

УДК 629.07

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ДАННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ, БАРОМЕТРИЧЕСКИХ, МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ И СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

К.В. Козадаев

Белорусский государственный университет, Минск

## INTEGRATION OF DATA FROM INERTIAL, BAROMETRIC, MAGNETOMETRIC AND SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS

K.V. Kozadaev

Belarusian State University, Minsk

В статье для комплексирования данных автономных и спутниковых навигационных систем предлагается использовать двухкаскадную схему фильтра Калмана. Это позволяет решить проблему различной скорости обновления данных в автономных и спутниковых навигационных системах, а также получить оптимальную оценку состояния динамической системы, основываясь на измерениях, неизбежно содержащих погрешности.

**Ключевые слова:** инерциально-спутниковые навигационные системы, фильтр Калмана, комплексирование потоков данных, навигационное решение.

The use of a two-stage Kalman filter scheme for integrating data from autonomous and satellite navigation systems is considered. This allows us to solve the problem of different data update rates in autonomous and satellite navigation systems, as well as to obtain an optimal estimate of the state of a dynamic system based on measurements that inevitably contain errors.

**Keywords:** inertial-satellite navigation systems, Kalman filter, data stream aggregation, navigation solution.

**Введение**

Задача интеграции показаний автономных и спутниковых навигационных систем с целью построения точного и надежного навигационного решения в настоящее время приобретает значительный практический интерес с точки зрения конструирования и применения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]–[4]. Одним из способов оптимального учета погрешностей навигационных систем является применение динамических фильтров Калмана (ФК), которые позволяют комплексировать потоки навигационных данных в режиме реального времени, обладая при этом хорошими показателями сходимости решений и минимизации аппаратных ошибок [1], [5]–[7].

Основной целью статьи является разработка схемы комплексирования потоков данных, формируемых спутниковыми и автономными навигационными системами типовых пилотажно-навигационных комплексов (ПНК) малых БПЛА, в состав которых входят: 3-х осевой акселерометр, 3-х осевой гироскоп, 3-х осевой магнитометр, статический и динамический барометрические датчики, а также модуль приема и обработки сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС).

**1 Алгоритм идеальной бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС)**

При описании ориентации и положения БПЛА в основном используются три системы координат (СК) [2], [4]:

– жестко сцепленная с корпусом БПЛА *связанная СК*;

– *сопровождающая СК*, ассоциированная с центром масс БПЛА;

– *геодезическая СК* Земли (например, WGS-84, ПЗ-90).

*Связанная СК* определяется взаимным расположением осей датчиков (акселерометров, гироскопов, магнитометров и пр.) и элементов фюзеляжа БПЛА. В данной работе предполагается что все датчики, действующие на разных физических принципах, соосны (для соответствующих осей) между собой, и при этом центр СК совпадает с центром масс БПЛА. Ось  $Ox_{cv}$  направлена вдоль линии, соединяющей центр масс БПЛА и его нос,  $Oy_{cv}$  – перпендикулярно  $Ox_{cv}$  в продольной плоскости симметрии БПЛА, ось  $Oz_{cv}$  – образует правую тройку с  $Ox_{cv}$  и  $Oy_{cv}$ . Далее в работе проекции векторов различных параметров на эти оси будут иметь индекс «св».

В качестве СК, ассоциированной с центром масс БПЛА, применяется *сопровождающая СК*, в которой центр СК совпадает с центром масс БПЛА, ось  $Oy_g$  противоположно направлена вектору ускорения свободного падения  $\vec{g}$ , ось  $Ox_g$  ориентирована на север перпендикулярно  $Oy_g$ , ось  $Oz_g$  – образует правую тройку с  $Ox_g$  и  $Oy_g$ . Далее в работе проекции различных параметров на эти оси будут иметь дополнительный индекс «г». Взаимное расположение сопровождающей и связанной СК показано на рисунке 1.1.

