

УДК 269.7, 537

Алгоритм комплексирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы и магнитометрической системы для решения задачи навигации летательных аппаратов

Бобронников В.Т.*, Кадочникова А.Р.**

Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

e-mail: vlbobronnikov@yandex.ru

e-mail: arkadochnikova@gmail.com

Аннотация

Разработан алгоритм комплексирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы и магнитометрической системы, предназначенной для использования на борту летательных аппаратов (ЛА) различного назначения для уточнения угла курса ЛА. Описана функциональная схема модели комплексированной навигационной системы (КНС). Проведен анализ эффективности алгоритма методом имитационного моделирования. В качестве показателя эффективности КНС рассматривается ошибка оценивания угла курса, статистические характеристики которой рассчитываются методом Монте-Карло. Представлены результаты численных расчетов, демонстрирующие преимущество использования КНС рассматриваемого типа на борту летательных аппаратов.

Ключевые слова: летательный аппарат, бесплатформенная инерциальная навигационная система, магнитометрическая система, комплексированная навигационная система, имитационная модель.

Введение

Основным источником навигационной информации на борту современных летательных аппаратов (ЛА) различного назначения, функционирующих в земной атмосфере, в околоземном космическом пространстве и аппаратов, движущихся под водой, является бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), состоящая из блока инерциальных чувствительных элементов (БИЧЭ) и алгоритма обработки измерений, реализованного в бортовой вычислительной системе (БВС) аппарата.

Очевидными преимуществами БИНС является её автономность и помехозащищённость. Однако с автономной работой инерциальной системы связан её главный недостаток – отсутствие возможности скомпенсировать ошибки, обусловленные погрешностями измерителей.

Среди ошибок навигации особенно существенными для ЛА определенных классов являются ошибки измерения углов ориентации, нарастающие пропорционально времени функционирования ЛА. Эти ошибки обусловлены постоянными или медленно меняющимися во времени ошибками измерений угловых скоростей с помощью датчиков угловых скоростей (ДУСов), называемыми «смещениями нулей» приборов. Смещения нулей являются случайными в каждой новой реализации движения ЛА, поэтому на этапе предварительной калибровки гироскопов не удаётся получить точную информацию об этих ошибках и учесть их заранее в бортовой программе. Поэтому показания БИНС необходимо корректировать в процессе движения ЛА.

В системах управления ЛА, движущихся в атмосфере, или в околоземном космическом пространстве, ошибки навигации с помощью БИНС обычно корректируют путем построения комплексированной навигационной системы (КНС) [1-3], в которой в качестве источника дополнительной навигационной информации служит спутниковая навигационная система (СНС). В качестве недостатка СНС указывают чувствительность этой системы к радиоэлектронным помехам. Для аппаратов, движущихся под водой, навигационная информация от СНС недоступна, так как радиосигналы не распространяются в водной среде. В качестве ее альтернатив при построении комплексированных навигационных систем для таких аппаратов рассматривают датчики глубины, измеритель скорости вращения винта и другие приборы.

Поэтому в последнее время повышенное внимание уделяется анализу возможности использования на борту подвижных объектов, движущихся в разных средах, в качестве дополнительного источника навигационной информации блока магнитометрических измерителей (БМИ) с трехкомпонентным (векторным) магнитометром в его составе [4, 5]. Эта возможность обусловлена улучшением эксплуатационных характеристик магнитометров, в том числе уменьшением их массы и габаритов, повышением точности измерений и снижением стоимости.

Целью исследования, результаты которого представлены в данной статье, является разработка алгоритма КНС, основанной на совместном использовании БИНС и магнитометрической навигационной системы (МНС), в состав которой входит БМИ и алгоритм оценивания «магнитных» углов ориентации ЛА, для повышения точности оценивания угла курса ЛА.

Предлагаемый вариант комплексирования системы

Способ комплексирования зависит от состава внешних (по отношению к БИНС) измерений и от схемы построения интегрированной системы. Существует несколько схем комплексирования: отдельная, слабо связанная, жестко связанная, глубоко интегрированная схемы [1- 3].

