

Особенности применения нерадиотехнических измерителей в угломерной НАП

© Авторы, 2015

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015

А.В. Гребенников – к.т.н., начальник сектора 4101, ОАО «НПП Радиосвязь» (г. Красноярск)

E-mail: berg24@mail.ru

А.П. Кудревич – аспирант, базовая кафедра «Радиоэлектронная техника информационных систем»,

Институт инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета (г. Красноярск)

E-mail: kudry@inbox.ru

А.А. Оганесян – к.т.н., доцент, зам. директора,

Департамент навигационных и связанных систем ОАО «ВНИИР-Прогресс» (Москва)

E-mail: glonass-gnss@yandex.ru

Рассмотрены особенности и варианты реализации комплексирования нерадиотехнических измерителей, в частности микроэлектромеханических инерциальных датчиков, с навигационной аппаратурой потребителя, обеспечивающей определение пространственной ориентации по сигналам ГНСС.

Ключевые слова: спутниковая навигация, ГНСС, ИНС, МЭМС, комплексирование, пространственная ориентация.

This article describes INS and GNSS integration features and methods. Particularly, article deals with using low-cost MEMS-based accelerometers and gyroscopes and GNSS receiver with attitude determination.

Keywords: satellite navigation, GNSS, INS, MEMS, attitude determination.

Обеспечение устойчивого функционирования навигационной аппаратуры потребителей (НАП), в условиях ограниченной радиовидимости сигналов от космических аппаратов ГНСС, например, из-за интенсивных маневров объекта, в высотной городской и горной местностях, а также в условиях воздействия помех является актуальной задачей. Одним из путей ее решения является использование дополнительной информации от нерадиотехнических систем. Известно, что совместная (комплексная) обработка информации, получившая название – «комплексирования» – позволяет построить интегрированную систему, состоящую из НАП ГНСС и нерадиотехнических измерителей навигационных параметров (НРИ). Тематика комплексирования не нова и достаточно широко освещается в литературе [1, 2]. В основном, научные изыскания в данной области направлены на исследование и разработку алгоритмов комплексирования одноантенной НАП и отдельных элементов инерциальных систем навигации, в частности малогабаритных микроэлектромеханических сенсоров (МЭМС) – датчиков ускорений и угловых скоростей, лазерных и волоконно-оптических гироскопов (ВОГ). Применение в интегрированных системах угломерной НАП (УНАП), обеспечивающей, наряду с определением координат и скорости, определение параметров пространственной ориентации объектов, дает определенные преимущества при построении интегрированных систем навигации по сравнению решениями на основе одноантенной НАП.

Особенности комплексирования одноантенной НАП и НРИ. Общая идея комплексирования НАП/НРИ заключается в том, что системы, функционирующие на различных физических принципах измеряют одни и те же навигационные параметры в разных системах координат – функционально связанные через параметры пространственной ориентации. Не наблюдаемые непосредственно параметры ориентации параметризуются и вычисляются в комплексном алгоритме. Так как функционально связанными параметрами являются ускорения (скорости), то эффективность алгоритма комплексирования в значительной степени зависит от наличия изменений ускорений (скоростей), т.е. от динамики объекта.

Каждая из рассматриваемых систем имеет свои недостатки, которые имеют разный характер и природу происхождения. Работу НАП усложняют условия ограниченной радиовидимости навигационных космических аппаратов (НКА), а также радиоэлектронное подавление – наличие помех. Указанные обстоятельства не влияют на работу автономных датчиков НРИ, что позволяет комплексному алгоритму на коротких интервалах отсутствия работоспособности НАП формировать навигационные параметры с характеристиками близкими к характеристикам высокоточных инерциальных навигационных систем. Кроме того, комплексирование НРИ с НАП на уровне радионавигационных параметров позволяет уменьшить полосы пропускания фильтров следящих систем НАП, за счет «замены» динамики объекта

на динамику погрешности НРИ. Кроме существенного уменьшения флуктуационной составляющей погрешности навигационных определений, которое получается и при комплексировании по выходам, данный подход повышает устойчивость НАП к воздействию широкополосных шумоподобных помех.

В то же время система навигации, построенная на НРИ (инерциальных датчиках), имеет недостаток, проявляющийся в возрастании со временем погрешности считываемых навигационных параметров (координат, скорости). Это связано с тем, что непосредственно, как правило, инерциальные датчики измеряют ускорения и угловые скорости вдоль осей чувствительности, а потребителю требуются линейные скорости и координаты, которые получают интегрированием первичных наблюдений, спроецированных на оси требуемой системы координат.

