

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 629.735.33

БЕНКАФО
Ахмед Саид

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ
И АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Минск 2016

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель Лобатый Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: Татур Михаил Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электронные вычислительные машины» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Калитин Сергей Борисович, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника авиационного факультета Военной академии Республики Беларусь

Оппонирующая организация Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита состоится 22 декабря 2016 г. в 16 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. (8-017) 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан 21 ноября 2016 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент

М.П. Ревотюк

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

На всех этапах разработки и применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) важнейшей задачей является обеспечение максимального использования всех возможностей системы управления при решении стоящих перед БЛА задач. Так как производство и эксплуатация БЛА, которые являются сложными высокотехнологичными комплексами, связано с большими материальными затратами, то на всех этапах их разработки, особенно на начальной стадии, необходимо учитывать стремление заказчиков и конструкторов к обеспечению максимальной эффективности применения перспективных БЛА. Одним из путей повышения эффективности БЛА является комплексирование технических средств БЛА, обеспечивающих информационное обеспечение и управление. Так как выполнение большинства задач, стоящих перед БЛА, зависит от поступающей в систему управления от различных источников информации, то комплексное использование этой информации позволяет повысить эффективность системы управления.

Современные информационные системы и технологии позволяют в реальном времени одновременно обрабатывать на борту БЛА большой объем информации. Оптимальная обработка поступающей с измерителей зашумленной информации с одновременным использованием априорно известных математических моделей оцениваемых процессов и характеристик неопределенностей основана на применении алгоритмов так называемой калмановской фильтрации. Применение этих алгоритмов для комплексирования различных источников информации, несмотря на развитую теорию оптимизации, имеет свои особенности. Некорректное использование алгоритмов оптимальной обработки информации может вместо повышения точности выходной информации привести к недопустимым ошибкам, называемым расходимостью фильтров. Поэтому задача оптимального алгоритмического комплексирования источников информации БЛА всегда является актуальной.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема работы соответствует научному направлению кафедры систем управления и кафедры электронных вычислительных машин учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Работа проводилась в рамках научно-технической работы ГБ № 10-114 «Математическое и программное обеспечение систем обработки

информации в образовании и автоматизированных системах управления техническими объектами», проводимой БГУИР, а также в рамках научных программ Ливии.

Цель и задачи исследований

Целью работы является разработка методик и алгоритмов обработки информации для управления беспилотным летательным аппаратом и оценки его эффективности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ принципов построения систем управления БЛА и принципов комплексирования их источников информации.
2. Провести анализ и исследование особенностей алгоритмической фильтрации в комплексах ориентации и навигации БЛА.
3. Обосновать принципы комплексирования источников информации БЛА в условиях возможных изменений режимов функционирования системы управления.
4. Разработать алгоритмы фильтрации и идентификации состояния системы управления БЛА.
5. Разработать методику и алгоритмы оценки эффективности БЛА при решении различных задач управления и мониторинга.

Научная новизна

1. Предложена система комплексирования различных источников информации системы управления БЛА, включающая алгоритмы оценивания навигационных параметров и идентификации состояния БЛА, позволяющая обеспечить эффективную работу системы управления БЛА в условиях наличия неопределенностей в выходной информации датчиков и при наличии случайных скачкообразных изменений режимов работы подсистем БЛА.

2. Разработан способ структурно-параметрической коррекции алгоритмов фильтрации навигационных параметров БЛА на основе использования системы нечеткой логики, отличающийся методом вычисления в блоке фазификации функций принадлежности путем нормировки апостериорной плотности вероятности распределения оцениваемых параметров.

3. Разработана общая методика оценки эффективности применения БЛА на различных этапах траектории полета, учитывающая стохастическую постановку задачи и позволяющая на этапе предварительного проектирова-

ния обосновать основные требования к элементам информационной подсистемы системы управления БЛА.

Положения, выносимые на защиту

1. Система комплексирования источников информации системы управления БЛА, включающая алгоритмы оценивания навигационных параметров и алгоритмы идентификации состояния БЛА, отличающаяся учетом неопределенностей в выходной информации датчиков и случайных скачкообразных изменений режимов работы подсистем БЛА.

2. Способ структурно-параметрической коррекции алгоритмов фильтрации навигационных параметров БЛА на основе использования системы нечеткой логики, отличающийся методом вычисления в блоке фазификации функций принадлежности путем нормировки апостериорной плотности вероятности распределения оцениваемых параметров.

3. Методика оценки эффективности применения БЛА на различных этапах траектории полета, учитывающая стохастическую постановку задачи и позволяющая на этапе предварительного проектирования обосновать основные требования к элементам информационной подсистемы системы управления БЛА.

Личный вклад соискателя ученой степени

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, получены лично автором. Научный руководитель принимал участие в постановке задач, определении возможных путей их решения, предварительном анализе, обсуждении результатов исследований, проведенных автором. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками диссертационной работы.

Автор самостоятельно получил основные результаты диссертационной работы. Общая концепция исследований и отдельные теоретические методы разработаны совместно с научным руководителем.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на одиннадцатой, двенадцатой и тринадцатой международных научно-технических конференциях БНТУ «Наука – образованию, производству, экономике» 2011 – 2015 гг., международных интернет-конференциях. Результа-

ты диссертации также докладывались на научных семинарах кафедры ЭВМ БГУИР и кафедры «Информационные системы и технологии» БНТУ.

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликованы 4 научные статьи в рецензируемых журналах согласно перечню ВАК Республики Беларусь общим объемом 2,8 авторского листа и 9 тезисов докладов на научных конференциях. Количество и объем публикаций по теме диссертации соответствуют пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, трех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, дается обоснование круга рассмотренных вопросов. В первой главе проведен анализ и обоснование принципов комплексирования элементов системы управления БЛА. Во второй главе решаются задачи синтеза алгоритмов комплексирования источников информации системы управления БЛА. В третьей главе приведена методика и алгоритмы оценки эффективности применения БЛА. В приложении приведены дополнительные теоретические материалы, поясняющие обоснованность основных научных результатов диссертационных исследований.

Общий объем диссертации составляет 139 страниц. Из них 95 страниц основного текста, 58 рисунков на 40 страницах, 1 таблица на 1 странице, библиографический список, насчитывающий 87 наименований, и список публикаций автора по теме диссертации на 8 страницах, а также 7 приложений на 18 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении показана актуальность темы, обоснована необходимость проведения работы по анализу и аналитическому синтезу построенных на новых принципах систем управления беспилотных летательных аппаратов, показана практическая значимость работы.

В первой главе рассматривается современное состояние изучаемого вопроса, проводится анализ принципов построения систем управления БЛА, рассмотрены различные схемы комплексирования источников информации.

