

На правах рукописи

Чистяков Валерий Валентинович

АРХИТЕКТУРА ПРИЕМНИКА СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ И МЕТОДЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Специальность: 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,

доцент кафедры «Бортовая радиоэлектронная аппаратура»

Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

Михайлов Николай Викторович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры «Радионавигационные приборы и системы»

Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Устинов Юрий Матвеевич

кандидат технических наук, доцент,

профессор кафедры «Военные системы космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации»

Военной академии связи имени маршала С.М. Буденного

Якушенко Сергей Алексеевич

Ведущая организация:

ОАО «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «25» июня 2014 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5, ауд. 5108.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru

Автореферат разослан «24» апреля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.238.06,

кандидат технических наук

А.М. Боронахин

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Для повышения автономности функционирования космических аппаратов (КА) различного целевого назначения в околоземном пространстве требуется использование бортовых средств навигации. Возможность высокоточного определения вектора состояния КА на борту значительно упрощает решение задач навигационного планирования (включая планирование маневров), удержания КА на орбите, предотвращения столкновений внутри группировки, а также открывает новые функциональные возможности в управлении КА, такие как создание группировок для полета строем (formation flying). В настоящее время наиболее полно требованиям к навигационному обеспечению КА удовлетворяют среднеорбитальные спутниковые радионавигационные системы (СРНС) – американская Global Positioning System (GPS) и российская Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС). К их достоинствам относятся высокая точность, доступность, надежность и непрерывность координатно-временного обеспечения потребителей. Поэтому навигационные приемники GPS/ГЛОНАСС становятся неотъемлемой частью бортового комплекса управления перспективных КА, информация от которых используется как для уточнения орбитальных параметров центра масс КА, так и для планирования целевых задач в бортовом комплексе [1].

Степень разработанности темы исследования. Несмотря на большой выбор навигационных приемников GPS/ГЛОНАСС, представленных на рынке гражданской аппаратуры потребителей (АП), число приемников, пригодных для использования в условиях космического пространства, ограничено. При этом стоимость такой аппаратуры весьма высока, что обусловлено небольшим сегментом рынка и жесткими требованиями к радиационной стойкости элементной базы АП космического базирования [2]. Электронные компоненты приемника, соответствующие этим требованиям, в частности многоканальный коррелятор (МКК), доступны лишь в военном исполнении или в исполнении для двойного применения.

Высокая стоимость и ограниченная доступность радиационно-стойких МКК являются препятствием при разработке бортовой аппаратуры спутниковой навигации (БАСН) для гражданского потребителя. Выходом из сложившейся ситуации может быть использование подхода, при котором функции коррелятора в навигационном приемнике реализуются программными средствами и выполняются под управлением центрального процессора (ЦП). Несмотря на очевидные преимущества этого подхода (гибкость архитектуры и упрощение аппаратной части), он имеет существенный недостаток – реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) предъявляет достаточно высокие требования к производительности ЦП. Необходимо отметить, что сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) общего назначения,

а именно ЦП и периферийные устройства, производятся в радиационно-стойком исполнении и часть этих СБИС доступны для гражданского потребителя. Однако ЦП с необходимой радиационной стойкостью, как правило, обладают низкой производительностью [3], что накладывает ограничения на алгоритмы обработки сигналов и архитектуру БАСН в целом. Указанный круг задач составил предмет данной диссертационной работы и определил ее цель.

Цель работы – решение научно-технической задачи проектирования архитектуры приемника спутниковой навигации с программным коррелятором для космических применений и разработки эффективных методов обработки сигналов, позволяющих снизить требования к производительности ЦП.

Для достижения поставленной цели были сформулированы **следующие задачи**:

1. Исследование условий приема сигналов GPS/ГЛОНАСС в БАСН для различных положений потребителя относительно орбиты навигационных КА (НКА) и определение основных требований к алгоритмам первичной обработки сигналов.
2. Анализ возможных подходов к проектированию аппаратуры потребителя спутниковой навигации с целью разработки архитектуры навигационного приемника для космических применений.
3. Разработка метода адаптивной обработки сигналов в корреляторе, ориентированного на снижение требований к производительности вычислительной платформы.
4. Анализ схем поиска сигналов в приемниках спутниковой навигации с программным МКК и разработка метода поиска сигналов в БАСН, обеспечивающего обнаружение сигнала в условиях широкого диапазона изменения доплеровской частоты и при пониженном уровне мощности сигнала.
5. Разработка метода слежения за параметрами сигнала в приемнике с программным МКК, ориентированного на уменьшение вычислительных затрат при оценке задержки огибающей и фазы несущей частоты.
6. Анализ помехоустойчивости систем слежения и алгоритма демодуляции символов с целью определения степени влияния метода адаптивной обработки на оценки параметров сигнала и вероятность ошибки приема символов.

