

УДК 534

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПРИСУТСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПОМЕХ

© 1994 г. В. А. Зверев

Институт прикладной физики РАН
603600 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46

Поступила в редакцию 21.09.93 г.

Предлагается методика измерения или оценки уровня рассеянных акустических сигналов на фоне существенно превосходящих мультипликативных помех, вызванных иными причинами. Методика применена в условиях натурального эксперимента. Актуальность метода обусловлена необходимостью выполнения акустического мониторинга сред при полной уверенности, что наблюдаемые изменения параметров акустических сигналов обусловлены именно влиянием среды, а не иными возможными факторами.

Неоднородности среды, приводящие к рассеянию волн, расширяют пространственный спектр волны, а перемещение этих рассеивателей вместе со средой вызывает флуктуации амплитуды и фазы принимаемых сигналов. Как то, так и другое весьма просто обнаружить и измерить с помощью протяженной акустической антенны и даже с помощью несравненно более простых средств и поэтому, казалось бы, нет более простой задачи, чем измерение рассеяния волн в среде. Это действительно так, если рассеиваемый сигнал является доминирующим над всеми другими источниками как флуктуаций сигнала, так и расширения пространственного спектра. В этом следует убедиться прежде, чем начать наблюдать и измерять. В данной статье предлагается методика, позволяющая оценить вклад, создаваемый рассеянием волн на неоднородностях среды, в общий уровень наблюдаемых изменений пространственного спектра и флуктуаций даже в том случае, если такой вклад пренебрежимо мал, т.е. никакого рассеяния на самом деле нет. Методика основана на том, что в реальной среде всегда есть какое-то, пусть сколь угодно слабое, течение, которое, благодаря эффекту Доплера, "окрашивает" пространственный спектр рассеянного сигнала, играя роль визитной карточки рассеивателей. Предлагаемая методика позволяет выделять такое окрашивание спектра.

Метод успешно применен в натурном эксперименте. Опыт был поставлен в Балтийском море. На расстоянии 10 км от места приема вблизи дна с помощью массивного донного якоря был установлен акустический излучатель мощностью 200 Вт, излучавший частоту 240 Гц. Излучения такой интенсивности было достаточно, чтобы можно было пренебречь влиянием аддитивного акустического шума, а низкая частота позволяла сделать достаточно малым, практически нена-

блюдаемым, рассеянный сигнал, в чем надлежало убедиться. Глубина моря в месте проведения опыта была около 70 м. Возможность наблюдения пространственного спектра обеспечивалась с помощью протяженной гидроакустической антенны, состоящей из 64 приемных элементов, расположенных друг от друга на равных расстояниях через половину длины волны. Приемные элементы были вмонтированы в кабель нейтральной плавучести, который был растянут под водой на глубине 20 м с помощью двух массивных донных якорей и двух плавучестей. Гибкость примененной антенны допускала появление мультипликативной помехи, которая могла приводить к флуктуациям сигнала и расширению его пространственного спектра не хуже, чем рассеянные в среде сигналы. Поэтому с самого начала возникла задача о выделении вклада в наблюдаемые искажения именно рассеянного сигнала.

Актуальность решения этой задачи связана с тем, что если наблюдаемые искажения поля происходят в самой среде, то ими можно воспользоваться для диагностики этой среды [1]; если же эти искажения происходят не в среде а появляются вследствие какого-то несовершенства при приеме сигнала, то необходимо убрать эти помехи. Только после выполнения этой операции можно трактовать наблюдаемые изменения фаз и амплитуд в соответствии с теорией, изложенной, например, в [2].

