

На правах рукописи

УДК621.396.96

Ву Чи Тхань

**ТРАЕКТОРНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ
ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
ИНФОРМАЦИИ О ПАРАМЕТРАХ ИХ ДВИЖЕНИЯ**

Специальность 05.12.14

Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2013

Работа выполнена на кафедре «Радиолокация и радионавигация» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, МАИ)»

Научный руководитель: Татарский Борис Григорьевич, доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой «Радиолокация и радионавигация» Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ).

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор Меркулов Владимир Иванович, заместитель генерального конструктора ОАО "Концерн "Вега", г.Москва
Кандидат технических наук, доцент Петров Вячеслав Владимирович, ведущий конструктор ОАО "ОКБ" Сухой".

Ведущая организация: ОАО "Корпорация"Фазотрон-НИИР", г.Москва.

Защита состоится «_____» _____ 2013 г. в ... часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете, МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

Автореферат разослан «_____» _____ 2013 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый Совет МАИ

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.125.03, д.т.н., доцент

М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена разработке и исследованию алгоритмов траекторного сопровождения воздушных судов (ВС) по информации, получаемой от радиолокационных систем (РЛС), входящих в состав систем управления воздушным движением (УВД), при наличии неопределенности в отношении параметров, определяющих траекторию движения наблюдаемых объектов и условий их наблюдения. Разработка алгоритмов оценивания изменяющихся во времени траекторных параметров ВС ведется с использованием математического аппарата нечетких множеств. Проводится оценка эффективности разработанных алгоритмов линейной фильтрации путем имитационного моделирования с использованием среды математического моделирования MATLAB.

Актуальность темы работы

Для обеспечения безопасности воздушного движения необходима оперативная информация о пространственном положении ВС в каждый момент времени в выделенной для контроля зоне ответственности. Необходимость в такой информации особенно возрастает при интенсивном воздушном движении, которое имеет место в районе современных аэропортов, располагаемых возле мегаполисов, а также вблизи крупных городов. Как правило, функции контролера выполняет авиационный диспетчер, который наблюдает за перемещением ВС по информации, выносимой на экран системы мониторинга воздушной обстановки, которая формируется по данным, поступающим от обзорных РЛС, входящих в систему УВД. Известно, что возможности человека по восприятию и обработке информации ограничены, поэтому в управлении ВС диспетчеру помогают автоматические системы, которые отслеживают перемещения летательных аппаратов в пространстве, помогая ему принимать решения по обеспечению безопасности воздушного движения в зоне ответственности. Реализация алгоритмов автоматического сопровождения, как правило, строится на основе алгоритмов калмановской фильтрации, которые требуют априорных знаний о предполагаемых моделях движений ВС и реальных условиях наблюдения, в которых проводятся измерения траекторных параметров наблюдаемых объектов. Поскольку данные сведения должны закладываться в алгоритмы фильтрации заранее, то существует

вероятность того, что реальные параметры, описывающие траекторию перемещения ВС и точностные характеристики каналов измерений, будут отличаться от априорных. Таким образом, при реальном функционировании алгоритмов траекторного сопровождения ВС, будет существовать неопределенность в отношении параметров моделей движения наблюдаемых объектов и точностных характеристик измеряемых траекторных параметров, что подтверждает актуальность проводимых в работе исследований.

Объект исследования. В диссертационной работе в качестве объекта исследования рассматриваются алгоритмы траекторного сопровождения воздушных объектов в условиях неопределенности информации о параметрах их движения и условиях наблюдения.

Предмет исследования. Принципы построения алгоритмов фильтрации траекторных параметров наблюдаемых воздушных объектов, обеспечивающих функционирование систем траекторного сопровождения в условиях неопределенности, обусловленной неточным знанием априорной информации в отношении параметров моделей движения и точности измерения наблюдаемых траекторных параметров.

Целью работы является разработка и исследование алгоритмов оценивания изменяющихся во времени траекторных параметров воздушных объектов, функционирующих в условиях неопределенности информации о параметрах их движения и условий наблюдения.

Практическая значимость результатов исследований

Проведенные в работе исследования нацелены на адаптацию известных алгоритмов линейной фильтрации к реально существующей на практике неопределенности, обусловленной принимаемыми при проектировании моделями движения воздушных судов, конкретными значениями траекторных параметров и параметров, описывающих условия наблюдения. Получение в работе алгоритмы линейной фильтрации, на основе математического аппарата нечетких множеств, позволяют учитывать существующую на практике неопределенность при работе данных алгоритмов, а их реализация в виде математического продукта может быть использована в функциональном программном обеспечении реально существующих

систем автоматического траекторного сопровождения воздушных объектов.

Достоверность и обоснованность обеспечиваются корректностью постановки задачи исследования и применением используемого математического аппарата синтеза алгоритмов линейной фильтрации, математического аппарата НМ, современных методов исследования и инструментальных средств для оценки эффективности предлагаемых решений.

Научная новизна результатов

- полученный новый алгоритм линейной фильтрации изменяющихся во времени траекторных параметров воздушных объектов, основанный на математическом аппарате нечетких множеств и учитывающий неопределенность в принятой модели движения объекта наблюдения и условиях наблюдения.

- исследование влияния вида функций принадлежности, описывающих термы лингвистических переменных, отображающих вариации траекторных параметров и условий наблюдения, на эффективность решения задачи фильтрации в условиях неопределенности.

- проведенная оценка влияния на эффективность работы линейных алгоритмов фильтрации траекторных параметров выбранных уровней пересечения функций принадлежности и количества термов, описывающих изменение оцениваемых параметров и условий наблюдения.

- разработанная математическая модель системы линейной фильтраций траекторных параметров воздушных объектов, обеспечивающая выполнение задачи оценивания изменяющихся во времени параметров в условиях неопределенности, и полученные результаты оценки эффективности разработанных алгоритмов фильтрации.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту

- синтезированные алгоритмы линейной фильтрации изменяющихся во времени траекторных параметров наблюдаемых воздушных судов на базе математического аппарата нечетких множеств, позволяют реализовать линейный фильтр, учитывающий вариации траекторных параметров и условий наблюдения;

- изменение вида функций принадлежности, описывающих термы

лингвистических переменных, отображающих вариации траекторных параметров и условий наблюдения, незначительно сказывается на эффективности работы синтезированного фильтра;

- варьирование выбранных уровней пересечения функций принадлежности и количества термов лингвистических переменных, описывающих неопределенность изменения траекторных параметров и условий наблюдения, слабо влияют на эффективность функционирования алгоритмов фильтрации;

- математическая модель системы линейной фильтрации, построенная с учетом разработанных алгоритмов, позволяет осуществлять оценку эффективности предлагаемых в работе решений.

Апробация работы и публикации. Результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на:

- Научных семинарах кафедры «Радиолокация и радионавигация» Московского авиационного института;

- 55-ой научной конференции МФТИ (г. Москва, МФТИ, 19-25 ноября 2012г.);

- 11-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика -2012» (г. Москва, МАИ, 13-14 ноября 2012г).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в двух статьях в журналах, входящих в рекомендованный ВАК МИНОБРНАУКИ России перечень для публикации результатов исследований соискателям ученых степеней, доктора и кандидата технических наук и в двух работах, включенных в сборники тезисов докладов по результатам научно-технических конференций МФТИ и МАИ.

