируются различные уровни излучения самих источников);

2) выходное ОСШП для АР с некоторым заданным АФР (весовым вектором)  $\mathbf{w}$ :

$$SNR_{out} = \frac{\mathbf{w}^+ R_S \mathbf{w}}{\mathbf{w}^+ (R_N + E) \mathbf{w}}, \tag{2}$$

$$R_S = \sigma_S^2 \mathbf{s}^* \mathbf{s}^T, \quad R_N = \sigma_N^2 \mathbf{n}^* \mathbf{n}^T,$$

где  $\mathbf{s}, \mathbf{n}$  – нормированные векторы–столбцы реплик полезного сигнала и помехи на входе АР, соответственно (используется нормировка вида  $|\mathbf{s}|^2 = 1, |\mathbf{n}|^2 = 1$ );  $R_S, R_N$  – соответствующие матрицы пространственных корреляций (когерентности), имеющие диадную форму в случае предполагаемой нами полной когерентности принимаемых сигналов;  $E$  – единичная матрица когерентности фонового шума; верхние индексы  $*, T, +$  – знаки комплексного сопряжения, транспонирования и эрмитова сопряжения матриц;

3) весовые векторы АР, которые определяются выбором метода обработки сигналов и в нашем случае имеют хорошо известный вид (например, [12]):

$$\mathbf{w} = \mathbf{s}^*, \tag{3}$$

$$\mathbf{w} = (R_N + E)^{-1} \mathbf{s}^* \tag{4}$$

для согласованной обработки (в точном значении этого термина) и для оптимальной обработки, соответственно (имеется в виду оптимизация по критерию максимума выходного ОСШП (2));

4) коэффициент усиления (выигрыш) АР и нормированный на число элементов АР выигрыш:

$$G = \frac{SNR_{out}}{SNR_{in}}, \quad g = \frac{G}{N}. \tag{5}$$

Вторая из этих двух характеристик АР с обработкой сигналов удобна именно тем, что в явном виде показывает отличие эффективности метода обработки в произвольной (по сигналу и помехам) ситуации от точно согласованной обработки в ситуации приема полностью когерентного сигнала на фоне пространственно-белого шума, когда выполняются равенства  $G = N, g = 1$ . Используя такие же характеристики, в ряде работ был проведен сравнительный анализ различных методов пространственной обработки в условиях ослабления когерентности многомодового сигнала при дальнем распространении звука в случайно-неоднородном океаническом волноводе [13–17]. В таком контексте величина  $g$  имеет очевид-

ный смысл потерь усиления АР, обусловленных частичной когерентностью полезного сигнала на входе АР (при этом  $g < 1$ ). Однако, при приеме сигнала (даже частично-когерентного) на фоне интенсивных анизотропных помех величина нормированного выигрыша может быть значительной ( $g \gg 1$ ) для тех методов обработки, которые обеспечивают их подавление, хотя бы частичное [13, 15]. Отметим в этой связи, что в многомодовом канале распространения возможность достижения такого “усиленного” выигрыша зависит одновременно от двух независимых условий: от того, насколько сильно модовый состав сигнала отличен от модового состава помехи, и есть ли у АР достаточный “ресурс” разрешающей способности для селекции сигнальных и помеховых мод. Последний фактор, в свою очередь, полностью определяется степенью ортогональности этих двух групп мод волновода на входе АР, что критически зависит как от числа ее элементов, так и положения их по глубине [18].

Таким образом, интересующие нас эффекты априорной неопределенности модели океанической среды моделируются следующим образом. На основе условий 7) и 8) формируется статистический ансамбль реализаций модели канала в заданных интервалах отклонений ее параметров от точных (опорных) значений. Определение “точные” в данной постановке означает, что именно эти значения параметров используются для расчета весовых векторов (3)–(4), т.е. для “настройки” методов обработки на основе опорной модели канала. Ансамбль реализаций сигнального и помехового полей на входе АР, отвечающий ансамблю реализаций “рассогласованной” (по тому или иному параметру) модели канала при заданных положениях обоих источников, формирует ансамбли величин (1), (2), (5). Последующее их усреднение дает те величины, которые естественно назвать “реальными” значениями ОСШП и коэффициента усиления АР для конкретного метода обработки. Такой расчет выполняется последовательно для каждого значения интервала отклонений и в итоге строятся зависимости нормированного выигрыша АР от этой величины, что дает возможность количественно оценить влияние рассогласования модели на эффективность рассматриваемых методов обработки сигналов.

Прежде чем переходить к результатам такого моделирования, отметим дополнительно ряд важных аспектов постановки задачи.

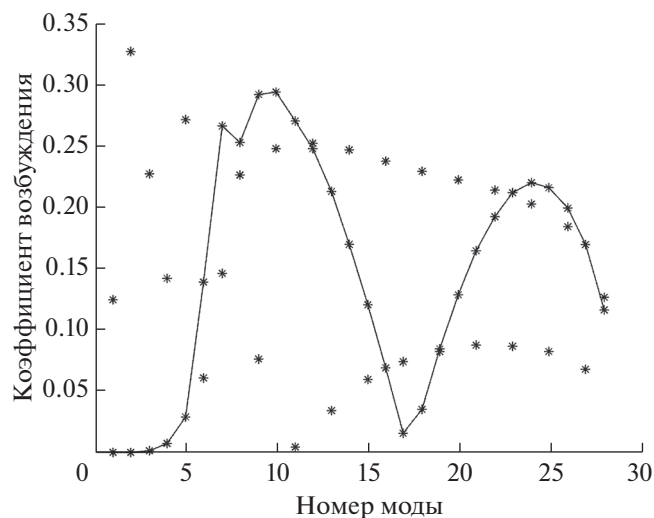
В данной работе мы ограничиваемся рассмотрением методов пространственной обработки принимаемых акустических сигналов, относящихся к некоторой заданной их частоте. Временные параметры сигналов и, соответственно, дополнительные возможности пространственно-временной обработки здесь не учитываются, поскольку наш интерес связан с анализом эф-