В настоящее время широкое применение получили НРИ типа МЭМС. Такие датчики имеют сравнительно большие шумы измерений и погрешности, обусловленные технологией их изготовления, но при этом имеют невысокую стоимость и малые массогабаритные размеры. Непосредственно измерения МЭМС используются только в тех случаях, когда не требуется проекции полученных наблюдений на оси другой, не совпадающей с осями чувствительности системы координат. Например, акселерометры МЭМС на мобильных устройствах – для ориентации экрана в зависимости от направления вектора силы тяжести, акселерометры МЭМС в автомобилях – для измерения ускорения в системах пассивной безопасности, датчики угловой скорости на элементах повестки и колес – для систем активной безопасности. Присущие МЭМС недостатки по точности измерения параметров не позволяют использовать их в автономном режиме для определения координат подвижного объекта, его ориентации в движении. Однако в интегрированных системах навигации, где осуществляется компенсация накапливающихся погрешностей и «спisyвание» систематических составляющих ошибок датчиков, на коротких интервалах времени пропадания навигационных сигналов, возрастание погрешности считанных навигационных параметров, обеспечиваемое МЭМС, может не выходить за заданные пределы. Это позволяет создавать компактные недорогие устройства, способные работать на динамичных объектах, устойчивые к кратковременным пропаданиям сигналов НКА, имеющие малую случайную погрешность навигационных параметров и повышенную устойчивость к воздействию помех.

Таким образом, комплексирование позволяет устранить проблемные аспекты каждой из навигационных систем, даже при использовании простейших НРИ типа МЭМС.

Особенности комплексирования УНАП/НРИ. Определение параметров пространственной ориентации при комплексировании базе одноантенной НАП основывается на параметризации матрицы перехода, связывающей ее измерения с измерениями инерциальных датчиков (ускорения и угловой скорости). Обычно в качестве параметров ориентации выбираются углы Эйлера (Эйлера–Крылова) или кватернионы (параметры Родрига–Гамильтона). При этом точность определения параметров ориентации в значительной степени зависит от характеристик инерциальных датчиков. Несмотря на то, что в комплексном алгоритме удается значительно снизить влияние ошибок инерциальных датчиков, их некомпенсированные погрешности снижают точность определения ориентации, что в свою очередь влияет на качество компенсации погрешностей самих датчиков. Следует отметить, что для низкодинамичных (и, тем более, неподвижных) объектов задача определения ориентации в рассматриваемой схеме не решается, что обуславливает низкое качество компенсации смещений инерциальных датчиков.

В отличие от стандартной схемы, УНАП самостоятельно измеряет ориентацию объекта, например, по измерениям разности фаз навигационных сигналов (РФС) ГНСС, приходящих на несколько разнесенных в пространстве антенн, что обеспечивает измерение параметров ориентации как для подвижного, так и для неподвижного объекта. Данное отличие УНАП кардинальным образом влияет на подходы к комплексированию с НРИ. В частности, в данном случае задача оценки параметров ориентации может сводиться к поддержке со стороны НРИ в моменты функциональной неработоспособности УНАП, например, из-за затенений НКА или воздействия помех с уровнем мощности, превышающих ее помехоустойчивость. Кроме того, НРИ могут использоваться для начальной «выставки» УНАП. При этом использование классической схемы комплексирования, с оценкой погрешностей датчиков НРИ, позволит существенным образом споленировать их систематические погрешности и тем самым значительно улучшить точностные характеристики на интервалах автономного счисления навигационных параметров.

Приведем только несколько примеров возможного использования НРИ для поддержки УНАП.

1. Применение акселерометров позволяет формировать значения углов крена и тангажа, используя в УНАП в качестве априорных значений при измерении пространственной ориентации. Погрешность определения углов крена и тангажа зависит от характеристик конкретного датчика, и может составить до $\pm 5^\circ$. Знание первоначальной ориентации, даже с такой невысокой точностью, позволяет значительно сократить время и повысить достоверность разрешения фазовых неоднозначностей по сигналам ГНСС в УНАП. Кроме того, применение пары пространственно разнесенных акселерометров позволяет определять отклонение оси вращения неподвижного объекта, например, радиолокационной станции.

