АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 3, с. 340–345

УДК 534

О ВЛИЯНИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ НА ВЫДЕЛЕНИЕ ДИФРАГИРОВАННОГО СИГНАЛА

© 2002 г. В. А. Зверев, П. И. Коротин

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

Email: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru.

Поступила в редакцию 03.05.2001 г.

Описан эксперимент, в котором наличие волны, рассеянной взволнованной водной поверхностью, явилось фактором, благодаря которому удалось уверенно принять сигнал, дифрагированный на движущемся рассеивателе. Приведены экспериментальные подтверждения этого факта и выяснены его причины.

Сигнал, рассеянный взволнованной водной поверхностью, является существенной помехой акустической локации. Особенно существенна эта помеха для локации на просвет [1–4] и для бистатической локации, близкой к локации на просвет. Поэтому нас немало удивил результат эксперимента, в котором появился сигнал, по большинству признаков являющийся рассеянным взволнованной водной поверхностью, который не только не мешал приему слабого дифрагированного сигнала, а способствовал выделению рассеивателя.

Прежде всего, опишем постановку опыта и приведем его результат. Затем выдвинем гипотезу о роли поверхностной реверберации в приеме дифрагированного сигнала и выскажем доводы в ее пользу.

Речь идет об эксперименте, схема которого и часть результатов описаны в [4–6]. На озере была осуществлена акустическая трасса длиной в 300 м. Глубина озера в месте расположения трассы была около 15 м. Излучатель располагался вблизи дна, горизонтальная приемная антенна заглублялась на 4 метра, рядом была установлена вертикально точно такая же антенна. Опыт проводился летом, когда температура воды вблизи поверхности озера была свыше 20 градусов, а около дна равна четырем градусам. В связи с этим образовывался градиент скорости звука, способствующий, благодаря рефракции, формированию придонного звукового канала при распространении звука. В опыте, о котором идет речь, поперек трассы распространения звука на расстоянии около 50 м от приемных антенн протягивался рассеиватель. Это была цилиндрическая труба с заглушками и балластом, имевшая длину около 5 м и диаметр 0.5 м. Рассеиватель перемещался на глубине 7 м с постоянной скоростью около 0.6–0.65 м/с так, что он в течении опыта пересекал воображаемую линию, соединяющую излучатель и центр приемной антенны, дважды (сначала двигаясь в одну сторону, а затем в другую). Продолжительность протяжки рассеивателя была примерно 3 минуты с полутораминутным перерывом между галсами.

Приемные антенны представляли собой эквидистантные цепочки из 64 гидрофонов, вытянутых в линию длиной 12 м. Излучатель работал в полигармоническом режиме на 4 дискретных частотах, лежащих в диапазоне примерно от 1.3 кГц до 2.5 кГц. На рассеивателе был укреплен тональный маяк на частоте 2.9 кГц. Для нас в дальнейшем будет наиболее существенным излучение на двух частотах, которые мы будем обозначать как частоту № 1 (1373.29 Гц) и частоту № 2 (2498.626 Гц).

Прием, регистрация и обработка сигналов антенны велись так, как это описано в [4, 5]. При обработке сигналов применялся описанный в [4] алгоритм темного поля, состоящий в вычитании следующих через постоянное время значений логарифмов комплексных амплитуд сигналов, принятых каждым элементом антенной решетки (это обеспечивало защиту от реверберации). После этого осуществлялось спектральное разложение в ряд Фурье по пространственным координатам антенных элементов (это обеспечивало угловое сканирование антенны) и временну́ю фильтрацию (для дополнительной защиты от реверберации, если таковая требовалась).

Результаты, полученные в этом опыте, показаны на рис. 1 и 2. Из этих рисунков видно, что движение рассеивателя в координатах "синус угла сканирования антенны – время", отчетливо заметно как на частоте № 1, так и на частоте № 2. Движение хорошо прослеживается на самой низкой и самой высокой частотах из исследуемого диапазона, на промежуточных частотах картина менее четкая.

Существенно то, что для получения четкой отметки сигнала от рассеивателя на рис. 1 и рис. 2

