

**ОЦЕНКА УРОВНЯ ФОНОВОГО ШУМА С ПОМОЩЬЮ
ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ
НА ФОНЕ ПРОСТРАНСТВЕННО НЕКОРРЕЛИРОВАННОЙ
И СТРУКТУРНОЙ ПОМЕХ**

© 2013 г. А. С. Иваненков, А. А. Родионов, В. И. Турчин

*Институт прикладной физики РАН
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46**E-mail: ivanenkov@appl.sci-nnov.ru*

Поступила в редакцию 17.01.2012 г.

Предложен и экспериментально апробирован метод определения уровня изотропного акустического шума моря с помощью горизонтальной антенной решетки в присутствии как пространственно некоррелированной помехи, так и помехи со сложной пространственной структурой. Алгоритм основан на аппроксимации пространственного спектра Кейпона принятого сигнала с помощью модельного спектра Кейпона для суммы изотропного шума и некоррелированной помехи. С помощью численного моделирования исследована зависимость точности предложенного метода от мощности помех, расстояния от антенной решетки до источников структурной помехи, а также от количества источников структурной помехи. Показано, что использование спектра Кейпона обеспечивает существенное подавление мощного источника структурной помехи, расположенного вблизи антенной решетки. Эффективность предложенного метода подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: шумы моря, адаптивные антенные решетки, структурная помеха, спектральная оценка Кейпона.

DOI: 10.7868/S0320791913020056

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных параметров при оценке дальности действия различных гидроакустических комплексов является уровень фонового акустического шума моря [1–3]. Характеристики шумов могут меняться в зависимости от времени и места. Они могут различаться в разных водных акваториях, изменяться в зависимости от времени года, погодных условий и т.п. В связи с этим задача оперативного измерения характеристик шумов моря является весьма актуальной. Чаще всего гидроакустические комплексы содержат решетки гидрофонов, которые и могут использоваться для измерения текущего уровня акустического шума. В данной работе будет рассматриваться задача определения уровня шумов моря с помощью линейной эквидистантной антенной решетки (АР).

В отсутствие сосредоточенных источников шума (судов, береговых механизмов и т.п.) и прочих помех задача оценки уровня шумом моря может быть решена с помощью известных методов обработки сигналов. Однако на практике антенная решетка может находиться вблизи судна, не-

сущего гидроакустический комплекс, либо может быть установлена непосредственно на борту судна, которое является источником интенсивной гидроакустической помехи, искажающей результаты измерений [4]. Кроме того, существенный вклад в суммарную мощность измеряемого сигнала могут вносить собственные шумы приемных элементов и гидродинамическая помеха, возникающая при движении судна [5]. Эти обстоятельства требуют разработки специальных методов для оценки уровня шумов моря. В настоящей работе предлагается один из возможных методов, основанный на использовании так называемой спектральной оценки Кейпона [6], позволяющей в большой степени отстроиться от мешающих сигналов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При определении характеристик акустической помехи будем использовать следующую модель принимаемого сигнала. Временной отсчет с номером j -го сигнала на выходе горизонтальной антенной решетки после узкополосной фильтрации

на частоте f_0 можно представить в виде вектора размерности $N \times 1$, включающего три компоненты:

$$\mathbf{x}_j = \tau_j + \xi_j + \mathbf{s}_j, j = 1, \dots, J, \quad (1)$$

где N – число гидрофонов, J – количество временных отсчетов, τ_j – компонента, соответствующая шуму моря, ξ_j – компонента, соответствующая независимым на гидрофонах шумам (электрические и гидродинамические¹ шумы), \mathbf{s}_j – структурная помеха, обусловленная работой внутренних механизмов судна, на котором установлена приемная решетка. Предполагается, что компоненты (1) являются гауссовыми процессами с нулевым средним. Будем считать, что шумы моря обладают достаточно слабой анизотропией в горизонтальной плоскости, и в дальнейшем будем полагать компоненту τ_j полностью изотропной. При этом ее корреляционная матрица представляется в следующем виде² [7]:

$$\langle \tau_j \tau_j^H \rangle = \sigma_i^2 \mathbf{T}, \text{ где } \mathbf{T} = \left\| \frac{\sin(kd(n-m))}{kd(n-m)} \right\|_{n,m=1,\overline{N}},$$

$(\cdot)^H$ означает эрмитово сопряжение, σ_i^2 – мощность изотропной помехи в рассматриваемой полосе частот, d – межэлементное расстояние антенны, $k = 2\pi f_0/c$ – волновое число, c – скорость звука в воде. Корреляционная матрица некоррелированной компоненты пропорциональна единичной: $\langle \xi_j, \xi_j^H \rangle = \sigma_0^2 \mathbf{I}$, где σ_0^2 – мощность пространственно некоррелированной помехи. Корреляционная матрица структурной помехи в общем случае неизвестна, поскольку неизвестно, какие именно механизмы ее порождают и как распределяются по корпусу сторонние источники помехи. При оценке погрешности, вносимой структурной помехой в результат измерений шумов моря, можно, однако, воспользоваться моделью в виде набора из L точечных источников, распределенных по объему корабля [8]. В этом случае корреляционная матрица структурной помехи может быть представлена в следующем виде:

$$\mathbf{R}_s = \langle \mathbf{s}_j \mathbf{s}_j^H \rangle = \sigma_s^2 \alpha^2 \sum_{l=1}^L p_l \mathbf{a}_l \mathbf{a}_l^H,$$

где σ_s^2 – мощность структурной помехи, $\mathbf{a}_l = \left\| r_{n,l}^{-1} \exp(ikr_{n,l}) \right\|_{n=1,\overline{N}}$ – вектор направлений точеч-

ного источника, $r_{n,l}$ – расстояние от l -го источника до n -го гидрофона, p_l – относительные мощности

точечных источников $\sum_l p_l = 1$, $\alpha = \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L r_{0,l}^{-1} \right)^{-1}$ – нормировка мощности, учитывающая конечное расстояние до источников структурной помехи, $r_{0,l}$ – расстояние от l -го источника до центра антенной решетки. В результате корреляционная матрица суммарного вектора (1) будет равна

$$\mathbf{R} = \sigma_i^2 \mathbf{T} + \sigma_0^2 \mathbf{I} + \sigma_s^2 \alpha^2 \sum_{l=1}^L p_l \mathbf{a}_l \mathbf{a}_l^H. \quad (2)$$

В случае, когда антенная решетка обладает заполненной апертурой, то есть выполняется условие $d \leq \lambda/2$, а структурная помеха отсутствует, наиболее естественным способом оценки величин σ_i^2, σ_0^2 является построение пространственного спектра принятого сигнала:

$$f_0(s_0) = N^{-1} \mathbf{a}(s_0)^H \mathbf{R}_x \mathbf{a}(s_0), \quad (3)$$

где $\mathbf{a}(s_0) = \left\| \exp(ikx_n s_0) \right\|_{n=1,\overline{N}}$ – вектор направлений плоской волны, $x_n = (n - (N+1)/2)d$ – координата n -го гидрофона, s_0 – синус пеленга плоской волны, $\mathbf{R}_x = J^{-1} \sum_{j=1}^J \mathbf{x}_j \mathbf{x}_j^H$ – выборочная корреляционная матрица принятого сигнала. На рис. 1а сплошной линией показан пример такого спектра, построенного для матрицы (2) при $\sigma_i^2 = 10, \sigma_0^2 = 3, \sigma_s^2 = 0, d = 1.5 \text{ м}, f_0 = 200 \text{ Гц}, N = 32$.

