

ИНФОРМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 681.511

А. Н. Шумский, Д. С. Карпович
Белорусский государственный технологический университет

НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР КАК УСТРОЙСТВО ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗМУЩЕНИЙ

Произведены анализ и обработка информации с применением теории нечетких множеств. Осуществлено аналитическое сравнение фильтрации по Калману и фильтрации с помощью нечеткого регулятора. Сравнение способов фильтрации проводилось в среде графического моделирования Simulink пакета Matlab. На основании полученных результатов выбран способ фильтрации для канала стабилизации крена системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом (БЛА) при полете по маршруту.

В данной статье предлагается использование теории нечетких множеств для уменьшения влияния внешних возмущений на систему автоматического управления беспилотным летательным аппаратом для стабилизации крена при полете по маршруту.

Ключевые слова: система управления, беспилотный летательный аппарат, нечеткий регулятор, фильтр Калмана.

A. N. Shumski, D. S. Karpovich
Belarusian State Technological University

FUZZY CONTROLLER AS A DEVICE OF PERTURBATION FILTRATION

The analysis and processing of information using the theory of fuzzy sets has been made. An analytical comparison of Kalman filtering and filtering ability using a fuzzy controller has been obtained. Comparison of filtering methods was carried out in the Matlab Simulink graphical modeling environment. Based on the results obtained, a filtering method was chosen for the roll stabilization channel of the automatic control system of the unmanned aerial vehicle when flying along a route.

This article proposes the use of the theory of fuzzy sets to reduce the influence of external disturbances on the automatic control system of an unmanned aerial vehicle to stabilize the bank when flying along a route.

Key words: control system, unmanned aerial vehicle, fuzzy regulator, Kalman filter.

Введение. Для обработки сигналов используют анализ. Главной целью анализа является сопоставление сигналов одного с другим для нахождения отличия либо же однообразия. Детерминированный сигнал – сигнал, параметры которого можно определить в любой момент времени с вероятностью, равной единице. Основное отличие случайных сигналов от детерминированных заключается в том, что для случайных сигналов неизвестны мгновенные значения. Данные значения возможно предска-

зывать лишь с некой вероятностью, которая меньше единицы. Характеристики для случайных сигналов имеют вероятностный вид. Случайным процессом называют математическую модель изменяющегося во времени случайного сигнала. Основной особенностью случайного процесса является то, что в любой момент времени значение этого процесса есть случайная величина. До момента фиксации случайный сигнал необходимо рассматривать как случайный процесс, имеющий совокупность функций от

времени. Данные функции подчиняются некоторому общему для этих функций статическому закону.

Для получения характеристик и анализа свойств случайных процессов необходимо знать его математическую модель. Зачастую данная модель представляет собой совокупность реализаций случайного процесса с учетом частоты появлений в некоторый момент времени.

В системах управления беспилотными летательными аппаратами имеются помехи (возмущения), такие как ветер, изменение атмосферных характеристик, изменение напряжения питания для управления рулевыми машинками, изменение тяги и т. д., действующие на канал передачи информации и канал регулирования. Зачастую отсутствует какая-либо информация об этих помехах, вследствие чего необходимо считать эти факторы случайными величинами с заранее неизвестными законами распределения. В результате возникают две проблемы: первая – управление в условиях неопределенности, вторая – необходимость уменьшения помех [1].

Основная часть. Случайные процессы являются функциями от времени, которые в определенный момент времени t принимают значение случайной величины $x(t)$. Плотность вероятности $p(x, t)$ случайной величины является основной характеристикой. Плотность вероятности обуславливает функции математического ожидания и дисперсии случайных величин [2]:

$$\begin{aligned} M_x(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)p(x, t)dx; \\ D_x(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} (x(t) - M_x(t))^2 p(x, t)dx. \end{aligned} \quad (1)$$

Для описания статистической взаимосвязи значений $x(t)$ в разные моменты времени вводится корреляционная функция сигнала $x(t)$:

$$K_x(t_1, t_2) = M[(x(t_1) - M_x(t_1)) \times (x(t_2) - M_x(t_2))]. \quad (2)$$

Различают стационарный случайный процесс, для которого корреляционная функция зависит от разности t_1 и t_2 , а именно: $K(t_1, t_2) = K(t_1 - t_2) = K(t)$. У стационарного случайного процесса математическое ожидание и дисперсия являются константами.

В случае если взять интеграл Фурье от корреляционной функции, то получим спектральную плотность $S(\omega)$:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (3)$$

Спектральная плотность показывает разложение мощности процесса на гармонические составляющие. Рассмотрим систему автоматического управления с учетом двух особенностей: первая – существует помеха в канале управления, вторая – существует помеха в измерительном канале. Главной задачей является уменьшение влияния помех в обоих каналах.

