АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2000, том 46, № 5, с. 658–661

УДК 551.463.2

ОЦЕНКИ ВРЕМЕН И УГЛОВ ПРИХОДА ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРЕДРЕВЕРБЕРАЦИИ В ОКЕАНЕ

© 2000 г. Е. А. Копыл, Ю. П. Лысанов

Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4
E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 20.12.99 г.

Рассмотрена акустическая предреверберация, обусловленная рассеянием звука на взволнованной поверхности океана. Для случая низкочастотного рассеяния, описываемого первым приближением метода малых возмущений, рассчитаны времена и углы прихода предреверберационных сигналов в приповерхностном звуковом канале в зависимости от скорости ветра, частоты звука и дистанции.

Океаническая предреверберация – явление, обнаруженное экспериментально еще в 60-х годах [1] и состоящее в более раннем, чем следует из "классических" расчетов, приходе сигналов в удаленную точку приема. Это явление принадлежит к тому же классу, что и реверберация. Предреверберация – частный случай бистатической реверберации, когда направление прихода реверберационных сигналов совпадает с генеральным направлением распространения звука. Причиной предреверберации, как и реверберации, служит рассеяние звука на неоднородностях поверхности, дна и водной толщи океана. Однако, в отличие от обычной реверберации, предреверберация возникает тогда, когда рассеянные сигналы распространяются по траекториям, отвечающим меньшему времени, чем время распространения в среде без рассеяния. Если реверберация интенсивно исследовалась в течение нескольких десятилетий (см. [2]) и продолжает изучаться в настоящее время [3], то предреверберация изучена значительно слабее.

Одна из моделей формирования предреверберационных сигналов вследствие рассеяния звука на взволнованной поверхности океана рассмотрена в работе [4]. В этой работе не конкретизируется механизм рассеяния, но рассматриваются направления рассеяния, окружающие зеркальное (относительно средней плоскости поверхности) и близкие к нему, что соответствует представлениям высокочастотного приближения касательной плоскости. Рассеяние низкочастотного звука при малых параметрах Рэлея P предоставляет больше возможностей для подобной трактовки предреверберации, так как в этом случае может найтись большее число путей распространения звука, не описываемых в рамках ни лучевого, ни волнового приближения для волновода с ровной верхней границей. Ниже приводятся простые оценки времен и углов прихода предреверберации, обусловленной рассеянием низкочастотного (в меру малости P) звука на поверхности океана.

Индикатриса рассеяния, описывающая угловое распределение интенсивности переизлученного поля при $P^2 \ll 1$, обладает одним или несколькими максимумами. Оценки положения максимумов индикатрисы и их формы известны. Например, в работе [5] для развитого изотропного волнения, описываемого спектром Пирсона–Московитца, в первом приближении метода малых возмущений получены аналитические выражения для углов, характеризующих положение пиков индикатрисы, и их ширины практически для любой ситуации, встречающейся при $P^2 \ll 1$. Эти выражения просты по структуре, но довольно громоздки, поэтому здесь мы не приводим их полную сводку. Однако одно из приближений, справедливое при выполнении условий

$$|\chi - \chi_0| \ll 1, \quad |\chi - \chi_0| \operatorname{ctg}\chi_0/2 \ll 1,$$

все же приведем:

$$|\cos\chi_m - \cos\chi| = K_m/\sqrt{2k}. \tag{1}$$

В этих формулах χ_0 – угол скольжения падающей на поверхность акустической волны, χ_m – углы скольжения, соответствующие максимумам индикатрисы (благодаря наличию модуля в левой части (1) таких максимумов, вообще говоря, два), k – волновое число звука, а $K_m \approx 0.61g/v^2$ – волновое число поверхностной волны, отвечающей максимуму спектра Пирсона–Московитца (g = 9.81 м/с^2, v – скорость ветра, задаваемая в м/с, размерность K_m – 1/м). Такое приближение описывает относительно высокочастотное рассеяние (разумеется, условие малости параметра Рэлея должно выполняться), когда максимумы расположены не слишком далеко от зеркального направления. В этом случае уравнение (1) просто определяет дифракци-

онные спектры Брэгга ±1-го порядка при рассеянии на поверхностной гармонике, соответствующей максимуму спектра волнения.

