

УДК 681.513

С.Г. Удовенко, д-р техн. наук, профессор,**Л.Э. Чалая, канд. техн. наук, с.н.с.***Харьковский национальный университет радиотехники**пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166**E-mail: udovenko@kture.kharkov.ua***ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРЕНДА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОНИТОРИНГА**

Рассматривается метод оперативного прогнозирования тренда гидрофизических параметров по результатам наблюдений. Для подавления нежелательных помех предлагается подход, основанный на применении многократных выборок в пределах каждого из периодов наблюдения в процессе мониторинга. Показана возможность повышения эффективности фильтрации выхода прогнозирующей модели путем экстраполяции оценок прогнозирования.

Введение. К важным задачам мониторинга окружающей среды следует отнести автоматическую регистрацию гидрофизических параметров и последующее прогнозирование их тренда по полученным данным.

Рассмотрим задачу оперативного прогнозирования возникновения волн цунами по результатам гидрофизических наблюдений.

Известно, что колебания уровня океана, предшествующие возникновению волн цунами, имеют весьма сложный характер. Соответствующая кривая уровня имеет небольшой подъем и интенсивный спад, на фоне которого наблюдается низкоамплитудные колебания с периодом от 10 до 30 минут.

В качестве прогнозирующей зависимости изменений уровня океана целесообразно использовать обобщенную модель низкого порядка, а для настройки ее параметров - алгоритм байесовского оценивания с экспоненциальным дисконтированием.

Прогнозирующие модели байесовского типа довольно чувствительны к помехам измерения.

Постановка задачи. Для подавления нежелательных помех, влияющих на качество прогнозирования, целесообразным является подход, основанный на применении многократных выборок в пределах каждого из периодов наблюдения в процессе мониторинга. Проверку эффективности алгоритмов байесовского оценивания применительно к задачам прогнозирования и оперативной регистрации опасности возникновения волн цунами проведем по данным реальных гидрофизических измерений, полученным в ходе натурных исследовательских испытаний. Исследуемый процесс представляет собой дискретную последовательность регистраций уровня с десятиминутным периодом квантования. Такой подход требует осуществления аппроксимации прогнозируемого значения выходного сигнала прогнозирующей модели колебаний уровня океана по результатам измерения [1].

Целью настоящей работы является решение задачи фильтрации и аппроксимации выходных данных прогнозирующей модели, позволяющее получить резервы времени при различной продолжительности процедур оценивания и принятия решений в каждом из тактов.

Решение задачи. Исследуемый непрерывный прогнозируемый выход $y(t)$ в большинстве случаев соответствует гладкой функции между двумя последовательными измерениями. Если период квантования сигнала $y(t)$ достаточно мал, то эту функцию можно аппроксимировать линейной моделью (в пределах одного такта)

$$y(t) = K_a t + \varepsilon_a(t) + C_a, \quad (1)$$

где K_a – m_y -мерный вектор направлений отдельных составляющих выхода; $\varepsilon_a(t)$ – ошибка аппроксимации; C_a – вектор абсолютных членов.

Предположив, что в каждом такте осуществляется дополнительная дискретизация сигнала $y(t)$ с постоянным шагом Δf , зависимость (1) с учетом погрешности измерений запишем в виде

$$\hat{y}_i = K_a i + \omega_i + C_a, \quad i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где \hat{y}_i – оценка i -го дискретного значения $y(t)$; i – номер выборки (дискретное время); m – количество выборок; $\omega_i = \varepsilon_{ai} + \varepsilon_{bi}$, ε_{ai} , ε_{bi} – соответственно погрешность аппроксимации и ошибка измерения i -й ординаты.

Представим (2) в компактной форме

$$\hat{y}_i = P_f^T m_i + \omega_i, \quad (3)$$

где $P_f^T = [K_a, C_a]$, $m_i^T = [i, 1]$.

Уравнение (3) представляет собой модель фильтрации в пределах одного такта измерений. Предположим, что параметры P_f неизменны на протяжении каждого такта k , однако отличны для разных тактов. Оценку этих параметров можно осуществить методом наименьших квадратов, минимизируя критерий

$$J_f = Tr \sum_{i=1}^m \omega_i^T S \omega_i = Tr \sum_{i=1}^m S \omega_i \omega_i^T,$$

где S – произвольная положительно определенная матрица.

С учетом (2) получаем

$$\begin{aligned} J_f &= Tr \sum_{i=1}^m S (\hat{y}_i - P_f^T m_i) (\hat{y}_i - P_f^T m_i)^T = \\ &= Tr S [P_f^T \sum_{i=1}^m m_i m_i^T P_f - P_f^T \sum_{i=1}^m m_i \hat{y}_i^T - \\ &\quad - \sum_{i=1}^m \hat{y}_i m_i^T P_f + \sum_{i=1}^m y_i y_i^T]. \end{aligned}$$

Принимая обозначения

$$M_1 = \sum_{i=1}^m m_i m_i^T; \quad M_2 = \sum_{i=1}^m y_i m_i^T,$$

представим J_f в виде

$$J_f = Tr S [(P_s - \hat{P}_f)^T M_1 (P_s - \hat{P}_f) - \hat{P}_f^T M_1 \hat{P}_f + \sum_{i=1}^m y_i y_i^T],$$

где $\hat{P}_f = M_1^{-1} M_2$.

Поскольку матрица M_1 является положительно определенной, то минимум J_f достигим при $P_s = \hat{P}_f$, следовательно, оценка выхода модели в момент i представляется следующей зависимостью:

$$\hat{y}_i = K_a i + C_a = \hat{P}_f m_i, \quad (4)$$

здесь $m_i^T = [i, 1]$.