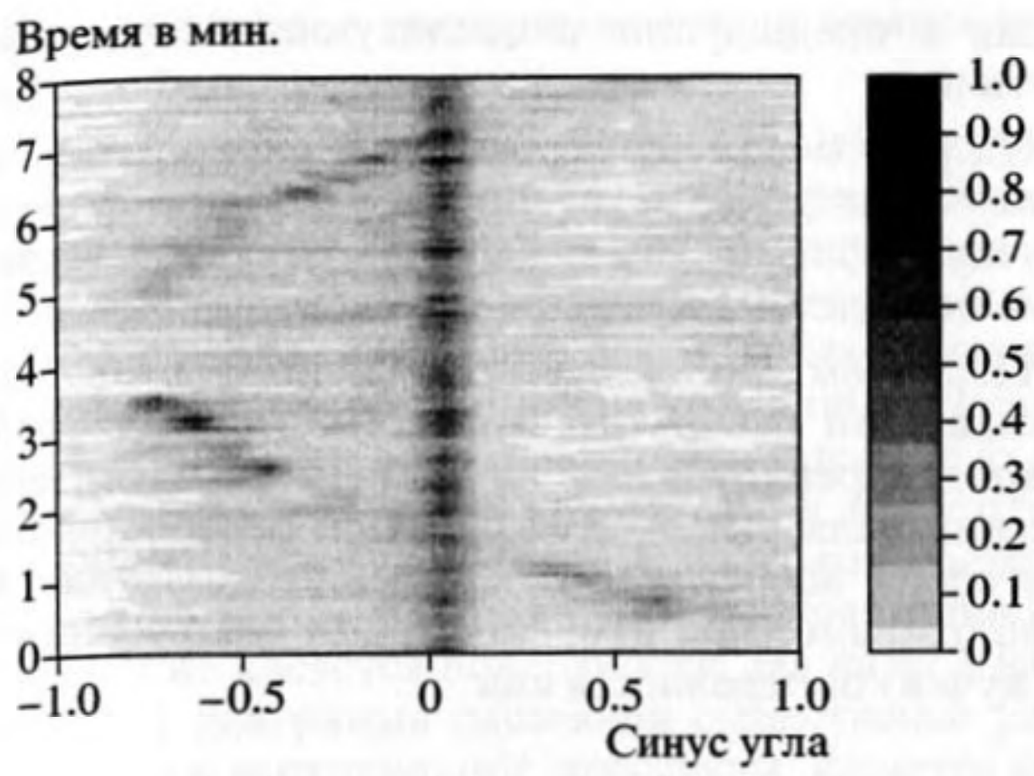

Рис. 1. Поле зрения антенны на частоте № 1 при протяжке рассеивателя в направлении поперек трассы распространения звука

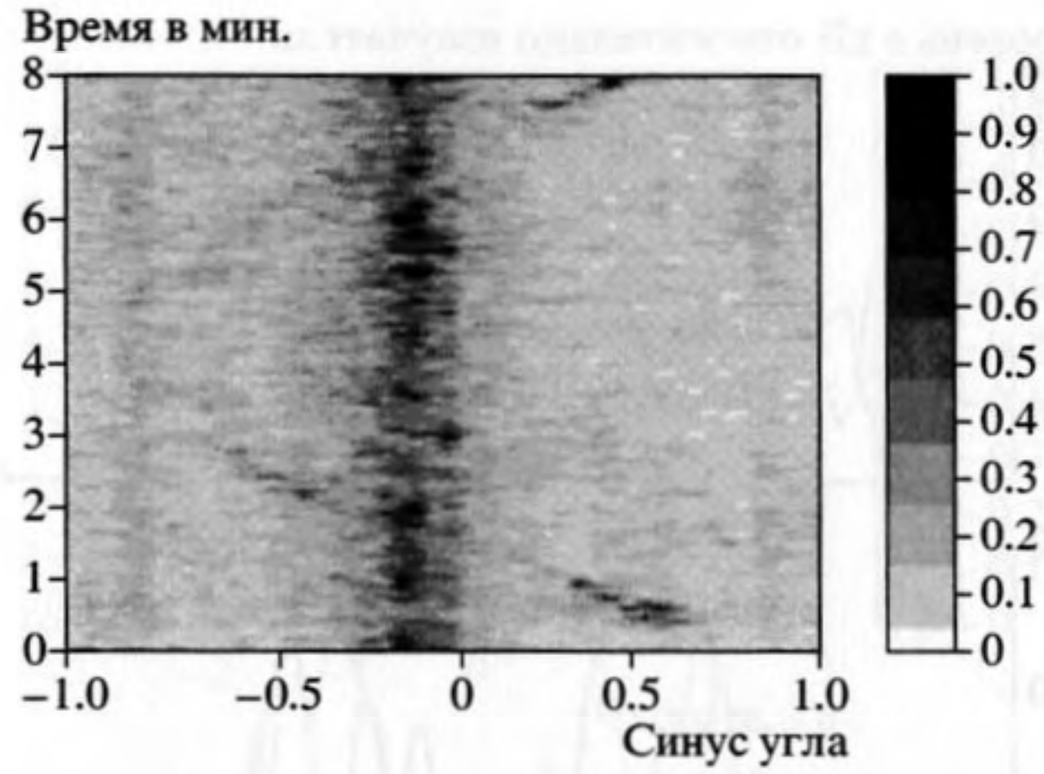

Рис. 2. Поле зрения антенны на частоте № 2 при протяжке рассеивателя в направлении поперек трассы распространения звука

использованы различные фильтры, способствующие выделению сигнала от рассеивателя. Картина, изображенная на рис. 1, получается при использовании в ходе обработки алгоритма темного поля [4] без последующей фильтрации. Наблюдаемый сигнал в этом случае имеет полосу от –3Гц до +3Гц относительно несущей частоты. Для получения такой картины движения рассеивателя, какая приведена на рис. 2, требуется дополнительная частотная фильтрация в полосе от –1 Гц до –0.6 Гц для того, чтобы сделать движение рассеивателя заметным при удалении рассеивателя от антенны и в полосе от 0.6Гц до 1Гц для того, чтобы сделать движение рассеивателя заметным при приближении рассеивателя. Если такой дополнительной частотной фильтрации не делать, то на рис. 2 появляются шумы, полностью скрывающие трассу рассеивателя.

Чтобы полнее выявить причины разницы между сигналами, принятыми на частотах № 1 и № 2, были проведены дополнительные исследования.

