

УДК 621.319

© 1993 г. В.Н. Гончаров, В.Г. Иванов, Г.Р. Минасян

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ МОРСКОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ В МНОГОЛУЧЕВОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЗВУКА

Рассмотрена эффективность работы адаптивного формирователя Кейпона в трехкомпонентном поле помех. Проанализировано влияние коррелированности лучей эхо-сигнала на выходное отношение сигнал-помеха. Показано, что применение метода Кейпона ведет к подавлению эхо-сигнала на выходе антенны. Для устранения этого эффекта использовался метод пространственного сглаживания или способ формирования весового вектора с ограничением по набору направлений. Методом математического моделирования для различных гидролого-акустических условий Мирового океана проиллюстрирована возможность эффективной адаптивной пространственной фильтрации морской реверберации.

В ряде гидролого-акустических ситуаций реверберация моря является доминирующей помехой. Угловой спектр реверберационной помехи (РП) резко анизотропен в вертикальной плоскости и зачастую подобен спектру эхо-сигнала (ЭС) от объекта локации. При традиционном формировании характеристик направленности (ХН) приемных гидроакустических антенных решеток (АР) реверберация, попадая на основной и боковые лепестки ХН, может существенно ограничить дальность действия гидролокатора. Поэтому для улучшения качества работы гидролокационных систем имеет смысл использовать адаптивные методы диаграммоформирования, когда помеха пространственно коррелирована.

Предполагается, что поле, наблюдаемое на гидрофонах приемной АР после излучения акустического импульса в среду, состоит из ЭС от объекта, реверберации, динамических шумов моря (ШМ) и собственных шумов носителя (СШ). Модель ЭС записывается в виде суммы N плоских узкополосных волн, падающих на АР:

$$G(\omega) = \sum_{\mu=1}^N \epsilon_{\mu} A_{\mu} e^{j\omega(t_{\mu} + \frac{1}{c} \langle e_{\mu}, \rho_m \rangle)}, \quad (1)$$

где A_{μ} — амплитуда μ -го луча (плоской волны) ЭС с учетом потерь на распространение в прямом и обратном направлении, t_{μ} — время распространения импульса по этому лучу, e_{μ} — единичный вектор, характеризующий направление прихода μ -го луча к приемнику, ρ_m — радиус-вектор, определяющий положение m -го гидрофона приемной АР, ϵ_{μ} — комплексная случайная величина с амплитудой, распределенной по закону Рэлея и фазой от 0 до 2π , ω — частота излучения, c — скорость звука, $\langle \rangle$ — скалярное произведение. Основным источником реверберации является рассеяние звука на неровных границах морской среды (дно и поверхность), а также на неоднородностях, заключенных в ее объеме. Количественно рассеяние описывается коэффициентами обратного рассеяния, зависящими в общем случае от глубины z , частоты ω и от направления фронтов волн падающей на рассеивающий элемент и рассеянной им в сторону приемной АР [1]. Относительно модели РП сделаны следующие допущения: реверберация есть сово-

купный вклад от множества рассеивателей, образующих гауссовский случайный процесс с нулевым средним; излучаемый сигнал и реверберация узкополосны; излучатель и приемник совмещены (моностатический режим); частота излучения достаточно высокая, чтобы было допустимо лучевое приближение; реверберация рассматривается как квазистационарная (стационарная на интервале времени, равном длительности излучаемого импульса). Угловой спектр реверберации рассчитывался по программе, описанной в [1]. В качестве модели ШМ принято равномерное распределение независимых источников звука в приповерхностном слое. Анизотропия поля рассчитывалась по формулам, приведенным в [2]. СШ носителя считается независимым, белым по пространству гауссовским шумом и имеет дисперсию σ_v^2 .