На основе проведенного анализа обосновано, что полная математическая модель БЛА и влияющих на него внешних факторов может быть представлена совокупностью стохастических дифференциальных уравнений в форме Ланжевена. Так как состояние БЛА (вид уравнений) может изменяться скачкообразно в случайные моменты времени, то математическую модель для исследования БЛА можно рассматривать как марковский случайный процесс случайной структуры, который характеризуется номером структуры (состояния) $S(t) = 1, ns$ и вектором состояния $X(t)$ (1). Номер $S(t)$ – случайный дискретный процесс, принимающий значения на конечном счетном множестве $1, ns$. Каждый компонент $s_i(t)$ этого вектора принимает значения $s_i(t) = 1, ns$.

$$\dot{X}^{(s)}(t) = \varphi^{(s)}(X, t) + W^{(s)}(X, t)U(t) + H^{(s)}(X, t)\xi(t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где $X^{(s)}(t)$ – в общем случае n -мерный случайный вектор (матрица-столбец); $\varphi^{(s)}(X, t)$ – векторная функция; $W^{(s)}(X, t)$, $H^{(s)}(X, t)$ – матричные нелинейные функции; $U(t)$ – r -мерная ($r < n$) векторная функция управления; $\xi(t)$ – n -мерный вектор центрированного гауссова белого шума с положительно определенной матрицей интенсивностей $G(t)$ и матрицей корреляционных функций $K_\xi(t, t') = G(t)\delta(t - t')$, $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака. $S(t) = \{s, t\}$ – индекс структуры системы.

Проведенный анализ особенностей применения алгоритмической (калмановской) фильтрации в комплексах ориентации и навигации БЛА показал, что фильтр Калмана (ФК) целесообразно использовать для комплексирования различных измерителей. При этом одним из измерителей комплекса ориентации и навигации является бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), представляющая собой математическую модель движения БЛА в пространстве. В этом случае вектор состояния $X(t) = X_{\text{БИНС}}(t)$, $\xi(t) = \xi_{\text{БИНС}}(t)$. $X_{\text{БИНС}} = [x_{1Б}, \dots, x_{nБ}]^T$, где $x_{iБ}$ ($i = \overline{1, n}$) – i -й выходной параметр БИНС. В качестве вектора $\xi_{\text{БИНС}} = [\xi_{1Б}, \dots, \xi_{nБ}]^T$ рассматриваются математические модели инструментальных погрешностей БИНС, приведенные к белым шумам в пределах соответствующих полос пропускания. В качестве вектора измерений $Z = [z_1, \dots, z_m]^T$ в данном случае выступают показания дополнительных измерителей, например спутниковая навигационная система (СНС). При этом модели погрешности измерений также сводятся к белым шумам в пределах заданных диапазонов. На рисунке 1 представлена структурная схема комплексирования БИНС и СНС.

В процессе функционирования основной информационной составляющей системы управления БЛА – КОН возможны случаи внезапного скачкообразного изменения режимов работы комплекса ориентации и навигации (КОН). Эти изменения могут быть обусловлены внезапными отказами одного из датчиков бортовой составляющей КОН или перерывами поступления информации от СНС. В такой системе необходимо иметь индикатор (определитель) режима и измерители фазовых координат.

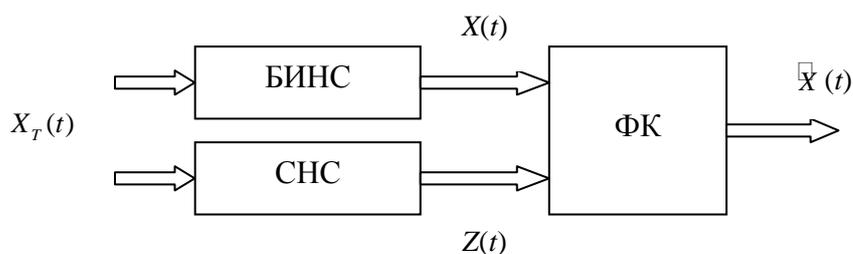


Рисунок 1. – Структурная схема комплексирования измерителей КОН

При комплексировании индикаторов и измерителей определяется совместный закон распределения фазовых координат и структуры (режима), на основании которого могут быть найдены оптимальные оценки фазовых координат и индекса структуры системы (рисунок 2). На рисунке 2 $Z(t)$ – вектор выходных сигналов измерителей; $r(t)$ – дискретный выходной сигнал индикатора; $\eta(t)$ и $\xi(t)$ – случайные помехи (стационарные неопределенности).

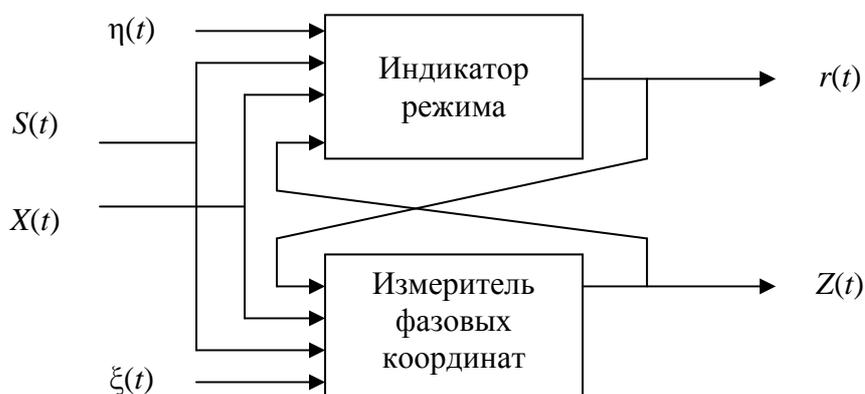


Рисунок 2. – Схема комплексной системы наблюдения

Так как свойства канала наблюдения зависят от процессов, протекающих в фильтре, то задача оптимальной фильтрации измеряемых фазовых координат системы (навигационных параметров КОН) формулируется с помощью структурной схемы, изображенной на рисунке 3. При этом свойства канала наблюдения могут изменяться под влиянием управляющего воздействия $U(t)$, которое формируется в фильтре таким образом, чтобы обеспечить

наилучшие условия фильтрации (получения оптимальной оценки $\hat{X}(t)$). Такая постановка относится к комбинированным задачам, когда в процессе фильтрации необходимо одновременно вести управление свойствами канала наблюдения.

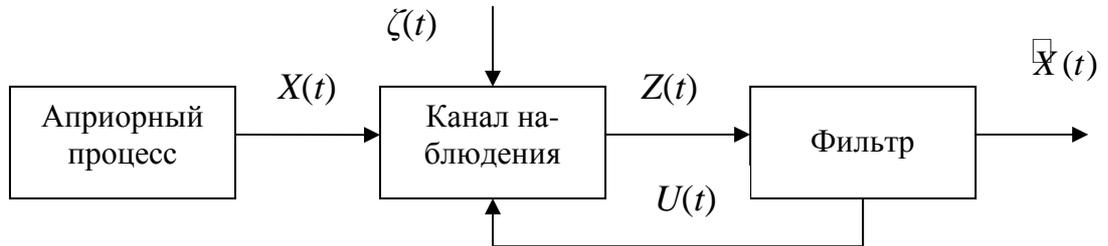


Рисунок 3. – Схема оптимальной фильтрации с управлением процессом наблюдения

Во **второй главе** разработаны алгоритмы комплексирования источников информации системы управления БЛА. В основу положено обобщенное уравнение Стратоновича–Кушнера для апостериорных ненормированных плотностей вероятности. Это позволяет решать задачи фильтрации (определения оценок вектора фазовых координат системы), а также – для идентификации состояния (режима) – определения вероятностей нахождения системы в каждом режиме в реальном времени.