Если структурная помеха отсутствует, величина пространственного спектра в зависимости от синуса пеленга плоской волны может быть записана

$$\text{в виде } f_0(s_0) = \frac{\sigma_i^2}{N} \sum_{l=-N+1}^{N-1} (N - |l|) \exp(iklds_0) \frac{\sin(\kappa ld)}{\kappa ld} +$$

σ_0^2 . Используя данное выражение, нетрудно показать, что для остронаправленной АР (при $Nd/\lambda \gg 1$) с заполненной апертурой ($d < \lambda/2$) величина пространственного спектра в области действительных углов $s_0 \in [-1, 1]$ составляет $\sigma_i^2 \lambda / (2d) + \sigma_0^2$, а в области мнимых углов – σ_0^2 . Таким образом, определяя две эти величины по пространственному спектру принятого сигнала, нетрудно найти величины σ_i^2, σ_0^2 . Ситуация меняется при наличии мощного источника структурной помехи: на рис. 1а пунктирной линией приведен пространственный спектр при $\sigma_s^2 = 100$. В модели структурной помехи использовался единственный точечный источник $L = 1$, находящийся на расстоянии четверти длины антенны от ее центра под нулевым углом к нормали. Из рис. 1а видно, что при наличии мощного источника структурной помехи уровень пространственного спектра в области действительных углов сильно возрастает. Нетрудно показать, что величина это-

¹ Независимость гидродинамической помехи в разных точках вдоль направления движения обусловлена временным сдвигом турбулентных пульсаций, которые в достаточно узкой полосе частот можно считать белыми.

² Такая корреляционная функция соответствует так называемой модели дальнего поля помех, на практике может использоваться более подходящая для конкретной ситуации модель.

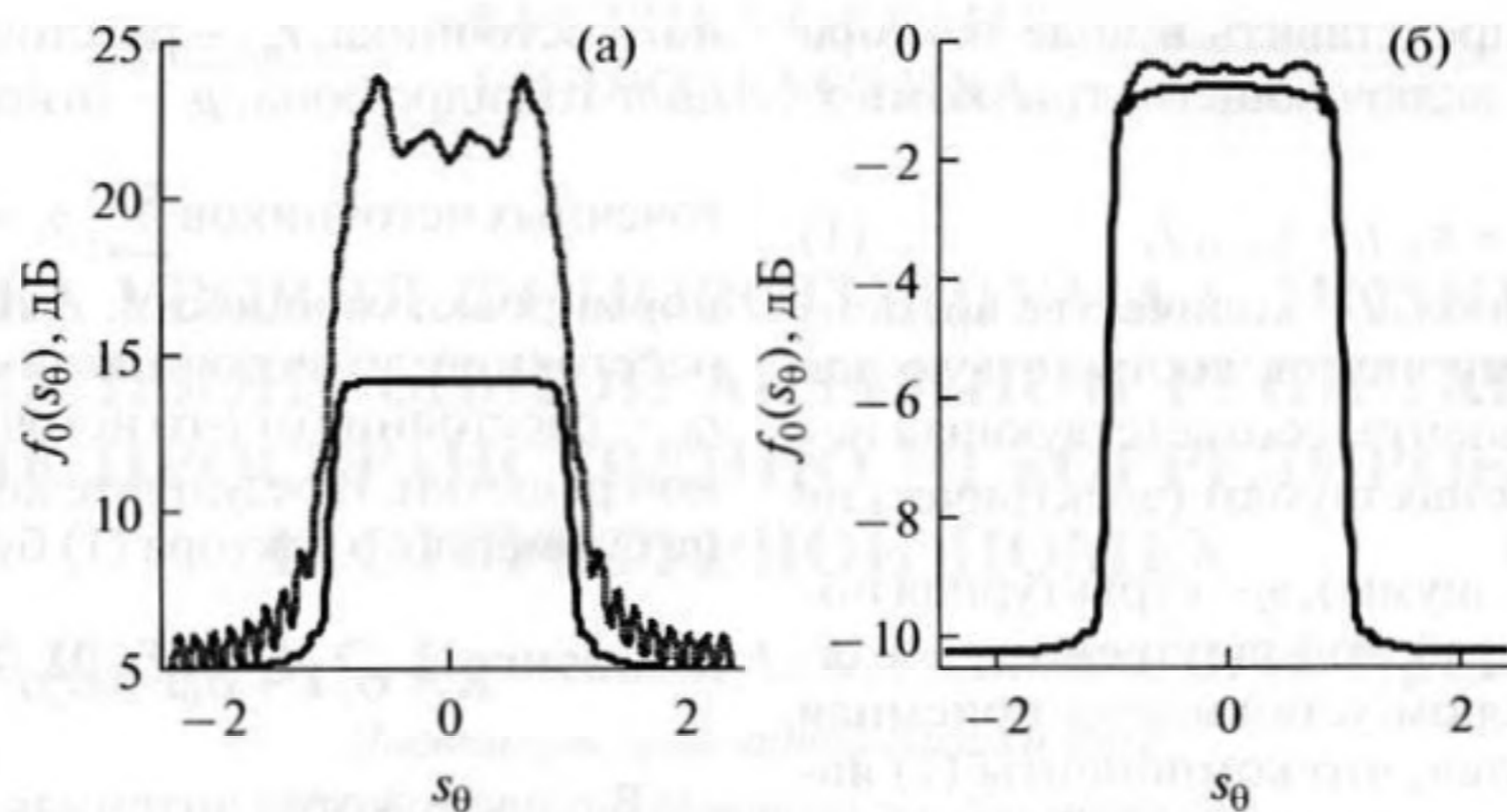


Рис. 1. Пример пространственных спектров (а) и спектров Кейпона (б) сигнала при $\sigma_i^2 = 10$, $\sigma_0^2 = 3$, $d = 1.5$ м, $f_0 = 200$ Гц, $N = 32$; сплошная линия — $\sigma_s^2 = 0$; пунктир — $\sigma_s^2 = 100$.

го роста пропорциональна мощности источника структурной помехи. Таким образом, использовать пространственный спектр (3) для оценки σ_i^2 , σ_0^2 при наличии структурной помехи становится затруднительно. Понятно, что для оценки уровней σ_i^2 , σ_0^2 необходим метод, который был бы слабо чувствителен к мощной структурной помехе. Дальнейшее рассмотрение и будет посвящено одному из таких методов.

МЕТОД ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА

Существует целый класс методов, позволяющих подавлять помеху, модель которой описана в предыдущем разделе. В случае если корреляционная матрица помехи \mathbf{R}_s известна, для построения оценки пространственного спектра вместо весового вектора $\mathbf{a}(s_\theta)$ в (3) должен использоваться весовой вектор $\mathbf{w} = \mathbf{R}_s^{-1}\mathbf{a}$. На практике, однако, чаще всего корреляционная матрица помехи неизвестна. В этом случае можно использовать так называемые адаптивные методы, в которых матрица \mathbf{R}_s заменяется некоторой оценкой. Принципиальная сложность рассматриваемой в данной работе модели (2) заключается в невозможности построения отдельной от полезного сигнала (изотропного акустического шума) оценки матрицы помехи. Тем не менее, в работе [9] на основе регуляризации функции правдоподобия предложен некоторый класс методов и для этого случая. В частности, к этому классу принадлежит известный метод Кейпона. Основным аргументом в пользу выбора метода Кейпона для решения рассматриваемой задачи стал тот факт, что этот метод дает корректные оценки уровней непрерывной части пространственного спектра. Метод Кейпона заключается в нахождении величины

$$f(s_\theta) = \left(\mathbf{a}(s_\theta)^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{a}(s_\theta) \right)^{-1}, \quad (4)$$

которая для модели (2) при отсутствии структурной помехи дает кривую примерно такого же вида, что и приведенная на рис. 1а. Таким образом, по уровням величины (4) в области действительных и мнимых углов можно однозначно оценить σ_i^2 и σ_0^2 . При наличии структурной помехи вид кривой (4) несколько меняется, однако это изменение невелико и, что более важно, стремится к некоторому пределу при увеличении мощности структурной помехи. На рис. 1б представлены пространственные спектры Кейпона (4) для тех же параметров, что и на рис. 1а. Видно, что относительная величина увеличения спектра в области действительных углов существенно меньше, чем при использовании пространственного спектра (3). Понятно, что оценка величин σ_i^2 , σ_0^2 по такому искаженному спектру будет иметь определенную погрешность, однако есть основания предполагать, что эта погрешность будет невелика. Зависимости величины этой погрешности от различных параметров будут приведены ниже.

