

Субоптимальный алгоритм оценивания и параметрической идентификации для навигационных систем летательных аппаратов и других подвижных объектов на основе информации магнитного поля Земли

Колосовская Т.П.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: mai703@front.ru*

Аннотация

Данная научная работа посвящена синтезу алгоритмов для навигационных и прицельно-навигационных комплексов (ПНК), использующих в качестве источника информации аномальное магнитное поле Земли (МПЗ).

В работе на основании методов теории оптимальной и субоптимальной нелинейной фильтрации калмановского типа и идентификации синтезирован алгоритм, позволяющий оценивать магнитный курс летательного аппарата (ЛА), а также (с целью повышения точности оценивания) магнитное склонение, модуль вектора напряженности МПЗ и коэффициенты Пуассона, характеризующие постоянное и индуктивное намагничивание.

Разработанная система определения курса может обеспечивать комплексную навигационную систему необходимой информацией для формирования истинного

курса в бортовом компьютере в различных режимах: радиомолчания, при полете над акваториями и участками суши с малоинформативным рельефом и т.п.; весьма перспективна и требует продолжения исследований в направлении впервые предложенного автором применения в этой области теории марковских процессов и систем со случайным изменением структуры.

Ключевые слова: расширенный фильтр Калмана, идентификация, навигационная система, магнитные поля, марковские процессы, оптимизация систем со случайной структурой.

Введение

Измерение и оценивание навигационных параметров связано с обработкой информации, заключенной в сигналах различной физической природы.

В данной работе предлагается решение задачи повышения точности определения навигационных параметров (в том числе, курса) на основании синтеза и анализа субоптимальных (в силу нелинейностей одной или обеих математических моделей состояния и/или наблюдения) алгоритмов обработки информации сигналов аномального МПЗ для комплексных навигационных систем ЛА гражданского и военного назначения, а также для других подвижных объектов.

Эффективность решения задачи наведения ЛА на конечном участке траектории существенным образом зависит от точности решения задачи вывода ЛА в требуемый район, что в свою очередь, полностью определяется точностью вычисления и

оценивания навигационных параметров.

Системы определения магнитного курса служат эффективным средством курсовой коррекции инерциальных навигационных систем (ИНС) при отсутствии или неработоспособности других корректирующих систем.

Как известно, современный объект и его оборудование обладают существенными магнитными массами, магнитные поля которых могут значительно искажать действительное направление горизонтальной составляющей МПЗ, что приводит к ошибкам определения угла курса - девиации [1].

С целью компенсации магнитных помех носителей в традиционных решениях для повышения точности систем определения курса на борту ЛА проводятся трудоемкие и дорогостоящие девиационные работы.

В результате проведения девиационных работ определяются коэффициенты Пуассона, характеризующие постоянное и индуктивное намагничивание, которые вводятся как константы для каждого типа объекта и в полете не уточняются.

В действительности, эти коэффициенты точно не известны и меняются от режима к режиму.

Традиционно компенсация составляющих девиации, связанной с жестким железом, главным образом производилась постоянными магнитами, а составляющих постоянной девиации, обусловленной мягким железом, экспериментально осуществлялась компенсаторами из мягкого железа.

С точки зрения математического описания магнитные поля ЛА от постоянного

намагничивания, созданные ферромагнитными элементами носителя, обладающими большой коэрцитивной силой, и от индуктивного намагничивания, созданные ферромагнитными элементами с малой коэрцитивной силой, например, от вихревых токов в обшивке, и зависящие от широты местонахождения объекта (ЛА), его положения и скорости в пространстве, описываются уравнениями Пуассона, которые дают проекции напряженности магнитного поля помехи в любой точке носителя на три взаимно ортогональные оси, связанные с осями ЛА.

Как известно, вектор магнитных помех носителя от постоянного намагничивания жестко связан с осями ЛА.

