

АДАПТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ СГЛАЖИВАНИЯ СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМАХ МИКРОАВИОНИКИ

Малкин В.А.

Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

Рассматриваются адаптивные к изменению интенсивности шумов измерения фильтры сглаживания сигналов датчиков, используемых в системах микроавионики. Адаптация осуществляется за счет предварительной статистической обработки ошибок фильтрации. Представлен алгоритм вычисления коэффициентов адаптивного фильтра и результаты моделирования его работы. (E-mail: vitalic767@gmail.com)

Ключевые слова: инерциальные системы, случайные ошибки датчиков, адаптивные сглаживающие фильтры.

Введение

В последнее десятилетие наблюдается достаточно интенсивный рост разработок в области беспилотной авиации. Беспилотные авиационные комплексы (БАК) находят широкое применение как в военной сфере, так и в различных отраслях народного хозяйства. В настоящее время в мире насчитывается более тысячи видов БАК самого различного назначения, сложности, размеров и массы беспилотных летательных аппаратов (БЛА).

Функционирование БЛА всегда связано с необходимостью решения навигационной задачи, т.е. определения в каждый момент времени углов ориентации, положения центра масс и составляющих скорости БЛА в выбранной системе координат. Эта задача решается в современных БАК с помощью пилотажно-навигационных комплексов, построенных на основе бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Пилотажно-навигационные комплексы современных БЛА по составу датчиков, сложности алгоритмов обработки информации и требованиям к точности навигации не уступают, а зачастую даже превосходят аналогичные системы в пилотируемой авиации [1].

В БЛА малой массы широкое распространение получили БИНС на основе микроэлектромеханических датчиков – акселерометров и датчиков угловой скорости (ДУС). Преимуществом таких датчиков перед традиционно применяемыми гироскопами является то, что они имеют значительно меньшие массу и габариты,

а также не требуют специальных видов электрического питания. Однако микроэлектромеханические датчики обладают и существенными недостатками, связанными с низкой точностью измерений и высоким уровнем внутренних шумов. Погрешности микромеханических датчиков разделяются на систематические и случайные [2, 3]. Систематические погрешности, как правило, оцениваются при калибровке и компенсируются в процессе функционирования системы.

Для снижения уровня случайных погрешностей микроэлектромеханических датчиков применяются алгоритмы сглаживания, построенные на основе фильтра Калмана. Классический фильтр Калмана позволяет получать оптимальные оценки случайного процесса при условии стационарности измерительных шумов или наличия априорной информации об изменении их интенсивности. Получить и использовать достоверную априорную информацию об изменении интенсивности шумов датчиков достаточно сложно, так как она зависит от случайных условий функционирования датчика и от нестабильности шумовых характеристик различных датчиков.

Устранить этот недостаток можно за счет использования фильтров сглаживания, адаптивных к изменению интенсивности шумов измерений. Традиционный подход к построению адаптивных алгоритмов на основе фильтра Калмана заключается в расширении вектора состояния путем включения в него априорно неизвестной интенсивности шума измерения. При таком подходе уравнения для ковариации

онных матриц ошибок оценивания (уравнения Риккати) становятся зависимыми от результатов измерений и должны интегрироваться совместно с уравнениями для оценок вектора состояния. Это приводит к увеличению вычислительных затрат при реализации фильтра.

С целью снижения вычислительных затрат на адаптацию предлагается использовать алгоритм сглаживания, имеющий структуру фильтра Калмана и отличающийся предварительной статистической обработкой невязок измерений. Предлагаемый алгоритм базируется на результатах работы [4], в которой показано, что матрица коэффициентов фильтра Калмана может быть получена на основе информации, содержащейся в ковариационных матрицах обновляющей последовательности измерений. Алгоритмы вычисления коэффициентов фильтра, полученные в работе [4], усовершенствованы тем, что предварительная статистическая обработка невязок измерений осуществляется на скользящем интервале времени [5]. За счет этого обеспечивается более высокая точность определения коэффициентов фильтра.

На основе такого подхода получен адаптивный дискретный алгоритм сглаживания выходных сигналов микроэлектромеханических датчиков БИНС.

Постановка и решение задачи

Адаптивные фильтры сглаживания первого порядка предназначены для обработки скалярных сигналов датчиков информации с использованием априорной модели сигнала в виде стохастического дифференциального (разностного) уравнения первого порядка.

Поскольку обработка сигналов датчиков осуществляется цифровыми устройствами, при решении задачи будем рассматривать математические модели процессов в дискретной форме. Пусть на вход датчика поступает дискретный процесс $x(k)$, априорная модель которого описывается уравнением:

$$x(k+1) = \alpha x(k) + \xi(k+1), \quad (1)$$

где $\alpha = 1 - \Delta t(T_x)^{-1}$, ($\Delta t \leq T_x$); $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ – шаг обновления оценок; T_x – постоянная времени формирующего фильтра процесса $x(k)$; $\xi(k+1)$ – дискретный центрированный слу-

чайный процесс, значения которого на соседних шагах счета не коррелированы $M[\xi(k+1)\xi(k)] = 0$.