фективности приемной АР именно как пространственного фильтра многомодовых сигналов в условиях априорной неопределенности модели среды распространения. Важно, что схема обработки сигналов в каналах АР для обоих рассматриваемых методов является единой – это стандартная схема линейной пространственной обработки, когда сигнал на выходе сумматора АР (выходной сигнал) есть результат линейного преобразования реплик входных сигналов путем их скалярного умножения на весовой вектор  $\mathbf{w}$ . Известно [1–3, 12], что в случае приема когерентного полезного сигнала (вне зависимости от когерентных свойств внешних шумов и помех) такая схема обеспечивает оптимизацию пространственной обработки по критерию максимума выходного ОСШП при соответствующем выборе весового вектора. Сценарий приема слабого сигнала (интенсивной помехи) интересен нам не только в силу своей практической значимости, но и потому, что он в наибольшей степени подчеркивает отличия методов оптимальной и согласованной обработки, что и будет показано ниже.

Несмотря на то, что динамические шумы моря в диапазоне низких частот обладают, как правило, характерной анизотропией в вертикальной плоскости канала (например, [19, 20]), мы ограничиваемся здесь случаем пространственно-белого шума, на фоне которого предполагается прием сигналов удаленных источников полезного сигнала и помехи. Фактически, это означает, что в качестве шума рассматриваются только собственные (взаимно-некоррелированные и равномерные по интенсивности) шумы в каналах АР. Такое весьма сильное упрощение постановки влияет, конечно, на количественные результаты моделирования, однако, не ограничивает возможности их корректных обобщений для более реалистичных ситуаций, в которых необходимо учитывать модовый состав анизотропных морских шумов (вернемся к этому вопросу ниже).

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Здесь мы ограничимся несколькими характерными иллюстрациями, наглядно демонстрирующими интересующие нас эффекты в отношении влияния априори неизвестных отклонений скорости звука в водной толще, скорости звука в дне и плотности дна от их точных значений. Усреднения расчетных величин  $SNR_{out}$  (2),  $G$  и  $g$  (5) выполнены по ансамблю 300 (для рис. 6 – 200) случайных реализаций соответствующих параметров для каждого значения интервала отклонений в указанных выше пределах. Особое внимание мы уделяем моделированию практически интересной ситуации, когда относительно мощный подповерхностный источник (например, движущееся судно) “маскирует” своим излучением слабый сигнал подводного объекта. Расстояния до источников выбраны либо равными друг другу (15 км),



**Рис. 2.** Нормированные коэффициенты возбуждения мод в поле полезного сигнала (отдельные звездочки) и помехи (сплошная кривая) на входе АР при равном удалении обоих источников на 15 км.

либо существенно различными (10 и 30 км). Угловые координаты источников в горизонтальной плоскости канала не играют роли в случае линейной вертикальной АР и могут быть произвольными (возможно, одинаковыми).

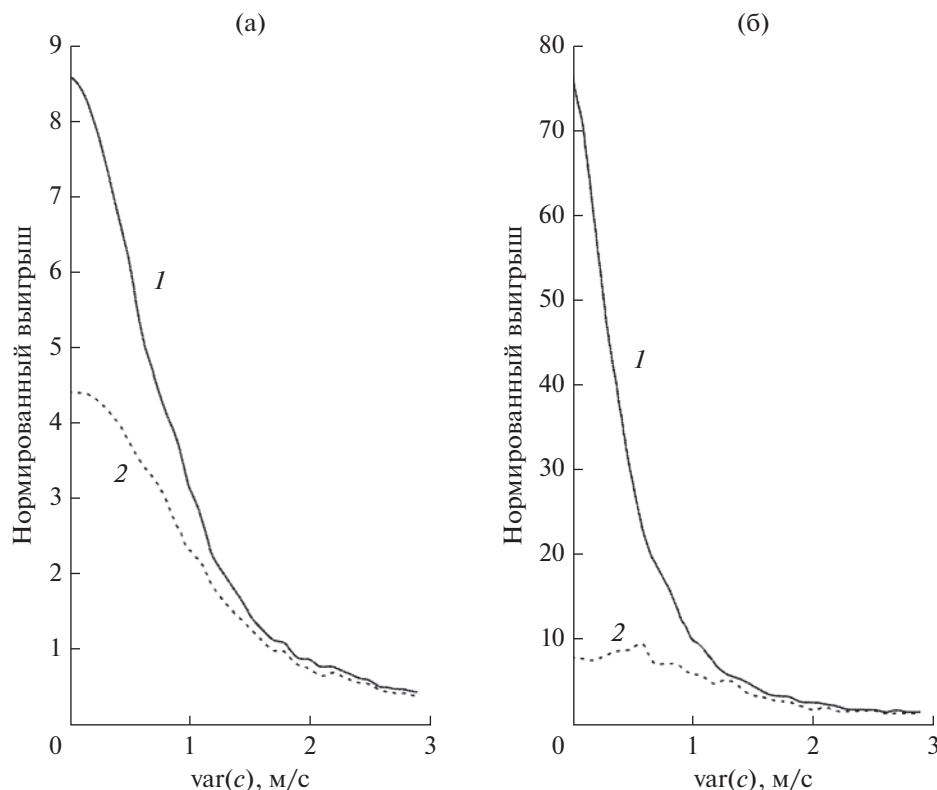
Для физической интерпретации последующих результатов необходимо иметь, прежде всего, представления относительно модового состава принимаемых реплик сигнального и помехового полей. Модовый состав сигнала на входе АР, возбуждаемого произвольным удаленным источником, определяется в рамках нашей модели горизонтально-однородного канала двумя основными факторами — начальными коэффициентами возбуждения мод (они зависят только от глубины источника, если он точечный) и неравномерным затуханием мод по трассе распространения (зависит от дистанции). На рис. 2 показаны результирующие коэффициенты возбуждения мод на входе АР для случая равноудаленных источников. Для удобства сравнения коэффициенты нормированы одинаковым образом по сумме квадратов их значений, но в действительности входное отношение сигнал/помеха (ОСП) выбирается малым ( $-10$  или  $-20$  дБ) с учетом нашего интереса к такой постановке. Хорошо видно, что модовый состав (амплитудный модовый спектр) полезного сигнала сильно “изрезан”, что характерно для положения источника в средней части канала, в то время как спектр помехи является более плавным, но тоже существенно неравномерным, имеет при этом два выраженных максимума в области средних (номер мод  $m \approx 10$ ) и высоких ( $m \approx 25$ ) мод. В результате только несколько мод сигнального поля имеют относительно высокие значения модовых (ОСП) $_m$  и оказываются практически

