АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 37 1991 Вып. 4

УДК 534.44
© 1991 г.

А.Н. Богданов, Н.Е. Мальцев, Е.А. Ривелис

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУРЬЕ-АНАЛИЗА СВЕРХДЛИННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РЕВЕРБЕРАЦИИ ОТ ГРАНИЦ МОРСКОГО БАССЕЙНА

В работе рассматривается возможность использования фурье-анализа длинных сигналов при исследовании реверберации звука от границ моря. Выбрана простейшая модель распространения звука: море представляет собой слой воды на поверхности Земли, акустические волны отражаются от берегов в горизонтальной плоскости согласно принципу Ферма. Представлены результаты корреляционного и спектрального анализов сигналов длительностью до 25 мин с целью изучения отражения звука, генерируемого взрывным источником, от границ моря.

В конце 70-х годов ряд работ американских исследователей был посвящен изучению распространения в океане и реверберации звука от границ бассейна при использовании мощных взрывных источников (от 10 до 660 т) [1, 2]. Естественно, что при этом сигнал, рассеянный границами океанического бассейна, велик на фоне шумов и может быть выделен явно. Другая ситуация складывается, когда источник звука не столь мощный и сигнал, обусловленный реверберацией, не всегда можно явно обнаружить. Возникает вопрос об использовании корреляционных методов при исследовании этого рассеяния.

В простейшей модели, которая принята в этой работе, море представляет собой однородный слой воды на поверхности Земли (с постоянной глубиной и скоростью звука). Берега бассейна рассматриваются как вертикальные границы, и звук отражается от берегов в такой модели по обычным геометрическим законам на основании принципа Ферма. Очевиден и не требует доказательства тот факт, что в такой модели звук в море в горизонтальной плоскости распространяется прямолинейно, а от берега отражается локально зеркально. Сигнал, обусловленный реверберацией, в рамках модели будем условно называть "отраженным" от берегов, хотя реальный механизм этого процесса сложен и не изучен досконально. Примеры приведены на рис. 1. В этом случае автокорреляционная функция сигнала, принимаемого за длительное время (достаточное для прохождения звука до берегов и далее к приемнику), давала бы представление о возможности регистрации этого отражения.

Таким образом, основная цель работы – применение фурье-анализа для получения корреляционных функций для большого времени (десятки минут), превышающего возможности стандартных процедур. Как правило, сложности цифровой обработки длинных сигналов возникают в силу невозможности процессирования всего массива как целого. Обычно спектральные и корреляционные характеристики получают для выборочных частей записи сигнала, а это сопряжено с влиянием разрыва сигнала на результаты обработки. Используемая в нашей работе методика подразумевает процессирование целого сигнала, когда программно длительность записи ограничена лишь объемом накопителя.

Записи сигналов, используемые при обработке, были получены в ходе эксперимента, который проводился в морских условиях. Минимум профиля скорости звука приходился на глубину 80 м. Приемники были расположены на вертикальной антенне на