Вначале сделаем одно замечание по поводу конкретной реализации метода оценки уровней изотропного и некоррелированного шума σ_i^2 и σ_0^2 на основе спектра Кейпона (4). Как сказано выше, в отсутствие структурной помехи оценки σ_i^2 и σ_0^2 выражаются в аналитическом виде через средние уровни спектра Кейпона в области действительных и мнимых углов. Однако некоторая трудность заключается в том, что в эти формулы входят три коэффициента, которые необходимо предварительно численно находить для каждого конкретного параметров задачи (таких как N , f_0 , d и т.п.). Альтернативным способом нахождения оценок σ_i^2 и σ_0^2 является непосредственная аппроксимация

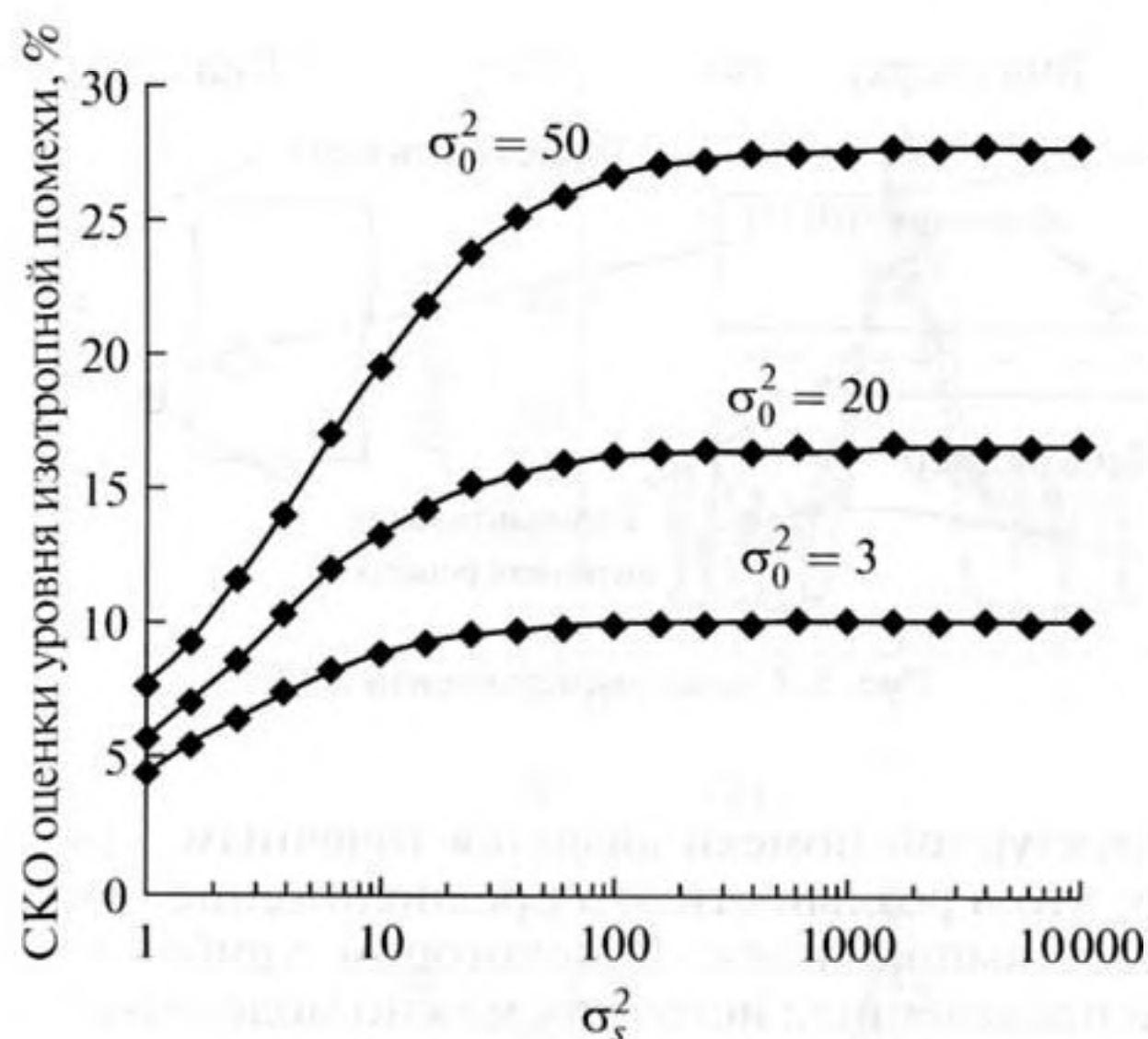


Рис. 2. Зависимости СКО оценки уровня изотропного акустического шума от уровня структурной помехи для трех различных значений уровня некоррелированной помехи $\sigma_0^2 = 3; 20; 50$, мощность изотропного шума $\sigma_i^2 = 10$.

спектра Кейпона, например, методом наименьших квадратов. Рассмотрим подробнее данный способ. Пусть $f(s_\theta)$ – спектр Кейпона (4), построенный по принятой реализации сигнала, а $f_m(s_\theta, \sigma_i^2, \sigma_0^2)$ – спектр Кейпона, построенный для модельной матрицы