Одной из основных проблем при реализации алгоритма фильтрации является неадекватность математических моделей объекта управления и измерителя реальным физическим процессам. Рассмотрим использование fuzzy-коррекции фильтра Калмана при наличии дополнительного измерителя. При такой постановке задачи используются более одного измерителя процесса $X(t)$ и соответствующих им фильтров. На рисунке 4 представлена схема структурно-параметрической нечеткой коррекции алгоритма фильтрации для случая использования двух измерителей процесса $X(t)$.

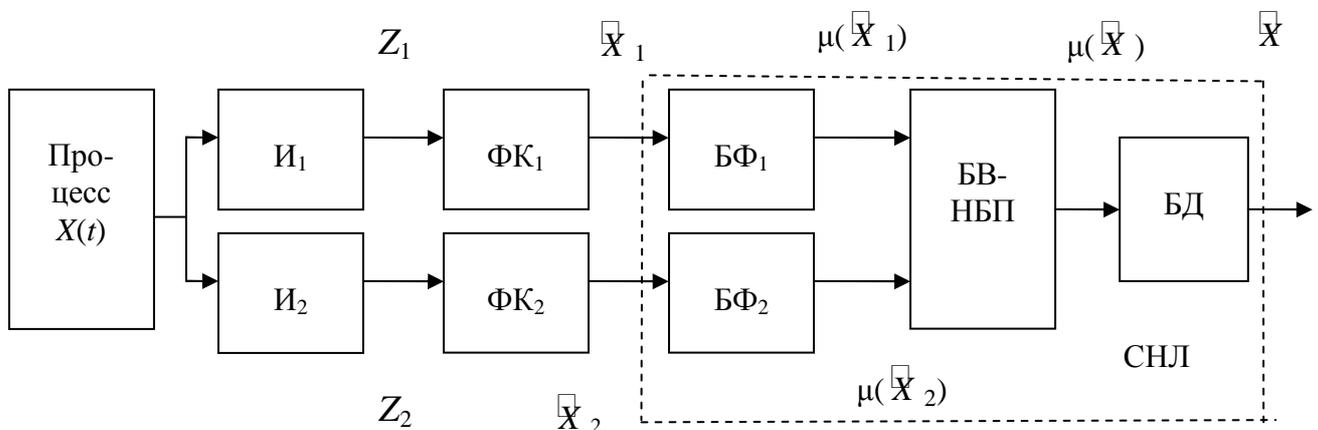


Рисунок 4. – Схема структурно-параметрической нечеткой коррекции

На рисунке 4 обозначено: I_1 и I_2 – измерители процесса $X(t)$; $ФК_1$ и $ФК_2$ – фильтры Калмана; $БФ_1$ и $БФ_2$ – блоки фаззификации; $БВ-НБП$ – блок вывода с нечеткой базой правил; $БД$ – блок дефаззификации.

Так как в нашем случае входной сигнал системы является случайным, то блок фаззификации должен преобразовывать в нечеткие числа вероятностные данные. Решение уравнений фильтрации позволяет получить вектор апостериорных математических ожиданий $\bar{X} = \bar{X}(t)$ и матрицу апостериорных корреляционных моментов $R_x = R_x(t)$. Это предполагает, что плотность вероятности распределения процесса $\bar{X}(t)$ гауссова, что в большинстве практических задач вполне допустимо. Этого вполне достаточно для определения n -мерной плотности вероятности $f(\bar{X}, t)$, которая имеет вид

$$f(\bar{X}, t) = \frac{1}{\sqrt{2^n \pi^n \Delta(t)}} \exp \left[\frac{\Delta^*(t)}{2\Delta(t)} \right], \quad (2)$$

где $\Delta(t)$ – определитель матрицы $R_x(t)$; $\Delta^*(t)$ – окаймленный определитель, получаемый из $\Delta(t)$ путем приписывания одного $(n+1)$ столбца и $(n+1)$ строки, состоящих из членов $x_1(t) - \bar{x}_1(t)$, $x_2(t) - \bar{x}_2(t)$, ..., $x_n(t) - \bar{x}_n(t)$, 0.

Переход от плотности вероятности $f(\bar{X}) = f(\bar{X}, t)$ к функции принадлежности $\mu(\bar{X}, t)$ предлагается производить путем нормирования $f(\bar{X}, t)$. При этом предполагается, что

$$\mu(\bar{X}, t) = \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_n, t)}{f(x_1 = \bar{x}_1, x_2 = \bar{x}_2, \dots, x_n = \bar{x}_n, t)}. \quad (3)$$

В качестве примера при оценке работоспособности предлагаемого подхода рассматривалось оценивание одного из навигационных параметров БЛА. Входящие в математические модели оцениваемого процесса и измерителя коэффициенты выбирались для гипотетической системы управления БЛА. Значения этих коэффициентов на качественную картину работы алгоритма фильтрации существенного влияния не оказывают.

На рисунках (5) и (6) представлены качественные результаты математического моделирования работоспособности алгоритма структурно-параметрической коррекции алгоритма оценки гипотетического навигационного параметра системы управления БЛА. На рисунке 5 представлены модель оцениваемого процесса $X(t)$ (а) и реализация случайного процесса на выходе измерителя $Z_1(t)$ (б). На рисунке 6 представлены выходной сигнал фильтра $ФК1$ $\bar{X}_1(t)$ (а) и оценка выходного сигнала, полученная после коррекции в системе нечеткой логики $\bar{X}(t)$ (б).