На рис. 1 показан отклик протяженной акустической антенны на сигнал излучателя в частотной полосе 0.3 Гц. Как видно из этого рисунка, сигнал самого излучателя четко выделяется в принимаемом угловом спектре, так как на расстоянии 10 км для антенны данной длины на частоте 240 Гц сигнал излучателя практически представляет собой одну плоскую волну. В то же время наблюдаемый отклик на уровне более чем -20 дБ

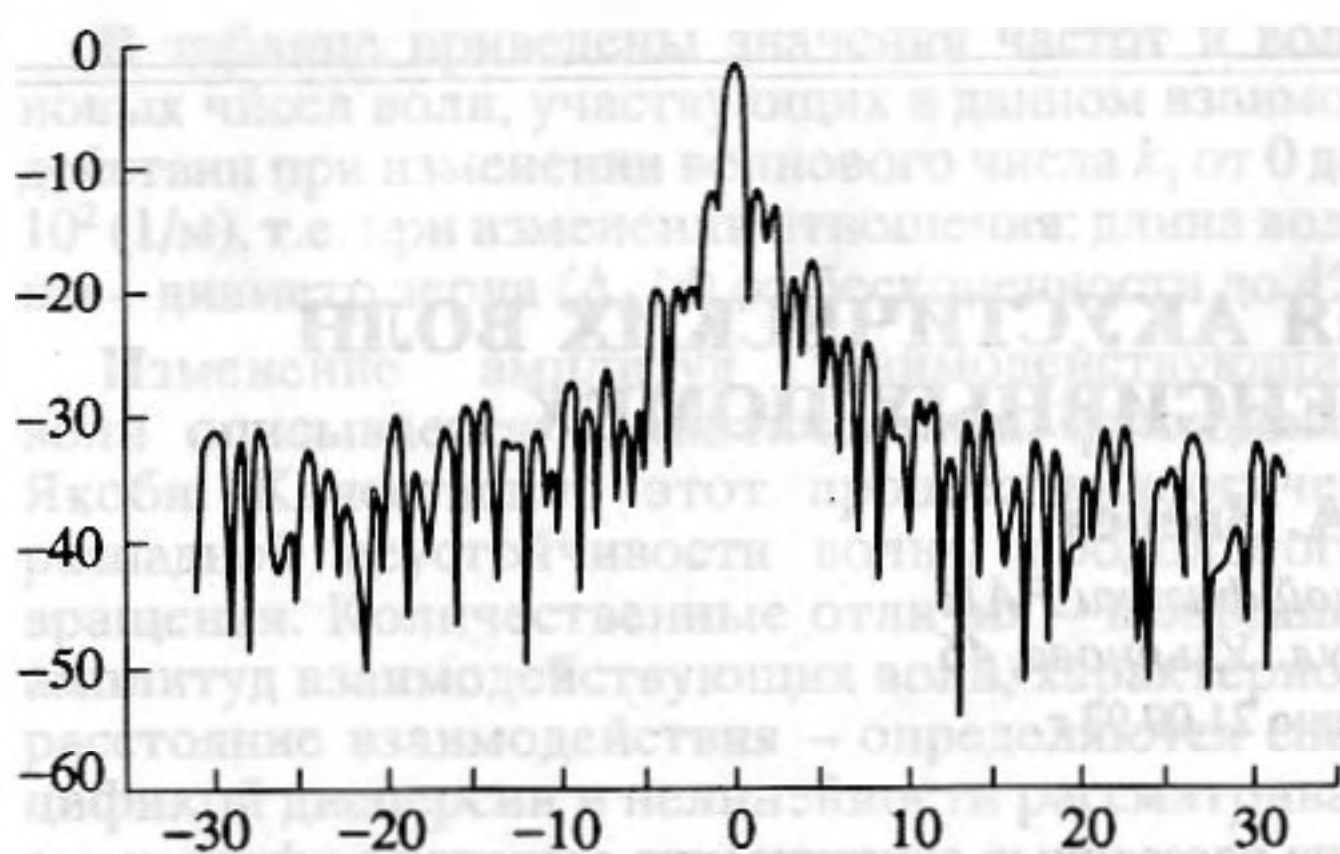


Рис. 1. Угловой спектр сигнала, принятого антенной, как функция безразмерной пространственной частоты $D/\lambda \sin \theta$. Приведен уровень модуля спектра, выраженного в децибеллах относительно максимального уровня.

