АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1994, том 40, № 4, с. 655 - 660

УДК 534.2

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ РЕВЕРБЕРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ ОКЕАНА

© 1994 г. Р. Ю. Попов, Е. В. Симакина
Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4
Поступила в редакцию 30.11.93 г.

Исследуется вертикальная корреляция реверберационных сигналов в прибрежном клине. Анализируется зависимость коэффициента корреляции от направления излучения, наклона дна, глубины места и гидрологических условий. Наблюдается существенная анизотропия корреляционных свойств реверберационного отклика в горизонтальной плоскости.

В мелководных районах океана реверберация является основной помехой в работе активных гидролокаторов и может существенно снижать их эффективность. Поэтому знание таких параметров реверберационного сигнала как интервалы пространственной корреляции важно для оценки коэффициентов концентрации планарных приемных антенн.

Исследованию характеристик и особенностей реверберации в мелководных районах океана с горизонтальным дном посвящены многочисленные работы [например, 1 - 3]. Однако здесь кратко остановимся лишь на работе Урика и Ланда [1], полезной, как нам кажется, для интерпретации полученных нами результатов. В мелком море важную роль в формировании результирующего реверберационного сигнала играет рассеяние на границах водного слоя, а также донно-поверхностные отражения. Сигналы, испытывающие отражения под более крутыми углами, ослабевают быстрее, поэтому с течением времени (после начала излучения зондирующей посылки) лучи, по которым приходят элементарные рассеянные назад сигналы, образующие реверберацию, становятся все более пологими. Это ведет по мнению авторов к заметному росту вертикального радиуса корреляции. Такой подход – ключ к объяснению многих результатов, полученных в условиях преобладающего влияния границ водного слоя.

В настоящей статье рассмотрим особенности поведения вертикальной корреляции реверберационных сигналов в мелком море с наклонным дном и убедимся в том, что даже небольшой его наклон может заметно сказаться на пространственных характеристиках реверберации и привести к хорошо выраженной азимутальной анизотропии реверберационного сигнала.

Измерения были проведены в юго-восточной части Средиземного моря вблизи берегов Египта и Израиля. Район характеризовался небольшими глубинами и слабо наклонным (0.5°) дном. Грунт отличался неоднородностью состава и значительной пористостью. В основном это был песчанистый или с примесью большого количества органики ($\rho = 1.8$ г/см^3). Рельеф дна сильно выровненный, практически плоский, с генеральным наклоном от берега. На расстоянии 60 км глубина места изменялась от 20 до 400 м. Научно-исследовательское судно стояло на якоре в точке, расположенной в центре указанного участка, с глубиной места 85 м.

Во время измерений был полный штиль, так что ветровая волна, также как и зыбь, отсутствовали. Работы проводились весной, когда уже проявился прогрев верхнего слоя воды. Поэтому для гидрологических условий характерен незначительный изотермический (перемешанный) слой толщиной 15 - 20 м с последующим уменьшением температуры воды до глубины 40 - 45 м, затем снова изотермический слой до дна. Соответствующий профиль изменения скорости звука с глубиной $C(z)$ представлен на рис. 1 (сплошная линия). Отметим, что вплоть до глубины 110 - 120 м скорость звука у поверхности (1522 м/с) превышала скорость звука у дна. Поэтому в рассматриваемом случае доминирующий вклад в реверберационный сигнал давало рассеяние на дне.

С научно-исследовательского судна на глубину 45 м опускался излучатель. Ширина лепестка диаграммы направленности по уровню 0.7 составляла 20° как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Изучались псевдошумовые зондирующие посылки со средней частотой 3.15 кГц в полосе 60 Гц длительностью 1 с. Угол наклона оси диаграммы направленности в вертикальной плоскости был равен нулю. Излучение 5 - 10 зондирующих посылок производилось для каждого из двух азимутальных углов: по направлению к берегу (перпендикулярно генеральной линии изобат, т.е. ребру прибрежного клина) и в противоположном направлении.

