

Наблюдение различных механизмов рассеяния низкочастотного звука на поверхностном волнении: традиционная брэгговская и новая феноменологическая модели рассеяния

М. Б. Салин,^{*} Г. А. Байдаков,[†] О. А. Потапов,[‡] Б. М. Салин, А. В. Стуленков, Д. Д. Разумов
Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН»
Россия, 603950, Н. Новгород, ул. Ульянова, д. 46

(Статья поступила 23.06.2017; Подписана в печать 26.06.2017)

В серии экспериментов исследовались узкополосные спектры обратного рассеяния звука. Выделены два вида спектров рассеяния. В первом случае наблюдаются боковые лепестки на определенном расстоянии от несущей частоты, вызванные брэгговским рассеянием на поверхностных волнах. Во втором случае наблюдается плавное уширение спектра вокруг несущей частоты. В этом случае спектр реверберации интерпретируется с помощью феноменологической модели рассеяния звука на приповерхностных неоднородностях, совершающих под воздействием ветровых волн круговое движение со скоростями значительно меньшими фазовых скоростей поверхностных волн.

PACS: 43.30.Gv

УДК: 551.463.2, 551.466.3

Ключевые слова: низкочастотная реверберация, обратное рассеяние, ветровое волнение.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование рассеяния звука в мелком море с определением уровней и доплеровского уширения спектров эхосигналов является актуальной задачей, необходимой для оценки дальности действия доплеровских гидролокаторов. Так же эта задача представляет интерес для акустического зондирования морской среды. Большинство работ, посвященных низкочастотному рассеянию звука, опираются на брэгговский механизм рассеяния звука на ветровом волнении, и уровень рассеяния в этом случае оценивается в рамках метода малых возмущений (ММВ). Однако в ряде экспериментов, например, [1], были получены уровни поверхностного рассеяния, превосходящие значения, предсказанные в рамках ММВ и больше соответствующие эмпирической зависимости Чапмана–Харриса. Отклонение от ММВ наблюдалось в определенной области параметров частота звука — скорость ветра. Авторами [2] этот эффект был назван «аномальным рассеянием», и был объяснен наличием воздушных полостей и пузырьков в приповерхностном слое.

Можно предположить, что отличие механизма рассеяния звука на воздушных полостях от брэгговского приведет не только к изменению силы рассеяния, но и к изменению доплеровского спектра эхосигнала. Чтобы провести измерения спектра эхосигнала с разрешением 1 Гц требуется, чтобы полоса посланного в среду активного сигнала, была не более этого значения. Импульсный объем такого сигнала в среде занимает в длину не менее 750 м, вдобавок по ряду причин целесообразно сделать паузу в 1–2 длительности импульса между окончанием фазы излучения и началом приема

анализируемого сигнала. Таким образом, эксперимент по измерению силы поверхностного рассеяния с разрешением по частотам Доплера будет связан посылкой в среду сигнала на расстоянии нескольких километров, для чего требуются достаточно мощные излучающие системы и контроль затухания сигнала по трассе для нормировки.

Во многих ранних экспериментах по поверхностному рассеянию [1–5] (в том числе и в обсуждаемой выше работе) применялись широкополосные импульсы, в основном генерируемые взрывными источниками звука, при этом оценивался только суммарный уровень рассеянного сигнала. В просветных экспериментах [6] проводился анализ доплеровского спектра реверберации. Но в этих работах, из-за бистатической геометрии и непрерывного режима излучения, сигнал рассеивался, главным образом, на более интенсивных поверхностных волнах большой длины. Это не соответствует тому типу помехи, с которой сталкиваются моностатические гидролокаторы дальнего обнаружения, использующие тональные импульсы большой длительности.