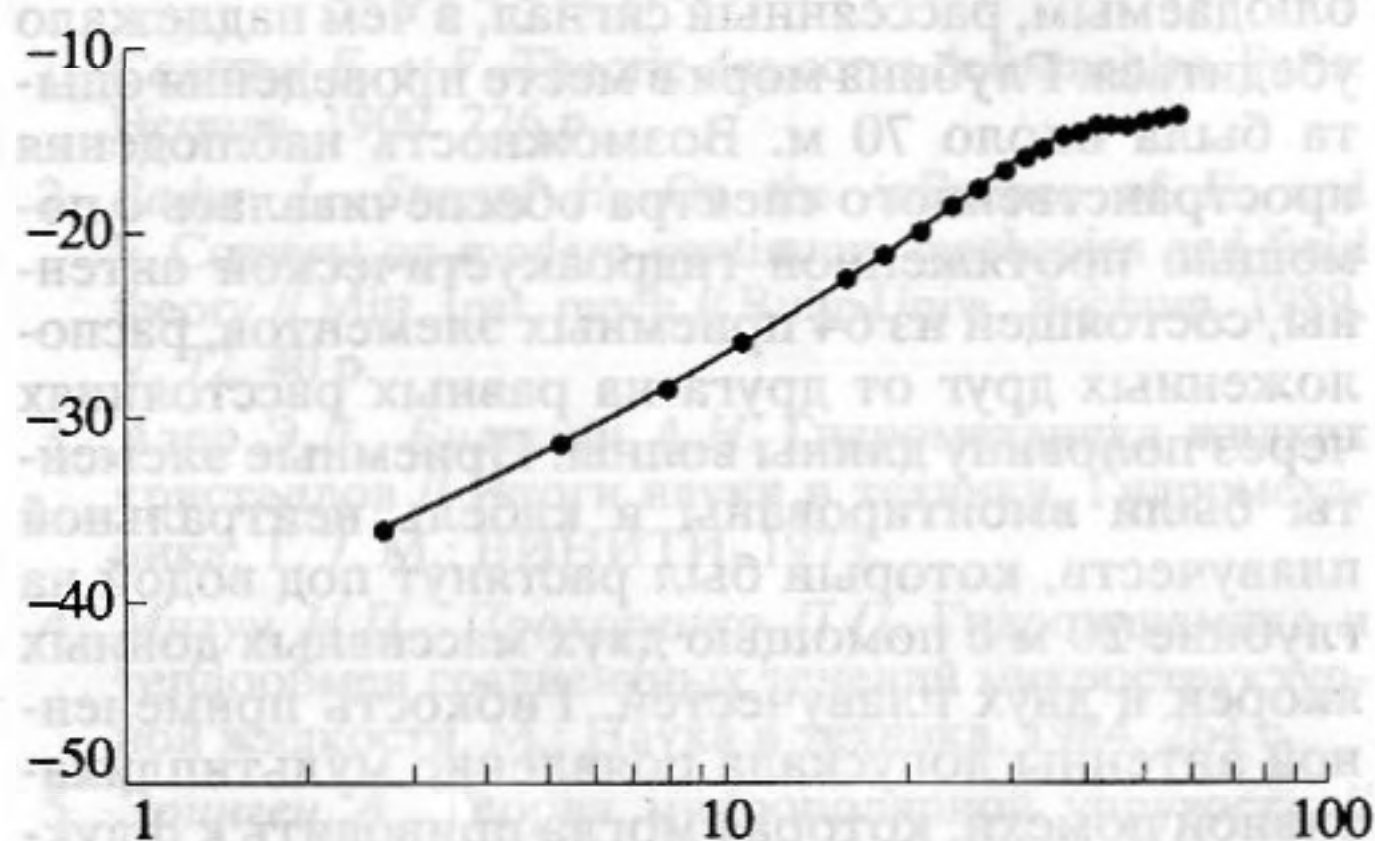


Рис. 2. Результат применения формулы (2) к реализациям сигнала. Показан уровень сигнала в децибеллах относительно максимального уровня сигнала, показанного на рис. 1, в зависимости от NT , выраженного в секундах.