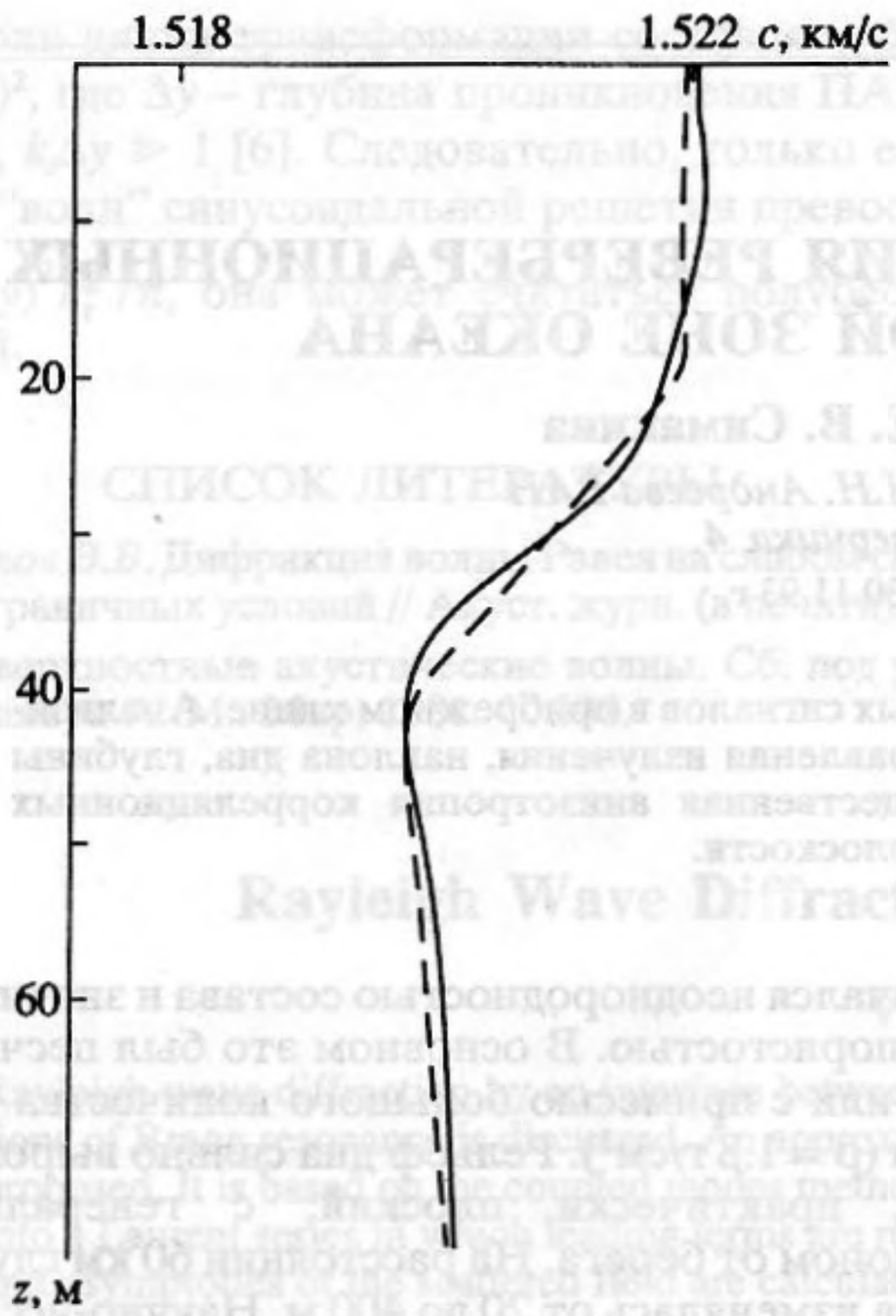

Рис. 1. Профиль изменения скорости звука с глубиной $c(z)$. —— – результат измерений, - - - – кусочно-линейная аппроксимация.

Рис. 2. Зависимость от времени огибающей сигнала, принятого на горизонте 45.0 м.

