

Ю. М. СУХАРЕВСКИЙ

## О ХАРАКТЕРЕ ФЛУКТУАЦИЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ МОРЯ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 22 VIII 1947)

1. В наших предыдущих работах <sup>(1)</sup> рассматривалась реверберация моря при посылке в воду ультразвуковых импульсов или коротких волновых пакетов, обусловленная эффектом рассеяния звука на неровностях границ (дна и поверхности) моря и на неоднородностях водной среды \*. Мы получили выражение для силы звука реверберации (силы реверберации) в точке излучения — приема в функции времени  $t$ , протекающего с момента окончания посылки, при различных случаях рассеяния (безграничная среда, плоский слой, плоская граница). Было показано, что в любой момент времени  $t$  в точку излучения — приема приходит множество волн, в общем случае рассеянных в пределах шарового слоя радиусом  $ct/2$  ( $c$  — скорость звука) и толщиной  $ct/2$  ( $\tau$  — длительность посылки), который мы назвали рассеивающим элементом пространства. Для нахождения полной силы звука мы суммировали плотности энергии отдельных рассеянных волн, причем предполагали рассеивающие свойства среды (или границы) постоянными во всем пространстве (или по всей границе) и не рассматривали фазовых соотношений, т. е. пренебрегали эффектом интерференции. В результате были получены такие законы для процессов реверберации, которые могут быть представлены плавно спадающими с возрастанием  $t$  кривыми.

Опыт, однако, показывает, что реверберация моря всегда является флуктуирующим процессом (кривые реверберации имеют значительные неравномерности), причем характер флуктуаций мало зависит от морских условий. Типичная кривая реверберации, записанная быстродействующим рекордером по Нейману, приведена на рис. 1, где по оси абсцисс справа налево отложено время в секундах, а по оси ординат в логарифмическом масштабе (в децибелах по отношению к некоторому условному уровню) — сила реверберации. Таким образом, полученные в нашей теории реверберации моря зависимости нужно рассматривать как определяющие только усредненные процессы реверберации (дающие общий закон спада), но не описывающие эти процессы полностью. Вопрос о флуктуациях реверберации, однако, представляет значительный интерес. Ниже приводятся некоторые соображения о характере флуктуаций реверберации.

2. Прежде всего возникает вопрос о том, обусловлены ли наблюдаемые флуктуации реверберации макроскопической неоднородностью среды, или они представляют собой чисто интерференционный эффект,

\* В дальнейшем под неоднородностью среды мы будем подразумевать обобщенное понятие, включающее, как частный случай, неровность границ.

связанный с микроскопической неоднородностью среды\*. Макроскопичность и микроскопичность здесь нужно понимать в сравнении с пространственной протяженностью импульса, определяющей толщину рассеивающего элемента пространства (ширина звукового пучка предполагается имеющей тот же порядок величины, т. е. порядок  $c\tau/2$ ).

На вопрос об основной причине флуктуаций практически однозначный ответ дает рис. 2 в сопоставлении с рис. 1. На рис. 2 приведена кривая реверберации, полученная в условиях опыта, давшего кривую рис. 1, с той, однако, разницей, что в опыте, иллюстрированном рис. 2, была применена частотная модуляция сигнала\*\*. В течение посылки частота сигнала плавно изменялась (повышалась на 15%). В результате кривая реверберации получилась значительно более гладкой. Во всяком случае, частные интенсивные флуктуации, явно выраженные на кривой рис. 1, здесь практически отсутствуют. Это свидетельствует об интерференционном характере основных флуктуаций реверберации.

В самом деле, макроскопическая неоднородность среды, которую „прочитывает“ бегущий в пространстве импульс, должна вызывать

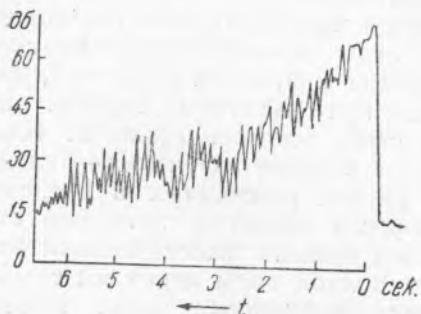


Рис. 1. Запись реверберации моря при отсутствии частотной модуляции сигнала. Длительность посылки  $\tau=0,2$  сек. Форма посылки — прямоугольная

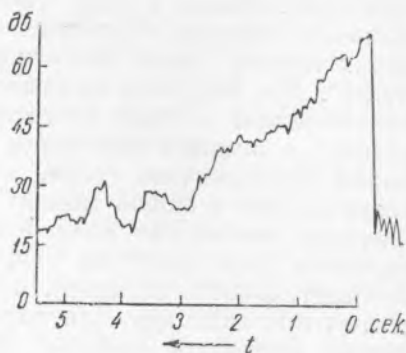


Рис. 2. Запись реверберации моря в тех же условиях при частотно модулированном сигнале

флуктуации кривой реверберации, не зависящие существенно, при постоянной длительности посылки, от характера (частотного спектра) сигнала. Повидимому, остаточные небольшие неравномерности кривой рис. 2 связаны в значительной мере именно с макроскопической неоднородностью среды.

