

ОТСЛЕЖИВАНИЕ КВАЗИГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ПРЕДСКАЗАНИЯ

Кирпичников А.П¹, Орешкин Б.Н², Отнякин С.П¹

¹Институт Проблем Управления Российской Академии Наук

²Московский Авиационный Институт (ТУ), info@autex.ru

Аннотация – решается задача отслеживания квазигармонических возмущений в целях управления инерционным исполнительным механизмом. Использование алгоритма предсказания позволяет оптимизировать управление при воздействии квазипериодических помех. Методом статистического моделирования показано, что помимо ресурсоемких адаптационных алгоритмов, эффективное решение задачи отслеживания квазигармонических возмущений может быть получено простым методом. Внедрение данного подхода позволило значительно улучшить характеристики системы управления с помощью маломощного микропроцессора.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для нужд управления инерционным объектом, т.е. таким объектом, момент рабочего цикла которого сдвинут во времени относительно момента подачи команды на заранее известное время **Ошибка! Закладка не определена.**, бывает необходимо использовать процедуру предсказания помехового сигнала для нейтрализации влияния внешних воздействий на качество отработки команды. В нашем случае необходимо разработать алгоритм предсказания квазигармонических колебаний с медленной девиацией частоты. Модель сигнала представляет собой два отдельных канала, каждый из которых является аддитивной смесью полезной периодической составляющей, хаотической импульсной помехи и ошибки измерения в виде белого Гауссовского шума:

$$\begin{aligned} s_1(t) &= A_1 \sin(\omega_1(t)t + \varphi_1) + \gamma_1(t) + \xi_1, \\ s_2(t) &= A_2 \sin(\omega_2(t)t + \varphi_2) + \gamma_2(t) + \xi_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где ξ_i – белый Гауссовский шум ($i = 1, 2$). Анализ реальных данных с используемых датчиков показывает, что отношение сигнал/шум в каналах $s_1(t)$ и $s_2(t)$ велико и составляет 20-30 дБ. Хаотическая импульсная помеха $\gamma_i(t)$ с длительностью τ_i и случайным временем появления $T_{i,j}^{\text{int}}$ может быть

представлена в виде: $\gamma_i(t) = A_i^{\text{int}} \sum_{j=1}^L u(T_{i,j}^{\text{int}}) - u(T_{i,j}^{\text{int}} - \tau_{i,j})$, где $u(t)$ – функция Хевисайда.

Конечной целью алгоритма предсказания является определение момента времени выдачи команды на управляемый объект, оптимального с точки зрения некоторого критерия качества. Критерием качества в данном случае является мера близости в момент исполнения команды сигнала $s_1(t)$ к одному из своих максимумов, а $s_2(t)$ – к одному из своих экстремумов. Тогда задача поиска оптимального момента времени t_{opt} , максимизирующего сформулированный критерий качества может быть записана следующим образом:

$$t_{\text{opt}} = \arg \left\{ \begin{array}{l} \max_t s_1(t) \\ \max_t s_2(t) \\ \min_t s_2(t) \end{array} \right. \quad (2)$$

Поскольку предполагается реализация разработанного алгоритма на процессоре с низким вычислительным ресурсом, критериями эффективности алгоритма являются, прежде всего, простота и близость оценки \hat{t}_{opt} , предсказываемой по реальным данным к идеальной, сформулированной в (2).

II. АЛГОРИТМ ПРЕДСКАЗАНИЯ

Анализ и синтез сложных алгоритмов идентификации и оценки параметров обобщенных моделей квазигармонических колебаний может быть найден в статьях [1-3]. В связи с требованиями, сформулированными к алгоритму предсказания в разделе I, для решения задачи (2) будут использованы простые методы и упрощенная модель сигнала (1). Процесс работы системы управления с использованием алгоритма предсказания можно разделить на несколько этапов:

- Предварительная обработка сигнала;
- Оценивание и сопровождение необходимых параметров сигнала;
- Предсказание оптимального момента времени выдачи команды \hat{t}_{opt} ;
- Выдача команды на объект управления.

