АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.833

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ПРИЕМНАЯ СЛУЧАЙНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА, СОГЛАСОВАННАЯ С ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМ ВОЛНОВОДОМ

© 2012 г. В. И. Бардышев

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: asemen@akin.ru
Поступила в редакцию 20.07.2011 г.

Приведены результаты измерений пространственно-временной корреляции шумового сигнала, а также углового отклика и коэффициентов усиления и помехоустойчивости горизонтальной приемной случайной антенной решетки при типовой аддитивной обработке сигнала, а также при обработке, согласованной с гидроакустическим волноводом. Антенная решетка была установлена на дне мелководного водохранилища. Согласованная обработка позволила улучшить характеристики антенной решетки.

Ключевые слова: гидроакустический волновод, пространственно-временная корреляция, случайная антенная решетка, аддитивная обработка сигнала, согласованная обработка сигнала, усиление, помехоустойчивость.

При распространении шумовых сигналов в мелководном гидроакустическом волноводе в виде суммы мод они искажаются под воздействием геометрической дисперсии. Фазовые и групповые скорости мод различных номеров отличаются и зависят от частоты [1]. Это приводит к снижению значений нормированной функции взаимной пространственно-временной корреляции сигнала по апертуре протяженной антенной решетки (АР) [2]. В работе [3] эта функция получила название коэффициента пространственной корреляции, продольной, если точки приема разнесены вдоль направления, на источник сигнала, и поперечной при разнесении их вдоль фронта звуковой волны.

Спадание корреляции сигнала по апертуре АР приводит к снижению характеристик АР, таких как направленность и коэффициенты усиления и помехоустойчивости [4]. Измерив импульсную переходную или частотную передаточную функции волновода, можно с их использованием скорректировать дисперсионные искажения сигнала, восстановить его форму и корреляцию по апертуре АР и улучшить ее выходные характеристики. Подобную обработку можно назвать согласованной с волноводом. В разных вариантах она применяется в системах радио- и гидроакустической связи [5-7]. Ниже рассматривается возможность такой обработки при шумопеленговании источника шума с помощью горизонтальной гидроакустической АР со случайным и разреженным размещением узлов (точек, в которых находятся приемные элементы).

Случайная гидроакустическая антенная решетка (СГАР) может быть сформирована из группы радиогидроакустических буев-ретрансляторов, сбрасываемых с борта летательного аппарата или судна [8, 9]. Случайные отклонения буев от намеченных точек получаются непроизвольно. СГАР обеспечивает однозначное пеленгование при ее разрежении, когда среднее межузловое расстояние превышает длину звуковой волны λ. В отличие от эквидистантной разреженной АР, боковые лепестки характеристики направленности случайной разреженной АР, равные по уровню главному лепестку, не образуются. Точнее, вероятность их образования очень мала [10]. Разрежение АР позволяет создать протяженную апертуру при ограниченном количестве узлов и обеспечить высокую направленность приема и точность пеленгования. В зоне Френеля протяженной АР возможны геометрическая фокусировка и определение дистанции до источника сигнала в режиме шумопеленгования [11]. Достоинства случайных АР способствовали их применению в радиолокации и радиоастрономии [10], в гидроакустике [8, 9, 11] и медицине [12]. Если допускается совмещение шумопеленгования с гидроакустической связью (например, при слежении за исследовательским подводным аппаратом), то возможны зондирование гидроакустического волновода с помощью импульсного или сложного сигнала и применение согласованной обработки.