$$R_m = \sigma_i^2 T + \sigma_0^2 I. \quad (5)$$

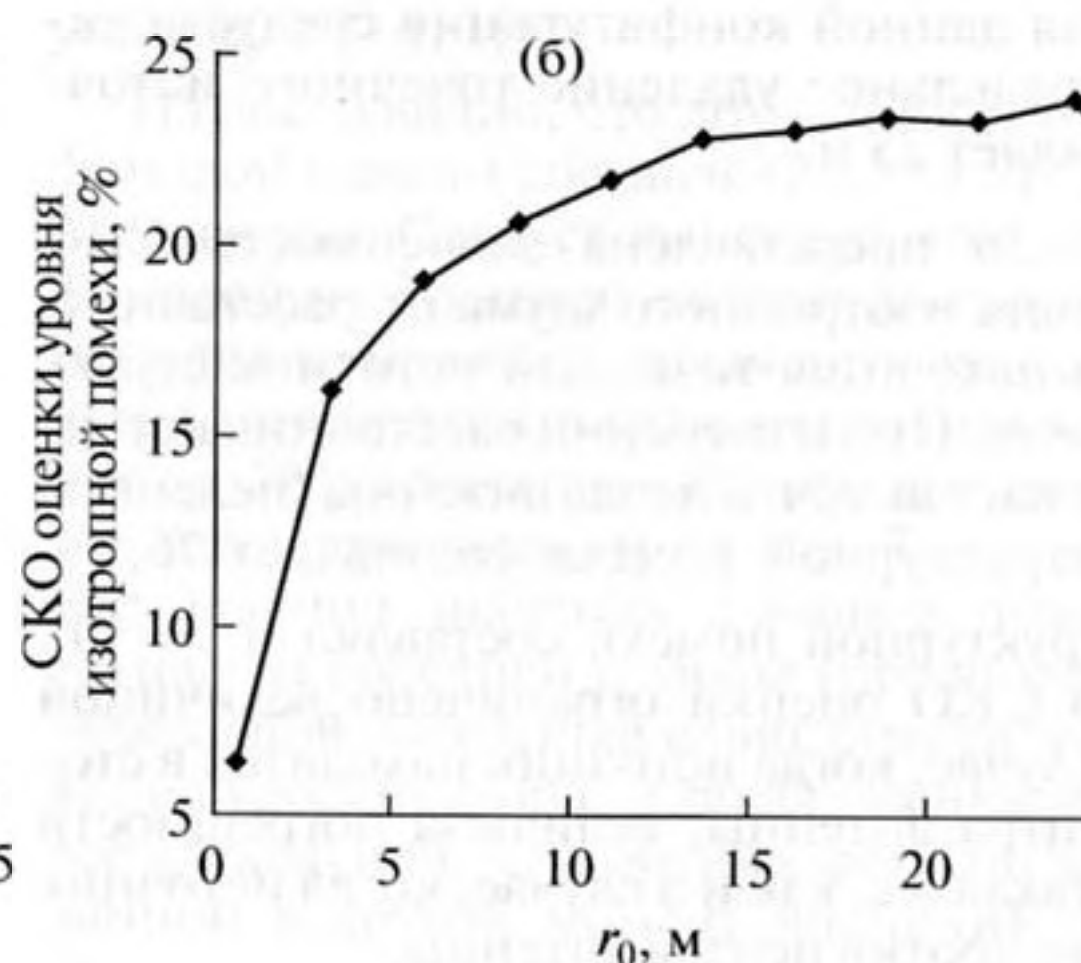
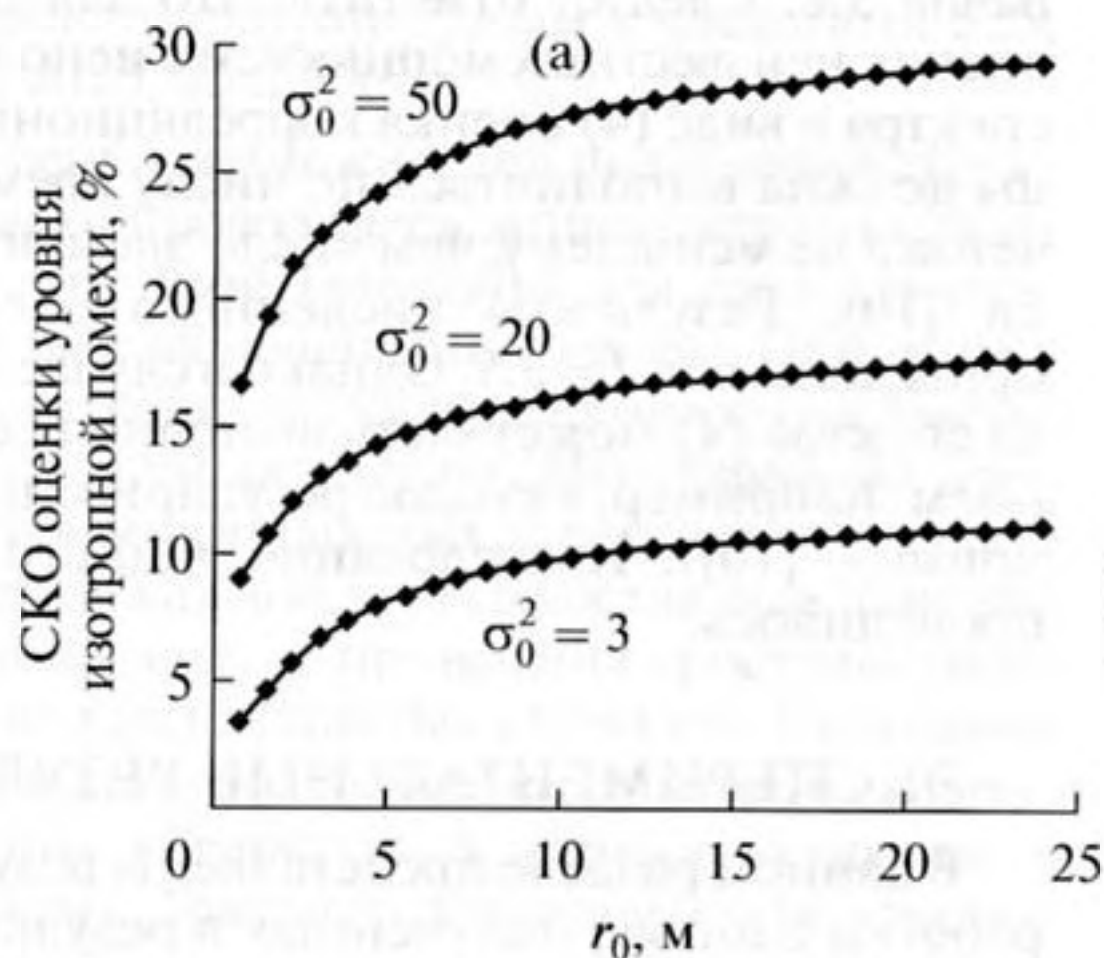


Рис. 3. Зависимости СКО оценки уровня изотропного акустического шума от расстояния, на котором находится точечный источник структурной помехи от центра антенной решетки; $\sigma_i^2 = 10$, уровень структурной помехи составляет $\sigma_s^2 = 10^4$. (а) Представлены результаты для четырех различных значений уровней некоррелированного шума $\sigma_0^2 = 3; 20; 50$; (б) пеленг на источник структурной помехи составляет 76.5° (при изменении расстояния r_0 источник перемещается почти вдоль антенны); $\sigma_0^2 = 50$.

Тогда оценки $\hat{\sigma}_i^2$ и $\hat{\sigma}_0^2$ величин σ_i^2 и σ_0^2 можно найти с помощью минимизации нормы разности пространственных спектров:

$$(\hat{\sigma}_i^2, \hat{\sigma}_0^2) = \arg \min_{(\sigma_i^2, \sigma_0^2)} \int_{-\lambda/(2d)}^{\lambda/(2d)} (f(s_\theta) - f_m(s_\theta, \sigma_i^2, \sigma_0^2))^2 ds_\theta.$$

Ниже приводятся зависимости погрешности определения уровня изотропного акустического шума моря от мощности структурной помехи, мощности некоррелированного шума, положения корабельного источника, количества точечных источников L , из которых состоит структурная помеха. На рис. 2 приведены зависимости среднего квадратического отклонения (СКО) оценки уровня изотропного шума моря от уровня структурной помехи для трех различных значений уровня некоррелированного шума $\sigma_0^2 = 3; 20; 50$. Мощность изотропного шума моря $\sigma_i^2 = 10$. Положение источника структурной помехи выбиралось таким же, как и для рис. 1б.

Видно, что при увеличении мощности структурной помехи СКО оценки уровня изотропного шума стремится к определенному пределу. При увеличении мощности некоррелированной компоненты СКО увеличивается. Если считать приемлемой относительную погрешность 30%, то в качестве предела отношения σ_0^2/σ_i^2 следует принять 5. На рис. 3а представлены зависимости СКО оценки уровня изотропного шума от расстояния, на котором находится точечный источник структурной помехи от центра антенной решетки, для трех различных значений уровней некор-