Сопровождающая СК перемещается в пространстве геодезической СК с угловой скоростью, вызванной суточным вращением Земли с модулем угловой скорости  $\Omega$  и угловыми скоростями изменения широты  $B$ , долготы  $L$  и высоты  $H$  (СК WGS-84), обусловленные перемещением БПЛА. Для ориентирования БПЛА в геодезической СК на основе инерциальных датчиков применяется алгоритм идеальной БИНС, позволяющий преобразовывать показания бортовых 3-х осевых акселерометров и гироскопов из ассоциированной с БПЛА связанной СК в геодезическую СК. В работе проекции различных параметров на эти оси будут иметь дополнительный индекс «GEO»

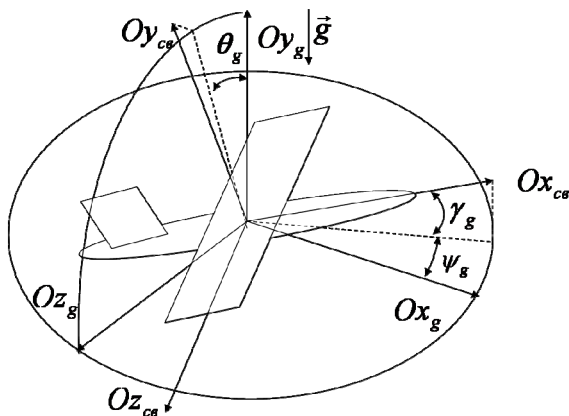


Рисунок 1.1 – Связь сопровождающей и связанной СК. Углы Эйлера в качестве параметров ориентации БПЛА

Для работы алгоритма идеальной БИНС необходимо в каждый момент времени иметь информацию о положении связанной СК относительно сопровождающей СК. Эта информация может быть получена из матрицы направляющих косинусов  $C$ , описывающей в каждый момент времени переход из сопровождающей СК в связанную СК [2], [4], [8]. Зная  $C$ , можно пересчитать вектор ускорения БПЛА, измеренный в связанной СК с помощью акселерометров, в сопровождающую СК, используя соотношение (1.1):

$$\vec{a}_g = C \times \vec{a}_{CB}. \quad (1.1)$$

Учитывая показания гироскопов, можно определить параметры изменения ориентации  $\vec{\eta}_g = (\eta_{xg}, \eta_{yg}, \eta_{zg}) = (\psi_g, \theta_g, \gamma_g)$  – углы Эйлера (см. рисунок 1.1).

Соотношения алгоритма БИНС [2] описывают преобразование первичной информации о кажущихся ускорении и угловой скорости БПЛА в связанной СК в координаты его центра масс и угловое положение относительно геодезической СК. Задавая на каждом новом шаге описанной процедуры в качестве начальных данных вектор скорости БПЛА в сопровождающей СК и его координату в геодезической СК, полученные на

предыдущем шаге, и результаты измерений акселерометров и гироскопов, фактически реализуется рекуррентный алгоритм идеальной БИНС. Отличительной особенностью описанного алгоритма является то, что навигационные параметры, получаемые в ходе его работы, совместимы с сопровождающей и геодезической СК, что делает их, в свою очередь, легко совместимыми с данными бортовых магнитометров и показаниями СРНС.

В практике конструирования малых и средних БПЛА зачастую применяется БИНС на основе микро электромеханических систем (МЭМС), что обусловлено их относительной дешевизной, низким энергопотреблением, малыми габаритами и массой [3]. Однако, измерения, формируемые микро электромеханическими акселерометрами (ММА) и микро электромеханическими гироскопами (ММГ), характеризуются значимой случайной шумовой составляющей и подвержены эффекту дрейфа нуля. Это приводит к быстрому росту погрешности результирующих показаний БИНС, особенно при работе в течение длительного промежутка времени в автономном режиме без внешней коррекции.

## 2 Магнитометрическая система ориентации

Для определения ориентации БПЛА в пространстве с помощью 3-х мерных магнитометрических (ММ) датчиков целесообразно кроме сопровождающей СК использовать опорную магнитную СК, отличающуюся тем, что ось  $Ox_m$  направлена не на географический северный полюс, а на магнитный. Ось  $Oy_m$  соответствует геодезической вертикали (то есть совпадает с  $Oy_g$ ), ось  $Oz_m$  – образует правую тройку с  $Ox_m$  и  $Oy_m$ . Далее в работе проекции различных параметров на эти оси будут иметь дополнительный индекс «M».