Научная новизна проведенных исследований заключается в том, что в результате их выполнения:

- предложен метод адаптивной обработки сигналов в программном МКК, заключающийся в использовании переменного интервала корреляции и позволяющий существенно снизить требования к производительности ЦП;

- предложен метод комбинированного поиска сигналов в приемнике спутниковой навигации с программным МКК, использующий несколько схем поиска в зависимости от информации об априорной неопределенности несущей частоты, обеспечивающий широкий диапазон поиска по частоте, а также получены аналитические соотношения для расчета параметров поиска;
- предложен метод слежения за параметрами сигнала в приемнике с программным МКК, заключающийся во временном разделении петель слежения за огибающей и несущей частотой и позволяющий получить оценки задержки и фазы несущей частоты с требуемой точностью при меньших вычислительных затратах по сравнению с традиционным подходом;
- получены аналитические зависимости, описывающие влияние внутрисистемной помехи на оценку параметров несущей частоты сигнала и вероятность ошибки приема символов при адаптивной обработке навигационного сигнала с кодовым разделением.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новой архитектуры приемника спутниковой навигации с программным МКК и эффективных методов первичной обработки сигналов, позволяющих снизить требования к производительности ЦП.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты диссертационных исследований могут служить основой при проектировании навигационных приемников GPS/ГЛОНАСС, используемых для навигации КА. Предложенная архитектура приемника и разработанные методы первичной обработки сигналов успешно реализованы в аппаратуре космического базирования MosaicGNSS, предназначенной для навигации КА по сигналам GPS L1 диапазона.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялись теоретические и экспериментальные методы исследований, включающие математическое моделирование при анализе характеристик алгоритмов ЦОС, использовались основные положения математической статистики, статистического анализа и обработки экспериментальных данных.

В результате проведенных исследований получены следующие **основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод адаптивной обработки сигналов в программном МКК позволяет снизить уровень требований к производительности вычислительной платформы.
2. Метод комбинированного поиска сигналов в навигационном приемнике с программным МКК обеспечивает обнаружение сигналов в широком диапазоне частот и при пониженном

уровне мощности сигнала. На основании полученных аналитических соотношений определены параметры комбинированного поиска.

3. Метод слежения за параметрами сигнала позволяет получить оценки задержки огибающей и фазы несущей частоты с требуемой точностью при меньших вычислительных затратах по сравнению с традиционным подходом.
4. Результаты анализа помехоустойчивости систем слежения за параметрами сигнала и алгоритма демодуляции информационных символов при адаптивной обработке сигнала в приемнике с программным коррелятором.

Степень достоверности и апробации результатов. Результаты диссертационных исследований использованы компанией EADS Astrium (Германия) при разработке навигационного приемника космического базирования MosaicGNSS [4], а предложенные алгоритмы ЦОС прошли успешную проверку в ходе натурных испытаний приемника, проведенных немецким центром аэрокосмических исследований в рамках проекта TerraSAR-X [5]. Первый запуск радиолокационного спутника TerraSAR-X с приемником MosaicGNSS на борту состоялся в 2006 году. В настоящее время на околоземной орбите функционирует 8 экземпляров приемника с общим сроком службы 18 лет. Кроме того, имеется заказ на изготовление еще более 40 экземпляров приемника для решения различных целевых задач на орбите [4].

Основные теоретические и практические результаты диссертации изложены в 14 публикациях, среди которых 1 монография, 7 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК, 1 патент на изобретение, 1 зарегистрированная программа для ЭВМ и 4 выступления на российских и международных конференциях.

Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из введения, 4-х разделов, заключения, списка использованных источников, включающего 65 наименований, и приложения. Основная часть работы изложена на 116 страницах машинописного текста. Работа содержит 75 рисунков и 20 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, определяется научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов.

В первом разделе «Особенности приема сигналов спутниковых навигационных систем в космосе» проанализированы основные отличия условий приема сигналов GPS/ГЛОНАСС в

БАСН от наземного потребителя. Для этой цели в среде MATLAB разработан программный комплекс, позволяющий получить оценки прогнозируемого отношения сигнал/шум (C/N_0) на входе цифровой части БАСН, доплеровского смещения несущей частоты и его производных (f_d , f'_d , f''_d), а также параметров рабочего созвездия НКА, включая геометрический фактор (PDOP). Для определения характерных особенностей приема сигналов СРНС в приемниках космического базирования для разных высоты и типа орбиты КА выбраны низкоорбитальный (МКС) и геостационарный (ИНМАРСАТ) потребители, имеющие близкие к круговым орбиты, а также потребитель с высокоэллиптической орбитой типа «Молния». Расчет траектории потребителей осуществлялся на основе данных сервиса North American Aerospace Defense Command (NORAD) в предположении, что КА движутся по идеальным невозмущенным орбитам. В качестве исходных данных о параметрах орбит НКА использовались альманахи систем GPS/ГЛОНАСС. С помощью разработанного программного комплекса для выбранных потребителей получены частотные распределения указанных выше параметров. Отмечено, что характер распределений для обеих систем одинаковый. Результаты моделирования для GPS суммированы в таблице 1. Для сравнения там же приведены характеристики условий приема сигналов GPS наземным потребителем.