2. Применение ДУС за счёт измерения динамических угловых маневров с высоким темпом позволяет уменьшить полосу пропускания фильтра следящей системы за разностью фаз сигналов. Наиболее сложным случаем для измерения разностей фаз является вращательное движение объекта. Фильтр разности фаз сигналов без инерциальной поддержки должен учитывать высокую динамику параметра, что непременно ухудшает его работу по сравнению со случаем линейного перемещения объекта, когда изменение разности фаз сигналов на выходах разнесенных в пространстве антенн обусловлены только движением НКА и является медленным. Поддержка от ДУС позволяет фильтру отслеживать только остаточные изменения разностей фаз, описываемые моделью погрешностей ИНС. Уменьшение полос следящих систем позволяет уменьшить погрешность измерения разности фаз и, как следствие, повысить точность определения ориентации объекта.

В общем случае все схемы комплексирования УНАП/НРИ можно свести к двум классическим вариантам [3] – комплексирование по входам и по выходам.

Первый вариант – это комплексирование на уровне первичной обработки информации (по входам). В данном случае от инерциального канала используются непосредственно измерения инерциальных датчиков – ускорений, угловых скоростей. Использование данного варианта позволяет получить потенциальные характеристики комплексирования.

Второй вариант предусматривает комплексирование на уровне вторичной обработки (по выходам), т.е. формирование оценки параметров из совместной обработки одних и тех же параметров, полученных отдельно в каждом канале – навигационном и инерциальном. Схема данного варианта приведена на рис 2. Основным недостатком данного варианта является необходимость учета коррелированности шумов наблюдений.

Учитывая особенность УНАП определять параметры пространственной ориентации с высокой точностью, при комплексировании роль НРИ будет сводиться практически только к уменьшению флуктуационных составляющих погрешностей. При этом точность датчиков НРИ не будет существенным образом влиять на итоговую точность определения параметров пространственной ориентации.

Математическое моделирование. Для оценки влияния точности датчиков НРИ на итоговую погрешность определения параметров пространственной ориентации было проведено математическое моделирование. Алгоритм комплексирования был реализован по схеме рис. 1 (комплексирования по входам). Имитационное моделирование предусматривала решение задачи определения одного угла в двумерном пространстве (на плоскости). В качестве НРИ рассматривались два датчика угловой скорости с характеристиками, отличающимися на два порядка: первый соответствует МЭМС, второй – волоконно-оптическому гироскопу (ВОГ). УНАП представляла собой четырех элементную антенну решетку с базой 1 (или 2) метра в условиях работы по шести НКА при отношении сигнал/шум 45дБГц. Результаты имитационного моделирования приведены рис. 3–6.



Рис. 1. Схема комплексирования на уровне первичной обработки



Рис. 2. Схема комплексирования на уровне вторичной обработки

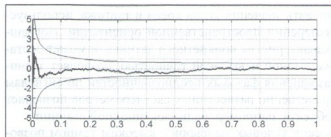


Рис. 3. Погрешность оценки угла, УНАПМЭМС (база – 1 м, $3\sigma = 0,8''$)

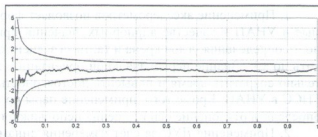


Рис. 4. Погрешность оценки угла, УНАПВОВ (база – 1 м, $3\sigma = 0,8''$)

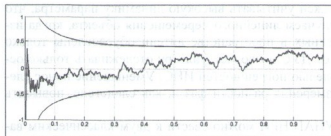


Рис. 5. Погрешность оценки угла, УНАПМЭМС (база – 2 м, $3\sigma = 0,4''$)

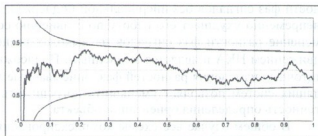


Рис. 6. Погрешность оценки угла, УНАПМЭМС (база – 2 м, $3\sigma = 0,4''$)

Как видно из результатов моделирования, улучшение характеристик датчиков НРИ на два порядка практически не приводит к уменьшению случайной составляющей погрешности измерения ориентации в интегрированной системе. С другой стороны – увеличение базы антенной решетки приводит к пропорциональному улучшению характеристик определения параметров пространственной ориентации. Результаты исследований позволяют сделать вывод, что использование высокоточных датчиков НРИ (например, ВОГ), делает нерациональным их применение в интегрированных системах УНАПНРИ. Применение высокоточных датчиков НРИ может быть оправдано, если ставится задача сохранения работоспособности при длительном (более нескольких десятков секунд) отсутствии приема сигналов ГНСС.