На начальном этапе исследования рассматриваемой проблемы ключевым фактором является простота алгоритма комплексирования, поэтому для построения интегрированной системы была выбрана отдельная схема, так как такая схема является наиболее простым вариантом совместного использования объединяемых систем. При отдельной схеме БИНС и МНС работают независимо друг от друга, и по измерениям МНС проводится коррекция БИНС. Коррекция заключается в периодическом перезапуске алгоритма БИНС с новыми начальными условиями, данные о которых поступают из МНС. Кроме того, для создания такой архитектуры КНС требуются минимальные изменения в аппаратных средствах и программном обеспечении БИНС как основной системы.

Дальнейший анализ проблемы показал, что такую замену целесообразно делать только для угла курса. Уходы по углам крена и дифферента можно оценивать отдельно, обрабатывая показания акселерометров в составе БИНС на участке прямолинейного движения ЛА.

Упрощающие предположения

Представленная модель функционирования КНС была разработана при следующих предположениях:

1. Навигация ЛА с помощью предложенного типа КНС осуществляется на участках движения, удалённых от магнитных аномалий.

2. Перед началом функционирования КНС уходы гироскопов крена и дифферента предварительно оценены с достаточной точностью на участках прямолинейного движения ЛА.

3. Перед началом функционирования КНС проведена калибровка МНС, результатом которой являются оценки компонент ВМИ Земли в месте нахождения ЛА и ВМИ постоянного магнитного поля ЛА.

4. Индукционное магнитное поле, создаваемое ферромагнитными массами ЛА, а также магнитное поле вихревых токов в токопроводящих элементах конструкции ЛА не учитываются.

5. ВМИ Земли и ЛА остаются постоянным на всём участке функционирования ЛА.

Комплексированный алгоритм навигации

При наличии информации об углах дифферента и крена математическая задача оценивания магнитного угла курса решается следующим образом.

ВМИ Земли \mathbf{B}_3^* и ЛА \mathbf{B}_1^* входят в математическую модель измерений магнитометра следующим образом [5]:

$$\tilde{\mathbf{U}}_i(\gamma_i, \vartheta_i, \psi_i) = \mathbf{A}_i(\gamma_i, \vartheta_i, \psi_i) \cdot \hat{\mathbf{B}}_3^* + \hat{\mathbf{B}}_1^* + \boldsymbol{\eta}_i(t), \quad (1)$$

где: $\tilde{\mathbf{U}}_i$ - трехмерный вектор измерений в момент t_i ; \mathbf{A}_i - матрица направляющих косинусов, связывающая инерциальную и связанную системы координат (ИСК и ССК) в момент t_i ; $\hat{\mathbf{B}}_3^*$ - оценка ВМИ Земли в ИСК; $\hat{\mathbf{B}}_1^*$ - оценка ВМИ изделия в ССК; $\boldsymbol{\eta}_i$ - вектор ошибок измерений магнитометра.

Измерения $\tilde{\mathbf{U}}_i$ могут быть использованы для оценки углов ориентации ЛА $\psi_i, \vartheta_i, \gamma_i$, входящих в матрицу \mathbf{A}_i . Совместно эти углы можно обозначить трехмерным вектором $\mathbf{q}_i = [\psi_i, \vartheta_i, \gamma_i]^T$.

Для оценки вектора \mathbf{q}_i по измерениям $\tilde{\mathbf{U}}_i$ поступаем следующим образом. Зная оценки $\hat{\mathbf{B}}_3^*$ и $\hat{\mathbf{B}}_1^*$, находим составляющую вектора измерений $\Delta\tilde{\mathbf{U}}_i$, обусловленную только ВМИ Земли и зависящую от текущего углового положения ЛА, характеризуемого текущим вектором \mathbf{q}_i :

$$\Delta\tilde{\mathbf{U}}_i = \mathbf{A}_i \cdot \hat{\mathbf{B}}_3^* = \tilde{\mathbf{U}}_i - \hat{\mathbf{B}}_1^*. \quad (2)$$

Перепишем алгебраическое уравнение (2) с учетом вектора \mathbf{q}_i , входящего нелинейно в матрицу $\mathbf{A}_i(\mathbf{q}_i)$:

$$\mathbf{A}_i(\mathbf{q}_i) \cdot \hat{\mathbf{B}}_3^* = \Delta\tilde{\mathbf{U}}_i. \quad (3)$$

При известных оценках углов $\hat{\gamma}(t)$ и $\hat{\vartheta}(t)$ матрицы \mathbf{A}_γ и \mathbf{A}_ϑ , входящие в матрицу ориентации $\mathbf{A} = \mathbf{A}_\gamma \cdot \mathbf{A}_\vartheta \cdot \mathbf{A}_\psi$, являются заданными матрицами, и соотношение (3) может быть преобразовано к виду:

$$\Theta(\gamma, \vartheta) \cdot \mathbf{A}_\psi \cdot \hat{\mathbf{B}}_3^* = \Delta \tilde{\mathbf{U}}_i, \quad (4)$$

где: $\Theta(\gamma, \vartheta) = \mathbf{A}_\gamma \cdot \mathbf{A}_\vartheta$.