Внедрение результатов диссертационной работы диссертационной работы

Результаты диссертационных исследований использованы в учебном процессе на факультете радиоэлектроники летательных аппаратов Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по дисциплинам "Радиотехнические системы" и "Радиолокационные системы" при проведении лекционных и практических занятий, а также в качестве базовой программы по исследованию алгоритмов линейной фильтрации, выполненной в среде математического моделирования MATLAB.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх разделов, заключения, списка литературы из 55 наименований и 3 приложений. Текст диссертации изложен на 152 машинописных страницах, включает 41 рисунки и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов диссертационной работы. Описана структура диссертационной работы и дано краткое содержание ее разделов.

В первом разделе проведен анализ математического аппарата, используемого при решении задач траекторного сопровождения наблюдаемых воздушных объектов в условиях достоверной информации о параметрах траекторий и условиях наблюдения, математических моделей, используемых при описании изменения параметров траекторий сопровождаемых воздушных объектов и условий наблюдения, а также факторов, приводящих к неопределенности информации в отношении траекторных параметров перемещения воздушных объектов и их условий наблюдения. Проведено формирование постановки задачи, на исследование при наличии неопределенности в отношении траекторных параметров наблюдаемых воздушных объектов и условий их наблюдения, которую кратко можно изложить в следующем виде:

Будем считать, что динамика измерения траекторных параметров наблюдаемого процесса задана уравнением вида:

$$\frac{d}{dt}X(t) = A(t)X(t) + G(t)N(t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где $X(t)$ – вектор состояния, компонентами, которого является траекторные параметры, подлежащие оцениванию; $A(t)$ – известная матрица динамических коэффициентов, определяемая по принятой модели траекторного

перемещения воздушных судов; $n_x(t)$ - вектор формирующих шумов, который полагается белым гауссовым; $G(t)$ - матрица формирующих шумов; $X(t_0)$ - вектор, соответствующий начальному состоянию динамической системы.

Наблюдению доступен процесс

$$y(t) = H(t)X(t) + n_{\text{и}}(t), \quad (2)$$

где $H(t)$ - матрица наблюдений, структура которой зависит от возможного числа каналов измерений компонент вектора состояния; $n_{\text{и}}(t)$ – вектор шумов наблюдений, который полагается белым гауссовым, причем известно, что $M\{n_x(t)n_{\text{и}}(t)\}=0$.

В отношении модели (1) и наблюдения (2) известно, что в процессе проведения эксперимента возможны изменения как характеристик параметров модели, так и статистических характеристик шумов наблюдения.

Требуется реализовать линейный фильтр, который учитывал бы возможную неопределенность в отношении параметров модели и статистических характеристик шумов наблюдения.

Во втором разделе проведен синтез алгоритмов линейной фильтрации изменяющихся во времени параметров, описывающих изменение траектории перемещения воздушных объектов, в условиях неопределенности при использовании математического аппарата теории нечетких множеств (НМ), проведена оценка эффективности разработанных алгоритмов по отношению к известным алгоритмам линейной фильтрации, построенных в соответствии с алгоритмами фильтра Калмана, а также проведено исследование эффективности полученных алгоритмов при варьировании вида функций принадлежности (ФП), описывающих значения (термы) лингвистических переменных, определяющих изменение параметров принятых моделей движения и условий наблюдения, уровней пересечения ФП и количества термов, описывающих степень детальности качественного описания изменения варьируемых параметров.

Синтез алгоритмов линейной фильтрации при использовании математического аппарата НМ проводился в предположении, что шумы наблюдений и формирующие шумы являются белыми гауссовыми некоррелированными друг с другом и в

качестве критерия оптимальности использовался минимум среднеквадратической ошибки фильтрации компонент вектора состояния. Учет неопределенностей, присущих динамической модели (1) и каналу наблюдения (2), осуществляется за счет использования математических объектов, построенных на основе НМ и именуемых лингвистическими переменными (ЛП). Данные математические объекты позволяют описать существующую неопределенность в качественном виде, не привязываясь к конкретным числовым значениям.

Анализ основных уравнений калмановской фильтрации

$$\frac{d}{dt} \hat{X}(t) = A(t)\hat{X}(t) + K(t)[y(t) - H(t)\hat{X}(t)], \quad \hat{X}(t_0) = \hat{X}_0, \quad (4)$$

$$K(t) = D(t)H^T(t)N^{-1}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} D(t) &= A(t)D(t) + D(t)A^T(t) + H(t)Q(t)H^T(t) - D(t)H^T(t)N^{-1}H(t)D(t), \\ D(t_0) &= D_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\hat{X}(t)$ - оптимальная оценка вектора состояния; $K(t)$ - матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана; $N^{-1}(t)$ - матрица, обратная матрице $N(t)$; $N(t)$ - матрица интенсивностей шумов наблюдения $n_n(t)$; $Q(t)$ - матрица интенсивностей формирующих шумов $n(t)$; $D(t)$ - квадратная симметрическая матрица дисперсий ошибок фильтрации:

$$D(t) = M \left\{ \left[X(t) - \hat{X}(t) \right] \left[X(t) - \hat{X}(t) \right]^T \right\}, \quad (7)$$

показал, что точность оценивания компонент вектора состояния $X(t)$, которые являются оцениваемыми траекторными параметрами перемещения воздушного судна, зависят от качества априорной информации о динамике их изменения (матрицы A и Q) и статистических характеристик шумов измерений (матрица N). Неточное знание динамики в виде матрица A приведет к ошибкам при вычислении матрицы дисперсии D . Неточные знания матриц интенсивностей Q и N , также влияют на значения компонент матрицы D . Кроме того, матрица интенсивностей N

шумов наблюдения непосредственно входит в коэффициент усиления K фильтра Калмана, влияя на его величину, а следовательно, на результат формирования оценки $\hat{X}(t)$.

В процессе оценивания величина коэффициента усиления K формируется адекватно изменению невязки

$$\Delta(y, \hat{X}) = y(t) - H(t)\hat{X}(t) \quad (8)$$

Учитывая данные обстоятельства, в работе было предложено описать влияние неопределенностей в параметрах моделей перемещения ВС и условиях наблюдения на функционирование ФК с помощью лингвистических переменных

$$\langle \text{«НЕВЯЗКА»}, \{ \text{«МАЛАЯ» (М)}, \text{«СРЕДНЯЯ» (СР)}, \text{«БОЛЬШАЯ» (Б)} \} \\ [U_1], TS, SM \rangle, \quad (9)$$

$$\langle \text{«КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ»}, \{ \text{«МАЛЫЙ» (М)}, \text{«СРЕДНИЙ» (СР)} \\ \text{«БОЛЬШОЙ» (Б)} \}, [U_2], TS, SM \rangle, \quad (10)$$

где U_1 и U_2 - области определения лингвистических переменных «НЕВЯЗКА» (НВ) и «КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ» (КУ), соответственно; «МАЛАЯ», «СРЕДНЯЯ», «БОЛЬШАЯ» - значения (термы) лингвистической переменной НВ; «МАЛЫЙ», «СРЕДНИЙ», «БОЛЬШОЙ» - термы лингвистической переменной КУ; TS и SM – синтаксические и семантические процессы, связанные с образованием новых термов и привязкой их к НМ, соответственно.

