

Повышение помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС за счет комплексирования с инерциальными навигационными датчиками

Иванов В.Ф.*, Кошкаров А.С.**

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

**e-mail: vf_ivanov@list.ru*

***e-mail: koshkarof@rambler.ru*

Аннотация

В статье рассмотрены возможности повышения помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителей за счет различных схем комплексирования. Проведено обоснование и состав функциональных связей при использовании схемы глубокого комплексирования навигационной аппаратуры с бортовой инерциальной навигационной системой ЛА. Особенностью предложенной схемы является реализация навигационной аппаратуры в формате программного приемника на основе специализированной микросхемы. Предложена схема ввода ассистирующей информации в НАП комплексированную с бортовой ИНС.

Ключевые слова: навигационная аппаратура потребителей, помехоустойчивость, комплексирование, инерциальные навигационные системы.

Введение

В настоящее время наблюдается значительный рост требований к техническим характеристикам навигационных комплексов (НК) летательных аппаратов (ЛА), в том числе беспилотных, в части, касающейся повышения обеспечения их помехоустойчивости к непреднамеренным и умышленным помехам [1,2].

Основной задачей НК в этих условиях является формирование и выдача в режиме реального времени координат, скорости, ускорения и, в некоторых случаях, параметров ориентации ЛА в пространстве. Данная информация используется как для управления непосредственно на борту, так и для реализации координатного метода управления служебным бортовым оборудованием и специальной аппаратурой в беспилотных системах, что в свою очередь требует высокой точности и надежности определения текущих навигационных параметров.

Высокий уровень надежности и автономности НК обеспечивается за счет использования инерциальных навигационных систем (ИНС). Использование ИНС в составе НК позволяет с высокой точностью определять параметры ориентации ЛА в пространстве. Известными недостатками данных систем являются невысокая точность определения координат и нарастающий с течением времени характер ошибок местоопределения [3].

Высокоточное определение координат местоположения и скорости в современных образцах НК, как правило, осуществляется за счет использования аппаратуры потребителей космических навигационных систем. Стандартные

образцы навигационной аппаратуры потребителей (НАП), обладая точностью определения координат местоположения на уровне единиц метров, в то же время имеют существенный недостаток – недостаточный уровень помехоустойчивости, который обусловлен низким уровнем мощности принимаемых радионавигационных сигналов ГЛОНАСС – порядка -166...-156 дБВт [4, 5].

Поэтому одним из методов повышения точности и помехоустойчивости НАП является комплексирование с автономными навигационными системами. Комплексирование с ИНС как метод, с помощью которого можно добиться повышения точности и помехоустойчивости радиоприемных устройств АП довольно долгое время считался радикальным и дорогостоящим. В первую очередь это связано с тем, что основой навигационных комплексов являлись прецизионные платформенные и бесплатформенные ИНС (БИНС), обладавшие значительной массой и высокой стоимостью (до 150-200 кг и 150-300 тысяч долларов США, соответственно). По этой причине данный метод повышения помехоустойчивости АП не предназначался для широкого круга потребителей. Появление серийных образцов малогабаритных бесплатформенных ИНС с точностными характеристиками, близкими к характеристикам платформенных ИНС, а также микромеханических датчиков позволило создать НК для большинства типов потребителей.

До настоящего времени наибольшее распространение имел метод комплексирования НАП и ИНС, основанный на совместной вторичной обработке навигационных данных разнородных систем. Данный метод, называемый так же

комплексирование “по выходам”, слабосвязанная схема комплексирования, схема с низким уровнем интеграции (в иностранной технической литературе - *loosely coupled*) [6, 7], позволяет проводить совместную обработку выходной информации навигационных датчиков и систем, в частности, НАП и ИНС. Обобщенная структурная схема, представленная на рисунке 1 отображает основные элементы НАП, БИНС и фильтра НАП/БИНС, а также их взаимосвязь в соответствии с реализуемыми алгоритмами комплексирования на уровне вторичной обработки информации. К основным структурным элементам НАП относятся: коррелятор, генератор опорной псевдослучайной последовательности (ПСП), блок поиска сигналов навигационных КА (НКА), схемы слежения за задержкой и за несущей частотой принимаемых радионавигационных сигналов (РНС), схема выделения символов информации, фильтр Калмана. К основным элементам БИНС относятся чувствительные элементы (ЧЭ): блоки акселерометров и гироскопов.

