
АКУСТИКА ОКЕАНА.
ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.87:551.463.2

ВЛИЯНИЕ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МОДЕЛИ ЗВУКОВОГО КАНАЛА МЕЛКОГО МОРЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

© 2023 г. А. И. Малеханов^{a, b, *}, А. В. Смирнов^a

^aФедеральный исследовательский центр “Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук” (ИПФ РАН), ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

^bНациональный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (ННГУ), ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: almal@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 09.06.2023 г.

Принята к публикации 22.06.2023 г.

Цель данной работы — численная демонстрация и сравнительный анализ критически сильного и неоднозначного влияния априорной неопределенности модели волновода мелкого моря по ее основным физическим параметрам на эффективность основанных на модели методов пространственной обработки многомодовых сигналов, принимаемых вертикальной антенной решеткой. Рассматривается сценарий приема относительно слабого сигнала удаленного подводного источника на фоне интенсивной помехи, создаваемой подповерхностным источником (имитирующим надводное судно) и динамического шума морской среды, возбуждаемого ветровым волнением. Методы обработки включают согласованную обработку полезного сигнала, оптимальную обработку сигнала на фоне помехи и шума, квазиоптимальную обработку на основе согласованной фильтрации одной из мод сигнального поля с адаптивным выбором ее номера. Получены количественные оценки сверху для величин погрешности данных относительно скорости звука в водной толще и геоакустических параметров подстилающего дна, при которых потери усиления антенны не превышают заданного уровня. Показано, что подобные оценки сильно различны как для разных параметров среды, так и для методов обработки, при этом определяющую роль играют условия приема полезного сигнала — модовый состав и уровни интенсивности помехи и шума среды на входе антенны. Постановка задачи и результаты представляются полезными для формулировки требований к средствам оперативной океанографии, предназначенных для поддержки эффективного функционирования гидроакустических антенных систем в реальных морских условиях.

Ключевые слова: волновод мелкого моря, вертикальная антенная решетка, пространственная обработка сигналов, коэффициент усиления антенны, антенный выигрыш, согласованная обработка, оптимальная обработка, модовая фильтрация, оперативная океанография

DOI: 10.31857/S0320791923600427, **EDN:** QTEETJ

ВВЕДЕНИЕ

Среди актуальных вопросов, которые активно обсуждаются специалистами в области прикладной акустики океана и смежных вопросов акустической океанографии, особое место занимает вопрос об оценке необходимых требований к объему и качеству информации относительно свойств и параметров океанической среды для повышения практических возможностей приемных антенных систем. По существу, речь идет о количественных оценках требований к средствам оперативного контроля состояния среды и значений ее параметров, влияющих на распространение звука, которым они должны удовлетворять для повышения эффективности обнаружения и оценки

параметров сигналов на фоне совокупности шумов среды и помех в условиях реального океана [1, 2]. Не вызывает сомнения, что корректная информация о среде распространения принимаемых сигналов должна учитываться в алгоритмах их обработки [3–7], и в этом смысле “согласование обработки со средой” на основе адекватной модели среды, как подход, является не просто целесообразным, но необходимым. Однако, какая именно информация требуется для реализации такого подхода — о каких параметрах среды и, в особенности, с какой допустимой погрешностью их оценки в натурных условиях, — заранее не очевидно и составляет предмет дискуссий. Без анализа этих принципиальных аспектов и сам под-

ход, основанный на согласовании обработки со средой, и “наполнение” его конкретными алгоритмами, остаются неопределенными в той степени, которая необходима для эффективного практического применения.

В недавних работах [8, 9] поставленный вопрос был рассмотрен с позиций численного моделирования эффективности вертикальной антенной решетки (АР) как пространственного фильтра узкополосных сигналов, формируемых удаленными источниками в канале мелкого моря и принимаемых в условиях априори неточного знания его параметров. Данная работа развивает полученные там результаты с акцентом на сравнительном анализе существенно различных методов обработки сигналов, которые опираются на одну и ту же (предполагаемую известной) модель канала распространения. Различие методов заключается при этом не только в их разной математической формулировке, но и в том, что они в разной степени используют априорную информацию относительно условий приема полезного сигнала. Как будет показано ниже, такие условия в основном определяются возможным присутствием на входе АР интенсивной помехи и фоновых шумов морской среды.

Канал мелкого моря выбран нами в качестве среды распространения сигналов не только из соображений практической значимости, но и потому, что в таком канале звуковые поля испытывают сильное влияние подстилающего дна [10]. Следовательно, геоакустические параметры канала должны быть в явном виде включены в число параметров, подлежащих оценке наравне с вертикальным профилем скорости звука (ВПСЗ) и профилем глубины подводного канала. Очевидно, объем априорной неопределенности модели среды при этом только возрастает, причем существенно — неопределенность данных о параметрах дна в натуральных условиях, как правило, является весьма значительной. В свою очередь, вертикальная АР как одна из базовых конфигураций приемных гидроакустических антенн представляет особый интерес в силу практической возможности селекции пространственных гармоник принимаемых сигналов (волноводных мод или лучей) в вертикальной плоскости канала. Ограничение постановки задачи, связанное с предположением фиксированной частоты, не является в данном контексте принципиальным, поскольку пространственная обработка стандартно понимается нами как частотно-зависимая фильтрация сигналов с помощью АР определенного (не слишком малого) волнового размера. В случае приема сигналов с конечной шириной спектра, их обработка в АР предполагает использование частотного накопления выходных сигналов отдельных пространственных фильтров [11–13].

Следуя работам [8, 9], мы продолжаем рассмотрение одного из важных сценариев гидроакустики — приема слабого полезного сигнала, создаваемого на входе АР удаленным локализованным источником, на фоне собственных шумов морской среды и интенсивной помехи, создаваемой другим локализованным источником (возможно, несколькими). Рабочая частота предполагается низкой (диапазон первых сотен Гц), с учетом этого мы опираемся на хорошо известный модовый формализм описания звуковых полей в подводном канале [10, 14]. Эффективность методов обработки мы характеризуем коэффициентом усиления АР (антенным выигрышем) по величине отношения сигнал/(шум + помеха) (ОСШП). По сути, это основная, хотя и эвристическая по своей природе, характеристика протяженной АР как пространственного фильтра полезного сигнала на фоне аддитивных шумов и помех; при этом ее связь с отношением правдоподобия как статистическим критерием эффективности обнаружения слабого сигнала на фоне шумов хорошо известна (например, [11, 12]).

В отношении модели среды мы предполагаем, что вертикальный профиль скорости звука (ВПСЗ), глубина канала и параметры подстилающего дна известны не точно, но с некоторой погрешностью — с отклонениями от тех опорных значений, которые используются при расчете амплитудно-фазового распределения (векторного) АР в соответствии с выбором метода пространственной обработки. Эти отклонения, задаваемые в пределах определенных интервалов, формируют ансамбль “реальных” значений параметров среды и характеризуют тем самым уровень априорной неопределенности опорной модели среды. В таком сценарии приема и сама опорная модель, и основанные на модели методы обработки становятся принципиально “рассогласованными со средой”, что в наибольшей степени отвечает практике приема сигналов удаленных источников в реальных морских условиях. Сценарий точного согласования рассматривается при этом как тот идеальный сценарий, которому отвечают потенциальные возможности методов обработки сигналов в заданном канале, и в этом смысле его рассмотрение, бесспорно, полезно.

Здесь мы проводим количественное сравнение трех существенно разных методов пространственной обработки: метода согласованной обработки полезного сигнала (исходно, именно этот метод в англоязычной литературе получил название *matched-field processing*) [3, 4], эвристического метода согласованной фильтрации одной из мод сигнального поля (с условием, что эта мода выбирается по определенному критерию) [15, 16] и метода оптимальной обработки, где оптимизация понимается по критерию максимума заданной характеристики эффективности — выходного

ОСШП [11]. Эти известные методы являются, по существу, различными подходами к реализации пространственной фильтрации многомодового сигнала на фоне модовых помех и шумов. Основной наш интерес как раз и заключается в том, чтобы выявить, на их конкретном примере, зависимость потерь эффективности пространственной обработки сигналов, основанной на модели среды, от уровня априорной неопределенности модели и от “внешних” условий приема полезного сигнала. Под такими условиями здесь понимаются, прежде всего, относительные уровни интенсивности и модовый состав помехового и шумового полей на входе АР.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Звуковой канал мелкого моря и положение в нем АР задаются нами на основе данных одного из натурных экспериментов ИПФ РАН с постановкой стационарной акустической трассы в акватории Баренцева моря [17] с использованием тонального источника на частоте 240 Гц (такой выбор сделан только для определенности условий моделирования). Глубина места постановки АР равна 160 м, опорный ВПСЗ вдоль трассы распространения сигналов (показан жирной линией на рис. 1) построен путем линейной интерполяции данных измерений в 32 точках по глубине, следующих через 5 м (отмечены точками). Предполагается далее, что в силу своей природной изменчивости и погрешности измерений, реальный ВПСЗ известен с некоторыми произвольными отклонениями от опорного профиля, при этом модель его “мгновенных” реализаций выбрана нами в виде:

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

где c_i — реализации скорости звука на каждом i -м горизонте измерения; $(c_0)_i$ — измеренные значения; ξ_i — статистически независимые случайные величины, равномерно распределенные на интервале $[-1, 1]$; $(\text{var}(c))_i$ — амплитуда отклонений, которая является переменной моделирования и монотонно уменьшается с глубиной (с ростом индекса i) от максимального значения на поверхности до нуля на дне. Сужающийся “рукав” вариаций ВПСЗ и несколько его случайных реализаций показаны на рис. 1. Мы исходим здесь из реалистичного предположения о том, что вариации ВПСЗ имеют глубинную зависимость и максимальны в верхнем слое, наиболее подверженном температурным вариациям в приводном слое атмосферы. Максимальный интервал вариаций мы ограничиваем при моделировании значениями 5 или 10 м/с (что отвечает температурным вариациям на уровне 1 или 2°C), при построении пока-

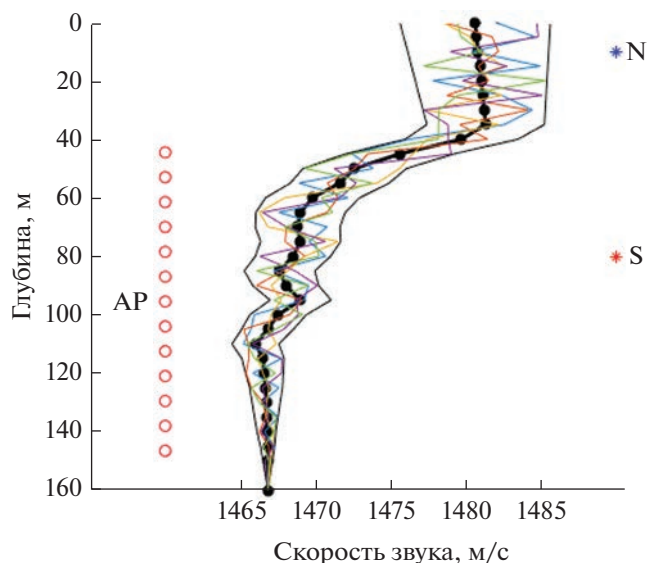


Рис. 1. Опорный ВПСЗ (жирная линия, точки на которой отвечают горизонтам измерения скорости звука) и пять случайных реализаций ВПСЗ (1) в пределах интервала, монотонно сужающегося с глубиной. Слева показаны положение элементов АР по глубине (кружки); справа — выборочные значения глубин источников полезного сигнала (S, 80 м) и помехи (N, 10 м).

