

УДК 551.463

АКУСТИЧЕСКОЕ ТЕМНОЕ ПОЛЕ

© 2000 г. В. А. Зверев

Институт прикладной физики РАН
603600 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru
Поступила в редакцию 20.01.99 г.

Предлагается акустический метод темного поля, позволяющий наблюдать сигналы, рассеянные движущимися неоднородностями среды в направлении, близком к направлению освещающего поля. Приведены результаты натурального эксперимента, показавшего эффективность предлагаемого метода в условиях интенсивной реверберации. Впервые удалось наблюдать пространственное распределение рассеяния волн взволнованной поверхностью для каждой из боковых частот его спектра в отдельности.

В оптике давно существуют установки, позволяющие наблюдать в прямом луче на просвет малые неоднородности. В таких установках прямой свет источника в поле зрения наблюдателя не попадает [1]. Если среда однородна, (рассеивателей нет), то поле зрения прибора остается темным. Отсюда происходит название метода наблюдения – “темное поле”. Стоит в зону прибора, освещаемую мощным источником света попасть неоднородности, изменяющей показатель преломления или прозрачность среды, как она становится видна на экране прибора в виде светящегося объекта. Так наблюдают возмущения, вносимые в среду акустическими волнами и иными неоднородностями, которые невозможно увидеть на фоне источника света.

В подобных устройствах остро нуждается и акустика. С их помощью можно было бы наблюдать и фиксировать неоднородности в океане, течения и другие объекты. Для решения этого класса задач акустики разрабатываются томографические методы [2, 3]. Они позволяют по измеренным флуктуациям времен распространения лучей между многими пунктами их излучения и приема, вычислять место и величину неоднородности [2]. Такая методика требует решения обратных задач. Такие решения обладают неустойчивостью. Кроме того, в условиях мелкого моря не удастся разделять отдельные лучи, и применение томографии становится невозможным [3].

В акустику можно перенести оптический метод темного поля [4]. Для этого нужны акустические антенны большого размера, так называемые фокусируемые антенны [4]. На низких частотах, на которых возможно исследование океанических неоднородностей, фокусируемая антенна представляет собою гигантское “циклопическое” сооружение. Несмотря на гарантированный и выверенный в оптике успех такого сооружения, стро-

ительство таких антенн, судя по литературе, нигде не планируется.

Нами ранее предлагался акустический метод темного поля, позволяющий затемнить поле мощного источника, и наблюдать малые возмущения среды на фоне сигнала от этого источника [5]. Для реализации метода, предложенного в [5], фокусируемая антенна больших размеров не требуется. Достаточно любой антенны, обеспечивающей требуемое угловое разрешение наблюдаемых неоднородностей. Однако этот метод эффективно работает, когда существуют лишь малоугловые пространственные возмущения поля [6, 7]. Специальный эксперимент, проведенный в условиях мелкого моря [6], показал, что, кроме искомым возмущений, имеется шумовой ореол, охватывающий весь диапазон углов, на уровне – 15–20 дБ от уровня поля излучателя [8, 9, 10]. Предложенный в [5] метод акустической антенны темного поля в таких условиях мало эффективен.

Метод затемнения поля мощного источника в [5] состоял в использовании разности сигналов комплексных амплитуд в соседних элементах антенны, что практически эквивалентно вычитанию соответствующим образом сфазированных значений комплексных амплитуд сигналов в соседних элементах антенной решетки [6]. Предлагаемый в настоящей работе модифицированный метод темного поля основан на вычитании значений логарифмов комплексных амплитуд в соседних дискретных моментах времени. Вычитание значений сигналов в соседних точках отсчета во времени эквивалентно фильтрации. Линейная фильтрация после логарифмирования совершается при кепстральном методе выделения сигналов [11]. Частотная характеристика фильтра, эквивалентного вычитанию сигналов через малое время, спадает к низким частотам пропорционально частоте. Такая форма частотной характеристики фильтра подавляет постоянную состав-

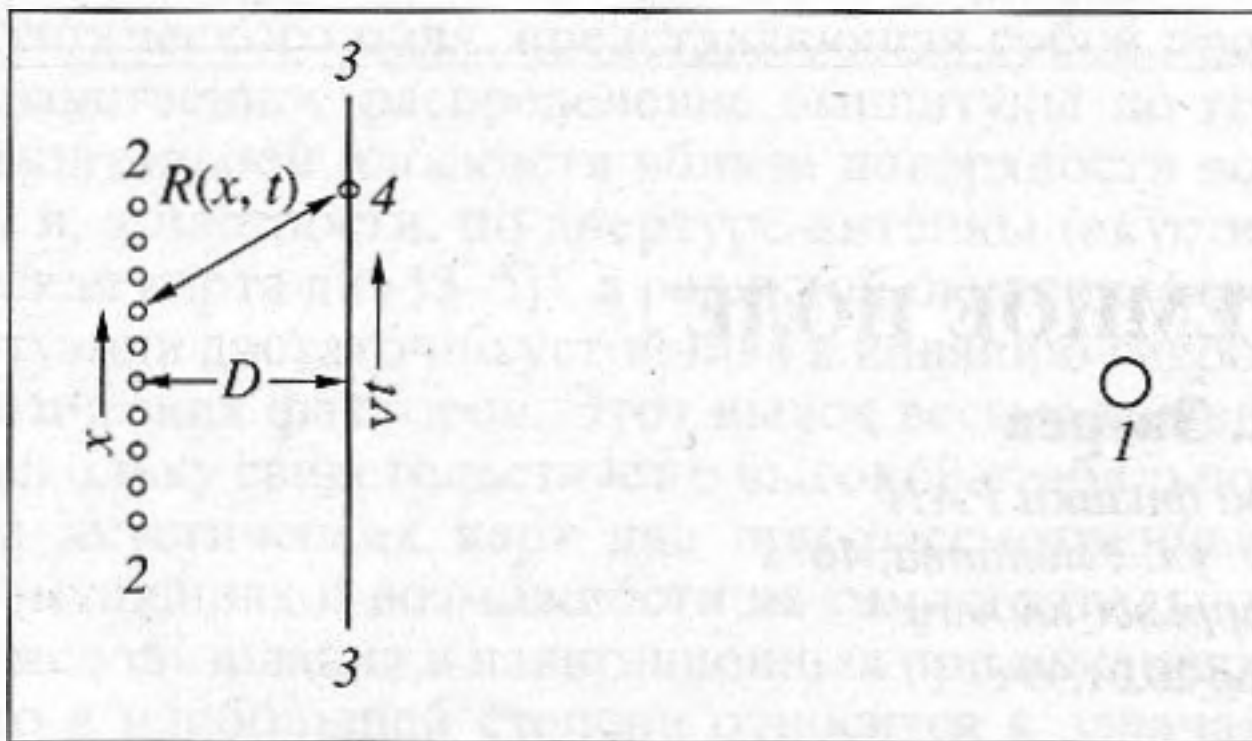


Рис. 1. Схема моделирования эксперимента. На рисунке обозначено: 1 – излучатель; 2–2 – приемная антенна; 3–3 – трасса движения имитируемого рассеивателя; 4 – рассеиватель; D – расстояние от трассы движения рассеивателя до приемной антенны; R(x, t) – расстояние от рассеивателя до каждого приемного элемента антенны.

