

щищаемых объектах. Разработан и изготовлен макет технического средства проверки алгоритмов работы мультикритериальных пожарных извещателей.

1. Peacock, R.D. Characteristics of Fire Scenarios in Which Sublethal Effects of Smoke are Important. Fire Technology / R.D. Peacock, J.D. Averill, P.A. Reneke, and W.W. Jones – 40, 127–147, 2004.

2. J.R. Hall, Jr. “How Many People Are Exposed To Sublethal Fire Smoke?” Fire Technology, vol. 40, 2004, pp. 109–124.
3. СТБ 2218-2011 Система стандартов пожарной безопасности. Системы пожарной сигнализации. Извещатели пожарные тепловые. Общие технические требования. Методы контроля.

УДК 519.248:681.51

## АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНОГО МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Артемов В.М., Наумов А.О., Кохан Л.Л.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Одним из способов повышения точности измерений является комплексирование (совмещение) результатов измерений одних и тех же параметров от нескольких датчиков. Датчики могут быть построены на различных физических принципах, однако должны обеспечивать получение информации об одних и тех же измеряемых данных. Как правило, измерения осуществляются в условиях помех, что приводит к необходимости фильтрации измерений. Для получения наиболее точных результатов необходимо решать задачу оптимальной фильтрации комплексирования, важную для ряда технических систем, например навигации [1], управления подвижными объектами [2] и ряда других. Комплексирование может осуществляться посредством двух схем обработки: централизованной и децентрализованной. В первом случае производится объединение измеренных данных, а затем осуществляется их фильтрация. Во втором первоначально осуществляется фильтрация каждой из составляющих измерений, а затем результаты объединяются. Каждая из этих схем имеет свои преимущества и недостатки [3]. Классические методы комплексирования требуют априорного знания спектральных либо статистических характеристик воздействий, что сужает область их применения. Поэтому сохраняется необходимость разработки методов синтеза комплексных фильтров в условиях априорной статистической неопределенности характеристик воздействий.

Одним из подходов к решению такой задачи может быть использование рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК) [3], требующий минимального объема априорной информации в виде предположения о гладкости изменения измеряемого параметра [4], что соответствует физической природе технических систем. Под гладкостью понимается допустимость аппроксимации процесса изменения измеряемого параметра полиномиальной функцией на ограниченном интервале наблюдения. Предлагается метод синтеза структуры и параметров

централизованного комплексного фильтра на основе РМНК для воздействий в виде случайных последовательностей при их неизвестных статистических характеристиках, но в предположении гладкости изменения огибающей измеряемого параметра.

Предположим, что имеются  $M$  датчиков, измеряющих одну и ту же случайную последовательность  $x_k$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$  – дискретное время с периодом  $T_0 = 1$ . Скорость изменения этой величины  $\vartheta_k = x_k - x_{k-1}$ , а ускорение равно разности скоростей  $\vartheta_k - \vartheta_{k-1}$ . Совокупность входных сигналов датчиков можно представить в виде вектора  $x_k \cdot \mathbf{I}$ , где  $\mathbf{I} = \overbrace{[1, 1, \dots, 1]}^M$  есть единичный вектор размерности  $M$ . Характеристики линейных безинерционных датчиков и связи между ними задаются матрицей  $\mathbf{H}$  размерности  $M \times N$ , где  $N$  – число выходов. Элементы матрицы  $\mathbf{H}$  обозначим символами  $h_{ij}$  ( $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}$ ). Ошибки измерений полагаются аддитивным вектором шумов  $\mathbf{v}_k = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T$ , в результате чего вектор измерений  $\mathbf{z}_k = [z_1, z_2, \dots, z_N]^T$  имеет вид

$$\mathbf{z}_k = x_k \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{v}_k.$$

Результаты измерений обрабатываются комплексным фильтром, выходом которого будет оценка  $\hat{x}_k$  значений входной последовательности.

Синтез линейного фильтра основан на введении квадратичного функционала потерь и его минимизации. Один из возможных вариантов функционала имеет следующий вид:

$$Q_k(x_k, \vartheta_k) = (1 - \alpha)(z_k - x_k \mathbf{H} \cdot \mathbf{I})^T \times \\ \times (z_k - x_k \mathbf{H} \cdot \mathbf{I}) + \alpha [\vartheta_k^2 + (\vartheta_k - \vartheta_{k-1})^2]; \quad 0 \leq \alpha \leq 1.$$

Коэффициент регуляризации  $\alpha$  задает степень сглаживания и имеет эмпирический харак-