Изменение состава бортового оборудования (например, отделение груза) приводит к скачкообразному изменению магнитного поля носителя (ЛА и других объектов). Поэтому идентификация коэффициентов Пуассона в процессе движения (в полете) является актуальной задачей.

Таким образом, с целью обеспечения высокой точности курсовой информации возникла необходимость синтеза и анализа субоптимального алгоритма определения курса с учетом магнитных полей ЛА, основанного на достижениях современной теории оптимального оценивания и идентификации.

Много научных исследований было выполнено в классе схем адаптивной фильтрации для сложной задачи совместного оценивания и параметрической идентификации, известных по работам Эйкхоффа П., Сейджа А.П., Созда, Лайниотиса Д.Ж. и др. Актуальность исследований в этой области в настоящее время требует новых

перспективных разработок.

Цель данной работы состоит в решении задачи синтеза и анализа алгоритма обработки магнитометрической информации для навигационных комплексов (НК) и ПНК на основе классической нелинейной фильтрации калмановского типа и предложении нового подхода к ее решению, заключающегося в распространении адаптивного оценивания для классических стохастических динамических систем с детерминированной структурой на случай нелинейной фильтрации и параметрической идентификации в стохастических навигационных системах по МПЗ с применением теории марковских процессов и оптимизации систем со случайной структурой или переключающимися параметрами.

В качестве датчика поля - измерителя МПЗ в работе выбран трехкомпонентный феррозондовый магнитометр, состоящий из трех взаимно ортогональных чувствительных элементов. Положение измерителя МПЗ в пространстве описывается соответствующей матрицей.

К ряду преимуществ феррозондовых магнитометров следует отнести небольшую постоянную времени 0,1 - 0,5 с и возможность непрерывно фиксировать измеряемое поле, в отличие от квантовых магнитометров.

Магнитная проницаемость пермаллоя есть функция индукции магнитного поля. Эта зависимость, причем резкая, лежит в основе принципа измерения индукции магнитного поля при помощи феррозондовых магнитометров [2].

В качестве алгоритма оценивания в работе принят расширенный дискретный

фильтр Калмана (РДФК) [3] в силу нелинейной постановки задачи.

Формулировка поставленной и решаемой в настоящей работе задачи - синтезировать субоптимальный алгоритм, позволяющий оценивать магнитный курс ψ_m ЛА, а также, с целью повышения точности оценивания, магнитное наклонение, модуль вектора напряженности T МПЗ и коэффициенты Пуассона, характеризующие индуктивное и постоянное намагничивание, на основании геомагнитной информации, получаемой с помощью магнитометра, с учетом магнитных полей носителя (ЛА и др.) [4].

В отличие от подхода к решению задачи компенсации ошибок ИНС, представленного в работе [5], где предложен путь повышения точности измерения навигационных параметров полета ЛА и борьбы с ошибками инерциальных датчиков за счет принудительного вращения блока чувствительных элементов бесплатформенной ИНС, в настоящей работе в качестве эффективного средства борьбы с накапливающимися ошибками инерциальных навигационных систем для курсовой коррекции ИНС выбрана система определения магнитного курса, что является необходимым при отсутствии или неработоспособности других корректирующих систем.

Одной из первых работ, посвященных применению фильтра Калмана в инерциальных навигационных системах, использующих информацию измерений рельефа местности, является публикация [6].

На первом этапе решения задачи, поставленной в работе [4], рассмотрены

основные характеристики МПЗ и его измерителей, вопросы пересчета пространственных полей на высоту; проведен анализ вариаций магнитного поля, известных математических моделей ошибок магнитометров (в том числе, феррозондового магнитометра) и магнитных полей ЛА; исследован традиционный алгоритм формирования курсовой информации и отмечены его недостатки.

На втором этапе для решения задачи синтеза алгоритма были выведены нелинейные уравнения измерений проекций вектора напряженности МПЗ феррозондовым магнитометром на основании математической модели ошибок магнитометра, математической модели полей ЛА и полного вектора напряженности МПЗ с учетом формирования флуктуационных составляющих ошибок магнитометра.

