

Соколов Олег Аркадьевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного
маршала авиации А.А. Новикова

Марьянинов Семён Егорович

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного
маршала авиации А.А. Новикова

Шурупов Артём Владиславович

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного
маршала авиации А.А. Новикова

Методы интеграции gnss и инерциальных систем, анализ экономичности при деградации спутниковой навигации

Аннотация. Проведен анализ методов интеграции глобальных навигационных спутниковых систем и инерциальных измерительных комплексов в условиях деградации качества сигналов спутниковой навигации. Разработана классификация архитектур интегрированных систем на основе уровня взаимодействия компонентов. Предложен модифицированный алгоритм адаптивной фильтрации Калмана, обеспечивающий устойчивое функционирование при частичной потере спутниковых измерений, точность систем самолетовождения, направленное также на повышение экономичности авиаперевозок, вследствие экономии топлива и времени, затраченное на полет. Экспериментально установлено, что применение глубокой интеграции позволяет снизить ошибку позиционирования на 35-60% по сравнению с традиционными схемами слабой интеграции при уровне деградации сигнала 60-80%. Доказана эффективность использования нелинейных фильтров (UKF, CKF) для компенсации нелинейных эффектов при работе в сложных сигнальных условиях.

Ключевые слова: интегрированная навигационная система, GNSS, инерциальная навигация, деградация сигнала, фильтр Калмана, глубокая интеграция, адаптивная фильтрация

Sokolov Oleg Arkadyevich

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of
Aviation A.A. Novikov

Maryaninov Semen Egorovich

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of
Aviation A.A. Novikov

Shurupov Artem Vladislavovich

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of
Aviation A.A. Novikov

Methods of gnss and inertial systems integration, analysis of economics under satellite navigation degradation

Abstract. The analysis of methods of integration of global navigation satellite systems and inertial measurement complexes in conditions of degradation of the quality of satellite navigation signals is carried out. The classification of architectures of integrated systems based on the level of interaction of components is developed. . A modified algorithm of adaptive Kalman filtering is proposed, which ensures stable operation with partial loss of satellite

measurements, the accuracy of navigation systems, also aimed at increasing the economy of air transportation due to fuel savings and time spent on flight. It is experimentally established that the use of deep integration allows to reduce the positioning error by 35-60% in comparison with traditional schemes of weak integration at the signal degradation level of 60-80%. The effectiveness of using nonlinear filters (UKF, CKF) to compensate for nonlinear effects when working in complex signal conditions has been proven.

Keywords: integrated navigation system, GNSS, inertial navigation, signal degradation, Kalman filter, deep integration, adaptive filtering

Введение

Современные транспортные системы, включая гражданскую и военную авиацию, беспилотные летательные аппараты, морской и наземный транспорт, все в большей степени зависят от точности и надежности навигационного обеспечения. Глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS) обеспечивают высокоточное позиционирование при благоприятных условиях приема сигналов, однако их функционирование существенно ухудшается в условиях преднамеренных или непреднамеренных помех, многолучевого распространения радиоволн, а также при работе в условиях ограниченной видимости спутников [1, с. 45].

Инерциальные навигационные системы (INS) обладают автономностью и нечувствительностью к внешним электромагнитным воздействиям, однако их точность ограничена накапливающимися ошибками, обусловленными дрейфом гироскопов и шумами акселерометров [2, с. 78]. Интеграция GNSS и INS позволяет компенсировать недостатки каждой из систем и создать навигационный комплекс с улучшенными характеристиками точности, надежности и помехоустойчивости [3, с. 15].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения непрерывного навигационного обслуживания в условиях, когда качество GNSS-сигналов деградирует вследствие различных факторов: естественных (ионосферные возмущения, геометрия спутниковой группировки), техногенных (помехи от радиоэлектронных средств, структуры городской застройки) или преднамеренных (средства радиоэлектронного подавления) [4, с. 112]. В таких условиях традиционные методы интеграции зачастую не обеспечивают требуемого качества навигационного решения.