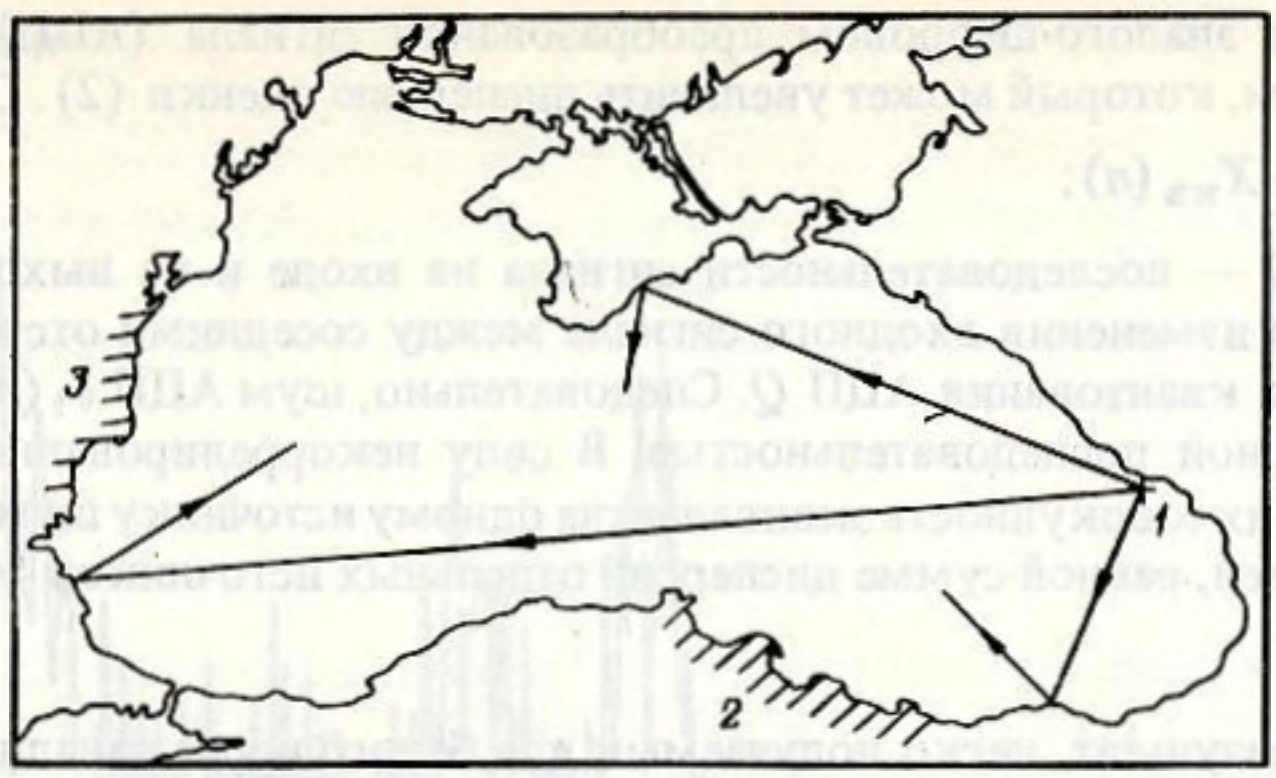

Рис. 1. К описанию модели распространения звука в море: *1* – источник излучения, *2*, *3* – рассматриваемые участки берега. Стрелками обозначено направление распространения звука

глубине 5, 85, 105 м в месте, где начинался береговой шельф. Подрывы ТНТ весом 0,45 кг осуществлялись на расстоянии 10 миль от приемников в направлении от берега. Глубина подрывов составляла 40 м. Сигналы, соответствовавшие давлению звуковой волны, принимавшиеся раздельно по двум каналам из трех, оцифровывались с частотой 512 Гц, поступали в ЭВМ и записывались на магнитную ленту. Коэффициент усиления в приемном тракте был выбран так, чтобы не было переполнения при оцифровке. Запись осуществлялась в течение 45–50 мин с момента подрыва заряда. Последующая обработка требовала считывание сигнала с ленты в ЭВМ.

Таким образом, мы записывали последовательные значения звукового давления на приемниках $X(n) = X(n\tau)$, где $n = 1, 2, \ldots N$, $\tau = 1/512$ с, $N \sim 10^6$. Тогда выборочной оценкой автокорреляционной функции сигнала будет являться свертка [3]

$$c_{xx}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-k} (X(n) - \bar{X})(X(n+k) - \bar{X}), \; k = 0, 1, \ldots, N-1, \tag{1}$$

где $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} X(n)$ – выборочное среднее значение ряда $X(n)$.

