мы. Пределы такого регулирования расширяются по мере роста отношения присоединенной массы к массе колебательной системы преобразователя.

Наличие эффектов увеличения эффективности преобразователей и изменения полосы пропускания при совместной работе преобразователей было подтверждено экспериментально [17]. При этом для случая $N_g=2$ получено возрастание мощности излучения в 4 раза, КПД — в 1,4 раза и расширение полосы пропускания на 30% (рис. 7).

Автор благодарит сотрудников кафедры акустики Г. В. Романова и О. С. Тонаканова, сотрудников Акустического института И. П. Голямину, В. Г. Кириленко и В. А. Пирогова, а также сотрудников ЦНИИ «Гидроприбор» Н. Е. Константинову и В. Н. Кочедыкова за интерес к работе, полезные обсуждения и помощь в проведении экспериментов.

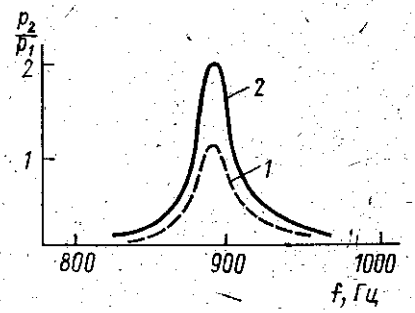

Рис. 7. Частотные зависимости звукового давления, создаваемого одиночным излучателем (*1*) и двумя близко расположенными излучателями (*2*)

ЛИТЕРАТУРА

[1] Бурдик В. С. Анализ гидроакустических систем. Л., 1988. [2] Простаков А. Л. Электронный ключ к океану (гидроакустическая техника сегодня). Л., 1978. [3] Вишин Г. М. Многочастотная радиолокация. М., 1973. [4] Sherman C. H.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1975. SU-22, № 5. P. 281. [5] Woollett R. S.//J. Acoust. Soc. Am. 1980. 68, N 4. P. 1031. [6] Proc. of the Workshop on Low Frequency Sound Sources. Naval Undersea Center TP404, Vol. 1. 1974. [7] Вовк И. В., Гринченко В. Т.//Техническая акустика. 1992. 1, № 2. С. 5. [8] Конева М. А., Кравчун П. Н., Чернышев К. В.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1981. 22, № 4. С. 32. [9] Конева М. А., Кравчун П. Н., Чернышев К. В.//Акуст. журн. 1981. 27, № 5. С. 759. [10] Бриллюэн Л., Пароди М. Распространение волн в периодических структурах. М., 1959. [11] Кравчун П. Н., Чернышев К. В.//Методы синтеза и применение многослойных интерференционных систем: Тр. Всесоюз. науч. семинара. М., 1984. С. 145. [12] Тюлин В. Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука. М., 1976. [13] Кириленко В. Г., Пирогов В. А.//Акуст. журн. 1991. 37, № 2. С. 328. [14] Кравчун П. Н., Чернышев К. В.//VI науч.-техн. конф. по информационной акустике. М., 1981. С. 29. [15] Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М., 1967. [16] Кравчун П. Н.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1993. 34, № 4. С. 97. [17] Кравчун П. Н., Чернышев К. В.//Обработка акустической информации в многоканальных системах. Л., 1988. С. 75.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 6

УДК 534.88

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ НА ИСТОЧНИК МАЛОГАБАРИТНОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ АНТЕННОЙ В УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩИХ ШУМОВ

К. А. Пестов, О. С. Тонаканов

Обобщаются результаты исследований группы сотрудников кафедры по методам приема и обработки сигналов в условиях помех океана и реверберационных помех на основе моделей как известных, так и предлагаемых на кафедре, применитель-

но к многокомпонентному приемнику акустической скорости, находящемуся в одной точке с приемником давления. Рассматривается алгоритм обработки информации. Алгоритм базируется на методе максимального правдоподобия и дает возможность определения направления на источник звука в условиях окружающих шумов. Исследуется работа алгоритма в различных шумовых ситуациях и проводится сравнение с известным методом.