“свободными” от помехи: это низкие моды с номерами 1–5 и две средние моды с номерами 16, 18, т.е. не более четверти от полного количества мод. Фильтрация именно этих мод обеспечивает оптимизацию обработки, в то время как согласованной обработке отвечает фильтрация заметно большего (примерно в два раза) количества мод сигнального поля, что приводит к пропуску на выход АР некоторой части интенсивных помеховых мод с низкими значениями (ОСП) $_m$ . Ожидаемым следствием этого является заметный проигрыш в эффективности, что будет показано на следующих рисунках.

На рис. 3 иллюстрируется влияние априорной неопределенности модели канала по профилю скорости звука в водном слое. Видно, что согласованная обработка в случае более мощной помехи (правый график) намного менее эффективна, чем оптимальная обработка, что объясняется не только низким значением входного ОСП (в данном примере,  $-20$  дБ), но и отмеченным выше заметным “перекрыванием” модовых спектров сигнала и помехи на входе АР (рис. 2). В случае большего их разделения, дополнительный выигрыш оптимальной обработки над согласованной становится менее значительным (согласованная обработка — более эффективной), хотя часть помеховых мод может “проникать” на выход АР в результате слабой ортогональности части сигнальных и помеховых мод, если такое условие отвечает положению АР в канале [18]. Отметим, что потенциально наиболее “выигрышный” сценарий приема отвечает здесь случаю, когда сигнал и интенсивная помеха сосредоточены в разных группах мод, и эти две группы мод достаточно хорошо ортогональны. Наглядной аналогией такого сценария при работе АР в свободном пространстве является прием сигнала и помехи по существенно разным направлениям прихода, угловое расстояние между которыми много больше ширины главного лепестка диаграммы направленности. При точном фазировании АР в направлении на источник сигнала, что отвечает согласованной его обработке вида (3), помеха оказывается в области слабых боковых лепестков диаграммы (т.е. почти ортогональна весовому вектору АР), что уже обеспечивает высокие значения антенного выигрыша. Дополнительное формирование нуля диаграммы в направлении на источник помехи, что отвечает оптимизации обработки вида (4), приводит к полной ортогонализации весового вектора волновому фронту помехи и повышению выигрыша до максимального значения.

Видно, вместе с тем, что согласованная обработка является заметно более устойчивой к рассогласованию и, более того, может демонстрировать немонотонную зависимость от интервала “расстройки” профиля скорости звука. Такая особенность также объясняется присутствием мощной помехи — “разумное” рассогласование





**Рис. 3.** Нормированный выигрыш  $g(3)$  AP для оптимальной обработки (сплошные кривые 1) и согласованной обработки (точечные кривые 2) в зависимости от интервала вариаций профиля скорости звука в водном слое. Расстояния до источников: 15 км (как на рис. 2), входные интенсивности сигналов относительно белого шума: (а) —  $\sigma_S^2 : \sigma_N^2 = 10 : 100$  и (б) —  $10 : 1000$ .

вектора AP с репликами полезного сигнала, отвечающими изменчивости гидрологии, действительно может приводить к некоторому повышению помехоустойчивости, но только в том случае, если при этом достигается более эффективное подавление помехи. Видно, что при отклонениях скорости звука на величину  $\sim 1$  м/с оба метода показывают уже практически одинаковую эффективность, при этом потери усиления оптимальной обработки составляют значительную величину (до  $\sim 10$  дБ), в то время как для согласованной обработки — не более 1–2 дБ. Фактически, оптимальная обработка быстро деградирует до уровня согласованной обработки и при таком уровне рассогласования по данному параметру уже не имеет какого-либо преимущества. Соответственно, уровни допустимых отклонений реального профиля скорости от точного (для определенности, по уменьшению выигрыша AP в два раза) так же различны и зависят при этом от величины входного ОСП. Например, для правого графика (ОСП =  $-20$  дБ) мы можем оценить эти уровни величинами 0.3 и 1.5 м/с для методов оптимальной и согласованной обработки, соответственно. При менее интенсивной помехе (ОСП =  $-10$  дБ, левый график) отличия в эффективно-

сти двух методов ожидаемо становятся менее существенными: согласованная обработка не имеет здесь отмеченного смещения максимума достигаемого выигрыша, допустимые уровни отклонений примерно равны и составляют величину  $\sim 1$  м/с.

Характеризуя влияние рассогласования модели канала по профилю скорости звука, подчеркнем, что предполагаемый нами разброс его случайных отклонений от опорного профиля (не более 3 м/с на каждом горизонте) составляет реально малую величину в сравнении с той вертикальной изменчивостью профиля, которая приводит к формированию канала придонного типа (до 20 м/с, см. рис. 1). Следовательно, речь в данном случае не идет о какой-либо существенной трансформации канала, характерной для сезонной изменчивости гидрологии в мелком море [10], но об относительно малых вариациях, оценка которых отвечает назначению оперативной океанографии.