Умножая (4) слева на $\Theta^{-1}(\gamma, \vartheta) = (\mathbf{A}_\gamma \cdot \mathbf{A}_\vartheta)^{-1} = (\mathbf{A}_\gamma \cdot \mathbf{A}_\vartheta)^T = \mathbf{A}_\vartheta^T \cdot \mathbf{A}_\gamma^T$, получаем уравнение:

$$\mathbf{A}_\psi \cdot \hat{\mathbf{B}}_3^* = \Theta^{-1} \cdot \Delta \tilde{\mathbf{U}}_i = \tilde{\mathbf{Q}}_i, \quad (5)$$

в котором:

$$\mathbf{A}_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{Q}}_i = \begin{bmatrix} \tilde{Q}_{x1} \\ \tilde{Q}_{y1} \\ \tilde{Q}_{z1} \end{bmatrix}_i. \quad (6)$$

Из (5) с учетом (6) находим искомый угол $\hat{\psi}$:

$$\hat{\psi} = \begin{cases} \arcsin(s_\psi), & \text{если } c_\psi \geq 0 \\ \pi \cdot \text{sign}(\arcsin(s_\psi)) - \arcsin(s_\psi), & \text{если } c_\psi < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

$$\text{где: } s_\psi = \sin \psi = -\frac{\tilde{Q}_{z1}}{\|\tilde{\mathbf{Q}}\|}; \quad c_\psi = \cos \psi = \frac{\tilde{Q}_{x1}}{\|\tilde{\mathbf{Q}}\|}; \quad \|\tilde{\mathbf{Q}}\| = \sqrt{\tilde{Q}_{x1}^2 + \tilde{Q}_{z1}^2}.$$

Формирование модели КНС

Эффективность предложенного алгоритма была оценена путем имитационного моделирования процесса функционирования КНС. В качестве критериев эффективности рассматривались статистические характеристики ошибок оценивания угла курса ЛА.

Функциональная схема имитационной модели представлена на рис. 1. На этой схеме модель инерциальной компоненты системы включает модель БИЧЭ и алгоритм БИНС для расчета углов ориентации ЛА по измерениям ДУСов. Магнитометрическая часть системы включает модель векторного магнитометра и алгоритм оценки угла курса ЛА.

В качестве факторов, влияющих на функционирование КНС и учитываемых в модели, рассматривались: динамика движения ЛА, ВМИ Земли и ЛА, априорная оценки ВМИ Земли и ЛА, ошибки измерений БЧЭ и БМИ.

Выходами модели являются оценки трех углов ориентации ЛА, в том числе углов тангажа и крена на выходе алгоритма БИНС и угла курса на выходе алгоритма ММС.

Переменными y на схеме (см. рис. 1) указаны функциональные связи между компонентами КНС, участвующими в оценке угловых параметров ЛА: y_1 – вектор угловых скоростей и ускорений ЛА, измеренных БИЧЭ; y_2 – вектор суммарного ВМИ, измеренного БМИ; y_3 – углы дифферента и крена ЛА, оцененные в алгоритме БИНС; y_4 – оценка угла курса ЛА, вычисленная в алгоритме МНС.

Переменными z обозначены связи компонентов КНС с внешней средой: z_1 – векторы угловых скоростей и кажущихся ускорений ЛА; z_2 – информация о угловом положении ЛА в момент начала работы БИНС, поступающая из навигационной системы носителя ЛА; z_3 – векторы ошибок измерений ДУСов и акселерометров БИЧЭ; z_4 – компоненты ВМИ Земли; z_5 – компоненты ВМИ ЛА; z_6 – ошибки измерений векторного магнитометра; z_7 – оценки ВМИ Земли и ЛА, полученные на этапе калибровки векторного магнитометра; z_8 – углы ориентации ИСК относительно ЗСК, задаваемые перед пуском ЛА; z_9 – оценки углов ориентации ЛА, поступающие из КНС в СУ для управления угловым движением ЛА, в том числе углов дифферента и крена из БИНС и угла курса из МНС.