Приемное устройство НАП осуществляет поиск, обнаружение, усиление и поэтапное преобразование частоты радионавигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS. Преобразованные радионавигационные сигналы затем поступают на корреляторы, на другие входы которых подаются опорные сигналы. Выходные сигналы корреляторов поступают в кольца слежения за задержкой кода и несущей частотой. Сигналы рассогласования по фазе и частоте между опорным и принимаемым сигналами, вырабатываемые в кольцах слежения, передаются обратно к управляемому генератору опорного сигнала. Схема слежения за несущей частотой обычно имеет третий порядок астатизма. Выходная информация схемы слежения за

несущей частотой может быть использована в схеме слежения за задержкой, имеющей, как правило, первый порядок астатизма.

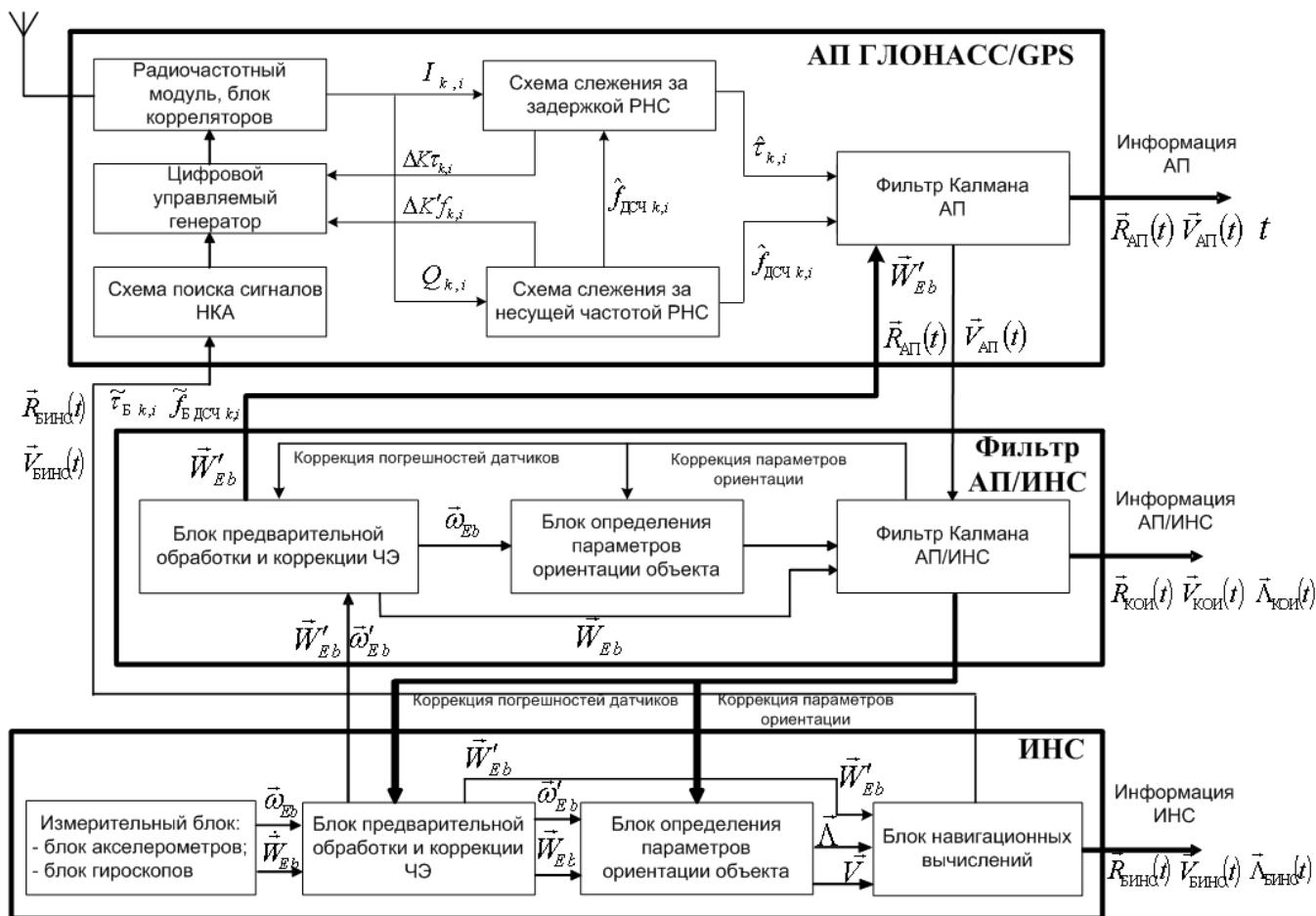


Рисунок 1 – Слабосвязанная схема комплексирования

На схеме (см. рисунок 1) изображены основные каналы ввода дополнительной (корректирующей) информации, получаемой в результате обработки в фильтре НАП/БИНС. Корректирующая информация поступает в блок предварительной обработки и коррекции ЧЭ (компенсация погрешностей датчиков) БИНС, в блок определения параметров ориентации инерциальной системы (коррекция погрешностей определения угловых параметров). В фильтр Калмана НАП из фильтра НАП/БИНС поступают скорректированные значения измерений скорости

\vec{W}_{Eb} . Кроме того, информация о местоположении и скорости ЛА $\vec{R}_{\text{БИНС}}(t)$, $\vec{V}_{\text{БИНС}}(t)$, полученная на основе измерений БИНС, после соответствующего преобразования может быть использована для уменьшения времени поиска радионавигационных сигналов. Сокращение времени поиска сигналов (при условии наличия в запоминающем устройстве НАП альманаха системы) достигается путем сужения диапазона априорных значений задержек и доплеровских частот за счет указания текущих координат и скорости, получаемых в результате решения задачи счисления пути, непрерывно выполняемого БИНС.

На рисунке 1 использованы следующие условные обозначения:

$I_{k,i}, Q_{k,i}$ - синфазная и квадратурная составляющие входного радионавигационного сигнала, соответственно;

$\hat{\tau}_{k,i}, \hat{f}_{\text{ДСЧ } k,i}$ - оценки задержки принимаемой псевдослучайной последовательности дальномерного кода и доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) сигнала;