Рассмотрим линейную, эквидистантную АР, состоящую из M ненаправленных гидрофонов. Обозначим через $x(t, \rho)$ вектор сигналов полного гидроакустического поля, принимаемого гидрофонами АР в момент времени t . Размерность вектора $M \times 1$.

$$x(t, \rho) = s(t, \rho) + n_r(t, \rho) + n_n(t, \rho) + n_v(t), \quad (2)$$

где $s(t, \rho)$ — вектор ЭС, $n_r(t, \rho)$ — вектор РП, $n_n(t, \rho)$ и $n_v(t)$ — векторы ШМ и СШ носителя, $\rho = \{ \rho_x, \rho_y, \rho_z \}$ — вектор, определяющий местоположение датчиков АР в декартовой системе координат. В любой момент времени взаимно корреляционная матрица (ВКМ) полного поля по выходам гидрофонов имеет вид

$$C(\tau) = E \{ x(t, \rho_i) x(t - \tau, \rho_j) \}, \quad (3)$$

где $E \{ \cdot \}$ — усреднение по ансамблю. Взаимно спектральная матрица (ВСМ) полного гидроакустического поля на выходах гидрофонов АР есть фурье-преобразование ВКМ (3). Запишем ВСМ полного поля в следующем виде:

$$R(\omega) = G(\omega) \cdot G^h(\omega) + \sigma_r^2 \cdot Q(\omega) + \sigma_n^2 \cdot N(\omega) + \sigma_v^2 \cdot I, \quad (4)$$

где $Q(\omega)$, $N(\omega)$ — ВСМ реверберации и шумов моря, $G(\omega)$ — фурье-образ вектора ЭС $s(t, \rho)$ на частоте ω , σ_r^2 , σ_n^2 и σ_v^2 — дисперсии мощности реверберации, ШМ и СШ, I — единичная матрица. Здесь сделана нормировка $\text{tr} \{ Q(\omega) \} = \text{tr} \{ N(\omega) \} = M$, "h" — знак комплексного сопряжения и транспонирования. На практике $R(\omega)$ неизвестна, поэтому получают ее оценку, например, в виде максимально-правдоподобной оценки (МПО):

$$\hat{R}(\omega) = \frac{1}{KN} \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N X_i(\omega_n) \cdot X_i^h(\omega_n), \quad (5)$$

где оценка матрицы (5) получается усреднением по K временным и N соседним частотным отсчетам на основе вектора входной выборки $X_i(\omega_n)$. Вектор $X(\omega_n)$ — фурье-образ вектора входного воздействия (2), взятый на частоте ω_n . Оценка мощности на выходе пространственной системы обработки имеет вид

$$\hat{P}(\omega) = W^h(\omega) \cdot \hat{R}(\omega) \cdot W(\omega),$$

где $W(\omega)$ — вектор весовых коэффициентов (ВВК) АР.

Сравним два вида систем обработки: традиционную (т.е. обычное равнозвешенное диаграммоформирование с задержкой и суммированием — оценка Бартлетта [3]) и адаптивную, в качестве которой использовался метод минимальной дисперсии шума или метод Кейпона [4]. Для традиционной обработки весовой вектор выбирается в виде

$$W_{\text{BART}}(\omega) = a(\theta, \omega), \quad (6)$$

где $a(\theta, \omega) = [e^{j \frac{\omega}{c} d \cdot \sin \theta}, \dots, e^{j \frac{\omega}{c} d \cdot (M-1) \cdot \sin \theta}]$ — вектор компенсации АР в вертикальной плоскости в направлении θ .