1. НАБЛЮДЕНИЕ БРЕГГОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ В ЗАЛИВЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

В эксперименте [7], проведенном в заливе Ладжского озера, специально создавались условия, чтобы измерить спектр обратного рассеяния звука с высоким соотношением сигнал–шум. В опыте использовалась излучающая фазированная антенная решетка (ФАР) с диаграммной направленности, ориентированной вверх под углом 45° к горизонту. Ненаправленный приемник был расположен непосредственно под ФАР. Выбранный угол превосходил угол полного внутреннего отражения от дна, и обеспечивал гарантированный прием рассеянного сигнала только из той области

^{*}Е-mail: mikesalin@hydro.appl.sci.nnov.ru

[†]Е-mail: zebrrr-nn@yandex.ru

[‡]Е-mail: potap052@hydro.appl.sci.nnov.ru

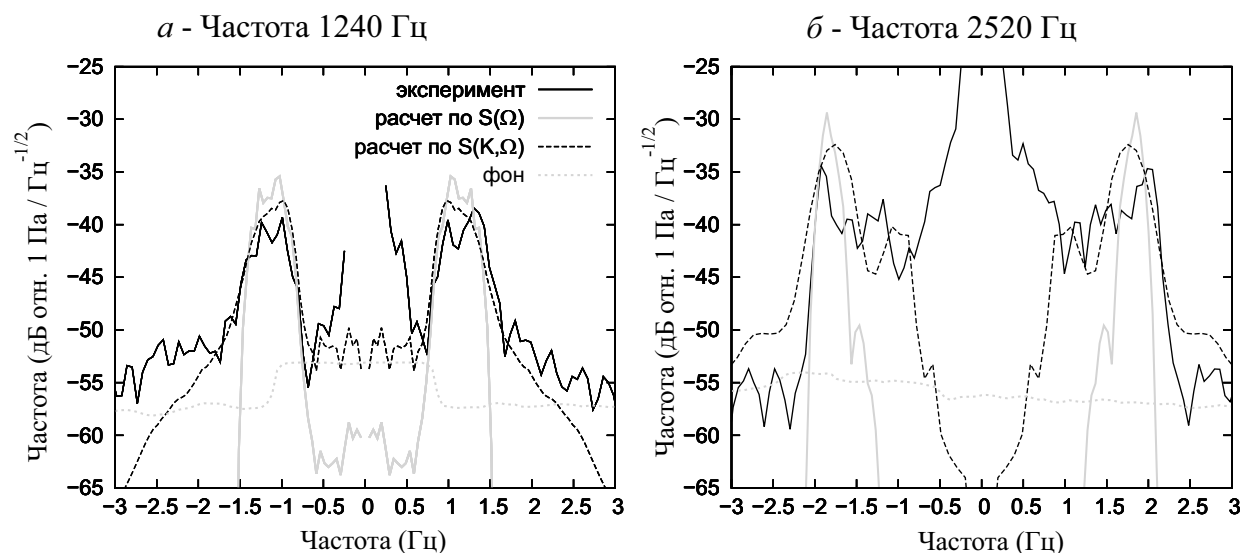


Рис. 1: Спектр обратного рассеяния поверхности, при падении направленного пучка под углом 45° . Оз. Ладога, 2013 г. Теоретические кривые рассчитаны по ММВ. Уровни соответствуют принятому сигналу для конкретной схемы эксперимента и уровню излучения

поверхности, которая находится в прямой видимости ФАР. Это существенно упростило расчеты, поскольку значения засвеченной площади в эксперименте и угла падения необходимы для пересчета уровня эхосигнала в силу рассеяния. Таким образом, уровни рассеяния не зависели от импульсного объема сигнала, поэтому применялся непрерывный режим излучения и проводился анализ спектра рассеяния с разрешением 0.1 Гц.

На рис. 1 представлен пример спектров рассеяния для двух несущих частот: 1240 Гц и 2520 Гц. На спектрах наблюдается локальный максимум вблизи брэгговской частоты (с поправкой на вертикальный угол прихода луча на поверхность). Экспериментальные спектры по уровню и по форме находятся в хорошем согласии с теоретической оценкой, сделанной в рамках ММВ на основе измеренного спектра волнения. Проводилось два типа измерения. По вехе измерялся частотный спектр волнения $S(\Omega)$ и для использования его в расчете применялось дисперсионное соотношение для поверхностных волн. С помощью видеокамеры измерялся напрямую пространственно-временной спектр $S(K, \Omega)$, и в расчете уже не использовалось дисперсионное соотношение. Подробно методика расчета дана в [7].