Отметим одну общую особенность индикатрис рассеяния на изотропном волнении: при фиксированном направлении падения их максимумы (максимум) лежат в плоскости падения, а в вертикальном сечении находятся тем дальше от зеркального направления, чем ниже частота звука или меньше среднеквадратичное возвышение поверхности. При предельно низких частотах и слабом волнении единственный максимум индикатрисы может соответствовать даже направлениям рассеяния, близким к обратному [5].

Ограничимся случаем приповерхностного канала с постоянным вертикальным градиентом скорости звука c, так что $c(z) = c_0(1 + az)$, где c_0 – скорость звука на поверхности, z – глубина (в приводимом ниже численном примере относительный градиент $a = 1.1 \times 10^{-5}$ 1/м имеет значение, определяемое изменением гидростатического давления по глубине). Для простоты будем считать, что излучатель (S – см. рис. 1) и приемник (R) звука расположены на поверхности океана, на дистанции $r = r_1 + r_2$ друг от друга. Рассмотрим ситуацию, когда на пути от излучателя до приемника звук однократно рассеялся на поверхности (в точке 0 на рис. 1), причем угол скольжения χ_0 падающего на поверхность луча не равен углу скольжения рассеянного луча: последний соответствует положению максимума индикатрисы χ_m, даваемому выражением (1). Наряду с двумя циклами лучей, показанными на рис. 1 и отвечающими условию $\chi_0 < \chi_m$, возможны два других цикла с $\chi_0 > \chi_m$, отличающихся от показанных только порядком следования друг за другом (чтобы получить их, на рис. 1 достаточно поменять местами излучатель и приемник).

Обозначим через $\beta = r_1/r_2$ отношение, в котором точка рассеяния (O) делит дистанцию r. Кроме того, будем считать, что углы скольжения всех лучей малы. Используя простые геометрические соображения и ограничиваясь членами порядка не выше χ_0^2 и χ_m^2, с учетом формулы (1) можно записать три уравнения, связывающие параметры рассматриваемой задачи:

$$\begin{aligned} \chi_0 + \chi_m &= ar/2, \\ \chi_0 &= \beta\chi_m, \\ \left|\chi_0^2 - \chi_m^2\right| &= \sqrt{2}K_m/k. \end{aligned} \tag{2}$$

Эти три уравнения служат для нахождения трех неизвестных (χ_0, χ_m и β) по известным величинам дистанции r, градиента a, волнового числа K_m максимума спектра волнения (т.е. скорости ветра) и волнового числа k звука (т.е. его частоты).

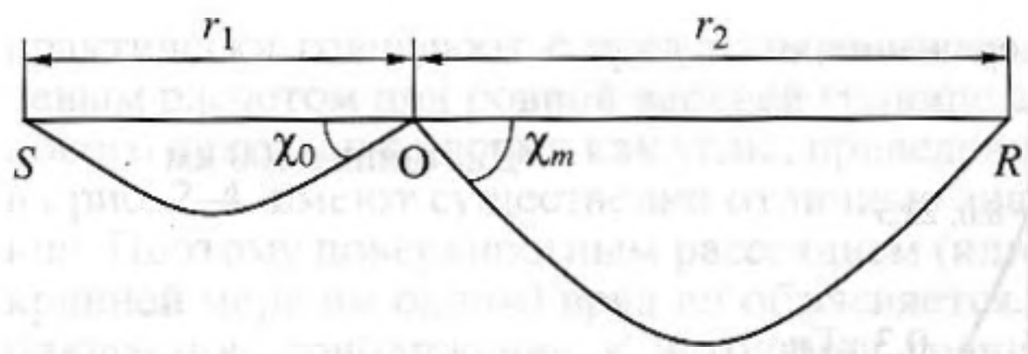

Рис. 1. Геометрия лучей, соединяющих излучатель S и приемник R.

Система (2) легко разрешается, давая в результате

$$\begin{aligned} \chi_m &= \frac{ar}{4} \pm \frac{\sqrt{2}K_m}{ark}, \\ \chi_0 &= \frac{ar}{4} \mp \frac{\sqrt{2}K_m}{ark} \end{aligned} \tag{3}$$

для углов скольжения падающего и рассеянного лучей, где верхний знак относится к случаю $\chi_m > \chi_0$, а нижний – к случаю $\chi_m < \chi_0$. Обратим внимание на то обстоятельство, что величина, соответствующая знаку "–" в правой части формул (3), должна быть положительной. При заданных a, K_m и k это накладывает ограничение на минимальную дистанцию, при которой реализуется ситуация, показанная на рис. 1. При меньших дистанциях, отвечающих условию

$$\frac{ar}{4} - \frac{\sqrt{2}K_m}{ark} < 0,$$

не найдется таких значений χ_0 и χ_m, которые бы описывались формулой (1). Условие положительности этой разности является тем менее жестким, чем выше частота звука (больше k) и чем больше скорость ветра (меньше K_m). Подстановка решения (3) во второе из уравнений (2) дает оценку отношения $\beta = r_1/r_2$.