Таблица 1 – Характеристики условий приема сигналов GPS

Потребитель	Число «видимых» НКА	Время контакта с НКА, мин	Диапазон изменения			
			C/N_0 , дБГц	f_d , кГц	f'_d , Гц/с	f''_d , Гц/с ²
Наземный	7 ... 14	7 ... 350	39 ... 50	±4,5	-0,8 ... 0	±0,00015
МКС	7 ... 13	1 ... 40		±42	-70 ... 0	±0,08
ИНМАРСАТ 4-F1	0 ... 4	1 ... 59	22 ... 38	±6	0 ... 1,4	±0,0002
Молния 3-50	0 ... 24	1 ... 64	22 ... 52	±50	-50 ... 20	±0,06

Из особенностей приема сигналов спутниковых навигационных систем в космосе следует отметить плохую радиовидимость и пониженный уровень мощности сигналов НКА для потребителей, расположенных над орбитой СРНС. Если для низкоорбитального потребителя в зоне радиовидимости всегда находится не менее 7-ми НКА, что позволяет осуществлять непрерывное позиционирование по набору одномоментных измерений радионавигационных параметров (РНИ), то для потребителей с геосинхронной и высокоэллиптической орбитами наиболее вероятное число «видимых» НКА не превосходит четырех. При этом существуют

значительные интервалы времени, когда в зону радиовидимости потребителя не попадает ни один НКА. Использование сигналов от боковых лепестков диаграммы направленности передающей антенны НКА при пороге обнаружения сигнала 30 дБГц не меняет характер распределения. Число «видимых» НКА существенно возрастает, если порог обнаружения сигнала опустить до 20-22 дБГц. В этом случае наиболее вероятное число «видимых» НКА для этих потребителей равно четырем, а радиовидимость НКА становится практически непрерывной. Однако даже при этих условиях геометрический фактор рабочего созвездия НКА редко опускается ниже 30.

Величина доплеровского эффекта, обусловленного движением потребителя и НКА, определяет диапазон поиска сигнала по частоте и параметры следящих петель. Для космического потребителя потенциально достижимые значения доплеровского смещения частоты и его производных зависят от высоты и типа орбиты. Максимальная взаимная динамика наблюдается в случае, когда плоскости орбит потребителя и НКА совпадают, а их угловые скорости имеют разные знаки. Для относительных скорости, ускорения и рывка имеют место соотношения:

$$v = \frac{1}{r} (|\vec{R}_0| |\vec{R}_1| \varphi' \sin \varphi), \quad a = \frac{1}{r} (|\vec{R}_0| |\vec{R}_1| (\varphi')^2 \cos \varphi - v^2), \quad j = -\frac{1}{r} (|\vec{R}_0| |\vec{R}_1| (\varphi')^3 \sin \varphi + 3va),$$

где \vec{R}_0 и \vec{R}_1 – радиус-векторы НКА и потребителя, φ – угол между \vec{R}_0 и \vec{R}_1 , $r = |\vec{R}_0 - \vec{R}_1|$. Для круговых орбит модуль радиус-вектора КА и его угловая скорость не меняются. Поэтому для φ' справедливо соотношение:

$$|\varphi'| = \sqrt{\mu} (|\vec{R}_0|^{-3/2} + |\vec{R}_1|^{-3/2}),$$

где μ – гравитационная постоянная Земли. На основании этих соотношений получены зависимости максимальных значений f_d , f'_d , и f''_d от высоты орбиты потребителя, которые представлены на рисунках 1 и 2.

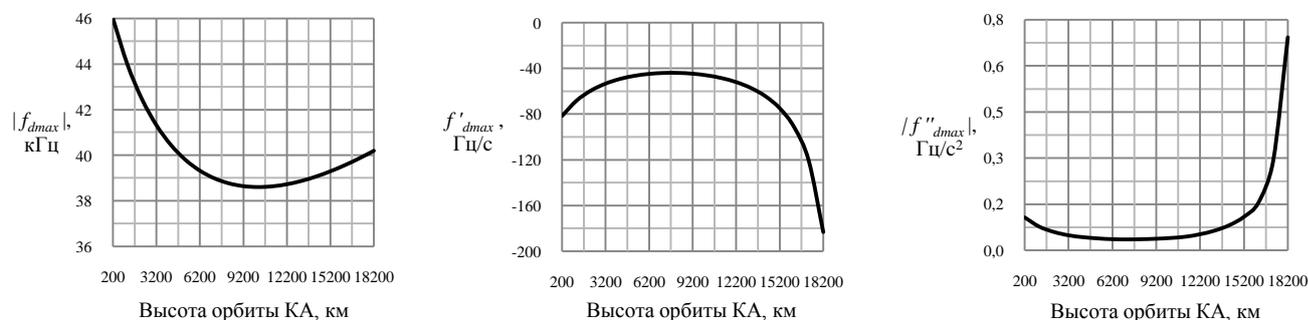


Рисунок 1 – Максимальные значения доплеровского смещения частоты и его производных для потребителя, расположенного ниже орбиты НКА