Математическое моделирование синтезированных алгоритмов осуществлено на третьем этапе исследований.

Математическая постановка задачи и алгоритм решения

Математическая модель динамики состояния системы описывается дискретным уравнением вида

$$x(k+1) = \Phi[k+1, k]x(k) + \Gamma(k)w(k), x(k_0), (1)$$

где $x(k)$ - недоступный непосредственному наблюдению фазовый вектор-столбец переменных состояния системы;

$x(k_0)$ - начальное состояние системы - есть случайный вектор с математическим ожиданием $M[x(k_0)] = \bar{x}_0$, и заданной ковариационной матрицей

$$P(k_0) = cov[x(k_0), x(k_0)] = M[(x(k_0) - \bar{x}_0)(x(k_0) - \bar{x}_0)^T];$$

$\Phi[k+1,k]$ - переходная матрица, определяющая переход из состояния, соответствующего моменту $k \tau$, в состояние $(k+1) \tau$;

$w(k)$ - случайный векторный процесс, представляющий собой дискретный белый гауссов шум (БГШ), характеризующий возмущение состояния системы, с математическим ожиданием и ковариационной матрицей:

$$M[w(k)] = 0, \text{cov}[w(k), w(j)] = Q_1(k) \delta_k(k-j),$$

где $Q_1(k)$ - неотрицательно определенная матрица интенсивностей,

$\delta_k(k-j)$ - символ Кронекера;

$\Gamma(k)$ - матрица при шумах $w(k)$ возмущения состояния системы.

Модель наблюдений системы имеет вид

$$r(k) = S[x(k), k] + V(k), \quad (2)$$

где $r(k)$ - вектор измерений;

$S[x(k), k]$ - нелинейная вектор-функция переменных состояния системы, представляющая собой аналитические выражения полного вектора напряженности T [нТл] МПЗ и математические выражения полей ЛА с учетом систем координат.

$V(k)$ - случайный векторный процесс типа БГШ, характеризующий ошибки (шумы) измерений со статистическими характеристиками -

$$M[V(k)] = 0, \text{cov}[V(k), V(j)] = R_1(k) \delta_k(k-j),$$

где $R_1(k)$ - положительно определенная матрица интенсивностей ошибок (шумов) измерений, причем вне диагонали стоят взаимные интенсивности шумов измерений.

Так как магнитные моменты источников нестационарных полей изменяются по

случайному закону в случайные моменты времени, то вектор составляющих от нестационарных помех, входящий в модель наблюдений, можно включить в вектор ошибок измерений, как векторный случайный процесс типа БГШ.

Предполагается, что вектор начального состояния $x(k_0)$, вектор шумов измерений $V(k)$ и вектор шумов возмущений состояния системы $w(k)$ не коррелированы между собой

$$\text{cov} [x (k_0), V (k)] = \text{cov} [x (k_0), w (k)] = 0; \text{cov} [V (k), w (j)] = 0,$$

для любых $k, j > k_0$.

Для решения задачи синтеза алгоритма фильтрации геомагнитной информации, получаемой с помощью магнитометра и необходимой для формирования истинного курса ψ и в бортовом компьютере, в качестве алгоритма оценивания предлагается использовать расширенный дискретный фильтр Калмана (РДФК), так как уравнения модели наблюдений поставленной задачи являются существенно нелинейными.

Субоптимальной оценкой вектора состояния, выдаваемой на выходе фильтра с учетом наблюдений $r(k+1)$, поступающих от датчиков поля, является условное математическое ожидание вектора состояния на интервале наблюдения $(k_0, k+1)$

$$\hat{x}(k+1) = M [x (k+1) / r (k+1)].$$

Нелинейный расширенный алгоритм фильтрации Калмана строится на предположении о возможности линеаризации нелинейных функций моделей состояния (1) и наблюдения (2) относительно ошибок оценивания, начиная с априорной.