Подставляя в (4) значение \hat{P}_f , получаем

$$\hat{y}_i = M_2^T M_1^{-1} m_i = M_2^T f,$$

где $f = M_1^{-1} m_i = [f_1, f_2]^T$, f_1, f_2 – постоянные коэффициенты фильтра. Опишем результирующий алгоритм фильтрации:

в каждом такте k последовательно с шагом Δf измеряем значения \hat{y}_i и формируем суммы

$$\sum_{i=1}^m i \hat{y}_i, \quad \sum_{i=1}^m \hat{y}_i;$$

после последнего m -го измерения определяем оценку \hat{y}_m , в соответствии с зависимостью

$$\hat{y}_i = M_2^T f = f_1 \sum_{i=1}^m i \hat{y}_i + f_2 \sum_{i=1}^m \hat{y}_i.$$

Отфильтрованная величина \hat{y}_m принимается в дальнейшем в качестве оценки выхода в текущем такте принятия решений. Однако подобный подход не всегда позволяет осуществлять оперативные расчеты по фильтрации выходных данных прогнозирующей модели ввиду необходимости создания резервов времени при различной продолжительности процедур оценивания и принятия решений в каждом из тактов. Рассмотрим процесс фильтрации для k -го периода наблюдения при использовании m -кратного линейного экстраполирующего фильтра.

Если момент оценки выхода модели соответствует моменту последнего наблюдения, то константы f_1 и f_2 зависят лишь от количества отсчетов в каждом такте, а аппроксимирующее уравнение принимает вид

$$\hat{y}_m = \frac{2}{m} \left[\frac{3}{m+1} \sum_{i=1}^m i \hat{y}_i - \sum_{i=1}^m \hat{y}_i \right].$$

Рассмотрим дополнительную возможность использования описанного подхода. Предположим, что проведение m выборок в очередном такте завершено в момент $(k+m\Delta f)$. В этом случае представляется целесообразной экстраполяция аппроксимирующей прямой на m_2 шагов с целью получения оценки \hat{y}_e в момент $(k+m_1\Delta f)$, более приближенный к следующему такту основной дискретизации $(k+1)$. При этом появляется возможность в течение времени T_B осуществить все необходимые расчеты по фильтрации данных (рисунок 1). Нетрудно показать, что экстраполяционная оценка \hat{y}_e может быть определена по зависимости

$$\hat{y}_e = \hat{y}_m + m_2 \left[\frac{6(\hat{y}_m - 2a_1)}{m(m+1)(m-1)} + \frac{2(a_2 - \hat{y}_m m + \hat{y}_m)}{m(m-1)} \right],$$

где $a_1 = \sum_{i=1}^{m-1} i \hat{y}_i$, $a_2 = \sum_{i=1}^{m-1} \hat{y}_i$.

Результаты моделирования. При проведении экспериментального моделирования в ситуациях, когда абсолютная величина прогнозирования на текущем такте вычислений превышала пороговую величину, принималась гипотеза о потере устойчивости процесса прогноза на всем интервале моделирования.

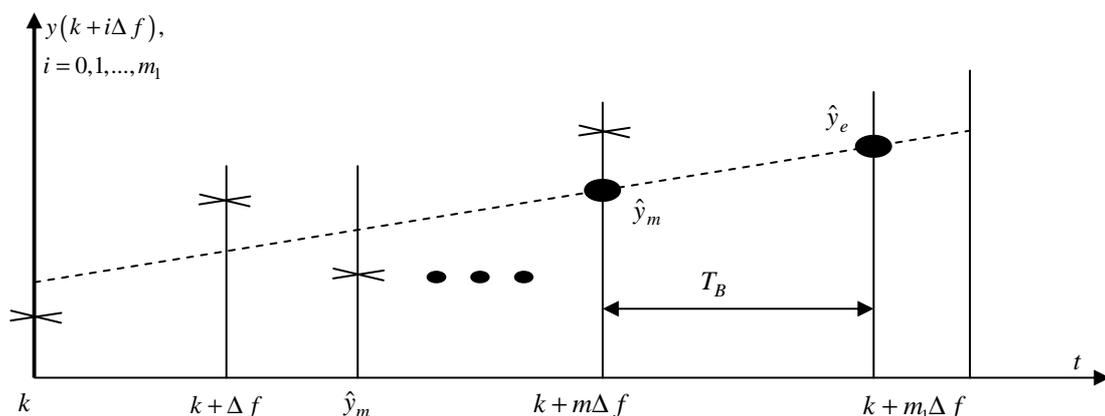


Рисунок 1 – Экстраполяция оценок прогнозирования: × – измеренные значения $y(t)$,
 - - - – аппроксимирующая прямая

Начальные значения во всех случаях принимались нулевыми. Следует отметить, что процедуры байесовского оценивания с фильтрацией обеспечивали более высокое качество прогнозирования по сравнению с рекуррентным методом наименьших квадратов [2]. На условно стационарных интервалах качество прогнозов было приблизительно одинаковым для различных величин скользящего окна $S_{ок}$. Относительная ошибка прогноза на стационарных участках для всех $S_{ок}$ не превышала 0,09.

Выводы. Результаты моделирования позволяют сделать вывод об эффективности дополнительной фильтрации и экстраполяции оценок выхода прогнозирующей модели.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на формализацию процедуры адаптивного выбора параметров предложенного фильтра.

Библиографический список

1. Удовенко С.Г. Программная фильтрация в контурах адаптивного управления / С.Г. Удовенко // Проблемы бионики. — 1998. — Вып. 48. — С. 70–74.
2. Удовенко С.Г. Рекуррентное оценивание параметров стохастической модели с аппроксимацией шума / С.Г. Удовенко, Р.Д. Кириак // Вестник ХГПИУ. — 2000. — Вып. 121. — С. 129–133.

Поступила в редакцию 27.10.2008 г.