В случае если имеются помехи с бесконечным равномерным спектром, то данным помехам будет соответствовать корреляционная функция вида:

$$\begin{cases} S(\omega) = \sigma^2 = \text{const}, \\ K(\tau) = \frac{\sigma^2}{2\pi} \delta(\tau), \\ D = K(0) = \infty. \end{cases} \quad (4)$$

Система уравнений (4) описывает белый шум с интенсивностью, равной σ^2 , и бесконечной мощностью.

Фильтрация должна обеспечивать наибольшее снижение влияния помех. Пусть рассматриваемые помехи имеют случайную природу с известными корреляционными функциями.

Модель входного сигнала имеет вид: $u(t) = s(t) + q(t)$; где $s(t)$ – полезная составляющая сигнала управления; $q(t)$ – составляющая шумов и помех.

Разработка фильтров происходит с использованием известной априорной информации о сигналах, шумах и помехах. Обычно используется информация, учитывающая корреляционные характеристики. В случае когда корреляционная информация отсутствует, создание корректно работающего фильтра становится практически невозможным.

Качество фильтра можно определить с помощью критерия минимизации среднего квадратичного отклонения:

$$\overline{\varepsilon^2} = [\overline{y(t) - s(t)}]^2. \quad (5)$$

Данный критерий зависит от выходного сигнала и от полезной составляющей сигнала управления.

Задача предсказания значений случайного процесса, порождаемого белым шумом, пропущенным через линейный фильтр, является наиболее типичной для калмановской фильтрации. Для оценки случайных процессов в системах навигации движущихся объектов достаточно часто и эффективно применяется фильтр Калмана, который удовлетворительно работает на больших объектах с разнообразным навигационным оборудованием. Для БЛА задача сни-

жения уровня отклонения от заданной траектории движения остается открытой, так как влияние на них сопутствующих неопределенностей более значительно.

Рассмотрим фильтрацию по Калману. Фильтр Калмана – рекурсивный фильтр, оценивающий вектор состояния динамической системы. Фильтр используется для фильтрации зашумленных сигналов с возможностью прогнозирования будущего состояния системы управления.

Фильтр Калмана используется для рекурсивного дооценивания вектора состояния известной динамической системы. Поэтому для получения текущего значения системы управления необходимо знать текущее измерение, а также предыдущее состояние самого фильтра. Ввиду этого фильтр Калмана реализован во временном представлении, а не в частотном, таким образом фильтр оперирует не только оценками состояния, но и оценками неопределенности (плотности распределения) вектора состояния, опираясь на формулу Байеса условной вероятности.

Алгоритм работает в два этапа. На этапе прогнозирования фильтр Калмана экстраполирует значения переменных состояния, а также их неопределенности. На втором этапе по данным измерения (полученного с некоторой погрешностью) результат экстраполяции уточняется. Благодаря пошаговой природе алгоритма, он может в реальном времени отслеживать состояние объекта (без заглядывания вперед, используя только текущие замеры и информацию о предыдущем состоянии и его неопределенности).

Исследуемая модель объекта управления имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Gw, \\ y_v = Cx + Du + Hw + v \end{cases} \quad (6)$$

с известными входами u , возмущениями по входам w и измерениям v , которые являются белым шумом со следующими характеристиками:

$$\begin{aligned} M\{w\} &= M\{v\} = 0; \\ M\{w(t)w(\tau)^T\} &= Q\delta(t - \tau); \\ M\{v(t)v(\tau)^T\} &= R\delta(t - \tau); \\ M\{v(t)w(\tau)^T\} &= N\delta(t - \tau). \end{aligned} \quad (7)$$

Требуется выполнить синтез наблюдателя для оценки вектора состояния объекта, который минимизирует установившуюся ошибку:

$$P = \lim_{t \rightarrow \infty} M\{(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T\}. \quad (8)$$

Фильтр описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y_v - C\hat{x} - Du), \\ \begin{bmatrix} \hat{y}_v \\ \hat{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ I \end{bmatrix} \hat{x} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} u + Hw + v, \end{cases} \quad (9)$$

где матрица коэффициентов обратных связей L определяется на основе решения алгебраического матричного уравнения Риккати. Например, при $H = 0$ дисперсия P определяется из уравнения

$$AP + PA^T - (PC^T + GN)R^{-1} \times (CP + N^T G^T) + GQG^T = 0. \quad (10)$$

Матрица коэффициентов обратных связей L определяется из решения уравнения Риккати.

$$L = APC^T(N + CPC^T)^{-1} = 0. \quad (11)$$

Наблюдатель использует известные входы u и результаты измерений y_v , искаженные случайными помехами для того, чтобы вычислить оценки вектора переменных состояния \hat{x} и выходов \hat{y} (рис. 1) [3].