В силу проведения линеаризации функции $S [x (k) , k]$ оценка $\hat{x}(k+1)$ является

приближенно оптимальной (субоптимальной).

Оценка $\hat{x}(k+1)$ тем ближе к оптимальной, чем выше точность начального оценивания, характеризуемая ковариационной матрицей ошибок оценивания. При больших начальных отклонениях динамическая система, описываемая уравнением оценок и уравнением ковариаций, может оказаться неработоспособной.

В ряде ранее опубликованных работ автором решена задача линеаризации на основе синтезированных алгоритмов с применением теории марковских процессов и оптимизации систем со случайным изменением структуры, что позволяет сохранить оптимальность фильтра - измерителя при больших ошибках оценивания, и таким образом снять ограничения применения, в том числе, беспойсковых корреляционно-экстремальных систем, когда традиционные методы линеаризации были неэффективны.

Алгоритм фильтрации (оценивания) Калмана с учетом значений оценки вектора состояния x на $(k+1)$ шаге на основании $(k+1)$ измерения и на k шаге на основании k измерений, в традиционном представлении [3], без применения теории оптимизации систем со случайной структурой, используемый в настоящей работе, имеет следующий вид

$$\hat{x}(k+1, k+1) = \hat{x}(k+1),$$

$$\hat{x}(k, k) = \hat{x}(k),$$

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k+1, k) + K(k+1) [r(k+1) - S[\hat{x}(k+1, k), k+1]]. \quad (3)$$

Одношаговое предсказание или прогноз оценки на $(k+1)$ шаг

$\hat{x}(k+1, k) = \Phi[\hat{x}(k), k]$, при начальных условиях $\hat{x}(k_0) = \bar{x}_0$.

Алгоритм прогнозной (априорной) ковариационной матрицы ошибок оценивания

$P(k+1, k)$ представлен следующим рекуррентным уравнением

$$P(k+1, k) = \frac{\partial \Phi[\hat{x}(k), k]}{\partial \hat{x}(k)} P(k, k) \frac{\partial \Phi^T[\hat{x}(k), k]}{\partial \hat{x}(k)} \Gamma[\hat{x}(k), k] Q^1(k) \Gamma^T[\hat{x}(k), k], \quad (4)$$

где $P(k_0) = P(0, 0)$ значения ковариационной матрицы в начальный момент времени.

Алгоритм апостериорной ковариационной матрицы ошибок оценивания

$$P(k+1, k+1) = P(k+1, k) -$$

$$\begin{aligned} & -P(k+1, k) \frac{\partial S^T[\hat{x}(k+1, k), k+1]}{\partial \hat{x}(k+1, k)} \left\{ \frac{\partial S[\hat{x}(k+1, k), k+1]}{\partial \hat{x}(k+1, k)} P(k+1, k) \times \right. \\ & \times \left. \frac{\partial S^T[\hat{x}(k+1, k), k+1]}{\partial \hat{x}(k+1, k)} + R_1(k) \right\}^{-1} \frac{\partial S[\hat{x}(k+1, k), k+1]}{\partial \hat{x}(k+1, k)} P(k+1, k). \quad (5) \end{aligned}$$

Коэффициент усиления в матричной форме (как зависимость от ковариационной матрицы ошибок оценивания)

$$K(k+1) = P(k+1, k+1) \frac{\partial S^T[\hat{x}(k+1, k), k+1]}{\partial \hat{x}(k+1, k)} R^{-1}(k). \quad (6)$$

Ошибка оценивания на $(k+1)$ шаге есть $\Delta x(k+1) = x(k+1) - \hat{x}(k+1)$.

Начальные условия для расчета по алгоритму РДФК соответствуют априорным значениям математического ожидания вектора состояния $\hat{x}(k_0)$ и ковариационной матрицы в начальный момент времени $P(k_0) = P(0, 0)$.