Рассмотрим теперь влияние частотной модуляции сигнала на флуктуации интерференционного характера. При отсутствии частотной модуляции сигнала в некоторый момент времени в точке излучения — приема мы наблюдаем суперпозицию рассеянных волн, фазовые соотношения между которыми определяются микроскопической структурой неоднородности среды. Полагая отдельные неоднородности расположенными в пространстве хаотически, мы приходим к рассмотренному Рейли<sup>(2)</sup> случаю сложения многих колебаний одинаковой частоты с произвольными фазами. Вероятность той или иной суммарной амплитуды в этом случае определяется законом  $e^{-r^2/n^2}$ , где  $r$  — амплитуда суммарного колебания,  $n$  — средняя квадра-

\* Неоднородность среды предполагается стационарной, т. е. мало изменяющейся за время порядка длительности посылки.

\*\* Записи реверберации моря, приведенные на рис. 1 и 2, получены Г. Д. Малюжиным, И. П. Жуковым и Н. С. Антоновым.

тичная амплитуда,  $e$  — основание неперовых логарифмов. Таким образом, вероятность существования величин квадрата амплитуды суммарного колебания, превышающих квадрат средней более чем в 5 раз (отклонение +7 децибел), составляет менее 1%, а превышающих более, чем в 2,5 раза (отклонение +4 децибела) — около 10%. Для квадрата амплитуды, составляющего меньше 0,1 от квадрата средней (отклонение -10 децибел), мы имеем вероятность около 10%, а меньше 0,01 (отклонение -100 децибел) — вероятность 1%. На основании этого мы можем считать, что флуктуации в пределах диапазона амплитуд порядка 10—15 децибел должны встречаться еще довольно часто.

Как видно из рис. 1, наблюдаемые флуктуации реверберации по порядку величин их амплитуды не находятся в противоречии с вышеприведенными данными. Проведение более подробного сравнительного анализа в этом направлении с использованием записи рис. 1 было бы мало целесообразным, так как эта запись производилась прибором с ограниченной максимальной скоростью регистрации — порядка 450 децибел в секунду, вследствие чего она неточно отражает действительное явление.

3. Интересным представляется вопрос о частотном спектре флуктуаций реверберации. Мы ограничимся в рамках настоящей заметки некоторыми соображениями только о вероятной скорости изменения флуктуирующей амплитуды реверберации. Легко показать, что при интерференционном характере флуктуаций амплитуда не может сильно изменяться за время, существенно меньшее длительности посылки. Действительно, значительное изменение суммарной амплитуды рассеянных волн в точке излучения — приема становится вероятным только при переходе бегущего импульса (полностью или, во всяком случае, в значительной части) в новый участок пространства, для чего требуется время порядка длительности посылки. С другой стороны, по той же причине мало вероятно сохранение неизменности амплитуды в течение времени, по порядку величины равного или большего длительности посылки\*.

Таким образом, флуктуирующий процесс реверберации должен состоять из элементов с масштабом по времени порядка длительности посылки, но не повторяющих ее по форме. Как видно из записи рис. 1, производившейся при посылке прямоугольной формы с длительностью  $\tau=0,2$  секунды, экспериментальные данные не противоречат этим выводам.

4. Рассмотрим теперь вопрос о минимально необходимой для сглаживания флуктуаций реверберации глубине модуляции частоты сигнала. Ее можно определить, задаваясь тем условием, что в промежуток времени, равный длительности посылки, должно укладываться по крайней мере несколько колебаний „частоты биений“ между крайними частотами в посылке. Это условие записывается так:  $\frac{\Delta f}{f} \gg \frac{1}{\tau f}$ ,

где  $\Delta f$  — необходимая абсолютная величина расстройки частоты,  $f$  — среднее значение частоты сигнала, а вся левая часть представляет необходимую величину относительной расстройки частоты. При записи реверберации, показанной на рис. 2 (средняя частота сигнала была 20 кГц), формулированное выше условие, таким образом, было выполнено. Заметим, что в архитектурной акустике, где частотная модуляция применяется для сглаживания флуктуаций реверберации помещений, при измерении последней (так называемый метод воющего тона) выбор необходимой глубины модуляции частоты может произ-

\* Здесь, как и ранее, правильнее было бы говорить о величине половины длительности посылки, определяющей толщину рассеивающего элемента пространства.

водиться на основании того же условия, в котором тогда под  $\tau$  нужно подразумевать среднее время пробега волн между двумя последовательными отражениями, стоящее в хорошо известной связи с размерами помещения.

Приведенные в настоящей работе соображения о характере флуктуаций реверберации моря, так же как и экспериментальные данные, подобные показанным на рис. 1 и 2, дают общее представление о существе вопроса. Подробное количественное его изучение требует проведения более детальных теоретических и экспериментальных исследований.

Физический институт  
им. П. Н. Лебедева  
Академии Наук СССР

Поступило  
22 VIII 1947

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Ю. М. Сухаревский, ДАН, 55, № 9 (1947); 58, № 1 (1947); 58, № 2 (1947).  
<sup>2</sup> Рейли, Волновая теория света, русск. пер., 1939, стр. 10.