Целью настоящей работы является разработка и исследование методов интеграции GNSS/INS, обеспечивающих устойчивое функционирование навигационной системы при деградации спутниковых сигналов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести анализ факторов, влияющих на качество GNSS-сигналов; разработать классификацию архитектур интегрированных систем; предложить модифицированные алгоритмы фильтрации для работы в условиях неполных или искаженных измерений; выполнить экспериментальную оценку эффективности предложенных решений.

1. Литературный обзор

1.1. Анализ факторов деградации GNSS-сигналов

Деградация качества GNSS-сигналов представляет собой комплексное явление, обусловленное воздействием различных факторов, которые можно классифицировать по природе происхождения и характеру влияния на навигационный процесс. Выделяют три основные категории источников деградации: естественные, техногенные и преднамеренные воздействия [5, с. 156].

Естественные факторы включают ионосферные и тропосферные задержки сигналов, многолучевое распространение в условиях городской застройки или горной местности, а также геометрические факторы, связанные с конфигурацией видимой части спутниковой группировки. Ионосферные возмущения, особенно в периоды повышенной солнечной активности, могут вызывать фазовые флуктуации сигналов, приводящие к ошибкам псевдодальностных измерений порядка 10-50 метров [6, с. 445].

Техногенные факторы обусловлены электромагнитной обстановкой в районе эксплуатации навигационной системы. К ним относятся помехи от систем радиосвязи, радиолокационных станций, высоковольтных линий электропередач, а также собственные шумы бортового радиоэлектронного оборудования. Уровень таких помех может достигать значений, при которых отношение сигнал/шум на входе коррелятора GNSS-приемника снижается ниже порога устойчивого сопровождения сигнала.

Преднамеренные воздействия представляют собой наиболее критичный тип угроз для систем спутниковой навигации. К ним относятся маскировка (spoofing) и подавление (jamming) сигналов. Маскировка заключается в трансляции ложных навигационных сигналов, имитирующих спутниковые, что приводит к формированию ошибочной оценки положения потребителя. Подавление осуществляется путем излучения шумовых или импульсных помех в полосе частот GNSS, что приводит к полной или частичной потере способности приемника декодировать навигационное сообщение.

1.2. Количественные характеристики деградации

Для количественной оценки уровня деградации GNSS-сигналов вводится параметр, характеризующий относительное снижение качества навигационных измерений. Данный параметр определяется как функция нескольких факторов: отношения сигнал/шум (C/N_0), числа доступных спутников, геометрического фактора точности (PDOP), а также флагов достоверности измерений.

При относительном уровне деградации до 30% система сохраняет работоспособность с незначительным снижением точности. В диапазоне 30-60% наблюдается существенное увеличение ошибок позиционирования, требующее применения методов компенсации. При деградации свыше 60% традиционные методы обработки сигналов становятся неэффективными, и необходим переход к альтернативным алгоритмам, использующим данные инерциальной системы в качестве основного источника навигационной информации [9, с. 425].

Таблица 1 – Классификация уровней деградации GNSS-сигналов

Уровень деградации	C/N_0 , дБ-Гц	PDOP	СКО ошибки, м
Низкий (0-30%)	>40	<3	2-5
Средний (30-60%)	35-40	3-5	5-15
Высокий (60-80%)	30-35	5-10	15-50
Критический (>80%)	<30	>10	>50

Примечание: СКО – средноквадратическое отклонение; PDOP – геометрический фактор точности.

2. Материалы и методы

2.1. Классификация архитектур интегрированных систем

Архитектуры интегрированных GNSS/INS систем классифицируются по уровню взаимодействия между компонентами системы. Выделяют четыре основных уровня интеграции: автономное функционирование, слабая интеграция, жесткая интеграция и глубокая интеграция. Каждый из уровней характеризуется различной степенью взаимодействия между GNSS-приемником и инерциальным измерительным модулем, что определяет их эффективность в условиях деградации спутниковых сигналов.

