

УДК 534.231

ПРОГНОЗ ФЛУКТУАЦИЙ ОГИБАЮЩЕЙ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В МЕЛКОМ МОРЕ

© 1996 г. С. Н. Моисеев

Воронежский государственный университет
394693 Воронеж, Университетская пл., 1

Поступила в редакцию 25.04.95 г.

В работе [1] была построена вероятностная модель флуктуаций огибающей акустического сигнала в мелком море по экспериментальным данным, полученным на стационарных акустических трассах длиной 70 км. В ходе экспериментов одновременно излучались два тональных сигнала с частотами f_1 и f_2 ($f_2/f_1 \approx 3$) в диапазоне от 100 до 300 Гц. Эксперименты проводились в разные сезоны года – летом и осенью. Измерения в обоих случаях велись в тихую погоду при скорости ветра 8–10 м/с и волнении 3 балла. Более подробно условия, в которых были получены экспериментальные данные, изложены в [1].

Для построения модели в работе [1] использовались реализации огибающей акустического сигнала длительностью 13.65 ч. Построенная модель оказалась устойчивой к разным временам года и к разным частотам акустических сигналов. Ее вид задается нелинейным авторегрессионным уравнением четвертого порядка:

$$z_t - \Phi_1 z_{t-1} - \Phi_2 z_{t-2} - \Phi_3 z_{t-3} - \Phi_4 z_{t-4} = a_t, \quad (1)$$

$$z_t = \ln x_t - m,$$

где x_t – амплитуда наблюдаемого гармонического сигнала, отсчеты x_t и x_{t-1} разнесены на 12.25 с, m – математическое ожидание процесса $\ln x_t$, Φ_i , $i = \overline{1, 4}$ – коэффициенты модели, a_t – белый гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией σ_a^2 . Оценки коэффициентов модели (1) приведены в [1].

Целью настоящей работы является построение прогнозов на основе модели (1) и проверка точности прогнозирования по экспериментальным данным.

Процессы, описываемые разностным уравнением (1), относятся к марковским процессам четвертого порядка. Свойство марковости проявляется в частности в том, что прогноз временного ряда x_t будет зависеть только от четырех прошлых известных отсчетов ряда x_t , наиболее близко отстоящих от настоящего момента времени. Если t – настоящий момент времени в который известно последнее значение ряда x_t , то прогноз, начиная с

момента времени t , на l шагов вперед (с упреждением l) ряда z_t будет иметь следующий вид:

$$\hat{z}_t(l) = \Psi_0(l)z_t + \Psi_1(l)z_{t-1} + \Psi_2(l)z_{t-2} + \Psi_3(l)z_{t-3}, \quad (2)$$

где веса $\Psi_k(l)$, $k = \overline{0, 3}$ находятся из простых рекуррентных соотношений $\Psi_k(l) = 0$ при $l < 1$, но $l \neq -k$; $\Psi_k(-k) = 1$; $\Psi_k(l) = \sum_{i=1}^4 \Phi_i \Psi_k(l-i)$ при $l \geq 1$. Прогноз (2) является прогнозом с минимальной среднеквадратической ошибкой (СКО). Теоретическую дисперсию ошибок прогноза (2) для разных упреждений l можно выразить через значения только одной весовой функции $\Psi_0(l)$:

$$d_z(l) = \sigma_a^2 \sum_{i=1}^l \Psi_0^2(l-i). \quad (3)$$

Поскольку логарифмически нормальный ряд x_t флуктуаций огибающей акустического сигнала и гауссовский ряд z_t связаны нелинейной логарифмической зависимостью, то чтобы не потерять свойство минимума СКО, прогнозы $\hat{z}_t(l)$ (2) ряда z_t нужно пересчитывать в прогнозы $\hat{x}_t(l)$ ряда x_t в соответствии с правилом пересчета математического ожидания логарифмически нормальной случайной величины через параметры исходной гауссовской величины [2]. Тогда прогноз с минимальной СКО флуктуаций огибающей акустического сигнала в мелком море x_t запишется в следующем виде:

$$\hat{x}_t(l) = \exp\{\hat{z}_t(l) + m + d_z(l)/2\}. \quad (4)$$

Дисперсия ошибок прогноза (4) для разных упреждений l будет иметь вид [2]:

$$d_x(l) = \hat{x}_t^2(l) [\exp\{d_z(l)\} - 1]. \quad (5)$$

Более полно негауссовские ошибки прогноза (4) будут характеризовать верхняя $x_{\text{в}}$ и нижняя $x_{\text{н}}$ $100(1 - \varepsilon)\%$ доверительные границы прогнозируемого отсчета x_{t+l} :

$$x_{\text{в,н}} = \exp\{\hat{z}_t(l) + m + u_{1-\varepsilon/2} \sqrt{d_x(l)}\}, \quad (6)$$

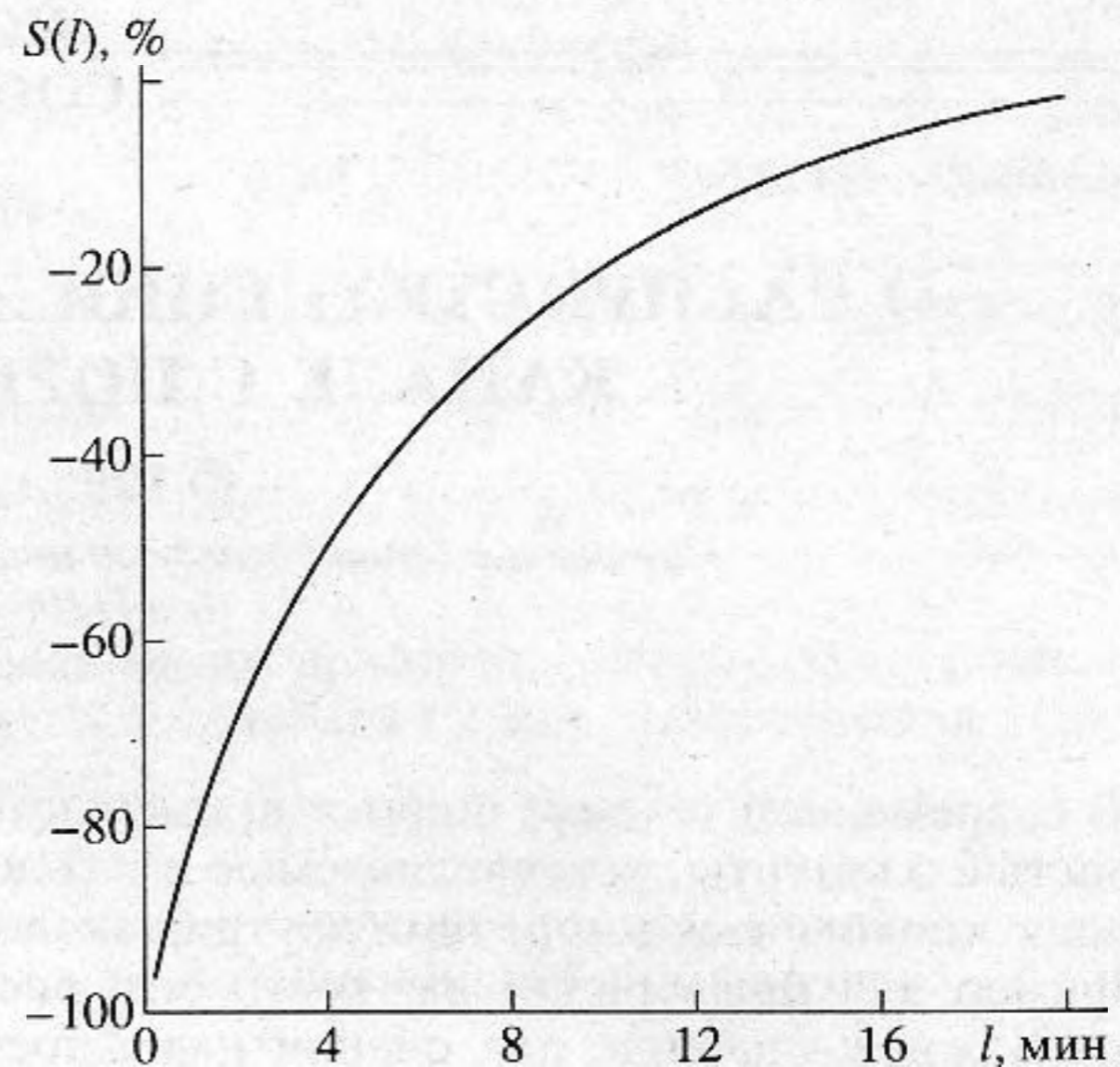
где знаки “плюс” и “минус” относятся соответственно к x_v и x_n , $u_{1-\varepsilon/2}$ – квантиль порядка $1 - \varepsilon/2$ стандартного гауссовского распределения.