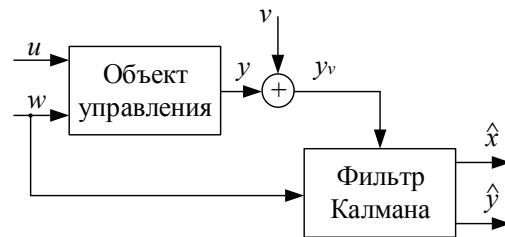


Рис. 1. Наблюдатель Калмана

Рассмотрим переходный процесс стабилизации крена, а именно исходный зашумленный сигнал (рис. 2–4), фильтрацию Калмана и способ уменьшения воздействия внешних возмущений с помощью нечеткого регулятора.

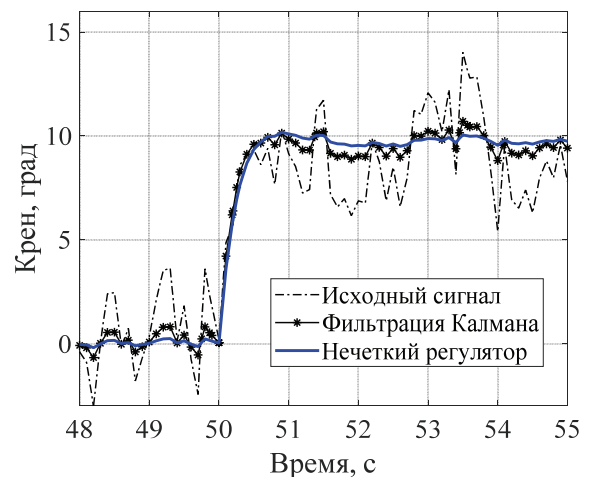


Рис. 2. Переходный процесс стабилизации крена от 0 до 10°

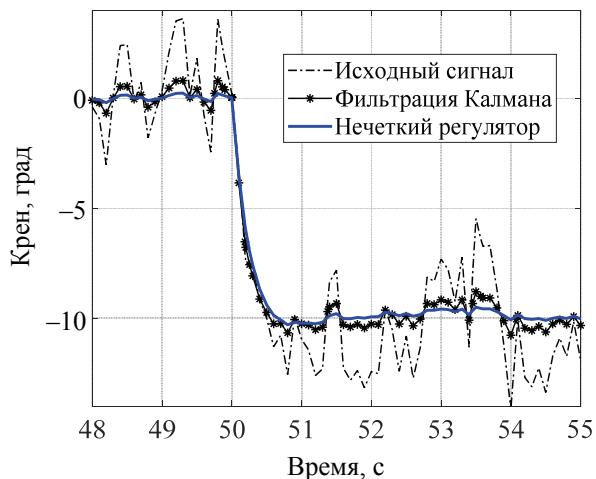


Рис. 3. Переходный процесс стабилизации крена от 0 до -10°

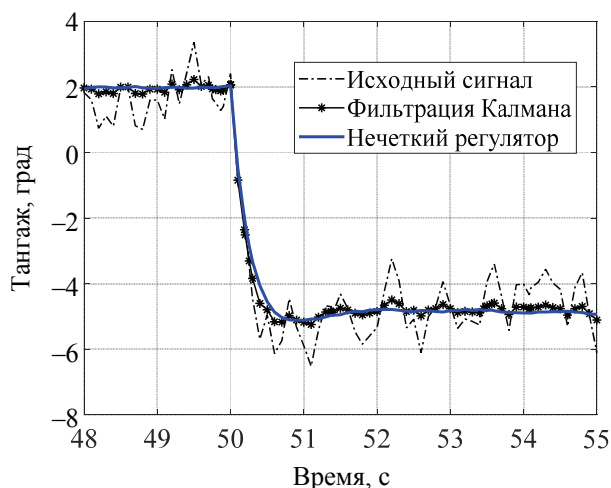


Рис. 6. Переходный процесс стабилизации тангажа от 2 до -5°

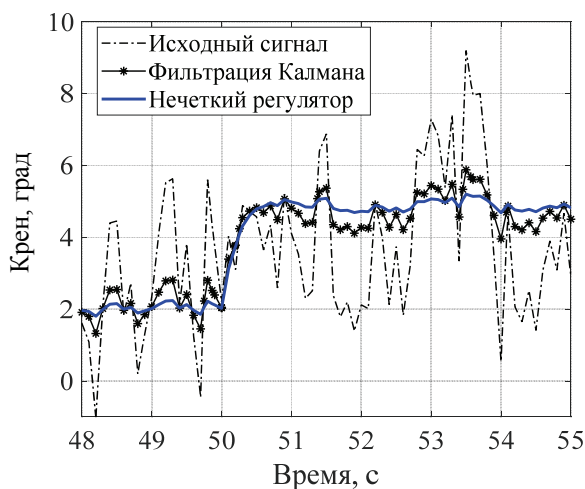


Рис. 4. Переходный процесс стабилизации крена от 2 до 5°

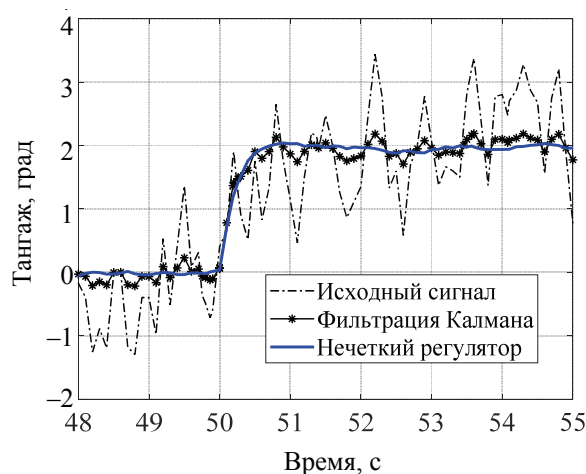


Рис. 7. Переходный процесс стабилизации тангажа от 0 до 2°

Также рассмотрим переходный процесс стабилизации тангажа (рис. 5–7).

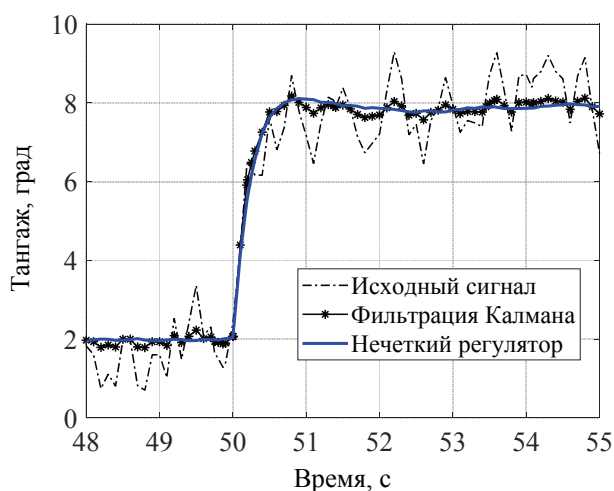


Рис. 5. Переходный процесс стабилизации тангажа от 2 до 8°

Заключение. Безопасное и эффективное применение беспилотных летательных аппаратов связано с функционированием систем автоматического управления. Для эффективной работы системы автоматического управления важно обеспечить своевременность подачи управляющих сигналов на органы управления беспилотного летательного аппарата, которые зависят от логики управления, летных характеристик беспилотного летательного аппарата, характеристик датчиков и исполнительных механизмов с учетом возможного шума, установленных в аппарате.

Теорию нечетких множеств возможно использовать для уменьшения влияния внешних возмущений на систему автоматического управления беспилотным летательным аппаратом. Также для снижения воздействия помех на систему управления можно применять фильтрацию Калмана. Однако следует учесть тот факт, что для фильтрации Калмана необходимо