Программная реализация имитационной модели

В состав имитационной модели КНС помимо комплексированного алгоритма навигации также входят алгоритм БИНС, модель углового движения ЛА, модели ВМИ Земли и ЛА, модели измерений ДУСов и магнитометра, учитывающие ошибки приборов.

Программа имитационной модели КНС была реализована в системе программирования Matlab. Подсистемы КНС моделировались следующим образом.

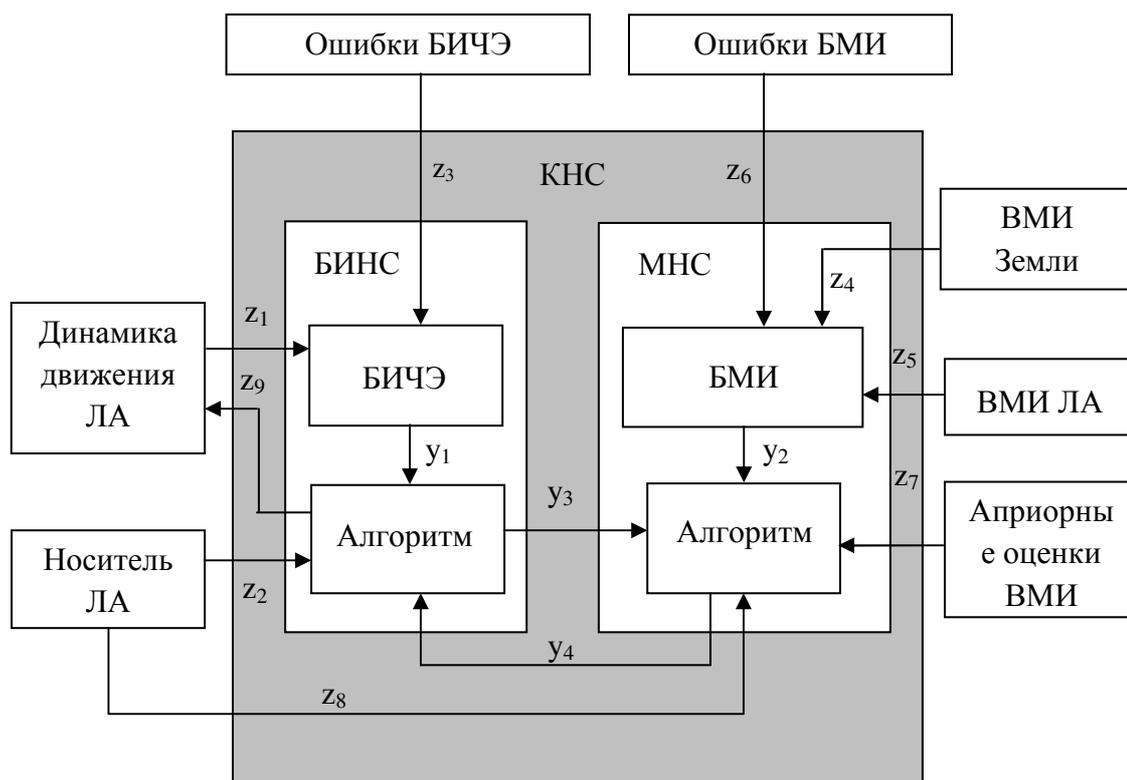


Рис. 1. Функциональная схема модели КНС.

Угловое движение ЛА $V_{ЛА}$ моделировалось путем задания угловых скоростей ЛА по трем осям в виде гармонических функций времени с заданными амплитудами и частотами. «Истинные» углы ориентации ЛА на каждом шаге рассчитывались путем интегрирования уравнений Эйлера.

Компоненты ВМИ Земли V_z рассчитывались с помощью стандартной подпрограммы как функция от географических координат места нахождения ЛА. ВМИ ЛА принимался постоянным вектором.

Ошибки измерений ДУСов $\varepsilon(t)$ по каждой из трех осей имитировались как сумма линейной составляющей, соответствующей уходу гироскопа, и дискретного белого шума с заданной дисперсией, описывающего случайные ошибки измерений.