Предложения по практической реализации алгоритмов комплексирования. На основе синтеза оптимального алгоритма комплексирования УНАП и инерциальных датчиков (по входам) может быть получена схема, представленная на рис. 7. Составной дискриминатор по ускорению учитывает необходимость учета ускорений Кориолиса и свободного падения. Введение в модели динамики систематических погрешностей измерений инерциальных датчиков приводит к появлению соответствующих каналов коррекции ускорений и угловых скоростей. Блок комплексной обработки информации содержит основную часть фильтра, где осуществляется экстраполяция параметров и вычисление текущих оценок. Введение в вектор состояния всей совокупности параметров характеризующих пространственное положение объекта позволяет оценивать как параметры ориентации объекта, так и его координаты, скорости, ускорения и т.д.

В некоторых приложениях, где основной задачей УНАП является определение параметров пространственной ориентации можно предложить более простые схемы комплексирования. Например, одна из возможных схем приведена на рис 8.

Эта схема несколько другой детализации, тем не менее, позволяет проиллюстрировать основную идею, которая заключается в следующем. Ориентацию можно получить из УНАП и из измерений датчиков угловых скоростей, путём «интегрирования» измерений датчика от некоторого начального известного значения ориентации. Оценки ориентации поступают в фильтр, с выхода которого результаты поступают потребителю. Эти же конечные оценки ориентации, формируемые с темпом измерений инерциального датчика, позволяют произвести оценку разностей фаз сигналов для каждого НКА по каждой из антенн. Эти оценки используются для уменьшения полос пропускания фильтров разностей фаз. Акселерометры используются для формирования априорных значений углов крена и тангажа.

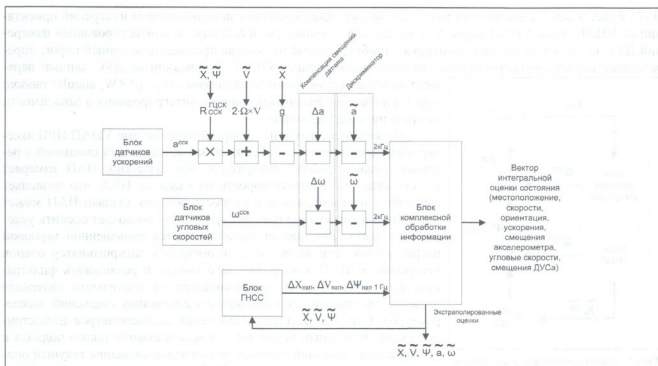


Рис. 7. Схема комплексирования УНАП и НРИ на уровне первичной обработки

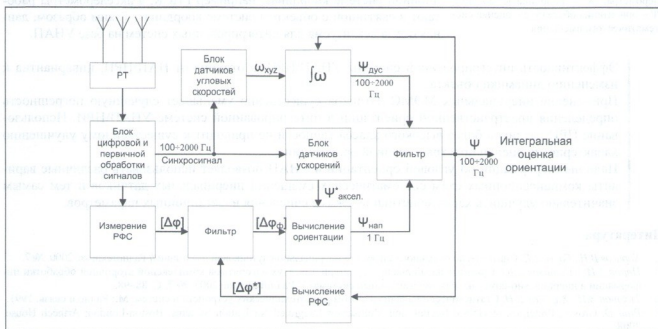


Рис. 8. Схема компенсации динамики РФС (Ψ – ориентация объекта, $\Delta\varphi$ – РФС)

Следует отметить, что интегрирование измерений датчика угловых скоростей не является действительным интегрированием, а алгоритм зависит от выбранного представления ориентации – углы Эйлера, кватернионы и т.д. Кроме того, построение фильтра оценки ориентации усложняется тем, что оценки ориентации из инерциального канала будут коррелированы, что несколько усложняет алгоритм [4].

Кроме того, в данной схеме отсутствует компенсация смещений датчика угловых скоростей в отличие от предыдущей схемы. Предполагается, что часть ошибок можно определить в процессе калибровки с использованием поворотных стеллов и УНАП. В то же время, начальные значения, относительно которых отсчитываются приращения пространственной ориентации на интервале интегрирования показаний

ДУС, будет известно достаточно точно, поскольку сформировано с использованием измерений ориентации от УНАП. Если УНАП формирует измерения с темпом раз в секунду, то «интегрирование» измерений ДУС за это же время даст некоторую ошибку, которая не должна превышать заданный порог, определяемый случайной погрешностью измерения ориентации УНАП. В описании на ДУС данный параметр называется «случайным блужданием угла» (ARW, angular random walk) и позволяет рассчитать ошибку интегрирования в зависимости от времени интегрирования.