Таким образом, опорная магнитная СК повернута относительно сопровождающей СК вокруг общей оси  $Oy$  на угол магнитного склонения  $\delta$ . Следовательно для углов Эйлера справедливо соотношение (2.1):

$$(\psi_g, \theta_g, \gamma_g) = (\psi_m + \delta, \theta_m, \gamma_m). \quad (2.1)$$

Вектор напряженности магнитного поля земли  $\vec{H}$  в опорной магнитной СК имеет две составляющие:  $H_h$  и  $H_v$  – горизонтальную (вдоль оси  $Ox_m$ ) и вертикальную (вдоль оси  $Oy_m$ ) соответственно, как это показано на рисунке 2.1.

Соотношение этих составляющих определяет угол  $i$  магнитного наклона магнитного поля Земли в данной точке поверхности ( $i = \arctg(H_v / H_h)$ ). Следовательно проекции

вектора  $\vec{H}$  на оси, связанной СК БПЛА, соответствуют вектору показаний трехосевого ММ датчика  $\vec{H}_{ИЗМ}$ , оси чувствительности которого по аналогии с инерциальными датчиками направлены по осям  $Ox_{cb}$ ,  $Oy_{cb}$  и  $Oz_{cb}$ .

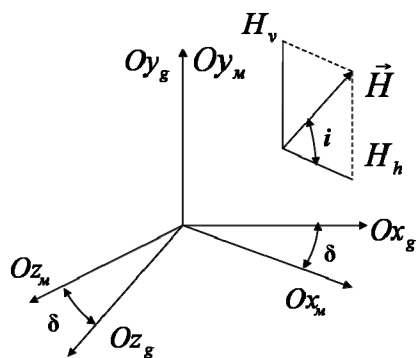


Рисунок 2.1 – Связь сопровождающей и опорной магнитной СК

Для определения углов Эйлера на основании показаний магнитометрической системы в данной работе применяется алгоритм, процесс функционирования которого можно кратко описать следующим образом:

1. Показания датчиков трехосевой магнитометрической системы формируют  $\vec{H}_{ИЗМ}$ , который далее перенормируется на 1 и корректируется, определяя  $\vec{H}_{СВ}$ .

2. Параллельно на основании данных о положении, согласно имеющейся карте магнитных наклонений и склонений, моделируется вектор напряженности магнитного поля Земли в данной точке пространства для случая *геодезической* СК  $\vec{H}_{ГЕО}$ .

3. Используя углы Эйлера, рассчитанные на предыдущем шаге алгоритма, формируется матрица поворота в *сопровождающую* СК (матрица направляющих косинусов  $C$ ), и производится преобразование компонент вектора напряженности магнитного поля Земли  $\vec{H}_{СВ}$  из *связанной* СК в *сопровождающую* СК, вследствие чего определяется вектор  $\vec{H}_g$  (2.2):

$$\vec{H}_g = C \times \vec{H}_{СВ}. \quad (2.2)$$

4. Далее производится вычисление степени рассогласования векторов  $\vec{H}_g$  и  $\vec{H}_{ГЕО}$ , на основании чего строится функционал рассогласования и производится его минимизация. Параметры ориентации, полученные при минимизации функционала рассогласования, применяются для независимой оценки углов Эйлера ориентации БПЛА.

Учет в навигационных измерениях показаний магнитометрических датчиков имеет ряд особенностей. Например, угол наклона магнитного поля Земли в широтах Беларуси составляет порядка 65–70 градусов, это приводит к тому, что при горизонтальном полете большая часть модуля вектора напряженности поля приходится на вертикальную ось, а на две оставшиеся – не более 6–7% его значения, что приводит к

значимому влиянию погрешности на измерения по этим осям. Кроме этого, магнитные датчики крайне восприимчивы к влиянию электромагнитных полей, являющихся результатом как внешних наводок, так и работы некоторого бортового оборудования.