Проведенные в течение ряда лет группой сотрудников кафедры исследования в области векторно-скалярных методов приема гидроакустических сигналов позволили построить некоторые теоретические модели окружающих помех как в режиме низкочастотной активной локации, так и в режиме шумопеленгования и предложить способы приема сигналов на фоне помех. В этих работах рассмотрена модель донной реверберации в мелком море, отличная от ранее известных, изучена структура пространственных корреляционных функций в различных режимах излучения и приема ненаправленными и дипольными гидрофонами [1—4]. При этом показана возможность уменьшения влияния реверберационных помех при корреляционной обработке путем определенной взаимной ориентировки каналов приема и оси излучения. Экспериментальные результаты приема и корреляционная обработка низкочастотной реверберации действительно показали наличие оптимальных случаев расположения дипольных гидрофонов относительно оси излучения [5].

Отдельно вырисовывалась задача, связанная с работой векторно-скалярно приемных устройств в пассивном режиме в условиях шумов океана. Известные модели поверхностного и объемного шумов океана были дополнены эмпирической моделью шумов, образуемых совместным действием нескольких источников [6]. Предлагаемая работа является обобщением ранее выполненных исследований на кафедре и носит в определенном смысле итоговый характер по применению статистических методов обработки гидроакустических сигналов, воспринимаемых векторно-скалярными приемными устройствами в условиях шумов океана.

До настоящего времени мало разработаны оптимальные алгоритмы и оценка качества их работы. Именно восполнению этого пробела и посвящена предлагаемая работа, в которой рассматривается алгоритм определения направления на источник звука и оценивается точность этого определения применительно к различным моделям шумов океана.

Развитие методов акустических измерений допускает применение комбинированных векторно-скалярных приемных устройств, представляющих собой объемный крест Миллса, содержащий три ортогональных приемника компонент колебательной скорости (V_x, V_y, V_z) и один ненаправленный приемник давления P [7]. Известно применение такого акустического модуля как в акустике, так и в сейсмологии, причем одной из очевидных задач является обнаружение сигнала и оценка направления на источник в присутствии помехи. В предположении стационарности источников за время наблюдения можно построить систему оценки углов прихода сигнала, предполагая сигналы и помехи аддитивными гауссовскими процессами.

В работе сотрудников кафедры [8] предложена схема проверки гипотезы о наличии сигнала при многоканальном приеме стационарных за время наблюдения процессов, когда невозможно предварительно оценить мощность чистой помехи, а корреляционные свойства сигналов и помехи считаются частично известными. Для гауссовых сигналов на фоне аддитивных помех критерием проверки является отношение максимумов функций правдоподобия. При этом все независи-

мые векторы $\mathbf{v}$, входящие в выборку V, одинаково распределены и каждый из них состоит из M зависимых случайных величин v_{ij} $(i=\overline{1, T}, j=\overline{1, M})$. Рассмотрение выборки имеет смысл потому, что данные о случайном процессе могут поступать в дискретные моменты времени. Смысл параметра T можно понять, рассматривая выборку процесса, занимающего ограниченную полосу частот с верхней частотой f. В этом случае необходимо каждую секунду брать $2f$ отсчетов, согласно теореме Котельникова. При длительности реализации t с получаем число отсчетов равным $T=2ft$, т. е. произведению полосы сигнала на длительность реализации.

Корреляционная матрица $\mathfrak{R}$ каждого из векторов $\mathbf{v}$ в отсутствие сигнала равна

$$\mathfrak{R}=n\mathfrak{N},$$

где n—неизвестная дисперсия шума, оцениваемая при помощи функции правдоподобия и матрицы реализаций $\mathfrak{W}$:

$$G(n)=\exp\left\{\frac{1}{2n}\operatorname{Sp}[\mathfrak{R}^{-1}\mathfrak{W}]\right\}\Big/[(2\pi n)^{MT/2}\det(\mathfrak{N})^{T/2}],\quad \mathfrak{W}_{ij}=\sum_{k=1}^{T}v_{ik}v_{jk}.$$

Выражение $\operatorname{Sp}(\mathfrak{W})$ является суммой диагональных элементов матрицы $\mathfrak{W}$.