ляющую и ослабляет низкие частоты. При этом подчеркиваются сигналы, рассеянные движущимися неоднородностями пропорционально их доплеровской частоте.

Предлагаемый метод исследован как путем математического моделирования, так и экспериментально в натуральных условиях интенсивной реверберации. При этом получено затемнение поля флуктуирующего прямого сигнала и сопутствующих ему помех по отношению к прямому полю излучателя, освещающего антенну, на 60 дБ. Заметим, что существующие лучшие адаптивные методы, включая [5], оказались способными затемнить акустическое поле излучателя в условиях интенсивной реверберации не более чем на 30 дБ [6].

Суть метода изложим на конкретном примере. В акустический волновод поместим мощный излучатель монохроматического сигнала для освещения неоднородностей. Для наблюдения неоднородностей на некотором расстоянии от излучателя разместим акустическую антенну. Пусть это будет линейная горизонтальная антенна, состоящая из ряда эквидистантно расположенных приемных элементов.

Пусть комплексная амплитуда поля (комплексное число, модуль которого равен амплитуде колебания в акустическом поле, а аргумент его фазе [12, 13]) на элементе антенны, имеющим номер k в момент времени, номер которого n , будет $A_{k,n}$. Алгоритм создания акустического темного поля (АТП) предполагает выполнение следующих действий с комплексными амплитудами поля, принимаемыми отдельными приемными элементами антенной решетки:

$$S_{k,n} = \ln\left(\frac{|A_{k,n+1}|}{|A_{k,n}|}\right) + i(\arg(A_{k,n+1}) - \arg(A_{k,n})). \quad (1)$$

Действие преобразования (1) сначала покажем на математической модели. В качестве простейшей модели выберем наблюдение одиночного рассеивателя, движущегося по прямолинейной траектории и освещаемого плоской волной, как это показано на рис. 1. Эта модель позволит нам не только показать действие преобразования (1), а и получить калибровочный сигнал, необходимый для оценки величины наблюдаемых неоднородностей. Пусть между излучателем 1 и приемной антенной 2–2 по трассе 3–3 движется рассеиватель 4 с постоянной скоростью v (рис. 1). Найдем комплексную амплитуду рассеянного поля, излученного движущимся рассеивателем на каждом элементе приемной антенны. Введем следующие геометрические параметры: расстояние от рассеивателя до точки приема $R(x, t)$, где x – координата приемного элемента антенны (рис. 1); длину пути, пройденного рассеивателем при его движении вдоль траектории 3–3 – vt , где t время; дистанцию от траектории рассеивателя до антенны D . В принятых обозначениях и предположениях будем иметь:

$$R(x, t) = \sqrt{D^2 + (vt - x)^2}. \quad (2)$$

Фаза сигнала, поступающего от рассеивателя в каждую точку приема, в результате изменения расстояния $R(x, t)$ будет следующим образом зависеть от времени:

$$\varphi(x, t) = \frac{2\pi}{\lambda} R(x, t), \quad (3)$$

где λ длина волны.

Предположим, что излучатель расположен так далеко от антенны, что создаваемое им прямое поле имеет разность фаз между соседними элементами антенной решетки, независящую от номера антенного элемента (следствие того, что антенна не фокусируемая). Пусть эта фаза не зависит от времени (излучатель и антенна неподвижны), и для определенности равна нулю. Искомую комплексную амплитуду мы получим (с точностью до постоянной фазы) с помощью следующей формулы:

$$A(x, t) = \exp(i\varphi(x, t)) + A_0, \quad (4)$$

где A_0 прямое поле излучателя на антенне.

Выражение (4) использовано нами для математического моделирования одиночного рассеивателя движущегося в зоне наблюдения АТП.

На рис. 2 показан результат наблюдения движущегося рассеивателя с помощью антенны без использования АТП. В данном случае это получается, так как никакой реверберации нет. Обработка сигнала состоит в получении пространственного спектра $A(x, t)$, определяемого (4), вдоль антенны (только по координате x) в виде функции времени t [12, 13]. Связь между значениями прост-

пространственной частоты U , являющейся аргументом графика, и углом θ , по которому сканируется зона наблюдения антенной решеткой, следующая [13]:

$$U = U_{\max} \frac{\lambda}{2d} \sin(\theta), \quad (5)$$

где U_{\max} – максимальное значение пространственной частоты, равное половине общего числа точек спектрального разложения Фурье; d – расстояние между приемными элементами антенной решетки. При моделировании предполагалось, что $2d = \lambda$. Интервал пространственных частот, показанный на графиках простирается в пределах $\pm U_{\max}$. Здесь в виде вертикальной линии в центре (при $\theta = 0$) виден излучатель. Имитируемый рассеиватель отображен наклонной линией, так как согласно (4) направление на рассеиватель изменяется примерно пропорционально времени.

На рис. 3 показан результат точно такой же обработки сигнала с применением АТП. Это точно такая же процедура, какая произведена при получении рис. 2, но только не для сигнала $A(x, t)$, а для сигнала $S(x, t)$, прошедшего дополнительную обработку в соответствии с формулой (1). В результате сигнал излучателя не виден (поле затемнено), сигнал рассеивателя наблюдается под теми же углами, что и на рис. 2 с интенсивностью, зависящей от величины его доплеровского смещения частоты в соответствующий момент времени.

Предлагаемый нами алгоритм обработки сигнала содержит нелинейную операцию – логарифмирование. Это единственное математическое преобразование, позволяющее свести мультипликативную помеху к аддитивной и в таком виде ее фильтровать. Совокупность последовательно совершаемых операций логарифмирование и фильтрации назовем нелинейной фильтрацией (НФ). Польза НФ показана в бурно развившемся направлении обработки мультипликативно связанных спектров сигналов, получившем название кепстральный анализ [11]. В преобладающем влиянии мультипликативных помех заключена специфика распространения акустических монохроматических сигналов. Интенсивное излучение монохроматического звука позволяет принимать его в столь узком частотном диапазоне, что влиянием аддитивного шума можно пренебречь. В этом случае помехами являются флуктуации уровня и фазы подсвечивающего акустического сигнала. Эти флуктуации мультипликативно связаны с принимаемым сигналом.