Ниже описывается моделирование СГАР с согласованной обработкой сигнала в водохранилище глубиной 4.2 м. СГАР была сформирована из восьми ненаправленных гидрофонов, укреплен-

ных на металлической ферме (базе) на высоте 0.5 м от поверхности дна. Длина базы, или апертура СГАР, равнялась 7.5 м = 14.4 λ , λ = 0.52 м. Стандартное отклонение узлов от восьми эквидистантных точек вдоль базы составляло 0.37 м, и поперек базы — 0.8 м. Среднее межузловое расстояние $b = 1.3 \text{ м} \approx 2.5 \lambda$. Координаты узлов измерены с точностью до 5×10^{-3} . Точка излучения сигналов располагалась на глубине 3 м и на дистанции r = 112.7 м $\approx 216.7\lambda$ от центра базы под углом 32° от перпендикуляра к центру базы. Звуковое поле в узлах СГАР формировалось шестью эффективными модами. Излучались зондирующий импульсный сигнал длительностью 2×10^{-4} с и через секунду основной шумовой сигнал в полосе частот 2.5—3 кГц со средней частотой 2750 Гц; ($\lambda =$ = 0.52 м). Обработка сигналов осуществлялась в цифровой форме. Частота квантования сигнала составляла 20 кГц. Выборка шумового сигнала состояла из Q = 4096 отсчетов, ее длительность, или время усреднения T = 0.2 с. Измерялось среднее по всем узлам значение интенсивности шумового сигнала в сумме с помехой D_{sp} , а также при выключенном излучателе интенсивность помехи D_p :

$$D_p = \frac{1}{TJ} \sum_{i=1}^{J} \sum_{q=1}^{Q} p_{pj}^2(t_q), \qquad (1)$$

где j — номер узла, J — количество узлов, q — номер отсчета, p_{pj} — давление помехи в узле j, t_q — время отсчета с порядковым номером q.

$$D_{sp} = \frac{1}{TJ} \sum_{j=1}^{J} \sum_{q=1}^{Q} p_{spj}^{2}(t_{q}), \qquad (2)$$

где p_{spj} — давление сигнала в сумме с помехой в узле j. Измеренное отношение $E = D_{sp}/D_p = 1800$ — достаточно велико, чтобы можно было считать его отношением сигнала к помехе. Такое же отношение $E_e = D_{se}/D_{pe}$ измерялось на выходе системы обработки сигналов, где D_{se} и D_{pe} — интенсивности сигнала и помехи на выходе системы обработки. Коэффициенты помехоустойчивости СГАР Π и усиления K измерялись в дE:

$$K = 10\lg(D_{se}/D_{sp}), \qquad (3)$$

$$\Pi = 10\lg(E_e/E). \tag{4}$$

Нормированный угловой отклик СГАР $A(\theta, \theta_s)$ измерялся согласно формуле:

$$A(\theta, \theta_{s}) = \sum_{q=1}^{Q} \left\{ \sum_{j=1}^{J} p_{spj} [t_{q} - \tau_{1j}(\theta)] \right\}^{2} \times \left\{ \sum_{q=1}^{Q} \sum_{j=1}^{J} p_{spj}^{2} (t_{q}) \right\}^{-1},$$
(5)

где θ — угол компенсации, $\tau_{lj}(\theta)$ — аппаратное время задержки сигнала в канале j относительно сигнала в канале 1, вводимое для компенсации СГАР. Угловой отклик подобен характеристике

направленности, но в отличие от нее измеряется в реальном волноводе.

Согласованная обработка состояла в следующем. Гидроакустический волновод рассматривался как стационарный линейный фильтр. Считалось, что короткий зондирующий импульс дает в каждом узле j импульсную переходную функцию волновода $h_j(t)$ по трассе от точки излучения до узла j. Частотную передаточную функцию $M_j(\omega)$ по этой трассе можно получить с помощью преобразования Фурье:

$$M_j(\omega) = m_j(\omega)\Phi_j(i\omega) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} h_j(t) \exp(-i\omega t) dt, \quad (6)$$

где $m_j(\omega)$ — действительная частотная, а $\Phi_j(i\omega)$ — фазовая характеристики волновода по трассе j, ω — круговая частота, i — мнимая единица. Частотный: спектр сигнала, принятого в узле j: $S_j(\omega) = S(\omega)M_j(\omega)$, где $S(\omega)$ — спектр излучаемого сигнала. Восстановленный спектр излучаемого сигнала вычислялся по формуле:

 $S_{rj} = S_j(\omega) M_j(\omega) \cdot M_{cj}(\omega) / m_j^2(\omega) = S(\omega),$ (7) $M_{cj}(\omega) - \Phi$ ункция, комплексно-сопряженная с $M_j(\omega)$. Излучаемый сигнал $p_s(t)$ восстанавливался с помощью обратного преобразования Фурье:

$$p_s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega) \exp(i\omega t) d\omega.$$
 (8)

Теоретически он одинаков во всех узлах, и значения коэффициентов взаимной корреляций по всем парам узлов должны быть равны единице. В действительности они несколько меньше, так как измерения выполняются не точно по следующим причинам: длительность выборки ограничена, зондирующий импульс отличается от дельтафункции, волновод может несколько отличаться от стационарного фильтра, и присутствуют шумовые помехи.

С восстановленным сигналом выполнялись те же операции, что и с невосстановленным, согласно выражениям (3)—(5). Результаты сравнивались.

На рис. 1 приведены образцы нормированных функций взаимной корреляции шумовых сигналов, принятых в парах узлов. Для невосстановленных сигналов они различаются по форме тем более, чем больше продольное разнесение узлов. Для восстановленных сигналов они сходны по форме во всех парах узлов, и главный корреляционный максимум везде хорошо выражен и положителен. Функции корреляции растягиваются по времени задержки на интервале Дт около 15 миллисекунд (мс), что можно объяснить дисперсией шести эффективных мод. Расчетные групповые скорости мод лежат в интервале от $u_1 = 1432.2 \text{ м/c}$ до $u_6 = 1338.7$ м/с. Расстояния r от точки излучения до узлов составляли 110-115 м. Разность времени пробега мод можно оценить по формуле:

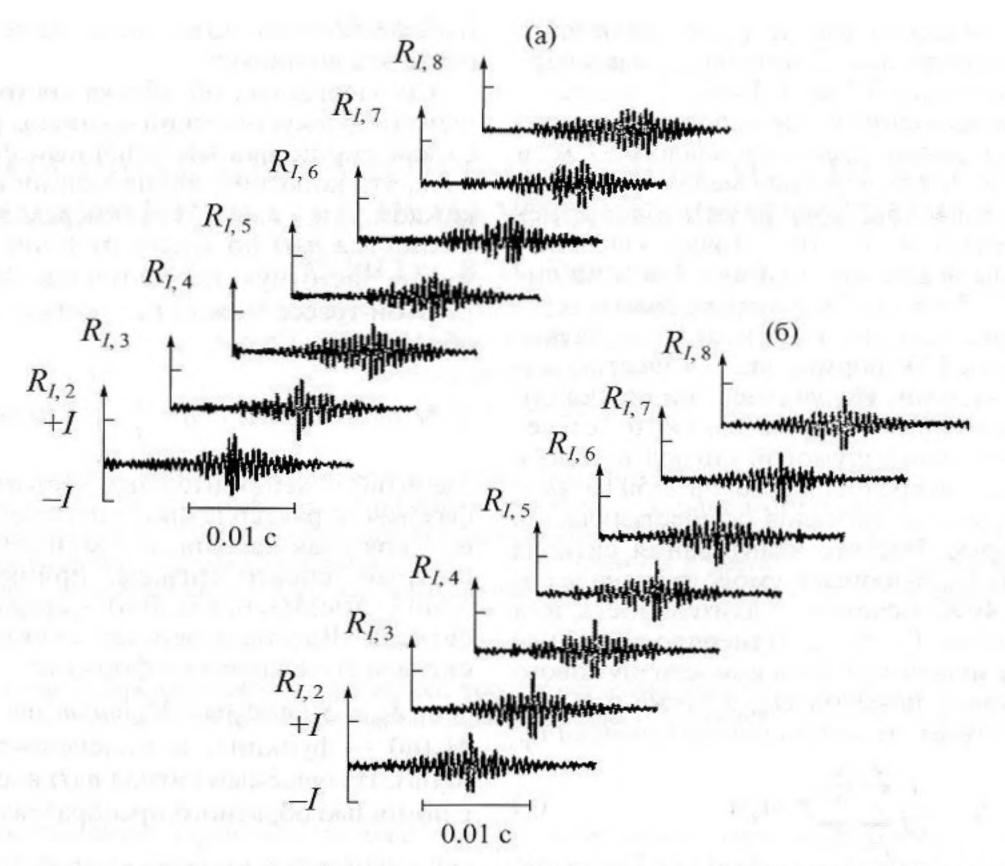


Рис. 1. Нормированные функции взаимной корреляции шумового сигнала в парах узлов СГАР $I, j \ (j = 2...8)$ в зависимости от аппаратной задержки сигнала: (а) невосстановленного, (б) восстановленного.

$$\tau_{1,6} \approx r \left(\frac{1}{u_6} - \frac{1}{u_1} \right) \cong 5.5 \text{ MC.}$$
 (9)

Интервал автокорреляции излучаемого шумового сигнала $\tau_0 \approx 2$ мс. Расчетное время затягивания корреляции $\Delta \tau \approx 2(\tau_{1,6} + \tau_0) = 15$ мс.

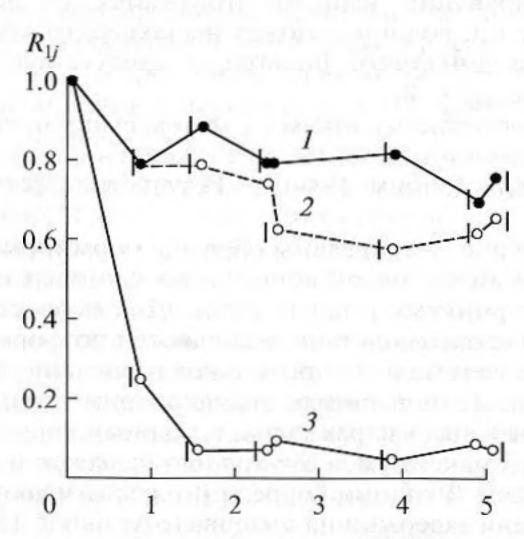


Рис. 2. Максимальные значения коэффициента горизонтальной корреляции шумового сигнала: I — восстановленного, 2 — невосстановленного, 3 — то же для помех в отсутствии сигнала. Вертикальные черточки — стандартные ошибки измерений. По оси абсцисс отложены продольные разнесения узлов СГАР в метрах.

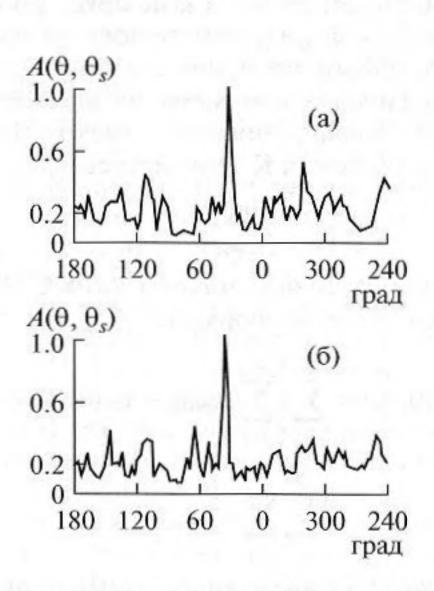


Рис. 3. Нормированный угловой отклик СГАР $A(\theta, \theta_s)$: (a) при типовой обработке шумового сигнала, (б) при согласованной обработке. θ — угол компенсации, $\theta_s = 32^\circ$ — угол источника сигнала.

Таблица

Параметр	Типовая обработка	Согласованная обработка	Полная корреляция сигнала	Выигрыш согласованной обработки
R_m	0.67	0.78	1.0	1.2 раза
K	16.1 дБ	17.3 дБ	18.0 дБ	1.2 дБ
П	6.8 дБ	8.1 дБ	9.0 дБ	1.3 дБ
$\Delta\theta$	7°	5°	3.5°	1.4 раза

Максимальные значения коэффициентов корреляции восстановленного сигнала выше, чем невосстановленного (см. рис. 2).