Датчиком осуществляется измерение значений $x(k)$ со случайной ошибкой $\eta(k)$:

$$x^*(k) = x(k) + \eta(k). \quad (2)$$

Предполагается, что систематическая составляющая погрешности $\Delta x(k)$ отсутствует (либо компенсируется на выходе датчика). Случайная составляющая $\eta(k)$ представляет собой дискретный нестационарный центрированный случайный процесс, значения которого на соседних шагах счета не коррелированы между собой ($M[\eta(k+1)\eta(k)] = 0$).

Для дискретного процесса (1) с учетом соотношения (2) требуется получить алгоритм фильтрации калмановской структуры, в котором коэффициент преобразования $k_\phi(k)$ адаптируется к изменению интенсивности процесса $\eta(k)$.

В работе [4] показано, что предварительная статистическая обработка невязок измерений позволяет получать коэффициенты усиления фильтра, зависящие от изменения интенсивности шумов измерения и взаимной ковариации невязок на двух соседних шагах счета. Таким образом, для определения квазиоптимальных значений коэффициентов фильтра отпадает необходимость в решении уравнений Риккати, а также в наличии априорной информации об интенсивностях порождающих и измерительных шумов системы.

Для уравнения (1) квазиоптимальная оценка процесса $\hat{x}(k)$ может быть получена на основе рекуррентного соотношения:

$$\hat{x}(k+1) = \alpha \hat{x}(k) + k_\phi[x^*(k+1) - \alpha \hat{x}(k)], \quad (3)$$

где $k_\phi(k)$ – коэффициент преобразования фильтра; $x^*(k+1)$ – измеренное значение сигнала датчика на шаге $(k+1)$.

Для определения коэффициента преобразования фильтра $k_\phi(k)$ необходимо на каждом шаге счета вычислять оценки $\hat{M}[v(k+1)v(k)]$ и $\hat{M}[v^2(k+1)]$, где $v(k+1) = x^*(k+1) - \alpha \hat{x}(k)$ –

невязка измерения в момент времени t_{k+1} .
Оценки величин $\hat{M}[v(k+1)v(k)]$ и $\hat{M}[v^2(k+1)]$ находятся путем осреднения соответствующих произведений на скользящем интервале T_0 , содержащем N тактов вычисления оценок величины $x(k)$: $T_0 = N \Delta t$ [5]. Вычислительный эксперимент показал, что для удовлетворительной работы алгоритма достаточно принять $N = 50 \div 100$.

Вычисление коэффициента $k_\phi(k)$ производится по следующему алгоритму:

1. На каждом шаге отсчета k формируется N -мерный вектор Q , элементами которого являются невязки измерений, вычисленные на предыдущих $N-1$ шагах обновления оценок и на данном шаге:

$$Q^T = \{q_1, q_2, \dots, q_n\} = \{v(k), v(k-1), \dots, v(k-N+1)\}.$$

2. Кроме этого, на каждом шаге счета запоминается вектор P , сформированный на предыдущем шаге:

$$P^T = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} = \{v(k-1), v(k-2), \dots, v(k-N)\}.$$

3. Вычисляются скалярные произведения:

$$S_1 = Q^T Q; S_2 = Q^T P.$$

4. В качестве оценок математических ожиданий ковариаций невязок принимаются:

$$\hat{M}[v^2(k+1)] \approx \frac{S_1}{N}; \hat{M}[v(k+1)v(k)] \approx \frac{S_2}{N}.$$

Коэффициент преобразования фильтра $k_\phi(k)$ вычисляется по формуле:

$$k_\phi = \frac{|\hat{M}[v(k+1)v(k)]|}{\hat{M}[v^2(k+1)]} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (4)$$

Обсуждение результатов

Моделирование рассматриваемого алгоритма сглаживания выходных сигналов датчиков проводилось в среде *Matlab-Simulink*.

В процессе математического моделирования оценивались работоспособность и точность алгоритма фильтрации первого порядка с предварительной статистической обработкой невязок измерений. Проводился сравнительный анализ точности разработанного фильтра и классического дискретного фильтра Калмана, в котором коэффициент усиления находится из решения уравнения Риккати.

Математическая модель алгоритма фильтрации первого порядка включает в себя следующие подсистемы:

- математическую модель формирования оценок входного сигнала;
- математическую модель формирования коэффициента фильтра;
- математическую модель формирования решения уравнения Риккати;
- математическую модель формирования входного сигнала;
- математическую модель оценки среднеквадратичного отклонения сигнала на выходе фильтра;
- средства визуализации результатов моделирования.