На рис. 4 приведен пример эффективности НФ, взятый из работы [14]. Исходный сигнал, спектр, которого приведен на рис. 4а, промодулирован сильным низкочастотным сигналом по фазе. В результате, спектр этого сигнала принял вид, показанный на рис. 4б. На рис. 4в и 4г показаны результаты применения процедуры НФ как

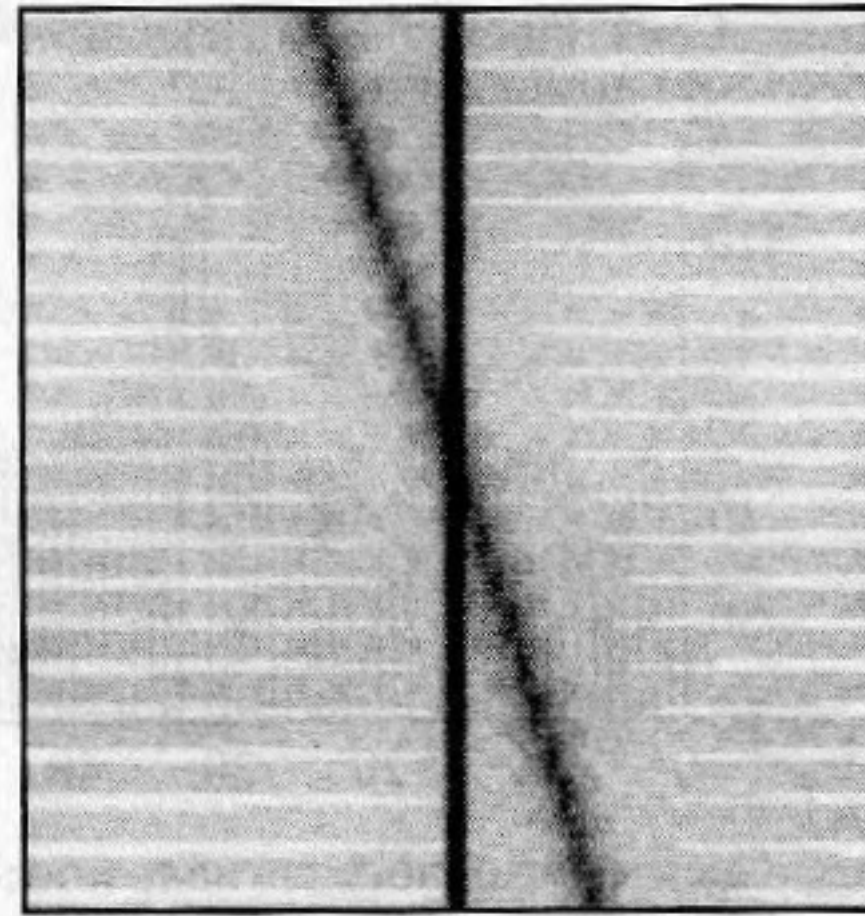


Рис. 2. Численная модель модуля отклика антенны на сигнал движущегося рассеивателя без затемнения прямого сигнала. По вертикали показано время. По горизонтали – пространственная частота (угловой спектр (5)).

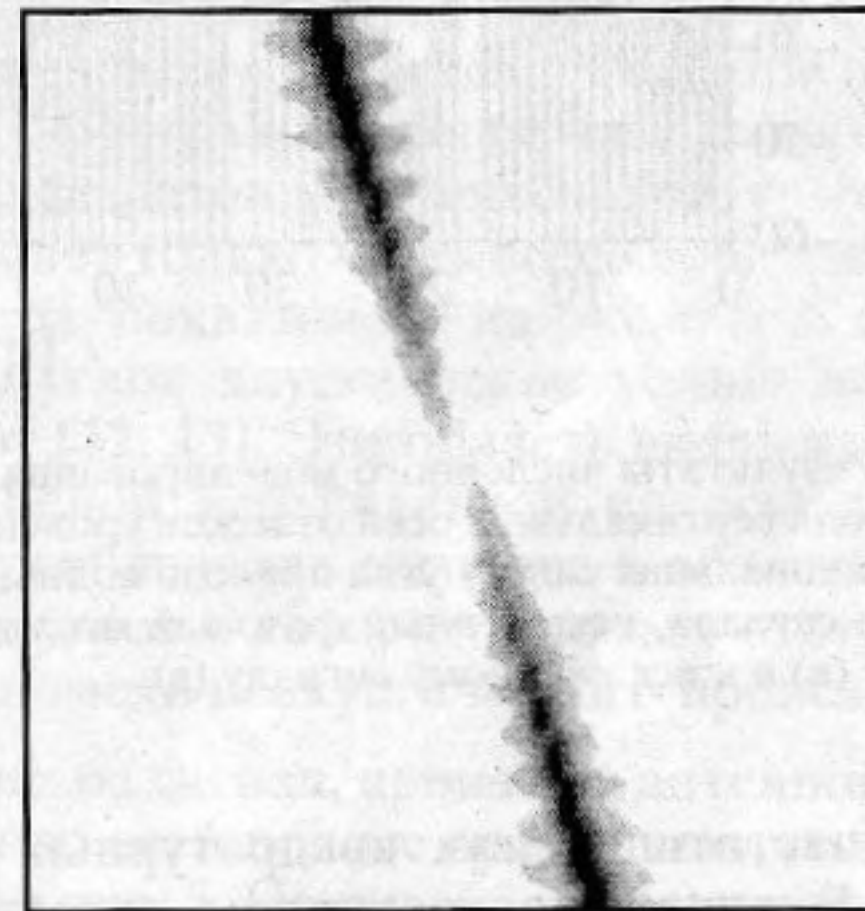


Рис. 3. Численная модель модуля отклика антенны на сигнал движущегося рассеивателя при затемнении прямого сигнала. По осям отложено то же, что и на рис. 2.

к исходному сигналу, так и к сигналу, подвергнутому искажению. Процедура НФ особенно эффективна в ситуации, описанной в работе [15].

Натурный эксперимент был поставлен на озере Санхар – одном из живописнейших водоемов Владимирской области. Схема опыта соответствовала рис. 1. Акустическое поле принималось отдельными гидрофонами антенны, обрабатывалось и регистрировалось в обработанном виде.

Обработка принимаемых сигналов включала следующие операции. Во-первых, сигналы, принимаемые каждым гидрофоном, фильтровались в полосе ± 3 Гц от каждой дискретной частоты, излучаемой излучателем. Во-вторых, профильтрованные сигналы смешивались с сигналом излучаемой частоты, образуя при этом сигналы раз-