Однако такой расчет не является оптимальным в том смысле, что сигнал непосредственно от источника – короткий по сравнению с временем записи, а шум, преобладающий в течение большей части этого времени, увеличивает дисперсию оценки (1). Поэтому вместо формулы (1) в расчетах использовалась свертка сигнала с короткой записью взрыва (8 или 32 с): $X(n)$ $n = 1, 2, \ldots M$, $M = 2^{12}$ или $M = 2^{14}$ (назовем его эталонным сигналом)

$$\psi(k) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M} (X(n) - \bar{X}_1)(X(n+k) - \bar{X}), \; k = 0, 1, \ldots, N-M, \tag{2}$$

причем $\bar{X}_1 = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M} X(n)$, т.е., обе последовательности в формуле (2) приводились к нулевому среднему значению.

Имея хорошо разработанную методику быстрого преобразования Фурье (БПФ), можно вычислять свертку с большой экономией машинного времени. Была составлена программа расчета корреляционных функций, сверток, спектров, оптимальных фильтров на основе БПФ длинного сигнала, размер которого ограничен емкостью накопителя.

Остановимся на некоторых аспектах точности вычислений. Помимо естественного

шума $e_0(n)$, при аналого-цифровом преобразовании сигнала (АЦП) появляется дополнительный шум, который может увеличить дисперсию оценки (2). Он равен

$$e_1(n) = X(n) - X_{\text{кв}}(n), \tag{3}$$

где $X(n)$, $X_{\text{кв}}(n)$ – последовательности сигнала на входе и на выходе АЦП соответственно. Величина изменения входного сигнала между соседними отсчетами существенно превышает шаг квантования АЦП Q. Следовательно, шум АЦП $e_1(n)$ белый и некоррелирован с входной последовательностью. В силу некоррелированности шума $e_1(n)$ и входного шума их совокупность эквивалентна одному источнику шума $e(n) = e_0(n) + e_1(n)$ с дисперсией, равной сумме дисперсий отдельных источников [4]:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + \sigma_1^2. \tag{4}$$

$\sigma_1^2 = Q^2/12$ – результат, легко получаемый для белого шума; анализ входного шума показывает, что в условиях эксперимента $\sigma_0^2 \simeq 100 \cdot Q^2$. Следовательно, величина шума практически не возрастает при АЦП и дисперсия оценки (2) определяется величиной естественного шума.

С другой стороны, при вычислении БПФ возникает ошибка округления действительных чисел в ЭВМ. На первый взгляд, эта ошибка может значительно возрасти при увеличении размера массива. Опираясь на результаты [4] и методику БПФ, можно сделать вывод о зависимости относительной ошибки расчета от размера последовательности. Так, при выполнении БПФ ряда размеров N точек отношение δ среднеквадратических значений последовательности погрешностей и результирующей последовательности пропорционально $\sqrt{\log_2 N\epsilon}$, где ϵ – максимально возможная относительная ошибка округления действительного числа в системе. Учет всех источников ошибок метода показывает, что величина

$$\delta \leqslant \epsilon\sqrt{2\log_2 N}$$

и растет очень медленно с увеличением размера массива N. Таким образом, большая длительность записи не является фактором роста ошибок. Теперь можно обратиться непосредственно к полученным результатам.

В качестве примера был выполнен расчет корреляции сигнала с эталонным сигналом длительностью 8 с в соответствии с формулой (2). На рис. 2 дан график зависимости модуля такой корреляционной функции от временного сдвига до 24 с. Каждая точка кривой получалась в результате нахождения абсолютного максимума функции (2) на малом промежутке времени. В данном случае величина этого отрезка составляла 1/16 с (сама результирующая последовательность – слишком длинная для представления на графике). Время на графике отсчитывается от момента, когда эталонный сигнал не сдвинут относительно исследуемого. Можно наблюдать существенное превышение значений корреляционной функции до времен порядка 13 с над значениями на временах от 13 до 24 с. Это объясняется приемом звука, отраженного от ближнего берега, и не противоречит геометрическому расположению границ моря. Подобный график воспроизводился от подрыва к подрыву. Эта регулярность подтверждает то, что мы регистрируем именно реверберацию звука от берега.