знание математической модели объекта управления, что в свою очередь накладывает ограничения на использование фильтрации для системы управления беспилотным летательным аппаратом, поскольку не всегда есть возможность

описать его в виде простых математических формул. Эта проблема решается с помощью теории нечетких множеств. В случае ее применения нет необходимости знать точную математическую модель объекта управления.

Литература

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 604 с.
2. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Control System Toolbox. MATLAB 5 для студентов / М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. 287 с.
3. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

References

1. Sergienko A. B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. St. Petersburg, Piter Publ., 2003. 604 p.
2. Medvedev V. S., Potemkin V. G. *Control System Toolbox. MATLAB 5 dlya studentov* [Control System Toolbox. MATLAB 5 for students]. Moscow, DIALOG-MEFI Publ., 1999. 287 p.
3. Leonenkov A. V. *Nechetkoye modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy simulation in MATLAB and fuzzyTECH]. St. Petersburg: BKhV-Petersburg Publ., 2005. 736 p.

Информация об авторах

Шумский Андрей Николаевич – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: andreishumski91@gmail.com

Карпович Дмитрий Семенович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: karpovich@tut.by

Information about the authors

Shumski Andrei Nikolaevich – assistant lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andreishumski91@gmail.com

Karpovich Dmitriy Semenovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karpovich@tut.by

Поступила 30.03.2018