Предварительная обработка сводится к сглаживанию сигналов в каналах фильтром скользящего среднего: $s_i^{sm}(n) = \sum_{j=0}^{N-1} s_i(n-j)w(j)$, где N – порядок фильтра. Коэффициенты фильтра определяются из соотношения значений максимальной рабочей частоты и частоты дискретизации и приведены в Таблице 1.

$w(0)$	$w(1)$	$w(2)$	$w(3)$	$w(4)$
0.1101934	0.2398227	0.2999674	0.2398227	0.1101934

Оценка параметров $\omega_1(n)$, $\omega_2(n)$, φ_1 и φ_2 модели сигнала (1) производится посредством анализа пересечений нуля сигналами $s_1(n)$ и $s_2(n)$. Для этого вычисляется средний уровень сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ с помощью фильтра экспоненциального взвешивания с параметром $\alpha \in (0,1)$ и $1 - \alpha \ll 1$:

$$s_i^{zero}(n) = \alpha s_i^{zero}(n-1) + (1 - \alpha) s_i^{sm}(n).$$

Сопровождение и сглаживание значений оценок частот $\hat{\omega}_1(n)$, $\hat{\omega}_2(n)$ также производится фильтром экспоненциального взвешивания с параметром $\beta \in (0,1)$ и $1 - \beta \ll 1$:

$$\hat{\omega}_i^{sm}(n) = \beta \hat{\omega}_i^{sm}(n-1) + (1 - \beta) \hat{\omega}_i(n).$$

В момент, выбранный для выдачи предсказания времени \hat{t}_{opt} , формируются коэффициенты предсказания $k_2^{max}(p)$ и $k_2^{min}(p)$ для максимумов и минимумов сигнала $s_2(n)$:

$$k_2^{max}(p) = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2^{max}) + pT_1}{T_2^{max}}, \quad k_2^{min}(p) = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2^{min}) + pT_1}{T_2^{min}}, \quad (3)$$

где $p = 1, 2 \dots P$ – количество периодов сигнала $s_1(n)$, на которое производится предсказание вперед; φ_1 , T_1 – начальная фаза и период следования максимумов сигнала $s_1(n)$; φ_2^{max} , φ_2^{min} , T_2^{max} , T_2^{min} – начальная фаза и период следования максимумов и минимумов сигнала $s_2(n)$. Информативным параметром коэффициентов предсказания (3) является их дробная часть. Величина дробной части коэффициентов предсказания показывает насколько далеко от максимумов сигнала $s_1(n)$ отстоят экстремумы сигнала $s_2(n)$. Таким образом, формируя матрицу коэффициентов предсказания:

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_2^{max}(1) & k_2^{max}(2) & \dots & k_2^{max}(P-1) & k_2^{max}(P) \\ k_2^{min}(1) & k_2^{min}(2) & \dots & k_2^{min}(P-1) & k_2^{min}(P) \end{pmatrix}$$

и определяя элемент этой матрицы с наименьшей дробной частью мы находим решение задачи (2) в виде:

$$\hat{t}_{opt} = T_1 \arg \left(\min_p (\text{frac} \mathbf{K}) \right) - t_{delay}, \quad \text{где } t_{delay} \text{ – время реакции объекта управления.}$$

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С целью проверки эффективности предлагаемого алгоритма было проведено моделирование процесса предсказания квазигармонических сигналов с белым гауссовским шумом. Частоты сигналов были взяты 9 Гц и 6 Гц, отношение сигнал-шум 13 дБ, скорость изменения частоты 0.2 Гц/сек. Один из временных интервалов изображен на Рис. 1.

