

УДК 534.26

## КОМПЛЕКСНАЯ СОГЛАСОВАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ПРИНЯТЫХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ

© 2000 г. А. Л. Матвеев, В. В. Митюгов

*Институт прикладной физики РАН  
603600 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46  
E-mail: matveyev@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Поступила в редакцию 22.12.98 г.

Обсуждаются теоретические предпосылки применения комплексной согласованной фильтрации для обработки дифракционно-теневых акустических сигналов, принятых многоэлементной вертикальной антенной. Проведено сравнение теории с экспериментом, поставленным в условиях естественного водоема.

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] была построена теория наблюдения акустической дифракции в канале мелкого моря и проведено компьютерное моделирование такого наблюдения на фоне природных флуктуационных помех. Характерной особенностью условия дифракционно-теневых наблюдений океанических объектов является высокая степень неоднородности и нестационарности вертикальной структуры тонального акустического поля, обусловленная многомодовым характером распространения сигналов. Именно по этой причине использование приема на вертикальную антенную цепочку является весьма эффективным, поскольку позволяет в значительной степени снизить влияние непредсказуемых амплитудно-фазовых вариаций сигналов на отдельных элементах при многоканальной обработке.

Существенным элементом поэтапной обработки сигналов послужила согласованная фильтрация, ориентированная на ожидаемую зонно-френелевскую структуру дифракционного сигнала. Математическая природа такого преобразования оказалась полностью подобна процедуре восстановления точечного источника по его голографическому изображению в когерентной оптике. Аналогия здесь оказалась настолько полной, что применяемые нами компьютерные процедуры выделения обостренного дифракционного отклика обнаруживают и характерные трудности, присущие оптической голографии.

В практической обработке наиболее просто реализуется чисто амплитудный алгоритм согласованной фильтрации, оперирующий с огибающими принятых сигналов и нечувствительный к вариациям текущей фазы. Моделирование в статье [2] показало, что применение этого алгорит-

ма уже повышает отношение сигнал/шум (SNR) на 10–14 дБ в зависимости от параметров экрана, на котором происходит дифракция сигнала, и характера его движения. В работе [3] приведены результаты применения амплитудной согласованной фильтрации к записям натурального эксперимента по наблюдению акустической дифракции в условиях пресноводного водоема, где эффект удалось наблюдать с результирующим превышением полезного сигнала над помехой более, чем на 20 дБ. При этом выяснилось, что в полном соответствии с оптическим аналогом задачи, обостренный сигнальный пик располагается на фоне более широкого и достаточно мощного пьедестала. Точно так же в амплитудной оптической голографии восстановленное изображение точечного источника неизбежно окружено абберационным фоновым пятном, устранить которое можно только применением фазовой голографии [4].

Предметом настоящей статьи является проверка эффективности комплексной амплитудно-фазовой согласованной фильтрации дифракционных сигналов по результатам натурального эксперимента. Для обработки были взяты экспериментальные записи, полученные в условиях естественного водоема. Сопоставление с результатами морских наблюдений [5] показало, что помеховая обстановка в обсуждаемом эксперименте оказалась в довольно близком пространственно-временном подобии к типичной ситуации реального мелкого моря.

### 1. ФОРМИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Рассмотрим акустическую трассу длины  $L$  в мелководном канале глубины (толщины водного слоя)  $H \ll L$ . Вертикальная приемная антенна пусть содержит  $N$  равномерно расположенных

гидрофонов и перекрывает канал от поверхности до дна. На другом конце трассы на глубине  $z_s$  помещен излучатель, посылающий тональный сигнал на частоте  $f$ . Как и в работах [2, 3], в теоретической части данной статьи все длины и расстояния примем безразмерными, выразив их в длинах акустической волны  $\lambda = c/f$  ( $c$  – средняя скорость звука в канале).

В отсутствие затенения и вариаций параметров среды одиночный  $k$ -й гидрофон на глубине  $z_k$  принимает независящий от времени сигнал, амплитуда и фаза которого определяются (с точностью до электро-акустического переходного множителя) комплексным безразмерным коэффициентом передачи

$$K_k(z_k, z_s) = \sum_n (\chi_n L)^{-\frac{1}{2}} U_n(z_k) U_n(z_s) e^{i\chi_n L}, \quad (1)$$

где модовые собственные функции  $U_n(z)$  и модовые волновые числа  $\chi_n$  обычным образом [6] отыскиваются из решения волнового уравнения при заданном профиле скорости звука  $c(z)$  и надлежащих граничных условиях на поверхности и на дне. Существуют известные компьютерные методы и программы для проведения таких расчетов, например [7].

В экспериментальных условиях параметры канала нестационарны, поэтому амплитуда и фаза принимаемого сигнала существенным образом флуктуируют во времени. Анализ опытных данных показывает, что наиболее существенной причиной таких флуктуаций в информативном для нас диапазоне частот являются длинноволновые колебания водной поверхности (т.н. сейши), характерный масштаб которых в нашем случае одного порядка с длиной трассы или превышает ее. В первом приближении влияние этого эффекта можно оценить, просто рассматривая вариации глубины канала  $H$  как параметра в формуле (1). Изменения волновых чисел  $\chi_n$  с изменением  $H$  при когерентном многомодовом интерференционном суммировании по модам (1) обуславливают высокую чувствительность принимаемых сигналов к указанным вариациям [8], что и оказывается в дальнейшем основным помеховым фактором при наблюдении дифракции.