Поскольку акватория закрыта от сильных ветров, то во время эксперимента наблюдалось слабое волнение с максимумом на 1 Гц. Максимум спектра рассеяния действительно соответствует именно брэгговской частоте, а не максимуму спектра волнения, как в простейших экспериментах.

2. НАБЛЮДЕНИЕ «АНОМАЛЬНОГО» РАССЕЯНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА ГОРЬКОВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

На Горьковском водохранилище был проведен эксперимент таким образом, чтобы воспроизвести классическую моностатическую схему локации. Водохранилище имеет характерные размеры 5 x 50 км, среднюю глубину 10 м. При направлении ветра вдоль водохранилища на нем наблюдается развитое волнение. В день эксперимента существенная высота волн от подошвы до гребня составляла 21 см.

Катер с приемо-передающим комплексом стоял на якоре посередине между берегами. Ненаправленный излучатель был установлен на дно, а приемная ФАР была установлена с помощью грузов и плавучестей в горизонтальном положении на расстоянии 5 м от дна. Приемная ФАР состояла из 32 гидрофонов равномерно распределенных по апертуре 6.2 м. Производилось излучение импульсных сигналов с частотой заполнения 1320, 2020 и 3020 Гц (вблизи резонанса излучателя) и с огибающей в форме окна Ханна длительностью 1, 2 и 4 с. Скважность импульсов была достаточной, чтобы при начале очередного импульса заканчивались реверберационные эффекты от предыдущего.

При обработке сигналов выполнялись следующие операции:

- гетеродинирование на несущей частоте,
- определение момента времени, когда начиналось излучение очередного импульса,
- фазирование по набору пеленгов,
- вычисление узкополосного скользящего спектра

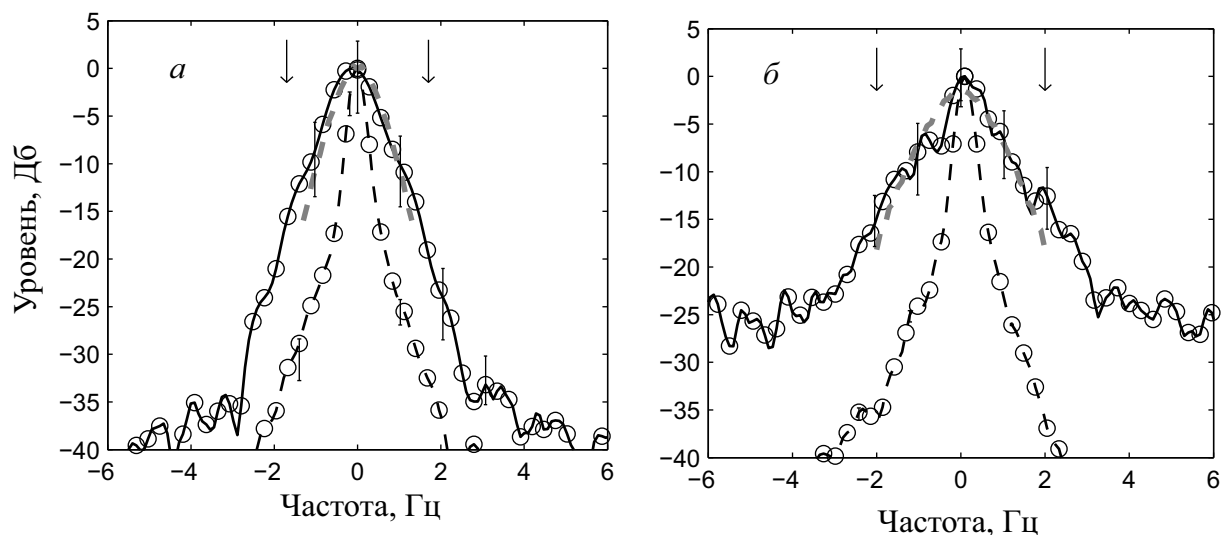


Рис. 2: Сплошная линия — нормированный на максимум спектр эхосигнала по одному пеленгу, в стробе с задержкой a — $\tau_{j*} = 3.1$ с, b — 6.3 с. Черная штриховая линия — нормированный на максимум спектр излученного сигнала. Серый пунктир — теоретическая зависимость. Частота a — 1320 Гц и b — 2020 Гц, длительность 4 с. Горьковское вдхр., 2016 г.