существенно отличается от отклика идеальной антенны на плоскую волну. Эти отличия не являются простым следствием ошибок в фазировке элементов антенны, так как форма отклика, если ее наблюдать на уровне более чем -20 дБ, существенно изменяется через время примерно 100 с, демонстрируя таким образом существенную нестационарность своего поведения во времени. Такой результат можно объяснить либо тем, что в среде имеются рассеиватели, искажающие волновое поле излучателя, либо искажениями поля мультипликативной помехой при его приеме. Возникает задача о разделении этих эффектов.

Метод, примененный для решения этой задачи, с целью достижения большей четкости и компактности описания, мы изложим в виде отдельных операций, совершаемых над сигналом, принимаемым антенной. Сигнал, принимаемый

каждым приемным элементом антенны, представим в виде:

$$M(x, t) = A(x, t) \exp(i\omega t), \quad (1)$$

где $A(x, t)$ – комплексная амплитуда монохроматического сигнала частоты ω [3], а x – координата антенного элемента, отсчитываемая вдоль антенны, t – время.

1. Первая операция состоит в разделении сигналов, определяемых (1), на отдельные неперекрывающиеся между собой временные реализации длительностью T .

2. Для каждой из этих реализаций выполняется комплексное преобразование Фурье по переменной t в пределах длины реализации T .

3. Исключается постоянная фаза, появляющаяся из-за наличия в (1) множителя $\exp(i\omega t)$. Эта операция производится путем деления комплексных чисел, полученных в каждой временной реализации в результате преобразования Фурье, на любую линейную комбинацию этих же чисел. Эта операция совершенно необходима для последующего выявления зависимости $A(x, t)$ от t .

Комплексные числа, полученные в результате выполнения этой операции, обозначим как $B_N(x)$, где N – номер реализации.

4. Определяется средний квадрат по антенным элементам по следующей формуле:

$$C(N) = \frac{1}{D} \int_{-D/2}^{D/2} |B_1(x) - B_N(x)|^2 dx. \quad (2)$$

Здесь D – полная длина антенны.

В результате этой операции выявляется зависимость комплексной амплитуды от времени. В качестве примера на рис. 2 приведен результат этой операции, примененной к данным реального эксперимента, описанного выше. Из графика видно, что комплексная амплитуда действительно зависит от времени.

Перед тем как описать следующую операцию, необходимо сделать пояснение. Предположим, что изменения комплексных амплитуд во времени, проявившиеся в результате операции 4 и показанные на рис. 2, произошли из-за влияния рассеяния волны на неоднородностях среды. Примем, что неоднородности перемещаются вместе со средой как целое, практически не изменяя своей формы. (Модель замороженной турбулентности [3].) В этом случае можно получить последующую реализацию из предыдущей.

В самом деле, пусть мы имеем угловой спектр временной реализации сигнала номера N в виде:

$$V_N(u) = \Phi[B_N(x)], \quad (3)$$

где $\Phi[f(x)]$ означает операцию комплексного преобразования Фурье над функцией $f(x)$,

$$u = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta, \quad (4)$$

θ – угол, отсчитанный от нормали к антенне, λ – длина волны.

Неоднородности, которые согласно нашему предположению, сформировали угловой спектр (3) за время τ , изменят свое положение, что вызовет изменение фазы рассеянных сигналов, определяемое выражением:

$$\Delta\varphi_\tau = 2v\tau \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta, \quad (5)$$

где v – составляющая скорости течения, нормальная к линии, соединяющей излучатель и приемную антенну.

С учетом (4), (5) можно записать в виде:

$$\Delta\varphi_\tau = 2v\tau u. \quad (6)$$

После этого замечания перейдем к следующей операции.

5. Пространственный спектр одной из реализаций умножается на функцию $\exp(i\Delta\varphi_\tau)$, где $\Delta\varphi_\tau$ определяется из формулы (6). Эта операция выражается следующей формулой:

$$V_\tau(u) = \Phi[B_1(x)]\exp(i2v\tau u). \quad (7)$$

6. Совершается обратное преобразование Фурье от функции $V_\tau(u)$, определяемой (7), по формуле:

$$K_\tau(x) = \Phi^{-1}[V_\tau(u)], \quad (8)$$

где $\Phi^{-1}[f(u)]$ – обратное комплексное преобразование Фурье функции $f(u)$.