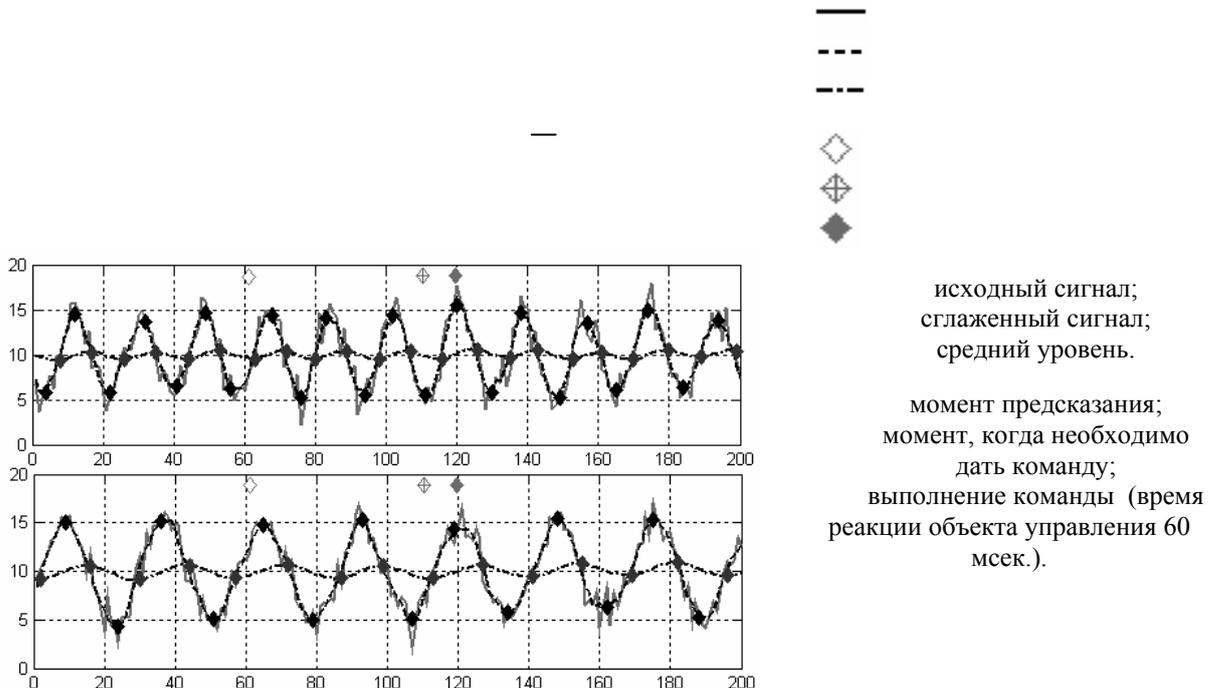


Рис. 1 Пример работы предложенного алгоритма предсказания

Результаты статистического моделирования данного алгоритма, усредненные по 3000 испытаний, представлены на Рис. 2.