Наряду с этим в канале действуют и другие факторы, вызывающие вариации принимаемых сигналов. Это, в частности, быстрые амплитудные и фазовые флуктуации за счет отражения звука от взволнованной водной поверхности. Анализ экспериментальных записей на разных озерных трассах и их сопоставление с аналогичными данными морского эксперимента [9] показывают, что флуктуации за счет ветрового волнения поверхности во всех случаях носят сравнительно высокочастотный характер и могут быть

отфильтрованы в процессе обработки при разумных параметрах экрана и его движения. Кроме того, следует отметить амплитудно-фазовые возмущения поля из-за отражений звука от неровностей дна и от берегов. Такие возмущения наоборот, оказываются медленно зависящими от времени и при использованной нами методике обработки сигналов с вертикальной антенны практически не влияют на результат.

Перейдем к обсуждению суммарных временных изменений принимаемых сигналов за счет указанных интерференционных флуктуаций и дифракционно-теневых эффектов от перемещаемого экрана. Представим текущую комплексную амплитуду  $x_k(t)$  сигнала на  $k$ -ом гидрофоне в виде суммы

$$x_k(t) = x_k^{(s)}(t) + \delta x_k(t), \quad (2)$$

где  $x_k^{(s)}(t)$  – флуктуирующий прямой сигнал от источника и  $\delta x_k(t)$  – эффект дифракционного затенения антенны движущимся экраном.

В дальнейшем примем для рассмотрения следующую кинематическую схему движения экрана [1]. Будем считать, что экран движется с постоянной скоростью  $v$  и на постоянной глубине перпендикулярно к акустической трассе (линия излучатель – антенна), пересекая ее в момент  $t_0$  на расстоянии  $R$  от антенны. Тогда, согласно [1, 2], следует положить

$$\delta x_k(t) = |\delta x|_{\max} D(t) \exp[-i\pi v^2 (t-t_0)^2 / h + \delta\phi_k], \quad (3)$$

где  $h$  – приведенное удаление экрана определяемое по формуле

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{R} + \frac{1}{L-R}. \quad (4)$$

Предэкспоненциальная функция  $D(t)$  представляет собой апертурную огибающую, зависящую от формы экрана. Для прямоугольного экрана, в частности, она имеет каноническую структуру вида  $\sin[a(t-t_0)]/a(t-t_0)$ . Предполагая построить алгоритм для наблюдения экрана с неизвестной заранее формой, мы примем в качестве  $D(t)$  функцию гауссова типа из статьи [2]:

$$D(t) = \exp[-2v^2 l^2 (t-t_0)^2 / h^2], \quad (5)$$

где  $l$  – размер экрана по горизонтали.

Компьютерное моделирование и натурные эксперименты показали, что начальная фаза дифракционного возмущения  $\phi_k$  в формуле (3) существенно меняется с изменением глубины, а ее значения могут отличаться на заметную величину даже для соседних элементов антенны. Поэтому набор возможных картин огибающей дифракционного затенения оказывается весьма богатым [1, 10]. В частности, в опытах неоднократно уда-

валось наблюдать картину "обратной" дифракции, когда вместо ожидаемого дифракционного затенения огибающая сигнала на определенном гидрофоне содержит характерный подъем.

Сомножитель  $|\delta x|_{\max}$  в формуле (3) тоже следовало, строго говоря, снабдить индексом  $k$  – номером гидрофона. Так же, как и начальная фаза, амплитуда возмущения существенно варьирует по глубине, а ее поведение зависит от многих факторов: гидрологического профиля, рельефа дна, глубины протяжки экрана. Однако для последующей записи и для оценок нам удобнее сразу же принять в качестве множителя  $|\delta x|_{\max}$  его значение, усредненное по элементам антенны и по глубинам перемещения экрана. Следует еще учесть, что условия многомодового распространения звука в мелководном волноводе несколько увеличивают амплитуду возмущения по сравнению с рафинированной двумерноцилиндрической схемой дифракции. Учитывая сказанное, для дальнейшего примем модельную полуэмпирическую оценку относительной амплитуды теневого возмущения (по отношению к средней амплитуде прямого сигнала) из работы [1]:

$$\frac{|\delta x|_{\max}}{|x^{(s)}|} = \mu \frac{\sigma}{H\sqrt{h}}, \quad (6)$$

где  $\mu > 1$  – коэффициент усиления тени за счет многомодовости распространения, а  $\sigma$  – площадь сечения экрана. Компьютерное моделирование для условий, близких к обсуждаемым ниже экспериментам, дает значение  $\mu \approx 1.4$ .

## 2. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ

Представим текущие принятые комплексные сигналы  $x_k(t)$  в форме

$$x_k(t) = X_k(t)e^{i\phi_k(t)}. \quad (7)$$

Первым этапом применяемой нами предварительной обработки является формирование нормализованных амплитудных и фазовых переменных

$$Y_k^{(a)}(t) = \frac{X_k(t)}{\bar{X}_k(t)} - 1, \quad (8)$$

$$Y_k^{(\phi)}(k) = \phi_k(t) - \tilde{\phi}_k(t), \quad (9)$$

где  $\bar{X}_k(t)$  и  $\tilde{\phi}_k(t)$  представляют собой результаты обычного скользящего сглаживания переменных  $X_k(t)$  и  $\phi_k(t)$  посредством линейного фильтра-окна с передаточной функцией

$$g(t) = \begin{cases} \tau^{-1} & \text{для } |t| \leq \tau/2 \\ 0 & \text{для } |t| > \tau/2. \end{cases} \quad (10)$$

Время сглаживания  $\tau$  каждый раз выбирается из тех априорных соображений, чтобы оно несколько превышало ожидаемое характерное время прохождения дифракционного возмущения. Это время оценивается исходя из угловой ширины дифракционного лепестка и предполагаемой скорости перемещения экрана.