Графическая иллюстрация данных математических объектов через функции принадлежности (ФП) их термов приведена на рис.1, где через $\mu_H(u_1)$ обозначены ФП нечетких переменных (НП) «МАЛАЯ» (М), «СРЕДНЯЯ» (СР), и «БОЛЬШАЯ» (Б), описывающих термы ЛП «НЕВЯЗКА», а с помощью $\mu_k(u_2)$ - ФП нечетких переменных «МАЛЫЙ» (М), «СРЕДНИЙ» (СР) и «БОЛЬШОЙ» (Б), описывающих термы ЛП «КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ». Использование введенных математических объектов (8) и (9) позволяет провести формальное описание неопределенности, возникающей при работе алгоритмов линейной фильтрации, и разработать процедуру, которая будет учитывать данную неопределенность.

Основой формирования такой процедуры служит композиционное правило нечеткого вывода с использованием процедуры максимина вида:

$$\mu_{\tilde{K}^*}(u_2) = \bigvee_{u_1 \in \theta} (\mu_{H^*}(u_1)) \wedge \mu_{\tilde{R}}(u_1, u_2) \quad (11)$$

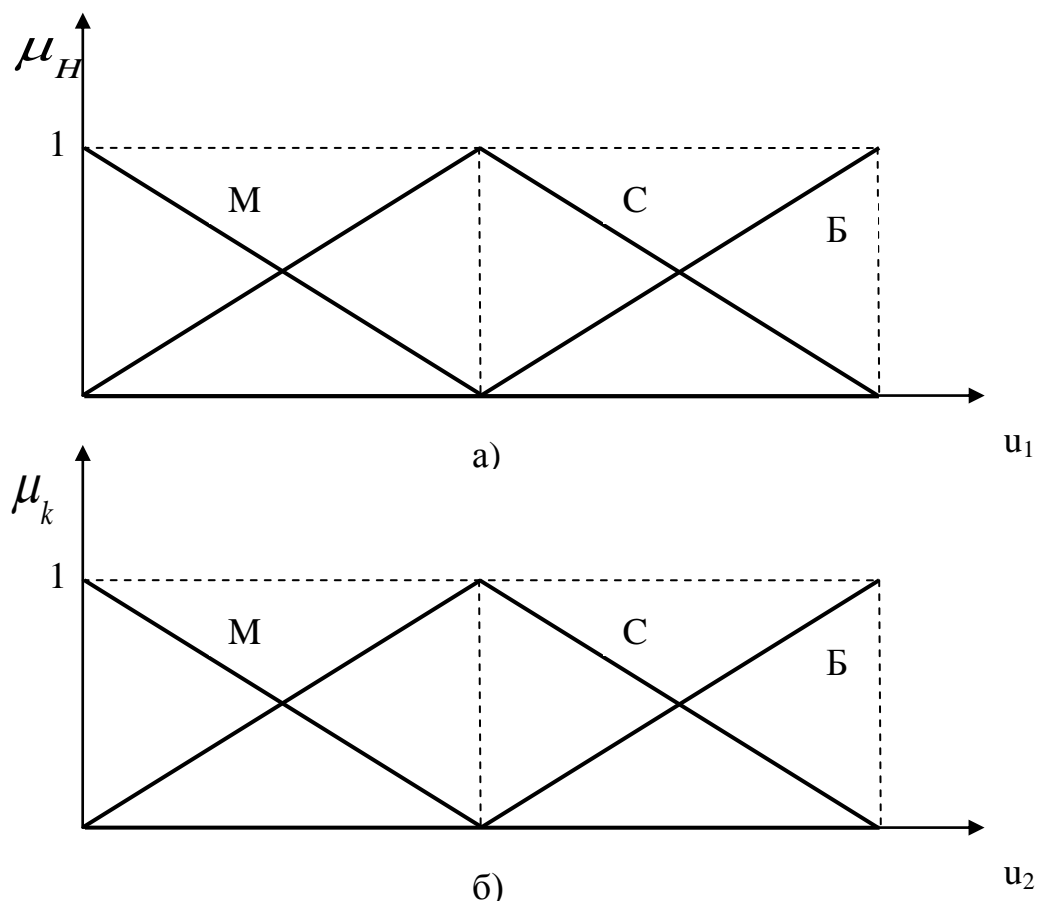


Рис 1

где $\theta \subset \mathbb{R}$ - множество вещественных чисел, $\mu_{H^*}(\cdot)$ - функция принадлежности текущего измерения, \vee и \wedge - операции взятия минимума и максимума, соответственно, $\mu_{\tilde{K}^*}(\cdot)$ - функция принадлежности нечеткой переменной «КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ», сформированный по результатам обработки априорных знаний и текущих данных в условиях неопределенности.

Выражение (11) связывает априорные знания, построенные с учетом возможной неопределенности, результаты выводов о принимаемом решении, формируемые с учетом неопределенности априорной информации и текущие наблюдения. В нашем случае выводом является величина коэффициента усиления

линейного фильтра, которая формируется на основе текущего значения невязки. Выражение (11) в формализованном виде описывает некую базу знаний (БЗ), которая учитывает возможные варианты неопределенностей и правила принятия решений при возникновении одного из вариантов.

Выражение (11) может быть представлено через (ФП) НП, описывающие математические объекты (9) и (10), как

$$\mu_{\tilde{K}^*}(u_2) = \bigvee_{u_1 \in \Theta} (\Lambda \mu_{\tilde{H}^* \cap \tilde{H}} \Lambda_{\tilde{K}}(u_2)) \quad (12)$$

где « \cap » - операция пересечения нечетких множеств \tilde{H}^* и \tilde{H} , представляющих собой текущие и возможные изменения наблюдения соответственно.

Из (12) следует, что получение нечеткого вывода строится по результатам нечеткой предпосылки \tilde{H} и измерения \tilde{H}^* (текущим значениям невязки), которые редуцируются на заключение \tilde{K} . При выборе в качестве редукции \tilde{K} процедуры отсечения на уровне α правило (12) принимает вид:

$$\mu_{\tilde{K}^*}(u_2) = \alpha \Lambda \mu_{\tilde{K}}(u_2) = \mu_{\alpha \tilde{K} \cap \tilde{K}}(u_2). \quad (13)$$

Выражения (11) - (13) описывают правила выбора коэффициента усиления линейного фильтра, работающего в условиях неопределенности через функции принадлежности величин, изменяющихся в процессе работы. Для получения численного значения КУ, которое необходимо выбрать при возникших условиях наблюдения, необходимо совершить переход от ФП $\mu_{\tilde{K}}(u_2)$ к конкретному элементу $u_2 \in \tilde{K}^*$. В работе данный переход выполняется в соответствии с методом центра тяжести (ЦП)

$$\dot{u}_2 = \frac{\int_{U_2} u_2 \mu_{\tilde{K}^*}(u_2) du_2}{\int_{U_2} \mu_{\tilde{K}^*}(u_2) du_2} \quad (14)$$

Как следует из (14), величина \dot{u}_2 является ЦТ фигуры, образованной функцией $\mu_{\tilde{K}^*}$ и осью u_2 . Графическая иллюстрация нечеткого вывода о выборе коэффициента усиления линейного фильтра приведена на рис 2. На рис.2,а представлены функции принадлежности термов ЛП НВ и текущего наблюдения ($\mu_{\tilde{H}^*}$), а на рис.2,б – функции принадлежности термов ЛП КУ и нечеткого вывода ($\mu_{\tilde{K}^*}$). Здесь же на

числовой оси u_2 отмечено численное значение коэффициента усиления (\dot{u}_2) фильтра для смоделированной ситуации. Графическая иллюстрация по выбору коэффициентов усиления фильтра, представленная на рис.2, соответствует только одному каналу фильтра. Для других каналов выбор коэффициентов усиления осуществляется аналогично.