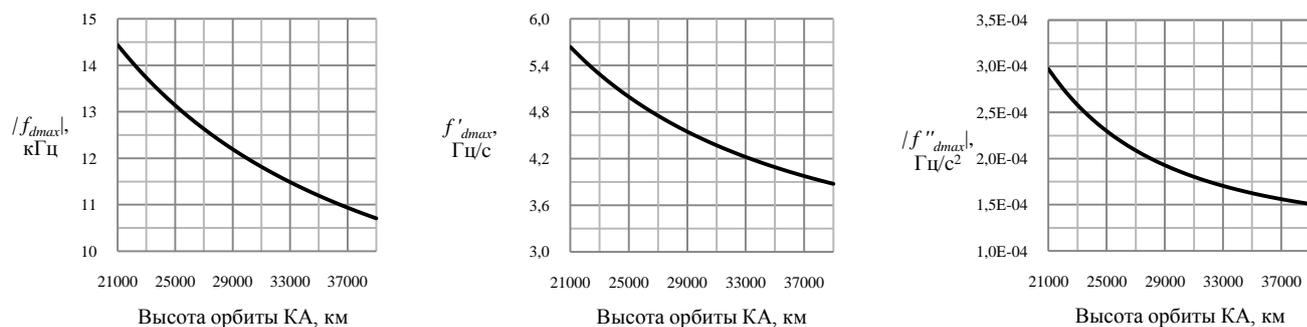


Рисунок 2 – Максимальные значения доплеровского смещения частоты и его производных для потребителя, расположенного выше орбиты НКА

Показано, что максимальный диапазон изменения доплеровского смещения частоты для космического потребителя без учета погрешности формирования опорной частоты в приемнике составляет ± 50 кГц, а модуля его производной – $0 \dots 180$ Гц/с. По сравнению с наземным потребителем диапазон поиска по частоте увеличился на порядок, а максимальное ускорение – на два порядка. Вторая производная доплеровского смещения частоты изменяется в пределах – $0 \dots 0,7$ Гц/с². Для обеспечения прецизионных измерений РНП в приемнике космического базирования в системах слежения за параметрами сигнала необходимо учитывать как первую, так и вторую производную доплеровского смещения частоты.

Во втором разделе «Архитектура приемника сигналов спутниковых навигационных систем для космического потребителя» проанализированы возможные подходы к проектированию навигационных приемников GPS/ГЛОНАСС. Отмечено, что ограниченный доступ к радиационно-стойким МКК определяет выбор в пользу программного коррелятора в БАСН для гражданского потребителя. Трудность реализации этого подхода заключается в том, что ЦП с необходимой радиационной стойкостью обладают низкой производительностью.

Основным потребителем ресурсов ЦП в навигационном приемнике с программным МКК является алгоритм вычисления корреляции входного сигнала с опорным. Поэтому основные усилия разработчиков направлены на оптимизацию вычислений при реализации алгоритма корреляции. Проведен анализ методов реализации программного МКК, позволяющих в разы уменьшить число операций, необходимых для вычисления свертки и снизить, таким образом, уровень требований к производительности ЦП. Отмечено, что использование Single Instruction Multiple Data (SIMD) команд, битовых логических операций, а также пакетной обработки отсчетов промежуточной частоты позволяет осуществлять обработку сигнала под управлением ЦП с темпом поступления отсчетов. Получена эмпирическая оценка производительности ЦП, необходимой для программной реализации одного канала МКК. Полученная оценка пересчитана для предлагаемого к использованию в БАСН сигнального процессора TSC21020F,

изготавливаемого компанией Atmel (Temic) и представляющего собой радиационно-стойкую версию процессора ADSP21020 компании Analog Devices. Показано, что при одноразрядном квантовании входного сигнала TSC21020F позволяет реализовать не более двух каналов корреляции. Таким образом, для реализации многоканальной обработки необходима новая архитектура приемника с программным МКК и разработка эффективных методов ЦОС.

В классическом приемнике с программным МКК число каналов корреляции фиксировано и определяется максимальной загрузкой ЦП. Однако, в разных режимах функционирования приемника (поиск/слежение) загрузка ЦП может варьироваться. Это означает, что в некоторых режимах существует свободный ресурс ЦП. Предложена архитектура приемника с программным МКК, реализующего двухэтапную обработку сигнала, ориентированная на максимально эффективное использование ресурсов ЦП (рисунок 3). Приемник включает в себя