Отметим, что эвристическая процедура амплитудной нормализации (8) является нелинейной. Опыт ее применения показал, что она оказывается эффективной и в случае нестационарности условий распространения, когда развитая теория линейной фильтрации для стационарных и эргодических случайных процессов неприменима и поэтому не может дать полезных рекомендаций.

Следующий этап обработки сигнала состоит в применении согласованной фильтрации. Наиболее простой с точки зрения практической реализации чисто амплитудный алгоритм согласованной фильтрации [2, 3] состоит в преобразовании переменной  $Y_k^{(a)}(t)$  по формуле

$$F_k^{(a)}(t) = \left| \int Y_k^{(a)}(t')\Phi(t-t')dt' \right|, \quad (11)$$

где

$$\Phi(t) = C \exp \left[ -\frac{v^2}{h} \left( i\pi + \frac{2t^2}{h} \right) t^2 \right] \quad (12)$$

представляет собой передаточную функцию фильтра, согласованного с обсуждавшейся выше моделью дифракционного возмущения. Нормировочную константу  $C$  мы уточним чуть позже.

Аналогичным образом строится алгоритм выделения обостренного дифракционного пика за счет согласованной фильтрации фазовой переменной

$$F_k^{(\phi)}(t) = \left| \int Y_k^{(\phi)}(t')\Phi(t-t')dt' \right| \quad (13)$$

с той же самой передаточной функцией  $\Phi(t)$  (12). Компьютерное моделирование и обработка натурных записей показывают, что структуры дифракционных пиков, выделенных посредством процедур (11) и (13) из амплитудной и фазовой компонент принятого сигнала, почти полностью подобны одна другой. В обоих случаях сигнальный пик располагается на фоне уширенного пьедестала, хорошо известного в амплитудной оптической голографии. Причина указанного подобия состоит в том, что для малого (относительно прямого сигнала) дифракционного возмущения переменные  $Y_k^{(a)}(t)$  и  $Y_k^{(\phi)}(t)$  оказываются просто квадратными компонентами комплексного возмущения вида (3). В справедливости последнего утверждения можно убедиться, если подставить представление сигнала (2) с учетом (3) в формулы (8) и (9). Не учитывая флуктуации прямого сигнала

ла и полагая  $\tilde{X}_k = \overline{|x_k^{(s)}|}$ , в линейном по  $|\delta x_k|$  приближении получим

$$Y_k^{(a)}(t) = \frac{|\delta x|_{\max}}{\overline{|x_k^{(s)}|}} D(t) \times \quad (14)$$

$$\times \cos[-\pi v^2(t-t_0)^2/h + (\delta\varphi_k - \tilde{\varphi}_k)],$$

$$Y_k^{(\varphi)}(t) = \frac{|\delta x|_{\max}}{\overline{|x_k^{(s)}|}} D(t) \times \quad (15)$$

$$\times \sin[-\pi v^2(t-t_0)^2/h + (\delta\varphi_k - \tilde{\varphi}_k)].$$

Отметим, что величина  $|\delta x|_{\max}/\overline{|x_k^{(s)}|}$  в экспериментах описываемого ниже типа составляет единицы процентов.

Несмотря на указанное подобие чисто амплитудного и чисто фазового алгоритмов, работать с фазовой переменной все же намного труднее. Необходимо использовать вспомогательные алгоритмы для устранения неоднозначности фазы в области ее определения, компенсировать фазовые скачки на участках аномальных падений амплитуды и т.д. Кроме того, даже после применения всех программных ухищрений результирующие фазовые флуктуации, соответствующим образом нормированные, оказываются в некоторых случаях выше амплитудных.

Аналогичные трудности в их оптико-механическом варианте были отмечены на заре появления оптической голографии. Первые амплитудные голограммы тогда удалось получить уже сравнительно простыми средствами при помощи весьма несовершенных и нестабильных источников. А вот произошедшее позднее получение амплитудно-фазовых голограмм потребовало значительных и нестандартных технических усилий: постановки оптической системы на независимый фундамент, проведения экспонирования в наиболее тихие ночные часы.

Комплексная согласованная фильтрация просветно-теневых акустических сигналов строится следующим образом. Составим из амплитудных и фазовых переменных их комплексные линейные комбинации  $Y_k(t) = Y_k^{(a)}(t) + iY_k^{(\varphi)}(t)$ , после чего совершим преобразование

$$F_k(t) = \left| \int Y_k(t') \Phi(t-t') dt' \right| \quad (16)$$

с использованием прежней передаточной функции  $\Phi(t)$  из (12). Нужно только учесть, что при наличии дифракционного возмущения (14)–(15) комплексная процедура (16) увеличивает амплитуду в  $\sqrt{2}$

раз, поэтому выбор нормировочной константы  $C$  в формуле (12) следует производить из условий

$$\int |\Phi(t)|^2 dt = \begin{cases} 2 & \text{для } F_k^{(a)}, F_k^{(\varphi)} \\ 1 & \text{для } F_k. \end{cases} \quad (17)$$

Анализ показывает, что именно при таком выборе нормировок во всех трех случаях сохраняется возможность использовать формулу (6) для оценок сечения акустической дифракции  $\sigma$  по результатам эксперимента. Отметим, что именно на этапе согласованной фильтрации (16) достигается устранение основной части флуктуаций, обусловленных ветровым волнением водной поверхности.