Таким образом, для модели (1) и уравнения наблюдения (2) алгоритма линейной фильтрации, синтезированный в соответствии с критерием минимума среднеквадратической ошибки фильтрации компонент вектора состояния при использовании математического аппарата НМ в условиях неопределенностей описывается уравнением

$$\frac{d}{dt} \hat{X}(t) = A(t) \hat{X}(t) + K^*(t) [y(t) - H(t) \hat{X}(t)], \hat{X}(t_0) = X_0, \quad (15)$$

где величина $K^*(t)$ выбирается в соответствии с алгоритмами (11) - (14).

В соответствии с (11) - (15), функционирование линейного фильтра строится на основе реализации БЗ, построенной в соответствии с анализом возможных изменений параметров модели перемещения ВС и условий наблюдения, которые описываются в виде продукционных правил. Данные продукции представляют собой ничто иное как описание нечеткого вывода, представленного в (11) в форме функции принадлежности $\mu_R(u_1, u_2)$.

Оценки работоспособности алгоритма (15) проводилась в предположении, что траектория перемещения ВС описывалась в виде модели:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} D &= V; & D(t_0) &= D_0; \\ \frac{d}{dt} V &= a; & V(t_0) &= V_0; \\ \frac{d}{dt} a &= -\alpha a + \sqrt{2\alpha\sigma_a^2} n_a(t); & a(t_0) &= a_0, \end{aligned} \quad (16)$$

где D - дальность до ВС; V - скорость изменения дальности; a - скорость изменения скорости относительного перемещения; α - величина характеризующая ширину спектра флуктуаций ускорения; $n_a(t)$ - формирующий белый гауссовский шум, а в работе задача линейной фильтрации решалась в дискретном времени. Переход от модели (14) к ее представлению в дискретном времени осуществлялся на основе

стандартной процедуры путем нахождения фундаментальной матрицы системы (16) в соответствии с правилом:

$$\Phi(t-t_0) = L^{-1} \{ (pI - A)^{-1} \}$$

где L - символ преобразования Лапласа; " -1 " - символ обратного преобразования (Лапласа либо матрицы); p - оператор дифференцирования; I - единичная матрица; A - матрица динамических коэффициентов системы (16).

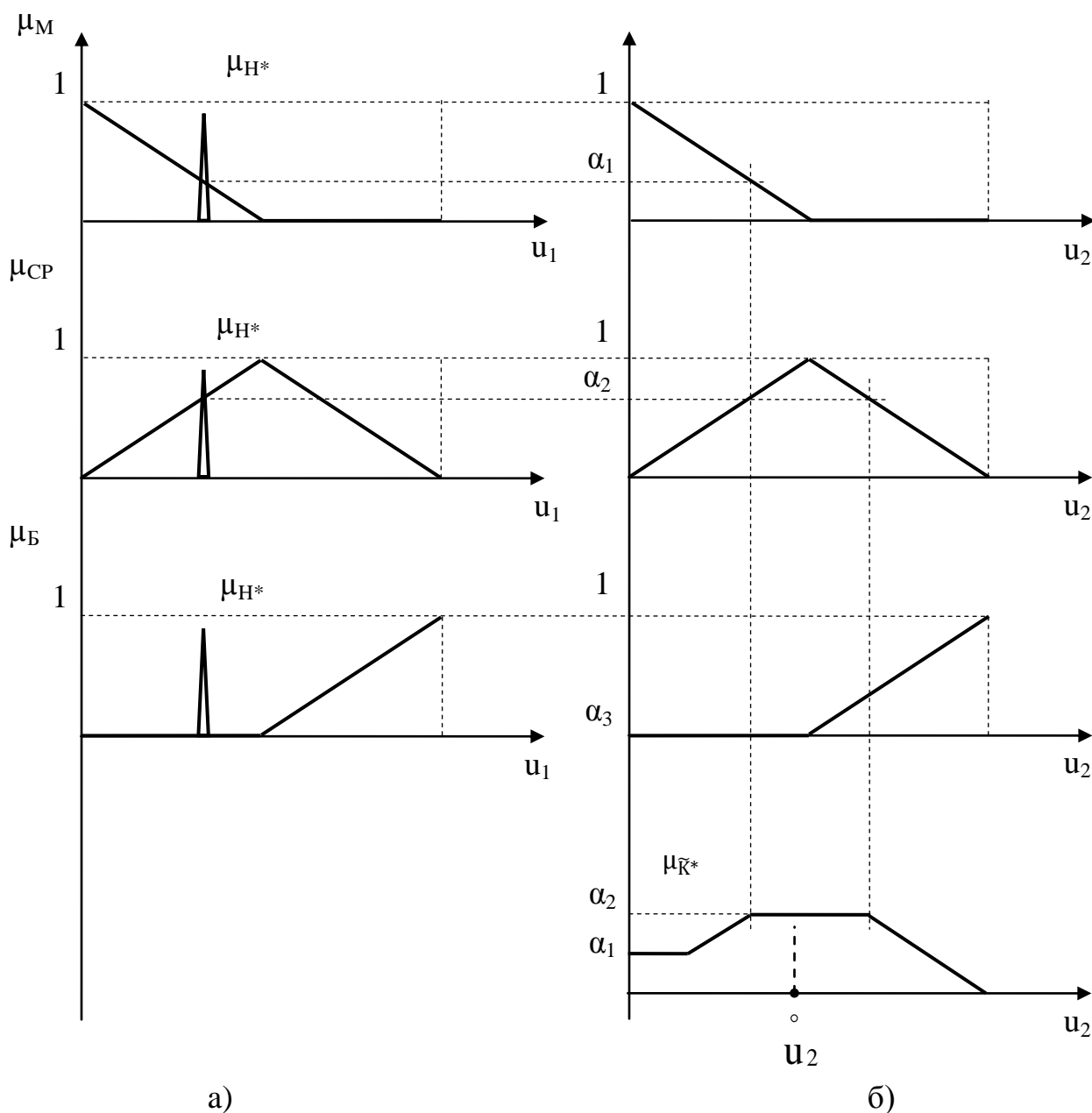
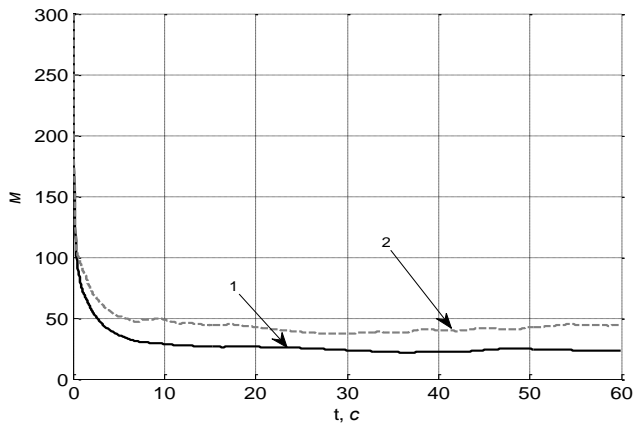