Прием рассеянных сигналов осуществлялся на вертикальную цепочку из пяти гидрофонов, разнесенных на 16.5; 1.5; 3.0 и 9.0 м (снизу вверх). Цепочка с грузом на конце опускалась с борта судна, причем второй сверху гидрофон располагался на горизонте 45 м, т.е. приблизительно на горизонте оси звукового канала. Типичный вид огибающей принимаемых сигналов представлен на рис. 2. Никаких явно выраженных локальных подъемов на реверберационной кривой, свидетельствующих о существовании в районе подводных возвышенностей (местных предметов) или об интерференционных явлениях, обнаружить не удалось.

Принятые гидрофонами сигналы синхронно гетеродинировались на $f_{ср}$ = 500 Гц и записывались на многоканальный магнитофон. Сигналы от различных пар гидрофонов цепочки вводились в ЭВМ. Обработка состояла в вычислении функции их взаимной корреляции

$$R(t, \tau) = \frac{1}{T\sqrt{\sigma_i^2(t)\sigma_j^2(t)}} \int_t^{t+T} S_i(t)S_j(t+\tau)dt,$$

где T – длительность зондирующей посылки; $S_i(t)$ и $S_j(t)$ – смесь реверберационного сигнала и шума океана, принятая i-м и j-м гидрофонами вертикальной цепочки; $\sigma_i^2(t)$ и $\sigma_j^2(t)$ – дисперсия сигналов $S_i(t)$ и $S_j(t)$.

В нашем случае время усреднения T составляло 1 с. Регистрировалось изменение пикового (максимального) значения корреляции $R_{пик}(t)$ со временем после излучения посылки. При этом предполагалась стационарность сигнала на интервале усреднения. Ошибка, связанная с таким предположением, уменьшается по мере приближения к "хвостовой" части реверберационного сигнала, где кривая спада уровня со временем становится более пологой. На рис. 3 и 4 представлены усредненные по пяти реализациям кривые огибающей $R_{пик}(t)$ для различных расстояний между приемниками. Рис. 3 относится к случаю излучения по направлению к берегу, рис. 4 – к случаю излучения в направлении открытого моря. Время отсчитывалось от начала посылки, цифры у кривых – расстояние между гидрофонами в метрах.

Из анализа представленных кривых следует, что при излучении в направлении берега в интервале между четвертой и пятой секундами происходит заметный рост корреляции реверберационных сигналов (до 0.45 - 0.5). Область повышенной корреляции сохраняется вплоть до разнесения гидрофонов на 21 м, т.е. примерно на 40 длин волн λ, причем задержки τ, отвечающие максимальным значениям $R(t)$, всегда близки к 0.

При излучении в сторону открытого моря картина иная. Область повышенной корреляции наблюдается лишь при разнесении гидрофонов до 3 м, причем она сдвинута по сравнению с предыдущим случаем в сторону больших t примерно на 1 с. При разнесении приемников на 4.5 м и более эта область исчезает и значения корреляции снижаются до фонового уровня.

Объяснение такого поведения корреляционных характеристик реверберационных сигналов основано на учете гидрологических условий эксперимента и наклона дна. Сделаем некоторые оценки, используя лучевое приближение и приближение плоских волн. Будем считать, что вертикальный профиль скорости звука $c(z)$ можно аппроксимировать тремя прямыми (пунктирная линия на рис. 1), что дно – шероховатая наклонная плоскость, обладающая круговой индикатрисой рассеяния (кроме лепестка в зеркальном на-