На рис. 3 приведены реализации сигналов, показанных на рис. 1 и 2 в виде функций времени для двух пеленгов. Значения углов выбирались так, чтобы они захватывали (как для частоты № 1, так и для частоты № 2) хорошо заметные на рис. 1 и 2 участки траекторий рассеивателя. На том же рис. 3 показаны моменты, в которые эти реализации стробировались. Длина строба составляла около 5 сек. Один строб помещался в место наибольшего сигнала, соответствующего моменту пересечения движущимся рассеивателем того азимутального угла, который соответствовал данной реализации. Другой строб брался в момент, когда рассеиватель был под другим углом, далеким от этого. В этом стробе оказывалась только помеха. На рис. 4 приведены спектры сигналов в отдельных стробах. Из этого рисунка видно, что спектр сигнала для частоты № 1 отличается от спектра реверберации только уровнем. Формы спектров сигнала и помехи практически совпадают. Для частоты № 2 спектры сигнала и помехи совпадают по форме и уровню всюду за исключением диапазона от –1 Гц до –0.6 Гц. В этом диапазоне спектр сигнала резко отличается по уровню от спектра реверберации.

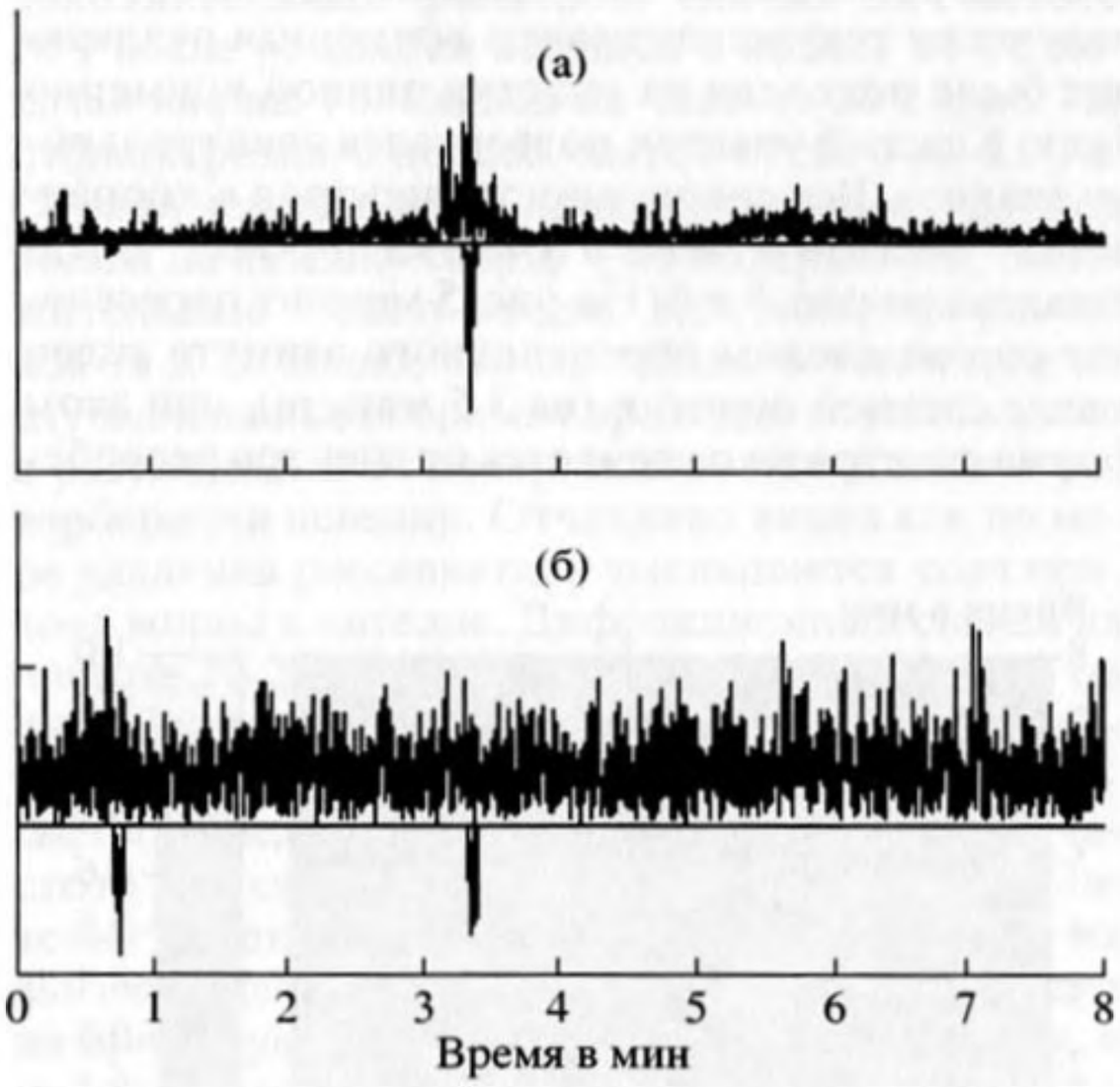

Рис. 3. Отклики антенны с двух пеленгов в виде функции времени. Верхний график (а) для $\sin(\varphi) = -0.6$ на частоте № 1 (рис.1). Нижний график (б) для $\sin(\varphi) = +0.6$ на частоте № 2 (рис. 2). Вниз на графиках отложены значения, взятые в отдельные моменты (стробы), использованные для последующего спектрального анализа.