$\tilde{\tau}_{B k,i}, \tilde{f}_{\text{ДСЧ } k,i}$ - значения задержки и ДСЧ, полученные по результатам измерений БИНС;

$\vec{\omega}_{Eb}, \dot{\vec{W}}_{Eb}$ - векторы измерений угловой скорости и ускорения ПС на выходе измерительного блока БИНС в проекциях на оси связанной с измерительным блоком системы координат;

$\vec{\omega}'_{Eb}, \dot{\vec{W}}'_{Eb}$ - скорректированные с учетом погрешностей гироскопов и акселерометров значения угловой скорости и ускорения;

\vec{A}, \vec{V} - векторы параметров ориентации и скорости, определенные по результатам измерений датчиков БИНС;

$\vec{R}_{АП}, \vec{V}_{КОИ}, \vec{A}_{БИНС}$ - векторы текущих параметров местоположения, вектора скорости и параметров ориентации, на выходах АП, схемы комплексной обработки информации и БИНС, соответственно;

$\Delta K, \Delta K'$ - коэффициенты усиления схем слежения за задержкой и несущей, соответственно.

Простейшие схемы комплексирования на уровне вторичной обработки информации используют только один канал обратной связи: выход БИНС – схема поиска радионавигационных сигналов - цифровой управляемый генератор. Использование данного канала обратной связи позволяет сократить время поиска радионавигационных сигналов.

В более сложных схемах комплексирования на уровне вторичной обработки информации в состав вектора состояния включают информацию о значениях погрешностей датчиков автономных навигационных систем, в том числе инерциальных. Результирующий вектор состояния может содержать несколько десятков параметров. Кроме того, канал обратной связи может быть использован для выставки и коррекции погрешностей БИНС непосредственно во время работы НК на борту ЛА.

Однако метод комплексирования АП и БИНС при осуществлении вторичной обработки информации позволяет достичь требуемого качества навигационных определений только в случае работоспособности самих измерителей. Следует отметить, что ситуации, когда измерители становятся неработоспособными - наблюдаются срывы сопровождения в схемах слежения за задержкой и несущей частотой сигналов навигационных КА, являются довольно распространенными.

Кроме того, существенным недостатком данного метода комплексирования является необходимость усложнения НК за счет применения ИНС высокой точности и резервирования критически важных узлов.