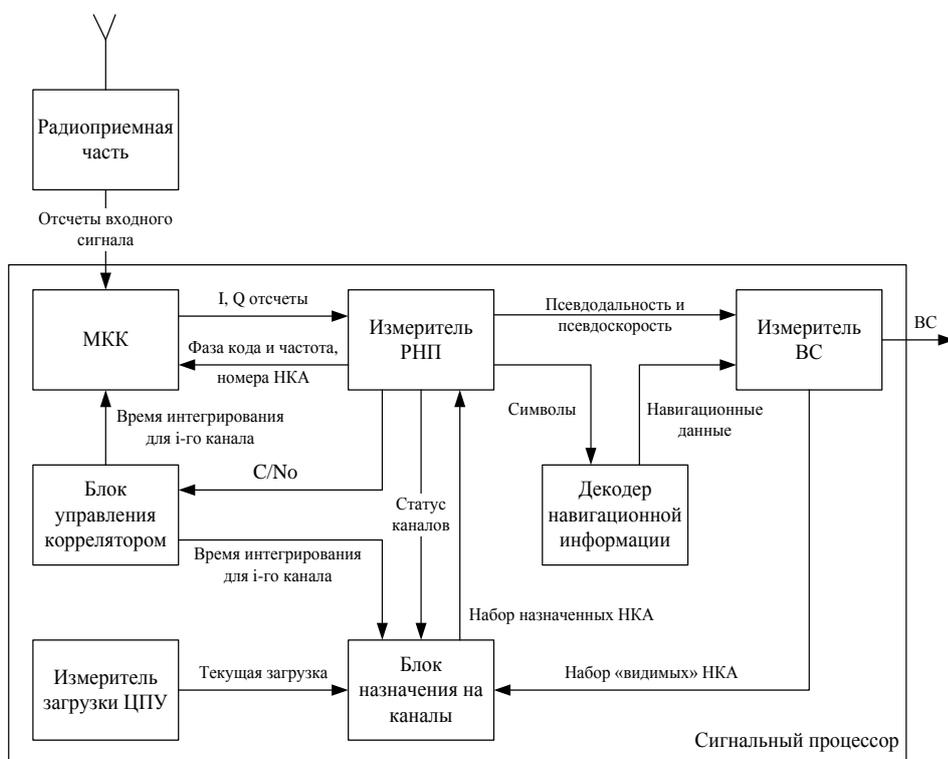


Рисунок 3 – Архитектура навигационного приемника с динамически изменяемым числом каналов МКК

радиоприемную часть и сигнальный процессор, который исполняет функции МКК, измерителей РНП и вектора состояний, декодера навигационной информации и блока назначения на каналы. В отличие от классической реализации приемников с программным МКК в данной архитектуре добавлены два новых блока – измеритель загрузки ЦП и блок управления коррелятором, позволяющие динамически изменять число каналов коррелятора в зависимости от условий приема сигналов. В МКК осуществляется формирование отсчетов

опорного сигнала, свертка этих отсчетов с отсчетами входного сигнала, а также интегрирование результата свертки для получения первичных квадратурных накоплений I и Q . В измерителе РНП эти накопления используются для оценки текущей фазы кода и фазы несущей частоты, а также отношения C/N_0 для каждого из каналов. На основании этих оценок производятся измерения псевдодальности и псевдоскорости. Кроме того, в измерителе РНП осуществляется демодуляция информационных символов. В измерителе вектора состояния на основании измерений псевдодальности и псевдоскорости, полученных в разных каналах, вычисляются пространственные координаты, составляющие вектора скорости и поправка к шкале времени потребителя. На основании альманаха системы, передаваемого в навигационном сообщении, и вектора состояния потребителя вычисляется набор НКА, находящихся в зоне радиовидимости БАСН. Решение об изменении числа каналов МКК и формировании списка назначенных НКА осуществляется в блоке назначения на каналы на основании данных о наборе «видимых» НКА, статусе канала (поиск/захват/слежение) и времени интегрирования для каждого из каналов. Измеритель загрузки ЦП вычисляет оценку среднего значения интервала времени, затрачиваемого сигнальным процессором на выполнение всех задач, за фиксированный интервал времени, например, за одну секунду. По измеренному отношению сигнал/шум в блоке управления коррелятором вычисляется время интегрирования для каждого из каналов коррелятора, которое используется в МКК для вычисления свертки.

В третьем разделе «Многоканальный программный коррелятор с переменным временем интегрирования» предложен метод адаптивной обработки сигнала, позволяющий существенно уменьшить затраты ресурсов ЦП при вычислении свертки. Идея метода состоит в экономии ресурсов ЦП благодаря использованию неполного ансамбля входных отсчетов при обработке сигнала в корреляторе. При этом освободившиеся ресурсы ЦП могут быть использованы для обработки сигнала следующего НКА. Благодаря программной реализации МКК использование входных отсчетов в каждом канале коррелятора может осуществляться порциями с разными длительностью и периодичностью. Это позволяет перераспределить потери между каналами МКК в зависимости от уровня принимаемых сигналов, т.е. потери в каналах с низким уровнем сигнала могут быть уменьшены за счет тех каналов, в которых имеется некоторый запас помехоустойчивости. Допустимое количество пропущенных отсчетов в канале коррелятора определяется уровнем мощности принимаемого сигнала. Пусть q_i – отношение сигнал/шум для i -го НКА, а q_0 – минимальное значение отношения сигнал/шум, начиная с которого допускается использование неполного ансамбля входных отсчетов. Тогда коэффициент использования сигнала i -го НКА, который определяется как отношение количества входных отсчетов, использованных при вычислении свертки на некотором интервале времени T , к