занных ниже зависимостей он проходит с малым шагом 0.1 м/с.

Подчеркнем, что задаваемые нами интервалы априорной неопределенности ВПСЗ заведомо не превосходят глубинной изменчивости опорного ВПСЗ (~20 м/с) в пределах слоя скачка на глубинах 40–60 м, т.е. сезонная гидрология канала летнего типа в целом сохраняется. Следовательно, речь идет именно о тех относительно малых и краткосрочных вариациях поля скорости звука, которые подлежат оценке средствами оперативной океанографии. Вместе с тем, выбранная модель вариаций ВПСЗ не претендует на высокую степень соответствия характеру изменчивости реального океана, тем более, весьма вариативному для разных морских районов и в разных сезонах. Дополнительная коррекция модели (1), например, “сглаживание” реализаций путем введения эвристического ограничения на величину вертикального градиента скорости звука или взаимных корреляций вариаций скорости на близких горизонтах (что близко, по сути) в большей степени может отвечать натурным условиям, но не является предметом данной работы. Отметим только, что подобная коррекция ожидаемо приведет к некоторому ослаблению демонстрируемых ниже эффектов, но не будет влиять на их характер (отдельные расчеты с такими поправками модели (1) были сделаны).

На рис. 1 показаны также: положение элементов АР, состоящей из 13 элементов, расположен-

ных эквидистантно через 8.5 м в интервале глубин от 44.5 до 146.5 м ниже перемешанного и относительно прогретого слоя; положение точечных источников сигнала (S , 80 м) и помехи (N , 10 м). Такое положение АР и источников отвечает большinstву приведенных ниже иллюстраций.

Подстилающее дно упрощенно задается в виде однородного жидкого поглощающего полупространства, опорные значения его параметров заданы следующими: плотность $\rho_b = 1.8 \text{ г/см}^3$, скорость звука $c_b = 1750 \text{ м/с}$, коэффициент затухания звука $\beta_b = 0.07 \text{ дБ/км Гц}$ или $0.12 \text{ дБ/}\lambda$. С учетом значительного разброса геоакустических параметров донных пород различного типа, интервалы предполагаемых отклонений от указанных значений мы ограничиваем достаточно большими величинами: 50% в обе стороны для плотности, от -15% до 25% для скорости звука, от 0.01 до 0.7 дБ/км Гц для коэффициента затухания. Такие интервалы включают значения соответствующих параметров для большинства известных типов осадочных донных пород. Поскольку параметры дна по своей природе являются стабильными величинами, то их априорная неопределенность моделируется нами последовательным перебором в пределах указанных интервалов с фиксированным шагом: 1% для плотности и скорости, 0.01 дБ/км Гц для коэффициента затухания. Неопределенность глубины канала задается выборочно отдельными значениями погрешности в пределах относительной величины 3%, что сопоставимо с той погрешностью, которую дают доступные атласы глубин Мирового океана. Для данного канала абсолютная погрешность батиметрии при такой оценке сверху составляет 5 м (в пределах длины волны для заданной частоты).

Таким образом, априорная неопределенность расчетной модели канала распространения звука по всей совокупности ее основных физических параметров моделируется нами с учетом природной специфики этих параметров и возможностей получения корректной информации о них в натуральных условиях.

Уточним далее схему расчета звуковых полей на входе АР. Расчет выполняется в рамках модового формализма с использованием программы, разработанной ранее И.А. Шерешевским и затем адаптированной И.П. Смирновым (ИПФ РАН) для моделирования методов обработки многомодовых сигналов в среде MatLab в различных постановках задачи (см., например, [8, 18, 19]). Расчетное выражение для компонент вектора полезного сигнала на входе j -го элемента АР имеет хорошо известный вид суперпозиции отдельных мод [10, 14]:

$$s(z_j) = \sum_{m=1}^M \frac{u_m^*(z_s) u_m(z_j) \exp\{i(\kappa_m - \alpha_m)r_s + i\pi/4\}}{\sqrt{\kappa_m r_s}}. \quad (2)$$

Здесь $u_m(z_j)$ — значение собственной (модовой) функции волновода на глубине j -го элемента АР; κ_m и α_m — постоянная распространения и коэффициент затухания в донном грунте m -ой моды (действительная и мнимая часть продольного волнового числа моды, соответственно); r_s — горизонтальное расстояние до источника сигнала; z_s — глубина источника; M — полное число распространяющихся мод дискретного спектра. Аналогичное выражение мы используем для расчета помехового сигнала на входе АР, подставляя в выражение (2) координаты r_N, z_N для соответствующего источника. Модовые коэффициенты затухания α_m рассчитываются для заданных параметров дна по следующей формуле [10]:

$$\alpha_m = \frac{\rho_w}{\rho_b} \frac{k_b^2 u_m^2(H)}{2\kappa_m \sqrt{\kappa_m^2 - k_b^2}} \alpha_b.$$

Здесь H — заданная глубина канала (160 м); $k_b = 2\pi f/c_b$ — волновое число звуковой волны в дне для заданной частоты (240 Гц); ρ_w — плотность воды (1 г/см³); параметр α_b характеризует поглощающие свойства донных осадков и связан с коэффициентом затухания β_b соотношением: $\beta_b = (40\pi l_{ge}/c_b) \alpha_b$ (дБ/км Гц).

Для заданной частоты в канале с указанными опорными значениями параметров число мод $M = 28$, т.е. моделируемый канал распространения звука действительно является многомодовым волноводом. Важно, что в таком волноводе могут реализоваться качественно различные ситуации с точки зрения взаимного расположения спектров интенсивностей полезного сигнала, помехи и фонового шума среды по номерам мод. Естественно ожидать, что от этого будет сильно зависеть эффективность выбранных нами (или других) методов обработки как в случае полной определенности модели канала (точного согласования), так и в условиях ее априорной неопределенности.

Как и в работах [8, 9], канал предполагается горизонтально-одноуровневым и детерминированным, следовательно, накапливаемые с дистанцией эффекты взаимодействия мод и рассеяния на случайных неоднородностях канала не учитываются. Физически, это ограничивает сверху задаваемые расстояния до соответствующих источников на уровне первых десятков километров (для выбранного диапазона низких частот). Конкретно, источник полезного сигнала задается в интервале средних глубин (выборочно на глубине 40, 80 или 120 м), источник помехи — под поверхностью (на глубине 5 или 10 м), расстояния до обоих источников фиксируются одинаковыми (15 км), угловые положения источников в горизонтальной плоскости не играют роли и потому не задаются. Отношение суммарных (по элементам) интен-

сивностей сигнала к помехе на входе АР также является важным параметром задачи и задается малым на уровне -10 или -20 дБ.

Аддитивный фоновый шум предполагается здесь состоящим из двух независимых компонент: стандартно задаваемого пространственно-белого (некоррелированного по элементам АР) изотропного шума, и собственного (т. н. динамического) шума морской среды, который имеет ветровое происхождение и генерируется в приповерхностном слое канала; для его расчета мы используем одну из наиболее цитируемых моделей [20]. Такой шум заведомо не является полностью когерентной помехой на входе многоэлементной АР, в качественном отличии от помехи локализованного источника. Принципиально важно, что динамический шум является анизотропным в вертикальной плоскости канала благодаря определенному модовому составу, смещенному в область высоких номеров мод, эффективно возбуждаемых со свободной поверхности. Отметим также, что адекватный выбор модели пространственно-распределенного шума среды зависит от выбранного диапазона частот. К примеру, для более низких частот (~ 100 Гц и ниже) следует учитывать шумы удаленного судоходства, которое становится основным его источником, при этом с понижением частоты и соответствующим ростом размеров “шумообразующей” акватории характерной становится трансформация модового состава шума в область низких номеров мод и соответствующее сглаживание вертикальной анизотропии. Наиболее важно, что оба предполагаемых источника интенсивных помех на входе АР — локализованный в волноводе источник и шум среды — в совокупности занимают определенную часть модового спектра волновода (даже значительную его часть) и тем самым резко ограничивают возможности помехоустойчивого приема мод сигнального поля.

Таким образом, мы ориентируемся на практически востребованный сценарий приема вертикальной АР слабого и коррелированного по элементам (когерентного) сигнала удаленного подводного объекта, “маскируемого” мощной когерентной помехой надводного судна и частично-когерентным анизотропным шумом морской среды.

Расчетные выражения для нахождения величины антенного выигрыша в рамках такого сценария хорошо известны, они имеют вид:

$$G = \frac{\text{SNR}_{\text{out}}}{\text{SNR}_{\text{in}}}, \quad \text{SNR}_{\text{in}} = \frac{\sigma_s^2}{K + \sigma_N^2 + \sigma_{mn}^2}, \quad (3)$$

$$\text{SNR}_{\text{out}} = \frac{\mathbf{w}^+ \tilde{\mathbf{R}}_s \mathbf{w}}{\mathbf{w}^+ (\mathbf{E} + \tilde{\mathbf{R}}_N + \tilde{\mathbf{R}}_{mn}) \mathbf{w}},$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_s = \sigma_s^2 \tilde{\mathbf{s}} \tilde{\mathbf{s}}^T, \quad \tilde{\mathbf{R}}_N = \sigma_N^2 \tilde{\mathbf{n}} \tilde{\mathbf{n}}^T, \quad (4)$$

$$\tilde{R}_{mn}(z_i, z_j) = \sigma_{mn}^2 \tilde{r}_{mn}(z_i, z_j),$$

$$\tilde{r}_{mn}(z_i, z_j) \sim \sum_{m=1}^M \frac{\tilde{u}_m(z_i) \tilde{u}_m(z_j) \tilde{u}_m^2(z')}{\tilde{\alpha}_m \tilde{\kappa}_m}. \quad (5)$$