Возвращаясь к используемой нами простейшей модели фоновых шумов отметим, что учет анизотропного модового шума приведет, очевидно, к соответствующим поправкам в распределении по модам величин (ОСП) $_m$  — оно будет определяться модовым составом всей совокупности

источников шума и помех. В этом случае для оценки группы мод, наиболее “полезных” для оптимизации обработки, необходимо построить зависимость того же вида, что и на рис. 2, но с учетом модового шума и его входной интенсивности относительно внешнего источника помехи. Например, с учетом характерных для природных условий шумов моря, возбуждаемых в приповерхностной области канала и имеющих при этом максимум интенсивности в области высоких номеров мод, такие поправки приведут к дополнительному “зашумлению” именно высоких мод полезного сигнала. Эту ситуацию мы можем качественно проиллюстрировать в рамках нашей модели, варьируя расстояния до источников.

На рис. 4 демонстрируется существенное различие модовых спектров полезного сигнала и помехи в области высоких мод и, следовательно, величин  $(ОСП)_m$  в двух противоположных ситуациях: слева – относительно близкий источник сигнала (10 км) и далекий источник помехи (30 км), справа – обратное соотношение дистанций. Вертикальным пунктиром отмечена та группа высоких мод ( $m \geq 20$ ), для которых величины  $(ОСП)_m$  изменились при такой перестановке источников наиболее заметно. Ожидаемо сильно меняется выигрыш согласованной обработки, что иллюстрируется на рис. 5 – в первом случае он заметно выше, поскольку высокие моды в составе помехи значительно подавлены затуханием по дистанции, и поэтому согласованная фильтрация сигнала в этой области спектра в меньшей степени подвержена воздействию помехи. Напротив, с приближением источника помехи (удалением источника сигнала) часть интенсивных сигнальных мод “накрывается” помехой, что приводит к увеличению мощности помехи на выходе согласованного фильтра, уменьшению величин выходного  $ОСП$  и выигрыша АР. Например, значения  $(ОСП)_m$  для моды с номером 24, которой отвечает второй максимум модового спектра помехи, меняются фактически на порядок:  $(ОСП)_{24} \approx 0.2$ ,  $(ОСП)_{24} \approx 0.1$ ,  $(ОСП)_{24} \approx 0.04$  для расстояний 10 и 30 км, 15 и 15 км, 30 и 10 км, соответственно (при оценке  $(ОСП)_m$  на основе рис. 4 необходимо учитывать уровень входного  $ОСП$ , который составляет здесь –10 дБ).

Из рис. 5 видно также, что оптимальная обработка, напротив, показывает слабую чувствительность к изменению интенсивностей сигнала и помехи в области высоких номеров мод. Это объясняется тем, что оптимальный модовый фильтр является пространственным фильтром небольшой группы мод указанных выше номеров, но высокие моды в эту группу не входят в силу присутствия в них второго максимума спектра помехи (несмотря на то, что он меняется по величине).

Таким образом, соотношения расстояний до источников полезного сигнала и помех оказывают весьма сильное влияние на “иерархию” мето-

дов пространственной обработки. Физической причиной этого является характерный для мелкого моря эффект неравномерного модового затухания, и если источники расположены на существенно разных расстояниях, то эффект “обеднения” модового состава звукового поля с дистанцией в области высоких номеров мод заметно влияет на результат обработки.

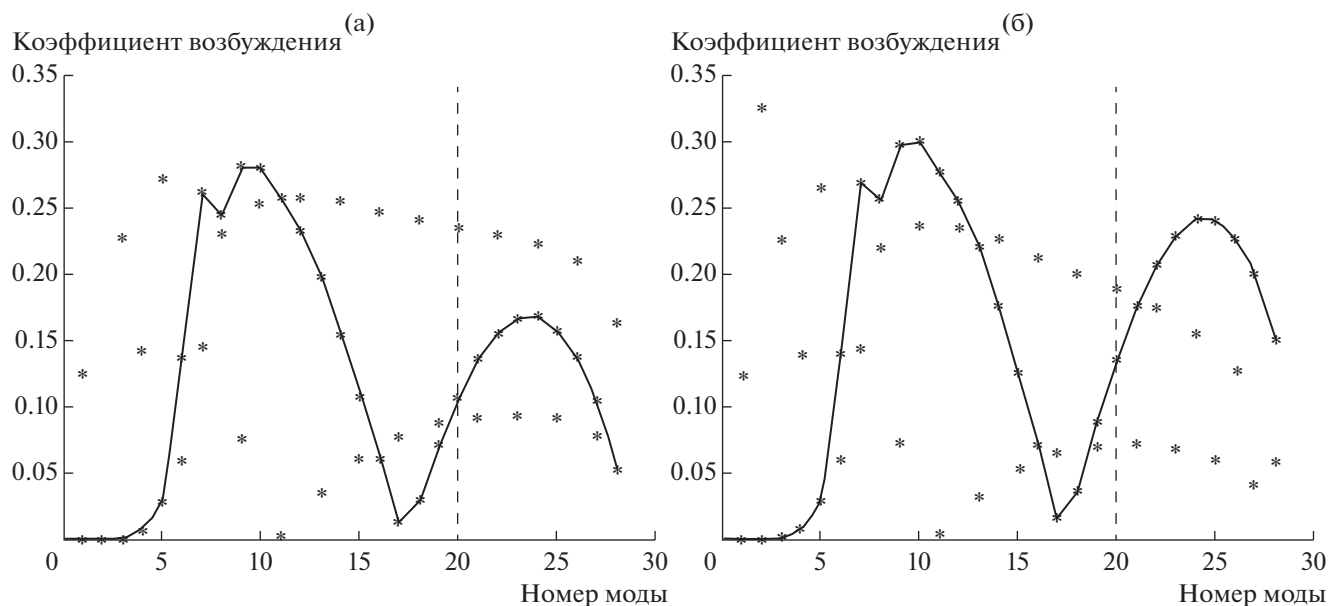
На рис. 6 показан другой сценарий априорной неопределенности модели – по параметру скорости звука в жидком полупространстве, моделирующем подстилающее дно. Вид зависимостей здесь заметно другой, но максимум выигрыша согласованной обработки также имеет некоторое смещение по величине интервала вариаций этого параметра. В этом случае появляются характерные “боковые лепестки” зависимости для обоих методов, хотя для оптимальной обработки они практически не существенны. Допустимые (в том же смысле) уровни отклонений по данному параметру модели оцениваются величиной на уровне ~1% для оптимальной обработки и ~5% для согласованной обработки, т.е. они оказываются существенно различными и в этом сценарии рассогласования.