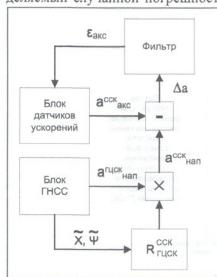


Рис. 9. Схема компенсации систематической составляющей смещения акселерометра: X – координаты объекта; Ψ – ориентация объекта; ϵ – оценка систематического смещения

Для используемых в интегрированной системе УНАПНРИ акселерометров возможно построение схемы компенсации смещений в реальном режиме работы аппаратуры. Как известно, НАП измеряет псевдодальность и псевдоскорость по каждому НКА, что позволяет вычислить местоположение и скорость объекта. Однако НАП может измерять и производную псевдоскорости, что позволяет оценить ускорения объекта. Эти оценки характеризуются повышенной шумовой погрешностью, тем не менее, если построить дискриминатор оценок ускорений от НАП и инерциального канала, и реализовать фильтрацию выходного сигнала дискриминатора на длительном интервале времени, то становится возможным компенсация смещений акселерометров. Схема компенсации смещений акселерометров иллюстрируется рис 9. Важным условием для использования такого подхода к компенсации смещений акселерометров является знание текущей ориентации – это связано с тем, что НАП вычисляет ускорения в навигационной системе координат, например ГЦСК, а акселерометры работают в связанной с объектом системе координат. Таким образом, данная схема реализуема для интегрированных систем на базе УНАП.

Эффективность интегрированной системы УНАПНРИ, в отличие от НАПНРИ, инвариантна к изменению динамики объекта.

Применение инерциальных ЭММС датчиков существенно уменьшает случайную погрешность определения пространственной ориентации в интегрированной системе УНАПНРИ. Использование НРИ датчиков более высокого класса точности не приводит к существенному улучшению характеристик оценки пространственной ориентации.

Наличие информации об угловой ориентации в УНАП позволяет использовать различные варианты компенсационных схем систематических смещений инерциальных датчиков и тем самым значительно улучшить характеристики в режиме счисления навигационных параметров.

Литература

1. Харисов В.Н., Горев А.П. Синтез тесно связанного алгоритма инерциально-спутниковой навигации // Радиотехника. 2000. № 7.
2. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Сравнительный анализ характеристик двух алгоритмов комплексной вторичной обработки информации в инерциально-спутниковых навигационных системах // Радиотехника. 2003. № 7. С. 88–98.
3. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь. 1991.
4. Paul D. Groves. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Boston-London: Artech House, 2008.

Радиолокация
и радиометрия

Методы и средства
оптоэлектроники
в радиофизике

Системы
радиоуправления

Антенны и техника СВЧ

Робототехника

Биомедицинская
электроника

Технологии
живых
систем

Новые
информационные
технологии

Нейрокомпьютинг

Нанотехнологии

Информационные
и измерительные
системы

Радионавигационные технологии



УДК 629.78
ББК 39.67
П 15

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СЕРИИ

Редакционный совет:

д.ф.-м.н., проф. О.В. Бешкий, акад. Ю.В. Гуляев, д.т.н., проф. А.Ю. Гринев, д.т.н., проф. Ю.Л. Козирацкий, д.т.н., проф. Г.С. Кондратенков, д.т.н., проф. А.В. Коренной, д.т.н., д.б.н. И.В. Матвейчук, д.т.н., проф. В.И. Меркулов, д.т.н., проф. А.И. Перов, к.б.н. А.В. Савельев, акад. А.С. Сигов, д.т.н. проф. М.С. Ярылков

Выпуск 4

Серия «Радиосвязь и радионавигация»

Рецензент:

докт. техн. наук, профессор *В.Н. Харисов* (ОАО «ВНИИР Прогресс»)

П 15 Радионавигационные технологии. Сб. статей. / Под ред. *А.И. Перова*. – М.: Радиотехника, 2015. – 144 с.: ил. Научно-технические серии. Вып. 4. Серия «Радиосвязь и радионавигация». (Авторы указаны на с. 144)

ISBN 978-5-93108-096-3

Отражены теоретические вопросы спутниковой навигации, технологии перспективной системы ГЛОНАСС, показаны результаты экспериментальных исследований технологий спутниковой навигации; рассмотрены вопросы мониторинга навигационных сигналов; даны приложения технологий спутниковой навигации в различных областях. Книга подготовлена по материалам научно-технической конференции «Радионавигационные технологии в приборостроении» (сентябрь 2014 г.).

Для научных работников и инженеров, а также преподавателей и студентов вузов.

УДК 629.78
ББК 39.67

ISBN 978-5-93108-096-3

© Авторы, 2015

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015