Если же выборка состоит из смеси сигнала и помехи, то для каждого из векторов $\mathbf{v}$ корреляционная матрица имеет вид

$$\mathfrak{R}=n\mathfrak{N}+s\mathfrak{S},$$

где $\mathfrak{S}$ — известная матрица коэффициентов корреляции сигнала, а s — его неизвестная дисперсия. Функция правдоподобия в этом случае записывается в виде

$$G(n,\ s)=\exp\left\{-\frac{1}{2}\operatorname{Sp}(n\mathfrak{N}+s\mathfrak{S})^{-1}\mathfrak{W}]\right\}\Big/[(2\pi)^{MT/2}\det(n\mathfrak{N}+s\mathfrak{S})^{T/2}].$$

Корреляционные матрицы шума или сигнала, уже упомянутые выше, представляют собой таблицы, у которых элемент на пересечении строки с номером i и столбца с номером j равен усредненному по времени произведению помех или сигналов из каналов с номерами i и j:

$$\mathfrak{N}=\langle n_i n_j\rangle,\quad \mathfrak{S}=\langle s_i s_j\rangle.$$

Тот или иной элемент корреляционной матрицы (с номерами i, j) можно получить, вычислив интеграл по всем углам прихода шума от произведения диаграмм направленности (ДН) соответствующих каналов с номерами i, j.

Оценки $\hat{n}$ и $\hat{s}$ должны быть выбраны такими, чтобы обеспечивать максимум функции правдоподобия:

$$\frac{\partial}{\partial n}\ln G(\hat{n},\ \hat{s})=0,\quad \frac{\partial}{\partial s}\ln G(\hat{n},\ \hat{s})=0.$$

Выполнив дифференцирование, авторы работы [8] получили уравнения

$$\operatorname{Sp}[(\hat{n}\mathfrak{N}+\hat{s}\mathfrak{S})^{-1}\mathfrak{N}(\hat{n}\mathfrak{N}+\hat{s}\mathfrak{S})^{-1}\mathfrak{W}/T]-\operatorname{Sp}[(\hat{n}\mathfrak{N}+\hat{s}\mathfrak{S})^{-1}\mathfrak{N}]=0,$$

$$\operatorname{Sp}[(\hat{n}\mathfrak{N}+\hat{s}\mathfrak{S})^{-1}\mathfrak{S}(\hat{n}\mathfrak{N}+\hat{s}\mathfrak{S})^{-1}\mathfrak{W}/T]-\operatorname{Sp}[(\hat{n}\mathfrak{N}+\hat{s}\mathfrak{S})^{-1}\mathfrak{S}]=0.$$

Указанную выше схему получения оценок $\hat{n}$ и $\hat{s}$ можно использо-

вать для построения оптимального алгоритма определения направления на шумовой источник сигнала в условиях помехи разных типов. Предполагая известными дисперсии $\hat{n}$ и $\hat{s}$, обозначим неизвестные параметры — углы прихода сигнала — через $\lambda=\{\theta, \varphi\}$.

Оценка параметра методом максимального правдоподобия должна обеспечивать экстремум функции $C(\mathbf{v}, \lambda)$ по параметру λ, что дает два уравнения:

$$\mathrm{Sp}\,[\mathfrak{R}^{-1}\mathfrak{R}'_\theta\mathfrak{R}^{-1}\mathfrak{W}]=T\,\mathrm{Sp}\,[\mathfrak{R}^{-1}\mathfrak{R}'_\theta],\quad \mathrm{Sp}\,[\mathfrak{R}^{-1}\mathfrak{R}'_\varphi\mathfrak{R}^{-1}\mathfrak{W}]=T\,\mathrm{Sp}\,[\mathfrak{R}^{-1}\mathfrak{R}'_\varphi]. \qquad (a)$$

Решение этой системы уравнений относительно параметров θ и φ дает искомые оценки для углов прихода сигнала.

Практический интерес представляют не только найденные значения оценок параметров, но и точность этих оценок. Для оценки точности используют понятие дисперсии оценки как характеристики предельной точности, которая связана с конечным временем работы системы.

Согласно [9] если параметр λ имеет составляющие $(\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_k)$, то выражение для дисперсии

$$\sigma^2_{\lambda_j}=\mathfrak{U}^{-1}_{jj},\ \text{где}\ \mathfrak{U}_{ij}=-\left\langle\frac{\partial^2}{\partial\lambda_i\lambda_j}\ln(G(\mathbf{v}/\lambda_m))\right\rangle \qquad (1)$$

и λ_m — точка максимума функции правдоподобия $G(\mathbf{v}, \lambda)$.