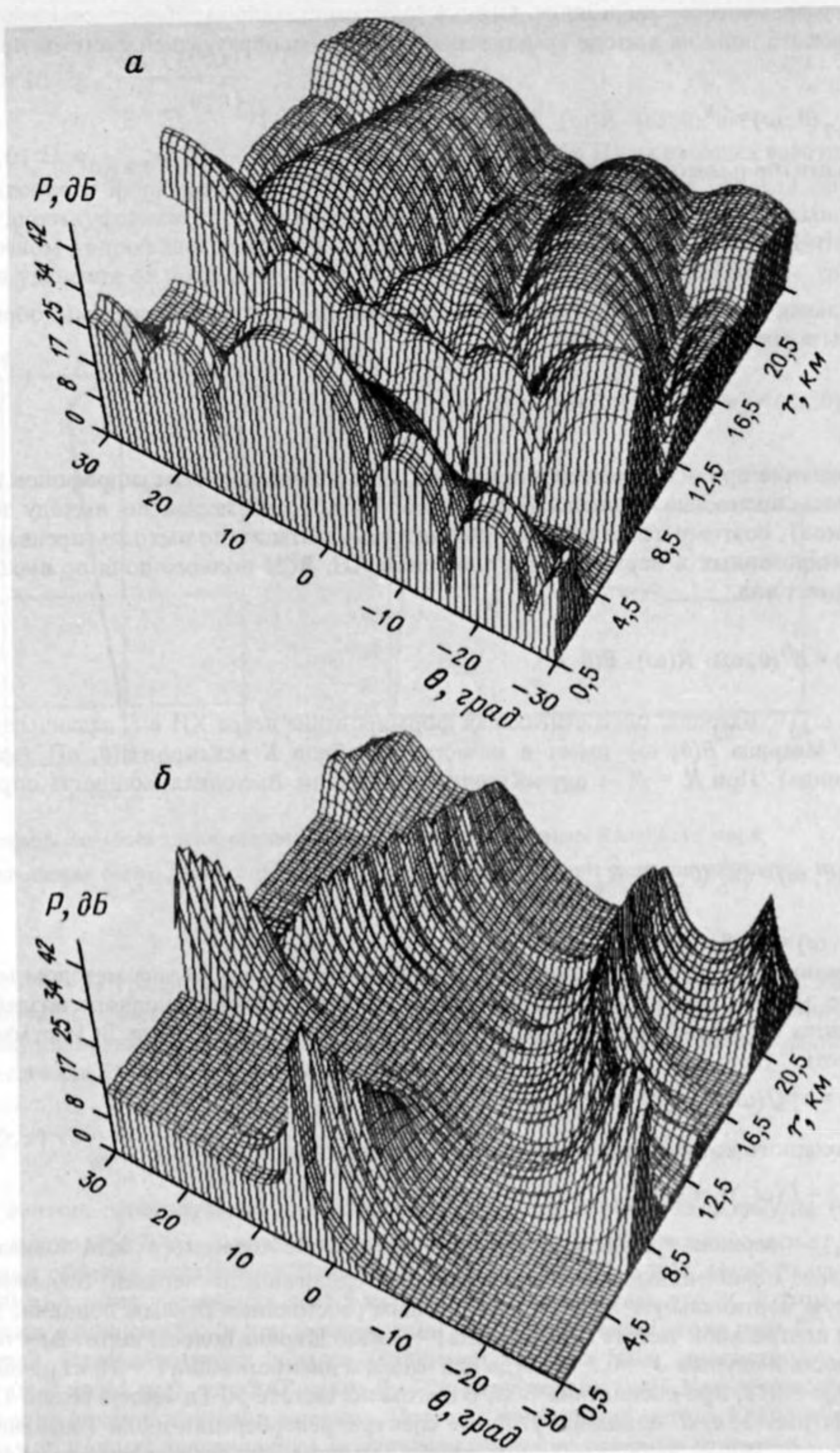


Рис. 1. Оценки угловых спектров реверберации и ШМ в вертикальной плоскости (Японское море, зима, см. рис. 2, глубина приемно-излучающей системы 100 м): а – метод Бартлетта, б – метод Кейпона

d — межэлементное расстояние. Оценка пространственно-частотного спектра гидроакустического поля на выходе традиционной диаграммообразующей системы принимает вид

$$\hat{P}_{\text{BART}}(\theta, \omega) = \mathbf{a}^h(\theta, \omega) \cdot \hat{R}(\omega) \cdot \mathbf{a}(\theta, \omega).$$

Весовой вектор в методе Кейпона записывается в виде

$$\mathbf{W}_{\text{CAP}}(\omega) = \frac{\hat{R}^{-1}(\omega) \cdot \mathbf{a}(\theta, \omega)}{\mathbf{a}^h(\theta, \omega) \cdot \hat{R}^{-1}(\omega) \cdot \mathbf{a}(\theta, \omega)}. \quad (7)$$