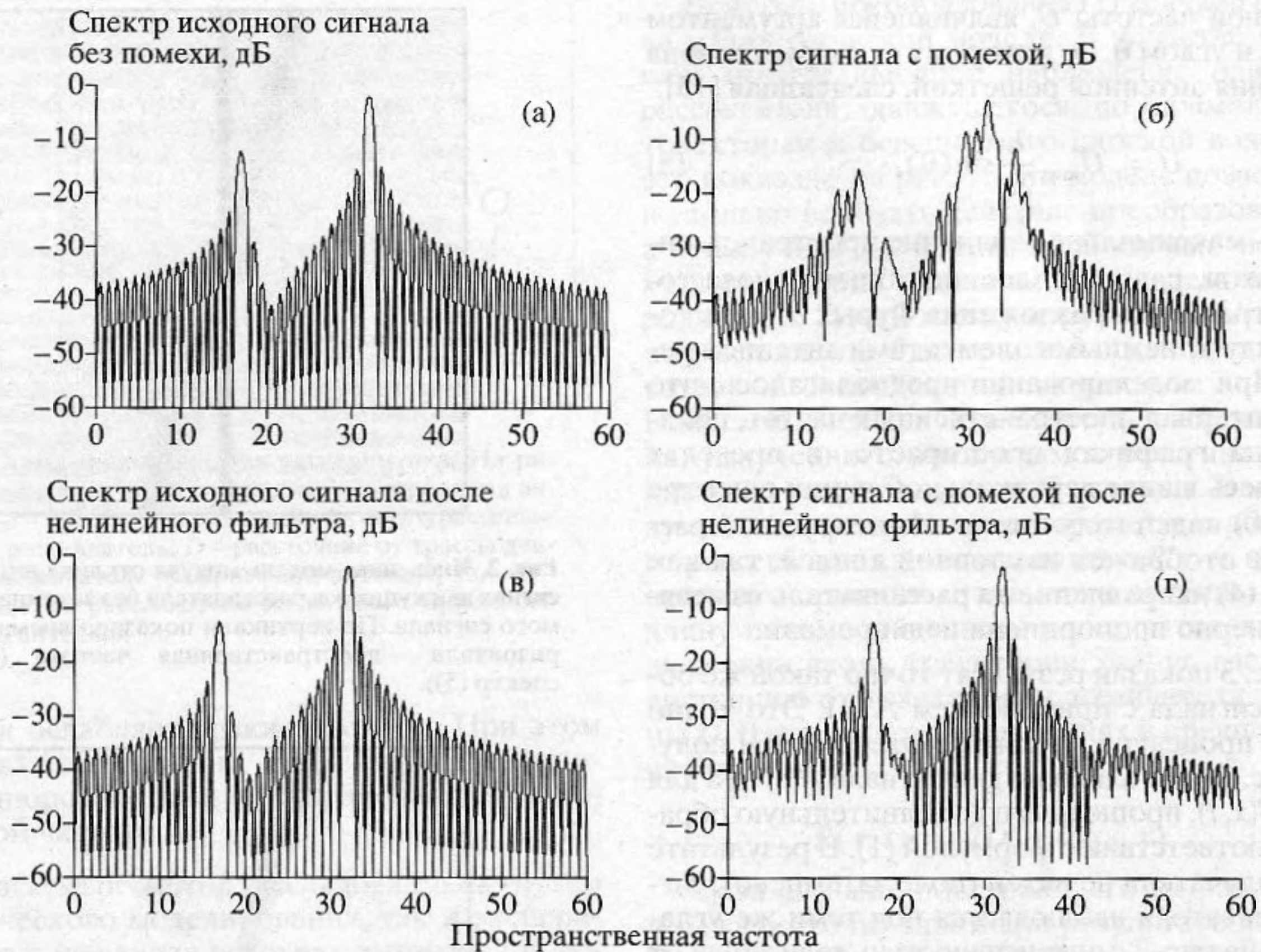


Рис. 4. Результаты численного моделирования применения процедуры НФ к сигналам, принятым антенной решеткой [14]. Вдоль вертикальных осей отложен уровень в дБ. Вдоль горизонтальной оси отложена пространственная частота, пропорциональная синусу угла прихода волны (5). (а) – спектр исходного сигнала. (б) – пространственный спектр исходного сигнала, искаженный фазовой модуляцией. (в) и (г) – результаты применения процедуры НФ к исходному сигналу (в) и к искаженному сигналу (г).

ностной частоты в двух квадратурных каналах [12, 13]. В одном квадратурном канале сигнал представлял собою $A\cos(\varphi)$, а в другом $A\sin(\varphi)$, где A – амплитуда принимаемого сигнала, а φ – его фаза. Сигналы с обоих квадратурных каналов регистрировались в цифровом виде с помощью компьютера. Такая предварительная обработка сигналов позволяла получать запись сигналов с антенны в виде, эквивалентном комплексным амплитудам, рассматриваемым в [12, 13], что представляет собою запись полного поля или голограмму принимаемого акустического сигнала, позволяющую при последующей обработке получать те же результаты, что и при соответствующей обработке непосредственно принимаемого акустического поля.

Опыт проводился в условиях, когда квадрат глубины водоема (15–20 м), отнесенный к длине волны (~ 1 м) был примерно равен длине акустической трассы (~ 300 м). Такие условия еще не соответствуют согласно [15] условиям мелкого моря. Однако и в этих условиях было достаточно много отражений от поверхности водоема, его берегов и дна, вследствие чего наблюдалась интенсивная

реверберация сигнала. Описываемый эксперимент имел целью выяснения возможностей наблюдения природных факторов, под действием которых рассеивается акустическое поле. В описываемом нами эксперименте в поле зрения антенны не перемещались никакие предметы, а работали только излучатель и приемная антенна. Поэтому для определения силы цели рассеянных сигналов, к сигналу, считываемому с антенны, при его обработке добавлялся сигнал, имитирующий поле рассеивателя.

Имитация сигнала движущегося рассеивателя производилась путем добавления к сигналу, принимаемому антенной, его же с внесенными в него следующими изменениями. Сигнал был ослаблен (например, на 40 дБ), и умножен на функцию вида (4) без постоянной составляющей. Тем самым в сигнал, в котором доминирует прямое поле излучателя, вводится доплеровское смещение частоты, пропорциональное пространственной частоте (угловому смещению). Благодаря этой операции прямое поле излучателя в добавленном ослабленном сигнале, получив доплеровское и угловое смещения, играет роль движущегося рассе-

Спектр сигнала, усредненный вдоль антенны

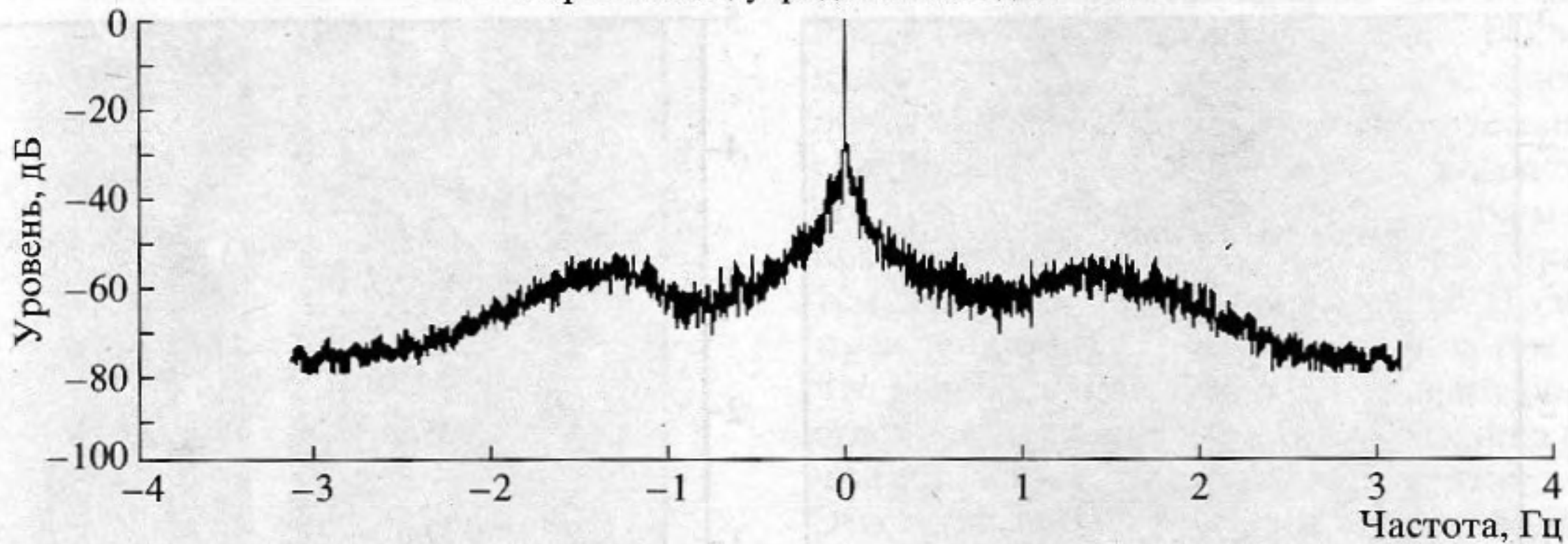


Рис. 5. Спектр сигнала, принятого гидрофонами антенны.