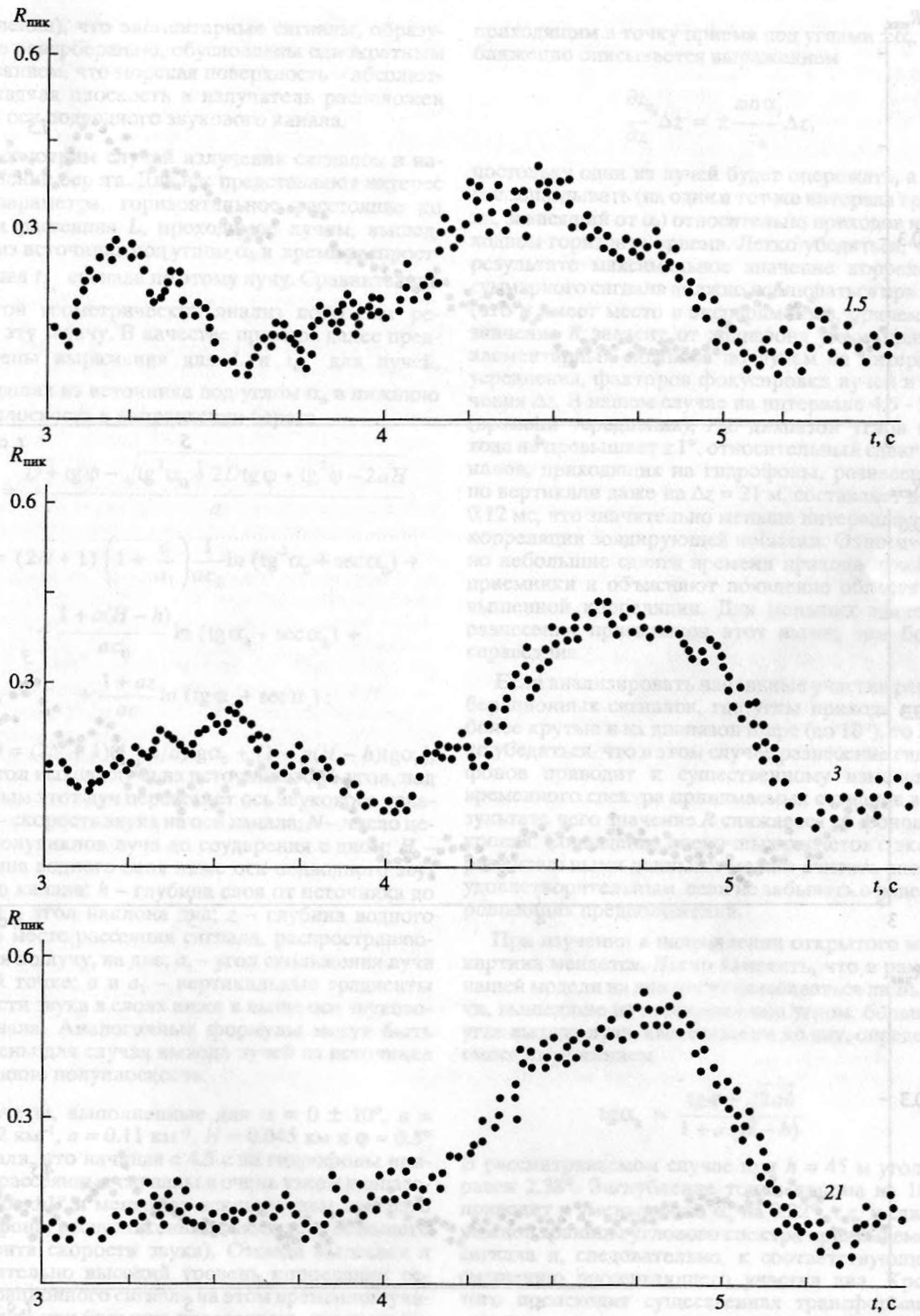

Рис. 3. Зависимость от t огибающей $R_{пик}$ при излучении в направлении берега для различных разнесений гидрофонов.