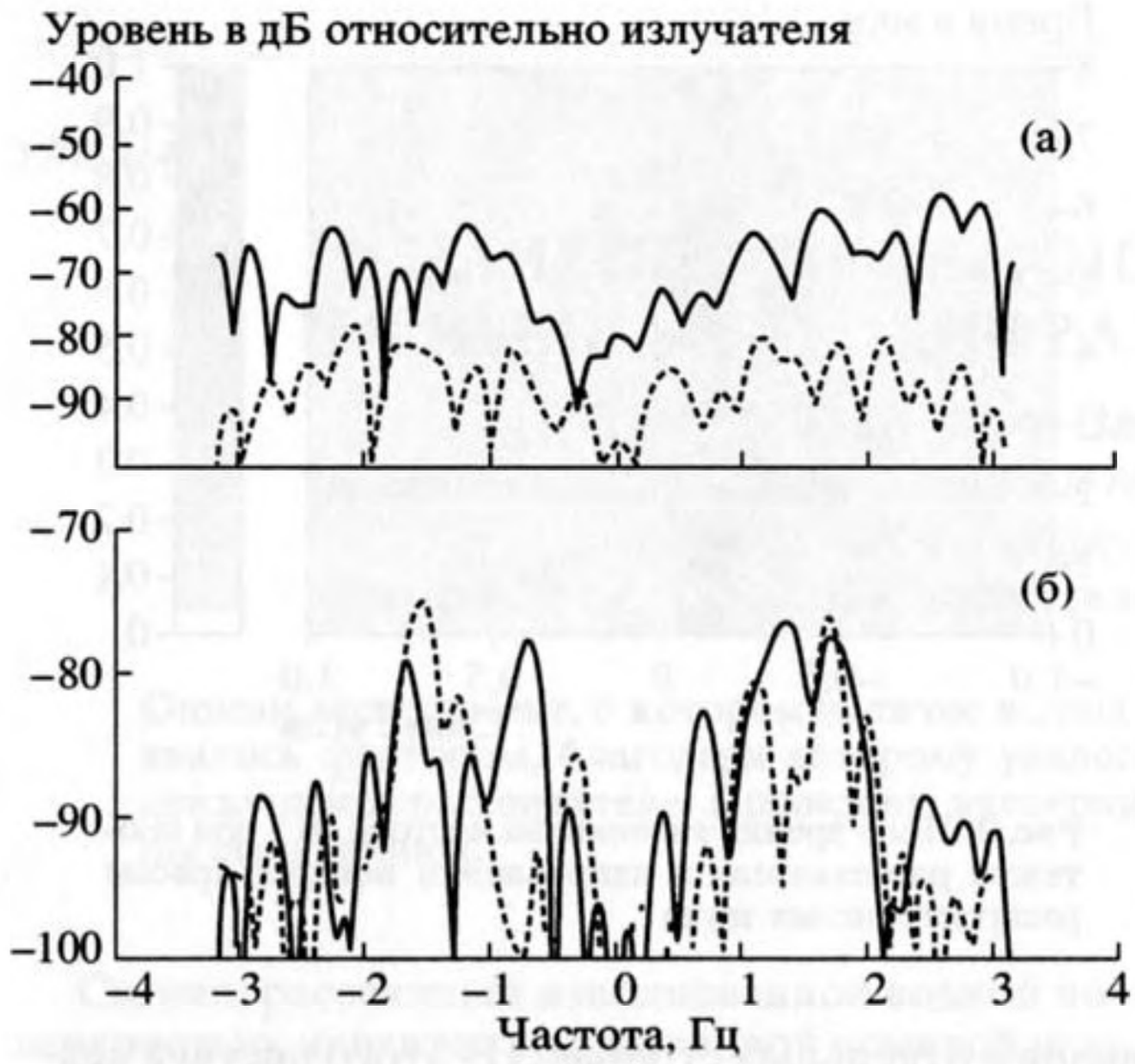

Рис. 4. Спектры сигналов в стробах, показанных на рис. 3. Сплошными линиями показаны спектры в стробах, содержащих сигналы рассеивателя. Пунктиром показаны спектры в стробах, содержащих реверберацию. Буквой а отмечены спектры на частоте № 1. Спектры на частоте № 2 отмечены буквой б.

Этот же эффект наглядно виден из рис. 5 и 6. На этих рисунках показан текущий спектр временных реализаций, показанных на рис. 3. Для получения текущего спектра временна́я реализация была поделена на участки длиной примерно 5 сек. Каждый участок подвергался спектральному анализу. Вся совокупность спектров в координатах "частота – номер участка (время)" представлена на рис. 5 и 6. На рис. 5 момент пересечения рассеивателем определенного азимута виден в виде светлой полоски (на 3.5 минуте), при этом форма спектра не отличается от спектра реверберации в предыдущие и последующие моменты времени.