Спектральная плотность мощности поля на выходе адаптивной системы обработки может быть оценена как

$$\hat{P}_{\text{CAP}}(\theta, \omega) = [\mathbf{a}^h(\theta, \omega) \cdot \hat{R}^{-1}(\omega) \cdot \mathbf{a}(\theta, \omega)]^{-1}.$$

На практике при использовании приемных АР с большим числом гидрофонов трудно реализовать полностью адаптивный процессор (т.е. с адаптацией по выходу всех M гидрофонов), поэтому целесообразно рассмотреть адаптацию по выходам предварительно сформированных в вертикальной плоскости ХН, ВСМ полного поля по выходу веера ХН имеет вид

$$\hat{R}_B(\omega) = B^h(\theta, \omega) \cdot \hat{R}(\omega) \cdot B(\theta, \omega),$$

где $B(\theta, \omega)$ — матрица, обеспечивающая формирование веера ХН в K заданных направлениях. Матрица $B(\theta, \omega)$ имеет в качестве столбцов K векторов $\mathbf{a}(\theta, \omega)$ (матрица Вандермонда). При $K = M$ — случай полной адаптации. Выходная мощность определяется как

$$\hat{P}_{\text{CAP}}^b(\theta, \omega) = [\mathbf{a}_b^h(\theta, \omega) \cdot \hat{R}_b^{-1}(\omega) \cdot \mathbf{a}_b(\theta, \omega)]^{-1},$$

где $\mathbf{a}_b(\theta, \omega) = B^h(\theta, \omega) \cdot \mathbf{a}(\theta, \omega)$.

Для различных гидролого-акустических условий Мирового океана методом математического моделирования формировались случайные выборки входного воздействия на элементах АР. Отделим от $R(\omega)$ (4) помеховую компоненту, тогда ВСМ суммарной помехи есть

$$R_i(\omega) = \sigma_r^2 Q(\omega) + \sigma_n^2 N(\omega) + \sigma_v^2 I.$$

Вектор входного воздействия на частоте ω_n моделировался как

$$\mathbf{X}_i(\omega_n) = L(\omega_n) \xi_i + \mathbf{G}(\omega_n),$$

где $L(\omega_n)$ — верхняя треугольная матрица разложения Холецкого ВСМ помехи, ξ_i — независимые комплексные гауссовы векторы с единичной дисперсией. Возьмем 15 — элементную вертикальную АР с межэлементным расстоянием равным половине длины волны на центральной частоте ЛЧМ-сигнала $f = 3$ кГц. Ширина полосы частот $\Delta f = 600$ Гц, длительность импульса $T = 0,5$ с. Тогда для частоты дискретизации $F = 10$ кГц, числа точек БПФ $n = 512$, при оценивании ВСМ с шагом по частоте 50 Гц имеем около 120 выборок. На рис. 1, а, б показаны угловые спектры реверберации и ШМ (оцененные по классифицированным выборкам), полученные методом Бартлетта и методом Кейпона. Профиль скорости звука, соответствующий зимним условиям Японского моря, показан на рис. 2. Из сравнения рисунков 1, а и б видно, что метод Кейпона обладает более высокой разрешающей способностью, чем метод Бартлетта, и имеет существенно меньший уровень бокового поля. Для иллюстрации эффективности адаптивной обработки (ЭАО)

была рассчитана величина

$$q(r, z) = 10 \cdot \lg \frac{q_{\text{САР}}(r, z)}{q_{\text{ВАРТ}}(r, z)},$$

где $q_{\text{САР}}(r, z)$, $q_{\text{ВАРТ}}(r, z)$ — отношение сигнал/помеха (ОСП) на выходах адаптивного и традиционного формирователей соответственно, при нахождении объекта локации в точке гидроакустического волновода с координатами (r, z) . На рис. 3 показано ОСП на одиночном гидрофоне, вычисленное при нахождении объекта локации на глубине 50 м и на удалении от приемной АР от 1 до 24 км. На диаграммах дальность — глубина