тер [4]. Для нахождения оптимальных оценок  $\hat{x}_k$  и  $\hat{\theta}_k$  используются уравнения достаточных условий оптимальности  $\partial Q_k(x_k, \theta_k) / \partial x_k = 0$  и  $\partial Q_k(x_k, \theta_k) / \partial \theta_k = 0$  [3], решение которых приводит к следующему алгоритму комплексного фильтра:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + k_1 \hat{\theta}_{k-1} + k_2 (z_{0k} - h_0^2 \hat{x}_{k-1});$$

$$\hat{\theta}_k = \hat{x}_k - \hat{x}_{k-1}.$$

с обозначениями

$$h_0^2 = \mathbf{I}^T \mathbf{H}^T \mathbf{H} \cdot \mathbf{I} = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^M h_{ij} \right)^2;$$

$$k_1 = \frac{\alpha}{2\alpha + (1-\alpha)h_0^2};$$

$$k_2 = \frac{(1-\alpha)}{2\alpha + (1-\alpha)h_0^2};$$

$$z_{0k} = \mathbf{I}^T \mathbf{H}^T z_k = \sum_{i=1}^N z_{ik} \sum_{j=1}^M h_{ij}.$$

Структурная схема синтезированного фильтра приведена на рис. 1, где символом  $-T_0$  обозначена операция задержки на период  $T_0$ .

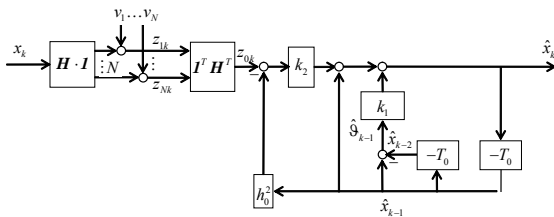


Рисунок 1 – Структурная схема комплексного фильтра

Проведена оценка точностных характеристик разработанного фильтра. Поскольку фильтр линейный, то ошибки от измеряемого параметра  $x_k$  и от шумов  $v_k$  могут рассматриваться по отдельности. Первоначально рассматривалась ошибка при постоянном входном воздействии  $x_k = x_0$  и отсутствии шумов ( $v_k = 0$ ). В этом случае ошибка определяется величиной  $\psi$ , являющейся относительной ошибкой по скорости изменения параметра. Зависимость этой ошибки от величины  $\alpha$  при заданных значениях  $h_0^2$  приведена на рис. 2.

Ошибку фильтрации за счет шумов  $v_k$  можно оценить по зависимости относительной величины дисперсии шума  $\varphi$  от коэффициента  $\alpha$ . График этой зависимости приведен при фиксированных значениях  $h_0^2$  приведен на рис. 3.

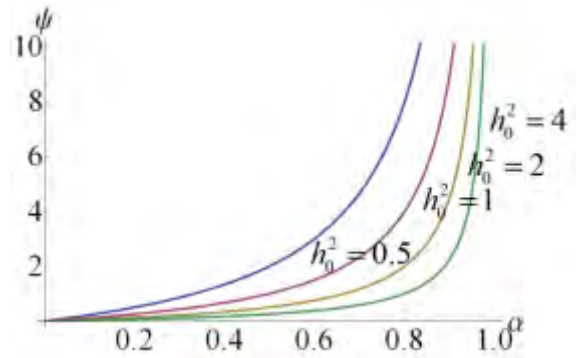


Рисунок 2 – Зависимость относительной ошибки по скорости  $\psi$  от коэффициента  $\alpha$

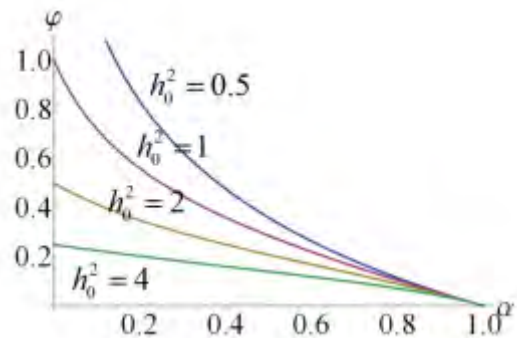


Рисунок 3 – Зависимость относительной величины дисперсии шума  $\varphi$  от коэффициента  $\alpha$

Графики на рис. 2 и 3 можно использовать для нахождения величины регуляризирующего коэффициента  $\alpha$ . Для заданных значений  $h_0^2$  можно выбрать величину регуляризирующего коэффициента  $\alpha$  исходя из компромисса между допустимыми значениями ошибок по скорости  $\psi$  и дисперсии ошибок от шумов измерений  $\varphi$ .

1. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах.– М: Машиностроение, 1991.– 512 с.
2. Алешин Б.С. Ориентация и навигация подвижных объектов / Б.С. Алешин, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморский. – М.: Физматлит, 2006. – 424 с.
3. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор".– 2009.– 496 с.
4. Сизиков В.С. Математические методы обработки результатов измерений.– СПб.: Политехника, 2001.– 230 с.