Ошибки измерений магнитометра $\eta(t)$ моделировались как дискретный белый шум с заданной дисперсией.

Модель алгоритма БИНС в составе КНС в данном случае сводилась к интегрированию уравнений Эйлера.

Схема вычислительного алгоритма имитационной модели КНС изображена на рис. 2. Для оценки эффективности системы в программу включен алгоритм расчета математического ожидания $m_\varepsilon(t)$ и среднеквадратичного отклонения $\sigma_\varepsilon(t)$ ошибки оценивания угла курса $\varepsilon(t) = \psi(t) - \hat{\psi}(t)$. Эти статистики рассчитывались методом Монте-Карло по большому числу реализаций.

Процесс функционирования КНС моделировался в течение 60 секунд при следующих исходных данных:

1. Функционирование ЛА имитировалось в точке с координатами:

$\varphi = 73^\circ$ Северной широты и $\lambda = 36^\circ$ Восточной долготы.

2. $\Psi_0 = 90^\circ$ – угол между направлением на Север и осью Ox ИСК, град;

3. Исходные углы ориентации ЛА принимались равными нулю.

4. $\mathbf{B}_{ЛА} = [-3000; 12000; -2500]$ – ВМИ ЛА, нТ;

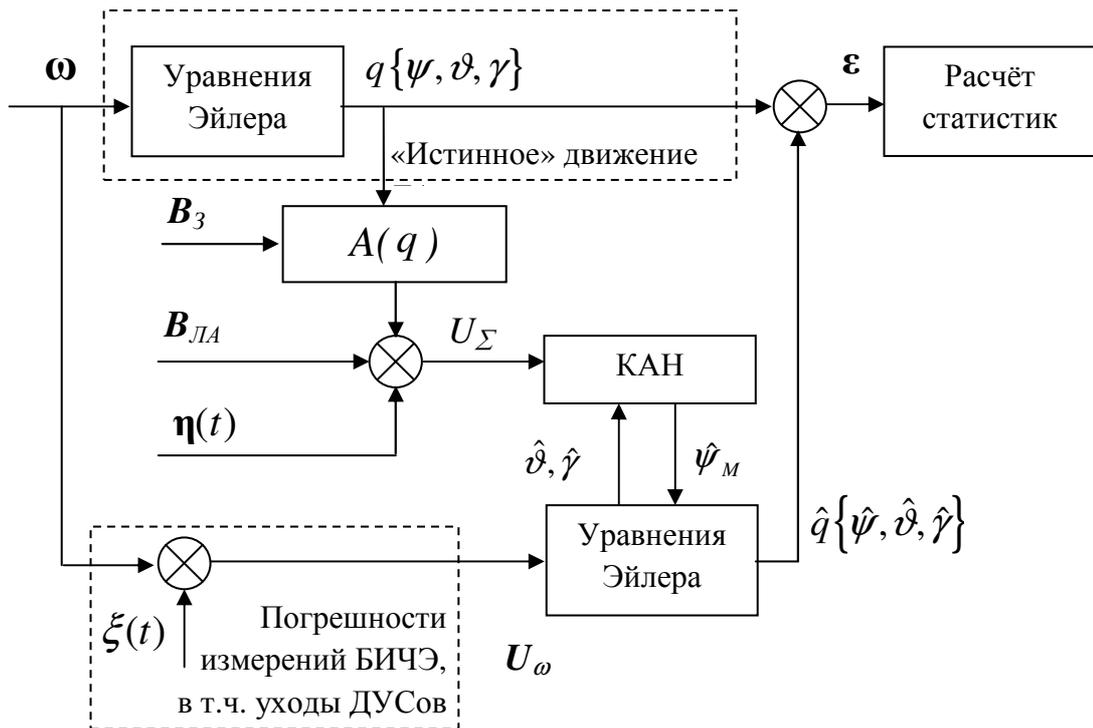


Рис. 2. Схема вычислительного алгоритма имитационной модели КНС.