При слабой интеграции GNSS-приемник и INS функционируют как независимые системы, формирующие собственные навигационные решения. Интеграция осуществляется на уровне оценок положения, скорости и ориентации, получаемых от каждой из подсистем. Фильтр Калмана используется для оптимального объединения этих оценок с учетом их ковариационных характеристик. Преимуществом данного подхода является простота реализации и возможность использования готовых GNSS-приемников без модификации их программного обеспечения.

Жесткая интеграция предполагает объединение систем на уровне измерений. В данной архитектуре фильтр Калмана обрабатывает псевдодальностные и псевдоскоростные измерения GNSS совместно с данными инерциальных датчиков. Это позволяет системе функционировать при недостаточном количестве спутников для формирования автономного GNSS-решения (менее четырех), поскольку инерциальная информация дополняет недостающие измерения.

Глубокая интеграция представляет собой наиболее сложную архитектуру, при которой происходит взаимодействие на уровне сигналов. INS используется для формирования вспомогательной информации, поступающей в корреляторы GNSS-приемника и позволяющей снизить требования к отношению сигнал/шум для устойчивого сопровождения. Данный подход обеспечивает максимальную помехоустойчивость, однако требует существенной модификации аппаратной и программной части GNSS-приемника.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика архитектур интеграции

Архитектура	Уровень интеграции	Мин. спутников	Сложность	СКО, м
Автономная	Отсутствует	4	Низкая	28.5
Слабая	Позиция/скорость	4	Низкая	8.5
Жесткая	Псевдодальности	2	Средняя	5.5
Глубокая	Корреляторы	1	Высокая	4.2

Примечание: СКО – среднеквадратическое отклонение ошибки позиционирования при деградации 60%.

2.2. Методы глубокой интеграции

Глубокая интеграция основана на использовании информации от инерциальных датчиков для повышения эффективности работы корреляторов GNSS-приемника. Основная идея заключается в формировании прогноза доплеровского смещения частоты и задержки кода для каждого спутникового канала на основе данных INS, что позволяет сузить полосу пропускания контуров сопровождения и тем самым повысить помехоустойчивость.

При формировании прогноза используются оценки положения, скорости и ориентации объекта, полученные от инерциальной системы. Доплеровское смещение для i -го спутника рассчитывается как проекция вектора относительной скорости спутника и объекта на направление линии визирования. Зная геометрическое расположение спутников и прогнозируемое положение объекта, можно определить ожидаемую задержку распространения сигнала.

В условиях деградации сигнала, когда традиционные схемы сопровождения теряют устойчивость, система глубокой интеграции продолжает функционировать за счет использования инерциального прогноза. Даже при значительном снижении отношения сигнал/шум корреляторы сохраняют способность извлекать навигационную информацию из сигнала благодаря точной компенсации динамики движения объекта.

2.3. Адаптивные алгоритмы фильтрации

Традиционный фильтр Калмана предполагает постоянство статистических характеристик шумов измерений и модели движения объекта. В условиях деградации GNSS-сигналов данное предположение нарушается, что приводит к субоптимальной работе фильтра и возможной расходимости оценок. Для преодоления указанного ограничения предлагается использование адаптивного фильтра Калмана с модификацией ковариационной матрицы шумов измерений.

Адаптация осуществляется на основе анализа невязок измерений (innovations) в скользящем окне. Ковариационная матрица шумов измерений R корректируется пропорционально отклонению эмпирической дисперсии невязок от теоретического значения. При обнаружении деградации сигнала соответствующие элементы матрицы R

увеличиваются, что приводит к снижению веса проблемных измерений в процессе обновления оценки состояния.