Теоретические характеристики (3), (5), (6) дают представление о точности прогноза только в случае адекватности построенной модели (1). Дополнительной проверкой на адекватность модели (1) является проверка точности прогноза (4) непосредственно по экспериментальным данным. Такая проверка была проведена. Причем параметры модели оценивались по первой половине выборки экспериментальных данных (обучающая подвыборка), а прогнозы в текущем режиме давались на вторую половину выборки (экзаменующая подвыборка). Точность прогнозов для разных упреждений l характеризовалась следующей величиной:

$$S(l) = \frac{S_p(l) - S_m}{S_m} 100\%, \quad (7)$$

где $S_p(l)$ – среднеквадратическое отклонение прогнозов $\hat{x}_t(l)$ от экспериментальных данных x_{t+l} , S_m – среднеквадратическое отклонение среднего значения обучающей подвыборки от значений экзаменующей подвыборки. Величина S_m представляет собой характеристику точности тривиального прогноза в виде среднего значения флуктуаций огибающей акустического сигнала. Поэтому выражение (7) удобно для сравнения эффективности построенных прогнозов (4) с простым прогнозом в виде выборочного среднего: отрицательные значения $S(l)$, взятые по модулю, будут показывать выигрыш в процентах в точности прогноза (4) по сравнению с прогнозом в виде среднего значения ряда, положительные значения – соответственно проигрыш.

На рисунке приведена функция $S(l)$ (7) в зависимости от упреждения l (в минутах), рассчитанная по имеющимся экспериментальным данным. Из рисунка хорошо видно, что при прогнозировании на короткое время (меньше 1 мин) выигрыш в точности прогнозов по сравнению с прогнозом в виде среднего будет более 80%. При прогнозе на время большее 20 мин выигрыш становится незначительным (менее 2%).



Относительные среднеквадратические ошибки прогнозов.

Проверка точности построенных прогнозов проводилась по тому же банку экспериментальных данных что и построение модели в [1]. Вследствие устойчивости модели точность прогнозов оказалась практически одинаковой для экспериментальных данных, полученных летом и осенью, а также, для рассматриваемого диапазона частот 100–300 Гц. Для проверки модели и точности прогнозирования вне рассматриваемого диапазона частот и в другие сезоны года требуется проведение дополнительных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукин А.Н., Мигулин А.А., Моисеев С.Н., Петников В.Г., Сусликов О.Б. Модель флуктуаций огибающей гармонического сигнала в мелком море // Акуст. журн. 1993. Т. 39. Вып. 4. С. 691–696.
2. Моисеев С.Н. Точность прогноза частоты экранирования слоя E_s // Изв. вузов. Радиофизика. 1993. Т. 36. № 2. С. 121–125.