Следующим этапом многоканальной обработки преобразованных дифракционных откликов является их некогерентное накопление по вертикальной антенне

$$F(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N F_k(t), \quad (18)$$

где  $N$  – число суммируемых элементов антенны. Наконец, в обсуждаемых ниже экспериментах применялось еще и накопление по нескольким рабочим частотам. Обозначим эти частоты  $f_j$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ;  $M$  – число рабочих частот) и снабдим добавочным частотным индексом  $j$  реализованные функции из (11), (13), (16) и (18):  $F_{kj}^{(a)}(t)$ ,  $F_{kj}^{(\varphi)}(t)$ ,  $F_{kj}(t)$  и  $F_j(t)$  соответственно. Перенормировку безразмерных параметров фильтра (12) к переменной длине волны  $\lambda_j$  производить не будем, поскольку разница между соседними частотами в нашем случае составляла всего около процента. С учетом сказанного запишем результат окончательной обработки с применением комплексной согласованной фильтрации в виде

$$F(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M F_j(t). \quad (19)$$

Технические возможности эксперимента позволяли использовать одновременно до пяти рабочих частот. Минимальное разнесение по частотам выбиралось из тех соображений, чтобы флуктуации сигнала на соседних частотах можно было считать статистически независимыми с достаточной для практических целей точностью. Дополнительные опыты показали, в частности, что уже при частотном разнесении в единицы процентов амплитудные флуктуации соответствующих принятых тональных сигналов имеют коэффициент корреляции порядка 0.1.

Флуктуации сигналов на разных элементах вертикальной антенны также оказались коррелированы весьма слабо. Измерения показали, что

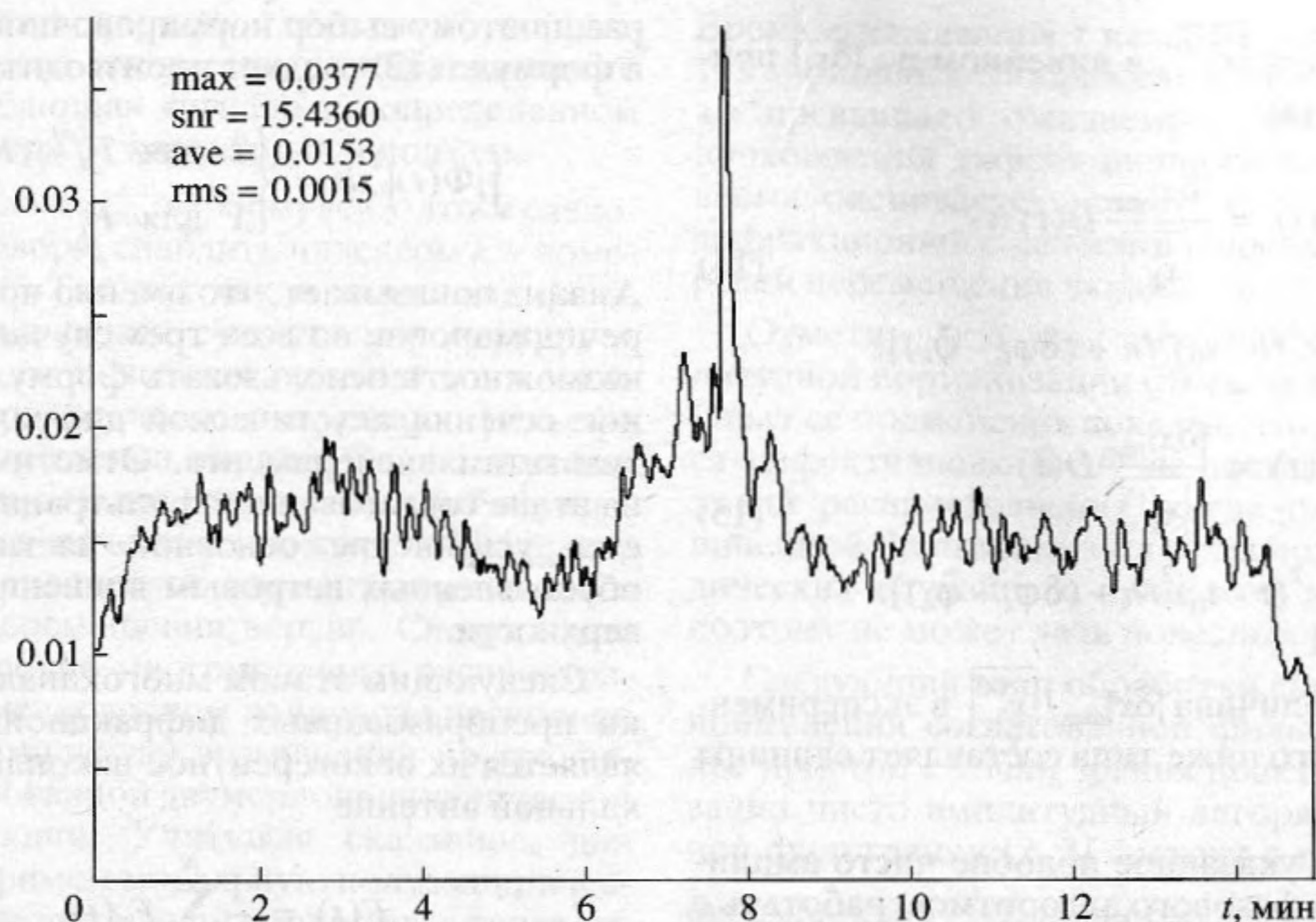


Рис. 1. Амплитудная фильтрация.