ивателя. Его уровень по отношению к излучателю известен. Используемый нами метод моделирования движущегося рассеивателя позволяет получить его математическую модель, обладающую известными параметрами и таким уровнем флуктуаций уровня и фазы, которым обладает прямое поле излучателя в условиях проводимого эксперимента.

Конкретизируем задачу эксперимента посредством привлечения рис. 5. На нем показан временной спектр акустических сигналов, принятых отдельными гидрофонами антенны. Эти спектры имеют вид, очень похожий на спектры, приведенные в монографии [3, стр. 214]. На спектре виден максимум при нулевой частоте. На эту частоту было смещено поле излучателя. Частоты выше частоты излучателя на графике положительные, а отрицательные частоты — это те, которые лежат ниже частоты излучателя. В спектре видны еще максимумы на частотах около ± 2 Гц. Такие максимумы спектра акустических сигналов, распространяющихся в море, объясняются рассеянием волн на поверхностном волнении, модулирующем сигнал и тем самым смещающим его спектр [3]. В [3] рассматривается метод диагностики состояния морской поверхности на основе таких спектров. Конкретная задача настоящего эксперимента состояла в том, чтобы попытаться с помощью антенны увидеть те поверхностные волны, которые модулируют сигнал излучателя.

Результаты эксперимента приведены на рисунках.

На рис. 6 и 7 показаны результаты обработки сигнала, принятого антенной решеткой. На рисунках черное поле соответствует максимальному сигналу, а белое — минимальному. Обработка заключалась в получении пространственных спектров вдоль линии расположения приемных гидрофонов антенны. Сигналы, показанные на рис. 6, обрабатывались дополнительно. Осуществлялось

затемнение поля антенны по формуле (1) и дополнительная фильтрация сигналов во времени.

Эксперимент проведен на такой частоте, при которой выполняется соотношение $2d < \lambda$ (см. (5)). Следствием этого является то, что при получении спектра пространственных частот вдоль антенны, весь диапазон действительных углов θ в силу (5) занимает только часть всего пространственного спектра, показанного на рис. 6 и 7. В области мнимых углов акустические волны интенсивно затухают [12, 13]. Эта область видна на рисунках в виде белой вертикальной полосы с каждого края. Преобладание сигналов в области действительных углов θ говорит в пользу отсутствия заметной помехи неакустического происхождения.

На рис. 6а сигнал, принятый антенной, обрабатывался во всей полосе временных частот, показанной на рис. 5. На рис. 6б показан результат обработки профильтрованного сигнала с исключением обеих боковых частот, превышающих по абсолютной величине 1 Гц. Тем самым были существенно подавлены сигналы, вызванные рассеянием на ветровом волнении [10, 13]. Таким образом, сравнивая рис. 6а и 6б можно видеть вклад рассеяния поверхностью водоема в совокупный рассеянный сигнал. Например, на рис. 6а излучатель виден в виде интенсивной линии, а на рис. 6б он едва заметен. Это говорит о том, что антенна видит отражение излучателя на поверхности водоема так, как мы привыкли видеть “лунную” или “подсолнечную” дорожку на взволнованной водной поверхности. На рис. 6а видно угловое распределение уровня сигнала, рассеиваемого поверхностью. Волны, рассеиваемые взволнованной поверхностью водоема, уверенно наблюдаются методом АТП. В этом случае рассеяние поверхностью составляет заметную долю рассеянного сигнала. Это ясно видно по различию заметности наклонной линии, являющейся результатом добавления сигнала, имитирующего рассеиватель. На рис. 6а и 6б заметность имитированного сигнала