Остановимся на результатах обработки записи большей длительности (до 25 мин). Здесь использовалась методика, соответствующая выражению (2), причем $M = 2^{14}$, т.е. эталонный сигнал имел длительность 32 с. На рис. 3 дан график, аналогичный графику на рис. 2, т.е. зависимость модуля корреляционной функции (2) для времени до 1440 с. График имеет выраженные подъемы от 450 до 600 с и от 1300 до 1350 с. Такие неоднородности функции корреляции могут объясняться либо регистрацией отраженного от берега звука, либо изменением статистических характеристик шума. Закономерности графика на рис. 3 повторялись для разных взрывов, значит, их причиной являлось отражение звука от берегов, в то время как шум являлся стационарным. Как уже отмечалось, в нашей модели приемник должен регистрировать звук, отраженный от некоторого участка берега, если это соответствует принципу Ферма. Поэтому сигнал обнаруживается лишь для некоторых интервалов времени. Исходя

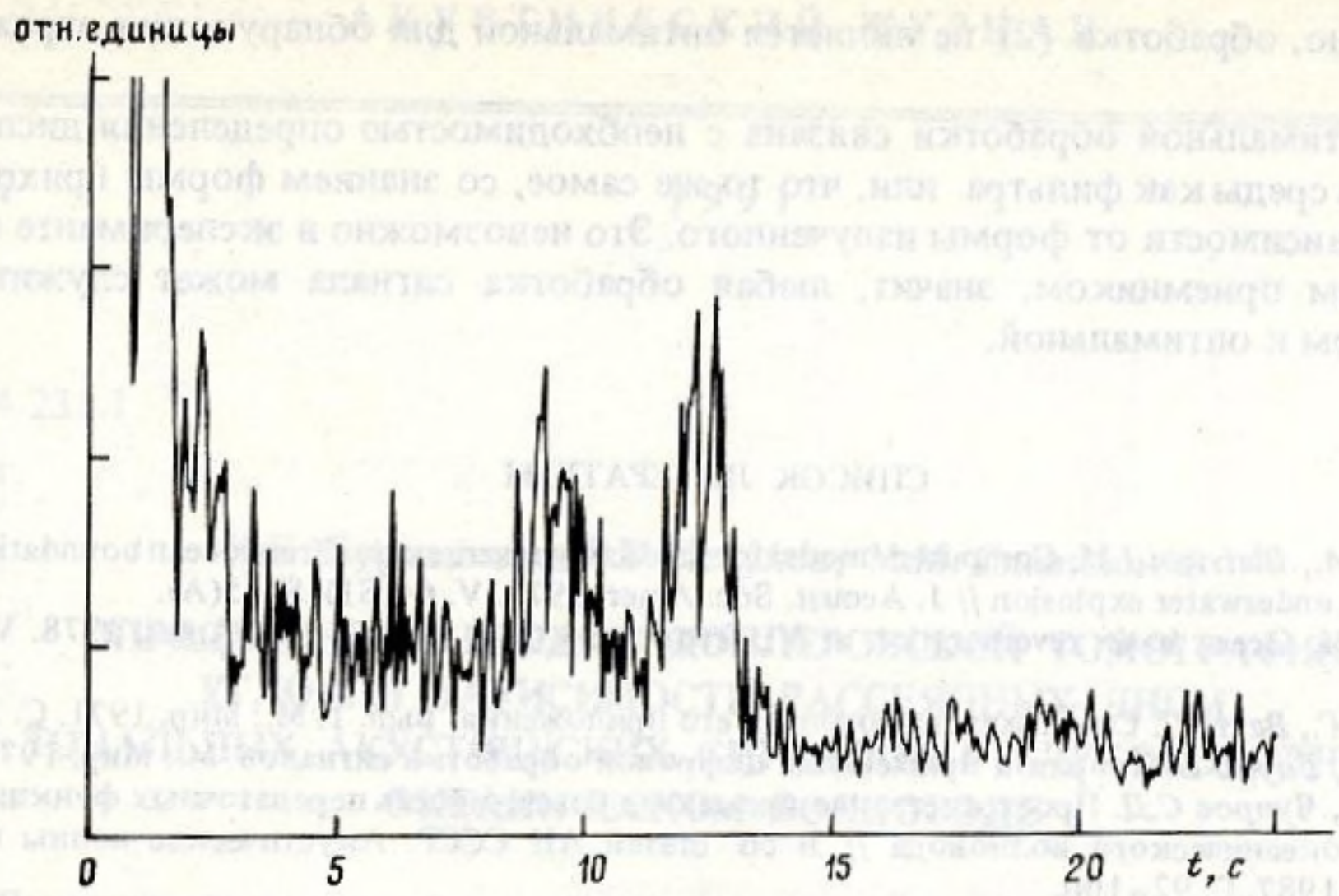

Рис. 2. Модуль функции корреляции сигнала с эталонным сигналом длительностью 8 с

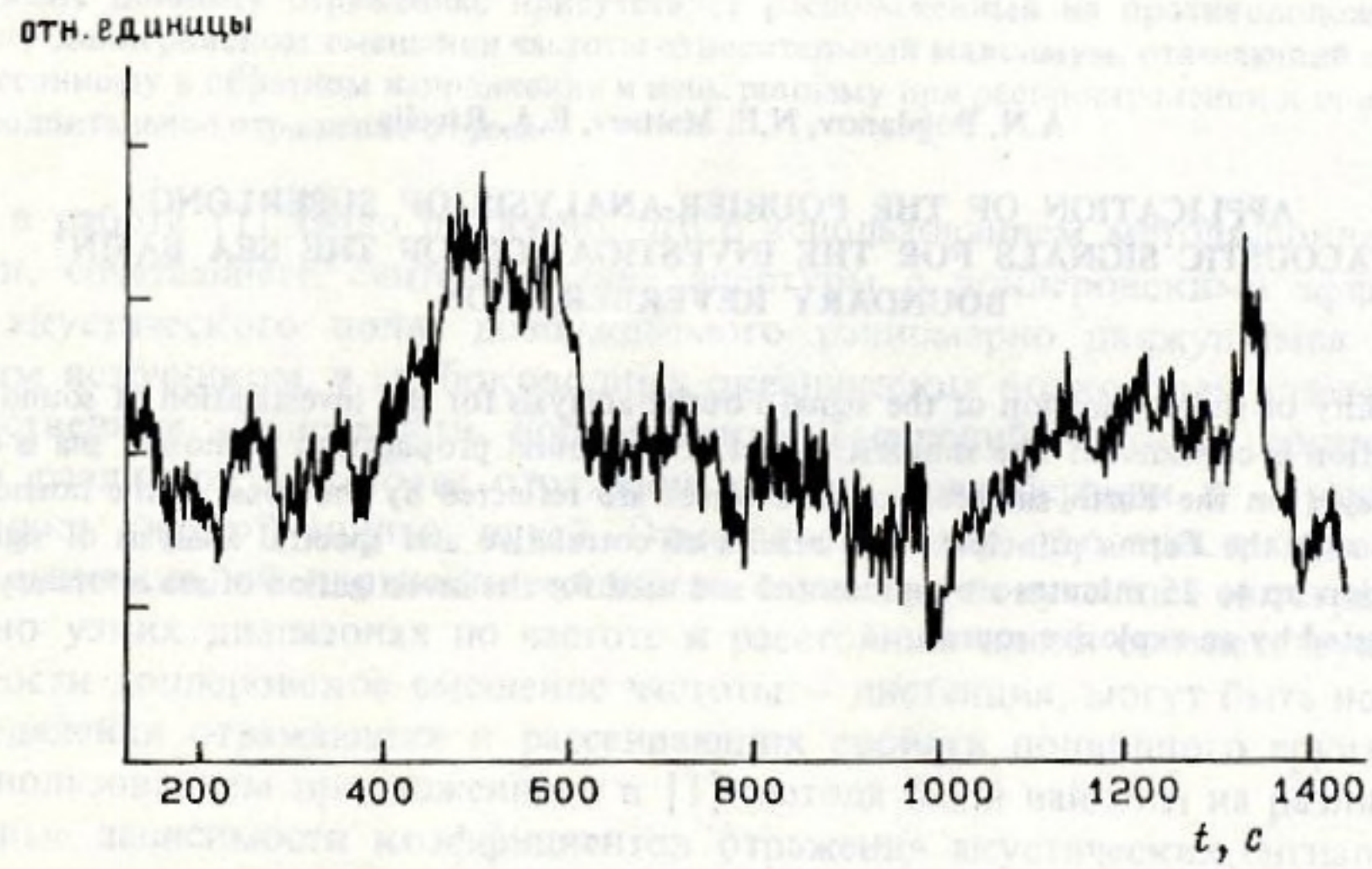

Рис. 3. Модуль функции корреляции сигнала с эталонным сигналом длительностью 32 с