В результате получаем реализацию сигнала, которая должна наблюдаться антенной через время τ , если справедливо предположение, что пространственный спектр реализации, подвергнутой операциям 5 и 6, сформирован распределенными в среде рассеивателями, движущимися вместе со средой. Полученные таким образом прогнозируемые реализации могут быть представлены аналогично рис. 2, если с ними проделать операцию 4 по формуле (2), заменив в ней NT на τ .

На рис. 3 представлены два графика, полученные таким путем, отличающиеся величиной скорости течения. Один из этих графиков, построенный для скорости течения 0.04 м/с, очень близок к графику, изображенному на рис. 2.

На основе сходства графиков на рис. 2 и 3 можно было бы сделать вывод, что пространственный спектр сигналов, принимаемых антенной, формируется рассеянными сигналами, а скорость течения среды примерно равна 4 см/с. Однако такой вывод явно противоречит результату сле-

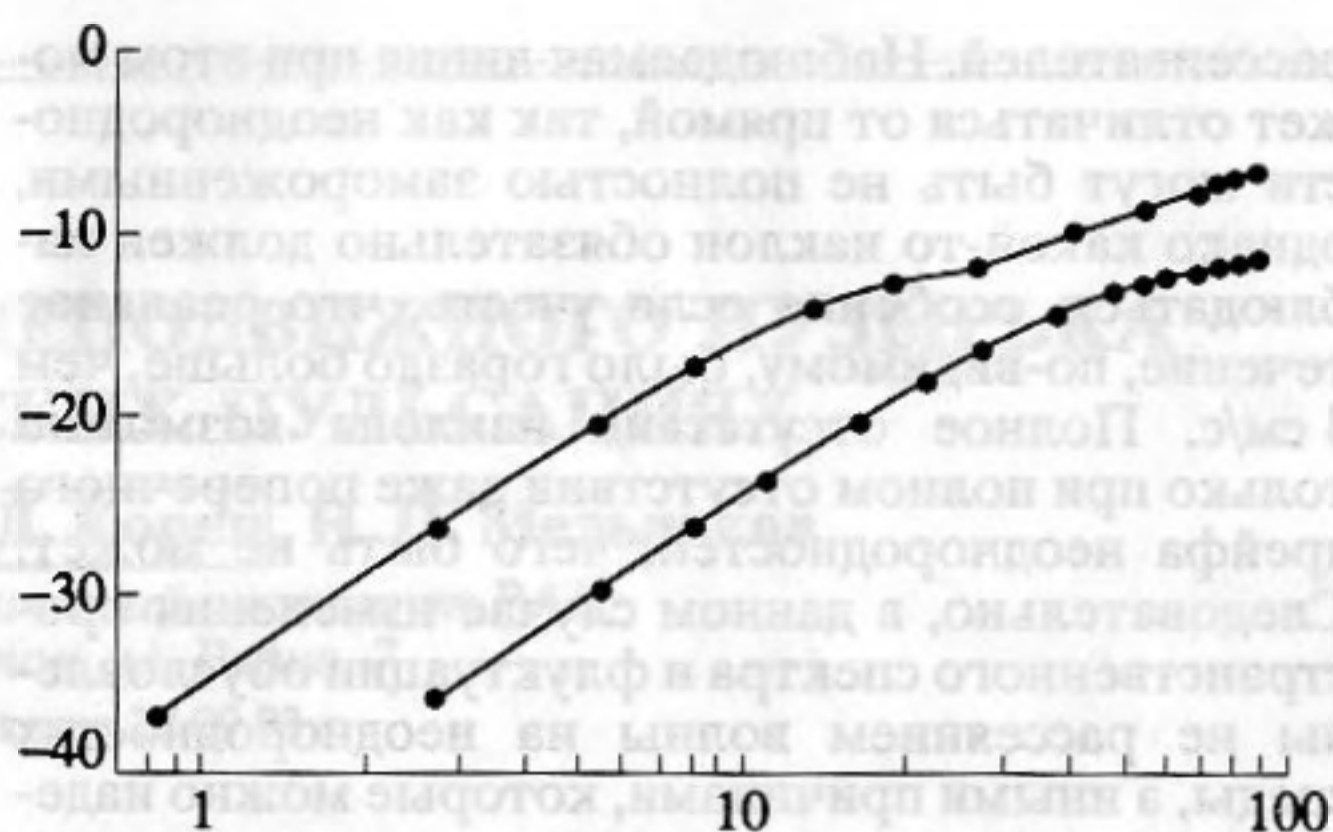


Рис. 3. Результат применения формулы (2) к реализациям сигнала, полученным по формуле (8), показанный в тех же координатах, что и рис. 2. Верхний график построен для скорости течения 0.12 м/с, нижний – для 0.04 м/с.

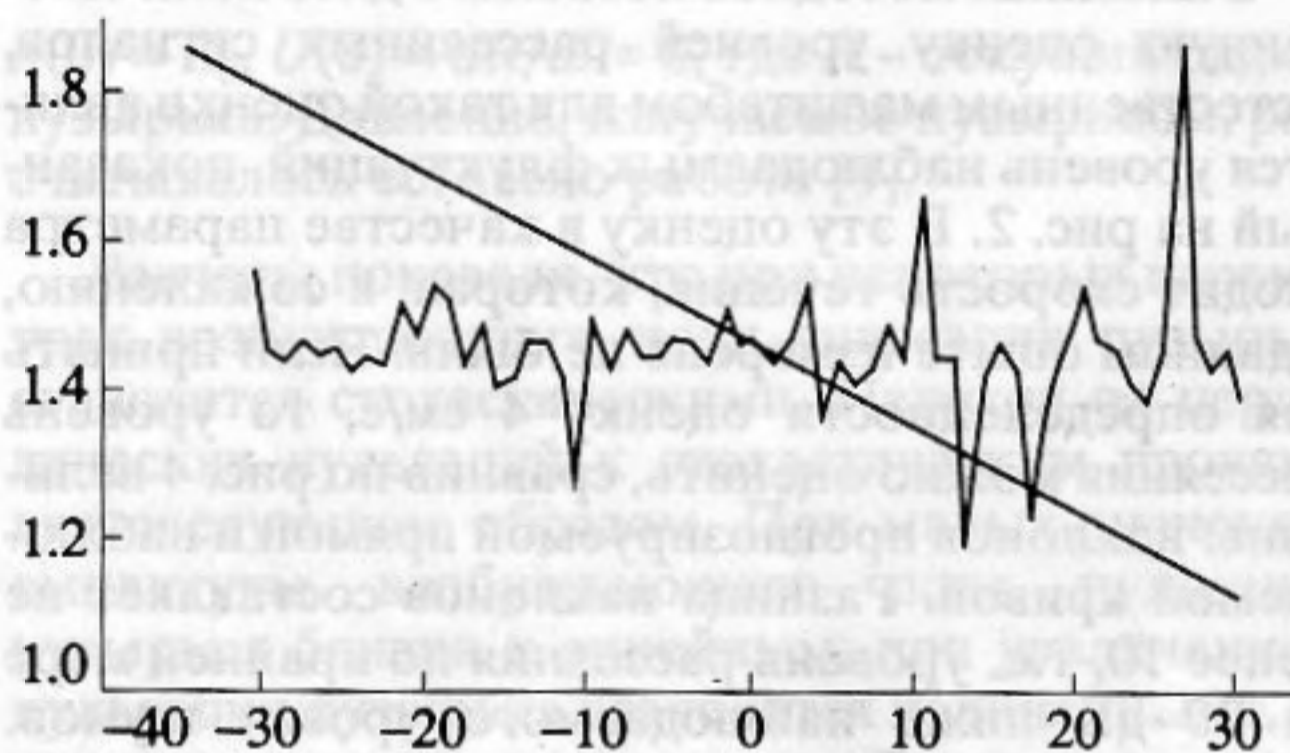


Рис. 4. Фаза отношения угловых спектров, выраженная в виде функции безразмерной пространственной частоты, для двух значений NT или τ функций $B_N(x)$ и $K_\tau(x)$. Время NT , через которое взяты спектры, равно времени τ и составляет 30 с. Скорость течения взята 0.04 м/с. Фаза выражена в долях периода колебания.