Здесь G — коэффициент усиления (выигрыш) АР, стандартно определяемый как отношение ОСШП на выходе сумматора АР (SNR_{out}) к величине входного ОСШП, усредненному по элементам АР (SNR_{in}); K — число элементов АР; σ_s^2 , σ_N^2 , σ_{mn}^2 — суммарные по элементам АР входные интенсивности полезного сигнала (нижний индекс S), помехи (индекс N) и модового шума (индекс mn — modal noise), которые нормированы на интенсивность белого шума σ^2 (в дальнейшем $\sigma^2 = 1$) и задаются тем самым как безразмерные величины; матрицы $\mathbf{R}_s$ и $\mathbf{R}_N$ размерности $(K \times K)$ — нормированные матрицы когерентности полезного сигнала и помехи, соответственно, которые являются диадными матрицами единичного ранга в силу исходного предположения о полной когерентности полей локализованных источников на входе АР (используется нормировка $\|\mathbf{R}_s\| = \text{Sp}(\mathbf{R}_s) = \sigma_s^2$, $\|\mathbf{R}_N\| = \text{Sp}(\mathbf{R}_N) = \sigma_N^2$); $\mathbf{R}_{mn}$ — нормированная аналогичным образом матрица когерентности динамического модового шума, элементы которой (5) рассчитываются по формулам работы [20] в предположении, что статистический ансамбль источников шума распределен изотропно в горизонтальной плоскости канала на фиксированной глубине $z' = 1$ м; $\mathbf{E}$ — единичная матрица когерентности белого шума; векторы $\tilde{\mathbf{s}}$, $\tilde{\mathbf{n}}$ — нормированные векторы-столбцы реплик сигнала и помехи на входе АР, соответственно (используется нормировка $|\tilde{\mathbf{s}}|^2 = |\tilde{\mathbf{n}}|^2 = 1$); $\mathbf{w}$ — весовой вектор АР; верхние индексы “*”, “T”, “+” — знаки комплексного сопряжения, транспонирования и эрмитова сопряжения матриц, соответственно. Верхний знак “тильды” в выражениях (3)–(5) означает, что соответствующие векторы и матрицы рассчитываются для параметров модели, варьируемых относительно своих опорных значений, т.е. для предполагаемых условий рассогласования опорной модели среды с реальным каналом.

Подчеркнем, что все поля (сигнала, помехи, шумов) рассчитываются как приведенные к входу АР таким образом, чтобы оперировать безразмерным соотношением их нормированных интенсивностей вида $\sigma^2 : \sigma_s^2 : \sigma_N^2 : \sigma_{mn}^2$. Это позволяет нам не задавать фактические мощности самих источников, считая их свободными параметрами. Ясно, что с учетом полного ослабления поля отдельного источника по трассе распространения,

включая цилиндрическую расходимость и модовое затухание, эти мощности в обратном пересчете становятся зависящими от расстояния до источника, но для целей нашего рассмотрения подобные расчеты не играют роли. Практически важной является именно указанная иерархия интенсивностей сигналов на входе АР, принципиальное влияние которой будет продемонстрировано ниже.

В рамках заданного сценария приема сигналов для согласованной обработки полезного сигнала (в точном значении этот термина), согласованной фильтрации одной из сигнальных мод (вопрос ее выбора рассмотрим отдельно) и оптимальной обработки, соответственно, весовые векторы АР имеют вид:

$$\mathbf{w}_{mf} = \mathbf{s}^*, \quad \mathbf{w}_q = \mathbf{u}_q, \quad \mathbf{w}_{opt} = (\mathbf{E} + \mathbf{R}_N + \mathbf{R}_{mn})^{-1} \mathbf{s}^*. \quad (6)$$

Здесь $\mathbf{u}_q$ — нормированный вектор пространственного распределения моды с номером q по элементам АР (модовый вектор), который является действительным для вертикальной АР (знак комплексного сопряжения здесь опущен).

Итак, согласно (6), пространственный фильтр АР для каждого из методов обработки предполагается “настроенным” на те реплики входных сигналов, которые отвечают опорной модели среды, в то время как на входе АР присутствуют “реальные” сигналы, фигурирующие в выражениях (3)–(5), и они отличны от своих опорных реплик в силу вариаций параметров модели в заданных интервалах. По существу, в этом и заключается наш подход к моделированию методов обработки в условиях априорной неопределенности модели среды с целью расчета потерь их эффективности, определяемой величиной антенного выигрыша G (3). На этой основе мы получим количественные оценки требований к допустимому уровню неопределенности модели по совокупности ее физических параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обсуждение результатов моделирования начнем с демонстрации того, какие распределения по номерам мод отвечают сигналам на входе АР в рамках опорной модели канала. На рис. 2 показаны модули модовых амплитуд (модовые коэффициенты возбуждения) в поле полезного сигнала (кривая 1) и помехи (кривая 2) при различных глубинах обоих источников, равноудаленных от АР на расстояние 15 км; кривая 3 на рис. 2в отвечает динамическому шуму среды (точками везде отмечены дискретные значения для каждого номера моды, соединительные линии проведены только для иллюстрации). Для наглядности сравнения, спектры приведены здесь в одном масшта-

бе, в то время как в действительности они сильно различны и пропорциональны заданным величинам входных интенсивностей соответствующих полей.

Модовый спектр полезного сигнала ожидаемо оказался более широким и сильно “изрезанным”, поскольку его источник расположен в области средних глубин канала. Хорошо видно, что только незначительная часть мод сигнального поля оказывается относительно “свободной” от помехи, а именно, несколько мод низких номеров на рис. 2а и, дополнительно к ним, несколько мод средних номеров на рис. 2б (в области глубокого провала в спектре помехи). Однако, с учетом модового шума среды, который, как и помеха, “начинается” примерно с 6-й моды, величины входного ОСШП по средним и высоким модам дополнительно и сильно уменьшаются. Это приводит, что будет показано ниже, к еще большему отличию величин выигрыша согласованного фильтра сигнала, не учитывающего помеху и модовый шум, от оптимального фильтра, который осуществляет их эффективное подавление путем обращения суммарной корреляционной матрицы помехи и шума согласно выражению (6).

Отметим, что с учетом относительной плавности модового спектра “подповерхностного” помехового поля, его можно качественно интерпретировать в более широком смысле как спектр не одного, но совокупности помеховых источников, локализованных в некотором интервале малых глубин и совместно формирующих интенсивную помеху на входе АР с определенным модовым составом.

Анализируя спектры энергонесущих мод принимаемых полей и результирующее распределение по номерам мод величины ОСШП (модовые ОСШП), можно корректно выбрать наиболее “полезную” моду сигнального поля, для которой эта величина будет наибольшей, и реализовать согласованный пространственный фильтр для этой единственной моды. Например, для спектров, показанных на рис. 2, номера таких мод оказываются следующими: 5, 1 и 2, соответственно. Как будет видно из дальнейшего, такой модовый фильтр может обеспечить близкую к оптимальному фильтру величину антенного выигрыша, но при этом оказывается значительно более простым в реализации и более устойчивым к рас- согласованию модели среды. Подчеркнем, что такая эвристическая процедура модовой фильтрации является, по своей сути, адаптивной, поскольку выбор указанной моды не может быть сделан априори, но только на основе эмпирической или модельной оценки модовых ОСШП. Важно при этом, что этот выбор определяется не только положениями соответствующих источников, что очевидно, но и положением приемной

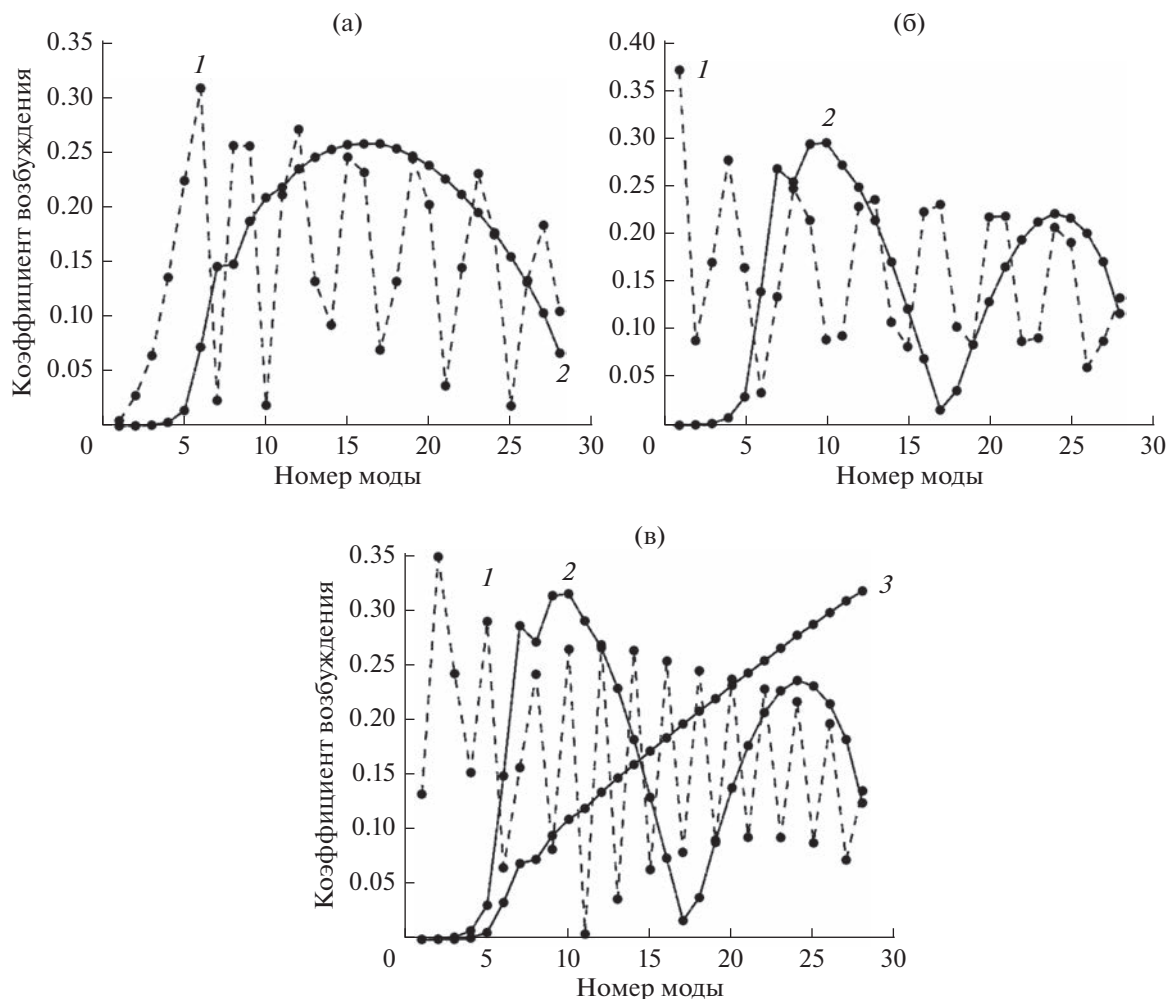


Рис. 2. Модовые спектры сигнального поля (штриховая кривая 1) и помехи (сплошная кривая 2) для различных положений источников по глубине: (а) — 40 м (сигнал) и 5 м (помеха); (б) — 120 м (сигнал) и 10 м (помеха); (в) — 80 м (сигнал) и 10 м (помеха) с добавлением модового шума (сплошная кривая 3).