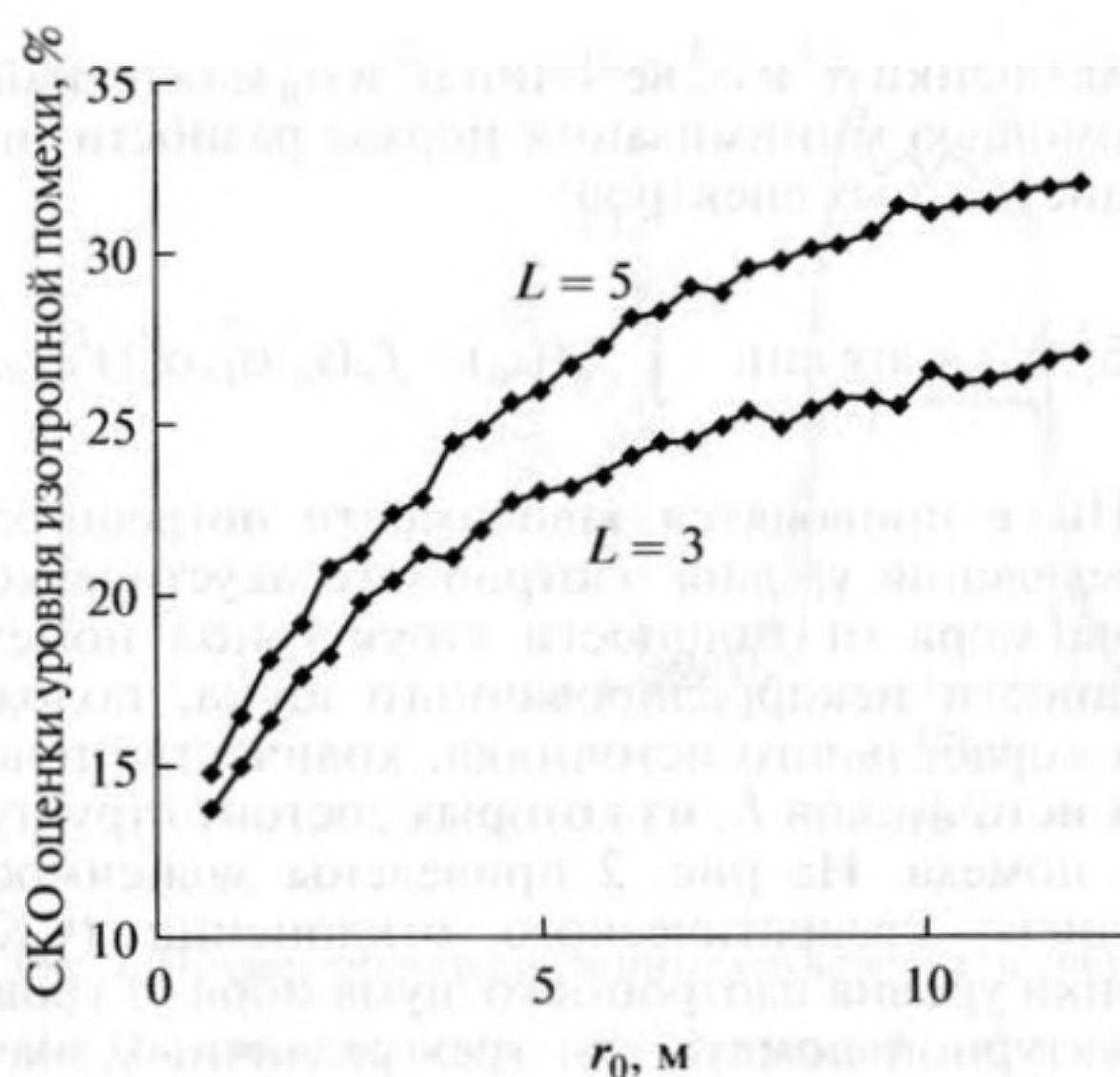


Рис. 4. Зависимости СКО оценки уровня изотропного шума от расстояния, на котором находится центр воображаемого шара (от центра антенной решетки), внутри которого случайным образом располагается набор точечных источников структурной помехи. Приведены результаты для $L=3, 5$. Уровень структурной помехи составляет $\sigma_s^2 = 10^2$.

релированного шума $\sigma_0^2 = 3; 20; 50$. Уровень структурной помехи составляет $\sigma_s^2 = 10^4$. Мощность изотропного шума моря $\sigma_i^2 = 10$. Видно, что при увеличении расстояния до источника (при сохранении приведенной мощности) погрешность оценки увеличивается. Это связано с тем, что метод Кейпона чувствителен к далеким источникам — источникам плоских волн³. Таким образом, для данной конфигурации следует считать, что предельное удаление точечного источника составляет 25 м.

На рис. 3б представлена зависимость СКО оценки уровня изотропного шума от расстояния, на котором находится точечный источник структурной помехи. При изменении расстояния источник перемещается почти вдоль антенны (пеленг на источник структурной помехи составляет 76.5°). Уровень структурной помехи составлял $\sigma_s^2 = 10^4$. Видно, что СКО оценки ограничено величиной 25%, т.е. в случае, когда источник находится в стороне от центра антенны, величина погрешности примерно такая же, как и в случае, когда источник находится напротив центра антенны.

Представленные выше результаты моделирования получены в предположении, что источник

³ Отметим, что такое поведение погрешности при увеличении дистанции до источника не является какой-то общей особенностью методов оценки пространственного спектра. Другие методы могут при этом вести себя по-другому.



Рис. 5. Схема эксперимента 2009 г.

структурной помехи является точечным. Понятно, что в реальности это предположение вряд ли будет выполняться. В некотором приближении распределенный источник можно моделировать с помощью набора точечных источников. На рис. 4 приведены зависимости СКО оценки уровня изотропного шума от расстояния, на котором находится центр воображаемого шара (от центра антенной решетки), внутри которого случайным образом располагается набор точечных источников корабельной помехи. Центр шара находится напротив центра антенны, радиус шара равен 1 м. Уровень структурной помехи составляет $\sigma_s^2 = 10^2$. Мощность изотропного и некоррелированного шума $\sigma_i^2 = 10$ и $\sigma_0^2 = 50$ соответственно. Видно, что увеличение количества источников заметно увеличивает погрешность определения уровня изотропной компоненты. Оценка неизвестных параметров проводилась по 10^3 реализациям случайного сигнала x на выходе АР. При данном числе реализаций случайного процесса относительная ошибка оценки СКО случайной величины приблизительно равна 3%. Следует отметить, что для построения оценок неизвестных мощностей с использованием спектра в виде (4) оценка корреляционной матрицы должна выполняться по числу временных отчетов J не меньшему, чем число элементов решетки [10]. Результаты численного эксперимента приведены для $J = 3N$. Однако в случае $J < N$ оценка спектра (4) может быть выполнена с применением, например, методов регуляризации (см., например, [10]). Исследование данного случая не проводилось.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе представлены результаты обработки данных, полученных в результате натурных экспериментов на Ладожском озере. Рисунок 5 представляет собой схему эксперимента 2009 г., когда горизонтальная антенная решетка из 64 элементов с межэлементным расстоянием $d = 0.19$ м располагалась на глубине десяти метров между двумя дебаркадерами. В одном из дебаркадеров находился широкополосный гидро-