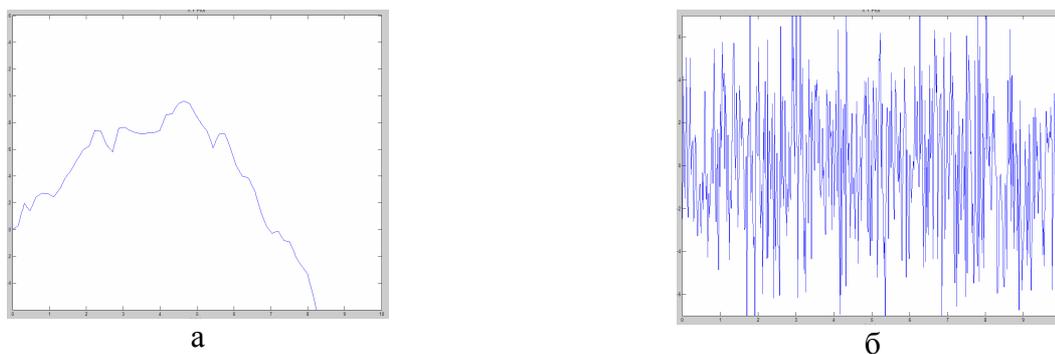


Рисунок 5. – Реализации случайного процесса и измерения

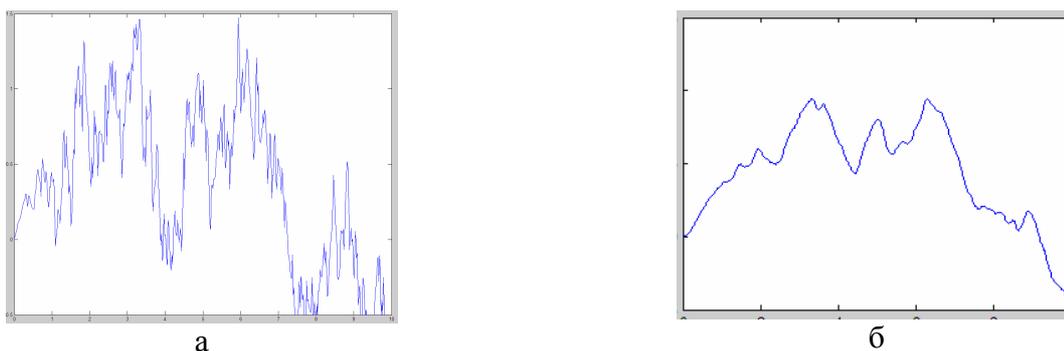


Рисунок 6. – Реализации результатов фильтрации

На рисунке 7 представлена схема математической модели последовательного изменения режимов БИНС-СНС. На рисунке 7 обозначено: КН – канал наблюдения; ИФИ – интегральный фильтр-идентификатор; $\zeta(t)$ – шумы наземных систем СНС; s – номер режима работы системы.

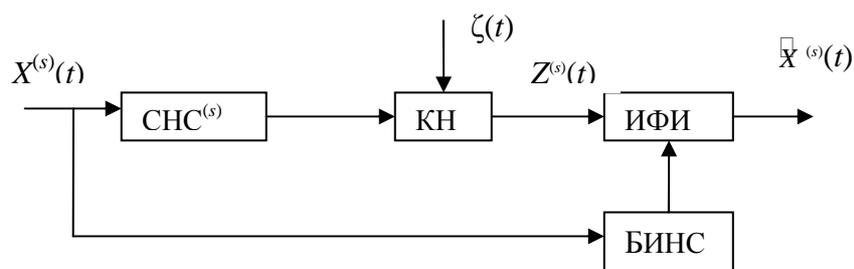


Рисунок 7. – Схема изменения режимов БИНС-СНС

Оцениваемый процесс и измеритель с учетом случайности режима работы (структуры) системы описываются выражениями, которые имеют вид

$$X_k^{(s)} = A_{k-1,k}^{(s)} X_{k-1}^{(s)} + L_{k-1,k}^{(s)} U_{k-1}^{(s)} + H_{k-1,k}^{(s)} \xi_{k-1}^{(s)}, \quad (4)$$

$$Z_k^{(s)} = C_k^{(s)} X_k^{(s)} + K_k^{(s)} U_k^{(s)} + \zeta_k^{(s)}. \quad (5)$$

Алгоритм дискретного фильтра Калмана описывается системой рекуррентных выражений, которые для системы случайной структуры имеют вид

$$\begin{aligned}\tilde{X}_k^{(s)} &= A_{k-1,k}^{(s)} X_{k-1}^{(s)} + L_{k-1,k}^{(s)} U_{k-1}, \\ \hat{X}_k^{(s)} &= \tilde{X}_k^{(s)} + B_k^{(s)} [Z_k - C_k^{(s)} \tilde{X}_k^{(s)} - K_k^{(s)} U_k],\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}B_k^{(s)} &= \tilde{R}_k^{(s)} C_k^{(s)T} [C_k^{(s)} \tilde{R}_k^{(s)} C_k^{(s)T} + Q_k]^{-1}, \\ \tilde{R}_k^{(s)} &= A_{k-1,k}^{(s)} R_{k-1}^{(s)} A_{k-1,k}^{(s)T} + H_{k-1,k}^{(s)} G_k^{(s)} H_{k-1,k}^{(s)T}, \\ R_k^{(s)} &= (E - B_k^{(s)} C_k^{(s)}) \tilde{R}_{k-1}^{(s)},\end{aligned}\quad (7)$$

где $\tilde{X}_k^{(s)}$, $\hat{X}_k^{(s)}$ – априорная и апостериорная оценки вектора состояния на k -м шаге; $\tilde{R}_k^{(s)}$, $R_k^{(s)}$ – априорная и апостериорная ковариационные матрицы ошибок оценивания; E – единичная матрица.

Рекуррентная формула для апостериорной вероятности состояния (режима работы) системы имеет вид

$$\hat{P}_k^{(s)} = \frac{\tilde{P}_k^{(s)} |\tilde{D}_k^{(s)}|^{-\frac{1}{2}} \exp[-\tilde{h}^{(s)}(Z_k, \tilde{X}_k^{(s)}, \tilde{R}_k^{(s)})]}{\sum_{i=1}^{ns-1} P_k^{(i)} |\tilde{D}_k^{(i)}|^{-\frac{1}{2}} \exp[-\tilde{h}^{(i)}(Z_k, \tilde{X}_k^{(i)}, R_k^{(i)})]},\quad (8)$$

где $\tilde{P}_k^{(s)} = \hat{P}_{k-1}^{(s)}$, $\tilde{D}_k^{(s)} = C_k^{(s)} \tilde{R}_k^{(s)} C_k^{(s)T} + Q_k^{(s)}$;

$\tilde{h}^{(s)}(Z_k, \tilde{X}_k^{(s)}, \tilde{R}_k^{(s)}) = \frac{1}{2} (Z_k - C_k^{(s)} \tilde{X}_k^{(s)} - K_k^{(s)} U_k)^T (\tilde{D}_k^{(s)})^{-1} (Z_k - C_k^{(s)} \tilde{X}_k^{(s)} - K_k^{(s)} U_k)$;

$\tilde{P}_k^{(s)}$ и $\hat{P}_{k-1}^{(s)}$ – априорная и апостериорная вероятности s -го режима на k -м шаге.

Входящие в (8) значения переменных вычисляются с помощью рекуррентного алгоритма (6) – (7).

Таким образом, согласно критерию Байеса оцениваемый процесс имеет режим s_k , чья апостериорная вероятность превышает апостериорные вероятности остальных режимов: $\hat{s} = \hat{s}_k$ при $\hat{P}^{(k)} = \max\{P_1, \dots, P_{ns}\}$. Решая совместно уравнения (6) – (8), можно определить, в каком режиме находится система, и оценить вектор ее фазовых координат (провести фильтрацию сигналов, необходимых для определения навигационных параметров объекта). Общая схема алгоритма оценки состояния и режима работы системы представлена на рисунке 8.