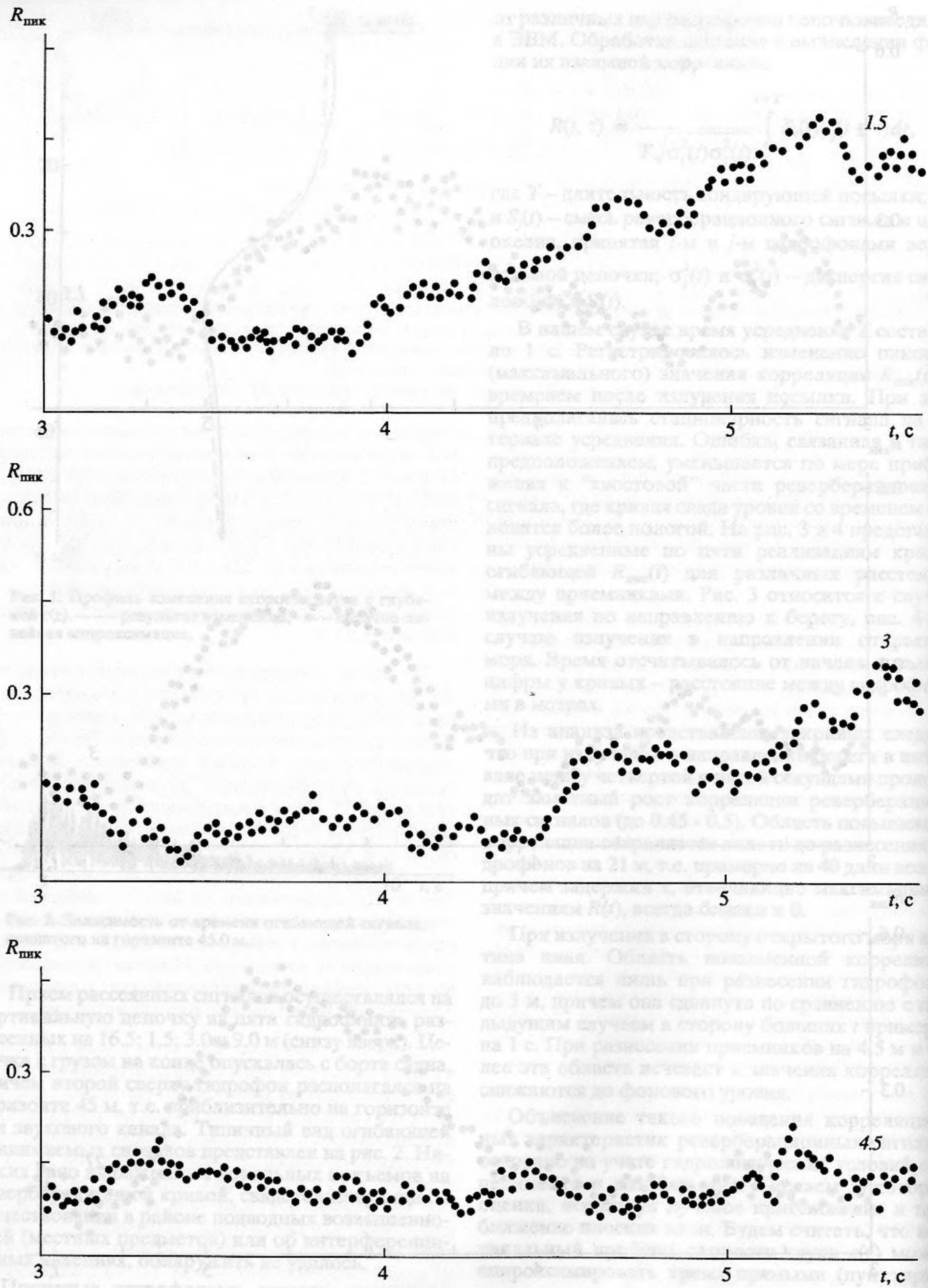

Рис. 4. Зависимость от t огибающей $R_{пик}$ при излучении в направлении открытого моря для различных разнесений гидрофонов.

правлении), что элементарные сигналы, образующие реверберацию, обусловлены однократным рассеянием, что морская поверхность – абсолютно гладкая плоскость и излучатель расположен ниже оси подводного звукового канала.