амплитудные и фазовые одночастотные флуктуации сигналов на гидрофонах, разнесенных по вертикали на  $\lambda/2$ , уже можно было считать практически независимыми (расстояние между соседними элементами использовавшейся нами антенной цепочки составляло чуть меньше  $\lambda/2$ ).

Перечисленные обстоятельства определили весьма высокую эффективность процедур некогерентного поэлементного накопления (18) и частотного накопления (19), что будет продемонстрировано ниже на конкретном экспериментальном материале.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Акустическая трасса была сформирована в условиях естественного пресноводного водоема (озера) с глубиной около 14 м и сравнительно ровным дном. Длина трассы составила около 480 м, излучатель располагался вблизи дна. Вертикальная приемная антенна содержала 64 элемента и перекрывала канал практически на всю глубину. Акустическое поле на трассе возбуждалось монопольным керамическим излучателем и содержало одновременно пять рабочих частот вблизи частоты 3 кГц с разнесением на величину около 40 Гц между соседними частотами. Температурный профиль канала распространения характеризовался наличием прогретого приповерхностного водного слоя с температурой около  $20^{\circ}\text{C}$  и толщиной до 4 м. При дальнейшем увеличении глубины температура воды резко снижалась, достигая значения  $6-7^{\circ}\text{C}$  вблизи дна. Сравнение температурных

профилей, а также волновой обстановки (при характерной скорости ветра 3–5 м/с) и размаха относительных флуктуаций принимаемого прямого сигнала (порядка 0.1–0.2) с аналогичными характеристиками эксперимента [9] на трассе мелкого моря показало их масштабную-частотную сопоставимость на качественном уровне и по порядкам величин.

Дифракционный экран с размерами поперечного сечения  $0.5 \times 2.5$  м протягивался поперек акустической трассы вблизи ее середины с различными постоянными скоростями и на постоянной глубине. Для последующего анализа в данной статье выбрана запись эксперимента, в котором экран протягивался со скоростью  $v \approx 0.3$  м/с.

Начнем с обсуждения последовательности цифровых процедур, выполняемых при обработке с использованием чисто амплитудного алгоритма согласованной фильтрации. Сначала комплексные сигналы на каждой из пяти рабочих частот и на каждом из антенных каналов подвергаются узкополосной цифровой фильтрации (в полосе порядка 1 Гц) для устранения местных акустических и электрических шумов. Затем на всех частотах выделяются реализации огибающих  $X_k(t)$ , которые и подвергаются последовательным процедурам нормализации (8) с характерным временем  $\tau = 60$  с в прямоугольном фильтре (10), амплитудной согласованной фильтрации (11) и некогерентного накопления типа (18). После этого производится частотное усреднение (19) по пяти частотам, результат которого представлен на рис. 1.