Обозначая величину произведения полосы сигнала на длительность реализации как $\beta=ft$, запишем

$$\mathfrak{U}_{ij}=\beta\,\mathrm{Sp}\,[\mathfrak{R}^{-1}\mathfrak{R}'_i\mathfrak{R}^{-1}\mathfrak{R}'_j]. \qquad (2)$$

При дальнейшем изложении множитель β будем считать равным 1.

Для расчета корреляционных матриц шума будем считать, что акустический модуль регистрирует звуковое давление P и три компоненты колебательной скорости V_x, V_y, V_z. Поэтому в матрицах в первой строке и первом столбце соответственно будут располагаться члены ($\langle PP\rangle$, $\langle PV_x\rangle$, $\langle PV_y\rangle$, $\langle PV_z\rangle$), а диагональные элементы будут составлены из соответствующих квадратур. Применим данную процедуру к трем моделям шумов океана: объемному, поверхностному и шуму как комбинации поверхностных и удаленных источников [6, 10]. Расчеты показывают, что корреляционные матрицы шума имеют следующий вид:

Объемный шум

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 \end{bmatrix}$$

Поверхностный шум

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 2/3 \\ 0 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/4 & 0 \\ 2/3 & 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}$$

Модель шума двух источников

$$\begin{bmatrix} N_{11} & 0 & 0 & N_{14} \\ 0 & N_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_{33} & 0 \\ N_{41} & 0 & 0 & N_{44} \end{bmatrix}$$

(В дальнейшем каждая матрица умножается на мощность шума n.)

Корреляционные матрицы позволяют аналитически рассчитать дисперсии оценок углов прихода $\hat{\theta}$ и $\hat{\varphi}$ ((1), (2)). Однако получаемые выражения являются чрезвычайно громоздкими и привести их к более простой форме можно, сделав предположение о малости отношения сигнал/шум (по сравнению с единицей) и пренебрегая в матрице $\mathfrak{R}$ корреляционной матрицей сигнала. Приведем конкретное выражение для объемного шума:

$$\sigma^2_\varphi=\left(\frac{n}{s}\right)^2\frac{1}{14\beta\cos^2(\theta)},\quad \sigma^2_\theta=\left(\frac{n}{s}\right)^2\frac{1}{14\beta}. \qquad (3)$$

Выражение (3) наглядно демонстрирует обратную зависимость среднеквадратичного отклонения от отношения сигнал/шум и резкое возрастание дисперсии оценки угла φ при приближении источника сигнала к положению, когда сигналы в каналах X и Y, лежащих в горизонтальной плоскости и определяющих угол φ, стремятся к нулю.

Для модели шума, порождаемого двумя источниками, такие аналитические выражения написать невозможно, так как в корреляционной матрице ненулевые элементы — сложные интегральные выражения. Общим для всех используемых шумовых моделей является наличие анизотропии шума только в вертикальной плоскости (по углу θ), что приводит к угловой зависимости дисперсии оценки только от угла θ.

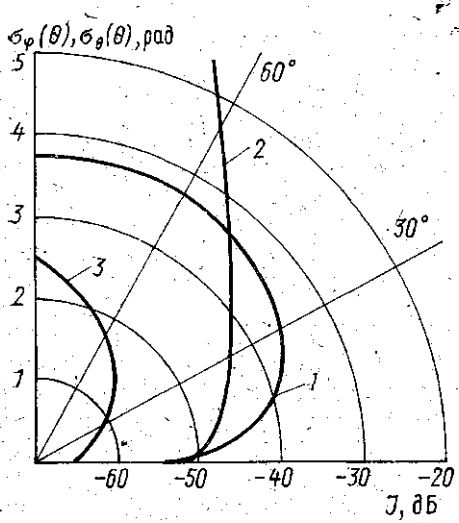

Рис. 1.

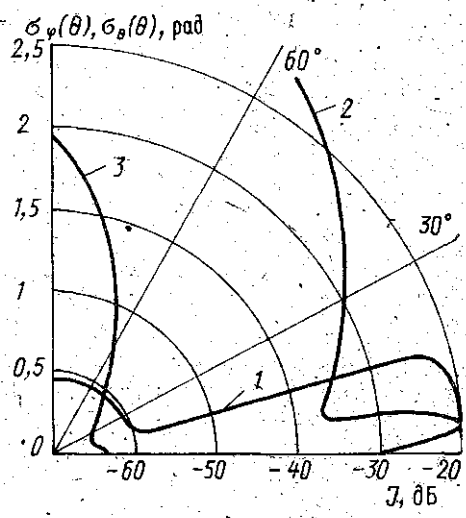

Рис. 2.