Рассмотрим случай излучения сигналов в направлении берега. Для нас представляют интерес два параметра, горизонтальное расстояние до точки рассеяния L, проходимое лучом, вышедшим из источника под углом α_h и время распространения t_{α_h} сигнала по этому лучу. Сравнительно простой геометрический анализ позволяет решить эту задачу. В качестве примера далее представлены выражения для L и t_{α_h} для лучей, вышедших из источника под углом α_h в нижнюю полуплоскость в направлении берега

$$L = \frac{D + \operatorname{tg}\varphi - \sqrt{\operatorname{tg}^2\alpha_0 + 2D\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}^2\varphi - 2aH}}{a};$$

$$t_{\alpha_h} = (2N+1)\left(1 + \frac{a}{a_1}\right)\frac{1}{ac_0}\ln\left(\operatorname{tg}^2\alpha_0 + \sec\alpha_0\right) + \frac{1 + a(H-h)}{ac_0}\ln\left(\operatorname{tg}\alpha_h + \sec\alpha_h\right) + \frac{1 + az}{ac}\ln\left(\operatorname{tg}\alpha_z + \sec\alpha_z\right);$$

где $D = (2N + 1)(1 + a/a)\operatorname{tg}\alpha_0 + [1 + a(H - h)\operatorname{tg}\alpha_h]$; α_h – угол выхода луча из источника; α_0 – угол, под которым этот луч пересекает ось звукового канала; c_0 – скорость звука на оси канала; N – число целых полуциклов луча до соударения с дном; H – толщина водного слоя ниже оси подводного звукового канала; h – глубина слоя от источника до дна; φ – угол наклона дна; z – глубина водного слоя в месте рассеяния сигнала, распространяющегося по лучу, на дне; a_z – угол скольжения луча в этой точке: a и a_1 – вертикальные градиенты скорости звука в слоях ниже и выше оси звукового канала. Аналогичные формулы могут быть получены для случая выхода лучей из источника в верхнюю полуплоскость.

Расчеты, выполненные для $\alpha = 0 \pm 10°$, $a = 0.012$ км$^{-1}$, $a = 0.11$ км$^{-1}$, $H = 0.045$ км и $\varphi = 0.5°$ показали, что начиная с 4.5 с на гидрофоны приходят рассеянные сигналы в очень узком диапазоне углов $\pm 1°$ и менее (за исключением верхнего гидрофона, расположенного в области большего градиента скорости звука). Отсюда вытекает и относительно высокий уровень корреляции реверберационного сигнала на этом временном участке даже при больших пространственных разнесениях гидрофонов. Действительно, поскольку при изменении глубины приемника на Δz изменение времени распространения сигнала по лучам, приходящим в точку приема под углами $\pm\alpha_i$, приближенно описывается выражением

$$\frac{\partial t_{\alpha_i}}{\partial z}\Delta z = \pm\frac{\sin\alpha_i}{c_0}\Delta z,$$

постольку один из лучей будет опережать, а другой запаздывать (на один и тот же интервал времени, зависящий от α_i) относительно приходов на исходном горизонте приема. Легко убедиться, что в результате максимальное значение корреляции суммарного сигнала должно наблюдаться при $\tau = 0$ (что и имеет место в эксперименте), причем это значение R зависит от диапазона углов прихода элементарных сигналов по лучам на интервале усреднения, факторов фокусировки лучей и значения Δz. В нашем случае на интервале 4.5 - 5.5 с (времени усреднения), где диапазон углов прихода не превышает $\pm 1°$, относительный сдвиг сигналов, приходящих на гидрофоны, разнесенные по вертикали даже на $\Delta z = 21$ м, составляет всего 0.12 мс, что значительно меньше интервала автокорреляции зондирующей посылки. Относительно небольшие сдвиги времени прихода лучей на приемники и объясняют появление области повышенной корреляции. Для меньших значений разнесения приемников этот вывод тем более справедлив.

Если анализировать начальные участки реверберационных сигналов, где углы прихода лучей более крутые и их диапазон шире (до 10°), то легко убедиться, что в этом случае разнесение гидрофонов приводит к существенному изменению временного спектра принимаемых сигналов в результате чего значение R снижается до фонового уровня. Совпадение оценочных расчетов с экспериментальными данными можно считать вполне удовлетворительным, если не забывать о ряде упрощающих предположений.