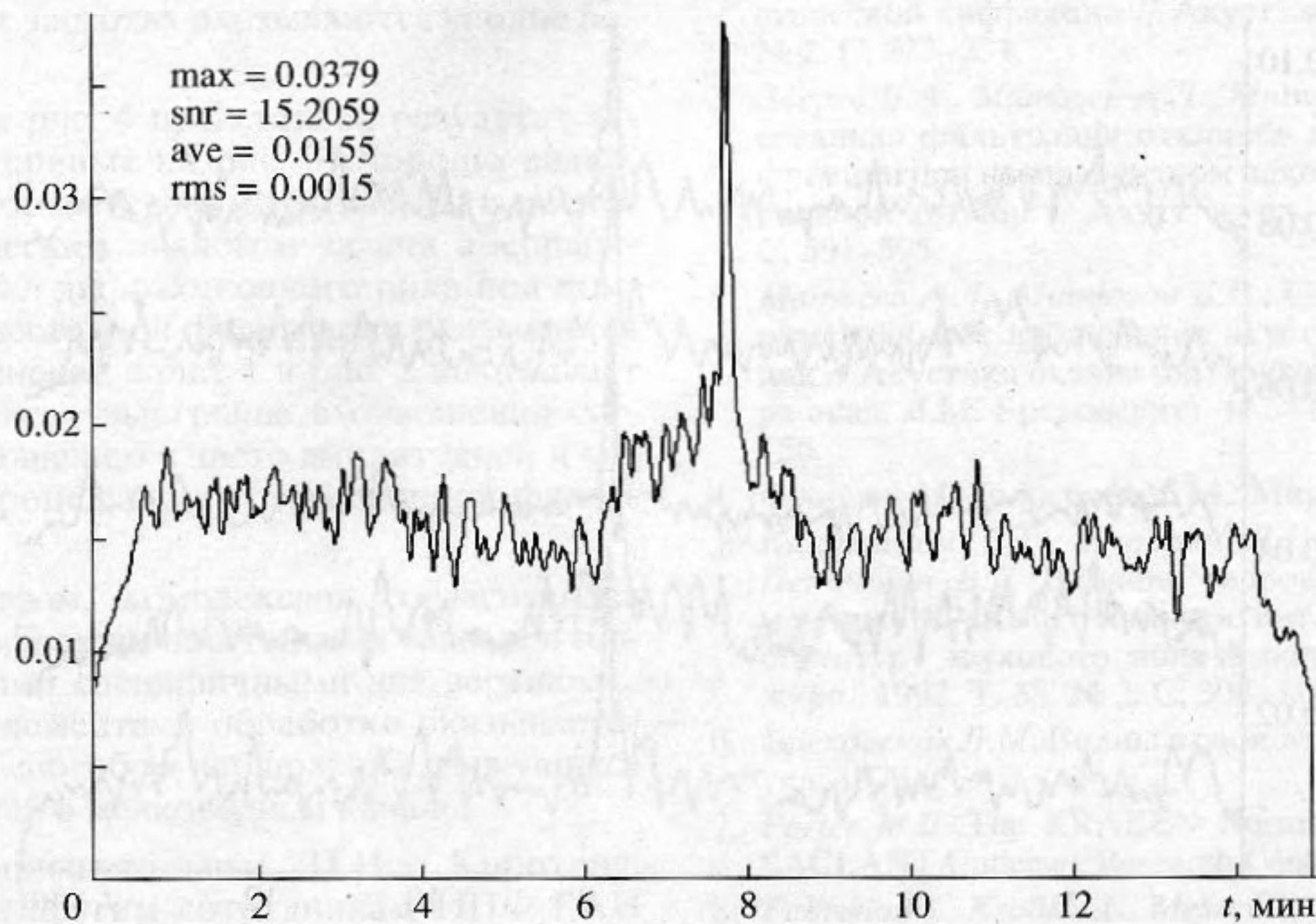


Рис. 2. Фазовая фильтрация.

Сразу же отметим, что на рисунке хорошо виден упоминавшийся выше размытый абберационный пьедестал (ср. [2]), на фоне которого и расположен обостренный процедурой (11) дифракционно-теневой пик. Цифровые данные в левом верхнем углу имеют следующий смысл:

max = 0.0377 — высота максимального пика

snr = 15.4360 — отношение сигнал/шум

ave = 0.0153 — средний шумовой пьедестал

rms = 0.0015 — стандартное отклонение для остаточных шумовых флуктуаций.

Все указанные величины приведены в линейной по амплитуде шкале. Напомним, что после нормализации (8) все величины оказываются автоматически нормированы к амплитуде прямого сигнала, что и отражено в безразмерных цифровых данных по оси ординат на всех четырех приводимых рисунках. Разумеется, статистические характеристики остаточных помех (ave) и (rms) вычислены по участкам, свободным от сигнального пика, сопровождающего его абберационного пьедестала и технологических краевых эффектов понижения уровня, характерных для данного способа обработки.

Несложный анализ показывает, что для оценки сечения дифракции  $\sigma$  по формуле (6) по результатам эксперимента в качестве величины  $|\delta x|_{\max}/|x^{(s)}|$  следует выбрать значение разности (max) — (ave) из таблицы опытных данных. В нашем случае для рис. 1 имеем (max) — (ave) = 0.022. Сравним это число с оценкой по формуле (6).

Подставляя значения  $\sigma = 5$ ,  $H = 30$ ,  $h = 240$ ,  $\mu = 1.4$ , получаем (max) — (ave) = 0.014. Как видим, по порядку величины согласие оказывается удовлетворительным.

Сопоставление довольно большого числа подобных экспериментов показало, что формула (6) дает в среднем несколько заниженную оценку. Наиболее вероятной причиной этого расхождения является наличие существенной температурной неоднородности (скачка) в приповерхностном слое воды. При определении коэффициента  $\mu$  методом компьютерного моделирования в работе [1] это обстоятельство не учитывалось. Физически представляется очевидным, что наличие прогретого приповерхностного слоя воды (в нашем случае это примерно 6–8 длин акустической волны) уменьшает эффективную глубину канала  $H$ , в котором концентрируется основная часть акустической энергии. Проверка показала, что внесение надлежащей эмпирической поправки практически устраняет указанную систематическую ошибку в оценках высоты дифракционных пиков.

Результат аналогичной согласованной обработки для фазовых переменных  $Y_k^{(\varphi)}(t)$  после приращения всех перечисленных выше накопительных процедур изображен на рис. 2. Сравнение обнаруживает почти полное подобие основных параметров результирующих кривых, полученных при обработке только амплитудных и только фазовых компонент. Как и в предыдущем случае, здесь хорошо заметен абберационный пьедестал,