из того, что источник и приемники были расположены близко друг от друга по сравнению с расстоянием до дальнего берега, подъемы графика можно объяснить отражением звука от двух дальних участков противоположного берега, где распространение звука происходило в направлении, близком к нормали с генеральной линией побережья (участки *2* и *3* на рис. 1).

Подъем корреляционной функции (2) не столь заметен, потому что распространение звука реально сложнее, чем использованная модель, и форма сигнала изменяется при распространении в море и при отражении от берега. В последнее время в некоторых работах исследовалась длина корреляции акустических полей от взрывных источников [5]. Было отмечено, что в диапазоне частот десятков герц радиус пространственной корреляции звука, излученного при взрыве, обычно не превышает несколько километров, что существенно меньше, чем расстояние распространения в нашем случае.

Следовательно, обработка (2) не является оптимальной для обнаружения отраженного сигнала.

Задача оптимальной обработки связана с необходимостью определения дисперсионных свойств среды как фильтра или, что то же самое, со знанием формы приходящего сигнала в зависимости от формы излученного. Это невозможно в эксперименте с одним стационарным приемником, значит, любая обработка сигнала может служить лишь приближением к оптимальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goertner J.A., Blatstein I.M.* Computer model for predicting reverberation from ocean boundaries following a large underwater explosion // J. Acoust. Soc. Amer. 1978. V. 64(S1). S. 45(A).
2. *Blatstein I.M.* Ocean basin reverberation at VL frequencies. // J. Acoust. Soc. Amer. 1978. V. 64(S1). S44(A).
3. *Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения. Вып. 1. М.: Мир, 1971. С. 220–221.
4. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. С. 344.
5. *Попов Р.Ю., Чупров С.Д.* Пространственно-временная изменчивость передаточных функций многомодового океанического волновода // В сб. статей АН СССР. Акустические волны в океане. М.: Наука, 1987. С. 92–100.

Акустический институт
им. Н.Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28.03.90

A.N. Bogdanov, N.E. Maltsev, E.A. Rivelis

APPLICATION OF THE FOURIER-ANALYSIS OF SUPERLONG ACOUSTIC SIGNALS FOR THE INVESTIGATION OF THE SEA BASIN BOUNDARY REVERBERATION

The possibility of the application of the signal Fourier-analysis for the investigation of sound sea boundary reverberation is considered. The simplest model of the sound propagation is chosen: sea is considered as the water layer on the Earth surface, acoustic waves are reflected by the coast in the horisontal plane in accordance with the Ferma principle. The results of correlative and spectral analysis of signals which have the duration up to 25 minutes are represented and used for the investigation of sea boundary reflection of sound generated by an explosive source.