5. $\mathbf{A} = [4; 1; 0.5]$ - вектор амплитуд гармонических сигналов, описывающих изменение угловых скоростей вращения ЛА относительно осей ССК в его истинном движении, град/сек;

6. $\mathbf{\omega} = [6; 12; 18]$ - вектор частот изменения этих сигналов, град/сек;

7. $\sigma_{\omega} = 0.5$ – с.к.о. ошибок измерений угловых скоростей с помощью ДУСов, град/сек;

8. $\sigma_{\Delta\omega} = 6/3/3600$ – с.к.о. скорости уходов ДУСов, град/сек, что соответствует 6 град/час по каждой из осей;

9. $\Delta\omega = [60/3600, 40/3600, 20/3600]$ – вектор постоянных составляющих уходов ДУСов по углам курса, крена и дифферента соответственно, град/сек, что соответствует 60, 40 и 20 град/час.

10. $\sigma_\eta = 10$ - с.к.о. ошибок измерений ВМИ по каждой из осей векторного магнитометра, нТ.

Результаты моделирования

Первоначально для проверки работоспособности КАН с использованием модели был проведен расчет при ошибках измерений БИЧЭ и магнитометра без учета линейной составляющей ошибки БИНС. Результаты расчета иллюстрируют графики, представленные на рис. 3. На графиках приведены математические ожидания и трубки $\pm 3\sigma_\psi$ возможных изменений во времени ошибок оценки угла курса ψ с помощью БИНС и КНС с вероятностью 0.997. Математическое ожидание ошибки КНС близко к нулю, тогда как для БИНС за расчетное время оно изменяется от -0.375° до -0.3° . Диаметр трубки ошибок КНС уменьшается в 40 раз по сравнению с трубкой для БИНС. Таким образом, результаты расчетов подтверждают, что использование КНС на борту ЛА значительно повышает точность навигации.

Влияние с.к.о. шумов измерителей (ДУСов и магнитометров) на с.к.о. результирующей ошибки КНС демонстрируют графики, представленные на рис. 4 и 5. Как видно из графиков, при увеличении значения с.к.о. ошибки измерений ДУСов от 1 до 25 град/сек точность работы КНС снижается в 2 раза, а при увеличении с.к.о. шума магнитометра от 10 до 100 нТ – в 6 раз.

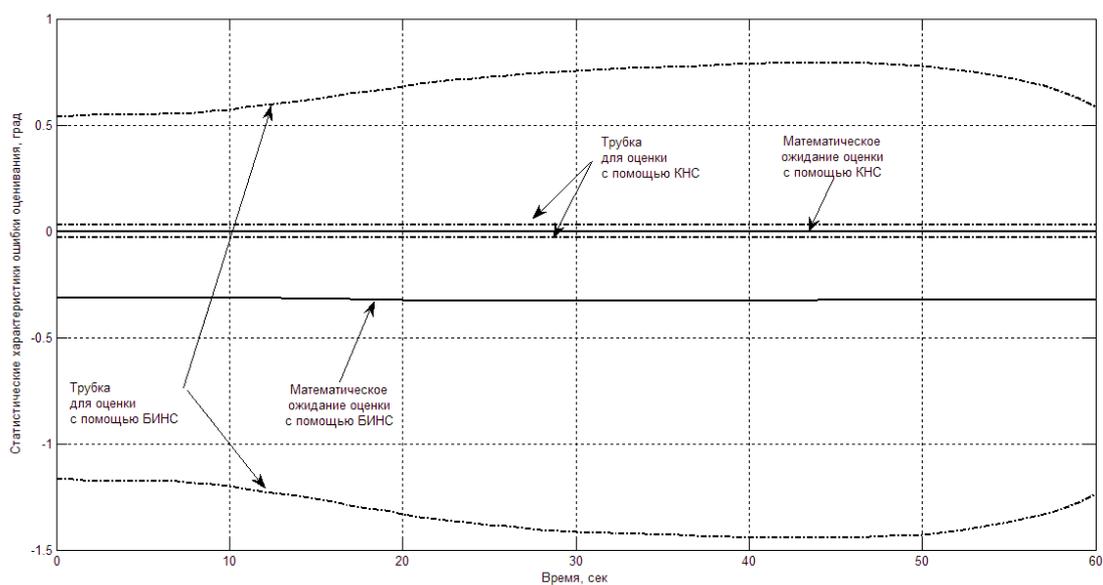


Рис. 3. Статистические характеристики ошибок оценивания угла курса с помощью БИНС и КНС.