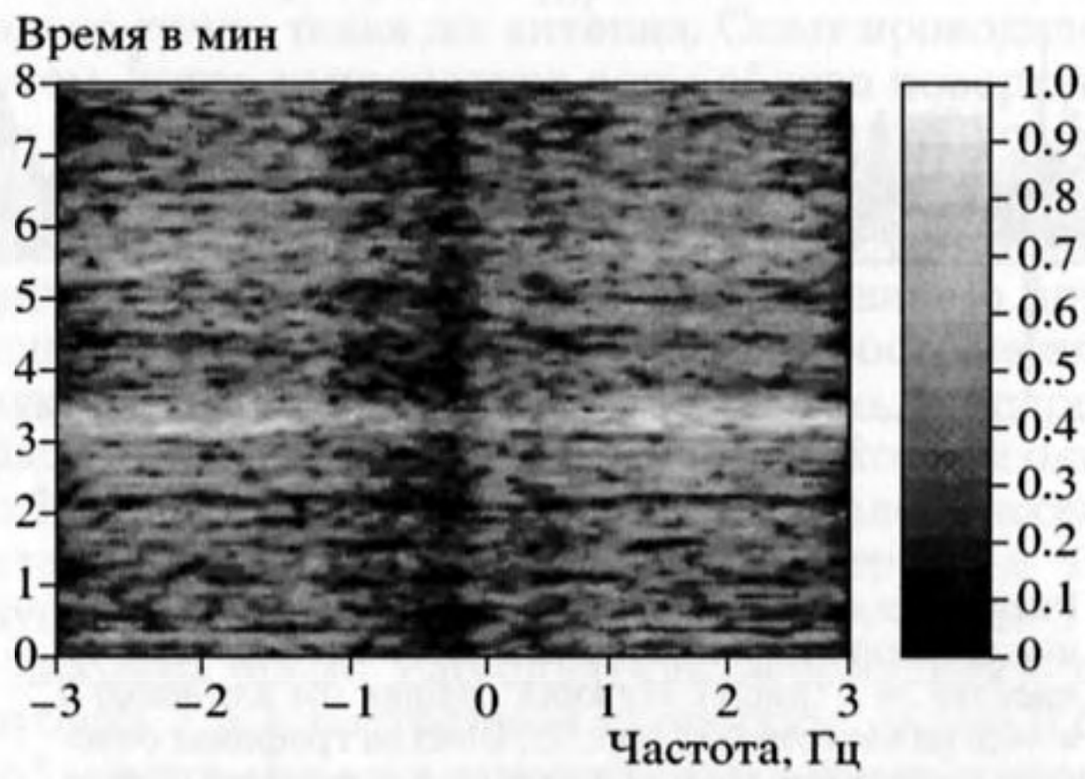

Рис. 5. Текущий спектр сигнала, показанного на рис. 3а.

На рис. 6 момент пересечения рассеивателем азимута виден в виде светлого пятна, занимающего узкую область спектра, на 0.5 минуте и частоте чуть меньше –1 Гц.

Перейдем к обсуждению результатов опыта. Ожидаемый результат с известной физической природой реализовался на частоте № 2. Сигнал рассеивателя выделяется на фоне реверберации благодаря эффекту Доплера. Частота Доплера приближенно (при пренебрежении искривлениями лучей) определяется как:

$$\Delta f = f\frac{V}{c}[\sin(\varphi_1) + \sin(\varphi_2)], \qquad (1)$$

где f – частота излучаемого звука; V – скорость движения рассеивателя; c – скорость звука; $\sin(\varphi_1)$ – функция, зависящая от угла наблюдения или то, что отложено вдоль горизонтали на рис. 1 и 2; $\sin(\varphi_2)$ – функция, зависящая от угла падения звука на рассеиватель. Если в (1) подставить значения указанных в нем параметров для момента времени, соответствующего значению момента строба, показанного на рис. 3 для частоты № 2, то получается примерно 0.8 Гц. Максимум спектра, показанного на рис. 4 для частоты № 2, получается на частоте примерно 0.7 Гц при ширине максимума по уровню 3 дБ примерно 0.2 Гц. Это значение, учитывая точность, с которой известны параметры, подставленные в (1), и приближенность самого соотношения (1), следует считать удовлетворительно совпадающим с оценкой, полученной по соотношению (1).

Соответствие спектра сигнала, полученного от рассеивателя, результатам расчета спектра по формуле (1) однозначно определяет физическую модель явления. Основной его особенностью является то, что принимаемое от рассеивателя поле является полем, которое дифрагирует непосредственно на теле рассеивателя. Эта же модель уверенно фиксировалась нами в большинстве иных опытов. В [5], основываясь именно на этой модели, определены такие параметры как размер рассеивателя и угол в вертикальной плоскости, под которым дифрагированное на рассеивателе поле приходит к горизонтально расположенной антенне.

Иначе обстоит дело с результатом опыта на частоте № 1. След от трассы движения рассеивателя на рис. 1 не исчезает, если применить фильтр, полностью вырезающий все частоты ниже 1 Гц. Эта область частот, учитывая, что частота № 1 почти вдвое ниже частоты № 2, с большим запасом перекрывает всю область возможных доплеровских частот. Отсюда следует, что физическая природа эффекта, наблюдаемого на частоте № 1 совершенно иная, чем на частоте № 2. Это

уже не гипотеза, а экспериментально установленный факт.