Структурная схема алгоритма обработки по уравнениям РДФК (1) - (6)

представлена на рисунке 1 [4]. Схема РДФК составлена автором для общего случая нелинейной модели состояния

$$x(k+1) = \Phi[x(k), k] + \Gamma[x(k), k]w(k), x(k_0) = x_0.$$

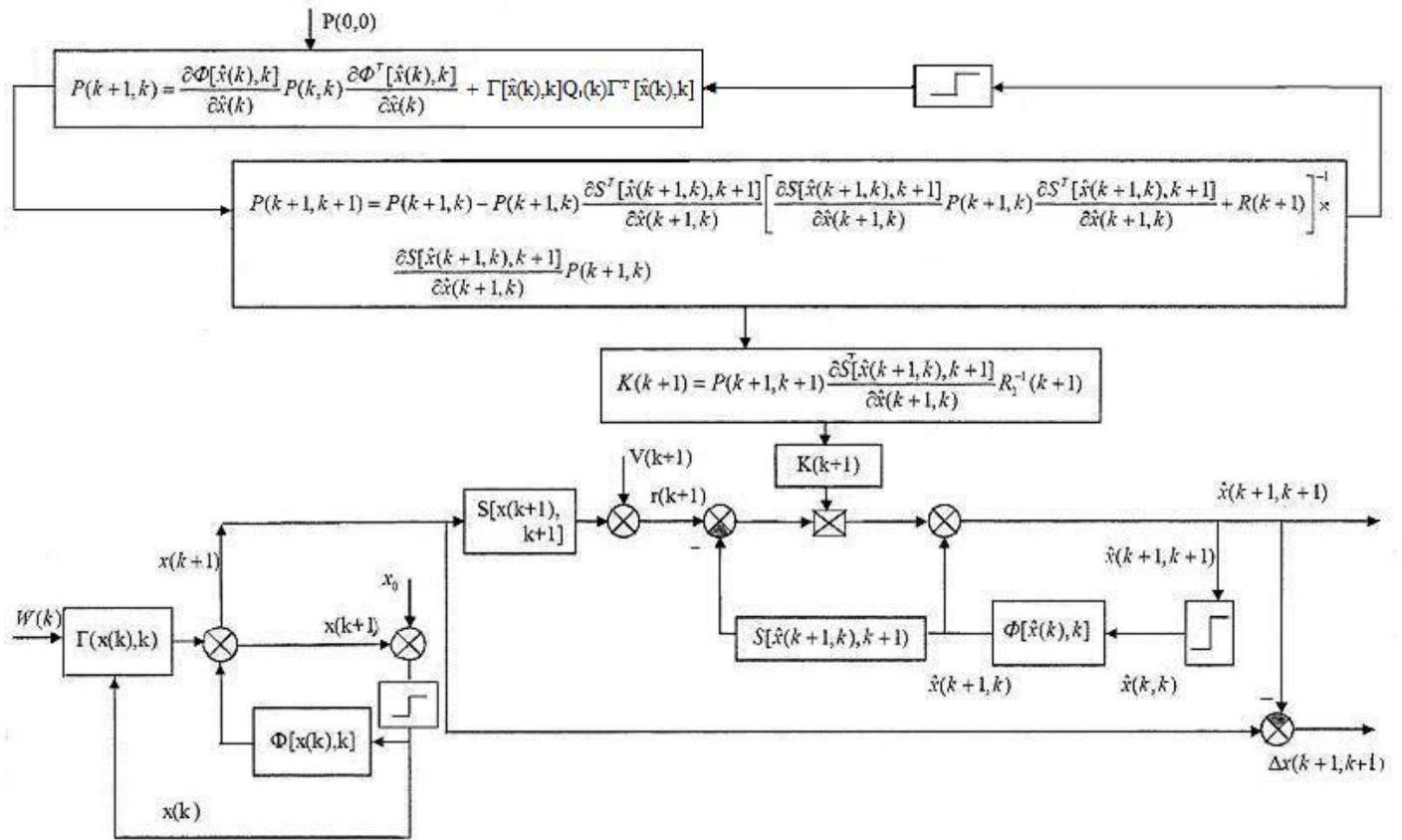


Рис.1. Структурная схема РДФК

Необходимо подчеркнуть, что в случае применения алгоритма фильтрации на базе систем со скачкообразным изменением структуры, предлагаемого автором для геомагнитной системы в виду скачкообразного изменения характеристик магнитного