На рис. 7 показано влияние рассогласования модели по параметру плотности донных пород. Эффект смещения максимума выигрыша согласованной обработки здесь оказывается еще более выраженным, и он достигается, как видно, при весьма значительной ошибке в оценке плотности: на ~10% в сторону увеличения (рис. 7а) и на ~30% в сторону уменьшения (рис. 7б). Видно также, что допустимая ошибка в оценке плотности для оптимальной обработки составляет, соответственно, ~20 и ~10%, т.е. по этому параметру она оказывается заметно более устойчивой. Поскольку плотность донных пород является, как правило, весьма “ненадежным” параметром модели в смысле своей неопределенности и возможной пространственной изменчивости по дистанции, подобный вывод и тот факт, что максимумы показанных зависимостей являются достаточно плавными, можно оценивать как позитивные.

Опуская графики для зависимостей выигрыша АР от интервала рассогласования модели по параметру глубины канала, отметим только, что эти зависимости ожидаемо оказались наиболее слабыми в сравнении с предыдущими. Весьма значительные ошибки в оценке глубины водного слоя (до 5 м) не оказывают существенного влияния на выигрыш АР даже для более “чувствительной” оптимальной обработки – относительно уменьшение нормированного выигрыша не превосходит ~30% для тех же вариантов по расстояниям до источников и уровням их интенсивностей.

Наконец, приведем пример расчета совместного влияния рассогласования по нескольким параметрам. Интуитивно ясно, что такое влияние будет значительно более сильным, чем в показан-





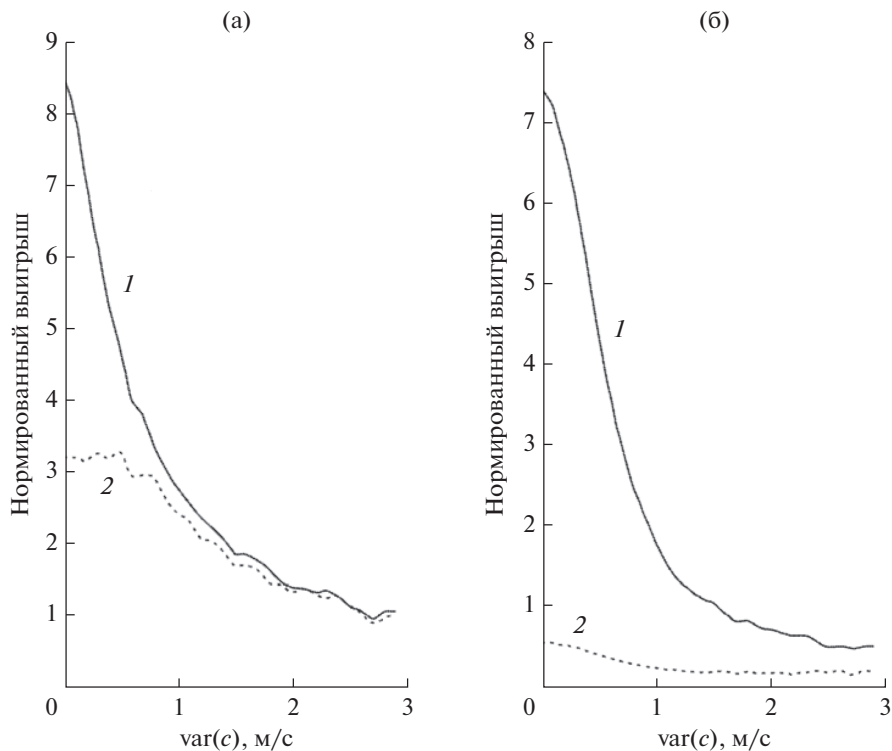
**Рис. 4.** Нормированные коэффициенты возбуждения мод в поле полезного сигнала (отдельные звездочки) и помехи (сплошная кривая) на входе АР при расстояниях до источников сигнала и помехи, соответственно: (а) – 10 и 30 км, (б) – 30 и 10 км.

ных выше случаях. На рис. 8 показаны зависимости нормированного выигрыша АР от интервала вариаций профиля скорости звука в тех же пределах, что и на рис. 3 и 5, но при существенном дополнительном условии, что другие два параметра – скорость звука и плотность в донных породах – также имеют некоторый заданный интервал отклонений (1 и 5%). Видно, что рассогласование модели сразу по нескольким параметрам приводит к тому, что достижение потенциально высоких величин выигрыша,кратно превосходящих число элементов АР, становится практически невозможным. В наибольшей степени, как и следовало ожидать, этот вывод относится к оптимальной обработке: на рис. 8б видно, что она не обеспечивает какого-либо выигрыша в сравнении с согласованной обработкой, потери ее эффективности теперь превышают ~13 дБ в сравнении с теми значениями, которые показаны на рис. 3а в области малых вариаций профиля скорости, но и уменьшение выигрыша с ростом аргумента уже не такое резкое.