Главный лепесток углового отклика СГАР узок, его ширина по половинной мощности при типовой обработке равна 7°, а при согласованной — 5° (рис. 3). Боковые лепестки отклика имеют нерегулярный вид, характерный для случайных АР. Они ниже главного лепестка. Ненормированный отклик при согласованной обработке в 1.3 раза выше, чем при типовой, что соответствует возрастанию коэффициента усиления на 1.2 дБ.

Полученные результаты сведены в таблицу с обозначениями: R_m — среднее значение максимумов коэффициентов взаимной корреляции шумового сигнала по всем парам узлов 1, j; K,П — коэффициенты усиления и помехоустойчивости СГАР; $\Delta\theta$ — ширина главного лепестка углового отклика СГАР по половинной мощности; "полная корреляция сигнала" — результаты расчетов при полной корреляции сигнала по всем парам узлов, $R_{skj} \equiv 1$, и при полной декорреляции помех, $R_{pkj} \equiv 0$; "выигрыш согласованной обработки" — по сравнению с типовой обработкой.

Полученный при согласованной обработке выигрыш невелик, поскольку протяженность СГАР недостаточна, и корреляция несогласованного шумового сигнала по ее апертуре остается довольно высокой. При согласованной обработке выходные параметры СГАР приближаются к идеальному случаю полной корреляции сигнала. При возрастании протяженности АР эффективность согласованной обработки должна возрастать. Так, по расчетам К.В. Авилова [13] для АР длиной в 512 м со 128 узлами в мелкой воде при согласованной оптимизированной обработке дальность обнаружения источника шума возрастает в 17.5 раз.

Таким образом, результаты измерений подтверждают эффективность обработки сигналов, согласованной с гидроакустическим волноводом, применительно к задаче шумопеленгования с использованием случайной разреженной гидроакустической антенной решетки в мелкой воде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Изд. АН СССР, 1957. 502 с.
- Бардышев В.И. О пространственно-временной корреляции шумовых сигналов в мелкой воде // Морское приборостроение. Серия Акустика. 1973. № 3. С. 15–34.
- Гершман С.Г., Тужилкин Ю.И. Измерение коэффициента поперечной корреляции непрерывного звукового сигнала в море // Акуст. журн. 1960. Т. 6. № 3. С. 292–298.
- Бардышев В.И. Испытания гидроакустических донных случайных решеток в море и водохранилище // Акуст. журн. 2004. Т. 50. С. 744—750.
- Williams R.E., Battestin M.F. Coherent recombination of acoustic multipath signals propagated in the deep ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1971. V. 50. № 1. P. 1433–1442.
- Видроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио, 1989. 440 с.
- Курьянов Б.Ф., Пенкин М.М. Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 2. С. 245–255.
- Torn J.V., Booth N.O., Lockwood J.C. Random and partially random acoustic arrays // J. Acoust. Soc. Amer. 1980. V. 64. № 4. P. 1277–1286.
- Бардышев В.И. Дрейфующая гидроакустическая антенная решетка // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 3. С. 342—347.
- Lo Y.T. A mathematical theory of antenna arrays with randomly spaced elements // IEEE Transactions on Antenna and Propagation. 1964. V. AP-12. № 3. P. 257–268.
- Бардышев В.И. Гидроакустическая случайная антенная решетка с обработкой сигнала по огибающей // Акустика океана. Доклады XII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XXI сессией Российского Акустического общества. М.: ГЕОС, 2009. С. 357—360.
- Гаврилов А.Р. Эволюция мощных: фокусирующих систем для. применения в различных областях медицины (обзор) // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 1. С. 844–861.
- Авилов К.В. Численные модели гидроакустических сигналов и помех и естественная первичная обработка гидроакустических сигналов // Акустика неоднородных сред. Сборник трудов семинара научной школы проф. С.А. Рыбака. М.: ГЕОС, 2011. С. 85–91.