При изучении в направлении открытого моря картина меняется. Легко заметить, что в рамках нашей модели на дне могут рассеиваться лишь лучи, вышедшие из источника под углом, большим угла выхода луча, касательного ко дну, определяемого выражением

$$\operatorname{tg}\alpha_k = \frac{\operatorname{tg}\varphi + \sqrt{2ah}}{1 + a(H-h)}.$$

В рассматриваемом случае при $h = 45$ м угол α_k равен 2.38°. Заглубление точки приема на 10 м приводит к уменьшению α_k на 0.22°, т.е. к сдвигу нижней границы углового спектра принимаемого сигнала и, следовательно, к соответствующему смещению рассеивающего участка дна. Кроме того происходит существенная трансформация углового и временного спектра реверберационного сигнала. Например, разность времен прихода элементарных рассеянных сигналов по лучам, отличающимся на 0.5° при $z = 10$ м достигает

для самых пологих лучей 50 - 100 мс. Это значение много больше интервала автокорреляции зондирующей посылки. Как следствие вышеизложенного значение R должно быть близко к фоновому уровню.

Проанализируем теперь (чисто расчетным путем) влияние глубины места и наклона дна. Расчеты времени прихода лучей на приемник показали, что с ростом глубины происходит увеличение диапазона углов прихода лучей, время прихода сигналов по которым лежит в интервале 1 с (время усреднения, равное длительности посылки). Например, при излучении в направлении берега лучи, приходящие на приемник под углами в пределах $\pm 1°$ занимают временной интервал 2.5 с при H, равном 45 м, и только 0.3 с при H, равном 160 м. Естественно, что в последнем случае значение корреляции существенно снижается и области повышенной корреляции при сравнительно больших Δz будут отсутствовать. В случае излучения в направлении открытого моря наблюдается заметное увеличение угла выхода касательного ко дну луча и, следовательно, уменьшение доли излученной в пределах главного лепестка диаграммы направленности энергии, рассеиваемой на дне.

Мы предположили, что морская поверхность – зеркальная плоскость с коэффициентом отражения -1. В действительности полное отсутствие ветрового волнения и зыби наблюдается редко, поэтому на частотах выше 100 Гц заметный вклад в реверберацию будет давать рассеяние на поверхности, а при более высоких частотах и объемное рассеяние.

Изменение наклона дна заметно сказывается на характеристиках реверберационного отклика. Например, увеличение угла наклона в 5 раз приводит к изменению длительности сигнала примерно во столько же раз. Наклон дна 15° сокращает длительность сигнала до величины менее 1 с. Кроме того временной интервал прихода сигналов по лучам с вертикальными углами +1° (т.е. область повышенной корреляции сигнала) существенно сужается и сдвигается в сторону меньших времен.

Заметим, что анализ случаев излучения под другими азимутальными углами при наклонном дне довольно сложен и нами не рассматривался.

Подведем итоги. Наклон дна и глубина места оказывают значительное влияние на характеристики донной реверберации. Даже небольшой наклон дна при определенных гидрологических условиях, глубине места и азимуте излучения может привести к значительному увеличению радиуса вертикальной корреляции некоторых участков реверберационного сигнала. В описанном выше эксперименте вертикальный радиус корреляции для конечных участков сигнала достигает примерно 40λ при излучении в сторону берега. При излучении в сторону открытого моря он менее 10λ для тех же участков реверберационного отклика.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект № 94-02-04149 а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Urik R.J., Lund G.R.* Vertical coherence of shallow-water reverberation // JASA. 1970. V. 47. P. 342 - 349.
2. *Alexandrou D.* Signal recovery in a reverberation-imited environment // IEEE J. of Oceanic Engineering. 1987. V. OE-12, № 4. P. 553 - 559.
3. *Weston D.E., Hocking P.D.* Interference patterns in swallow-water reverberation // JASA. 1990. V. 87 (2). P. 639 - 651.

Spatial Correlation of Reverberation Signals in Shell Zones of the Ocean

R. Yu. Popov and E. V. Simakina

Spatial vertical correlation of reverberation signals in a coastal wedge is investigated. The dependence of correlation coefficients on sound propagation direction, bottom slope, sea depth, and hydrological conditions is analyzed. Significant anisotropy of correlation characteristics of reverberation in the horizontal plane was observed.