Рис. 2

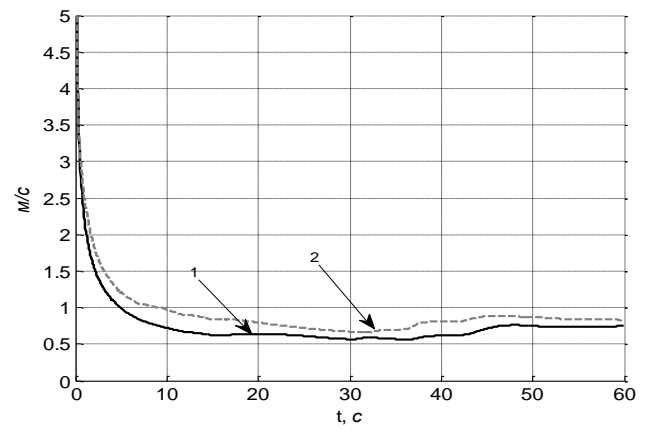
Результаты оценки работоспособности дискретного линейного фильтра, построенного с использованием математического аппарата НМ, приведены на рис.3

где представлены зависимости среднеквадратических ошибок оценивания дальности D (рис.3,а), скорости ее изменения V (рис.3,б) и ускорения a (рис.3,в) от времени (кривые 2) при варьировании ошибки измерения в канале дальности в пределах от 50 до 750 м, среднеквадратической ошибки формирующих шумов в диапазоне $0,015 \dots 1 \text{ м} / \text{с}^2$, полосы формирующих шумов в диапазоне $1/60 \dots 1$. Здесь же приведены аналогичные зависимости для фильтра Калмана (кривые 1), функционирующего в условиях: $\sigma_D = 250 \text{ м}$, $\sigma_a = 0,01 \text{ м} / \text{с}^2$, $\alpha = 1/60 \text{ с}^{-1}$. Из представленных результатов видно, что синтезированный фильтр обессточивает качество фильтрации компонент D , V и a , близкое к качеству классического фильтра Калмана, однако среднеквадратическая ошибка фильтрации компоненты D больше по отношению к классическому фильтру, но в то же время они меньше, чем ошибка измерения в канале дальности.

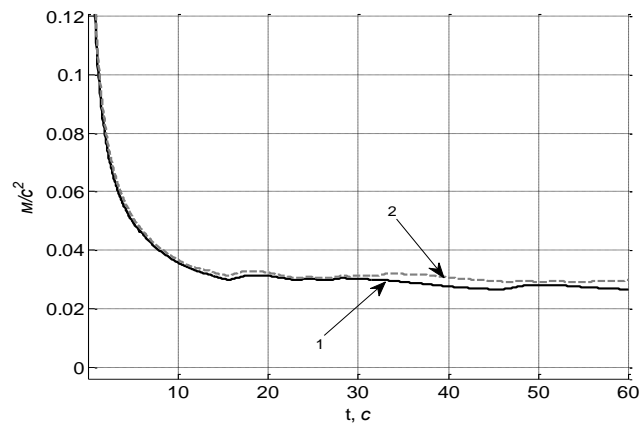
В процессе исследований по теме диссертации проводилась оценка влияния на эффективность работы синтезированного фильтра вида ФП, уровней пересечения данных функций, количества термов, служащих для описания лингвистических переменных, входящих в продукционные правила БЗ. Результаты данных оценок представлены на рис.4-6, где показано изменение среднеквадратических ошибок фильтрации по D - $\sigma_{\Delta D}$, скорости - $\sigma_{\Delta V}$ и ускорению - $\sigma_{\Delta a}$ от времени. В частности на рис.4 приведено изменение данных ошибок при изменении вида ФП, на рис.5 - при изменении уровней пересечения ФП предпосылок и заключений, а на рис.6 - при изменении количества термов. Как видно из представленных зависимостей варьирование вида ФП незначительно сказывается на конечной эффективности работы ЛФ с БЗ, где на рис. 4 кривые 1 соответствуют описанию ФП с помощью линейно - изменяющихся функций, а кривые 2 –с помощью гауссовых кривых. Изменение вида ФП приводит к относительному изменению среднеквадратической ошибки в единицы процентов. При варьировании уровней пересечения ФП (рис. 5, кривая 1 соответствует уровню 0,3 , кривая 2 - 0,5, кривая 3 - 0,7) и количества термов при описании предпосылок и заключений (рис. 6, кривая 1 соответствует 3 термам, кривая 2 - 5, кривая 3 - 7) относительное изменение среднеквадратических ошибок фильтрации колеблется в пределах от 10 % до 20%.



а)

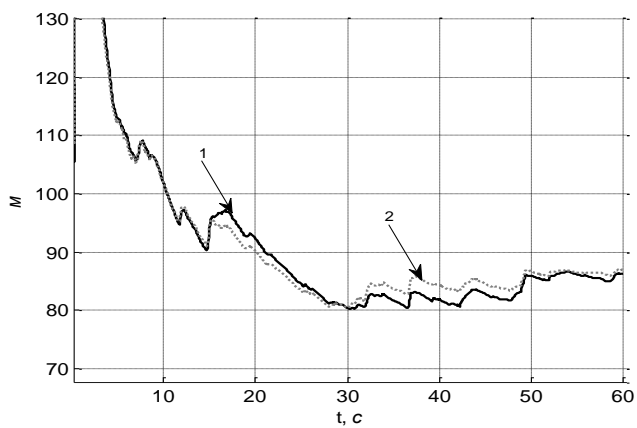


б)

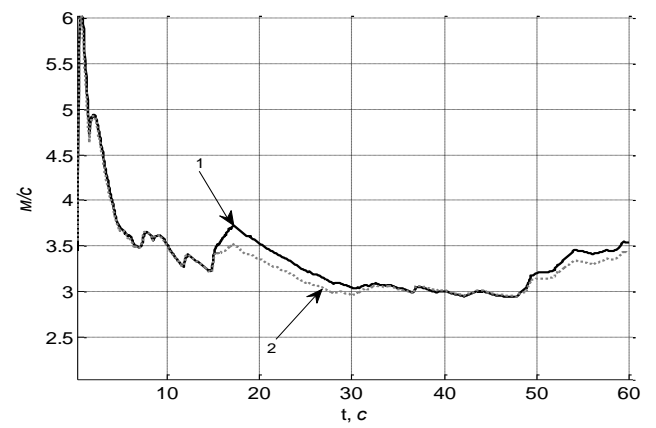


в)