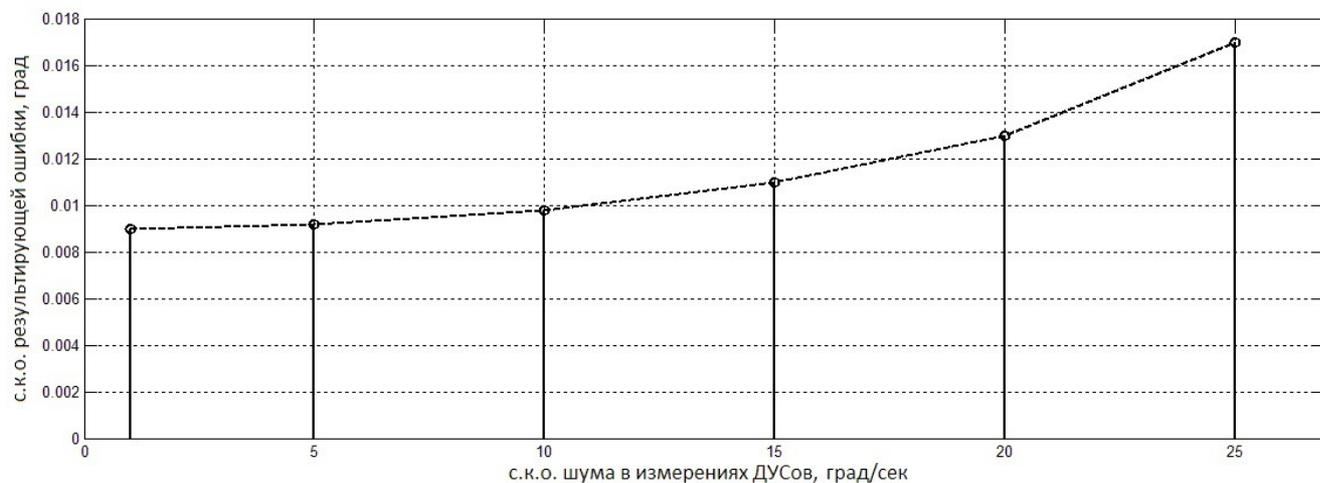


Рис. 4. Зависимость с.к.о. ошибки оценки угла курса с помощью КНС от с.к.о. ошибок измерений ДУСов.

Был также рассмотрен вариант работы КНС, в алгоритме которой используются нескорректированные измерения углов дифферента и крена, т.е. содержащие ошибки, обусловленные уходами гироскопов (рис. 6). При этих

ошибках результирующая ошибка оценивания угла курса превосходит ошибку этого угла с помощью БИНС. Следовательно, без возможности корректировать измерения углов крена и дифферента выбранный метод комплексирования неэффективен.

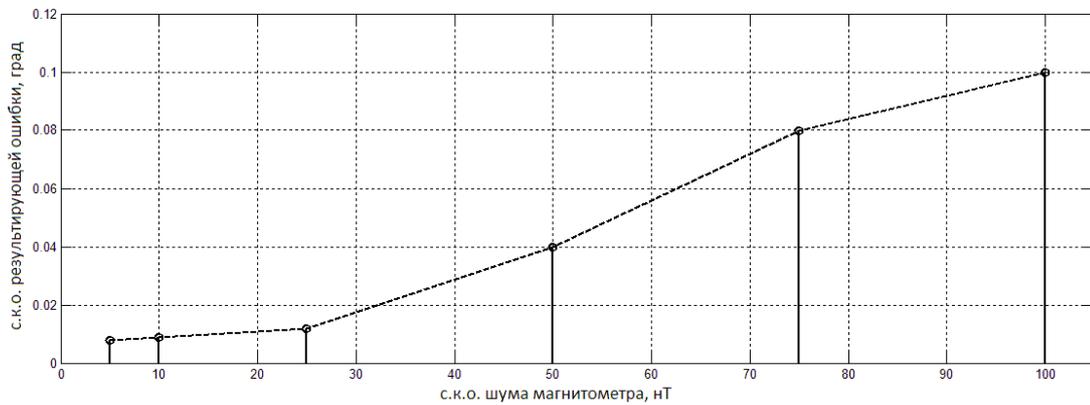


Рис. 5. Зависимость с.к.о. ошибки оценки угла курса с помощью КНС от с.к.о. ошибок измерений магнитометров.