Дополнительно вводится механизм обнаружения аномальных измерений на основе проверки гипотезы о попадании невязки в доверительный интервал. При выходе невязки за пределы трехсигмового интервала измерение считается недостоверным и исключается из процесса обновления. Предложенный метод обеспечивает устойчивость фильтра к воздействию импульсных помех и эффектам маскирования сигналов. Модели GNSS и погрешностей инерциальных датчиков характеризуются выраженными нелинейными свойствами, приобретающие критическую значимость при искажении качества принимаемых спутниковых сигналов.

Использование нелинейных алгоритмов фильтрации, таких как фильтр UKF, кубатурный фильтр SKF, предоставляет возможность добиться более высокой точности оценки навигационного состояния системы, в отличие от применения линеаризованного расширенного фильтра EKF.

3. Результат

3.1. Виды исследований

Для проверки насколько приемлемо работают изложенные методы, нами была изготовлена специальная установка, позволяющая моделировать различные ситуации: как движется объект и насколько уверенно принимает сигналы со спутников. Состав установки: генератор GNSS-сигналов с возможностью искажения их по желаемому сценарию, симулятор показаний инерциальных датчиков, программный блок интеграции данных и модуль записи результатов.

За идеал представляем траекторию с известными координатами. Анализируя, как алгоритмы отображают местоположение объекта с настоящим положением, мы получили сведения об ошибках при разной степени ухудшения приема спутниковых сигналов.

Рассмотрели четыре случая: прямолинейный равномерный полет; полет с креном до 10° в секунду; полет над населенными пунктами с отражением спутниковых сигналов от сооружений; полет в условиях частичного искажения сигналов. В каждой из перечисленных ситуаций мы изменяли качество, принимаемого сигнала от идеального (0% потерь) до минимального (95% деградации).

3.2. Анализ результатов исследования

Получившиеся данные подтвердили теорию: глубокая интеграция является наиболее устойчивой при плохом сигнале. Когда качество приема ухудшилось до 40% от нормы, адаптивный фильтр, входящий в состав комплексной интеграции, сохранил ошибку позиционирования в пределах 5,5 метров. Недостаточная интеграция в аналогичных условиях выдавала ошибку в 8,5 метров. А ошибка при эксплуатации без использования инерциальной поддержки, только по спутникам, составляла 28,5 метра.

Особый интерес представляет анализ поведения систем при полной потере GNSS-сигнала. Система глубокой интеграции обеспечивает наименьшую скорость нарастания ошибок за счет более эффективного использования информации от инерциальных датчиков. При типичном времени восстановления сигнала 60 секунд ошибка глубоко интегрированной системы составляет около 5 метров, тогда как система слабой интеграции накапливает ошибку порядка 10 метров.

Таблица 3 – Результаты экспериментальной оценки точности

Метод интеграции	0%	30%	60%	80%
GNSS автономно	2.5	5.2	28.5	65.3
Слабая интеграция (EKF)	2.8	3.5	8.5	15.3
Жесткая интеграция (EKF)	3.0	3.2	5.5	9.2
Глубокая интеграция (EKF)	3.2	3.3	4.2	6.1

Глубокая интеграция (UKF)	3.1	3.2	4.0	5.5
Глубокая интеграция (CKF)	3.1	3.2	4.0	5.6

Примечание: СКО – среднее квадратическое отклонение ошибки позиционирования,

м.

3.3. Доступность навигационного решения

Важным показателем эффективности интегрированной системы является доступность навигационного решения, определяемая как процент времени, в течение которого система способна формировать валидную оценку положения с заданной точностью. Данный показатель критически важен для приложений, требующих непрерывного навигационного обеспечения.

Анализ результатов показывает, что система глубокой интеграции обеспечивает доступность решения на уровне 95% при наличии всего 5-6 видимых спутников, в то время как для схемы слабой интеграции требуется не менее 7-8 спутников для достижения аналогичного показателя. GNSS-приемник в автономном режиме теряет способность формировать решение при снижении числа спутников ниже 4.

4. Анализ

Анализ осуществлялся по нескольким параметрам: точность определения местоположения, длительность работоспособности, скорость восстановления после потери спутниковых сигналов, сколько потребуется времени и затраты.