Для решения задачи повышения помехоустойчивости НК более перспективным является метод комплексирования на уровне первичной обработки информации (на уровне измеряемых параметров), то есть данных с колец (схем) слежения за задержкой и частотой несущей радионавигационных сигналов, гироскопов и акселерометров БИНС (в том числе микромеханических) с использованием единого вычислительного устройства в составе НК. Данный метод носит название сильносвязанной схемы или глубокого комплексирования - “tightly coupled”, “deeply integrated” (“ultra-tightly”) по терминологии, используемой в технической литературе [6, 7]. На рисунке 2 изображена структурная схема, представляющая метод глубокого комплексирования приемника радионавигационных сигналов и БИНС. На данном рисунке изображен состав основных блоков приемника НАП и БИНС, а также блоков, непосредственно реализующих алгоритмы комплексирования. Блок вычисления ожидаемых значений задержки и доплеровского сдвига частоты принимаемых радионавигационных сигналов относится к схеме комплексирования.

При реализации метода глубокого комплексирования появляется возможность использования неполного состава типовых структурных элементов как в спутниковом навигационном приемнике, так и в инерциальной системе.

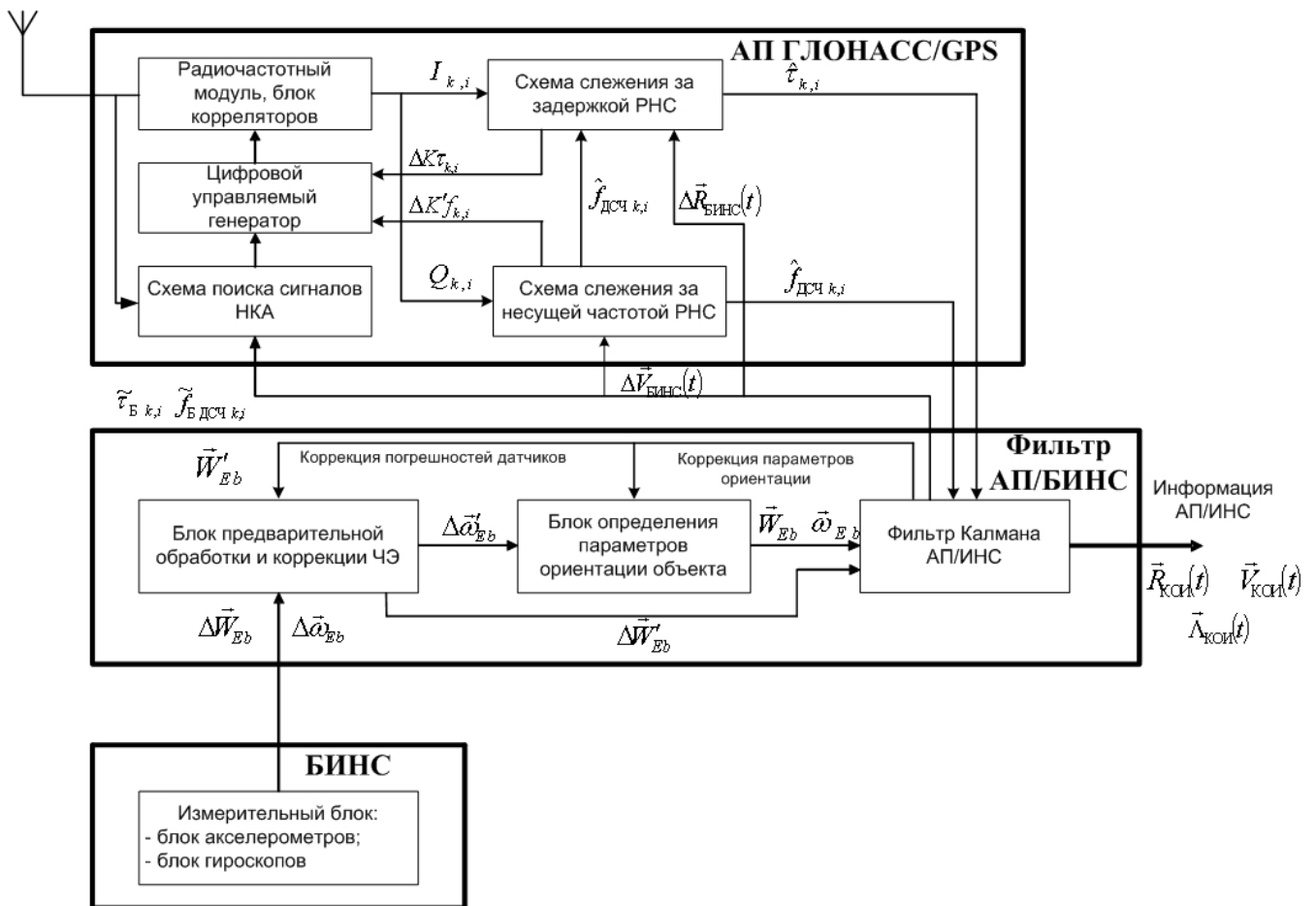


Рисунок 2 – Сильносвязанная схема комплексирования

Например, НАП может состоять из радиочастотного тракта, блока корреляторов, схемы слежения за задержкой и частотой несущей принимаемых сигналов, и не иметь собственного навигационного процессора, предназначенного для решения задачи вторичной обработки. В то же время БИНС может содержать в своем составе навигационные датчики – гироскопы, акселерометры и устройство, отвечающее за предварительную обработку информации от них. Решение задачи совместной обработки информации в схемах с глубоким уровнем комплексирования выполняется в отдельных аппаратно-программных модулях, чем достигается улучшение массогабаритных характеристик НК.

Принципиальным отличием каналов ввода дополнительной (корректирующей) информации в сильносвязанной схеме комплексирования (см. рисунок 2) по сравнению со слабосвязанной схемой комплексирования (см. рисунок 1), является возможность ввода предварительно обработанных и преобразованных измерений с выходов датчиков БИНС непосредственно в кольца слежения за частотой и задержкой НАП.

Метод глубокого комплексирования НАП и БИНС по сравнению с методом комплексирования на уровне вторичной обработки информации обладает следующими преимуществами [8]:

- существенное уменьшение вероятности ложных захватов следящими измерителями радионавигационных параметров;
- уменьшение вероятности срыва слежения за соответствующими параметрами принимаемых радиосигналов;
- для высокодинамичных объектов - компенсация влияния движения объекта на работу следящих измерителей;
- возможность уменьшения порядка астатизма колец слежения и, как следствие, уменьшение случайной ошибки слежения;