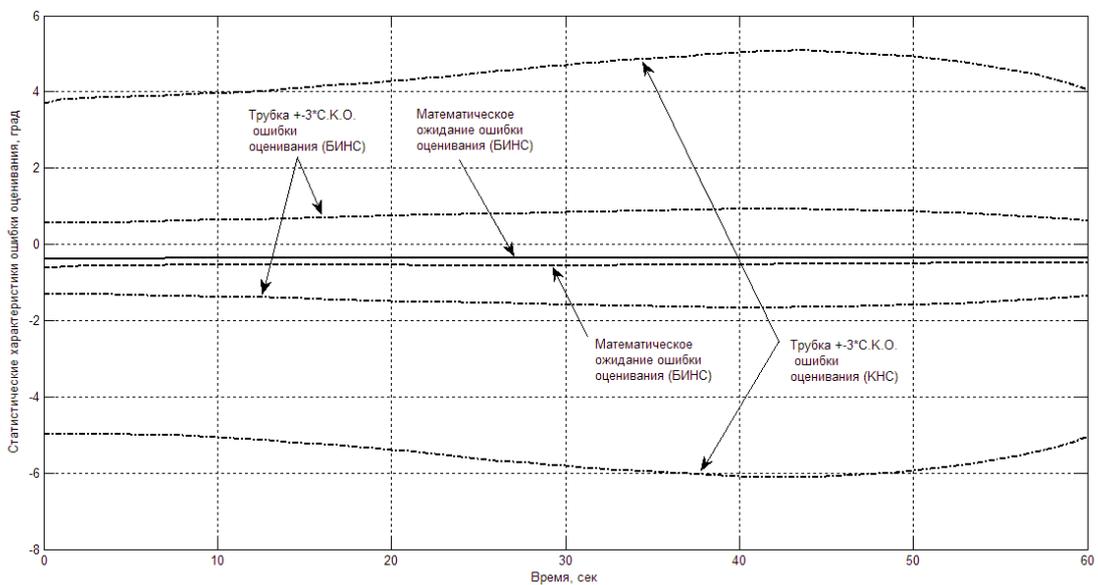


Рис. 6. Статистические характеристики ошибок оценивания БИНС и КНС.

Заключение

Результаты имитационного моделирования предложенного алгоритма функционирования КНС позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанный алгоритм комплексирования инерциальной и магнитометрической систем позволяет существенно повысить точность навигации ЛА по сравнению с использованием только БИНС, по крайней мере, при оценивании угла курса ЛА.

2. Ошибки измерений БИЧЭ и векторного магнитометра заметно влияют на результирующую оценку угла курса с помощью КНС. Для уменьшения этого влияния следует использовать высокоточные измерительные приборы.

3. Использование КНС может быть эффективным только при наличии достаточно точных априорных оценок уходов гироскопов по углам дифферента и крена, а также значений ВМИ ЛА и Земли. Уходы гироскопов по углам дифферента и крена могут быть предварительно оценены в алгоритме БИНС на участках прямолинейного движения ЛА.

Для дальнейшего исследования возможностей комплексирования инерциальных и магнитометрических компонентов в составе КНС, предназначенной для использования на борту современных летательных аппаратов, должна быть создана более подробная модель. В частности, целесообразно рассмотреть более глубокую схему комплексирования, использовать более точные модели ошибок измерений датчиков, учесть влияние мягкого железа и вихревой составляющей

ВМИ ЛА. Использование комплексированного алгоритма навигации следует рассмотреть совместно с алгоритмом оценивания уходов по углам дифферента и крена по измерениям акселерометров, а также алгоритмом калибровки магнитометрической системы.

Библиографический список

1. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. М.Н. Красильщикова и Г.Г. Себрякова. – М.: Физматлит, 2003, 280 стр.
2. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. / Под ред. Б.С. Алешина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. – М.: Физматлит, 2006, 424 стр.
3. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. / под ред. Красильщикова М.Н., Себрякова Г.Г. – М.: Физматлит, 2009, 556 стр.
4. Gebre-Egziabner D., Nyward R., Powell J. Design of Multi_sensor Attitude Determination System. // Ieee Transactions and Electronic Systems/ vol/ 40 No 2 ? 2004. p.p. 627- 649.
5. Семеновский Р.Б., Аверкиев В.В., Яроцкий В.А. Специальная магнитометрия. – СПб.: Наука, 2002, 228 стр.