Глубокая интеграция позволяет повысить точность, работоспособность и надежность. Но для ее внедрения требуются немалые затраты ввиду высокой стоимости мощных вычислителей. С другой стороны в течение эксплуатации повышается точность самолетовождения, следовательно, экономии топлива, которое могло бы использоваться на исправление ошибок.

По мере углубления интеграции возникает сложность — сигналы необходимо обрабатывать на уровне корреляторов и устанавливать более сложные фильтры. Также анализ показал, что при переходе к глубокой системе повышается нагрузка на процессор в 10 раз, в отличие от слабой. Нелинейные фильтры UKF, CKF дают пятикратный прирост по сравнению с обычным расширенным фильтром Калмана.

Заключение

В рамках проведенной работы разработали и исследовали способы совместного использования спутниковых навигационных систем с инерциальными системами, позволяющие комплексу оставаться работоспособным, когда прием спутниковых сигналов ухудшается.

Проанализировали из-за чего ухудшается качество GNSS-сигнала. Когда показатель деградации превышает 60%, стандартные методы обработки оказываются неэффективными.

Разработали классификацию GNSS-систем, выделив 4 уровня объединения: автономная работа, слабая, жесткая и глубокая интеграции. Продемонстрировали, что глубокая интеграция лучше всего при искажившихся сигналах вследствие того, что компоненты взаимодействуют уже на уровне корреляторов приемника.

Исследования показывают, что глубокая интеграция с адаптивным фильтром уменьшает ошибку позиционирования на 35-60% в отличие от обычных схем со слабой интеграцией. Данный комплекс обеспечивает точность навигации в 95% случаев, даже в случаях, когда доступно только 5-6 спутников.

Подтвердили, что нелинейные фильтры UKF, CKF следует применять для компенсации нелинейных искажений в условиях ухудшения приема спутниковых сигналов.

Можно отметить о том, что интеграция GNSS/INS систем способствует экономичности полетов, а именно экономиться топливо, в связи с оптимальными маршрутами полёта, также снижается вероятность допущения навигационных ошибок.

Рекомендации к дальнейшей эксплуатации: методы машинного обучения для автоматического выявления и подавления аномалий в GNSS-измерениях; использование

сигналов неспециализированных спутниковых систем (низкоорбитальные спутники, коммуникационные сигналы) для повышения устойчивости навигации; создание распределённых многосенсорных комплексов, которые собирают данные с разнородных источников.

Список источников

1. Голубев А.В., Симбиркин В.Н. Интегрированные системы навигации и ориентации для подвижных объектов // Гироскопия и навигация. – 2019. – Т. 27, № 2. – С. 45-58.
2. Дмитриев С.П., Куликов А.М., Степанов О.А. Нелинейная фильтрация в задачах навигации // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 5. – С. 78-92.
3. Коваленко Г.В., Чепига В.Е. Методы повышения помехоустойчивости спутниковых навигационных систем // Проблемы безопасности полетов. – 2018. – № 3. – С. 15-24.
4. Песехонов В.Г., Глумов В.М., Бабич О.А. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации // Гироскопия и навигация. – 2017. – Т. 25, № 4. – С. 112-125.
5. Степанов О.А., Торопов А.Б. Алгоритмы интеграции информации в гидроакустических и спутниковых системах навигации // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65, № 2. – С. 156-168.
6. Ткаченко М.Ю., Ходоровский В.Ю. Адаптивные методы обработки информации в интегрированных навигационных системах // Известия вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 6. – С. 445-456.

Сведения об авторах

Соколов Олег Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой №13 «Системы Автоматизированного Управления», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Марьянинов Семён Егорович, студент 4 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Шурупов Артём Владиславович, студент 4 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Sokolov Oleg Arkadyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department No. 13 “Automated Control Systems”, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Maryaninov Semen Egorovich, 4th-year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Shurupov Artem Vladislavovich, 4th-year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.