с длиной окна равной длине исходного импульса и с перекрытием окон 0.75.

Таким образом, данные для каждого режима излучения были представлены в виде массива $P(\tau_j, f_k, n, \theta_m)$ в зависимости от τ_j — задержки относительно момента излучения, f_k — частоты Доплера, n — номера импульса в последовательности, θ_m — пеленга.

Прежде всего, следует обратить внимание на спектры рассеяния, построенные для сигнала по пеленгу $\theta_{m*} = 90^\circ$ в стробе с номером j^* , отстоящем на τ_{j*} от момента излучения. Указанный пеленг был выбран вдоль длинной стороны водохранилища, так чтобы береговая линия не ограничивала распространение. Спектры усреднялись энергетически по ансамблю импульсов.

Пример таких спектров рассеяния представлен на рис. 2 (сплошная линия). Зависимости нормированы на максимум, поскольку условия эксперимента не позволили нормировать их в абсолютных единицах. Кривые имеют форму, близкую к Гауссовой с центром на нулевой частоте Доплера. На графике также нанесены нормированные спектры сигнала, зарегистрированного непосредственно в момент излучения (черная штриховая линия), чтобы показать, что спектр сигнала действительно уширяется при рассеянии в среде.

При брэгговском рассеянии на ветровом волнении в спектре должны были возникнуть локальные максимумы в окрестности частот Доплера, которые обозначены стрелками на рисунке. Явных экстремумов в этой части спектра практически не наблюдается.

Для описания измеренных спектров была привлечена развитая в [8] теория рассеяния звука на частицах, движущихся в поле орбитальных течений ветровых волн. Была рассчитана в диапазоне амплитуд

0 ÷ −15 дБ модельная зависимость спектра, которая нанесена серой штриховой линией на рис. 2. Для входящих в нее параметров были использованы следующие значения. Частота энергонесущих волн, измеренных струнным волнографом, составила 0.4 Гц, среднеквадратичное значение скорости осциллирующего течения у поверхности — 0.24 м/с. Толщина слоя рассеивателей была подобрана по совпадению формы расчетного и измеренного спектра и составила 0.5 м, сила рассеяния частиц не учитывалась из-за отсутствия нормировки принятых сигналов.

В эксперименте были также отмечены следующие факты. Первое, рассеяние обладает почти изотропной диаграммой направленности. На рис. 3 в яркостном виде построены усредненные по той же методике спектры в зависимости от пеленга. Второе, спектры рассеяния достаточно сильно флуктуируют от импульса к импульсу. На рис. 4 в яркостном виде построено семейство спектров в зависимости от номера импульса. Дисперсия флуктуаций уровней спектральных компонент представлена в виде диапазона погрешностей на рис. 2.

3. АНАЛИЗ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАНЕЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ТИХОМ ОКЕАНЕ

На примере результатов эксперимента, опубликованных в [9], можно одновременно наблюдать эффекты брэгговского и «аномального» рассеяния на спектре принятого сигнала. Эксперимент проводился в Тихом океане, в районе Камчатки, применялась довольно мощная излучающая система, несущая частота составляла 250 Гц, длительность огибающей — 100 с. На

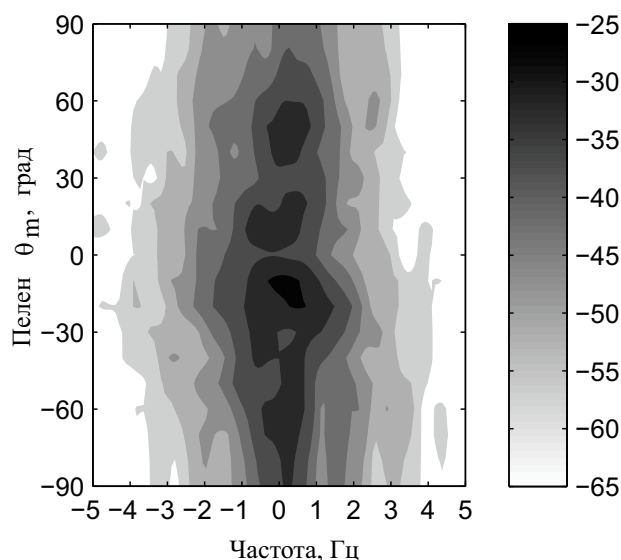


Рис. 3: Спектр эхосигнала, стробированного с задержкой $\tau_{j*} = 2.6$ с в зависимости от пеленга. Частота 2020 Гц, длительность 2 с