Математическая модель формирования оценок реализует получение оценки входного сигнала в соответствии с формулой (3). Коэффициент фильтра вычисляется в соответствии с формулой (4). Алгоритм вычисления оценок $\hat{M}[v^2(k+1)]$ и $\hat{M}[v(k+1)v(k)]$ реализован в модели фильтра в виде S -функции.

В качестве входного сигнала используется белый (либо окрашенный) шум, дисперсия которого изменяется скачкообразно в моменты времени, задаваемые при моделировании. Кроме этого, на вход фильтра могут подаваться регулярные сигналы (постоянный, линейно изменяющийся, гармонический).

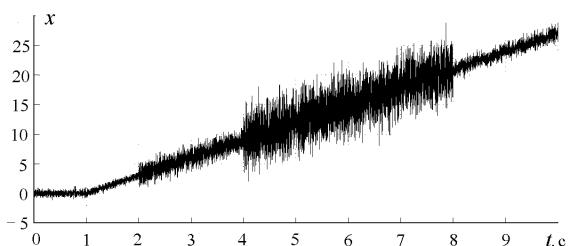
Для исследования статистических характеристик выходного сигнала фильтра используется S -функция, в которой на задаваемых временных интервалах вычисляются математическое ожидание, дисперсия и средний квадрат ошибки исследуемого случайного процесса.

Для визуализации процессов на выходе соответствующих подсистем используются виртуальные осциллографы.

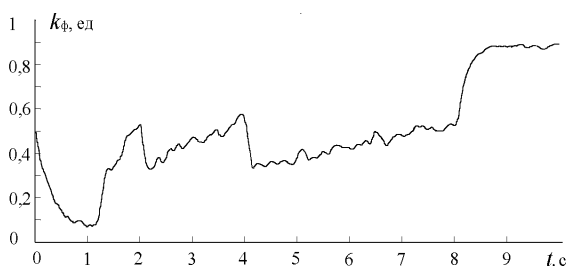
Проведена проверка работоспособности фильтра и его адаптации к изменению интенсивности шума измерения. С этой целью на вход фильтра подавался некоррелированный

случайный процесс, интенсивность которого изменялась скачкообразно в моменты времени 2 с, 4 с, 8 с.

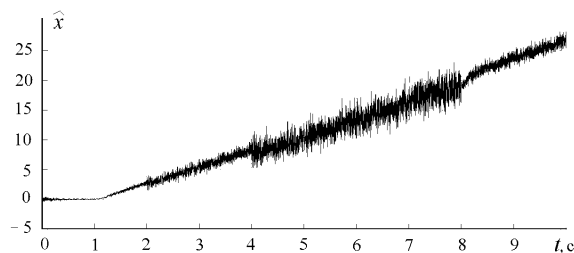
На рисунках 1 и 2 представлены реализации процессов при подаче на вход фильтра линейно изменяющегося сигнала, зашумленного белым гауссовым шумом со скачкообразно изменяющейся дисперсией. На рисунке 1 представлены реализации процессов для адаптивного алгоритма вычисления коэффициента, на рисунке 2 – для коэффициента, вычисляемого путем решения уравнения Риккати.



а



б



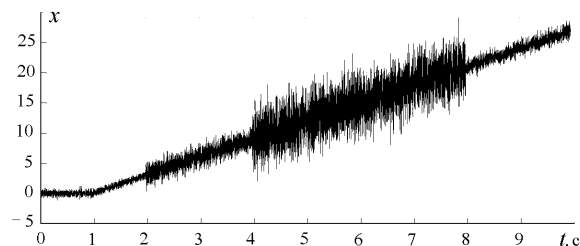
в

Рисунок 1 – Реализации процессов для адаптивного фильтра сглаживания: а – процесс на входе фильтра; б – график изменения коэффициента фильтра; в – процесс на выходе фильтра

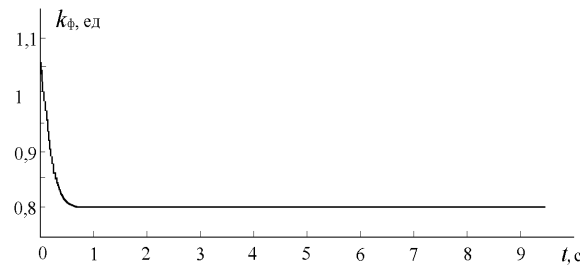
Анализ графиков, представленных на рисунках 1 и 2, позволяет сделать вывод о работоспособности алгоритма адаптации коэффициента фильтра к изменению интенсивности шума датчика. При увеличении интенсивно-

сти шума датчика происходит снижение коэффициента передачи фильтра, в результате чего его полоса пропускания уменьшается. Это, в свою очередь, приводит к снижению интенсивности шумовой составляющей на выходе фильтра.