Рис. 1. Угловые зависимости дисперсий оценок углов прихода сигнала для модели поверхностного шума при отношении сигнал/шум $s/n=0{,}1$; *1* — диаграмма направленности подводного шума (по мощности) J, *2* — угловая зависимость $\sigma_\varphi(\theta)$, *3* — угловая зависимость $\sigma_\theta(\theta)$

Рис. 2. Угловые зависимости дисперсий оценок углов прихода сигнала для модели шума согласно модели [6]. Превалирует помеха, идущая с горизонтального направления. Отношение сигнал/шум $s/n=0{,}1$, частота приема $f=120$ Гц. Обозначения кривых — как на рис. 1

В соответствии с изложенным выше алгоритмом, работающим по методу максимального правдоподобия, была написана программа для ЭВМ, рассчитывающая дисперсии оценок углов θ и φ и использующая как аналитические, так и численные выражения.

На рис. 1—3 представлены результаты расчетов по программе. Кроме угловых зависимостей дисперсий σ_θ и σ_φ (в радианах) в полярной системе координат строятся ДН подводного шума J для соответствующей модели (в дБ). Как уже упоминалось, параметр β везде принимается равным 1.

На рис. 1 представлены угловые зависимости дисперсий оценок углов прихода сигнала для модели поверхностного шума. Если сигнал занимает полосу 100 Гц и время накопления составляет 10 с, то представленные на рис. 1 кривые $\sigma_\theta(\theta)$ не превзойдут 0,1. Кривые $\sigma_\theta(\varphi)$ испытывают неограниченный рост при $\theta \to 90°$ и, следовательно, разумно брать значения этих кривых в каком-либо ограниченном диапазоне

углов (например, меньше 45°). Введение этого ограничения позволяет говорить практически о равной точности в определении углов θ и φ.

Сравнение между собой кривых $\sigma_\theta(\theta)$ для различных моделей шумов наглядно демонстрирует угловое соответствие уровня ошибки и уровня шума (максимум кривой ошибки для случая шума от двух источников соответствует максимуму ДН соответствующей помехи). Минимальная ошибка для случая поверхностного шума соответствует углу $\theta=0$, т. е. там, где помеха полностью отсутствует. В силу изотропности объемного шума кривая σ_θ также не зависит от угла φ, а кривая $\sigma_\varphi(\theta)$ испытывает рост при увеличении угла θ из-за падения величины полезного сигнала в каналах X и Y.

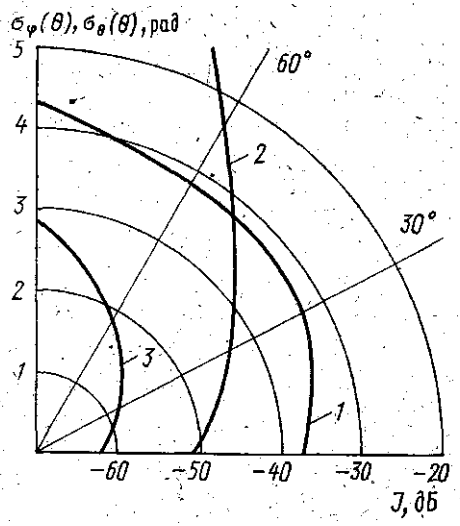

Рис. 3. Угловые зависимости дисперсий оценок углов прихода сигнала для модели шума согласно модели [6]. Помеха, идущая с горизонтального направления, сравнима с поверхностным шумом. Отношение сигнал/шум $s/n=0{,}1$, частота приема $f=800$ Гц, скорость ветра над поверхностью акватории $v=18$ м/с. Обозначения кривых — как на рис. 2

Связь между угловой зависимостью дисперсии и ДН шума иллюстрируют рис. 2, 3. Здесь моделируются две ситуации — помеха, идущая в основном с горизонта, и более равномерное распределение шума в диапазоне углов от 0 до 90°. Изменение вида ДН подводного шума достигалось путем изменения параметров в модели, взятой из работы [6]. При этом как мощности источников сигнала, так и интегральные мощности помехи оставались неизменными. В такой ситуации заметно уменьшение точности определения угла φ в диапазоне $15°>\theta>0$, так как именно в этом диапазоне приходит наиболее интенсивная составляющая помехи. В то же время точность определения угла θ значительно выше в случае помехи, приходящей с горизонта, так как в определении угла θ наибольшую роль играет канал Z, наименее подверженный воздействию помех такого рода. Можно заключить, что результат работы рассматриваемой системы связан не только с интегральным отношением сигнал/шум, но и с конкретным угловым спектром шума.