поля носителя, в том числе, при отделении различных грузов, фильтрация марковского процесса приведет к организации в структуре фильтра взаимосвязанных каналов оценивания, число которых равно количеству диффузионных фазовых компонентов процесса, подлежащего оцениванию.

Эта связь будет определяться весовыми коэффициентами со значениями, определяемыми в каждый момент времени по данным идентификатора состояний. В алгоритмах фильтрации для систем со случайной структурой будет присутствовать функциональная зависимость между апостериорными вероятностями состояний, субоптимальными оценками и элементами ковариационной матрицы ошибок оценивания.

Структурная схема ПНК для решаемой задачи с субоптимальным алгоритмическим обеспечением, как части комплексной экспертной системы, представлена на рисунке 2.

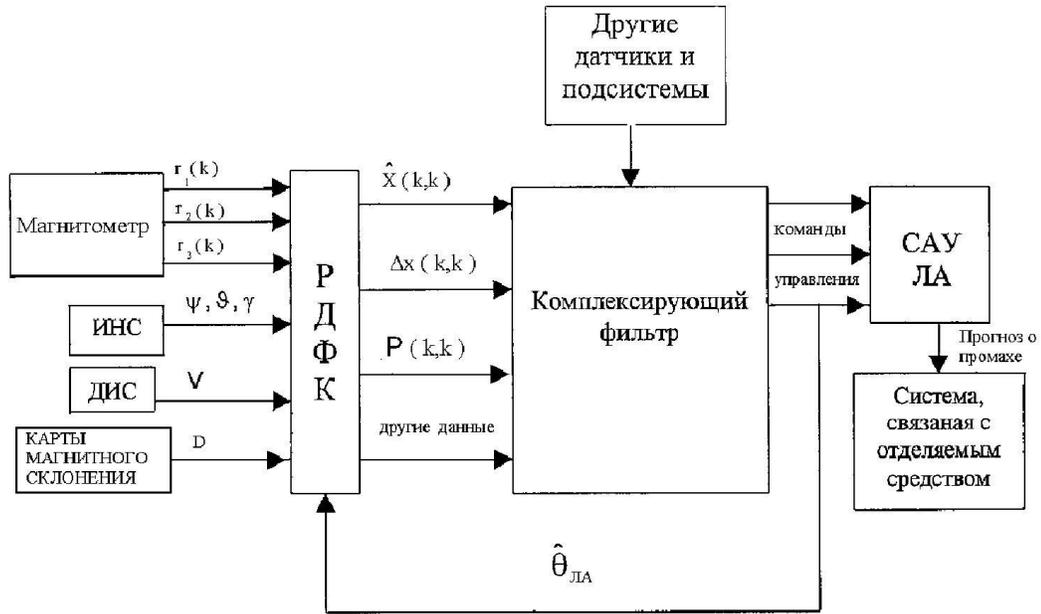


Рис. 2. Структурная схема информационного блока комплексной навигационной системы

Структурная схема изображена с учетом следующих обозначений:

ИНС - инерциальная навигационная система;

ДИС - доплеровский измеритель путевой скорости;

САУ ЛА - система автоматического управления ЛА;

$\hat{x}(k,k)$ - оценки вектора состояния x на k шаге на основании k измерений;

D - магнитное склонение; ψ - курс, ϑ - угол тангажа, γ - угол крена;

$\hat{\theta}_{ЛА}$ - закон управления положением вектора скорости ЛА по оценке

соответствующей компоненты вектора состояния.