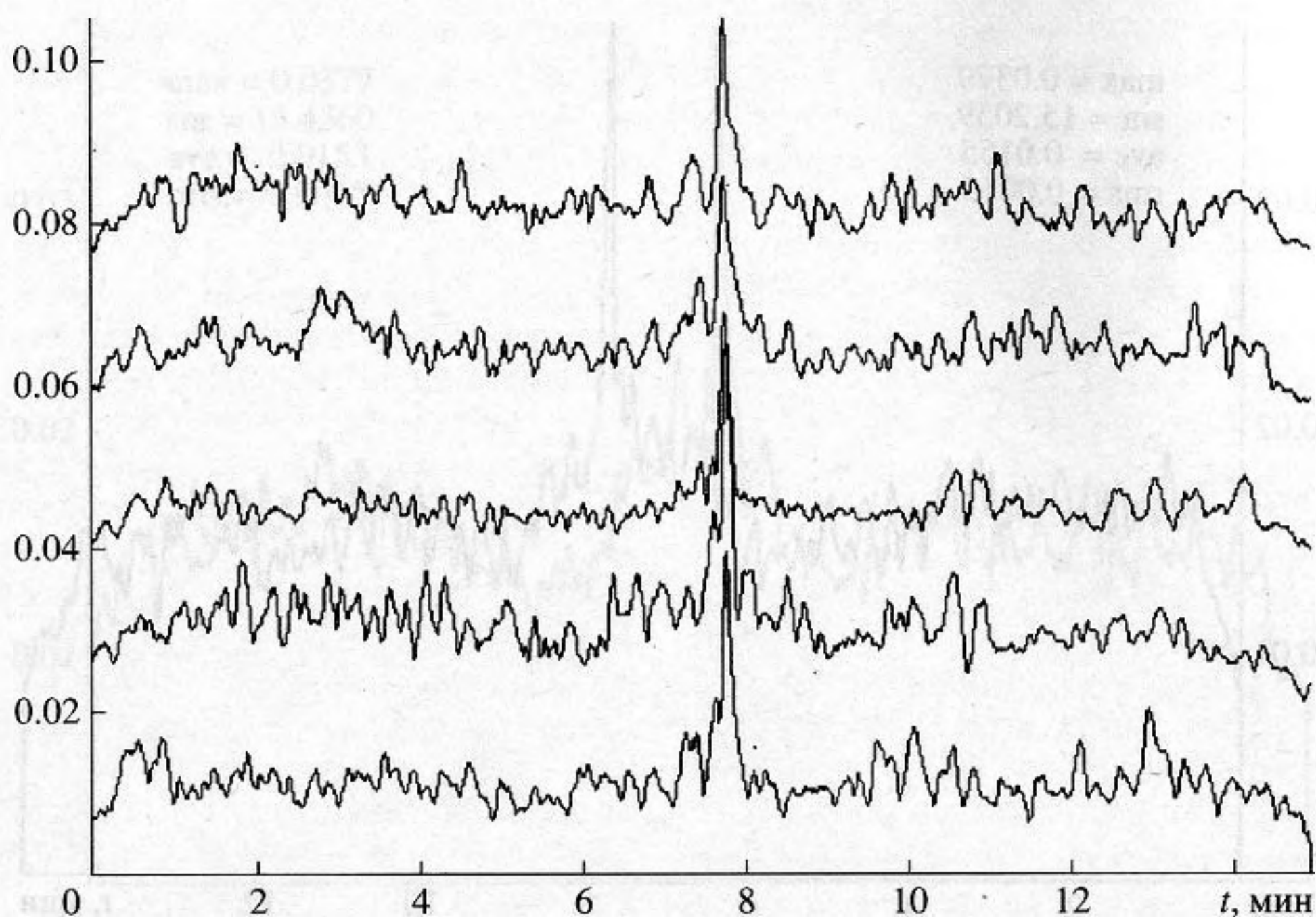


Рис. 3. Комплексная фильтрация для пяти частотных каналов.