АР. Ранее было показано [16, 21], что положения отдельных элементов вертикальной АР и антенны как целого по глубине являются фактором, существенно влияющим на антенный выигрыш при различных методах обработки многомодовых сигналов на фоне помех, включая метод модовой фильтрации. Это указывает на дополнительные возможности повышения эффективности обработки, связанные со специальным подбором положения АР по глубине (вернемся к этому аспекту ниже).

Прежде чем переходить к дальнейшему обсуждению, приведем полезную иллюстрацию, наглядно демонстрирующую качественное отличие рассматриваемых нами методов обработки в ситуации приема сигнала и помех широкого модового спектра. В работах [22, 23] была введена характеристика АР, осуществляющей прием многомодовых сигналов, которая есть прямой физический аналог стандартной диаграммы направленности

АР в поле плоских волн — модовая диаграмма. Эта характеристика, как и модовые спектры принимаемых сигналов, является дискретной функцией номеров мод, т.е. вектором размерности M , каждый элемент которого есть отклик АР с некоторым весовым вектором $\mathbf{w}$ на отдельную моду волновода (модовый отклик): $F_q = \mathbf{u}_q^T \mathbf{w}$. Вектор модовой диаграммы тогда определяется в общем виде как $\mathbf{F} = \mathbf{U}^T \mathbf{w}$, где $\mathbf{U}$ — матрица размерности $(K \times M)$, которая есть матрица модовой структуры волновода на входе АР (состоит из векторов-столбцов $\mathbf{u}_q, q = 1, 2, \dots, M$). Модовая диаграмма в явном виде определяет “направленность” АР в модовом пространстве и поэтому является удобным инструментом анализа методов пространственной обработки сигналов в волноводах для АР заданной конфигурации (не обязательно вертикальной).

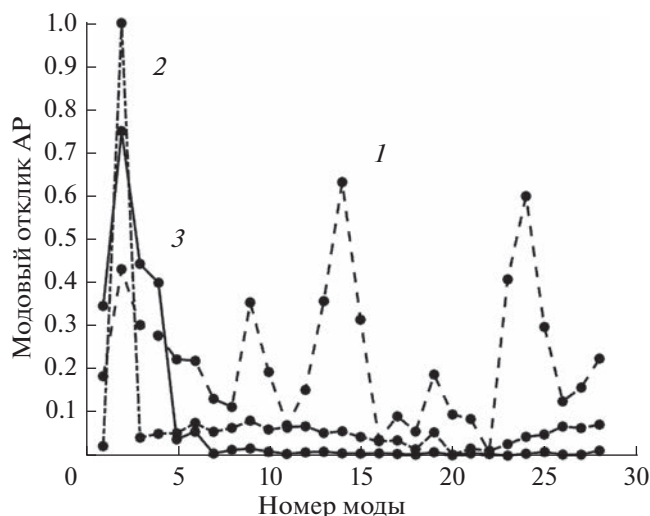


Рис. 3. Модовые диаграммы АР для методов согласованной фильтрации сигнала (1, штриховая кривая), согласованной фильтрации второй моды (2, штрих-пунктир) и оптимальной обработки (3, сплошная кривая) в случае приема сигнала на фоне помехи и модового шума. Модовые спектры принимаемых полей отвечают рис. 2в при соотношении нормированных интенсивностей на входе АР 1 : 10 : 100 : 100.

К примеру, для сценария приема полезного сигнала на фоне помехи и модового шума (рис. 2в) при условии, что нормированные интенсивности полей на входе АР имеют соотношение 1 : 10 : 100 : 100 (в указанном выше порядке), модовые диаграммы АР с весовыми векторами (6) имеют вид, показанный на рис. 3. Хорошо видно, что оптимальная обработка (кривая 3) обеспечивает пространственную фильтрацию только небольшой группы самых первых мод, “свободных” от интенсивной помехи и шума, и тем самым обеспечивает выделение полезного сигнала на их фоне с наибольшим коэффициентом усиления. В свою очередь, согласованная обработка (кривая 1) имеет высокие “боковые лепестки” модовой диаграммы в области средних и высоких номеров, что приводит к сильному ослаблению ее эффективности в данном сценарии приема полезного сигнала. Модовый фильтр 2-й моды (кривая 2) имеет близкую к оптимальной модовую диаграмму и, соответственно, также обеспечивает эффективное подавление помехи и модового шума, но при этом он подавляет часть помехоустойчивых сигнальных мод, поскольку “главный лепесток” его диаграммы оказывается слишком узким (номер моды здесь выбран $q = 2$ согласно приведенным выше оценкам).

1. Влияние вариаций ВПСЗ

Влияние случайных вариаций ВПСЗ на коэффициент усиления АР (пока без учета вариаций

параметров дна) демонстрируется в двух качественно различных ситуациях приема сигналов — в отсутствие интенсивного модового шума (рис. 4) и на его фоне (рис. 5). Для более наглядного сравнения методов обработки интересующие нас зависимости приведены здесь в относительно большом интервале вариаций до 10 м/с. Незначительные изломы кривых связаны с конечным числом реализаций профиля скорости, которое выбрано равным 100 для каждого значения амплитуды вариаций от нуля до максимального с шагом 0.1 м/с.

Рис. 4 показывает потери усиления АР при двух разных величинах входного отношения сигнал/помеха (ОСП): -10 дБ (рис. 4а) и -20 дБ (рис. 4б); рис. 5 — при фиксированном ОСП на уровне -10 дБ и различной интенсивности модового шума (10 и 20 дБ к уровню сигнала, рис. 5а и 5б соответственно). Горизонтальной штриховой линией на обоих рисунках отмечен уровень усиления $G = K$, который, как хорошо известно, отвечает согласованной пространственной обработке полностью когерентного сигнала на фоне белого шума. Физически очевидно, что в ситуации интенсивных и существенно анизотропных помех этот уровень может быть значительно превышен, поскольку даже согласованная фильтрация сигнала может частично (и даже значительно) подавлять помеху при условии заметных различий модовых составов сигнального и помехового полей, не говоря уже об оптимальной обработке, которая обеспечивает такое подавление наилучшим образом. Подобные “аномалии” коэффициента усиления вертикальной АР при приеме многомодовых сигналов неоднократно демонстрировались ранее в рамках различных модельных постановок задачи пространственной обработки [15, 21, 24].

Хорошо виден ожидаемый нами эффект сильного начального расхождения между кривыми, особенно для оптимальной и согласованной с сигналом обработки, которое превышает величину 10 дБ на рис. 4а и 20 дБ — на рис. 4б. На уровне оценки, дополнительный выигрыш оптимизации обработки в сравнении с согласованной обработкой равен обратной величине ОСП, что и подтверждается этими значениями. Однако, с ростом вариаций ВПСЗ оптимальная обработка быстро деградирует до уровня согласованной, и это тоже ожидаемый эффект, связанный с присутствием интенсивной помехи [8]. Действительно, в таких условиях оптимальная обработка не только частично “теряет” полезный сигнал (как и согласованная обработка), но и хуже подавляет помеху, в результате чего потери выигрыша при оптимальной обработке растут быстрее, и чем интенсивнее помеха, тем более сильными они оказываются. В свою очередь, согласованная модовая фильтрация наиболее помехоустойчивой 2-ой моды, занимая сначала промежуточное положение (ее начальный проигрыш оптимальной обработке весьма значи-

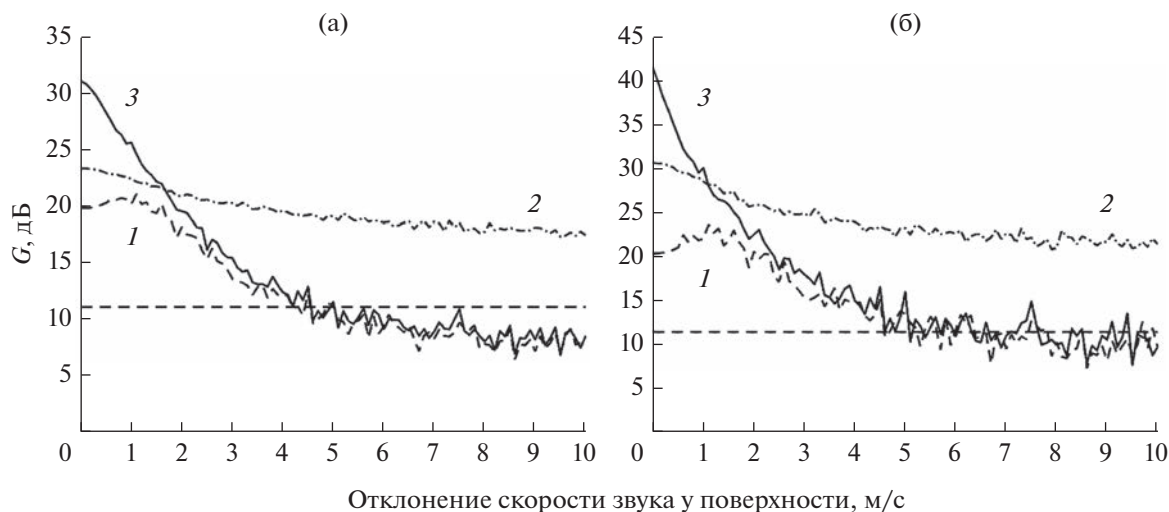


Рис. 4. Зависимости коэффициента усиления АР от амплитуды вариаций ВПСЗ для согласованной фильтрации сигнала (1, штриховая кривая), согласованной фильтрации второй моды (2, штрих-пунктир) и оптимальной обработки (3, сплошная кривая) в случае приема сигнала на фоне помехи без учета модового шума: нормированные интенсивности полей на входе АР равны (а) — 1 : 10 : 100 и (б) — 1 : 10 : 1000. Положение источников: (15 км, 80 м) и (15 км, 10 м) для сигнала и помехи, соответственно (так же на последующих рисунках).