- повышение помехоустойчивости НАП.

Сдерживающим фактором, не позволяющим в полной мере использовать на практике все преимущества метода глубокого комплексирования, является необходимость значительных временных и материальных затрат на проведение работ по изменению структуры аппаратной части приемника радионавигационных

сигналов для решения задачи интеграции с модулями инерциальной системы. Это связано с особенностью традиционной схемы построения НАП, заключающейся в аппаратной реализации основных операций цифровой обработки радионавигационных сигналов.

Выходом из данной ситуации может быть принципиальное изменение подхода к проектированию и разработке НАП для использования в составе бортового НК ЛА.

Наибольший положительный эффект от использования глубокой схемы комплексирования НАП и БИНС может быть достигнут при использовании программного приемника ГЛОНАСС/GPS в составе НК. Основным отличием программных приемников от традиционной схемы построения АП является реализация основных операций первичной и вторичной цифровой обработки радионавигационных сигналов (ЦОС) в виде программных модулей, выполняемых на специализированных или универсальных процессорах. В зарубежной технической литературе указанный подход к созданию программных приемников радиосигналов получил название «software defined radio» (SDR).

Преимущества программной обработки радиосигналов перед существующими аппаратными платформами заключаются в следующем [9, 10]:

- получение более высоких технических характеристик устройств приема и обработки радиосигналов;
- синтез сложных алгоритмов обработки сигналов, не реализуемых традиционными методами;

- коррекция алгоритмов обработки сигналов без изменений аппаратной части;
- оперативная программная перестройка АП при появлении новых навигационных сигналов без изменений аппаратной части;
- реализация алгоритмов глубокого комплексирования с навигационными датчиками и другими системами.

Рассмотрим основные этапы программной обработки сигналов НКА.

Оцифрованный радионавигационный сигнал промежуточной частоты S_{ki} , представленный квадратурными составляющими I_{ki}, Q_{ki} , записывается во входной программный буфер. Далее следует предварительная обработка: сортировка по квадратурным составляющим записанного набора данных, пороговое ограничение радиосигнала по заданному уровню, компенсация доплеровского сдвига частоты.

В программном приемнике выполнение операций поиска по задержке и доплеровскому сдвигу частоты, а так же обнаружения радионавигационных сигналов может быть осуществлено с использованием согласованного фильтра, программно реализуемого в составе приемного устройства. Для обеспечения работы согласованного фильтра на основе кодообразующих полиномов программным методом формируются дальномерные ПСП для каждого навигационного КА ГЛОНАСС и GPS. Сформированные опорные ПСП хранятся в отдельном массиве (в памяти) и используются при выполнении операций свертки с принимаемыми навигационными сигналами.