Как отмечалось в работе [4], геометрия лучей, показанная на рис. 1, соответствует более раннему приходу сигнала в точку приема по сравнению со случаем зеркального отражения звука от поверхности (т.е. со случаем $r_1 = r_2$). При малых углах скольжения это опережение может быть определено по приближенной формуле

$$\Delta t \approx T_0\left[1 - 4\frac{r_1}{r} + 4\left(\frac{r_1}{r}\right)^2\right], \tag{4}$$

где

$$T_0 = a^2r^3/(32c_0).$$

Учитывая, что $r_1/r = \beta/(1 + \beta)$, по формуле (4) легко оценить время предреверберации в рассматриваемом случае.

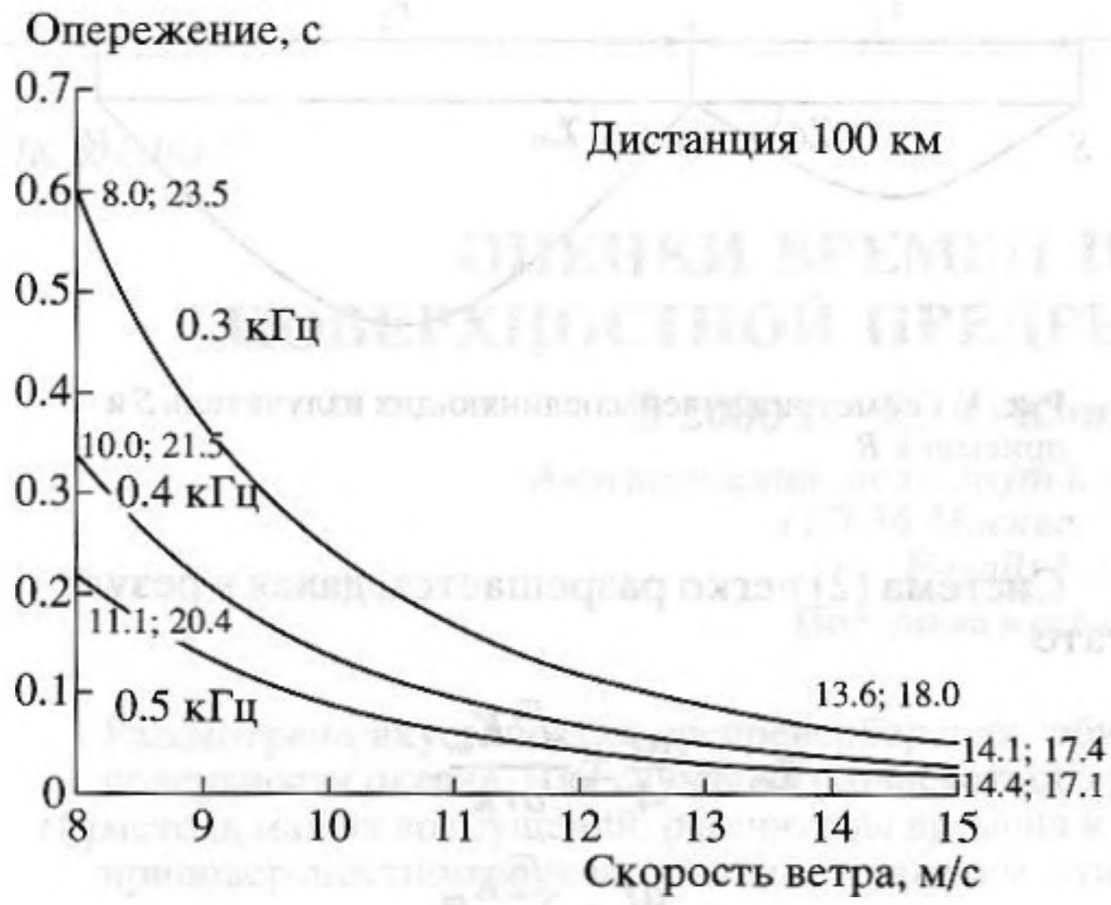

Рис. 2. Зависимости времени предреверберации от скорости ветра.