### 3 Показания барометрических датчиков

Зная истинную воздушную скорость и скорость ветра с определенной точностью, можно оценить вектор путевой скорости БПЛА  $\vec{w}$ . Параметры ветра, используемые в навигационных алгоритмах БПЛА определяются перед стартом по данным метеорологической разведки или должны быть определены во время полета на борту БПЛА самим ПНК. Один из возможных алгоритмов определения параметров ветра (угла направления ветра  $\varphi_e$  и скорости ветра  $U_e$ ) строится путем сравнения векторов путевой  $\vec{w}$  и истинной воздушной скоростей  $\vec{V}_u$  БПЛА. Источником информации о векторе  $\vec{w}$  на борту БПЛА может выступать СРНС, а источником информации о векторе  $\vec{V}_u$  – система воздушных скоростей (СВС), построенная на датчиках полного и статического давлений.

Проекция вектора путевой скорости БПЛА на оси, сопровождающей подвижную СК, определяются выражениями (3.1) и (3.2):

$$w_{gx} = V_{gu} \cos \psi + U_e \cos \varphi_e, \quad (3.1)$$

$$w_{gy} = V_{gu} \sin \psi + U_e \sin \varphi_e, \quad (3.2)$$

где  $U_e$  – модуль вектора скорости ветра;  $V_{gu}$  – проекция вектора истинной воздушной скорости БПЛА на плоскость  $x_g O y_g$ ;  $\psi$  – путевой угол.

### 4 Спутниковая навигация

В настоящее время спутниковые радионавигационные системы (СРНС) являются удобным общедоступным инструментом для определения пространственных координат и параметров движения мобильных объектов на поверхности Земли и в околоземном пространстве [1], [9]. Навигационные параметры, полученные с помощью СРНС, не имеют тенденции к накоплению погрешностей, однако в большей степени подвержены различным случайным помехам и имеют низкую скорость обновления информации (как правило единицы герц). Типичные значения погрешности наиболее распространенных приемников сигналов СРНС составляют порядка 5–10 метров в горизонтальной плоскости и 10–15 метров в вертикальной. Значимым недостатком СРНС является существенный разброс навигационных решений (параметры  $B, L, H$  и компоненты вектора скорости в *геодезической* СК), формируемых последовательно, даже при неподвижности приемника, что требует дополнительной

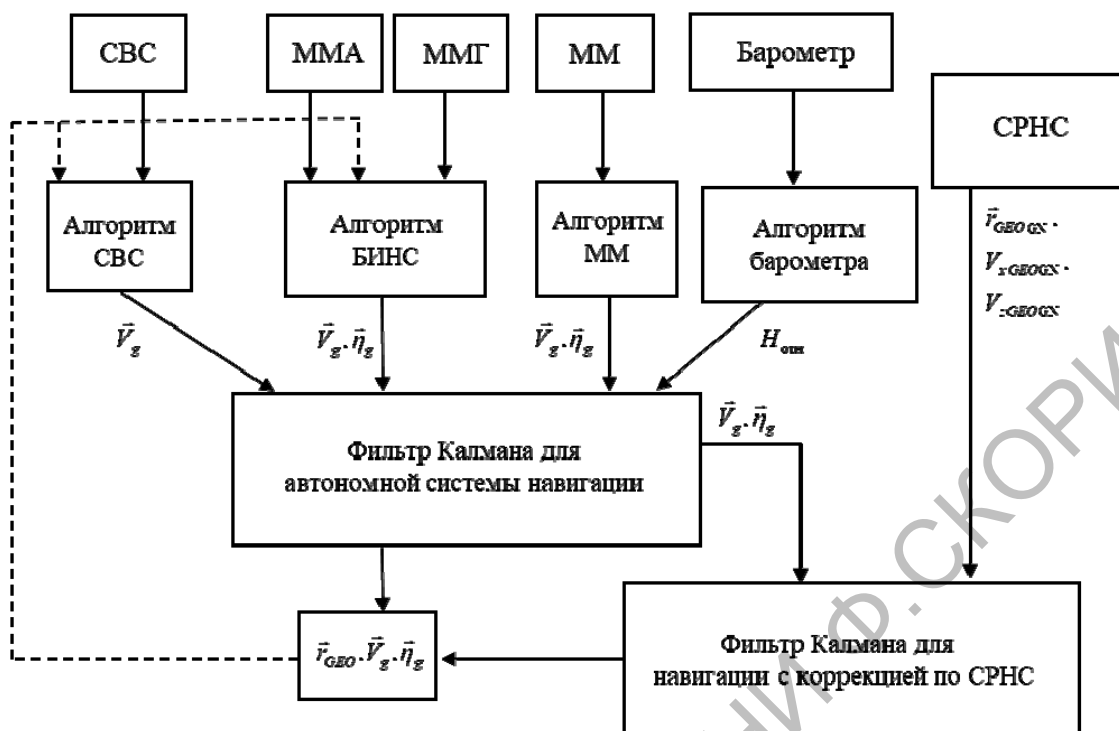


Рисунок 4.1 – Функциональная схема комплексирования данных

коррекции при их использовании в автоматизированных системах управления.