Математическое моделирование синтезированного алгоритма

Синтезированный в настоящей работе алгоритм фильтрации магнитометрической информации реализован с помощью математического моделирования.

В процессе моделирования исследовалось поведение оценок вектора состояния $\hat{x}(k+1)$ и текущего значения ковариационной матрицы $P(k+1, k+1)$ ошибок оценок внутри интервала наблюдения. При моделировании использовались карты МПЗ для различных районов.

Результаты моделирования представлены на графиках, отражающих поведение ошибок оценивания фазовых координат и их дисперсий на интервале наблюдения в процессе полета ЛА.

Графики изменения ошибок оценок $\Delta b(k+1)$ и $\Delta g(k+1)$ соответствующих коэффициентов Пуассона $b_{induct}(k+1)$ и $g_{induct}(k+1)$, характеризующих индуктивное намагничивание, приведены в качестве примера, иллюстрирующего работоспособность синтезированного алгоритма, на рисунке 3а, б).

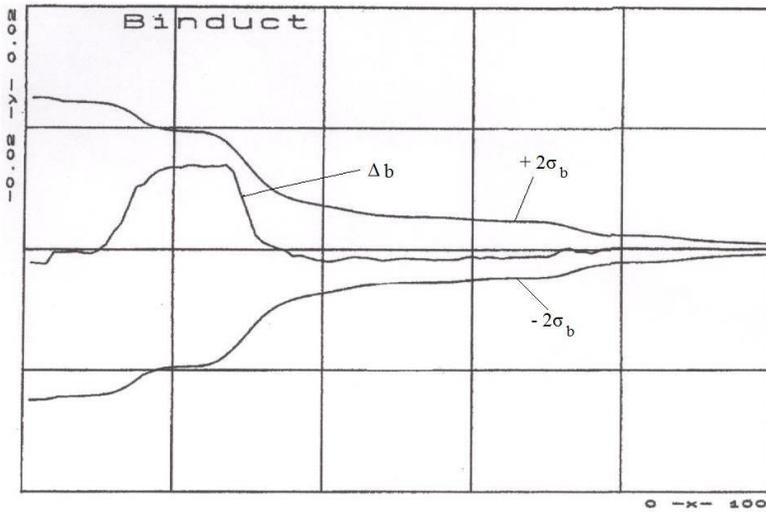


Рис.3 а). Поведение ошибок оценивания коэффициента Пуассона $b_{induct}(k+1)$ и их среднеквадратических отклонений

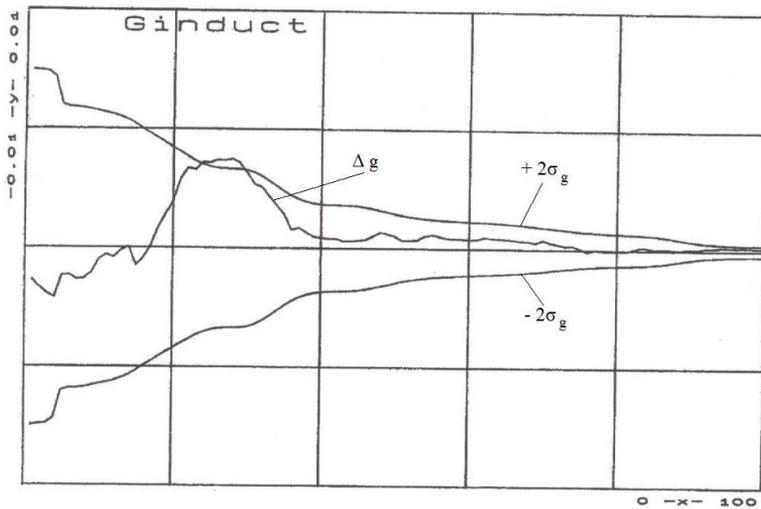


Рис.3 б). Поведение ошибок оценивания коэффициента Пуассона $g_{induct}(k+1)$ и их среднеквадратических отклонений

На графиках по оси абсцисс отражен интервал наблюдения в процессе оценивания, по оси ординат - диапазоны изменения ошибок оценок $\Delta b(k+1)$ и $\Delta g(k+1)$

точности оценивания коэффициентов Пуассона $b_{induct}(k+1)$ и $g_{induct}(k+1)$.