Для объяснения этого факта примем следующую модель. Совпадение спектров рассеянного сигнала на частоте № 1 и реверберации указывает на связь наблюдаемого эффекта с поверхностной реверберацией. Причина связи может заключаться в следующем. Дифрагированный сигнал имеет диаграмму направленности, зависящую от соотношения размеров рассеивателя и частоты локации. Вследствие этого, на высокой частоте № 2 дифрагированное поле имеет направленность вперед и не касается поверхности. На низкой частоте № 1 диаграмма рассеяния существенно расширяется в вертикальной плоскости, касается поверхности, и вклад поверхностной реверберации вторичного поля растет. Кроме того, доля энергии, рассеянной на взволнованной поверхности в зеркальном направлении, то есть вперед, с понижением частоты также растет. В совокупности, данные факторы приводят к возможности селекции лучей, касающихся после рассеяния поверхности и не касающихся ее.

Для частотной селекции вторичного поля, отраженного от поверхности, необходимо движение рассеивателя. Вторичное поле движущегося рассеивателя уже имеет доплеровский сдвиг, после его отражения от взволнованной поверхности спектр модуляции уширяется еще больше, и его частотные особенности отличны от спектра модуляции поверхностной реверберации первичного поля. Именно данные частотные особенности с учетом общего уменьшения реверберационной помехи для низких частот локации и переноса частот модуляции в область, превышающую модуляцию прямого сигнала поверхностным волнением, делают возможным выделение рассеивателя, когда непосредственно по прямому рассеянному полю, вследствие падения поперечника рассеяния, рассеиватель не виден.

Из сравнения частотных спектров сигналов на частотах № 1 и № 2 следует, что уровень реверберационной помехи существенно падает с понижением частоты. Во временно́м спектре сигнала на частоте № 2 наблюдаются интенсивные максимумы в диапазоне от 1 до 1.5 Гц, обусловленные брэгговским рассеянием на поверхностном волнении. Эти максимумы отсутствуют на частоте № 1. В работе [6] для данного эксперимента описана природа формирования брэгговского рассеяния, особенности пространственно-временного спектра реверберации и определены области на поверхности, отвечающие за брэгговское рассеяние, существующее в данных условиях для излучаемых частот выше 1.5–2-х килогерц.

Данную гипотезу о роли рассеяния поверхностью сигнала, дифрагированного рассеивателем на частоте № 1, доказывают результаты измерений, проведенных одновременно с помощью вертикальной антенны. Эти измерения демонстрируют условия локации в эксперименте относительно вкладов донной, поверхностной реверберации и прямого луча. На рис. 7 показаны пространственные спектры сигналов с вертикальной антенны в зависимости от времени для начальных 2.5 минут того же галса. На рис. 7а сигнал от маяка, установленного на рассеивателе, который не имел направленности ни в горизонтальной, ни в вертикальной плоскости. Сигнал маяка намного превышал реверберационную помеху и виден без дополнительных фильтров. Сигнал на частоте № 1 после режекции несущей в полосе ±1 Гц показан на рис. 7б. Сигнал на частоте № 2 (рис. 7в) отфильтрован в полосе частот от ±0.6 до ±1 Гц. Отрицательные углы прихода означают приход волны на антенну сверху – от поверхности, положительные – снизу от дна. Из сравнения рисунков 7а и 7б видно, что сигналы и в том и другом случае главным образом приходят отраженными и рассеянными от поверхности, вклад донной реверберации невелик. Отчетливо видно как по мере удаления рассеивателя уменьшается угол прихода волны к антенне. Дифракционный сигнал на частоте № 2 (рис. 7в) имеет иную структуру – он формируется прямым лучом, не касающимся поверхности или дна, и максимален в момент просветного пеленга. Таким образом, на низкой частоте № 1 сигнал от рассеивателя приходит на антенну преимущественно от поверхности, на высокой частоте № 2 рассеянное поле приходит на приемную антенну, не касаясь поверхности, и имеет доплеровский сдвиг, определяемый лишь движением рассеивателя. Результат опыта с приемом дифрагированных сигналов в совокупности с сигналом маяка на вертикальную антенну является не только необходимым, а и достаточным средством проверки выдвинутой гипотезы о физической природе сигнала на частоте № 1.