общему числу отсчетов на этом интервале, равен $k_i = \begin{cases} 1, & q_i \leq q_0 \\ q_0/q_i, & q_i > q_0 \end{cases}$. Таким образом, потери в i -ом канале МКК при прореживании составят $10lg(q_i/q_0)$ дБ, что соответствует превышению отношения сигнал/шум в этом канале относительно выбранного значения порога. Следовательно, чем меньше уровень мощности сигнала в канале МКК, тем меньше величина потерь в этом канале. Для тех каналов, в которых отношение сигнал/шум меньше чем q_0 , при вычислении свертки используются все входные отсчеты. Число «виртуальных» каналов МКК в каждый момент времени определяется как наибольшее целое M , для которого выполняется неравенство: $\sum_{i=1}^M k_i \leq N$, где N – число «базовых» каналов МКК. Под «базовым» понимается канал корреляции, в котором для вычисления свертки используется полный ансамбль входных отсчетов. В приемнике с программным МКК число «виртуальных» каналов является переменным и зависит от условий приема сигналов.

Эффективность предложенного метода иллюстрируется рисунком 4, на котором представлена зависимость среднего числа «виртуальных» каналов МКК от значения порога q_0 и числа «базовых» каналов корреляции N , полученная на основании результатов моделирования условий приема сигналов СРНС для низкоорбитального потребителя (МКС).

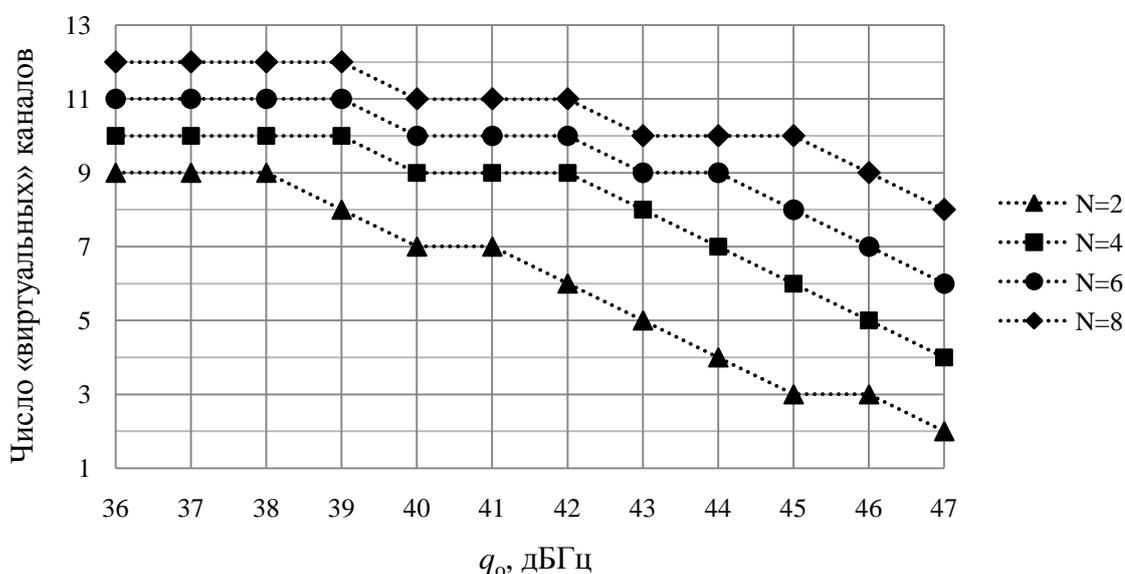


Рисунок 4 – Среднее число «виртуальных» каналов для низкоорбитального потребителя

Как видно на графике, максимальная эффективность метода достигается при минимальном значении q_0 . С увеличением порога эффективность метода снижается и при $q_0 \geq 47$ дБГц число «виртуальных» каналов совпадает с числом «базовых» каналов. Выбор значения q_0 определяется допустимой погрешностью определения вектора состояния потребителя.

Схема канала программного коррелятора, использующего адаптивную обработку сигнала, изображена на рисунке 5. Приведены детали реализации генераторов кода и несущей частоты. Получены оценки размера памяти, необходимой для хранения отсчетов псевдослучайной последовательности (ПСП) и энергетических потерь, связанных с табличной реализацией генератора кода:

$$\eta_1(N) = -20 \lg \left(1 - (1 + \rho) \frac{f_c}{N f_s} \right),$$

где N – число уровней квантования фазы ПСП, f_s – частота дискретизации, f_c – тактовая частота кода, ρ – значение бокового максимума модуля нормированной автокорреляционной функции (АКФ) ПСП;

$$\eta_2(f, T) = -20 \lg \left(1 - \frac{(T+1)}{2} \left(1 - \frac{1}{1+f/f_{L1}} \right) \right),$$

где f_{L1} – номинальное значение несущей частоты, f – доплеровское смещение частоты, T – длительность интервала корреляции, выраженная в периодах опорной ПСП.