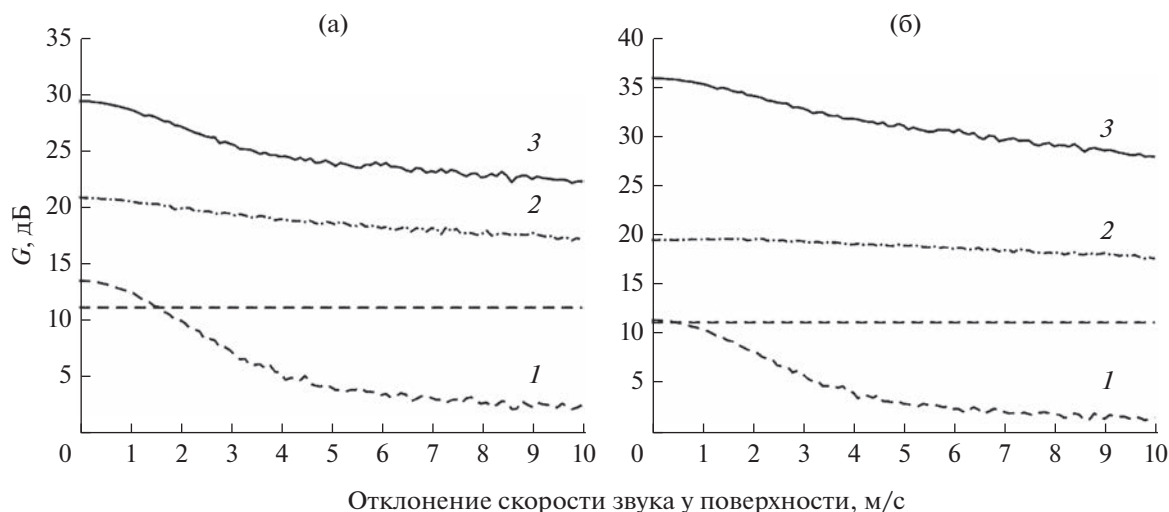


Рис. 5. Аналогичные рис. 4 зависимости в случае приема сигнала на фоне помехи и модового шума: (а) — 1 : 10 : 100 : 100 и (б) — 1 : 10 : 100 : 1000.

тельный, около 8 дБ), оказывается гораздо менее чувствительной к вариациям ВПСЗ. В результате именно этот метод обеспечивает наибольшую величину антенного выигрыша уже при вариациях ВПСЗ на уровне ~2 м/с, и затем его выигрыш над двумя другими методами только растет. Причина высокой устойчивости модовой фильтрации физически совершенно ясна и связана с тем, что модовые функции первых номеров являются наименее чувствительными к вариациям ВПСЗ, тем более, если эти вариации оказываются наиболее сильными только в верхнем слое канала (рис. 1). Таким образом, если задать равную для всех мето-

дов обработки величину приемлемого уровня потерь усиления АР в качестве требования к точности оперативного контроля изменчивости ВПСЗ, то эти требования окажутся сильно различными. Например, при заданном уровне потерь -3 дБ имеем соответствующие оценки: ~0.5 м/с для оптимальной обработки, ~2 м/с для согласованной обработки, ~5 м/с для оптимальной (в указанном выше смысле) модовой фильтрации.

На рис. 4 иллюстрируется еще один важный эффект — возможность немонотонной зависимости потерь усиления для согласованной обработ-

ки. На это также было обращено внимание в работе [8], причем этот позитивный по своей сути эффект, отчасти “спасающий” согласованную обработку в условиях рассогласования, является универсальным в смысле своего проявления, и даже более значительного, в случае вариаций не только ВПСЗ, но и донных параметров модели (остановимся на этом ниже). Такая особенность, на первый взгляд, несколько парадоксальная, тоже объясняется присутствием интенсивной модовой помехи, частично “закрывающей” моды полезного сигнала, и в ее отсутствие она пропадает.

Из сравнения рис. 4 и 5 хорошо видно значительное влияние интенсивного модового шума, причем для данной реализации модовых спектров сигнала, помехи и шума оно оказалось противоположного свойства: модовый шум оказывает “стабилизирующее” влияние на эффективность оптимальной обработки с кратным увеличением допустимых вариаций скорости звука (уже до ~ 5 – 10 м/с) и, напротив, дополнительно к интенсивной помехе подавляет эффективность согласованной обработки. Физически это связано с тем, что оптимальная обработка является в данном случае модовым фильтром узкой группы самых первых мод, практически “свободных” от помехи и шума (рис. 2), но именно эти моды являются наименее чувствительными к вариациям параметров среды и обеспечивают повышение робастности оптимального фильтра. Согласованная с сигналом обработка “настроена”, по определению, на все энергонесущие моды сигнала, включая моды средних и высоких номеров, которые полностью “закрываются” интенсивным шумом, и потому приобретает в данном случае дополнительные потери усиления. Выигрыш АР для метода модовой фильтрации по-прежнему слабо зависит от вариаций среды, следовательно, мы можем классифицировать согласованную модовую фильтрацию, при условии ее корректной “настройки” на одну из первых мод, как робастный метод, устойчивый не только к рассогласованию модели канала, но и к уровню модового шума (в рамках используемой модели — к интенсивности ветрового волнения в районе постановки АР).

Подчеркнем, однако, что отмеченное здесь качественно различное влияние модового шума на потери усиления АР для разных методов обработки сигналов не следует рассматривать в качестве общего вывода, поскольку оно обусловлено конкретными модовыми спектрами соответствующих полей (рис. 2в). Общий вывод заключается скорее в другом утверждении — влияние априорной неопределенности модели канала (в данном случае — по ВПСЗ в водной толще) на эффективность различных методов обработки и в различных условиях приема сигналов является весьма вариативным и даже не всегда однозначным, если иметь в виду возможность немонотонной зависи-

мости потерь усиления с ростом рассогласования модели среды.

2. Влияние вариаций параметров дна

Рассмотрим теперь специфический для каналов мелкого моря аспект, касающийся влияния существенной неопределенности параметров подстилающего дна — скорости звука, плотности и коэффициента затухания. Интуитивно кажется ясным, что первый из них должен быть значительно более “влиятельным”, поскольку от скорости звука в дне (как и в водной толще) зависят продольные волновые числа мод и, следовательно, взаимные фазовые сдвиги мод на входе АР для каждого из когерентных сигналов локализованных источников. Поскольку используемая нами расчетная модель распространения сигналов не учитывает фазовые флуктуации мод в результате рассеяния на случайных неоднородностях канала, фазовая “расстройка” мод в поле полезного сигнала и помехи в результате отклонения скорости звука от опорного значения становится сильным эффектом. Кроме того, от скорости звука в дне зависят не только волновые числа, но и общее число мод дискретного спектра и, следовательно, соотношение модовых спектров принимаемых сигналов, в то время как от плотности дна число мод зависит слабо. Например, при относительном уменьшении скорости звука от опорного значения на 10% число мод заметно уменьшается до $M = 19$, а при таком же относительном увеличении — возрастает до $M = 34$, в то время как варьирование плотности во всем заданном интервале не влияет на число мод (в асимптотике бесконечно большой скорости звука, отвечающей абсолютно жесткому дну, $M = 53$, что намного превышает характерные значения для нашей задачи).

На следующих двух рисунках демонстрируется совместное влияние вариаций плотности и скорости звука в дне (теперь без учета вариаций ВПСЗ) в случае интенсивного модового шума: в виде трехмерных зависимостей (рис. 6) и в виде линий равного уровня на плоскости (рис. 7). Прежде всего, обратим внимание на различный масштаб интересующих нас величин по вертикальной шкале на этих графиках. Как на предыдущих рисунках, здесь демонстрируются значительные расхождения начальных величин усиления АР для разных методов обработки (при точном согласовании опорной модели среды с реальным каналом) и качественно различный характер потерь усиления в условиях растущего рассогласования. Изолинии уровня усиления на рис. 7 построены с одинаковым интервалом 3 дБ для всех трех методов, что позволяет легко оценить для каждого из них ширину “зоны устойчивости” по обоим варьируемым параметрам и сделать соответствующие сравнительные выводы.

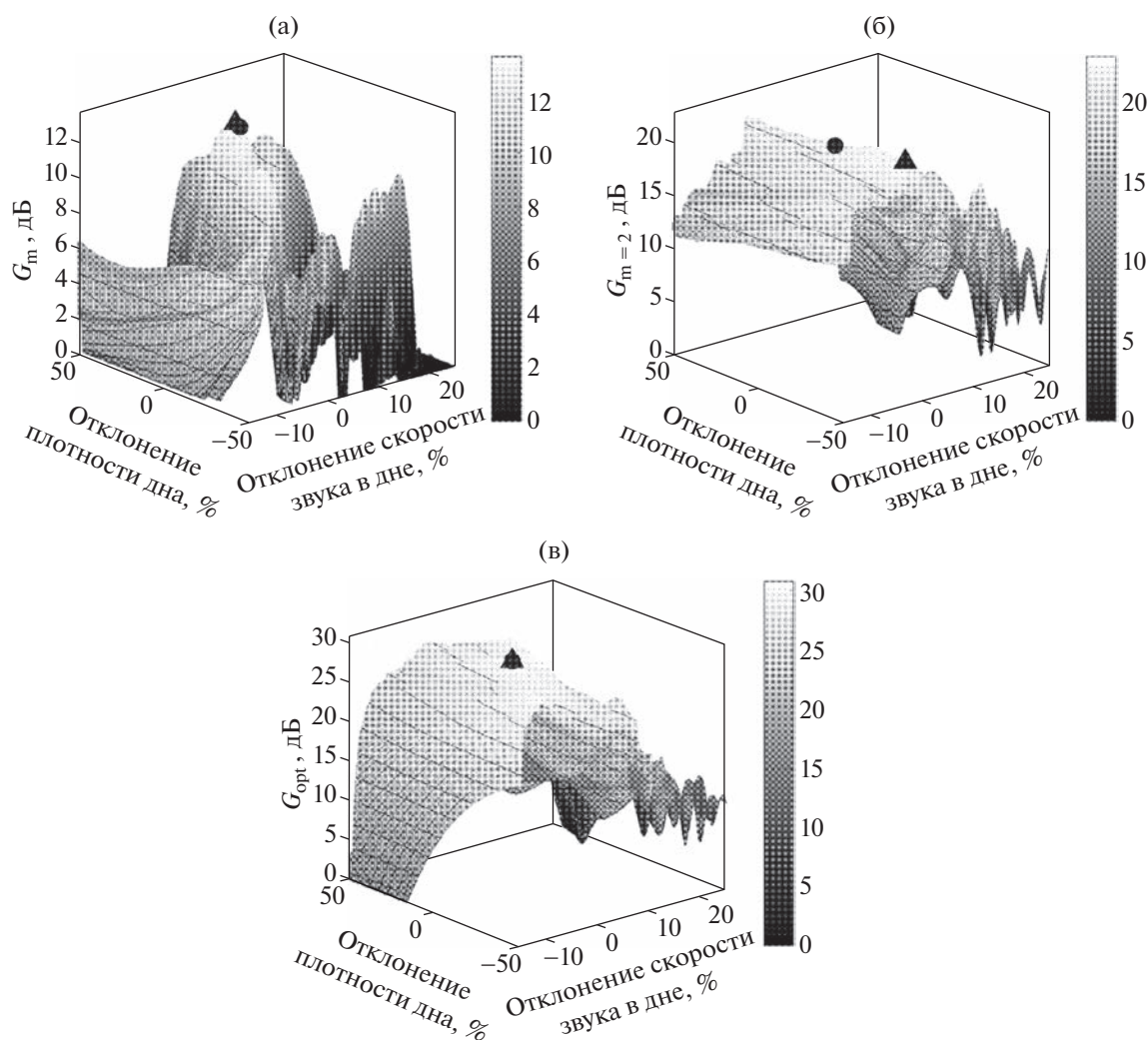


Рис. 6. Зависимости коэффициента усиления АР от амплитуд относительных вариаций скорости звука в дне и плотности дна для (а) — согласованной обработки, (б) — согласованной фильтрации 2-й моды и (в) — оптимальной обработки в случае приема сигнала на фоне помехи и модового шума: 1 : 10 : 100 : 100. Кругами отмечены значения коэффициента усиления в отсутствие вариаций (в начале координат); треугольниками — главные максимумы зависимостей для каждого из методов.