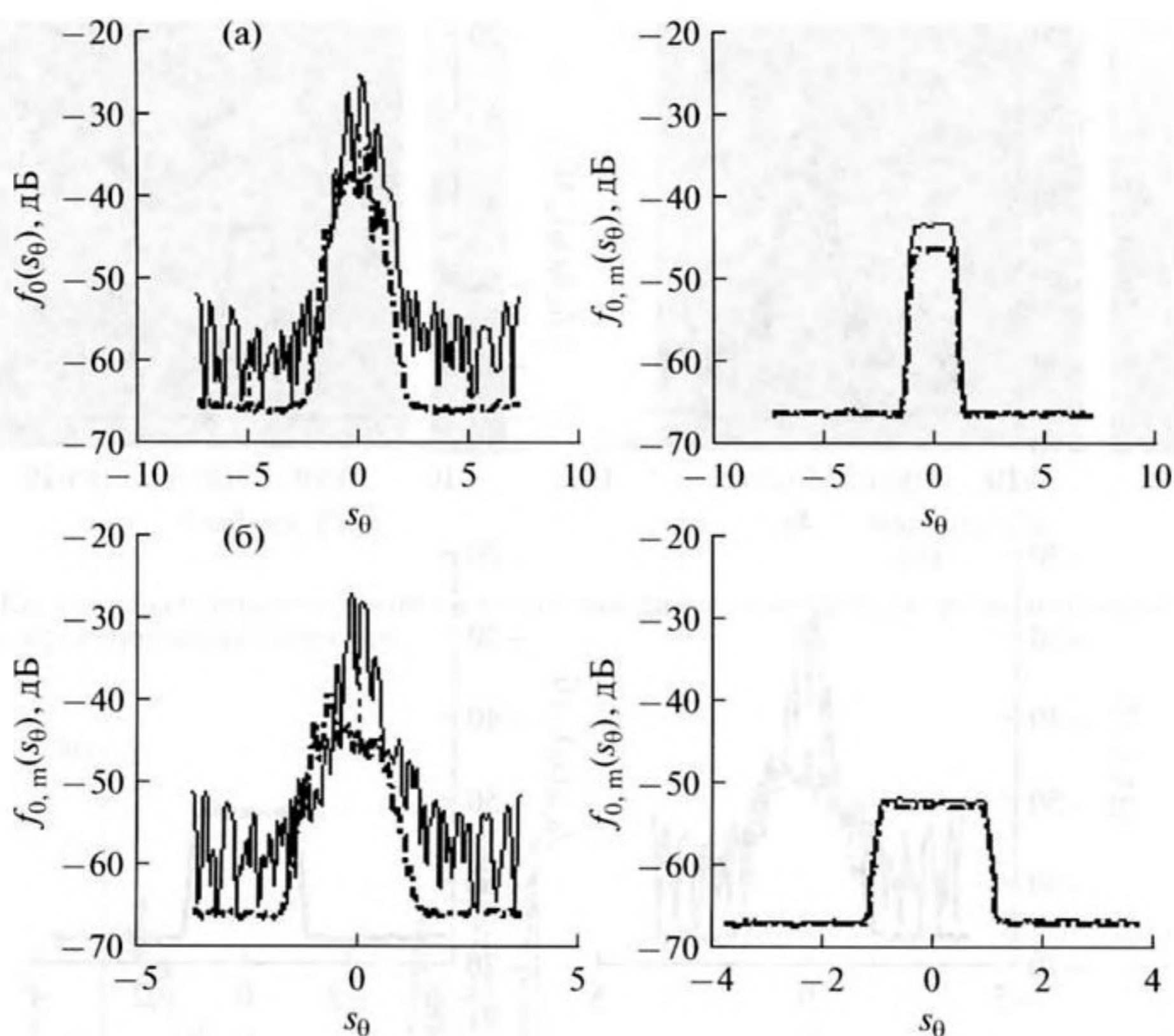


Рис. 6. Пространственные спектры принятых сигналов $f_0(s_\theta)$ (слева) в случае включенного (сплошная линия) и выключенного (штрихпунктирная линия) источника и соответствующие им модельные спектры $f_{0,m}(s_\theta)$ (справа). Последние построены с использованием модельной корреляционной матрицы (5) и оценок мощностей изотропного шума и некоррелированной помехи, полученных по принятым сигналам. (а) $F_c = 525$ Гц; (б) $F_c = 1025$ Гц.

акустический излучатель, имитирующий источник структурной помехи (расстояние от источника до центра антенной решетки составляло несколько метров). Излучаемый источником сигнал являлся политональным с частотами 525; 1025; 1525; 2025; 2525 Гц.

Для проверки возможностей подавления структурной помехи проводилась запись сигналов, принимаемых антенной решеткой для двух случаев: излучатель был включен и выключен. При этом в качестве изотропного акустического шума выступал фоновый шум акватории. Исследования проводились для узкополосных сигналов с полосой 23.84 Гц. Длина каждой записи составляла примерно 17 с. Слева на рис. 6 приведены пространственные спектры $f_0(s_\theta)$ принятых сигналов. Сплошная линия соответствует случаю включенного гидроакустического излучателя, а штрихпунктирная — выключенному. Графики приведены для узкополосных сигналов с центральными частотами $F_c = 525, 1525$ Гц. Для каждого из таких сигналов с помощью метода Кейпона были найдены оценки мощностей изотропного акустического шума и некоррелированной помехи. По найденным оценкам были построены модельные матрицы корреляции (5). Соответствующие им спектры $f_{0,m}(s_\theta)$

изображены справа на рис. 6. Погрешность определения мощности изотропного акустического шума можно оценить по разнице уровней приведенных спектров $f_{0,m}(s_\theta)$ в области действительных углов ($s_\theta \in [-1, 1]$).

Из рис. 6 видно, что погрешность определения фоновой помехи составляет 0.5–3 дБ для различных частот. Следует отметить, что сам уровень фоновой изотропной помехи достаточно быстро менялся во времени, и для двух записей, сделанных с интервалом в несколько минут, мог различаться. Это косвенно подтверждается результатами, представленными на рис. 7, где для точного определения значения фоновой помехи брался сигнал из соседней полосы (предполагается, что небольшой частотный сдвиг практически не влияет на уровень фона, и такая оценка является более адекватной, чем оценка фона по записи, сделанной в другой момент времени). Видно, что совпадение здесь более точное.

В 2010 г. проводился эксперимент, в котором в качестве структурной помехи выступал набор широкополосных вибрационных источников, помещенных внутри сложного объекта, имитирующего носитель гидроакустической антенной решетки. Изучались возможности предложенного

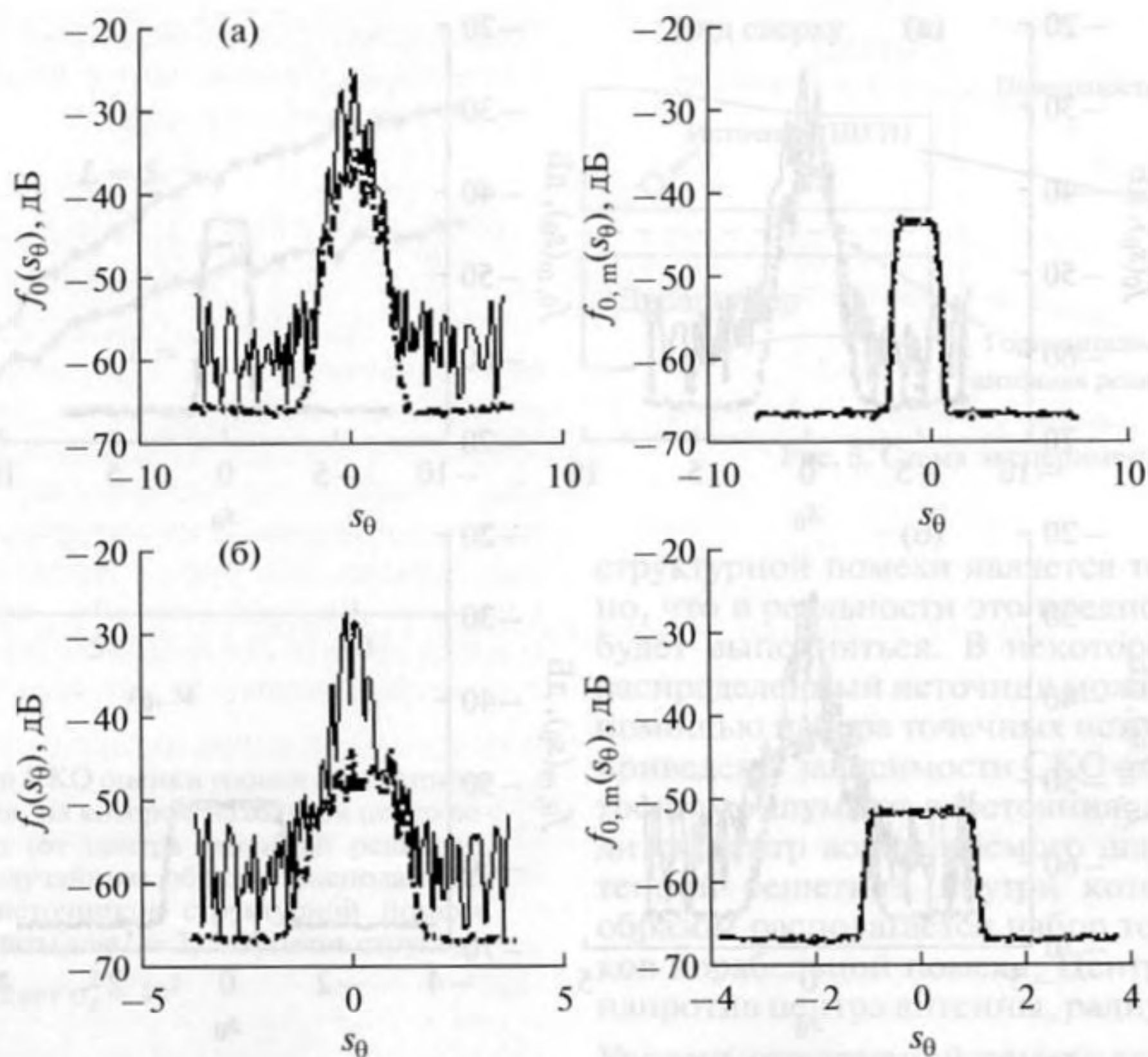


Рис. 7. Пространственные спектры принятых сигналов $f_0(s_\theta)$ (слева) в случае включенного источника и соответствующие им модельные спектры $f_{0,m}(s_\theta)$ (справа). Последние построены с использованием модельной корреляционной матрицы (5) и оценок мощностей изотропного шума и некоррелированной помехи, полученных по принятым сигналам. (а) $F_{c1} = 525$ Гц (сплошная линия), $F_{c2} = 501$ Гц (штрихпунктирная линия); (б) $F_{c1} = 1025$ Гц (сплошная линия), $F_{c2} = 1001$ Гц (штрихпунктирная линия);