Работа представленных на рисунке 8 блоков описывается соответствующими разностными уравнениями: классификатор – (8), фильтр – (6), дисперсиометр – (7).

В качестве примера проверки работоспособности алгоритмов оценки состояния и режима работы системы рассмотрена гипотетическая ситуация, когда вычисление с помощью БИНС одной из координат БЛА описывается выражением (4), а ее измерение посредством СНС описывается выражением (5). При этом возможны два режима работы СНС, смена которых происходит для БЛА случайным образом. Оценка работоспособности предлагаемых алгоритмов производилась путем моделирования в среде Mathcad.

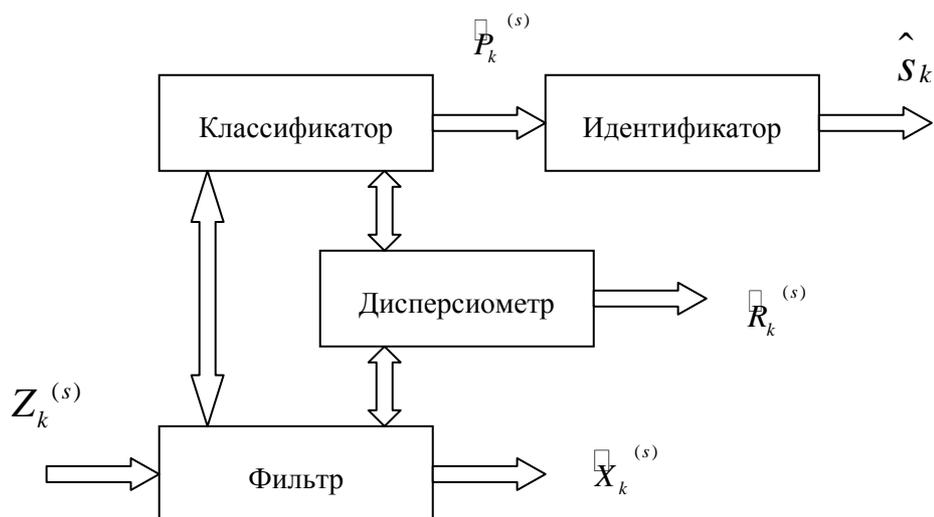


Рисунок 8. – Схема оценки состояния и режима работы

На рисунке 9 представлены графики изменения сигналов на выходе СНС для первого режима $Z_k^{(1)}=z1_k$ и для второго режима $Z_k^{(2)}=z2_k$ системы БИНС-СНС и на выходе фильтра $X_k^{(1)}=x10_k$ и $X_k^{(2)}=x20_k$ соответственно.

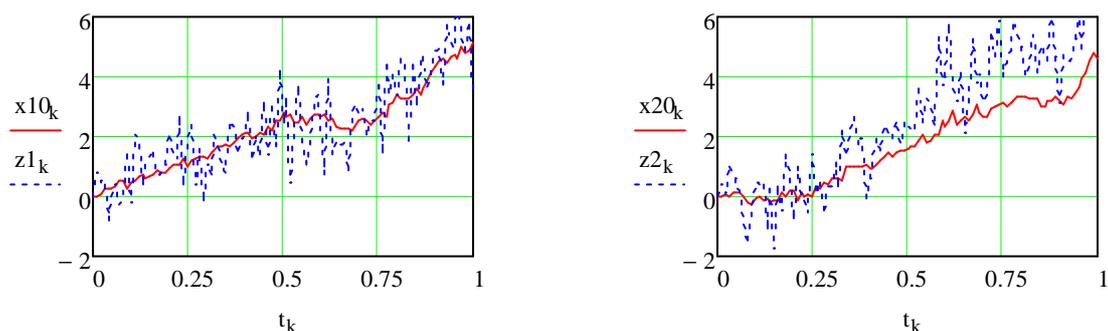


Рисунок 9. – Процессы на выходах измерителей и фильтров

На рисунке 10 приведены временные зависимости апостериорных вероятностей каждого из возможных режимов системы $P^{(1)} = P1_k$ и $P^{(2)} = P2_k$. В алгоритме распознавания априорные вероятности структур задавались равными $P1 = P2 = 0.5$. Обозначения на рисунках 9 и 10 соответствуют среде Mathcad.

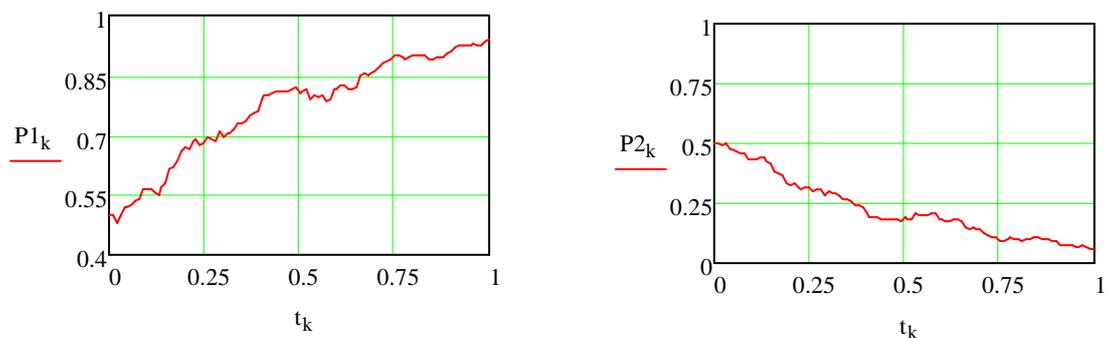


Рисунок 10. – Вероятности возможных режимов системы БИНС-СНС

Анализ результатов моделирования показал, что предлагаемые алгоритмы фильтрации и идентификации режимов позволяют с высокой степенью достоверности определить режим (структуру), в котором находится система БИНС-СНС. Время, необходимое для оценки структуры системы, в данном примере составило менее одной секунды.

Третья глава посвящена разработке методики оценки эффективности беспилотного летательного аппарата. В соответствии с основными задачами БЛА гражданского назначения, их классификацией и целевыми функциями проведено обоснование показателей эффективности БЛА. Так как применение БЛА сопровождается случайными факторами и преследует какую-то вполне определенную цель, которая может быть достигнута только полностью или совсем не достигнута и никакие промежуточные результаты нас не интересуют, то в этом случае в качестве показателя эффективности выбирается вероятность достижения этой цели $W=P(A)$.

Среди всех факторов, определяющих эффективность использования БЛА при их применении, наиболее значительным является точность навигационной системы, в качестве которой в БЛА используется БИНС. Исследование точности БИНС удобно проводить с помощью так называемых уравнений в вариациях, представляющих собой линеаризованные уравнения первого приближения относительно входных ошибок системы. Линеаризованная модель БИНС позволяет представить математическую модель ошибок БИНС в канонической форме в виде линейного векторно-матричного стохастического уравнения в форме Ланжевена (1), для которого справедливы векторно-матричные уравнения для вероятностных моментов.