На обоих рисунках хорошо виден уже отмеченный нами немонотонный характер зависимости для согласованной обработки (рис. 6а, 7а), но здесь этот эффект проявляется более резко — присутствуют дополнительные и значительные по величине максимумы коэффициента усиления и глубокие провалы между ними. Высокий уровень таких “боковых лепестков” усиления указывает на то, что согласованная обработка может оказаться в состоянии эффективного согласования со средой даже при значительном рассогласовании модели по донным параметрам. Подобные ее “возвращения” в режим максимального (для этого метода) усиления характерны и вполне предсказуемы (могут быть рассчитаны на основе модели), однако, они сильно вариативны по всем параметрам задачи и имеют, таким образом, ква-

зислучайный характер. Эта особенность не позволяет, на наш взгляд, придавать таким дополнительным максимумам большого практического значения, но вместе с тем, она представляется существенной. Уточним, что главный максимум (13.6 дБ) выигрыша АР при согласованной обработке достигается в данном случае при небольшом смещении плотности на +3%, хотя он практически не отличается по величине от начальной точки нулевых отклонений по обоим параметрам (эти значения оказались здесь в пределах “главного лепестка” зависимости). Видно также, что оптимальная обработка (рис. 6в, 7в), с учетом отмеченной выше специфики совместного влияния интенсивной помехи и модового шума, и здесь (как на рис. 5) показывает себя весьма устойчивой в относительно широком интервале неопре-

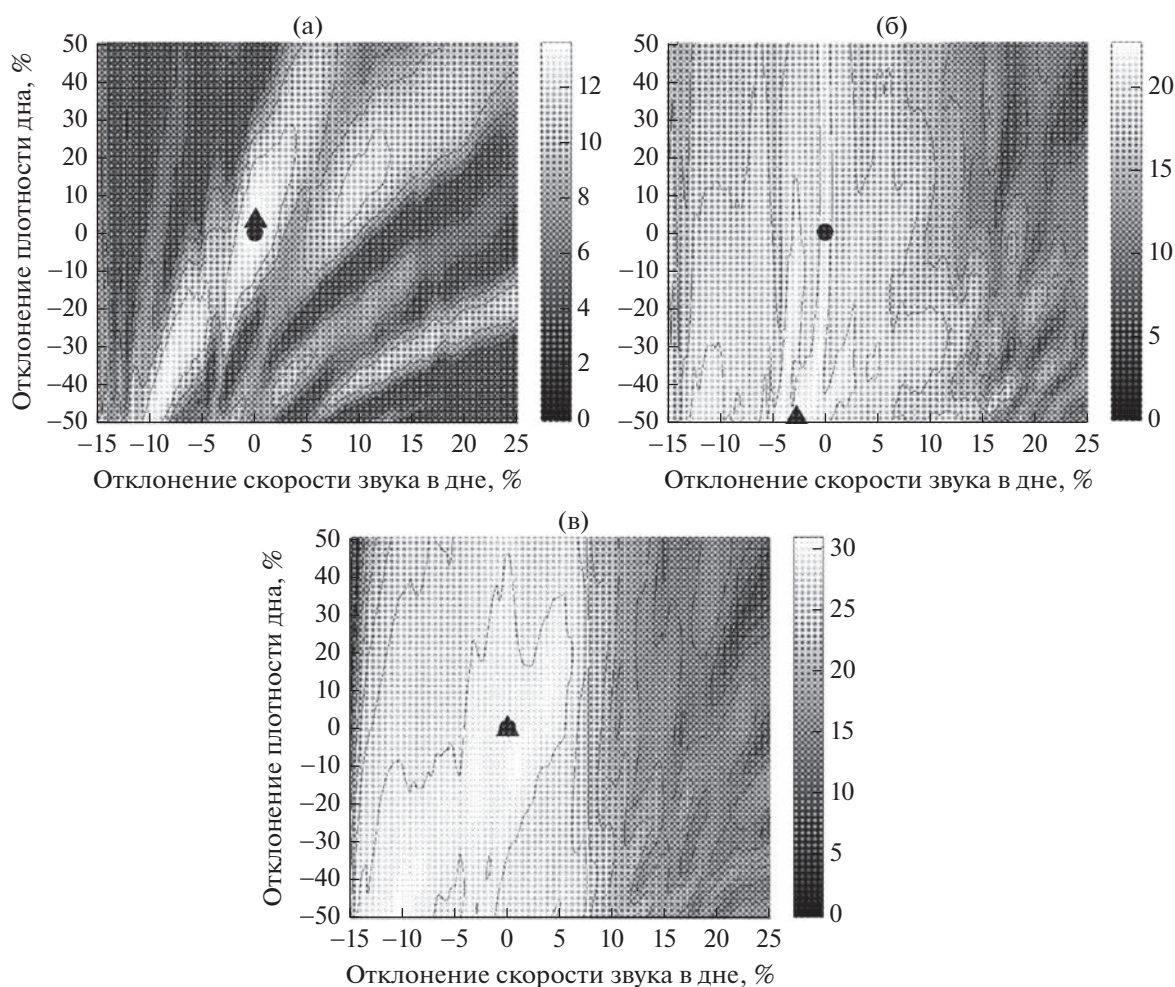


Рис. 7. Те же зависимости, что на рис. 6, в виде линий равного уровня коэффициента усиления, построенных через 3 дБ.

деленности донных параметров, но по скорости звука, что характерно, — только при отклонениях в меньшую сторону от опорного значения, т.е. при сокращении общего числа мод дискретного спектра. Явно выраженный в данном примере несимметричный характер зависимости указывает на то, что опорное значение скорости звука в дне должно выбираться с определенным “запасом” в сторону увеличения — потери усиления в условиях рассогласования могут оказаться при этом менее значительными, и такая особенность оптимальной обработки представляется важной в плане практических рекомендаций. Метод согласованной фильтрации 2-й моды (рис. 6б, 7б) также оказался в данном сценарии приема достаточно устойчивым к вариациям параметров дна, особенно к вариациям плотности. Однако, и для него видно смещение главного максимума: 22.8 дБ при отклонениях скорости звука на -3% и плотности на -49% против 20.8 дБ в начальной точке.

Если теперь “выключить” ветровое волнение и вместе с ним интенсивный шум в средних и высо-

ких модах, то потери усиления ожидаемо становятся значительно более резкими, особенно для методов согласованной и оптимальной обработки (рис. 8а, 8в). Видно, что область центрального “лепестка” зависимости (в начале координат) резко сужается и не превосходит первых единиц процентов по скорости звука и $\sim 10\%$ по плотности. Более того, главный максимум выигрыша АР для согласованной обработки (28 дБ) теперь не только заметно сместился от положения центрального максимума, но и значительно его превзошел (примерно на 8 дБ). Метод модовой фильтрации (рис. 8б) стабильно демонстрирует относительно высокую устойчивость, в результате чего оказывается более эффективным с ростом рассогласования модели по параметрам дна. Вместе с тем, и для этого метода видно смещение глобального максимума выигрыша (26.2 дБ) от начальной величины (23.4 дБ), т.е. примерно на ту же величину (менее 3 дБ, как на рис. 6, 7), хотя само смещение по параметру скорости звука оказалось совсем другим. Для сравнения, оптимальная

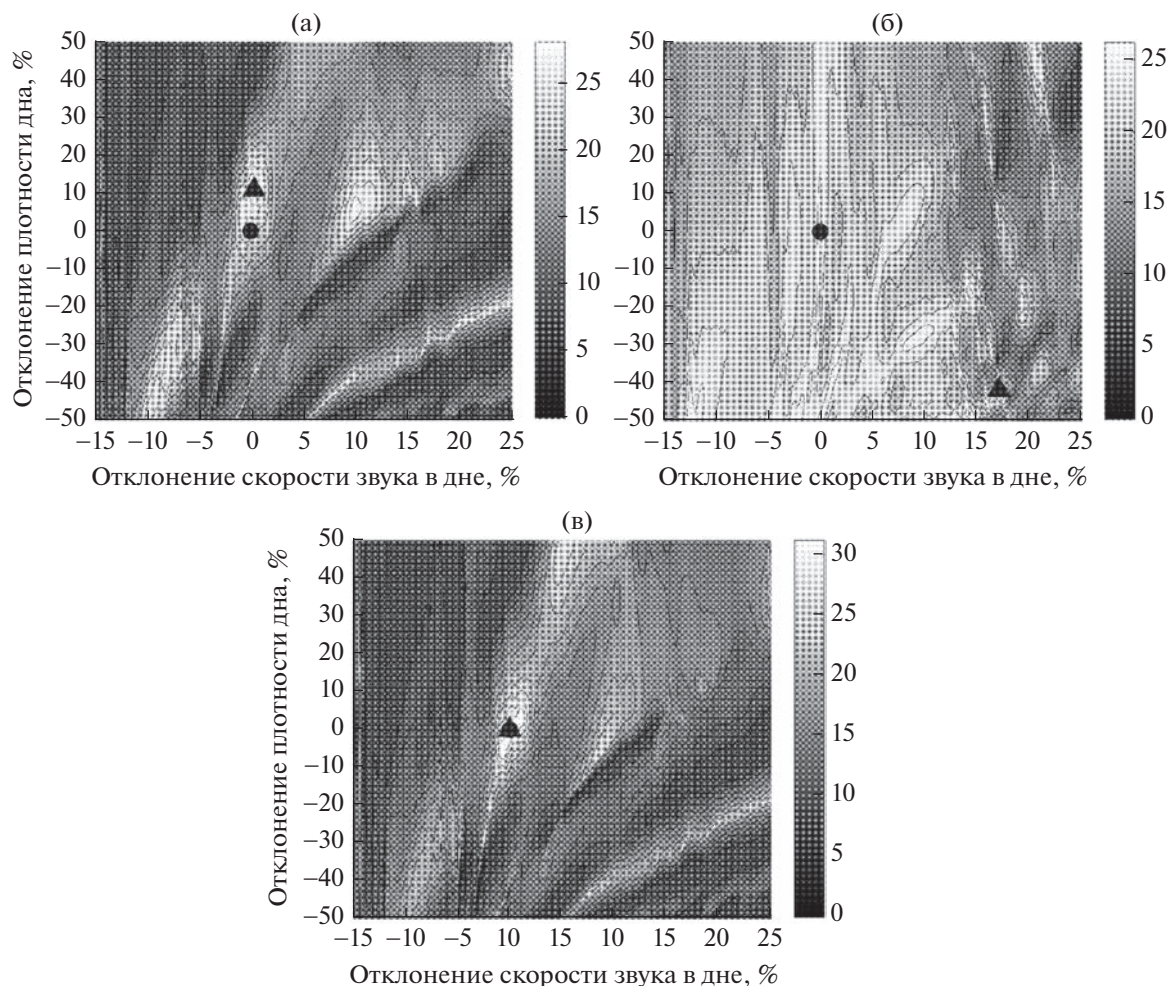


Рис. 8. Аналогичные рис. 7 зависимости в отсутствие интенсивного модового шума: 1 : 10 : 100 : 0.