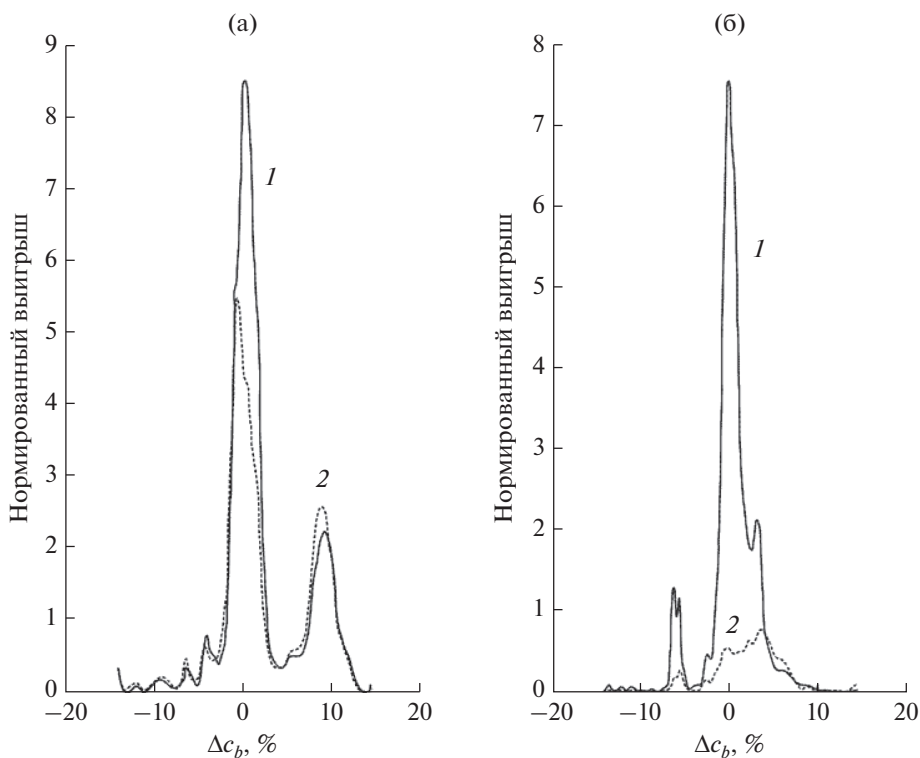
Завершая представление результатов моделирования, подчеркнем, что приведенные зависимости относятся именно к нормированному коэффициенту усиления АР согласно определениям (5). Несмотря на показанное значительное уменьшение его величины с ростом априорной неопределенности модели, сам коэффициент усиления может сохранять достаточно большие значения,  $G \sim N$ , в условиях рассогласования. Например, на рис. 3 и 5 видно, что при отклонениях профиля скорости звука в интервале до ~2 м/с, антенный выигрыш все еще достаточно ве-

лик, хотя и ослабление его величины от начального уровня также значительно. Отсюда можно сделать общий и вполне очевидный вывод, что сложный многопараметрический канал распространения сигналов лучше знать не точно и даже плохо, чем никак, и хотя бы приблизительные (достаточно грубые) оценки его параметров являются необходимыми для реалистичных оценок эффективности методов пространственной обработки сигналов.

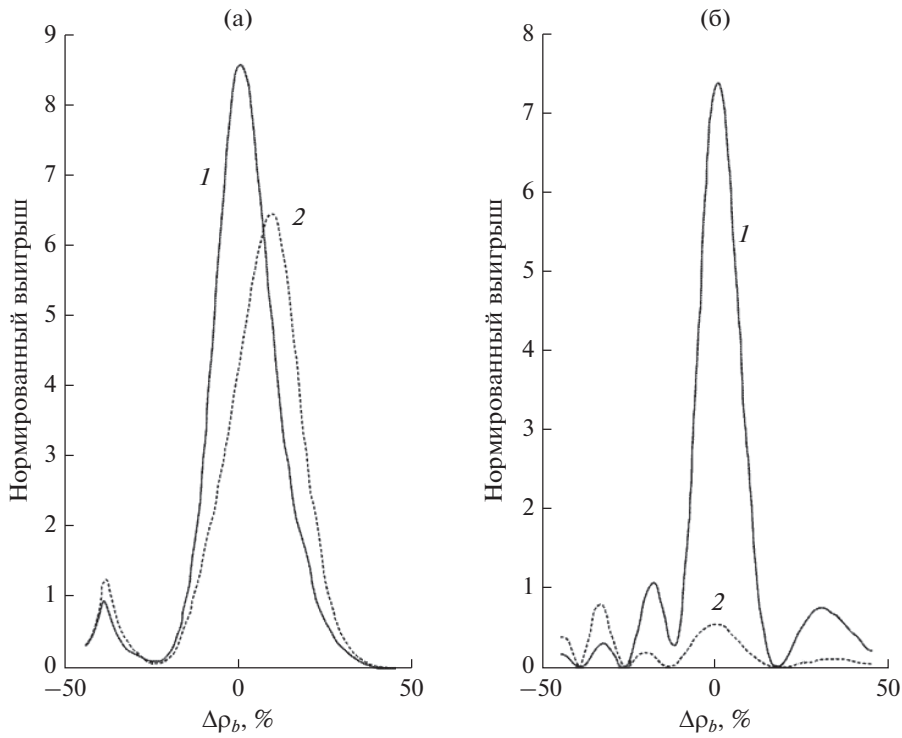
Представленные результаты моделирования получены, согласно постановке задачи, для заданной частоты звуковых сигналов. Естественно ожидать, что в реальных ситуациях приема широкополосных сигналов частотная зависимость показанных эффектов рассогласования будет играть существенную роль. Качественно, однако, эту роль можно оценить уже на основе выполненных расчетов, исходя из того соображения, что если ширина диапазона достаточно велика, то на разных частотах модовый состав принимаемых сигналов, как и общее число мод дискретного спектра, будет различным (по сути, это и есть физический критерий широкой полосы в данной постановке). Поскольку оценки модовых спектров принимаемых сигналов (аналогично рис. 2 и 4) лежат в основе априорной оценки потенциальных возможностей пространственной обработки, то в случае широкополосных сигналов необходимо, прежде всего, учитывать частотную зависимость модовых коэффициентов возбуждения при размещении источников в выбранном интервале глубин и частотно-зависимые эффекты модового затухания по трассам распространения.