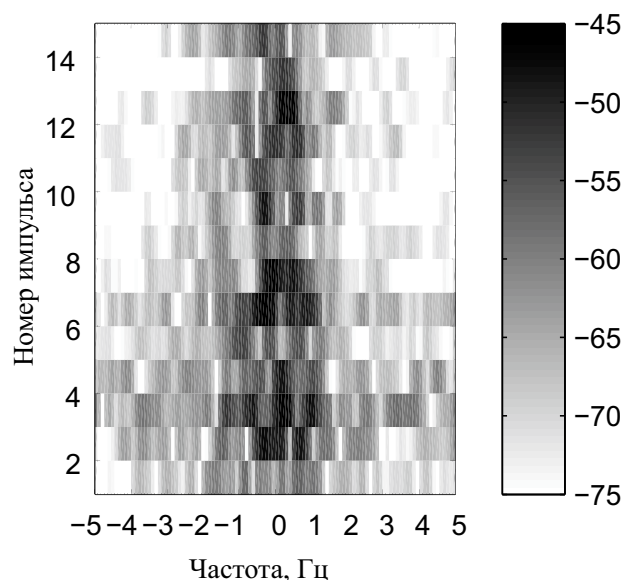


Рис. 4: Спектр эхосигнала, стробированного с задержкой $\tau_{j*} = 6.2$ с в зависимости от номера импульса. Частота 2020 Гц, длительность $T = 4$ с

рис. 5 воспроизведена кривая, снятая по точкам с иллюстрации в работе [9]. На этом же графике построена теоретическая зависимость, включающая рассеяние на движущихся приповерхностных частицах [10] (с подобранными параметрами) и брэгговское рассеяние на резонансной компоненте волн. Первое слагаемое формирует широкое распределение спектра вокруг нулевой частоты Доплера, второе — более узкий пика в окрестности частоты 0.66 Гц.

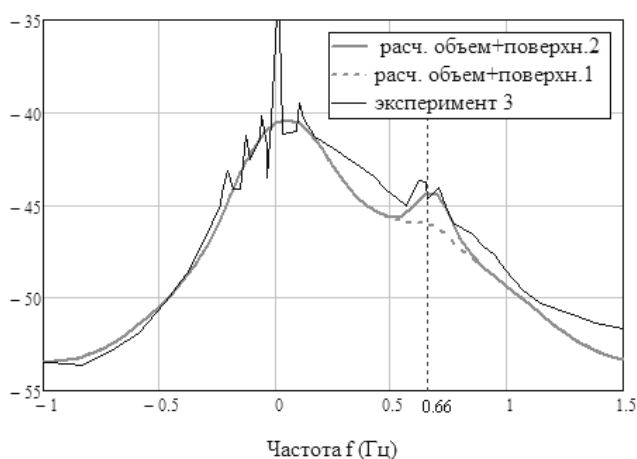


Рис. 5: Спектр эхосигнала, экспериментальная кривая воспроизведена из [9]

Авторы работы [9] действительно отмечали наличие брэгговского пика, но ширина распределения спектра на несущей частоте (на рис. 5 соответствует значению

$f = 0$) ими никак не интерпретировалась. Его объяснение было получено уже в современном цикле работ, включающих [8, 10] и настоящий доклад.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При слабой силе ветра обратное рассеяние звука происходит непосредственно на поверхности за счет брэгговского резонанса на ветровых волнах с соответствующими длинами и приводит к возникновению локального максимума на частоте Доплера в спектре рассеянного сигнала. При более высокой скорости ветра преобладающим механизмом формирования спектра, по-видимому, становится отражение от движущихся в приповерхностном слое локальных рассеивателей. Эти рассеиватели совершают колебательные движения в поле ветровых волн, из-за чего спектр рассеянного сигнала содержит частоты Доплера, но эти частоты оказываются значительно ниже, чем при брэгговском рассеянии непосредственно на поверхностных волнах.