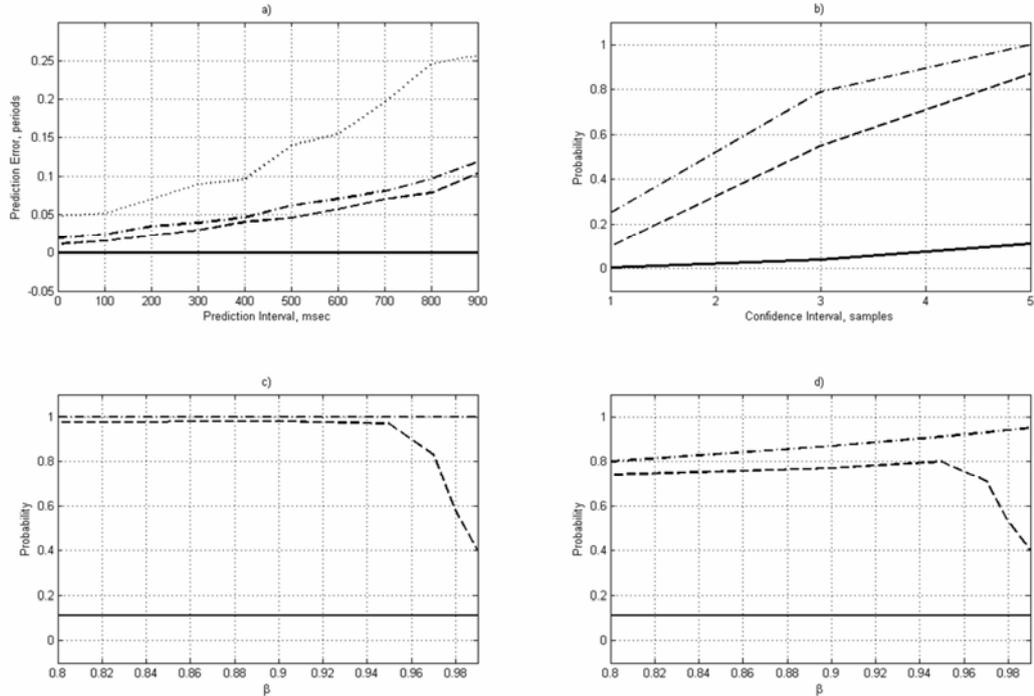


Рис. 2 Результаты статистического моделирования алгоритма предсказания (а) зависимость величины среднеквадратической ошибки предсказания от длины интервала предсказания: — и --- предсказание модели $s_i(t) = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$, SNR = 60 и 13 дБ соответственно, -- и ... предсказание модели $s_i(t) = A_i \sin(\omega_i(t)t + \varphi_i)$, SNR = 60 и 13 дБ; (б) вероятность попадания в заданный доверительный интервал при случайном выборе \hat{t}_{opt} (—) и использовании предложенного алгоритма для сопровождения параметров модели $s_i(t) = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$, SNR = 60 (---) и 13 (--) дБ; (в) вероятность попадания в доверительный интервал длиной 5 отсчетов в зависимости от величины параметра β при случайном выборе \hat{t}_{opt} (—) и использовании предложенного алгоритма для сопровождения параметров моделей $s_i(t) = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$ (---), $s_i(t) = A_i \sin(\omega_i(t)t + \varphi_i)$ (--), SNR = 60 дБ; (г) вероятность попадания в доверительный интервал длиной 5 отсчетов в зависимости от величины параметра β при случайном выборе \hat{t}_{opt} (—) и использовании предложенного алгоритма для сопровождения параметров моделей $s_i(t) = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$ (---), $s_i(t) = A_i \sin(\omega_i(t)t + \varphi_i)$ (--), SNR = 13 дБ.

IV. ВЫВОДЫ

В данной статье предложено простое и эффективное решение задачи отслеживания квазигармонических возмущений с использованием алгоритма предсказания, пригодное для реализации в устройствах с низким вычислительным ресурсом. Разработанный алгоритм реализован на базе малопотребляющего микропроцессора производительностью менее 25 MIPS. Как видно из графика среднеквадратической ошибки, при предсказании фазы на 300 мсек вперед ошибка предсказания составляет не более 5 мсек. Из результатов статистического моделирования системы управления на базе данного алгоритма (Рис. 2) видно, что его внедрение в систему позволяет увеличить эффективность ее работы в 5 и более раз.

Литература

1. M. Niedzwiencki, P. Kaczmarek, Generalized Adaptive Notch and Comb Filters for Identification of Quasi-Periodically Varying Systems, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 53, No. 12, 2005.
2. M. Niedzwiencki, P. Kaczmarek, Estimation and Tracking of Quasi-Periodically Varying Systems, Proc. of 13th IFAC Symp. System Identification, Vol. 53, No. 12, 2003.
- P. Tichavsky, A. Nehorai, Comparative Study of Four Adaptive Frequency Trackers, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 45, pp 1473-