### 5 Схема алгоритма комплексирования навигационных данных

Двухкаскадная схема алгоритма комплексирования разнородных данных приведена на рисунке 4.1.

Преобработка данных с помощью алгоритма БИНС позволяет оптимально учесть взаимное влияние ММГ и ММА при повороте БПЛА вокруг центра масс. При этом на выходе алгоритма БИНС формируются навигационные параметры в нормальной СК, что позволяет значительно упростить вид основных матриц ФК [5]–[7], исключив из них преобразования поворотов относительно нормальной СК. Алгоритм ФК для автономной системы навигации работает синхронно с алгоритмами БИНС, ММ и барометра, что позволяет не проводить операцию интегрирования показаний датчиков внутри периода работы ФК и тем самым не накапливать ошибки аддитивно.

Матрицы перехода и чувствительности ФК имеют простой вид [5]–[7], что позволяет значительно оптимизировать процедуры их обчета, а, следовательно, максимизировать скоростные характеристики алгоритма. Матрицы ошибок измерений и динамического шума системы состоят из изменяющихся элементов, что с одной стороны позволит оптимально учесть все основные параметры моделей шума датчиков и системы, а с другой – отнести разработанный ФК к адаптивным фильтрам.

### Заключение

Применение каскадной схемы комплексирования с применением ФК для навигации с коррекцией по СРНС позволяет, с одной стороны, обеспечить возможность работы ПНК в автономном режиме и режиме внешней коррекции, с другой – оптимальным образом учесть шумовые характеристики автономной системы навигации при комплексировании разнородных данных. Таким образом, применение только первого каскада (алгоритмы БИНС, ММ и барометрического датчика + ФК для автономной системы навигации) реализует автономный режим работы системы. Дополнительное использование второго каскада (первый каскад + ФК для навигации с коррекцией по СРНС) позволяет учесть уточняющие данные СРНС, производя процедуру внешней коррекции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Grewal, M. Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration / M. Grewal, L. Weill, P. Andrews – London: John Wiley and Sons Inc. – 2001 – 392 p.
2. Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов; под общ. ред. В.Я. Распопова. – СПб: Электроприбор, 2009. – 280 с.
3. Shin, E.-H. Techniques for Low-Cost Inertial Navigation / E.-H. Shin – Alberta: Department of Geomatics Engineering Calgary. – 2005 – 206 p.
4. Алешин, Б.С. Ориентация и навигация подвижных объектов / Б.С. Алешин; под общ.

ред. Б.С. Алешина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. – Москва: Физматлит, 2006. – 422 с.

5. *Комплексирование данных навигационных систем на основе нелинейного фильтра Калмана* / К.В. Козадаев [и др.] // Информатика. – 2012. – № 1. – С. 106–114.

6. *Козадаев, К.В.* Повышение точности инерциально-спутниковой навигационной системы в режиме неподвижности / К.В. Козадаев, А.Е. Макаренко // Информатика. – 2017. – № 2. – С. 113–120.

7. *Козадаев, К.В.* Алгоритм повышения точности слабосвязанной инерциально-спутниковой навигационной системы на основе фильтра Калмана для ошибок БИНС / К.В. Козадаев,

А.Е. Макаренко // Электроника-инфо. – 2015. – № 9. – С 45–48.

8. *Красильщиков, М.Н.* Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / М.Н. Красильщиков; под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Сербрякова. – Москва: Физматлит, 2003. – 280 с.

9. *Kaplan, E.D.* Understanding GPS. Principles and Applications / E.D. Kaplan, E.D. Grewal, C.J. Hegarty. – London: Artech Hous, 2006. – 707 p.

Поступила в редакцию 13.02.20.