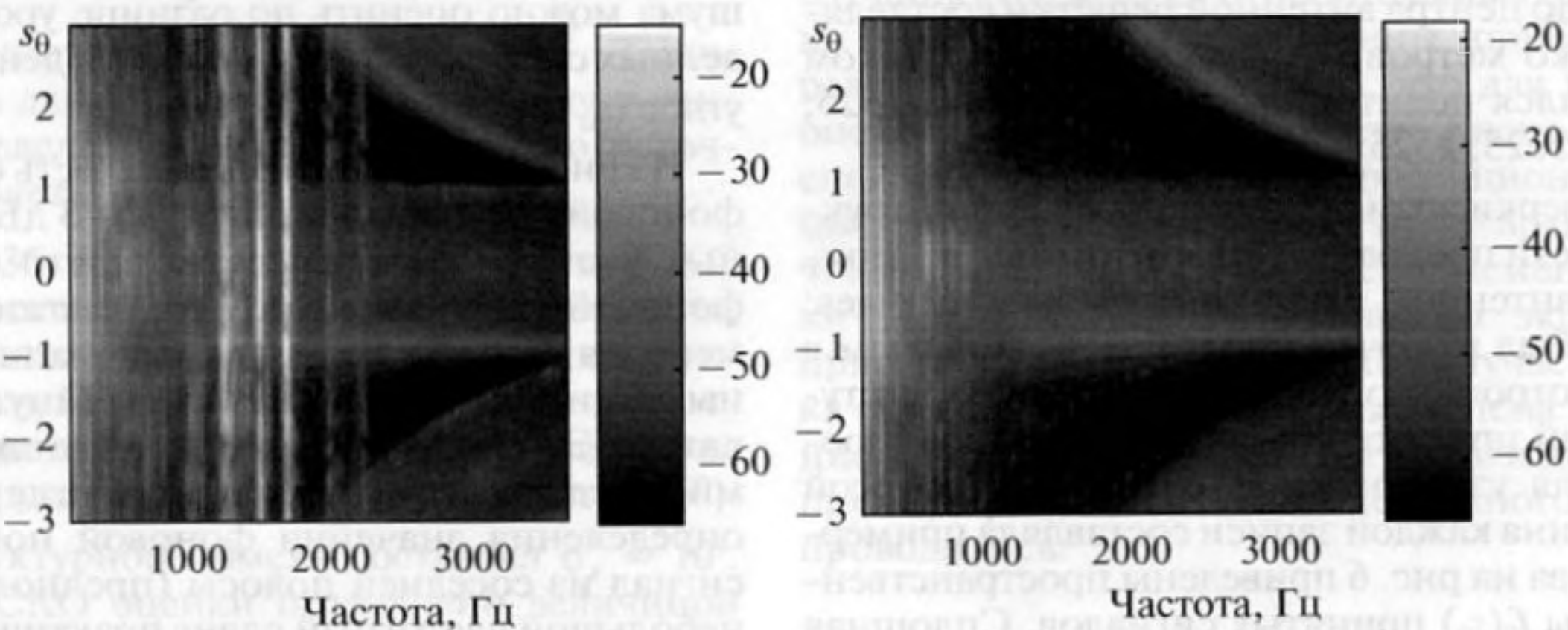


Рис. 8. Пространственные спектры экспериментального сигнала в зависимости от частоты при включенном (слева) и выключенном (справа) широкополосном вибраторе.

метода для достаточно большого диапазона частот. Для этого проводилась обработка большого набора прилегающих друг к другу частотных полос. Ширина полосы фильтрации F_s выбиралась фиксированной. Такой подход позволил постро-

ить зависимость пространственных спектров принимаемых сигналов от частоты. Такие зависимости представлены на рис. 8, 9. На рис. 8 показан обычный пространственный спектр в зависимости от частоты для чисто фонового шума (справа)

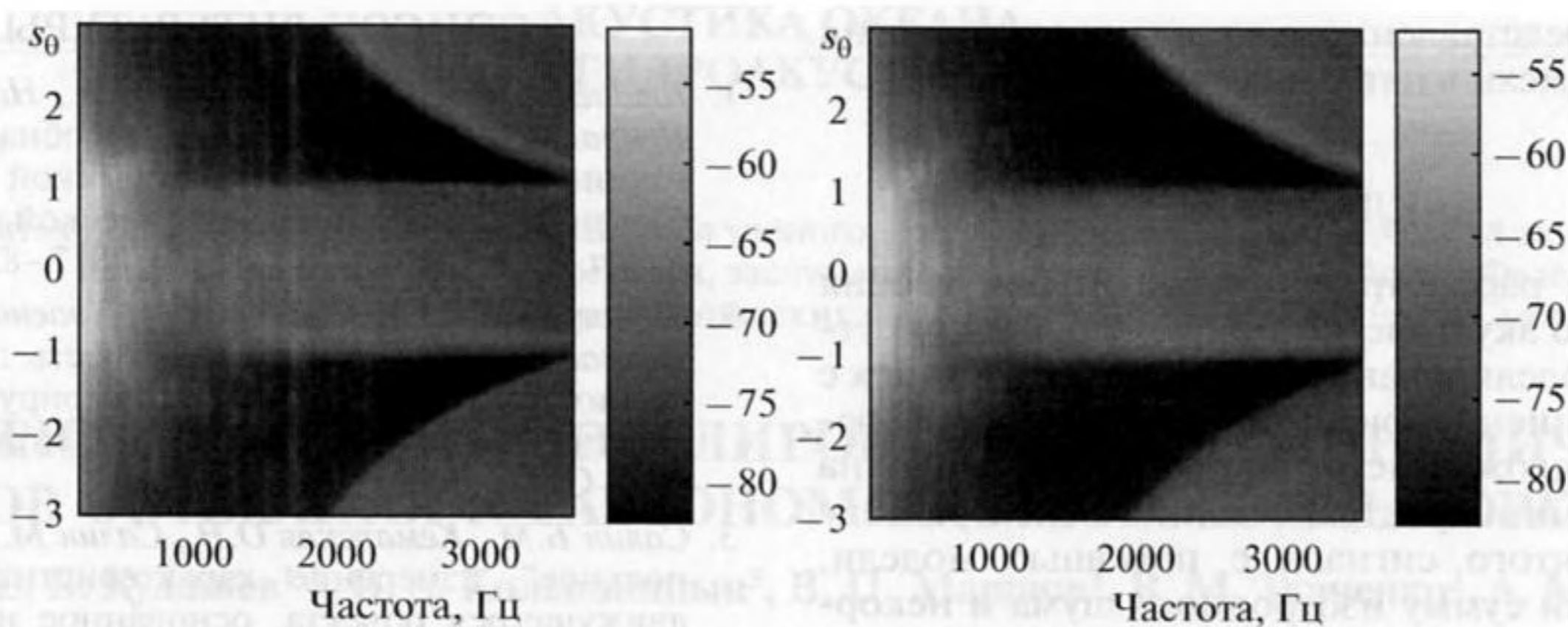


Рис. 9. Спектры Кейпона экспериментального сигнала в зависимости от частоты при включенном (слева) и выключенном (справа) широкополосном вибраторе.