Для повышения качества работы блока программного обнаружителя радиосигнала может быть реализована схема некогерентного накопления

результатов свертки принимаемого и опорного сигналов на заданном числе периодов дальномерного кода.

Для выполнения операции поиска по частоте на выходе согласованного фильтра формируется целочисленный массив синфазной и квадратурной составляющих $I_{k,i}^O, Q_{k,i}^O$ опорного сигнала с определенным шагом по частоте.

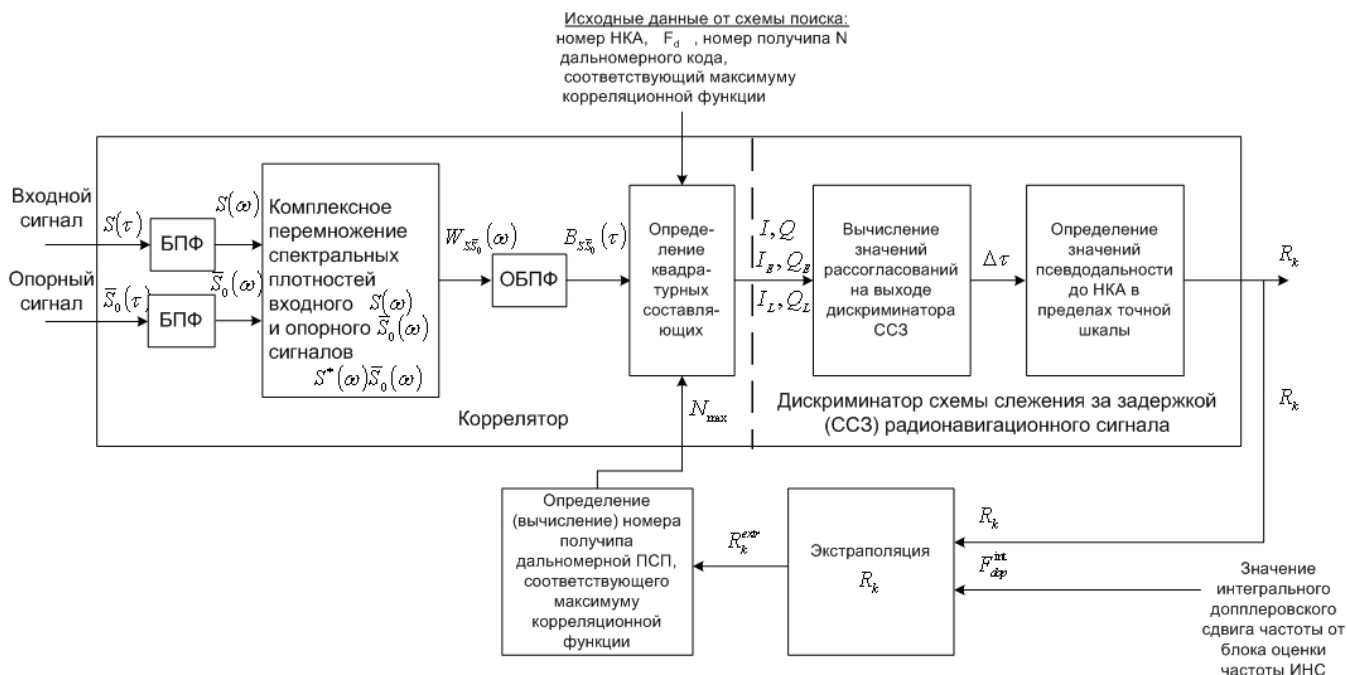


Рисунок 3 – Схема взаимодействия программно-реализованной НАП с ИНС

Существенное улучшение характеристик слежения за параметрами навигационных сигналов в программном приемнике достигается за счет реализации круговой свертки в частотной области.

Схема, представленная на рисунке 3, отображает процесс взаимодействия программного приемника с ИНС в составе НК.

Очевидно, что использование программного объединения разнородных навигационных датчиков в составе НК является технологичным и современным решением, которое будет способствовать не только повышению надежности

навигационных определений на борту ЛА, но и надежности самого аппарата со всех точек зрения.