Путем математического моделирования проведено исследование работоспособности предложенной методики использования метода моментов для оценки точности инерциальной системы БЛА. Аналитическое исследование точности с помощью метода моментов позволяет определить взаимную корреляцию ошибок определения параметров, характеризующих пространственное перемещение БЛА относительно опорной траектории.

При оценке эффективности БЛА на этапах наведения и поиска объекта рассматриваются различные способы наведения, методы поиска объектов в исполнительной зоне и различные состояния, в которых может находиться БЛА. Рассматриваются типовые траектории полета БЛА, которые реализуются при применении данных методов.

Вероятность обнаружения объекта в заданной области земной поверхности может определяться как вероятность того, что угловое положение объекта относительно БЛА ψ_0 находится в диапазоне $[\psi_{01}, \psi_{02}]$. При этом аппаратура БЛА способна обнаружить объект на дальностях $D_{01} \leq D_0 \leq D_{02}$ и в угловом

диапазоне $\Delta_{o1} \leq \Delta_o \leq \Delta_{o2}$. В предположении, что ψ_o , D_o , Δ_o распределены равномерно, искомая вероятность обнаружения объекта вычисляется по формуле

$$P_o = \frac{1}{2\pi S_p} \int_{\psi_{o1}}^{\psi_{o2}} \int_{D_{o1}}^{D_{o2}} \int_{\Delta_{o1}}^{\Delta_{o2}} d\psi_o dD_o d\Delta_o. \quad (9)$$

Здесь S_p – площадь района поиска объекта. φ

При оценке эффективности БЛА при мониторинге земной поверхности рассматривается структура, задачи и показатели эффективности беспилотных авиационных комплексов, предназначенных для сбора информации о наземной обстановке и выработке рекомендаций по принятию решений. Одной из основных задач является определение координат наземных объектов. При этом положение этих объектов может характеризоваться соответствующими статистическими характеристиками неопределенностей. Примером такой задачи является задача определения очага пожара в лесной местности.

Показателем эффективности (выполнения задачи) может служить приращение вероятности недопущения экономических потерь или математического ожидания сохраненных ресурсов, получающееся в результате обработки соответствующей информации. Вероятность недопущения потерь $W_n^{(н)}$ и математическое ожидание сохраненных ресурсов $m_c^{(н)}$ с учетом соответствующего информационного обеспечения можно записать в следующем виде:

$$W_n^{(н)} = W_n \cdot W^{(н)}, \quad (10)$$

$$m_c^{(н)} = m_c \cdot W^{(н)}. \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) W_n и m_c – соответственно вероятность недопущения потерь и математическое ожидание сохраненных ресурсов. $W^{(н)}$ – вероятность выполнения задачи БЛА по получению и обработке соответствующей информации.

В качестве примера рассматривается задача обнаружения с помощью аппаратуры БЛА очага тушения пожара в лесу. Выражение для вероятности своевременного тушения пожара $P_{т.п}$ получено в следующем виде:

$$P_{т.п} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \frac{1}{\langle t_p \rangle} e^{-\frac{t}{\langle t_p \rangle}} \left[\Phi \left(\frac{t - m_{т.п}}{\sqrt{2D_{т.п}}} \right) + \Phi \left(\frac{m_{т.п}}{\sqrt{2D_{т.п}}} \right) \right] dt. \quad (12)$$

Здесь $\langle t_p \rangle$ – среднее время распространения пожара, $\Phi(\dots)$ – функция Крампа (интеграл вероятностей); $m_{т.п}$, $D_{т.п}$ – математическое ожидание и дисперсия времени запаздывания $T_{зп}$, определяемым вероятностными характеристиками времени обработки информации о пожаре, временем, необходимым для принятия решения и подготовку к тушению пожара, временем прибытия пожарной команды и тушения пожара.

При допущении, что не только время распространения пожара T_p , но и время запаздывания $T_{зп}$ подчинено показательному закону с математическим ожиданием, равным $\langle t_{зп} \rangle$, вероятность своевременного тушения пожара определяется по формуле

$$P_{т.п} = \int_0^{\infty} \frac{1}{\langle t_p \rangle} e^{-\frac{t}{\langle t_p \rangle}} \int_0^t \frac{1}{\langle t_{зп} \rangle} e^{-\frac{\tau}{\langle t_{зп} \rangle}} d\tau dt = \int_0^{\infty} \frac{1}{\langle t_p \rangle} e^{-\frac{t}{\langle t_p \rangle}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\langle t_{зп} \rangle}} \right) dt = \frac{\langle t_p \rangle}{\langle t_p \rangle + \langle t_{зп} \rangle}. \quad (13)$$

Имея информацию о значениях $m_{об}$, $P_{тп}$, $\langle t_p \rangle$, $\langle t_{зп} \rangle$, можно производить анализ влияния информационной подсистемы БЛА на эффективность выполнения задачи БАК, а также производить сравнительную оценку и выбор варианта бортового и наземного оборудования БАК. Для определения вероятности того, что система действительно находится в данном (i -м) состоянии, используется формула Байеса, дающая возможность уточнить вероятность гипотезы с учетом априорной и апостериорной информации, которая может быть получена путем обработки статистических данных о состоянии наземных объектов, мониторинг которых производится с помощью БЛА.

Полученная аналитическим расчетным путем оценка эффективности БЛА используется для принятия решений при разработке БЛА, при принятии их в эксплуатацию, выборе рационального варианта решения, эффективного в заданном диапазоне условий применения.

Так как в общем случае вероятности вариантов условий применения БЛА либо не известны, либо не могут быть определены в процессе принятия решения, то такая постановка задачи относится к принятию решений в условиях неопределенности. В этом случае для анализа ситуаций, связанных с принятием решений, применяют один из следующих критериев: критерий Лапласа, минимаксный критерий, критерий Сэвиджа или критерий Гурвица, в которых используется матрица эффективностей с компонентами W_{ij} , каждый из которых – показатель эффективности (вероятность получения необходимой информации о земной поверхности) при применении i -го решения (i -го варианта бортового оборудования) в j -х условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Использование фильтров Калмана для оценки навигационных параметров БЛА, имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при составлении алгоритмов обработки информации, так как при отсутствии дополнительного измерителя фильтр Калмана дает оптимальное приближение оценки

процесса не к теоретическому (опорному) процессу, а к априорной математической модели оцениваемого процесса, минимизируя влияние на оценку процесса шумов измерителя. Следовательно, фильтр Калмана целесообразно использовать для комплексирования различных измерителей. При этом одним из измерителей комплекса ориентации и навигации является бесплатформенная инерциальная навигационная система, представляющая собой математическую модель движения БЛА в пространстве. В этом случае оцениваемым вектором состояния является вектор выходных параметров БИНС [1].