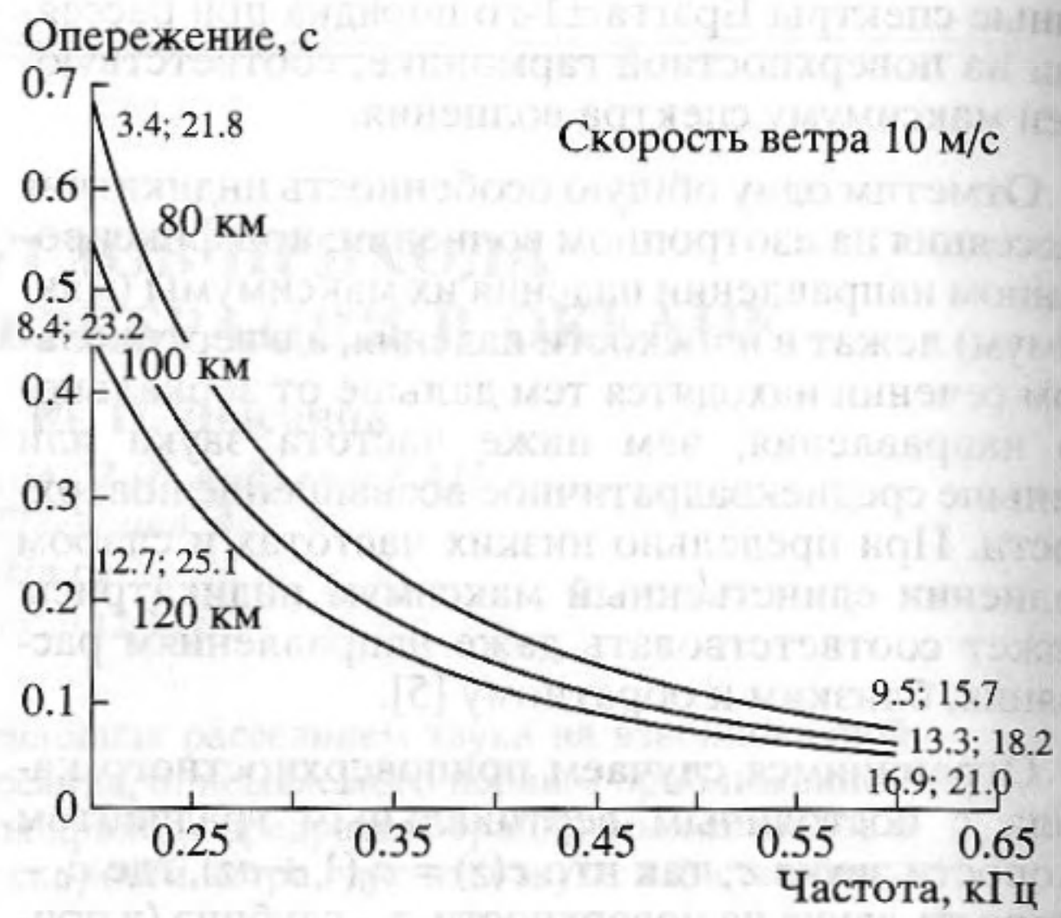

Рис. 3. Зависимости времени предреверберации от частоты звука.

На рис. 2 приведены рассчитанные согласно описанной выше модели зависимости времени опережения Δt предреверберационного сигнала от скорости ветра при фиксированной дистанции (r = 100 км) и трех частотах звука (0.3, 0.4 и 0.5 кГц – указаны на рисунке). Мелкими цифрами, приведенными вблизи левого и правого концов каждой кривой, обозначены соответствующие углы χ_0 и χ_m (или χ_m и χ_0, в градусах), рассчитанные для минимальной (8 м/с, левая пара чисел) и максимальной (15 м/с, правая пара чисел) из рассмотренных скоростей ветра. Отметим, что диапазон изменения параметров, выбранный для численного расчета, результаты которого показаны на этом и последующих рисунках, диктуется выполнением условия положительности правой части равенств (3), а также критериями применимости приближения, принятого при оценке положения максимумов индикатрисы поверхностного рассеяния [5]. Однако дистанции, указанные на этом и последующих рисунках, могут не реализоваться в силу ограниченной глубины волновода.