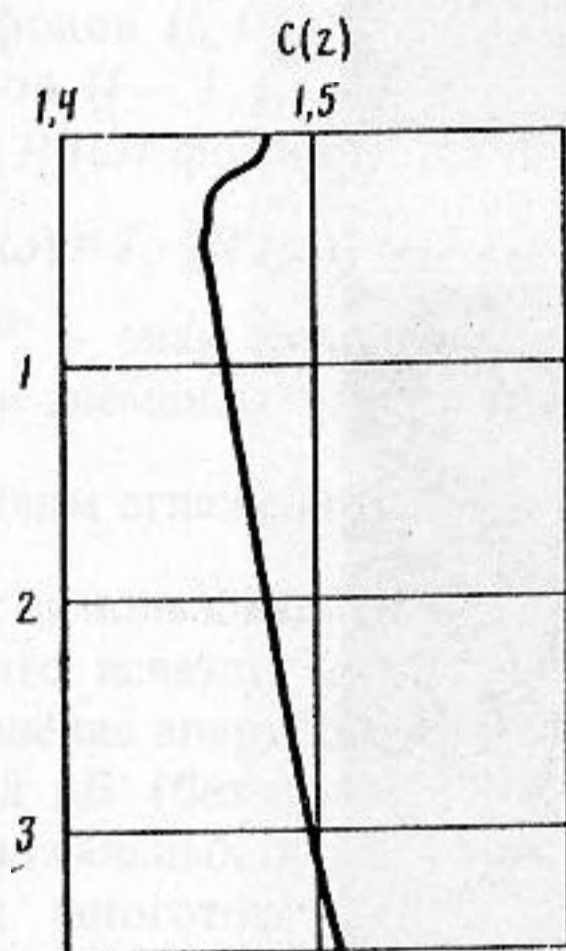


Рис. 2

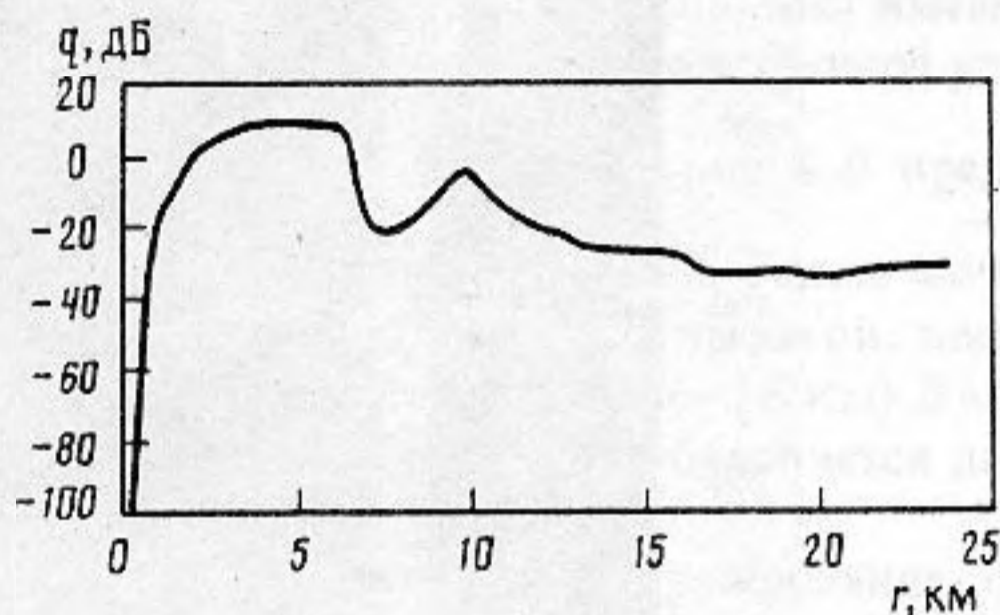


Рис. 3

Рис. 2. Профиль скорости звука, соответствующий зимним условиям Японского моря

Рис. 3. Отношение сигнал/помеха на одиночном гидрофоне (объект локации находится на глубине 50 м)