Поведение в полете ошибок оценивания остальных коэффициентов Пуассона, характеризующих индуктивное и постоянное намагничивание, имеют аналогичный вид. При этом ошибки оценивания входят в область, ограниченную $2\sigma_x$ - удвоенными значениями соответствующих среднеквадратических отклонений.

Для исследования влияния характера траектории ЛА на процесс оценивания параметров вектора состояния моделировался полет ЛА на различных магнитных курсах. Результаты моделирования показали, что на начальном этапе оценивания целесообразно совершать летательным аппаратом эволюции по курсу.

Заключение

В результате, на основании методов теории оптимальной и субоптимальной фильтрации и идентификации синтезирован алгоритм, позволяющий оценивать магнитный курс ЛА, а также, с целью повышения точности оценивания, магнитное наклонение, модуль вектора напряженности МПЗ и коэффициенты Пуассона, характеризующие индуктивное и постоянное намагничивание.

Программное обеспечение, разработанное автором, может быть использовано для решения ряда прикладных задач навигации и наведения на основе обработки информации сигналов аномального МПЗ в комплексных навигационных системах ЛА гражданского и военного назначения, а также для других подвижных объектов, в том числе в робототехнических системах.

В связи с тем, что изменение состава бортового оборудования (например,

отделение груза) приводит к скачкообразному изменению магнитного поля ЛА и, соответственно, коэффициентов Пуассона, в работе предложено решение задачи синтеза алгоритма для этой актуальной задачи на основе теории марковских процессов и систем со случайным изменением структуры.

Синтезированные в работе алгоритмы обработки сигналов и предлагаемая система определения курса

- - обеспечивают высокую точность курсовой информации, необходимой для формирования истинного курса в бортовом компьютере;
- - позволяют полностью отказаться от проведения трудоемких и дорогостоящих девиационных работ, характерных для традиционных алгоритмов;
- - могут использоваться в НК и ПНК как метод алгоритмической коррекции накапливающихся ошибок инерциальных навигационных систем в отличие от традиционно применяемых технических средств коррекции ИНС, с целью обеспечения точности и помехозащищенности в сложных условиях движения объекта;
- - могут служить необходимой автономной информацией для НК и ПНК в различных режимах: радиомолчания и молчания РЛС (для обеспечения скрытности); при полете над акваториями и участками суши с малоинформативным рельефом, и т.д.;
- не имеют зарубежных аналогов в объеме проведенного патентного поиска.

Библиографический список

1. Михлин Б.З., Селезнев В.П., Селезнев А.В. Геомагнитная навигация. - М.:

Машиностроение, 1976. – 280 с.

2.Семенов Н.М., Яковлев Н.И. Цифровые феррозондовые магнитометры. - Л.: Энергия, 1978. – 168 с.

3.Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. - М.: Связь, 1986. – 495 с.

4.Колосовская Т.П. Обработка сигналов магнитных полей в навигационных системах. - М.: ВИНТИ РАН, № 19, В2015, 9 с.

5.Слесаренок С.В., Шепеть И.П., Рубинов В.И., Титов Ю.П. Автокомпенсация погрешностей навигационных датчиков бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Труды МАИ, 2016, № 86:

<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=66381>

6.Andreas R.D., Hostetler L.D., Beckman R.C. Continuous Kalman Updating of an Inertial Navigation System Using Terrain Measurements. – NAECON'78, v. 3.