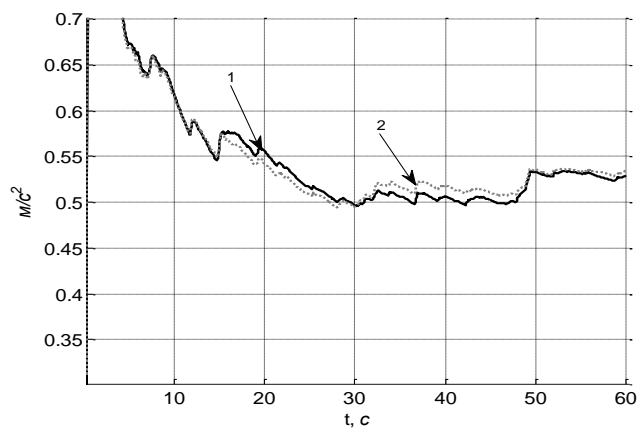
Рис. 3



а)

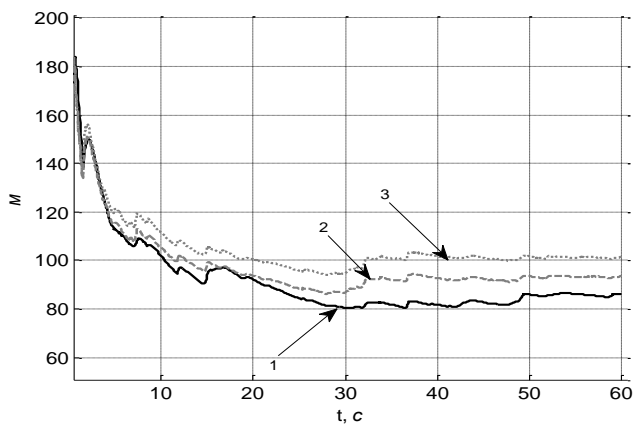


б)

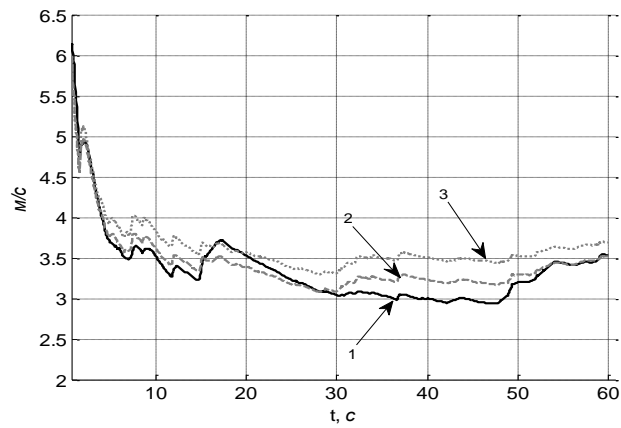


в)

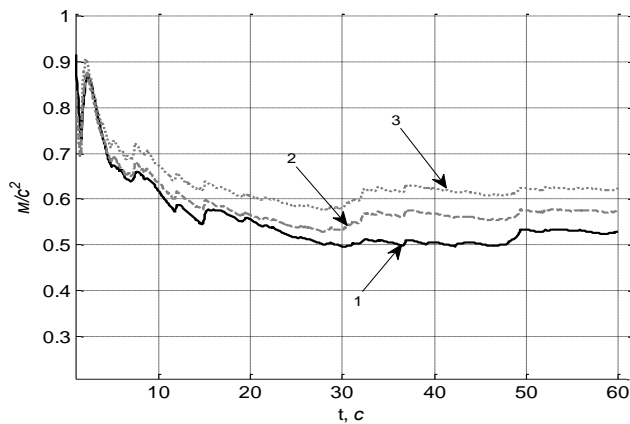
Рис. 4



а)

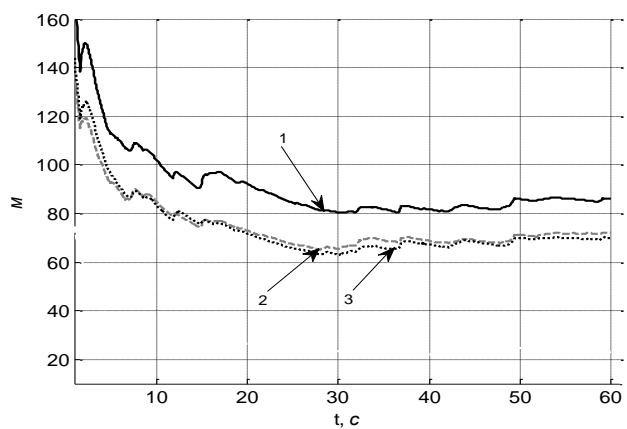


б)

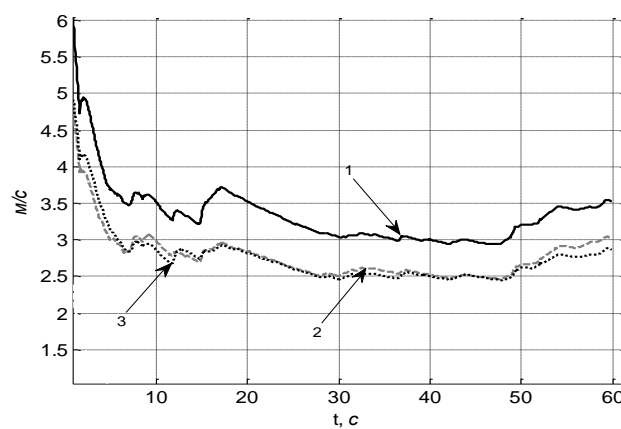


в)

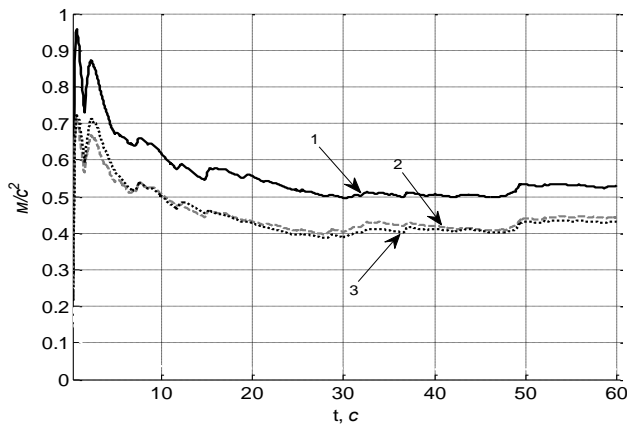
Рис. 5



а)



б)



в)

Рис. 6

В третьем разделе представлены материалы, связанные с разработкой имитационной модели линейного фильтра, синтезированного на базе математического аппарата нечетких множеств. Разработка модели проводилась в среде математического моделирования MATLAB. Данная модель позволяет провести оценку эффективности функционирования разработанного линейного фильтра. По структуре имитационная модель включает в себя три модуля: первый - представляет собой математическую модель фильтра Калмана (рис.7), функционирующего в соответствии с широко известными алгоритмами, описанными в научно - технической литературе; второй - представляет собой математическую модель линейного фильтра, построенного с использованием математического аппарата нечетких множеств (рис.8), и третий - математическую модель системы вывода на знаниях (рис.9), которая позволяет осуществлять выбор коэффициентов усиления для линейного фильтра, опираясь на имеющую информацию о возможных условиях работы фильтра и текущие наблюдения.