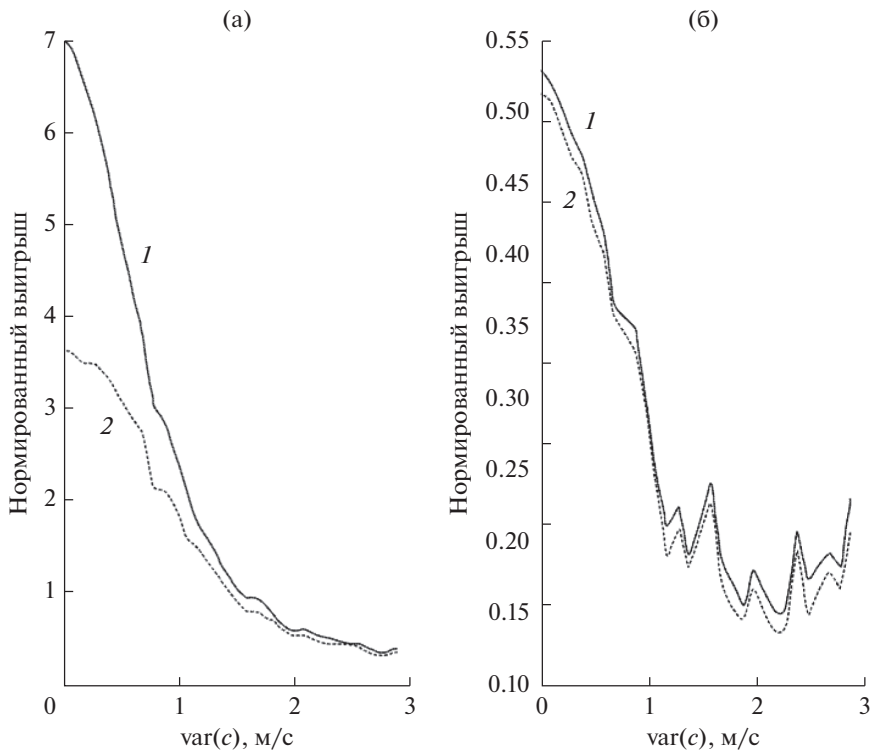
**Рис. 5.** Аналогичные рис. 3 зависимости нормированного выигрыша АР для расстояний до источников, отвечающих рис. 4, при  $\sigma_S^2 : \sigma_N^2 = 10 : 100$  в обоих случаях.



**Рис. 6.** Зависимости нормированного выигрыша АР от интервала вариаций скорости звука в дне. Расстояния до источников сигнала и помехи, соответственно: (а) – 15 км; (б) – 30 и 10 км;  $\sigma_S^2 : \sigma_N^2 = 10 : 100$  в обоих случаях.



**Рис. 7.** Зависимости нормированного выигрыша АР от интервала вариаций плотности дна при тех же параметрах источников, как на рис. 6.



**Рис. 8.** Зависимости нормированного выигрыша АР от интервала вариаций профиля скорости звука в водном слое при условии, что скорость звука в дне и его плотность варьируют в пределах (а) – 1 и (б) – 5% относительно своих точных значений. Расстояния до источников 15 км, отношение интенсивностей  $\sigma_S^2 : \sigma_N^2 = 10 : 100$  в обоих случаях (аналогично рис. 3а).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итог выполненному моделированию поставленной задачи, отметив наиболее важные качественные выводы.

1. Потери усиления АР как пространственного фильтра многомодовых сигналов в условиях априорной неопределенности относительно параметров канала сильно зависят не только от уровня этой неопределенности, но и от того, оценка какого именно параметра имеет отклонения от истинного значения. Такое “селективное” влияние параметров модели обусловлено тем, что они оказывают существенно различное влияние на формирование многомодового поля принимаемых сигналов, включая влияние на продольные волновые числа мод. Последние определяют фазовые соотношения мод на входе АР при заданном расстоянии до источника, а рассогласование по фазам сигналов, как правило, приводит к наиболее сильному эффекту потерь по величинам выходного ОСШП и коэффициента усиления АР (как и любого другого приемника, работающего с когерентными сигналами). Исходя из этого общего соображения, отмеченная выше относительно низкая чувствительность выигрыша АР к рассогласованию модели по плотности донных пород и глубине канала представляется ясной, поскольку эти параметры являются относительно “грубыми” в смысле влияния на формирование звукового поля в подводном канале. Напротив, рассогласование по скорости звука в водном слое и в донных породах оказывается фактором, наиболее сильно влияющим на результирующую эффективность выбранного метода пространственной обработки через влияние на волновые числа распространяющихся мод.

2. Значительный выигрыш оптимальной обработки над согласованной обработкой в случае достаточно хорошего (практически точного) знания параметров канала распространения обусловлен подавлением помехи и прямо пропорционален ее интенсивности. Следовательно, в условиях мощных помех (судоходство, динамический модовый шум океана, любые другие возможные источники) проблема “согласованной со средой обработки” значительно шире, чем согласование с полем полезного сигнала сложного пространственного (модового) спектра, и с необходимостью должна учитывать фактор помех, если они имеют, как и сигнал, некоторый характерный модовый состав на входе приемной АР.

3. Оптимальная обработка является значительно более чувствительной к рассогласованию (наименее робастной), поскольку потери усиления для нее определяются суммарным негативным эффектом — потерями в накоплении по элементам АР полезного выходного сигнала и потерями в подавлении интенсивной помехи. Менее очевидно, но характерно, что согласованная обработка может демонстрировать заметное смеще-

ние максимума своей эффективности — немонотонную и даже осциллирующую зависимость потерь усиления от величины рассогласования по отдельным параметрам. Более того, в отдельных случаях (как на рис. 6, 7, к примеру) “рассогласованная” согласованная обработка может оказаться даже более эффективной, чем “рассогласованная” оптимальная обработка, т.е. термин “оптимальная обработка” теряет свой первоначальный смысл в таких условиях. Такой неоднозначный эффект рассогласования обусловлен в первую очередь присутствием интенсивной помехи, модовый состав которой частично “закрывает” моды сигнального поля. В подобных ситуациях некоторый проигрыш эффективности в накоплении сигнала (уменьшение числителя в выходном ОСШП) при согласованной обработке может быть компенсирован и даже превзойден более значительным выигрышем в подавлении помехи (более резким уменьшением знаменателя).