Зависимости времени предреверберации от частоты звука, рассчитанные для скорости ветра 10 м/с и трех дистанций (80, 100 и 120 км), показаны на рис. 3 (пары чисел у кривых имеют тот же смысл, что на рис. 2). Наконец, рис. 4 иллюстрирует зависимости времени предреверберации (и углов χ_0 и χ_m) от дистанции при скорости ветра 10 м/с и частотах 0.3–0.5 кГц. Отметим, что расчетные значения опережения прихода предреверберационным сигналом согласуются с экспериментальными данными (в частности, упоминаемыми в работе [4]).

Ход кривых, показанных на рис. 2 и 3, объясняется положением боковых максимумов индикатрисы поверхностного рассеяния в зависимости от сочетания параметров задачи (напомним, что эти максимумы находятся тем дальше от направления зеркального отражения, чем ниже частота звука и чем слабее волнение). В соответствии с этим при уменьшении частоты и (или) скорости ветра отличие углов χ_0 и χ_m друг от друга возрастает, длины циклов, показанных на рис. 1, различаются заметнее и время предреверберации увеличивается.

Аналогична причина неожиданного на первый взгляд уменьшения времени предреверберации с ростом дистанции (рис. 4): на бо́льших дистанциях слабее отличие длин показанных на рис. 1 циклов

Рис. 4. Зависимости времени предреверберации от дистанции.

лучей и сигнал находится меньшее время в слоях с более высокой скоростью звука. Однако настоящее исследование относится только к случаю, когда расположенные на поверхности излучатель и приемник соединяются лучом, совершившим два цикла и претерпевшим однократное рассеяние на поверхности. Времена же предреверберации при другой геометрии путей распространения будут отличаться от приведенных. В частности, ясно, что в реальной ситуации зависимость времени опережения от дистанции не может быть монотонной из-за изменения характера семейства лучей, по которым сигнал достигает точки приема. Тем не менее, если использовать общепринятое приближение "многократное отражение – однократное рассеяние", приведенные оценки, по-видимому, можно применять, поскольку только один цикл луча будет отличаться от того, который отвечает зеркальному отражению от поверхности.

В заключение отметим, что явление предреверберации, понимаемое в широком смысле, включает не только более ранний (по сравнению с "классическим" расчетом) приход сигнала, но и пространственный сдвиг зон конвергенции в сторону к излучателю звука [6]. Если считать, что и это явление имеет ту же природу, что рассмотренное выше опережение, обусловленное поверхностным рассеянием, то легко сделать оценки упомянутого пространственного сдвига: приведенным значениям Δt отвечают пространственные масштабы в сотни метров. Однако, хотя такие масштабы согласуются с экспериментальными данными [6], измеренные в эксперименте углы прихода сигналов практически совпадают с предсказываемыми лучевым расчетом при ровной верхней границе звукового канала, в то время как углы, приведенные на рис. 2–4, имеют существенно отличные значения. Поэтому поверхностным рассеянием (или по крайней мере им одним) вряд ли объясняется наблюдаемое приближение к источнику границы освещенной зоны.

Авторы благодарны О.П. Галкину за полезное обсуждение представленного здесь материала. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 98-05-64302.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Студеничник Н.В.* Явление предреверберации в подводном звуковом канале // IX Всесоюзн. акуст. конф. Доклады. Секция Д. 1977. С. 45–48.
2. *Сухаревский Ю.М.* Теория реверберации моря, обусловленной рассеянием звука // Докл. АН СССР. 1947. Т. 55. № 9. С. 825–828.
3. *Dorfman Y.Y., Dyer I.* Monostatic and Bistatic Reverberation Statistics West of the Mid-Atlantic Ridge // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 100. № 4. P. 1755–1764.
4. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П., Студеничник Н.В.* К теории предреверберации звука в океане // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239. № 1. С. 211–213.
5. *Белоусов А.В., Копыл Е.А., Лысанов Ю.П.* Об индикатрисе рассеяния низкочастотного звука поверхностью океана // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 2. С. 223–228.
6. *Галкин О.П., Панкова С.Д.* Сопоставление экспериментальной и расчетной структуры звукового поля в океаническом волноводе // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 1. С. 59–68.

Evaluation of Times and Arrival Angles of Surface Prereverberation in the Ocean

E. A. Kopyl and Yu. P. Lysanov

Acoustic prereverberation caused by sound scattering from the rough sea surface is considered. For the case of low-frequency scattering described by the first approximation of the small perturbation method, the arrival times and angles of prereverberation signals in the subsurface sound channel are calculated as functions of the wind speed, sound frequency, and distance.