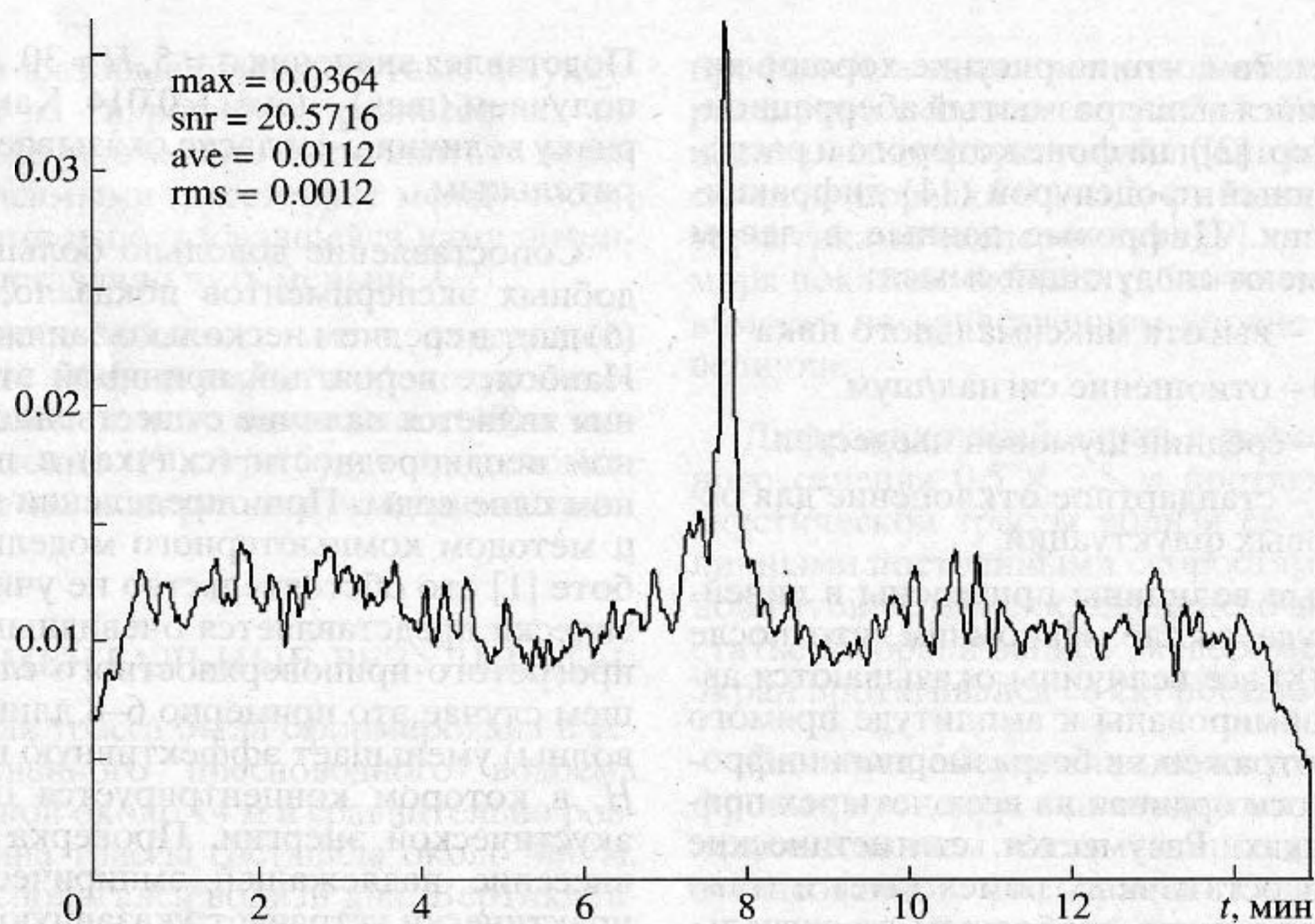


Рис. 4. Результат усреднения по частотам.

форма которого несколько затумована остаточными помехами.

Следующий этап анализа – комплексная согласованная фильтрация (16). На рис. 3 показаны результаты ее применения после поэлементного накопления (18) для всех пяти рабочих частот (кривые приведены с искусственным сдвигом относительно вертикальной оси, поэтому цифры по

оси ординат относятся только к нижнему графику). При внимательном визуальном изучении представленных кривых можно убедиться, что шумовые выбросы на них практически некоррелированы между собой, что и обеспечивает существенное шумоподавление при частотном накоплении. С другой стороны, обостренные за счет согласованной фильтрации дифракционные сигнальные

пики на разных частотах оказываются вполне подобны.

Наконец, на рис. 4 представлен результат усреднения (19) кривых на рис. 3. Хорошо видно, что в полном соответствии с теорией [2] и с оптико-голографическим аналогом задачи абберационный пьедестал дифракционного пика при комплексной согласованной фильтрации оказывается устранен. Сравнение с рис. 1 и рис. 2 показывает наличие заметного выигрыша в отношении сигнал/шум по сравнению с чисто амплитудной и чисто фазовой процедурами согласованной фильтрации.

Таким образом, комплексная согласованная фильтрация дифракционно-теневых сигналов совместно с другими специфичными для вертикальной антенны элементами обработки оказывается эффективным способом наблюдения движущихся неоднородностей в мелководном канале.

Авторы признательны П.И. Коротину, Б.М. Салину и другим сотрудникам ИПФ РАН за организацию и проведение эксперимента.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 97-02-17555 и 99-02-16401).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горский С.М., Зверев В.А., Матвеев А.Л., Митюгов В.В. Некогерентное накопление сигналов аку-

стической дифракции // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 2. С. 223–231.

2. Зверев В.А., Матвеев А.Л., Митюгов В.В. Согласованная фильтрация откликов акустической дифракции при некогерентном накоплении на вертикальной антенне // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 4. С. 591–595.
3. Матвеев А.Л., Митюгов В.В., Салин Б.М. Экспериментальное наблюдение акустической дифракции // Акустика океана (сб. трудов школы-семинара акад. Л.М. Бреховских). М.: Геос, 1998. С. 151–156.
4. Франсон М. Голография. М.: Мир, 1972.
5. Кацнельсон Б.Г., Кулапин Л.Г., Мигулин А.А., Петников В.Г. Влияние гидродинамической изменчивости на вертикальную интерференционную структуру звукового поля в волноводе // Акуст. журн., 1992. Т. 38. № 2. С. 308–316.
6. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
7. Porter M.B. The KRAKEN Normal Model Program. SACLANT Undersea Research Center, 1991.
8. Fabrikian J., Krolik J.L., Messer H. Robust maximum-likelihood source localization in uncertain shallow-water waveguide // J. Acoust. Soc. Am. 101. P. 241–249 (1997).
9. Матвеев А.Л., Митюгов В.В. Отчет по 7 рейсу НИС "Академик Сергей Вавилов", гл. 7. М.: ИО АН СССР, 1990.
10. Григорьев В.А., Кузькин В.М. Дифракция акустических волн на жестком вытянутом сфероиде в подводном звуковом канале // Акуст. журн., 1995. Т. 41. № 3. С. 410–414.

## Complex Matched Filtering of Diffraction Sound Signals Received by a Vertical Array

A. L. Matveev and V. V. Mityugov

Theoretical foundations of the use of complex matched filtering in the processing of the diffraction-shadow sound signals received by a multielement vertical array are discussed. The theoretical predictions are compared with the experimental data obtained in a natural water basin.