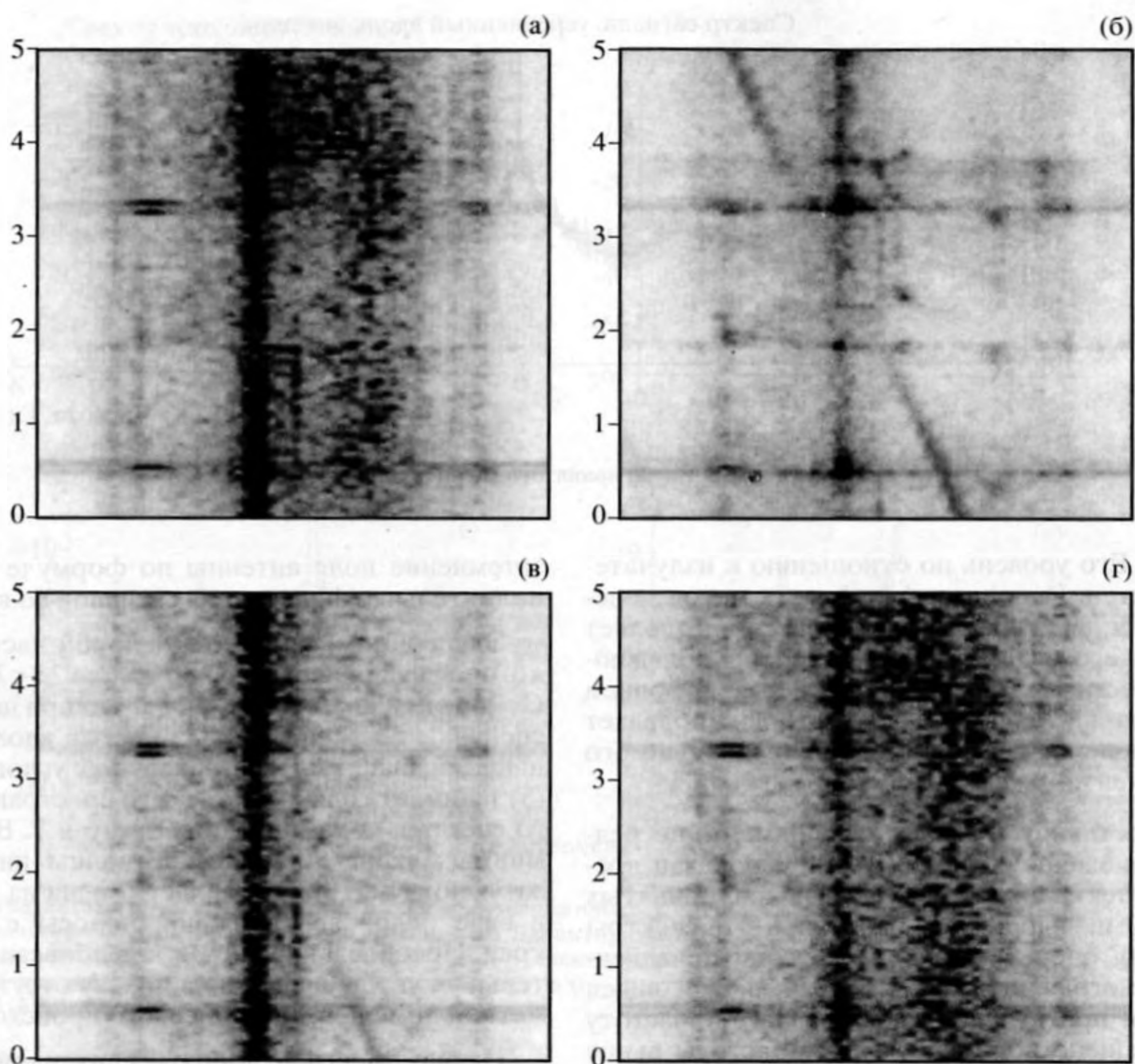


Рис. 6. Модуль отклика антенны в натурном эксперименте при затемнении прямого сигнала. Добавлен сигнал, имитирующий поле движущегося (как показано на рис. 1) рассеивателя с уровнем рассеянного сигнала на 40 дБ меньше поля излучателя на антенне. По вертикали – время в минутах, по горизонтали – пространственный (угловой) спектр; а – отклик антенны во всей полосе частот, показанной на рис. 5; б – отклик антенны при исключении из него обеих боковых частот, (превышающих 1 Гц по абсолютному значению); в и г – картина поля зрения антенны при фильтрации каждой из боковых частот в отдельности; в – убрана нижняя боковая; г – убрана верхняя.

ла существенно различается, хотя его уровень на этих двух рисунках одинаков.

На рис. 6в и 6г приведены результаты, полученные при исключении лишь одной из боковых частот нижней (рис. 6в) или верхней (рис. 6г). На этих рисунках видны волны, рассеянные поверхностью либо только с увеличением частоты Доплера либо только с ее уменьшением. Анализ пространственного распределения рассеяния акустического сигнала на ветровом волнении с учетом знака эффекта Доплера проведен впервые.

На рис. 7 показан результат обработки того же сигнала, что и на рис. 6, обработанного так, как сигнал на рис. 2 (без использования формулы (1), создающей темное поле). В сигнале, показанном на рис. 7, тоже имитировался рассеиватель, име-

ющий по отношению к излучателю на 10 дБ более высокий уровень. Однако его еще не было видно. Чтобы сделать имитируемый сигнал заметным на этом рисунке надо увеличить его уровень еще на 10 дБ. Фильтрация доплеровских составляющих также не оказывает влияния на вид рис. 7. Это показывает, что на фоне реверберации локализовать очаги рассеяния сигнала на ветровом волнении без затемнения поля антенны не удастся.

Рисунки 6 и 7 носят качественный характер. На них отчетливо видны временные изменения сигналов. По таким яркостным картинкам трудно судить о количественной стороне показанных результатов. Количественная сторона явления показана с помощью рис. 8. На нем изображены значения модуля отклика антенны, показанные

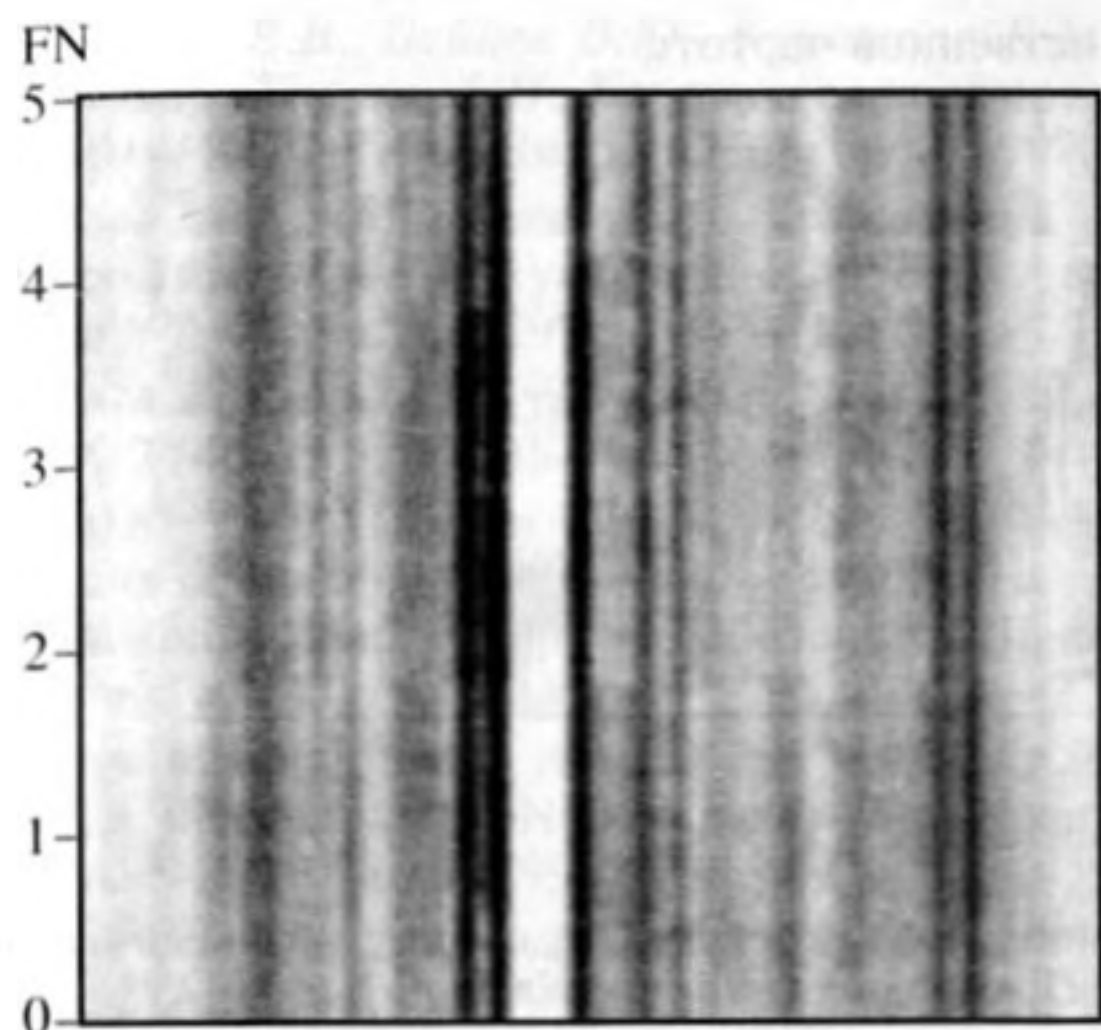


Рис. 7. Модуль отклика антенны в натурном эксперименте. Прямое поле не затемнялось, а уровень сигнала, имитирующего движущийся рассеиватель меньше поля излучателя на 30 дБ.