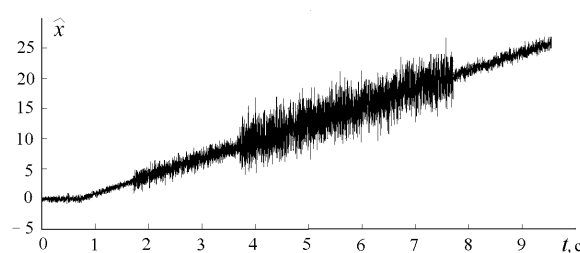
Сравнительный анализ величины среднего квадрата ошибки сигнала на выходе фильтра с адаптацией коэффициента усиления и без нее показывает, что для адаптивного фильтра средний квадрат ошибки сигнала уменьшается на 25–30 %.



а



б



в

Рисунок 2 – Реализации процессов для неадаптивного фильтра сглаживания: а – процесс на входе фильтра; б – график изменения коэффициента фильтра; в – процесс на выходе фильтра

На рисунках 3 и 4 представлены графики спектральной плотности мощности $S(\omega)$ сигналов на выходе фильтров при одинаковых сигналах на входе. Их анализ позволяет сделать вывод о том, что адаптивный фильтр сглажива-

ния обеспечивает более интенсивное подавление высокочастотных составляющих спектра входного сигнала.

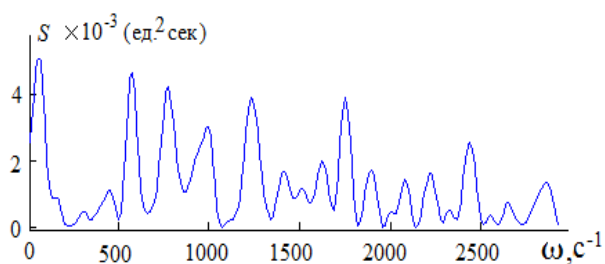


Рисунок 3 – Спектральная плотность мощности процесса на выходе для неадаптивного фильтра сглаживания

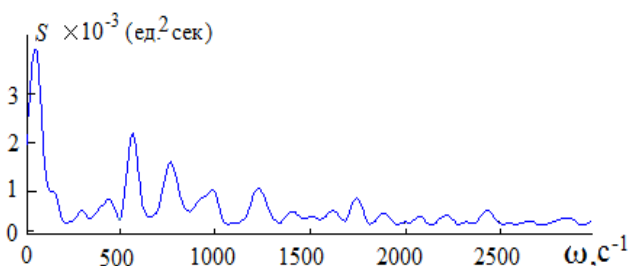


Рисунок 4 – Спектральная плотность мощности сигнала на выходе адаптивного фильтра сглаживания

Заключение

Показана возможность использования адаптивных фильтров с предварительной статистической обработкой невязок измерений для сглаживания сигналов микроэлектромеханических

датчиков в пилотажно-навигационных комплексах беспилотных летательных аппаратов.

Проведено математическое моделирование предложенных алгоритмов сглаживания, а также представлен сравнительный анализ точности неадаптивного и адаптивного фильтров первого порядка. Анализ показал, что для адаптивного алгоритма средний квадрат ошибки фильтрации снижается на 25–30 %.

Список использованных источников

1. Малютин, Д.М. Автопилоты / Д.М. Малютин, С.В. Телухин, М.Г. Погорелов // Приложение. Справочник. Инженерный журнал. – 2010. – № 11. – С. 20–24.
2. Иванов, Ю.В. Исследование статистических характеристик микроэлектромеханических датчиков инерциального модуля / Ю.В. Иванов, В.А. Орлов, Р.В. Алалуев, В.В. Матвеев // Датчики и системы. – 2007. – № 1. – С. 25–26.
3. Распопов, В.Я. Микросистемная авионика : учебное пособие / В.Я. Распопов. – Тула : Гриф и К, 2010. – 248 с.
4. Кузовков, Н.Т. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация / Н.Т. Кузовков, О.С. Салычев. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с.
5. Малкин, В.А. Двухэтапные алгоритмы оценивания в системах автосопровождения движущихся объектов / В.А. Малкин // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-тех. наук. – 1999. – № 4. – С. 56–59.

Malkin V.A.

The adaptive smoothing filters of sensor signals in the microavionic systems

The adaptive for intensity of measuring noise filters for smooth of sensor signals are considered. The adaptation are realized at the expense of the statistical processing of the filtering errors. The algorithm of adaptive filter coefficients calculation and modeling results are presented. (E-mail: vitalic767@gmail.com)

Key words: the inertial systems, the random sensor errors, the adaptive smoothing filters.

Поступила в редакцию 10.01.2012.