обработка обеспечивает максимальное усиление около 31 дБ, но, как и на рис. 4, с ростом рассогласования по скорости звука потери усиления быстро растут. Видно, что для этого метода также может быть характерна “овражная” зависимость усиления от вариаций параметров дна, хотя и менее резкая в сравнении с согласованной обработкой.

В целом, отмеченная здесь и выше (на рис. 4) “инверсия” методов обработки с ростом рассогласования модели совершенно ясна и указывает только на то, что сам термин “оптимальная обработка” относится только к тому идеальному сценарию приема, когда модель принимаемых сигналов известна точно и является стационарной, т.е. в отсутствие отклонений значений ее параметров от тех опорных значений, для которых выполнена оптимизация. По существу, то же самое относится и к термину “согласованная обработка”, которая в обсуждаемом сценарии приема с априорной неопределенностью параметров среды является, очевидно, “рассогласованной обработкой”.

Для удобства сопоставления зависимостей, показанных на рис. 4–8, отметим, что величины усиления в точке нулевых вариаций параметров на рис. 5а совпадают с начальными значениями соответствующих зависимостей на рис. 6, 7, и на рис. 4а – с начальными значениями на рис. 8.

Наравне со скоростью звука и плотностью, коэффициент поглощения звука в донных породах также может иметь значительную неопределенность в реальных условиях работы приемных антенн. Не останавливаясь на вопросе о влиянии неопределенности по этому параметру подробно, отметим только, что оно еще более слабое, чем влияние неопределенности по плотности дна, и становится заметным при соответствующих “ошибках” не на десятки процентов, но в разы. Например, при отличии реального поглощения звука в дне от опорного значения в три раза (0.2 против 0.07 дБ/км Гц) потери усиления АР для методов согласованной и оптимальной обработки не превышают 2 дБ, и практически отсутствуют для метода модовой фильтрации. Значительное влияние

(более 3 дБ) проявляется только при отличиях до ~ 10 раз (до ~ 0.7 дБ/км Гц), но такое сильное расхождение с опорной моделью фактически означает отсутствие сколько-нибудь обоснованной информации о составе подстилающего слоя донных пород. Однако, неопределенность модели по коэффициенту поглощения должна оказаться более существенной с ростом расстояний до источников сигнала и помехи. Интуитивно кажется ясным, что в этом случае ошибки в оценке поглощения приведут к более заметному искажению модовых спектров принимаемых сигналов в сравнении с опорной моделью (прежде всего, в области средних и высоких мод), а вместе с ними — к дополнительному росту эффекта рассогласования (см. также рис. 4 в работе [8]).

Наконец, остановимся кратко на влиянии неопределенности опорной модели по глубине канала. В пределах относительно малых ошибок батиметрии (до 3%, что не превосходит в нашем случае длину волны по абсолютной величине) это влияние также можно ожидать достаточно слабым в силу слабой чувствительности модовой структуры канала к вариациям глубины водного слоя на указанном малом уровне. Такие интуитивные ожидания подтверждаются расчетами: для всех методов обработки потери усиления АР не превышают величину ~ 1 дБ.

Таким образом, в ситуации приема многомодового сигнала на фоне интенсивной модовой помехи и модового шума среды, потери усиления АР могут иметь весьма сложную “многолепестковую” зависимость от уровня рассогласования модели канала по параметрам дна. Несмотря на то, что вариации этих параметров задавались заметно более сильными, чем вариации ВПСЗ в относительных единицах (единицы и десятки процентов против десятых долей процента, соответственно), тем не менее, соответствующие величины допустимого рассогласования предъявляют весьма жесткие требования к качеству оценки этих параметров в реальных морских условиях для эффективной реализации методов согласованной и оптимальной обработки. Метод согласованной фильтрации наиболее помехоустойчивой моды сигнального поля может быть достаточно близким по величине усиления к оптимальной обработке в условиях согласования со средой и при этом сохранять свою относительно высокую эффективность даже в условиях значительной неопределенности модели по донным параметрам.

Выше обсуждались эффекты рассогласования по отдельным параметрам модели (ВПСЗ, донные параметры, глубина канала), что позволило показать существенно разный характер их влияния на величину потерь усиления АР. Приведем теперь иллюстрацию совместного влияния вариаций скоростей звука в водной толще и в дне как

тех двух характеристик канала распространения, неопределенность оценки которых оказывает наибольшее влияние на эффективность методов обработки. Соответствующие зависимости показаны на рис. 9 для случая приема сигналов обоих источников на фоне интенсивного модового шума, который мы рассматриваем как более реалистичный. Все эффекты, которые мы отметили выше, здесь хорошо видны: высокие и узкие “боковые лепестки” зависимости для согласованной обработки (рис. 9а), приводящие к неоднозначному влиянию рассогласования на ее эффективность; более устойчивая, но явно несимметричная зависимость для оптимальной обработки (рис. 9в); близкая к ней зависимость для метода модовой фильтрации (рис. 9б) и его доминирование по величине усиления при значительных отклонениях опорных значений скоростных параметров от реальных значений.

В завершение остановимся более подробно на методе согласованной фильтрации одной из мод сигнального поля. В случае, если наиболее помехоустойчивыми модами принимаемого сигнала являются моды низких номеров, этот эвристический метод обеспечивает, как показано выше, достаточно высокие значения коэффициента усиления АР и при этом обладает относительно высокой устойчивостью в условиях рассогласования модели среды и значительных вариаций уровня шума в средних и высоких модах. Следовательно, он может рассматриваться в качестве квазиоптимального метода обработки, и тогда вопрос корректного выбора той моды, которая определяется в качестве опорной для его реализации, становится практически важным. Мы отметили выше, опираясь на результаты [16, 21], что выбор такой моды зависит не только от спектра энергонесущих мод принимаемых сигналов (рис. 2), но и от положения приемников в канале — фактически, от того, как эти моды “проецируются” на АР и какими взаимными ортогональными свойствами при этом обладают.

Для иллюстрации этого вывода, специфического для вертикальных АР, на рис. 10 показана зависимость коэффициента усиления модовой фильтрации от вариаций ВПСЗ при различном выборе опорной моды для трех вариантов эквидистантной АР с фиксированным числом элементов $K = 13$. Рис. 10а отвечает базовому положению АР (рис. 1), для которого показаны все предыдущие зависимости; рис. 10б — той же АР, размещенной в верхней части канала (глубина первого элемента равна 13 м, последнего — 115 м); рис. 10в — разреженной АР с увеличенным до двойной длины волны межэлементным расстоянием (глубина первого элемента — 8 м, последнего — 152 м). Хорошо видно, что не только выбор опорной моды для данного метода обработки и достигаемый с его помощью выигрыш АР, но и

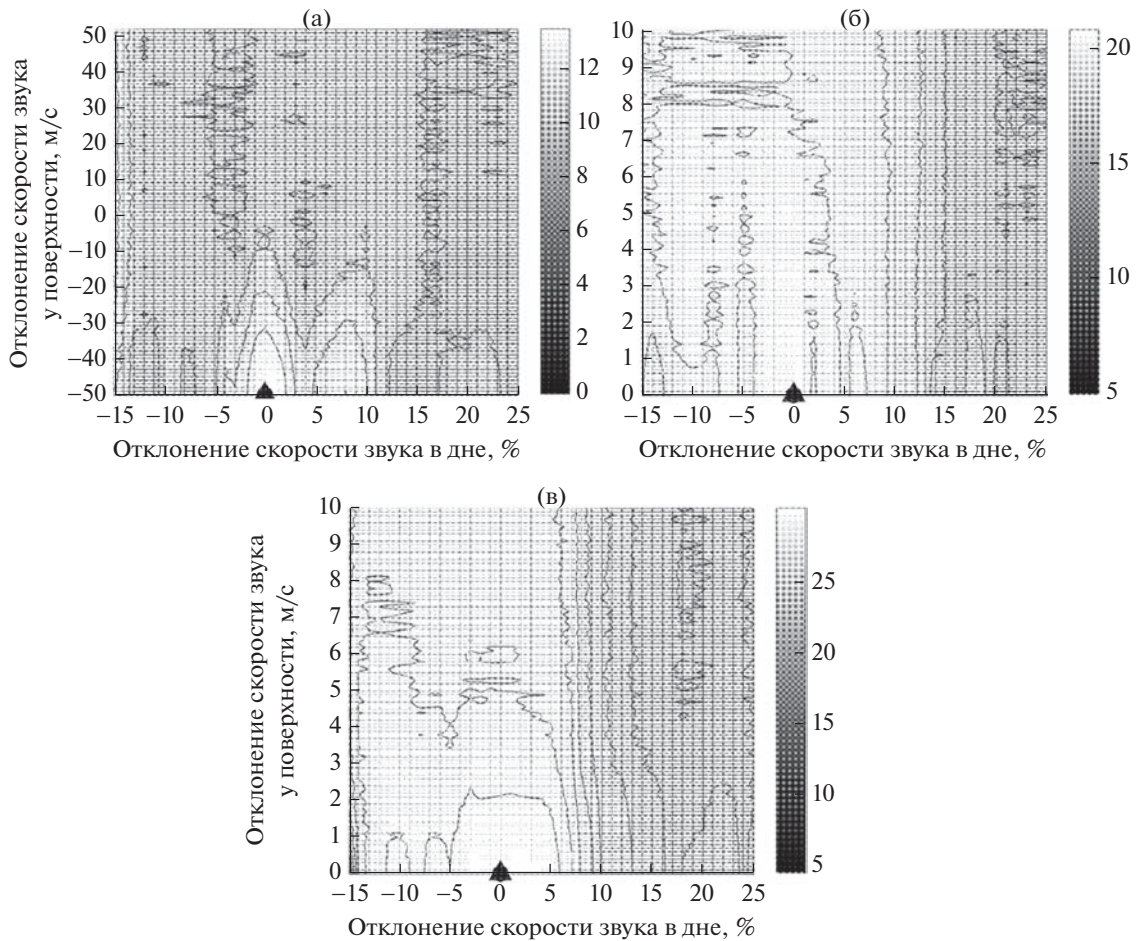


Рис. 9. Зависимости коэффициента усиления АР от вариаций ВПСЗ и скорости звука в дне для (а) — согласованной обработки, (б) — согласованной фильтрации 2-й моды и (в) — оптимальной обработки в случае приема сигнала на фоне помехи и модового шума: 1 : 10 : 100 : 100.