Показано, что в условиях максимальной динамики потребителя суммарные потери, обусловленные квантованием фазы ПСП (η_1) и использованием нулевого доплеровского смещения частоты при формировании таблицы опорной ПСП (η_2), не превышают 0,3 дБ.

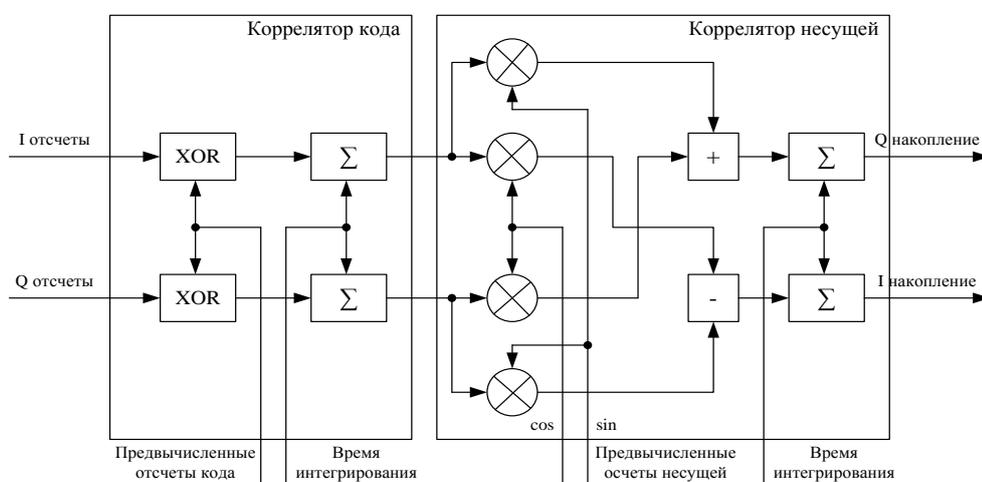


Рисунок 5 – Схема канала программного МКК с переменным временем интегрирования

С целью снижения требований к производительности ЦП при компенсации доплеровского смещения частоты использована пакетная обработка отсчетов демодулированного сигнала. Получена зависимость энергетических потерь при пакетной обработке от доплеровского смещения частоты и длительности пакета:

$$\eta_3(f, N_2) = -20 \lg \left(\frac{1}{N_2} \left| \frac{\sin(\pi f N_2 T_s)}{\sin(\pi f T_s)} \right| \right),$$

где T_s – период дискретизации, f – доплеровское смещение частоты, N_2 – длительность пакета в отсчетах. Показано, что при максимальном доплеровском смещении частоты потери, связанные

с пакетной обработкой (η_3), не превосходят 1,2 дБ. Таким образом, суммарные потери описанной реализации МКК в наихудшем случае составят 1,5 дБ.

Проведен анализ характеристик квадратурных отсчетов на выходе МКК. Показано, что кроме ожидаемых энергетических потерь, вызванных уменьшением длительности интервала корреляции, при адаптивной обработке происходит ухудшение автокорреляционных свойств квадратурных накоплений. Получена зависимость отношения локального максимума АКФ дальномерного кода к глобальному от длительности интервала корреляции. Предложен метод, позволяющий в режиме когерентного слежения за фазой несущей частоты восстановить свойства квадратурных накоплений. Идея метода состоит в усреднении результатов свертки на интервале нескольких последовательных периодов ПСП в соответствии с определенным правилом:

$$\bar{R} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M R_m, R_m \approx \rho_{\tau_m}(\Delta\tau) e^{i(\pi\Delta f T + \Delta\varphi)} \text{sinc}(\Delta f T), \rho_{\tau_m}(\Delta\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N c(nT_s - \tau_m) c(nT_s - \tilde{\tau}_m),$$

где $\Delta\tau$, $\Delta\varphi$, Δf – погрешности оценок параметров сигнала системами слежения за задержкой (ССЗ) и фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которые можно считать неизменными на интервале усреднения, τ_m и $\tilde{\tau}_m$ – фаза ПСП и ее оценка на начало m -го интервала корреляции, $T = NT_s$ – длительность интервала корреляции. При $\tau_m = \tau_{m-1} - T$ получаем:

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \rho_{\tau_m}(\Delta\tau) = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{MN-1} c(kT_s - \tau_0) c(kT_s - \tilde{\tau}_0),$$

т.е. среднее значение суммы M корреляций на интервале T совпадает с корреляцией входной и опорной ПСП на интервале MT . Следовательно, соотношение глобального и локального максимумов среднего значения суммы АКФ для укороченной ПСП такое же, как у АКФ для ПСП в M раз длиннее.