дующей операции, которая представляет собою тест на наличие рассеянных сигналов.

7. Для построения такого теста необходимо взять отношение комплексных пространственных спектров $V_N(u)$ для разных N и построить график для фазы этого отношения в зависимости от пространственной частоты u . Пример такого графика приведен на рис. 4. Он построен по данным эксперимента. Из него видно, что прогнозируемая через время τ реализация сигнала выглядит существенно иначе, чем реализация, взятая через такое же время непосредственно из опыта. Прогнозируемая реализация в полном соответствии с теми операциями, посредством которых она была получена, представляет собой прямую, угол наклона которой пропорционален произведению $v\tau$.

Реализация, взятая из опыта, тоже должна иметь какой-то наклон, если принимаемый сигнал действительно исходит от движущихся

рассеивателей. Наблюдаемая линия при этом может отличаться от прямой, так как неоднородности могут быть не полностью замороженными, однако какой-то наклон обязательно должен наблюдаться, особенно если учесть, что реальное течение, по-видимому, было гораздо больше, чем 4 см/с. Полное отсутствие наклона возможно только при полном отсутствии даже поперечного дрейфа неоднородностей, чего быть не может. Следовательно, в данном случае изменения пространственного спектра и флуктуации обусловлены не рассеянием волны на неоднородностях среды, а иными причинами, которые можно надеяться устранить в последующих опытах.

Заметим, что угловой спектр наблюдаемой модуляции не имеет ярко выраженных максимумов, что свидетельствует о малом влиянии не только распределенных в широком угле, но и дискретных рассеивателей.

Описанная методика позволяет дать количественную оценку уровней рассеянных сигналов. Естественным масштабом для такой оценки является уровень наблюдаемых флуктуаций, показанный на рис. 2. В эту оценку в качестве параметра входит скорость течения, которая, к сожалению, в данном опыте измерена не была. Если принять для определенности оценку 4 см/с, то уровень рассеяния можно оценить, сравнив по рис. 4 величины наклонов прогнозируемой прямой и наблюдаемой кривой. Разница наклонов составляет не менее 10, т.е. уровень рассеяния по крайней мере на 20 дБ ниже наблюдаемого уровня шумов. Сам наблюдаемый уровень шумов составляет около -20 дБ по отношению к прямому сигналу.

Таким образом, уровень рассеянного сигнала должен не превышать -40 дБ по отношению к прямому сигналу. Если учесть, что скорость течения на самом деле могла быть на порядок больше, то тогда уровень рассеяния составил бы -60 дБ относительно прямого сигнала. Это оценки только сверху, т.е. со стороны максимально допустимого уровня рассеяния, так как на самом деле никакого рассеянного сигнала в этом опыте не наблюдалось.

Высокая чувствительность метода и возможность обнаружения рассеянного сигнала, скрытого глубоко под уровнем постороннего шума, обусловлена тем, что в результате основной операции 7 используется фаза сигнала, которая способна накапливаться со временем.

Автор выражает глубокую благодарность Б.М. Салину, В.И. Турчину, А.Б. Гершману, И. Коллодиевой и другим сотрудникам Института прикладной физики Российской АН, которые поставили эксперимент и оказали существенную помощь в его математической обработке. Это исследование частично поддержано фондом Сороса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустический мониторинг сред. II сессия Российского акустического общества. Научн. ред. Наугольных К.А. Издание Акуст. ин-та им. Н.Н. Андреева. М., 1993.
2. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля. М.: Наука, 1978.
3. Зверев В.А. Радиооптика. М.: Сов. радио, 1975.

Analysis of the Scattering of Acoustic Waves in the Presence of Intense Noise

V. A. Zverev

A technique for either measuring or estimating the level of scattered acoustic signals in the background of strongly exceeding multiplicative noise is suggested. This technique was tested in a full-scale experiment. Currently, there is interest in this technique because of the need to acoustically monitor certain media to confirm the belief that observed parameter variations of acoustic signals are caused by the medium rather than by other possible factors.