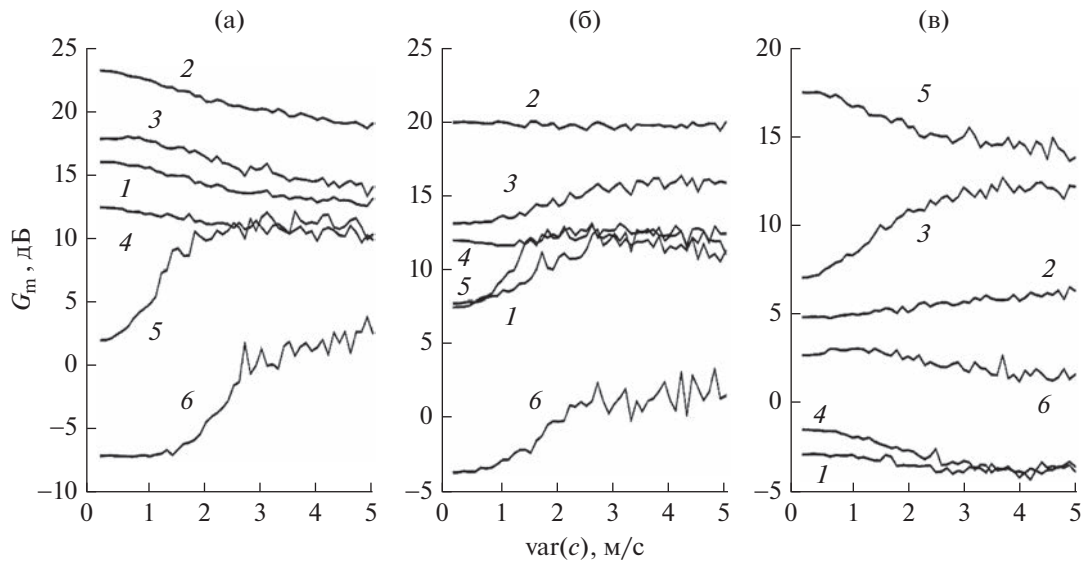


Рис. 10. Зависимости коэффициента усиления АР для метода модовой фильтрации от амплитуды вариаций ВПСЗ для разных номеров опорной моды (номера кривых соответствуют ее номеру) и трех положений АР: (а) — базовое положение (рис. 1), (б) — в верхней части канала, (в) — разреженная АР.

уровень допустимых вариаций ВПСЗ имеют явную и существенную зависимость от положения АР. Это действительно указывает на то, что размещение вертикальной АР в сечении канала — еще один фактор, который следует учитывать при рассмотрении вопроса устойчивости методов пространственной обработки к рассогласованию модели среды.

Таким образом, опираясь на предложенный подход к моделированию задачи, полученные в его рамках зависимости и их сравнительный анализ, становится возможным количественно оценить те диапазоны допустимого рассогласования модели канала по ее основным физическим параметрам, в пределах которых потери усиления АР не превышают 3 дБ (или другой заданный уровень) для каждого из методов обработки сигналов. Все приведенные графики демонстрируют, что эти диапазоны, а вместе с ними и требования к качеству оперативной оценки соответствующих параметров среды, радикально различны для разных параметров и для разных условий приема сигнала на фоне помехи и шума морской среды. Они также различны (вплоть до порядка величины) для разных методов обработки сигналов, при этом положение приемной АР, осуществляющей обработку, также заметно влияет на достигаемые величины коэффициента усиления в условиях рассогласования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итог и сформулируем выводы обобщающего характера, дополняя ими выводы работ [8, 9].

1. В практически важном сценарии приема слабых сигналов на фоне шумов среды и помехи, совместно “маскирующих” спектр пространственных гармоник полезного сигнала (мод, лучей, плоских волн), согласованная с сигналом обработка заметно проигрывает оптимальной обработке по величине коэффициента усиления в ситуации точного согласования со средой (точного знания всех параметров канала распространения). Характерно, что этот проигрыш растет не только с уменьшением относительного уровня полезного сигнала на входе АР, но и при таком изменении пространственных спектров сигнала и помех (например, при изменении координат соответствующих источников), при котором “перекрытие” их спектров усиливается. В ситуациях значительного “перекрытия” спектров (как это показано на рис. 2), квазиоптимальным методом обработки является эвристический метод согласованной модовой фильтрации одной из мод (фактически, небольшой группы мод близких номеров с учетом частичного пространственного разрешения модовой структуры). Необходимым условием его высокой эффективности является адаптивный выбор той моды (группы мод), кото-

рая обладает наибольшим значением входного ОСШП.

2. Методы пространственной обработки сигналов обладают различной устойчивостью к вариациям параметров среды, обусловленных их природной изменчивостью и погрешностью оперативного контроля их значений. Уровни допустимой априорной неопределенности опорной модели среды, которые определяются заданной величиной потерь усиления АР, для разных методов обработки сигналов оказываются не просто сильно различными, но зависящими от того, по каким именно параметрам модель отлична от реальной среды, и в каких условиях по уровню помех и фоновых шумов осуществляется прием полезного сигнала. Это означает, что универсальные количественные оценки приемлемого (в указанном смысле) качества многопараметрической модели океанической среды, а вместе с ними и требования к системе оперативной океанографии, отсутствуют в принципе.

3. Вместе с тем, такие оценки могут и должны быть получены *in situ* — для заданного морского района (если он корректно характеризуется набором типичных значений своих гидро- и геоакустических параметров), интервалов глубин источников полезного сигнала и помех различной природы, положения АР в канале и частотного диапазона. Все эти факторы сильно, но предсказуемым образом влияют на результат обработки сигналов “через” свое прямое влияние на пространственные спектры принимаемых сигналов, и поэтому должны приниматься в расчет при формулировке требований к средствам оперативной океанографии. Модельные расчеты позволяющие дать количественный прогноз относительно “коридора возможностей” различных методов обработки сигналов в условиях априорной неопределенности модели океанической среды по всей совокупности ее параметров.

4. Термин “согласованная со средой обработка сигналов” применительно к реальному океану, особенно к сложным и многопараметрическим (с точки зрения распространения звука) акваториям мелкого моря, не имеет практического смысла, если не определены количественно уровни погрешностей в оценке параметров опорной модели среды, претендующей на такое согласование, и для конкретных методов обработки сигналов. По нашему мнению, основная сложность проблемы заключается не в том, что не работает (плохо работает) сама идея согласования обработки со средой [4], а в том, что ее применимость принципиально ограничена требованиями к объему и качеству оперативной информации о реальной морской среде, и эти требования весьма вариативны.

В завершение отметим, что анализ влияния априорной неопределенности модели морской среды в данной работе ограничен рассмотрением

эффективности пространственной обработки сигналов единственно по критерию выходного ОСШП и определяемого им антенного выигрыша. Вместе с тем, практически важным подобное исследование является и в другой постановке, когда критерий эффективности обработки определяется качеством оценки неизвестных параметров источника полезного сигнала, прежде всего, его координат — в постановке задачи локализации удаленного источника [3–7]. По существу, эти два критерия не противоречат друг другу (невозможно оценить параметры слабого сигнала, если он достоверно не обнаружен на фоне помех и шумов с достаточным для этого усилением), однако, оценки соответствующих требований к качеству априорной информации о среде могут быть при этом различными, что является предметом отдельного рассмотрения.

Работа посвящена светлой памяти наших коллег, недавно ушедших из жизни — Александра Геннадьевича Сазонтова и Ивана Паисиевича Смирнова. Сотрудничество и общение с ними всегда было стимулирующим, продуктивным и комфортным.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00383, <https://rscf.ru/project/20-19-00383/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко В.В., Родионов А.А., Ванкевич Р.Е. Методические основы построения систем оперативной океанографии в приложении к задачам подводного наблюдения // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14. № 3. С. 4–19.
2. Коваленко В.В., Селезнев И.А. Оперативная океанография в интересах акустического подводного наблюдения // *Гидроакустика*. 2023. Вып. 53(1). С. 89–106.
3. Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Mikhalevsky P.N. An overview of matched field methods in ocean acoustics // *IEEE J. Oceanic Engin.* 1993. V. 18. № 4. P. 401–423.
4. 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.
5. Малышкин Г.С., Сидельников Г.Б. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов (обзор) // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60. № 5. С. 526–545.
6. Сазонтов А.Г., Малеханов А.И. Согласованная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (обзор) // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 2. С. 233–253.
7. Малеханов А.И., Коваленко В.В., Никитин Д.А., Сазонтов А.Г., Сергеев В.А. Согласованная со средой обработка акустических сигналов в подводных звуковых каналах: состояние исследований, оценки эффективности, перспективы // *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: Труды XVI Всерос. конф.* СПб.: Политех—Пресс, 2022. С. 15–21.
8. Малеханов А.И., Смирнов И.П. Пространственная обработка акустических сигналов в каналах мелкого моря в условиях априорной неопределенности: оценки потерь эффективности // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 4. С. 427–439.
9. Малеханов А.И. Точность априорной информации об океанической среде как фактор эффективности пространственной обработки гидроакустических сигналов // *Гидроакустика*. 2023. Вып. 53(1). С. 7–22.
10. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 189 с.
11. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
12. Ильичев В.И., Калужный А.Я., Красный Л.Г., Лаптий В.Ю. Статистическая теория обнаружения гидроакустических сигналов. М.: Наука, 1992. 415 с.
13. Малышкин Г.С., Мельканович В.С. Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы в гидроакустике. СПб.: ГНЦ РФ АО “Концерн” ЦНИИ “Электроприбор”, 2022. 268 с.
14. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 370 с.
15. Малеханов А.И. Некогерентная пространственная фильтрация мод в случайно-неоднородном океаническом волноводе // *Акуст. журн.* 1992. Т. 38. № 5. С. 898–904.
16. Labutina M.S., Malekhanov A.I., Smirnov A.V. Estimation of the efficiency of the vertical antenna arrays in underwater sound channels // *Physics of Wave Phenomena*. 2016. V. 24. № 2. P. 161–167.
17. 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.
18. 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. № 4. С. 540–550.
19. Сазонтов А.Г., Смирнов И.П. Определение направления на источник в акустическом волноводе и предел углового разрешения // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67. № 2. С. 174–184.
20. 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.
21. 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. Meet. Acoust. (POMA)*. 2021. V. 44. № 055005. P. 1–12.
22. Малеханов А.И., Таланов В.И. Об оптимальном приеме сигналов в многомодовых волноводах // *Акуст. журн.* 1990. Т. 36. № 5. С. 891–897.
23. Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Таланов В.И. Моделирование оптимальной пространственной обработки сигналов в подводных звуковых каналах // *Акуст. журн.* 1992. Т. 38. № 6. С. 1044–1051.
24. 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.