Информация о зависимости точности определения углов в зависимости от отношения сигнал/шум отображена на рис. 4, 5. На этих рисунках показано семейство кривых в присутствии поверхностного шума и шума удаленного судоходства. Наглядно демонстрируется обратная зависимость уровня ошибки от отношения сигнал/шум и связь между угловым распределением ошибок и видом диаграммы направленности шума.

Весьма интересно сравнить возможности предлагаемого метода с ранее известными, использующимися для определения угловых координат. Ниже приводится пример одного из них [11].

Приемник градиента давления, содержащий в одном сферическом корпусе три ортогональных приемных элемента, позволяет регистрировать вертикальную V_z и две горизонтальные составляющие

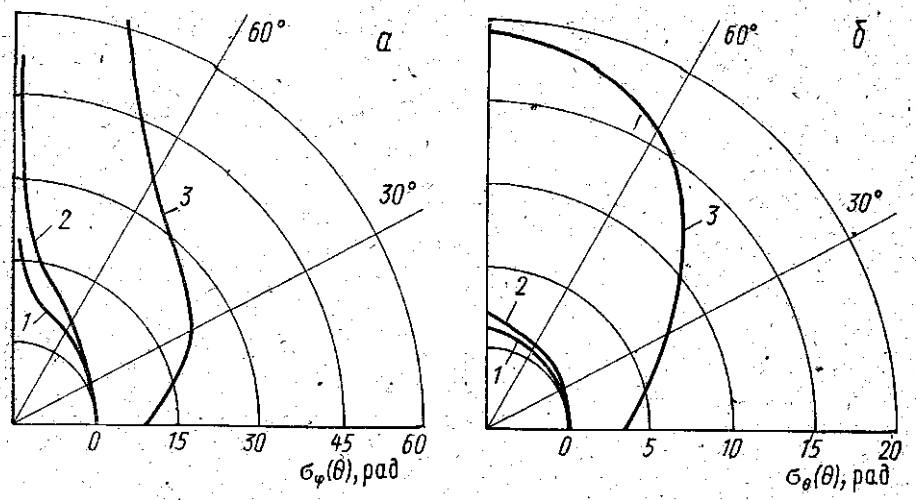

Рис. 4. Семейство угловых зависимости дисперсий оценок углов прихода сигнала для модели поверхностного шума: *а* — $\sigma_\varphi(\theta)$, *б* — $\sigma_\theta(\theta)$. Параметр — отношение сигнал/шум $s/n=1$ (*1*); 0,1 (*2*) и 0,01 (*3*)