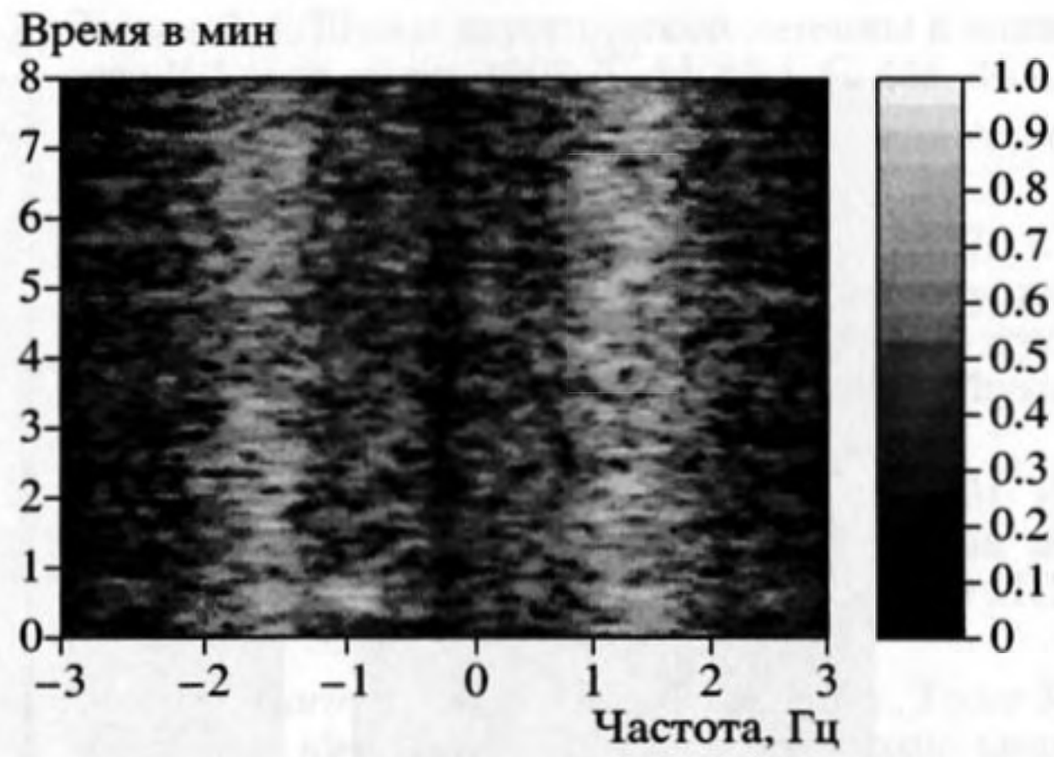

Рис. 6. Текущий спектр сигнала, показанного на рис. 3б.

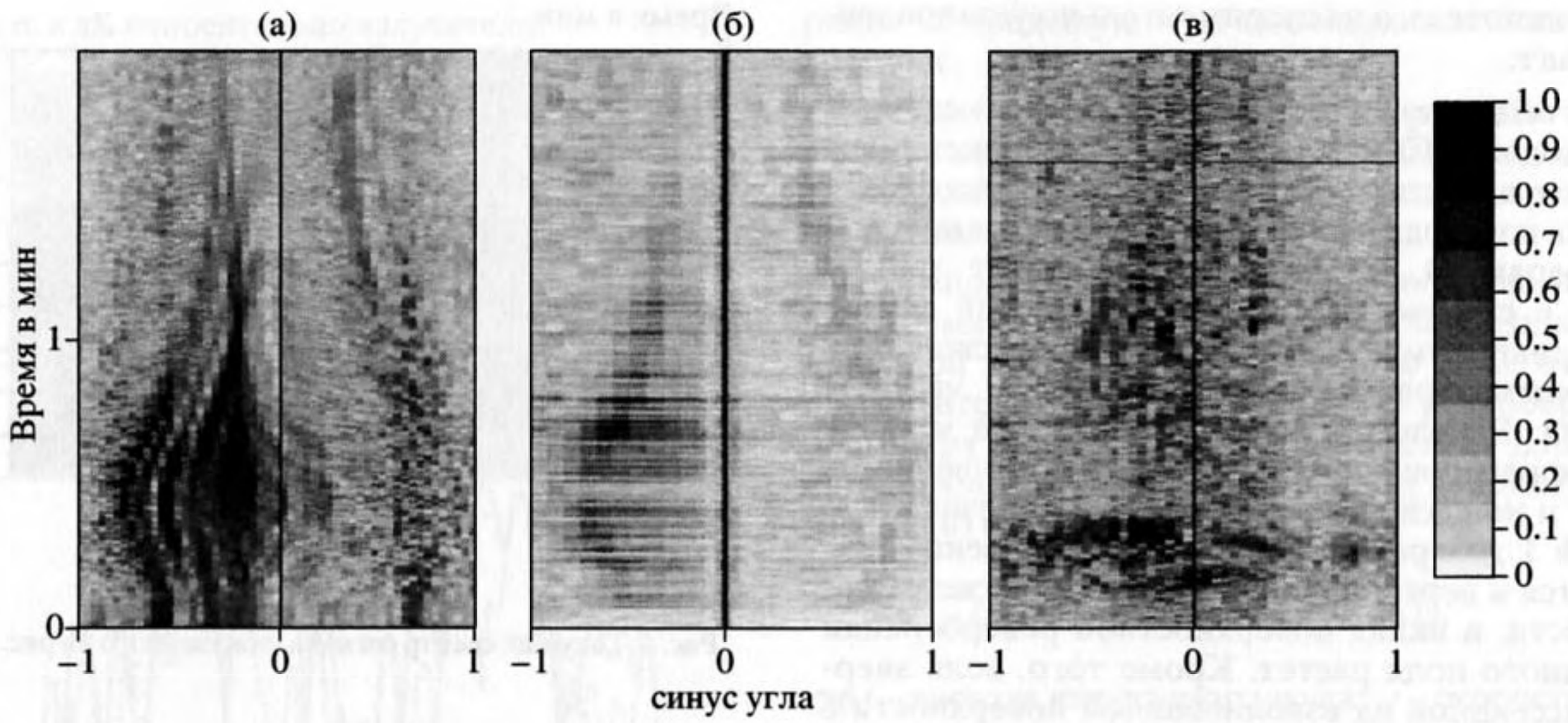

Рис. 7. Картины пространственных спектров в координатах "угол (пространственная частота) – время" на вертикальной антенне на частоте излучателя (а), установленного на движущемся рассеивателе; на частоте № 1(б); на частоте № 2 (в).