2. Система управления БЛА представляет собой динамическую систему со случайной структурой (состоянием). Ее состояние (режим работы) в каждый момент времени характеризуется вектором переменных, характеризующих эволюцию системы, который может быть непрерывным случайным процессом или дискретной случайной непрерывнозначной последовательностью, а также случайным дискретным скалярным процессом, принимающим значения на конечном счетном множестве и характеризующим номер состояния (структуры, режима работы) системы [1, 3, 6, 7].

3. Структурно-параметрическая коррекция алгоритмов фильтрации навигационных параметров БЛА основана на обработке информации, полученной от различных источников, с помощью системы нечеткой логики, что позволяет осуществлять комплексирование нескольких фильтров Калмана, каждый из которых производит оценку одного из навигационных параметров, поступающих с выхода соответствующего измерителя.

Результаты математического моделирования алгоритма оптимального оценивания навигационной информации подтверждают перспективность использования систем нечеткой логики при комплексировании измерителей навигационной системы БЛА, особенно с учетом того, что в условиях наличия неопределенностей в навигационной информации имеется возможность в алгоритме нечеткой логики учесть априорный опыт эксперта, не поддающийся формализованному описанию [4].

4. Для системы со случайными изменениями режимов работы, описываемой математической моделью в виде разностных уравнений, при решении задачи идентификации режимов работы целесообразно использовать байесовский алгоритм определения апостериорной вероятности состояния системы при допущении того, что на интервале дискретизации смена режима практически невозможна (маловероятна), а априорная вероятность на каждом последующем шаге вычислений равна апостериорной вероятности на предыдущем шаге. При гауссовой аппроксимации условных законов распределения навигационных параметров БЛА из формулы Байеса для апостериорной плотности вероятности при использовании дискретного алгоритма калмановской фильтрации получается рекуррентная формула для апостериорной оценки вероятности состояния

(режима работы) системы, на основе которой решается задача идентификации состояния информационной подсистемы БЛА.

Применение в комплексе ориентации и навигации БЛА алгоритмов идентификации режимов в дополнение к калмановским алгоритмам фильтрации ошибок инерциальной и спутниковой навигационной системы позволяет повысить устойчивость комплекса ориентации и навигации к внезапным изменениям режимов работы, что повысит эффективность применения БЛА [3, 7, 9].

5. Исследование точности инерциальной навигационной системы БЛА удобно проводить с помощью уравнений в вариациях, представляющих собой линеаризованные уравнения первого приближения относительно входных ошибок системы. Отсутствие существенных нелинейностей позволяет провести линеаризацию системы кинематических уравнений движения БЛА разложением в ряд Тейлора относительно опорной траектории полета БЛА с сохранением только линейных членов разложения. Правые части уравнений в вариациях состоят из линейных комбинаций возмущений (ошибок), действующих на входе БИНС. Коэффициенты линеаризованных уравнений являются функциями истинных значений кинематических параметров (параметров опорной траектории БЛА), входящих в систему, а поэтому являются переменными по времени. Следовательно, систему уравнений для вероятностных моментов ошибок инерциальной системы необходимо решать совместно с уравнениями для опорной траектории полета БЛА [2, 10].

6. Задача обеспечения требуемой эффективности применения БЛА на этапе наведения сводится к формированию оптимальной траектории полета БЛА. Эффективность поиска объекта в исполнительной зоне в значительной степени определяется принципами построения и техническими характеристиками установленной на борту БЛА аппаратуры мониторинга. Эта задача в своей постановке является стохастической, так как координаты объекта поиска заранее не известны.

Основной задачей оценки эффективности применения БЛА является получение законов распределения параметров, характеризующих результат выполнения БЛА поставленной задачи с целью вычисления показателей эффективности. При этом основным методом исследования эффективности БЛА является математическое моделирование процессов, происходящих в подсистемах БЛА, с учетом построения «иерархической» системы моделей отдельных подсистем и моделирования функционирования каждой подсистемы. Учет оценки эффективности БЛА в различных условиях позволяет принимать оптимальные решения при выборе различных вариантов применения БЛА [2, 5, 8, 11].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученную в диссертационной работе совокупность научных результатов можно квалифицировать как возможное направление в области задач аналитического исследования систем управления беспилотных летательных аппаратов, в том числе применительно к решению задач оценки их эффективности для формирования требований к характеристикам БЛА на этапе их разработки.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы в организациях, занимающихся вопросами анализа и синтеза систем автоматического управления техническими объектами, а также в учебном процессе учреждений образования Республики Беларусь и Ливии.

Работа выполнена на действующих основных фондах и не требует дополнительных капитальных вложений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Бенкафо, А.С. Особенности применения фильтров Калмана – Бьюси в комплексах ориентации и навигации / А.С. Бенкафо, А.А. Лобатый // Доклады БГУИР. – 2013. – № 5(75) . – С. 67 – 71.

2. Бенкафо, А.С. Показатели эффективности беспилотного авиационного комплекса / А.С. Бенкафо // Системный анализ и прикладная информатика. – 2014. – № 1 – 3 . – С. 17 – 22.

3. Бенкафо, А.С. Оценка навигационных параметров подвижного объекта в условиях многорежимности / А.С. Бенкафо, А.А. Лобатый // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4(82) . – С. 52 – 58.

4. Бенкафо, А.С. Структурно-параметрическая нечеткая коррекция алгоритма фильтрации / А.С. Бенкафо, А.А. Лобатый, А.С. Абуфанас // Системный анализ и прикладная информатика. – 2014. – № 4. – С. 4 – 8.

Тезисы докладов, материалы конференций

5. Бенкафо, А.С. Оценка эффективности беспилотного авиационного комплекса при мониторинге земной поверхности / А.С. Бенкафо // Информационные технологии в образовании, науке и производстве : тез. докл. Международной научно-технической конференции, Минск, 16 – 17 ноября 2013 г. / БНТУ. – Минск, 2013 [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/5468>.

6. Бенкафо, А.С. Вероятностный анализ непрерывно-дискретной стохастической системы / А.С. Бенкафо, А.А. Лобатый // Тезисы докладов одиннадцатой Международной научно-технической конференции, Минск, 2013 г. / БНТУ. – Минск, 2013. – С. 189.

7. Бенкафо, А.С. Комплексование измерителей с помощью фильтра Калмана – Бьюси / А.С. Бенкафо // Тезисы докладов одиннадцатой Международной научно-технической конференции, Минск, 2013 г. / БНТУ. – Минск, 2013. – С. 191.

8. Бенкафо, А.С. Эффективность беспилотного авиационного комплекса / А.С. Бенкафо // Тезисы докладов двенадцатой Международной научно-технической конференции, Минск, 2014 г. / БНТУ. – Минск, 2014. – С. 190.

9. Бенкафо, А.С. Комплексование навигационных систем в условиях случайной смены режимов работы / А.С. Бенкафо, А.А. Лобатый // Тезисы докладов двенадцатой Международной научно-технической конференции, Минск, 2014 г. / БНТУ. – Минск, 2014. – С. 191.