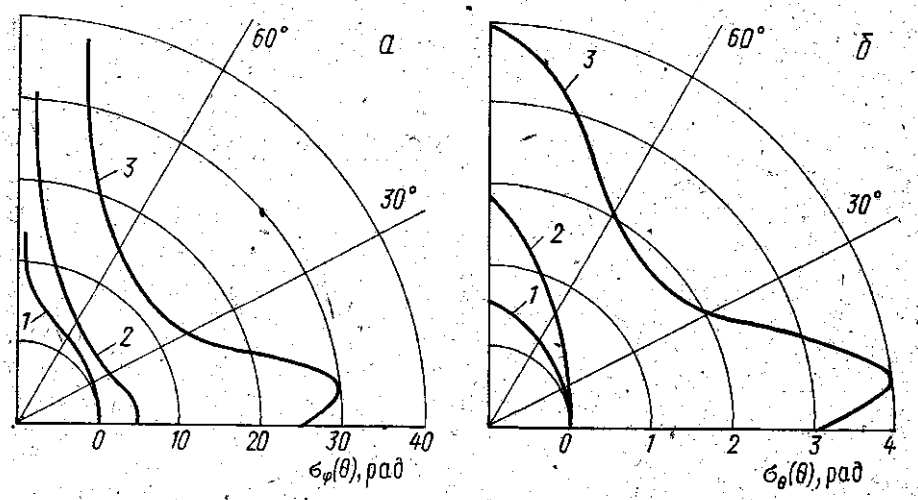

Рис. 5. Семейство угловых зависимости дисперсий оценок углов прихода сигнала согласно модели [6]: *а* — $\sigma_\varphi(\theta)$, *б* — $\sigma_\theta(\theta)$. Превалирует помеха, идущая с горизонтального направления, частота приема $f=120$ Гц. Параметр — отношение сигнал/шум. Обозначения кривых — как на рис. 4

скорости V_x и V_y. Если предположить, что пространственный октант, откуда приходит сигнал, известен заранее (либо определен с помощью дополнительного приемника звукового давления), то можно сформировать простую систему определения координат, основанную на измерении квадратов модулей вертикальной ($Z=|V_z|^2$) и горизонтальных ($X=|V_x|^2$, $Y=|V_y|^2$) составляющих колебательной скорости. Будем рассматривать сигнал мощностью s, приходящий на фоне объемного шума мощностью n. Во введенной ранее системе координат справедливо соотношение

$$\operatorname{ctg}^2(\varphi)=\frac{X}{Y}=\frac{s_x/n+n_x/n}{s_y/n+n_y/n},\qquad \operatorname{ctg}^2(\theta)=\frac{X+Y}{Z}=\frac{s_x/n+n_x/n+s_y/n+n_y/n}{s_x/n+n_x/n}. \tag{4}$$

Рассчитаем предельную точность оценки углов прихода по методу (4) и сравним с аналогичными выражениями, полученными ранее по методу максимального правдоподобия. Предположим, что уравнения (4) обеспечивают экстремум некоторой функции правдоподобия Q:

$$\frac{\partial \ln(Q)}{\partial \varphi} = -X \sin^2(\varphi) + Y \cos^2(\varphi) \frac{\partial \ln(Q)}{\partial \theta} =$$

$$= -(X+Y)\sin^2(\theta) + Z\cos^2(\theta). \qquad (5)$$

Полагая производные (5) равными нулю, тем самым мы получаем уравнения (4).

Для того чтобы получить дисперсии оценок $\sigma^2_{1\varphi}$ и $\sigma^2_{1\theta}$, применим описанную выше процедуру дифференцирования и усреднения (1), в результате чего получаем новую матрицу $\mathfrak{U}_1$, обратив которую, и найдем величины соответствующих дисперсий. Матрицу $\mathfrak{U}_1$ возможно представить как сумму двух матриц, в первую из которых входят члены, зависящие от отношения сигнал/шум, а во вторую — члены, не зависящие от этого отношения. Элементы второй матрицы представляют собой систематические ошибки, вносимые в оценки параметров наличием шума и определением углов прихода сигнала по энергетическому «центру тяжести» помехи. Эта ошибка становится преобладающей при $s/n \ll 1$. Для получения же предельной точности необходимо в матрице $\mathfrak{U}_1$ оставить члены, зависящие от отношения сигнал/шум, что справедливо для случая $s/n \gg 1$:

$$\sigma^2_{1\theta} = \frac{1}{(s/n)\,|\sin(2\theta)|}, \quad \sigma^2_{1\varphi} = \frac{1}{(s/n)\,|\sin(2\varphi)|\cos^2(\theta)}. \qquad (6)$$

Зависимости (6) обладают довольно очевидными свойствами: при стремлении φ и θ к значениям 0 или $\pi/2$ ошибка резко возрастает, что связано с обнулением сигналов в каналах X, Y или Z.