Кроме этого, реализация метода и алгоритмов комплексирования – совместной цифровой обработки измерений НАП и измерительной информации датчиков БИНС на уровне колец слежения за задержкой и частотой несущей радиосигналов позволяет улучшить характеристики следящих систем, а именно, уменьшить полосы захвата за счет дополнительной (ассистирующей) информации при этом величина ширины полосы пропускания следящей системы может быть уменьшена до значений порядка 3-5 Гц. Дальнейшее уменьшение полосы пропускания возможно, как за счет использования стабильного носителя шкалы времени в составе НАП (опорного генератора с относительной нестабильностью шкалы времени не хуже 10^{-6}), так и за счет БИНС высокой точности. На рисунке 4 представлена блок-схема, отображающая основные этапы алгоритма комплексной обработки информации НАП и БИНС на уровне колец слежения за задержкой и несущей частотой принимаемых радионавигационных сигналов. Указанный способ позволяют осуществлять накопление сигнала на интервале времени 1 секунда и более [11-12]. При этом дополнительный прирост в коэффициенте усиления может достигать 30 дБ, а чувствительность НАП в режиме слежения -190 дБВт.

Использование единого навигационного вычислительного устройства для программно-реализованной НАП и БИНС в составе НК, реализованного на основе метода глубокого комплексирования, позволяет снизить массогабаритные характеристики и энергопотребление служебного бортового оборудования.



Рисунок 4 – Блок-схема реализации алгоритма ввода ассистирующей информации в следящие системы

Проведенные исследования, в том числе и результаты экспериментов с использованием реальных радионавигационных сигналов ГЛОНАСС, показали, что применение метода и алгоритмов глубокого комплексирования макетного образца программной НАП и БИНС, построенной на основе микромеханических датчиков, приводит к повышению помехоустойчивости НК в среднем на 6-12 дБ.

Библиографический список

1. Алешин Б.С., Антонов Д.А., Веремеенко К.К., Жарков М.В., Зимин Р.Ю., Кузнецов И.М., Пронькин А.Н. Малогабаритный интегрированный навигационно-

посадочный комплекс // Труды МАИ. 2012. № 54. URL:
<https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29692>

2. Валайтите А.А., Никитин Д.П., Садовская Е.В. Исследование влияния ошибки многолучевости на точность определения параметров сигналов ГНСС (глобальных навигационных спутниковых систем) при помощи имитатора навигационного поля // Труды МАИ. 2014. № 77. URL:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53172>

3. Мишин А.Ю., Фролова О.А., Исаев Ю.К., Егоров А.В. Комплексная навигационная система летательного аппарата // Труды МАИ. 2010. № 38. URL:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=14161>

4. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.1). – М.: Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, 2008. – 60 с.

5. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. - М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. – 268 с.

6. Соловьев Ю.А. Комплексование глобальных спутниковых радионавигационных систем с другими навигационными измерителями (обзор) // Радиотехника. 1999. № 1. С. 3-21.

7. Фатеев В.Ф. Инфраструктура малых космических аппаратов. - М.: Радиотехника, 2011. – 432 с.

8. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. - М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.

9. Бахолдин В.С., Герасименко В.С., Добриков В.А., Дубинко Ю.С., Иванов В.Ф., Сахно И.В., Ткачев Е.А. Программный приемник ГЛОНАСС/GPS/Galileo на нейромикропроцессоре L1879VM1 // II Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно–временное обеспечение» (КВО–2005): тезисы докладов. - СПб.: 2005. С. 168-170.

10. Бабаков В.Н., Бахолдин В.С., Борсук О.А., Герасименко И.С., Добриков В.А., Дубинко Ю.С., Иванов В.Ф., Лукьяненко А.В., Сахно И.В., Симонов А.Б., Ткачев Е.А. Способ программной обработки буферизованных выборок оцифрованных сигналов и мультисистемный многоканальный программный приемник реального времени сигналов спутниковых навигационных систем и систем их поддержек для его осуществления. Патент РФ № 2336631. Бюлл. № 29, 20.10.2008.

11. Айсфеллер Б., Кройе К., Санрома Д., Люк Т. Разработка и анализ технических характеристик сильносвязанной системы ГСНС/ИНС // Гироскопия и навигация. 2003. № 2(41). С. 47–64.

12. Ладетто К., Мермино Б. Комплексование цифрового магнитного компаса и гироскопа в задаче пешеходной навигации // Гироскопия и навигация. 2003. № 2(41). С. 65–77.