10. Бенкафо, А.С. Аналитическая оценка точности инерциальной системы беспилотного летательного аппарата / А.С. Бенкафо, А.А. Лобатый, А.С. Абуфанас // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: тез. докл. II Международной научно-технической интернет-конференции, Минск, 4 декабря 2014 г. / БНТУ. – Минск, 2014 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/12573>.

11. Бенкафо, А.С. Оценка эффективности беспилотного авиационного комплекса на этапе наведения / А.С. Бенкафо, А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: тез. докл. Минск, 4 декабря 2014 г. / БНТУ. – Минск, 2014 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/12576>.

12. Бенкафо, А.С. Математические модели систем управления беспилотных летательных аппаратов как сложных динамических систем / А.С. Бенкафо, А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый // Тезисы докладов тринадцатой Международной научно-технической конференции, Минск, 2015 г. / БНТУ. – Минск, 2015. – С. 198.

13. Бенкафо, А.С. Исследование статистической динамики системы управления беспилотного летательного аппарата / А.С. Бенкафо // Тезисы докладов тринадцатой Международной научно-технической конференции, Минск, 2015 г. / БНТУ. – Минск, 2015. – С. 200.

РЭЗІЮМЭ

Бенкафо Ахмед Саід

Камплексіраванне крыніц інфармацыі і алгарытмы ацэнкі эфектыўнасці беспілотнага лятальнага апарата

Ключавыя словы: сістэма кіравання, камплексіраванне, фільтраванне, эфектыўнасць.

Мэта працы: распрацоўка алгарытмаў апрацоўкі інфармацыі для кіравання беспілотных лятальным апаратам (БЛА) і метадыкі ацэнкі эфектыўнасці яго прымянення.

Метады даследавання: класічныя і сучасныя метады аналізу і сінтэзу сістэм кіравання па зададзеным крытэрыі, і метады ацэнкі стану стахастычных сістэм, элементы тэорыі сістэмнага аналізу.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Прапанавана сістэма камплексіравання крыніц інфармацыі сістэмы кіравання БЛА, якая ўключае алгарытмы ацэньвання навігацыйных параметраў і ідэнтыфікацыі стану БЛА, якая дазваляе забяспечыць эфектыўную працу сістэмы кіравання БЛА ва ўмовах наяўнасці нявызначанасцяў у выхадной інфармацыі датчыкаў і пры наяўнасці выпадковых скачкападобны змяненняў рэжымаў працы падсістэм.

Распрацаваны спосаб структурна-параметрычнай карэкцыі алгарытму фільтрацыі навігацыйных параметраў БЛА на аснове сістэмы невыразнай логікі, які адрозніваецца метадам вылічэння ў блоку фазіфікацыі функцый прыналежнасці шляхам нарміроўкі апастэрыёрнай шчыльнасці верагоднасці ацэньваемых параметраў.

Распрацавана метадыка ацэнкі эфектыўнасці прымянення БЛА на розных этапах траекторыі палёту, якая ўлічвае стахастычную пастаноўку задачы і дазваляе на этапе папярэдняга праектавання абгрунтаваць асноўныя патрабаванні да элементаў інфармацыйнай падсістэмы БЛА.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Распрацаваныя метадыкі і алгарытмы могуць быць выкарыстаны ў арганізацыях, якія займаюцца пытаннямі аналізу і сінтэзу сістэм аўтаматычнага кіравання тэхнічнымі аб'ектамі.

Вобласць прымянення. Атрыманая ў дысертацыйнай працы сукупнасць навуковых вынікаў з'яўляецца магчымым напрамкам у галіне задач аналізу і аналітычнага сінтэзу сістэм кіравання БЛА, які забяспечвае павышэнне эфектыўнасці іх прымянення.

РЕЗЮМЕ

Бенкафо Ахмед Саид

Комплексирование источников информации и алгоритмы оценки эффективности беспилотного летательного аппарата

Ключевые слова: система управления, комплексирование, фильтрация, эффективность.

Цель работы: разработка алгоритмов обработки информации для управления беспилотным летательным аппаратом (БЛА) и методики оценки эффективности его применения.

Методы исследования: классические и современные методы анализа и синтеза систем управления по заданному критерию, методы оценки состояния стохастических систем, элементы теории системного анализа.

Полученные результаты и их новизна. Предложена система комплексирования источников информации системы управления БЛА, включающая алгоритмы оценивания навигационных параметров и идентификации состояния БЛА, позволяющая обеспечить эффективную работу системы управления БЛА в условиях наличия неопределенностей в выходной информации датчиков и при наличии случайных скачкообразных изменений режимов работы подсистем.

Разработан способ структурно-параметрической коррекции алгоритма фильтрации навигационных параметров БЛА на основе системы нечеткой логики, отличающийся методом вычисления в блоке фаззификации функций принадлежности путем нормировки апостериорной плотности вероятности оцениваемых параметров.

Разработана методика оценки эффективности применения БЛА на различных этапах траектории полета, учитывающая стохастическую постановку задачи и позволяющая на этапе предварительного проектирования обосновать основные требования к элементам информационной подсистемы БЛА.

Рекомендации по использованию. Разработанные методики и алгоритмы могут быть использованы в организациях занимающихся вопросами анализа и синтеза систем автоматического управления техническими объектами.

Область применения. Полученная в диссертационной работе совокупность научных результатов является возможным направлением в области задач анализа и аналитического синтеза систем управления БЛА, обеспечивающим повышение эффективности их применения.

SUMMARY

Benkafo Ahmed Saeed

Integration of data sources and algorithms evaluate the effectiveness of unmanned aircraft

Keywords: control system, aggregation, filtering efficiency.

Purpose of research: the aim is to develop information processing algorithms to control unmanned aerial vehicles (UAVs) and methods of evaluating the effectiveness of its application.

Research methods: the classical and modern methods of analysis and synthesis of control systems on specific criteria, methods of assessment of stochastic systems, elements of the theory of systems analysis.

The results obtained and their novelty. A system of interconnecting sources of information management systems UAVs, including algorithms for estimating the parameters of the navigation and identification of the state of the UAV, allowing for effective operation of UAV control system under the uncertainty of the output sensor information and the presence of random sudden changes modes subsystems.

The method of structural-parametric correction algorithm filtering parameters UAV navigation system based on fuzzy logic, wherein the method of calculation in the block fuzzification membership function by normalizing the a posteriori probability density of the estimated parameters

A method for evaluating the effectiveness of the use of UAVs at various stages of the flight path, taking into account the stochastic formulation of the problem and allows for the preliminary design phase to prove the elements of the basic requirements for information subsystem UAVs.

Recommendation for using. The developed methods and algorithms can be used in organizations concerned with the analysis and synthesis of automatic control systems of technical objects.

Application area. Obtained in the thesis collection of scientific results is a possible direction in problems of analysis and analytical synthesis of control systems UAV, providing increased efficiency of their application.

Бенкафо Ахмед Саид

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ
И АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации)

Подписано в печать. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. Тираж 60 экз. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014
ЛП №02330/264 от 14.04.2014
220013, Минск, П. Бровки, 6