В первом модуле, помимо собственно моделирования функционирования фильтра Калмана, проводится определение статистических параметров формируемых оценок компонент вектора состояния, что позволяет сравнивать точности оценивания траекторных параметров, определяемых по дискретному варианту уравнения Рикатти, и непосредственно из результатов моделирования. Второй модуль структурно построен аналогично. Однако, при формировании коэффициентов усиления линейного фильтра учитываются как имеющиеся знания о возможных условиях его работы, так и текущие наблюдения.

Формирование коэффициентов усиления ведется с помощью интеллектуального устройства, которое с полным основанием можно назвать базой знаний, поскольку в ней содержатся продукционные правила, отражающие качественные знания о возможных условиях наблюдения (предпосылки), представленные через невязки, и возможные варианты значений коэффициентов усиления линейного фильтра (заключения). Данные правила закладываются в базу знаний в виде задания функций принадлежности предпосылки и заключения.

Выбор требуемого значения коэффициента усиления фильтра ведется на базе нечеткого композиционного правила с привлечением текущего значения невязки.

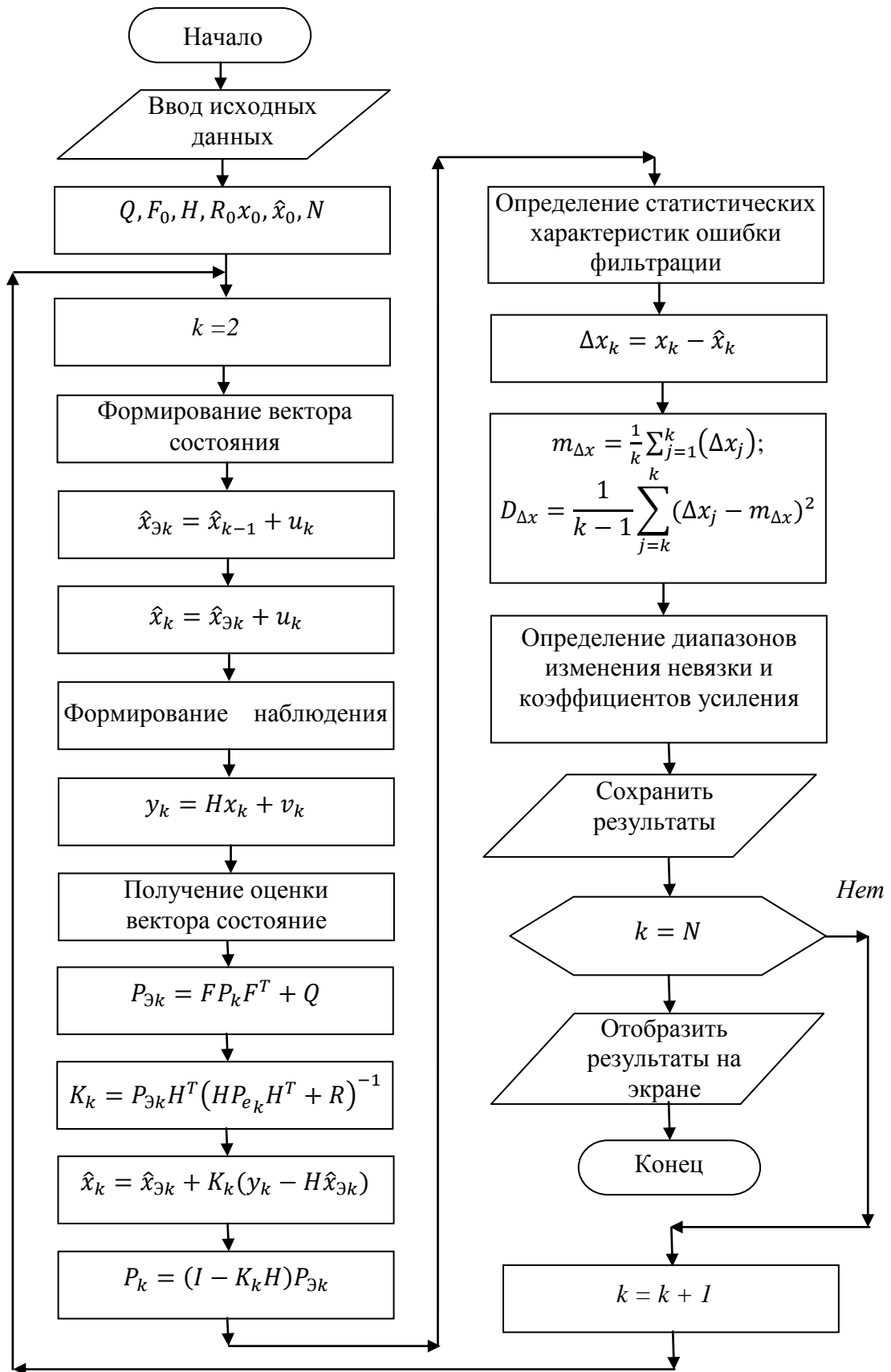


Рис.7

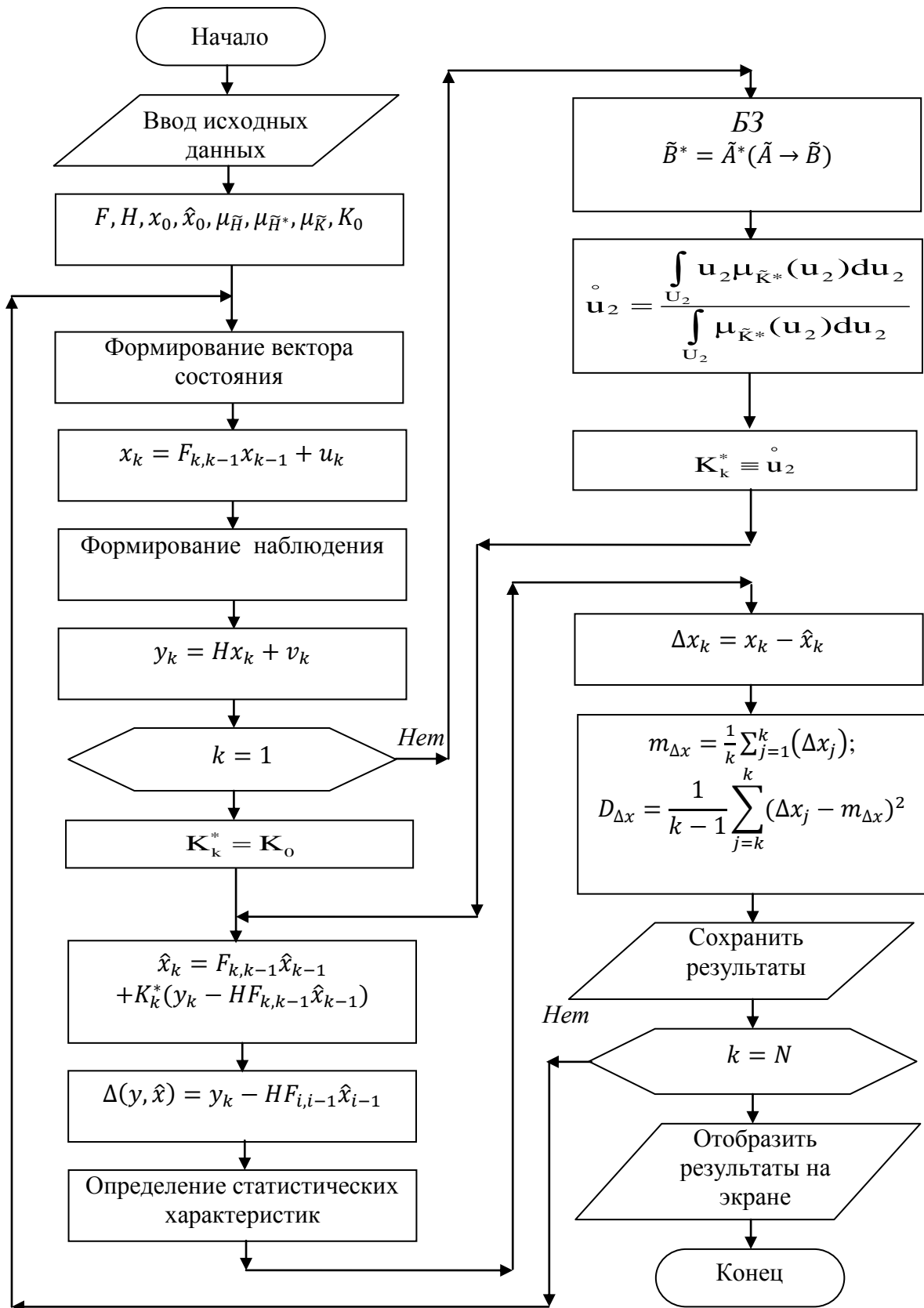


Рис.8



Рис.9

Как и в первом модуле, на каждом шаге ведется определение статистических характеристик процесса оценивания траекторных параметров наблюдаемого воздушного судна. Результаты данного определения в виде графиков изменения среднеквадратических ошибок оценивания дальности, скорости ее изменения и ускорения выводятся на экран монитора. Помимо данных результатов с помощью имитационной модели можно просмотреть характер динамических процессов на выходе любого блока ее модели и провести оценку данных изменений

В заключении сформированы основные научные результаты и выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ математических методов и алгоритмов, используемых при решении задач траекторных сопровождения, показывает, что в современных системах автоматического сопровождения ВС при решении задач оценивания изменяющихся во времени траекторных параметров, главным образом, используются алгоритмы, базирующиеся на алгоритмах линейной калмановской фильтрации, которые являются критичными к начальным условиям и априорной информации относительно условий наблюдения и используемой модели изменения траекторных параметров.

2. Как показывает анализ условий работы радиолокационных систем, являющихся первичными источниками информации для решения задачи траекторного сопровождения ВС, а также внешних факторов, воздействующих на воздушные объекты, что, как правило, условия, в которых проводится первоначально синтез фильтров Калмана, отличается от тех, в которых приходится им функционировать. Несоответствие условий синтеза линейного фильтра Калмана практическим условиям его работы заставляет разрабатывать математические методы, позволяющие решать задачу адаптации системы фильтрации траекторных параметров ВС к реальным изменениям условий их функционирования и параметров используемых моделей. Продуктивным в данной ситуации оказывается подход, основанный на использовании математического аппарата нечетких множеств.