на рис. 6 и 7, относящиеся к одному моменту времени. Как видно из рис. 8, метод темного поля без дополнительной фильтрации позволяет достичь эффективности порядка 60 дБ, а последующая временная фильтрация дает еще около 10 дБ дополнительно.

На рис. 8 виден отклик антенны на сигнал, имитирующий рассеиватель. Это максимальный отклик на жирной линии (временной срез рис. 6б) под углом, чуть превышающим 20 градусов. Его

уровень составляет примерно – 55 дБ по отношению к сигналу излучателя, в то время как он задавался – 40 дБ относительно этого уровня. Разница объясняется тем, что моделируемый сигнал слишком медленно смещается, вследствие чего его доплеровское смещение даже при максимальном угле существенно ослабляется фильтром, затемняющим поле зрения антенны. По временному сечению рис. 7, показанному на рис. 8, видно, что реверберация в озере оказывает более существенное влияние на форму отклика антенны, чем при аналогичных экспериментах в море [6]. Это объясняется тем, что в море более ровное дно и совсем нет отражений от берегов, которые отчетливо видны на рис. 8 под углами, близкими к 90 градусам.

Эффективность АТП может быть показана также с помощью временных спектров сигналов с антенны, приведенных на рис. 9 и 10. На рис. 9 приведен временной спектр сигнала на одной пространственной частоте без АТП. Пространственная частота (угол наблюдения) выбрана так, чтобы в нее попал имитируемый сигнал на своей максимальной доплеровской частоте. Его уровень на 20 дБ ниже уровня сигнала излучателя. На рис. 9 уровень этого сигнала ниже уровня излучателя на 30 дБ, хотя сигнал излучателя на этой пространственной частоте (этом значении угла) далеко не максимален. Это различие уровней связано с тем, что имитируемый сигнал присутствует на этой пространственной частоте лишь в немногих реализациях, а сигнал излучателя накаплива-

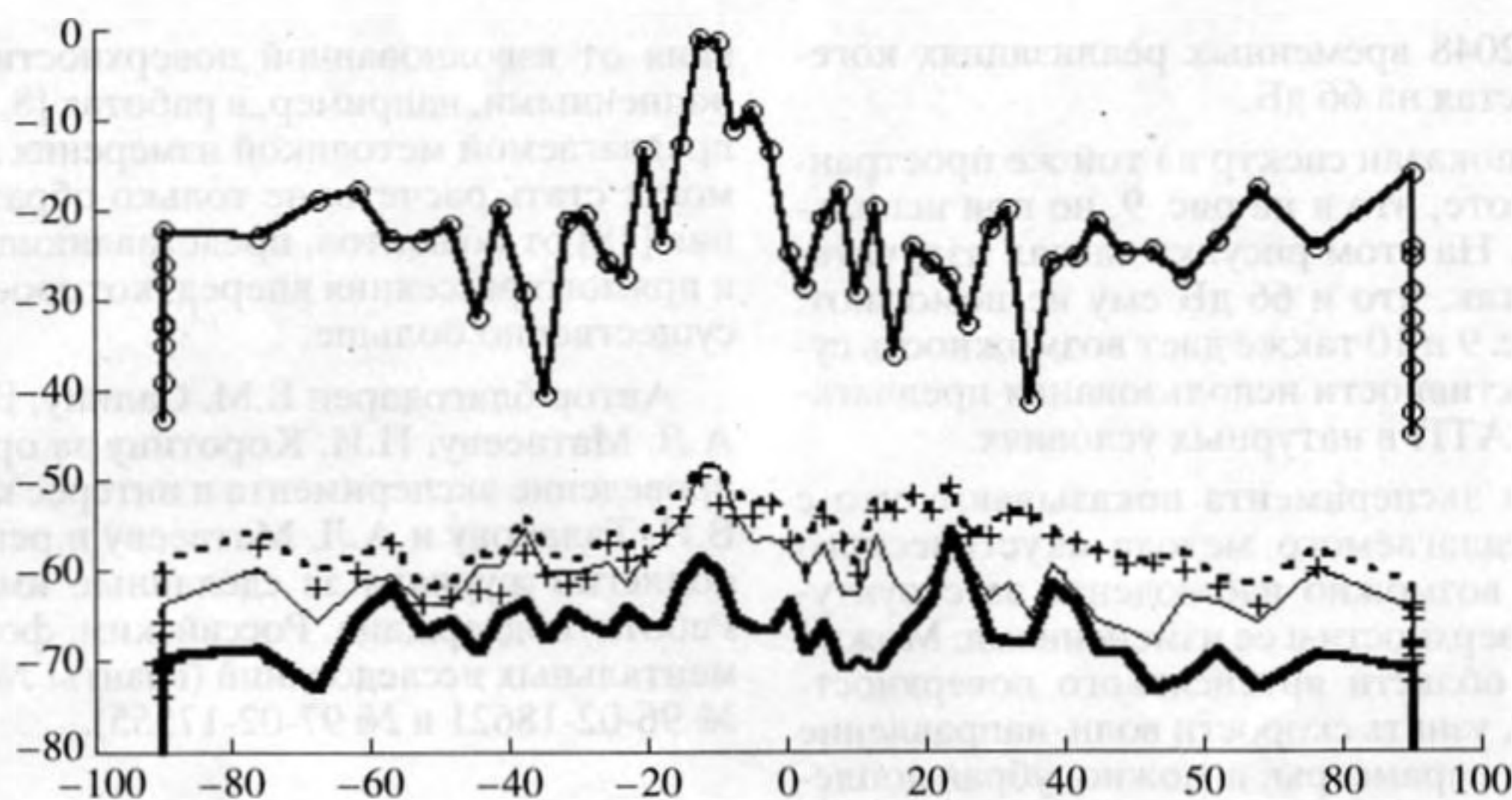


Рис. 8. Модули отклика антенны, показанные на рис. 6 и 7, относящиеся к моменту времени 15 с после начала опыта. Линией с кружками показан отклик антенны без затемнения поля (рис. 7). Жирной линией показан отклик антенны при затемнении поля и фильтрации сигнала (рис. 6б). Пунктирной линией показан отклик при затемнении поля во всей полосе частот (рис. 6а). Тонкой линией показан отклик, соответствующий одной боковой частоте (рис. 6в). Крестиками показан отклик, соответствующий другой боковой частоте (рис. 6г). По оси абсцисс – угол сканирования антенны в градусах относительно нормали к линии расположения гидрофонов. По оси ординат – уровень сигналов в дБ относительно максимального отклика незатемненной антенны.



Рис. 9. Спектр отклика антенны на одной пространственной частоте (угловой координате), соответствующей максимальному угловому сдвигу имитированного рассеивателя (рис. 6б). Прямое поле не затемнялось.