4. Сильное влияние точности оценки параметров дна, прежде всего, скорости звука, на величину достигаемого выигрыша АР указывает на то, что учет “донного фактора” критически важен для реализации высокой эффективности приемных антенных систем в условиях мелкого моря. С ростом рабочих дистанций обнаружения важность этого фактора и требования к качеству оценки донных параметров только растут, поскольку обсуждаемые эффекты рассогласования “накапливаются” с расстоянием. Последнее замечание справедливо, однако, до тех пор, пока в спектре принимаемых сигналов остается достаточно большое число мод, и сама постановка задачи обработки многомодовых сигналов сохраняет свой физический смысл. На больших дистанциях, когда модовый состав сигналов сильно сокращается и группируется в области низких мод, можно ожидать существенно более высокой устойчивости методов обработки к обсуждаемым эффектам. Соответствующие оценки интервала дистанций определяются типом подводного канала и заданным частотным диапазоном работы АР.

5. Моделирование в подобных постановках расчетной задачи позволяет:

- дать реалистичный прогноз эффективности вертикальной АР как пространственного фильтра многомодовых сигналов в условиях априорной неопределенности в оценке основных физических параметров звукового канала мелкого моря;

- количественно оценить уровень априорной неопределенности этих параметров, при котором потери усиления для конкретных методов обработки сигналов (не только рассмотренных, но и возможных других) в сравнении с потенциально достижимой величиной выигрыша АР не превышают заданной величины;

- на этой основе, обосновать количественные требования к средствам оперативной океанографии в заданной акватории в части контро-

ля временной изменчивости гидрологии канала (погодной, суточной, сезонной) и точности оценки геоакустических параметров дна с учетом возможной их пространственной изменчивости вдоль трасс распространения сигналов.

Сделанные выводы представляются достаточными общими, поскольку они не связаны с выбором конкретных значений параметров расчетной модели. Очевидно, в других гидрологических условиях или при других положениях АР и самих источников по глубине аналогичные зависимости и количественные оценки допустимых отклонений параметров будут отличными от тех, которые приведены выше. Полученные численные результаты рассматриваются нами скорее как наглядная демонстрация обсуждаемых эффектов и самого подхода к их исследованию применительно к выбранному варианту постановки задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-19-00383).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильичев В.И., Калужный А.Я., Красный Л.Г., Лаптий В.Ю. Статистическая теория обнаружения гидроакустических сигналов. М.: Наука, 1992. 415 с.
2. Малышкин Г.С., Сидельников Г.Б. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов (обзор) // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 5. С. 526–545.
3. Сазонтов А.Г., Малеханов А.И. Согласованная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (обзор) // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 2. С. 233–253.
4. Bucker H.P. Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sound sources in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1976. V. 59. № 2. P. 368–373.
5. Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Mikhalevsky P.N. An overview of matched field methods in ocean acoustics // IEEE J. Oceanic Eng. 1993. V. 18. № 4. P. 401–423.
6. Baggeroer A.B. Why did applications of MFP fail, or did we not understand how to apply MFP? // Proc. 1st Int. Conf. and Exhib. on Underwater Acoustics / Eds. by Papadakis J.S. & Bjørnø L. Corfu Island, Greece. 2013. P. 41–49.
7. Сазонтов А.Г., Смирнов И.П. Локализация источника в акустическом волноводе с неточно известными параметрами с использованием согласованной обработки в модовом пространстве // Акуст. журн. 2019. Т. 65. С. 540–550.
8. Сазонтов А.Г., Смирнов И.П. Локализация источника в случайно-неоднородном канале с использованием многогранного алгоритма Кейпона // Акуст. журн. 2021. Т. 67. С. 659–667.
9. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 370 с.
10. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 189 с.
11. Вдовичева Н.К., Матвеев А.Л., Сазонтов А.Г. Экспериментальное и теоретическое исследование вертикальной когерентности звукового поля в мелком море // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 3. С. 309–313.
12. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
13. Малеханов А.И. Некогерентная пространственная фильтрация мод в случайно-неоднородном океане // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 5. С. 898–904.
14. Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Сазонтов А.Г., Фарфель В.А. Влияние эффектов дальнего распространения звука в случайно-неоднородном океане на потери усиления горизонтальной антенной решетки // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 5. С. 615–621.
15. Вдовичева Н.К., Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Сазонтов А.Г. Коэффициент усиления вертикальной антенны в случайно-неоднородном океаническом волноводе // Акуст. журн. 1997. V. 43. № 6. С. 769–776.
16. Завольский Н.А., Малеханов А.И., Раевский М.А. Сравнительный анализ методов пространственной обработки сигналов, принимаемых горизонтальной антенной решеткой в канале мелкого моря со взволнованной поверхностью // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 5. С. 608–618.
17. Бурдуковская В.Г., Малеханов А.И., Раевский М.А. Влияние анизотропного ветрового волнения на эффективность пространственной обработки акустических сигналов в мелком море // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 6. С. 617–625.
18. Smirnov A.V., Malekhanov A.I., Labutina M.S. Vertical array gain in a randomly inhomogeneous underwater sound channel: Effect of the array arrangement // Proc. Mtgs. Acoust. (POMA). 2021. V. 44. № 055005. P. 1–12.
19. Kuperman W.A., Ingenito F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean // J. Acoust. Soc. Am. 1980. V. 67. № 6. P. 1988–1996.
20. Ардов А.А., Охрименко Н.Н., Фурдуев А.В. Анизотропия шумового поля в океане (эксперимент и расчет) // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 2. С. 215–221.