(см. рис. 4, а–в) градациями серого различной интенсивности показана ЭАО. Рис. 4, а иллюстрирует эффективность применения метода Кейпона с линейным ограничением по одному направлению, соответствующему максимальному (наиболее сильному) лучу эхо-сигнала. Весовой вектор определяется из формулы (7), и тогда

$$q_{\text{САР}}(r, z) = \frac{|W_{\text{САР}}^h(\omega) \cdot G(\omega)|^2}{W_{\text{САР}}^h(\omega) \cdot \hat{R}_i(\omega) \cdot W_{\text{САР}}(\omega)}$$

Весовой вектор, используемый для расчета $q_{\text{ВАРТ}}(r, z)$ берется из формулы (6). Из рис. 4, а видно, что ЭАО, в целом, лежит в диапазоне 6–30 дБ в зависимости от местонахождения объекта локации, ОСП, степени анизотропии РП и ШМ. Наибольшая ЭОА (более 30 дБ) — на дистанциях до 1,5 км. Это объясняется тем, что ЭС в этом случае практически однолучевой, и при компенсации АР в направлении этого луча РП сильно подавляется. Однако имеются области (например, глубина 50 м, дистанции от 0,5 до 4,5 км и от 9 до 11 км), где ЭАР равна 0 дБ, и даже меньше 0 дБ. Как видно из рис. 3, ОСП для этих точек достаточно высокое. Поэтому применение метода Кейпона с однолучевым (по одному направлению) ограничением в таких условиях приводит к эффекту взаимного подавления коррелированных лучей ЭС, приходящих с других направлений (в том числе и с направления компенсации). В работе [6] рассмотрен случай взаимного подавления двух коррелированных лучей. В частности, показано, что отклик адаптивного формирователя в направлении на второй луч определяется отношением