В нашем случае проверить модель формирования дифрагированного поля в присутствии сильного поверхностного волнения путем количественных оценок весьма сложно, вследствие чрезвычайной малости наблюдаемых эффектов рассеяния (последние наблюдаются лишь благодаря методу темного поля, обеспечивающему выигрыш около 50 дБ [4]), особенно, если учесть, что о поверхностном волнении у нас имеются весьма скудные данные.

В заключение представим еще один экспериментально наблюдаемый положительный эффект от воздействия поверхностной реверберации. В ходе измерений было показано, что для исследуемого диапазона частот бистатические наблюдения рассеивателя в темном акустическом поле при сильном ветре и, соответственно, сильном поверхностном волнении выигрывают относительно наблюдений в штиль. Наблюдается эффект увеличения поперечника рассеяния при высоте волн от 20–30 см и ненаправленном излучателе подсветки, когда рассеиватель становится заметен с хорошим соотношением сигнал/шум в течение всего галса (+/–60° от пеленга на излучатель подсветки, т.е. просветного пеленга). Иногда этот эффект проявляется в том, что рассеиватель становится заметен не только на просветном пеленге, а и в бистатике для некоторых угловых диапазонов при больших пеленгах наблюдения. Величина эффекта увеличения поперечника рассеяния в бистатическом диапазоне пеленгов, при разбросе отклика рассеивателя и уровня помехи от галса к галсу при одинаковых условиях около 2 дБ, составляет примерно 5–6 дБ. Это означает, что отношение сигнал/шум (меняется как помеха, так и отклик рассеивателя) на галсе при штиле отличается для галса при ветре силой 8–10 м/с на 5–6 дБ.

Данный эффект связывается с поверхностной реверберацией, когда бистатический сигнал от рассеивателя становится сравним с рассеянием от подсветки поверхностной реверберацией, работающей на просвет. При изотропном волнении и ненаправленном локационном излучателе поверхностная реверберация растет более–менее равномерно на всех пеленгах приемной антенны, а для рассеивателя увеличивается подсветка от поверхности со всех углов в горизонтальной плоскости и растет эффективный поперечник рассеяния, вследствии чего рассеиватель наблюдается в течение всего галса. При сформировавшемся анизотропном волнении угловая зависимость поверхностной реверберации имеет выраженные максимумы в горизонтальной плоскости, зависящие от направления распространения поверхностных волн и, соответственно, имеет максимумы угловая зависимость реверберации на приемной антенне. Максимален эффект от реверберационной подсветки в момент, когда рассеиватель пересекает максимум индикатрисы рассеяния поверхности, попадающий на приемную антенну – вариант просветной ситуации, но только для реверберационной подсветки. Данный экспериментально наблюдаемый эффект, по всей видимости, представляет интерес для дальнейшего теоретического анализа и оценок, так как имеет определенное практическое значение, например в задачах типа [7].

Авторы благодарны Б.М. Салину, А.Л. Матвееву, В.И. Турчину за постановку эксперимента и

обсуждение его результатов. Авторы выражают глубокую признательность рецензенту статьи за сделанные им существенные замечания, учет которых позволил улучшить статью. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 00-15-96741, № 99-02-16401 и № 01-02-17380).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gershman A.B., Turchin V.I. and Zverev V.A.* Experimental Results of Localization of Moving Underwater Signal by Adaptive Beamforming. IEEE Trans. on Signal Processing, V. 43. № 10. October 1995. P. 2249–2257.
2. *В.А. Зверев.* Физическая природа шумов акустических антенн в мелком море. // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 2. С. 220–224.
3. *Зверев В.А.* Шумы акустической антенны в волноводе // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 4. С. 456–461.
4. *Зверев В.А.* Акустическое темное поле // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 75–83.
5. *Зверев В.А., Коротин П.И., Матвеев А.Л., Салин Б.М., Турчин В.И.* Обращенный апертурный синтез в акустическом темном поле // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 5. С. 650–657. Acoustical Physics, V. 46. № 5. 2000. P. 569–575.
6. *Бредихин В.В., А.В. Лебедев А.В., Салин Б.М.* Исследование флуктуаций при распространении звука в замкнутом водоеме / Препринт № 490 ИПФ РАН, 1999. 30 стр.
7. *Runkle P., Carin L., Couchman L., Bucaro J.A., Yoder T.J.* Multiaspect identification of submerged elastic targets via wave-based matching pursuits and hidden Markov models // Journ. Acoust. Soc. Amer. V. 106. № 2. August 1999. P. 605–616.

Effect of Surface Reverberation on the Selection of a Diffracted Signal

V. A. Zverev and P. I. Korotin

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, Nizhni Novgorod, 603600 Russia
e-mail: zverev@hudro.appl.sci-nnov.ru

Abstract—An experiment is described in which the wave scattered by the rough water surface is the factor by virtue of which the signal diffracted by a moving scatterer is received with confidence. Experimental corroboration of this fact is presented, and the origin of this phenomenon is revealed.