Для интерпретации полученного результата обратимся к формулам (3), полученным раньше методом максимального правдоподобия при условии, что мощность объемного шума превосходит мощность сигнала (множитель β положен равным 1). Выражения (3) можно принять в качестве верхней оценки величин σ_θ, σ_φ в случае $s/n \gg 1$. Вычислим отношения $\sigma_{1\varphi}/\sigma_\varphi$, $\sigma_{1\theta}/\sigma_\theta$:

$$\sigma_{1\varphi}/\sigma_\varphi = \sqrt{14}\,\frac{\sqrt{s/n}}{\sqrt{|\sin(2\varphi)|}}, \quad \sigma_{1\theta}/\sigma_\theta = \sqrt{14}\,\frac{\sqrt{s/n}}{\sqrt{|\sin(2\theta)|}}.$$

Следовательно, зависимость $\sigma_{1\varphi}/\sigma_\varphi$ от угла φ и отношения сигнал/шум аналогична зависимости $\sigma_{1\theta}/\sigma_\theta$ от угла θ. Рассмотрим, для примера, зависимость $\sigma_{1\theta}/\sigma_\theta$, где величина s/n положена равной 1. Очевидно, что оценки $\sigma_{1\theta}$ и $\sigma_{1\varphi}$ ограничены сверху. При этом надо помнить, что величина $\sigma_{1\theta}$ меньше предельно осуществимой реальной точности (опущены члены в матрице $\mathfrak{U}_1$), а величина σ_θ больше реально достижимой точности, так как формулы (3) получены в предположении $s/n \ll 1$. Окончательно получаем оценку

$$\sigma_{1\theta} \gg 4\sigma_\theta,$$

справедливую для граничной области $s/n \approx 1$.

Таким образом, алгоритм определения угловых координат состоит в образовании матрицы реализаций $\mathfrak{B}$ с последующей подстановкой ее в систему (a). Решение этой системы относительно параметров $\{\varphi, \theta\}$ дает направление на источник звука с удовлетворительной точ-

ностью в определении параметров. Сопоставление трехканальной системы определения угловых координат на основе многоканального приемника скорости с системой на основе использования как каналов скорости, так и звукового давления демонстрирует преимущество последней, работающей по алгоритму метода максимального правдоподобия.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Лебединцев С. Н., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.//Вопросы судостроения, сер. акуст. 1977. № 8. С. 143. [2] Виноградов Н. С., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1976. 17, № 5. С. 573. [3] Виноградов Н. С., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.//Там же. 1977. 18, № 6. С. 57. [4] Виноградов Н. С., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.//Там же. 1978. 19, № 5. С. 73. [5] Виноградов Н. С., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.// //Вопросы судостроения, сер. общетехн. 1979. 46. С. 3. [6] Кравчун П. Н., Пестов К. А., Тонаканов О. С.//Акуст. журн. 1992. 38, № 5. С. 886. [7] Урик Дж. Основы гидроакустики. М., 1978. [8] Буров В. А., Дмитриев О. В.//Радиотехн. и электроника. 1973. 18, № 6. С. 1276. [9] Фалькович С. Е. Оценка параметров сигнала. М., 1970. [10] Акустика океана/Под ред. Л. М. Бреховских. М., 1974. [11] Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. М., 1983.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 6

УДК 534.322:551.463.228

ВЕКТОРНО-ФАЗОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

В. А. Гордиенко, Б. И. Гончаренко

Обсуждается подход к решению акустических задач, основанный на получении дополнительной информации о поле при заданных пространственно-временных объемах выборок посредством помещения в ограниченном числе точек среды наряду с приемниками звукового давления также приемников первого и более высоких порядков, позволяющих определять градиенты и биградиенты звукового давления, колебательную скорость частиц среды в акустической волне и т. д. Показано, что в случае одиночной комбинированной приемной системы имеет место качественный скачок — возможность определения направления на источник звука. Рассматривается подход к описанию векторно-фазовой структуры акустических полей сигналов и шумов в океане, а также некоторые возможности его использования для решения прикладных задач.

1. Введение

Известно, что повышение эффективности акустических систем различного назначения связано с улучшением отношения сигнал/помеха.

Один из путей (прямой) развития акустических средств связан с дальнейшим усовершенствованием алгоритмов обработки сигналов.

Другой путь заключается в разработке и реализации технических решений, основанных на регистрации новых физических явлений.

Есть и третий путь получения дополнительной информации о поле при заданных пространственно-временных объемах выборок (не исключающий перечисленные выше), о котором в основном и пойдет речь в данной работе. Он может быть реализован посредством помещения в ограниченном числе точек среды наряду с приемниками звукового давления также приемников первого и более высоких порядков, позволяющих определять градиенты и биградиенты звукового давления, колебательную скорость частиц среды в акустической волне и т. д.