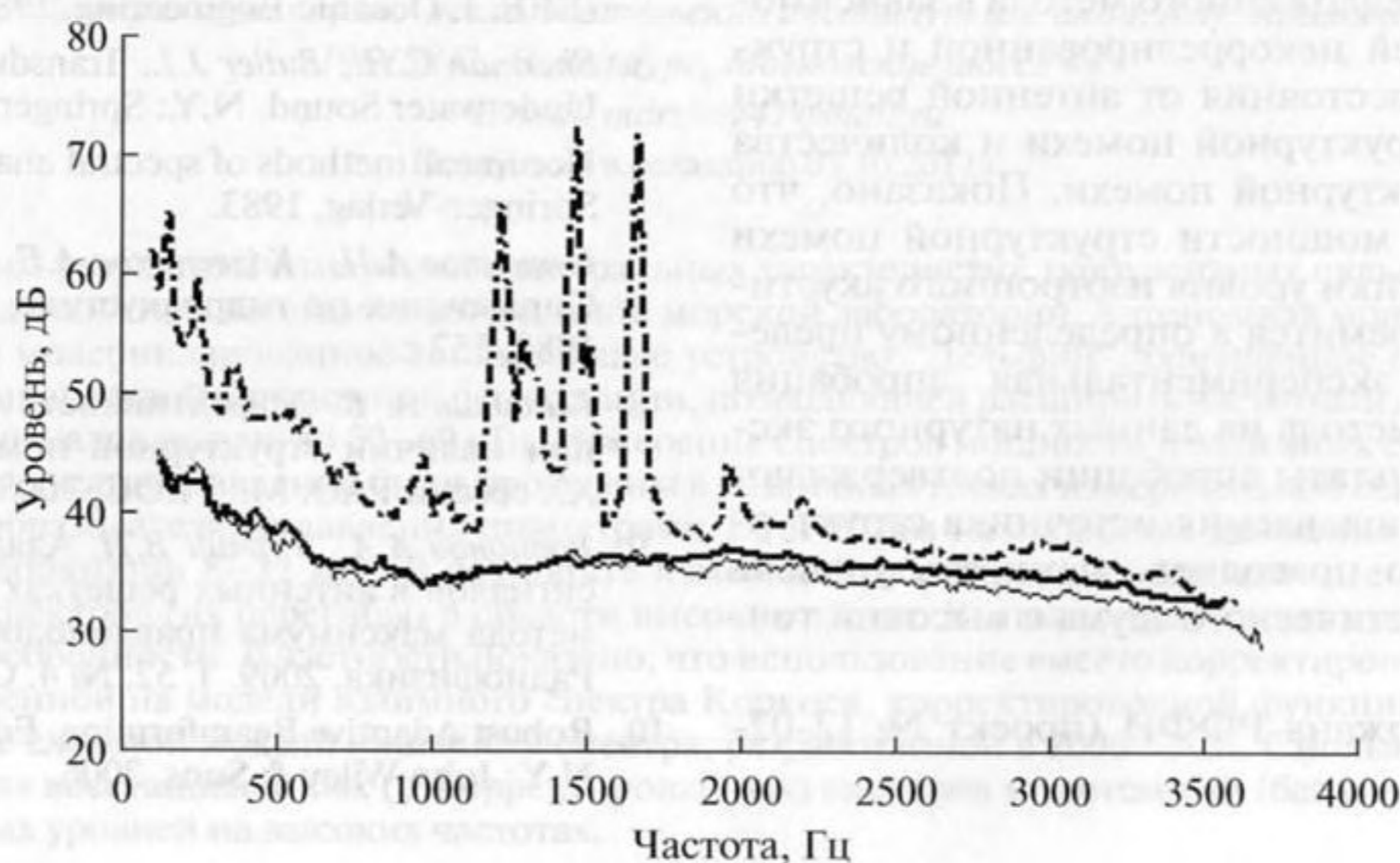


Рис. 10. Графики зависимостей оценок мощности изотропного акустического шума от частоты, полученных по методу Кейпона для фонового сигнала (жирная сплошная линия) и сигнала при включенном широкополосном вибраторе (тонкая сплошная линия). Штрихпунктирной линией показана зависимость, полученная с использованием обычного пространственного спектра при включенном вибраторе.

и при включенном вибрационном источнике (слева) соответственно. Сигнал, излучаемый акустическим вибратором, находился в полосе 1000–2000 Гц. Видно, что работа вибрационного источника приводит к значительному “подъему” спектра принятого сигнала. На рис. 9 представлены соответствующие спектры Кейпона. Видно, что спектр Кейпона принятого сигнала при работающем источнике помехи слабо отличается от спектра Кейпона для чисто фонового сигнала. На рис. 10 представлены три различные зависимости оценки мощности изотропного шума от частоты. Тонкой сплошной линией показана зависимость, полученная с помощью аппроксимации спектра Кейпона при работающем широкополосном вибраторе. Штрихпунктирной линией показана за-

висимость, полученная по тому же сигналу с помощью аппроксимации обычного пространственного спектра. Видно, что разница между представленными зависимостями очень велика (достигает 20 дБ), по этой разнице можно судить о величине подавления сигнала от вибрационного источника. Для оценки погрешности предложенного метода измерения фоновой помехи на рис. 10 жирной сплошной линией приведена зависимость, полученная с помощью аппроксимации спектра Кейпона при выключенном широкополосном вибраторе. По разнице кривых, построенных по сигналам при работающем и выключенном вибраторе, видно, что погрешность предложенного метода не превышает 2 дБ. Приведенные результаты подтверждают эффек-

тивность представленного метода оценки уровня фоновой помехи в натуральных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена задача оценки уровня изотропного акустического шума моря в присутствии некоррелированной и структурной помех с использованием горизонтальной антенной решетки. Предложен метод оценки, основанный на аппроксимации пространственного спектра Кейпона принятого сигнала с помощью модели, включающей сумму изотропного шума и некоррелированной помехи. Показано, что использование спектра Кейпона обеспечивает существенное подавление источника структурной помехи. С помощью численного моделирования исследована точность предложенного метода в зависимости от мощностей некоррелированной и структурной помех, расстояния от антенной решетки до источника структурной помехи и количества источников структурной помехи. Показано, что при увеличении мощности структурной помехи погрешность оценки уровня изотропного акустического шума стремится к определенному пределу. Проведена экспериментальная апробация предложенного метода на данных натурального эксперимента. Результаты апробации подтверждают эффективность подавления источника структурной помехи, что позволяет оценивать уровень изотропного акустического шума с высокой точностью.

Работа поддержана РФФИ (проект № 12-02-31657).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко В.А., Краснописцев Н.В., Наседкин А.В., Некрасов В.Н. Оценка дальности обнаружения источников сигнала гидроакустической системой на базе приемника потока акустической мощности // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 6. С. 817–826.
2. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н. Помехоустойчивость гидроакустических приемных систем, регистрирующих поток акустической мощности // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 5. С. 774–785.
3. Салин Б.М., Кемарская О.Н., Салин М.Б. “Ближнепольное” измерение характеристик рассеяния движущегося объекта, основанное на доплеровской фильтрации сигнала // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 6. С. 802–812.
4. Warren L.R. Hull-mounted sonar/ship design evolution and transition to low-frequency applications // IEEE. J. Oceanic Engineering. 1988. V. 13. № 4.
5. Sherman C.H., Butler J.L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. N.Y.: Springer, 2007.
6. Nonlinear methods of spectral analysis. Ed. Haykin S. Springer-Verlag, 1983.
7. Евтютов А.П., Колесников А.Е., Корепин Е.А. и др. Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 552 с.
8. Гладиллин А. В. Эффективность линейной антенны при наличии структурной помехи // Сб. трудов XX сессии РАО. М.: ГЕОС, 2008. Т. 2. С. 319–323.
9. Родионов А.А., Турчин В.И. Адаптивная обработка сигналов в антенных решетках с использованием метода максимума правдоподобия // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 4. С. 343–354.
10. Robust Adaptive Beamforming. Eds. Li J. and Stoica P. N.Y.: John Wiley & Sons, 2006.