3. Показано, что использование математического аппарата нечетких множеств позволяет, опираясь на математические объекты, именуемые лингвистическими переменными, описать существующую неопределенность в отношении модели изменения траекторных параметров и условий наблюдения в качественной форме и провести синтез линейного фильтра, способного настраиваться на неопределенные условия функционирования.

4. Разработана структура линейного фильтра, которая отличается от известной структуры фильтра Калмана способом управления его коэффициентом усиления. В разработанном фильтре данное управление строится на основе структуры в виде базы знаний, которые формируются и закладываются в неё на стадии разработки с учетом возможных вариаций условий функционирования фильтра и изменения параметров моделей траекторных параметров ВС в качественном виде в форме продукций. Вывод на знаниях, циркулируемых в базе знаний, строится на основе композиционного правила нечеткого вывода, описываемого через функции принадлежности термов лингвистических переменных, входящих в предпосылки и заключения продукционных правил.

5. Установлено, что эффективность функционирования линейного фильтра по сравнению с эффективностью функционирования фильтра Калмана, определяемая среднеквадратической ошибкой оценивания траекторных параметров, при варьировании условий функционирования может изменяться в пределах от 10% до 17%. В тоже время, она остается меньше, чем ошибка первичного оценивания траекторного параметра в измерительном канале.

6. Показано, что изменение вида функций принадлежности, описывающих термы лингвистических переменных, входящих в предпосылки и заключения продукционных правил, циркулируемых в БЗ линейного фильтра, незначительно влияет на конечную эффективность его функционирования. Изменение среднеквадратической ошибки фильтрации составляет порядка единиц процентов.

7. Установлено, что степень влияния варьирования выбранных уровней пересечения и количества термов лингвистических переменных, описывающих неопределенность изменения траекторных параметров и условий наблюдения, более

значительна. Изменение степени влияния на эффективность функционирования линейного фильтра при данных параметров колеблется в пределах от 10% до 20%.

8. Показано, что структура, разработанной математической модели для оценки эффективности линейного фильтра с базой знаний, построена по модульному принципу и обеспечивает имитацию работы стандартных алгоритмов калмановской фильтрации, работоспособности собственно ЛФ с БЗ, системы, построенной на знаниях, и позволяет обеспечивать определение статистических характеристик ошибок оценивания траекторных параметров, а также визуализацию результатов оценки эффективности функционирования отмеченных модулей.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ву Чи Тхань, Миляков Д.А., Татарский Б.Г. Алгоритмы калмановской фильтрации в условиях неопределенности// Информационно - измерительные и управляющие системы , N10, т.10, 2012.
2. Ву Чи Тхань, Татарский Б.Г. Оценка эффективности линейного фильтра, функционирующего в условиях неопределенности // Научно-технические технологии, N10, т.14, 2013.
3. Ву Чи Тхань, Миляков Д.А., Татарский Б.Г. Алгоритм линейной фильтрации динамических процессов в условиях неопределенности// 55-ой научной конференции МФТИ (г. Москва, МФТИ, 19-25 ноября 2012г.).
4. Ву Чи Тхань, Миляков Д.А., Татарский Б.Г. Линейная фильтрация динамических процессов в условиях неопределенности // 11-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика -2012» (г. Москва, МАИ, 13-14 ноября 2012г.).