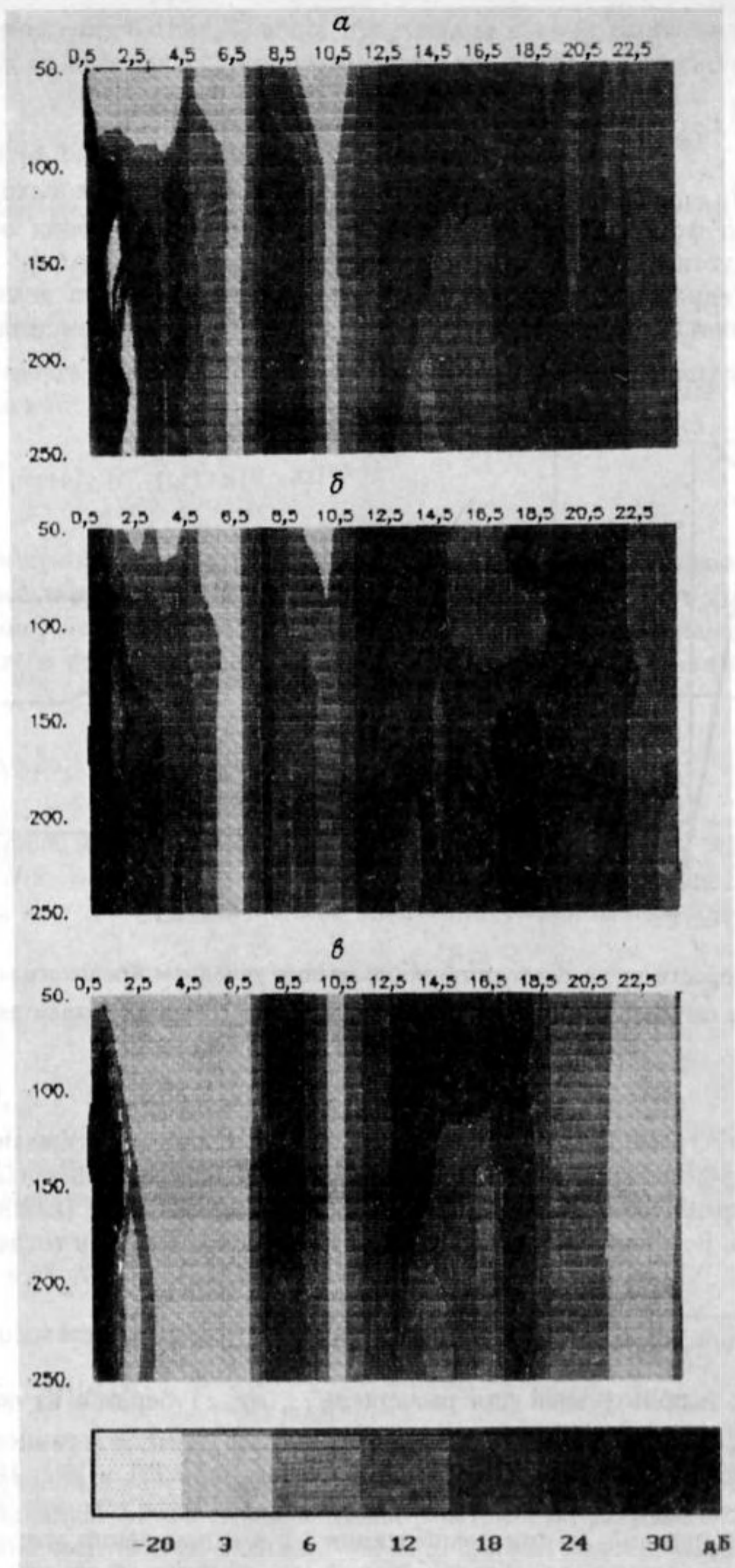


Рис. 4. ЭАО в функции глубины погружения и дальности до объекта локации: *a* – с одноточным ограничением, *б* – с использованием ММПС, *в* – с многоточным ограничением

амплитуд лучей и коэффициентом корреляции между лучами. Поэтому выходная мощность максимальна в случае, когда лучи некогерентированы. Когда имеется некоторая степень корреляции между лучами, то происходит подавление обоих лучей. С увеличением коэффициента корреляции между лучами выходная мощность адаптивной системы обработки будет уменьшаться. Для устранения этого эффекта можно применить многоточечное ограничение (по нескольким направлениям) или метод пространственного сглаживания, декоррелирующий лучи ЭС.

Модифицированный метод пространственного сглаживания (ММПС) описан в работе [7]. Если имеется N когерентных лучей ЭС, то исходную M — элементную АР разбивают на L подрешеток длиной $m \geq N + 1$. Например, если i -я подрешетка состоит из гидрофонов $(i, i + 1, \dots, i + m - 1)$, тогда соседние подрешетки будут состоять из гидрофонов $(i - 1, i, \dots, i + m - 2)$ и $(i + 1, i + 2, \dots, i + m)$. Далее из ВСМ для i -й подрешетки $R^i(\omega)$ формируется новая матрица

$$\bar{R}^i(\omega) = J \cdot [R^i(\omega)]^* \cdot J,$$

где "*" — знак комплексного сопряжения, J — матрица перестановок, имеющая единичные элементы на кроссдиагонали. Затем осуществим пространственное усреднение

и получим сглаженную ВСМ $\tilde{R}(\omega) = \frac{1}{2L} \sum_{i=1}^L (R^i(\omega) + \bar{R}^i(\omega))$. На рис. 4, б представлена

ЭАО с использованием ММПС по 4 подрешеткам длиной $m = 12$. Также можно отметить, что исчезли точки с ЭАО меньше 0 дБ, и ЭАО осталась высокой, несмотря на уменьшение апертуры АР. На глубинах 150–250 м (дистанции 16–18 км) ЭАО возросла с 18 дБ (без сглаживания, см. рис. 4, а) до 24–26 дБ, что объясняется декорреляцией сигнальных лучей.

При многоточечном ограничении адаптивное диаграммоформирование формулируется как [8]

$$\text{минимизация } W^h(\omega) \cdot \hat{R}(\omega) \cdot W(\omega)$$

$$\text{при ограничении } C^h(\theta, \omega) \cdot W(\omega) = E,$$

где E — вектор ограничений, $C(\theta, \omega)$ — $M \times K$ -матрица, имеющая в качестве столбцов векторы ориентации АР в K "охраняемых" направлениях. На рис. 4, в показана ЭАО при использовании метода Кейпона с ограничением по трем направлениям в пределах основного лепестка ХН. Заметим, что областей подавления ЭС (глубина 50 м, дистанции от 0,5 до 4,5 км и от 9 до 11 км) больше нет, но ЭАО в целом меньше, чем в случае одноточечного ограничения. Это можно объяснить тем, что теперь РП не режектируется уже с трех направлений.