Б. М. Салин благодарит программу ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 гг., раздел № 12.18 за поддержку разработки оборудования и техники гидроакустического эксперимента. М. Б. Салин благодарит Российский научный фонд (РНФ), грант 14_17_00667 за поддержку в части проведения и анализа результатов экспериментов на Горьковском водохранилище. Г. А. Байдаков благодарит РФФИ (грант № 17-05-41117).

-
- [1] Ogden P. M., Erskine F. T. JASA. 1994. **95**, N 2. P. 746.
[2] Neighbors T. H., Bjorno L. Hydroacoustics. 2001. **4**. P. 181.
[3] Андреева И. Б., Харатьян Е. Г. Акуст. журн. 1966. **12**, № 4. С. 399.
[4] Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.
[5] Ellis D. D. Defence Research Reports. Canada, 2014. Doc. N: DRDC Atlantic ECR 2013-154.
[6] Лебедев А. В., Салин Б. М. Акуст. журн. 2004. **50**. № 6. С. 813.
[7] Салин М. Б., Потапов О. А., Салин Б. М., Чащин А. С. Акуст. журн. 2016. **62**, № 1. С. 70.
[8] Салин Б. М., Кемарская О. Н., Молчанов П. А., Салин М. Б. Акуст. журн. 2017. **63**, № 3. С. 314.
[9] Авербах В. С., Бондарь Л. Ф., Голубев В. Н., Гольдблат В. Ю., Долин Л. С., Нечаев А. Г., Пигалов К. Е., Смирнов Г. Е., Тумаева Е. И. Акуст. журн. 1990. **36**, № 6. С. 1119.
[10] Салин Б. М., Салин М. Б. Акуст. журн. 2017 (в печати).
-

Observation of various mechanisms of low-frequency sound scattering on surface waves: the traditional Bragg and new phenomenological scattering models

M. B. Salin^a, G. A. Baidakov^b, O. A. Potapov^c, B. M. Salin, A. V. Stulenkov, D. D. Razumov

Federal Research Center Institute of Applied Physics of the RAS

Russia, Nizhny Novgorod

E-mail: ^amikesalin@hydro.appl.sci-nnov.ru, ^bzebrrr-nn@yandex.ru, ^cpotap052@hydro.appl.sci-nnov.ru

Narrow-band spectra of sound backscattering were investigated in a series of experiments. Two types of scattering spectra are distinguished. In the first case, side-lobes are observed at a certain distance from the carrier frequency. This effect is caused by Bragg scattering on surface waves. In the second case, a smooth broadening of the spectrum around the carrier frequency is observed. In this case, the reverberation spectrum is interpreted using the phenomenological model of sound scattering at subsurface inhomogeneities. These inhomogeneities are moving along circular tracks under the action of wind waves currents, which velocities are rather smaller than the phase velocities of surface waves.

PACS: 43.30.Gv.

Keywords: low frequency reverberation, surface backscattering, wind waves, surface roughness.

Received 23 June 2017.

Сведения об авторах

1. Михаил Борисович Салин — канд. физ.-мат. наук, зав. лаб.; тел.: (831) 416-47-85, e-mail: mikesalin@hydro.appl.sci-nnov.ru.
 2. Георгий Алексеевич Байдаков - канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник, тел.: (831) 416-47-09, e-mail: zebrrr-nn@yandex.ru.
 3. Олег Андреевич Потапов — мл. науч. сотрудник, тел.: (831) 416-06-43, e-mail: potap052@hydro.appl.sci-nnov.ru.
 4. Борис Михайлович Салин — доктор техн. наук, вед. науч. сотрудник, тел.: (831) 416-47-46, e-mail: salin@hydro.appl.sci-nnov.ru.
 5. Андрей Вадимович Стуленков — мл. науч. сотрудник, тел.: (831) 416-49-72, e-mail: andrey_stulenkov8@mail.ru.
 6. Дмитрий Дмитриевич Разумов — аспирант, тел.: (831) 416-47-46, e-mail: ddrazumov@gmail.com.
-