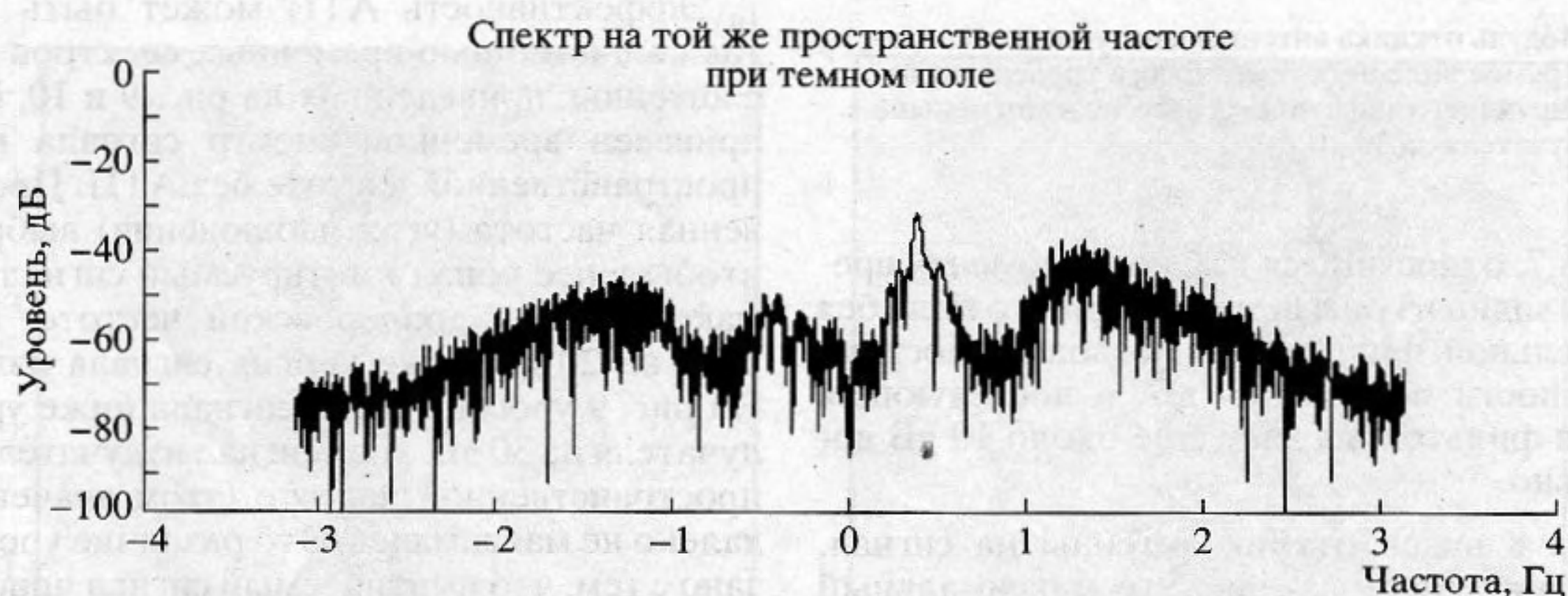


Рис. 10. Спектр сигнала на одной пространственной частоте при затемнении прямого сигнала. Остальные параметры те же, что и на рис. 9.

ется во всех 2048 временных реализациях когерентно, возрастая на 66 дБ.

На рис. 10 показан спектр на той же пространственной частоте, что и на рис. 9, но при использовании АТП. На этом рисунке сигнал излучателя затемнен, так, что и 66 дБ ему не помогают. Сравнение рис. 9 и 10 также дает возможность судить об эффективности использования предлагаемого метода АТП в натуральных условиях.

Результаты эксперимента показывают, что с помощью предлагаемого метода акустического темного поля возможно наблюдение за структурой водной поверхности и ее изменениями. Можно локализовать области интенсивного поверхностного волнения, узнать скорости волн, направление ветра и другие параметры, а можно, убрав доплеровские частоты, связанные с поверхностным волнением, тем самым отфильтровать его. В этом случае появляется возможность следить за внутренними движущимися неоднородностями, течениями видеть их так, как это позволяет применяемая антенная система. Появляется возможность поставить опыт в соответствии с расчетами рассе-

яния от взволнованной поверхности океана, выполненными, например, в работах [8, 17]. В связи с предлагаемой методикой измерения актуальными могут стать расчеты не только обратного рассеяния [18] от объектов, представляющих интерес, а и прямого рассеяния вперед, которое может быть существенно больше.

Автор благодарен Б.М. Салину, В.И. Турчину, А.Л. Матвееву, П.И. Коротину за организацию и проведение эксперимента и интерес к этой работе, В.И. Таланову и А.Л. Матвееву и рецензенту редколлегии журнала за сделанные ими замечания. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 96-15-96603, № 96-02-18621 и № 97-02-17555).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Л.А. Теневые методы. М.: Наука, 1968. 281 с.
2. Munk W., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring // Deep Sea Res. A. 1979. 26, № 2A. P. 123-161.

3. Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртенов В.М., Нецаев А.Г., Хилько А.И. Акустическая томография океана / ИПФ РАН. Нижний Новгород, 1997. 256 с.
4. Зверев В.А., Матвеев А.Л., Славинский М.М., Стромков А.А. Фокусируемая антенна темного поля // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 4.
5. Зверев В.А. Антенна темного поля // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 3. С. 401–404.
6. Gershman A.B., Turchin V.I., Zverev V.A. Experimental Results of Localization of Moving Underwater Signal by Adaptive Beamforming. IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 43. № 10. October 1995. P. 2249–2257.
7. Zverev V.A., Matveyev A.L., Slavinsky M.M., Stromkov A.A. Acoustic Array Noises in a shallow Water. Proc. I.O.A. Vol. 18 Part 5 (1996). P. 85–91.
8. Зверев В.А. Шумы акустической антенны в волноводе // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 4. С. 456–461.
9. Зверев В.А., Литвак Н.В. Численное моделирование случайных акустических полей // Акуст. журн. (в печати).
10. Зверев В.А. Формирование акустического изображения на основе его численной модели // Акуст. журн. (в печати).
11. Oppenheim A.V., Schaffer R.W., Stockham T.G. Nonlinear Filtering of Multiplied and Convolved Signals, IEEE Trans. Audio and Electroacoustics, Vol. AU-16, № 3. Sept. 1968.
12. Зверев В.А. Радиооптика. М.: Сов. радио, 1975.
13. Зверев В.А. Физические основы формирования изображений волновыми полями. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1998. – 252 с.
14. Зверев В.А. Нелинейная фильтрация // Современные проблемы радиопрофики: Сб. науч. трудов / Под ред. А.В. Якимова. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1996. 192 с.
15. 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.
16. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 191 с.
17. Rosenberg Alan P. A new rough surface parabolic equation program for computing low-frequency acoustic forward scattering from the ocean surface // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 105. № 1. P. 144–153.
18. Fawcett J.A., Fox W.L.J., Maguer A. Modeling of scattering by objects on the seabed // J. Acoust. Soc. Am. 1998. V. 104. № 6. P. 3295–3304.

Acoustic Dark Field

V. A. Zverev

An acoustic dark field method is proposed. The method allows one to observe the signals scattered by moving inhomogeneities of the medium in the direction close to that of the illuminating field. The results of a full-scale experiment demonstrating the efficiency of the proposed method under reverberation conditions are presented. For the first time, the spatial distribution of the wave scattering from a rough water surface is observed individually for each side frequency of its spectrum.