Аналогичные расчеты были проделаны для гидролого-акустических условий Охотского и Баренцева морей, Атлантического океана и др. [9]. Так, Баренцево море (мелкое море, $c(z)$, летом — придонный канал, зимой — приповерхностный канал) характеризуется высоким уровнем реверберации. Причем РП сильно анизотропно первые два километра (ЭАО более 40 дБ), а затем реверберационные лучи приходят с углами, равномерно распределенными в диапазоне $\pm 15^\circ$ (ЭАО 4–6 дБ). Эффектов подавления ЭС в Баренцевом море не наблюдалось, так как РП намного сильнее ЭС. Для условий Атлантического океана (глубоководный канал, первая ДЗАО) применение ММПС давало ЭАО 10–20 дБ. Рассматривалась также ЭАО по выходу веера ХН. В частности, для Японского моря при использовании пяти ортогональных ХН потери по сравнению со случаем полной адаптации (по выходам всех 15 гидрофонов) составляли 1–2 дБ.

Таким образом, результаты моделирования показали, что в случае, когда доля ЭС в суммарной ВСМ невелика, применение адаптивной пространственной фильтрации РП дает существенный эффект. При высоком ОСП использование ММПС или многоточечного ограничения приводит к желаемому эффекту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева И.Б., Гончаров В.Н. Методы расчета многолучевой реверберации и контрольные сравнения с экспериментом. Проблемы акустики океана / Под ред. Бреховских Л.М., Андреевой И.Б. М.: Наука, 1984. С. 69–77.
2. Аредов А.А., Охрименко Н.Н., Фурдусев А.В. Исследование вертикальной направленности поля динамических шумов в океане // Матер. 10-й Всесоюз. акуст. конф. М.: Наука, 1983.
3. Джонсон Д.Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения // ТИИЭР. 1982. Т. 70. № 9. С. 126–139.
4. Кейпон Дж. Пространственно-временной спектральный анализ с высоким разрешением // ТИИЭР. 1969. Т. 57. № 8. С. 69–79.
5. Reed I.S., Mallett J.D., Brennan L.E. Rapid convergence rate in adaptive arrays // IEEE Trans. 1974. V. AES-10. № 6. P. 853–863.
6. Reddy V.U., Paulraj A., Kailath T. Performance analysis of the optimum beamformer in the presence of correlated sources and its behavior under spatial smoothing // IEEE Trans. 1987. V. ASSP-35. № 7. P. 927–936.
7. Williams R.T., Prasad S., Mahalanabis A.K., Sibul L.H. An improved spatial smoothing technique for bearing estimation in a multipath environment // IEEE Trans. 1988. V. ASSP-36. № 4. P. 425–431.
8. Vural A.M. Effects of perturbation on the performance of optimum/adaptive arrays // IEEE Trans. 1979. V. AES-15, № 1. P. 76–87.
9. Минасян Г.Р., Иванов В.Г. Асимптотическая эффективность адаптивной режекции морской реверберации // Тез. докл. 3-го Всесоюз. сем. "Модели, алгоритм, принятие решений". Минск: МРТИ, 1991. С. 32.

Акустический институт
им. Н.Н. Андреева
Российской академии наук

Поступила в редакцию
12.05.92

V.N. Goncharov, V.G. Ivanov, G.R. Minasyan

EFFICIENCY ANALYSIS OF ADAPTIVE SPATIAL FILTRATION OF SEA REVERBERATION FOR MULTIRAY PROPAGATION OF SOUND

Sea reverberation suppression with the help of adaptive beam formation is considered. The effects of signal cancellation at the output of the Capon beamformer in a multiray environment are studied. The application of modified spatial smoothing technique or multiple points constrained adaptive beamformer is shown to provide the improvement in reverberation rejection.