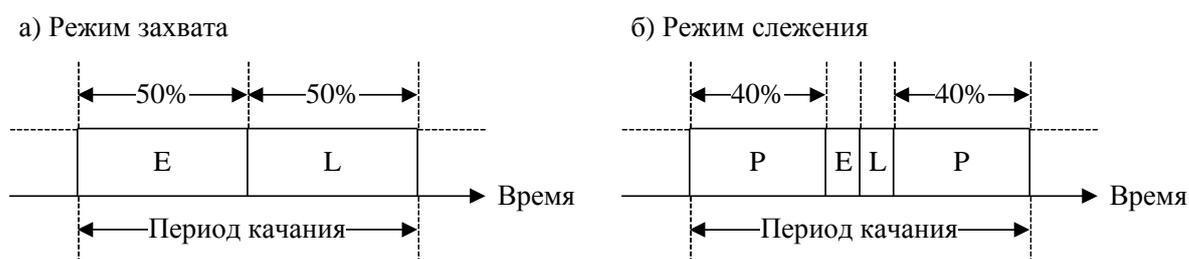
В четвертом разделе «Реализация основных алгоритмов первичной обработки сигналов спутниковых навигационных систем» исследованы особенности проектирования алгоритмов поиска, слежения за параметрами сигнала и демодуляции информационных символов в БАСН с программным МКК.

Проанализированы основные схемы поиска сигналов СРНС, используемые в приемниках спутниковой навигации. Показано, что использование в БАСН только последовательной схемы поиска сигналов в условиях полной априорной неопределенности приводит к недопустимому увеличению времени поиска из-за большого диапазона изменения доплеровской частоты. С другой стороны, при использовании параллельной схемы поиска возникают трудности в организации работы канала МКК одновременно в режимах быстрого преобразования Фурье (БПФ) и временной свертки. Так как параллельный поиск осуществляется в нереальном времени, то из-за высокой взаимной динамики потребителя и НКА за время работы БПФ

результаты поиска устаревают. Поэтому слежение за сигналом на основе временной свертки сразу после обнаружения невозможно и требуется уточнение оценок параметров найденного сигнала.

В БАСН с программным МКК предлагается использовать комбинированный подход, который заключается в том, что вместо одного типа поиска используется несколько, при этом наиболее эффективная схема поиска выбирается автоматически на основании априорной информации о доплеровском смещении частоты. Для обеспечения требований обнаружения сигнала в широком диапазоне по частоте и при пониженном уровне мощности полезного сигнала предложены четыре типа поиска: параллельный поиск по частоте с использованием 256-точечного БПФ; допоиск после БПФ; последовательный поиск в стандартном и узком диапазонах изменения частоты. Во всех схемах поиска обнаружение сигнала осуществляется с использованием процедуры усеченного последовательного анализа. Для расчета параметров обнаружителя получены аналитические соотношения. Даны характеристики используемых схем поиска.

Для обеспечения параллельной работы систем слежения за задержкой огибающей и фазой несущей частоты в приемниках СРНС традиционно используются результаты одновременной свертки входного сигнала с опережающей, синхронной и задержанной копиями опорной ПСП. Возможно использование копии разностного опорного кода. В любом случае для слежения за параметрами сигнала одного НКА необходимо, по крайней мере, два канала корреляции. В целях экономии ресурсов ЦП в приемнике с программным МКК предлагается использовать один канал корреляции с временным разделением вычислений свертки с разными копиями ПСП. Диаграмма работы канала МКК при таком подходе приведена на рисунке 6. Для



Е/Р/Л – свертка сигнала с опережающей/синхронной/задержанной копией ПСП

Рисунок 6 – Временная диаграмма работы канала МКК

реализации этой диаграммы использована одноканальная некогерентная схема ССЗ с качанием задержки. В режиме захвата для оценки задержки огибающей и ее производной используется полный набор квадратурных накоплений на периоде качания. В режиме слежения – только 10% квадратурных накоплений. Благодаря комплексированию ССЗ и ФАПЧ увеличение случайной погрешности оценки задержки, обусловленное использованием одноканальной схемы и

уменьшением числа накоплений при вычислении сигнала ошибки в режиме слежения, может быть компенсировано сужением шумовой полосы фильтра петли ССЗ без ухудшения ее динамических характеристик. Таким образом, ценой за двукратное сокращение вычислительных затрат является снижение на 0,46 дБ отношения сигнал/шум на входе ФАПЧ. Приведено обоснование выбора параметров ССЗ и ФАПЧ.

Отмечено, что характеристики систем слежения определяются двумя факторами – увеличением случайной погрешности оценок задержки и фазы несущей частоты из-за уменьшения интервала корреляции и снижением помехоустойчивости из-за ухудшения автокорреляционных свойств квадратурных накоплений на выходе МКК. Первый фактор является платой за увеличение числа «виртуальных» каналов МКК. Путем выбора значения q_0 , можно достичь разумного компромисса между допустимой погрешностью оценок и числом «виртуальных» каналов. Для сигналов с кодовым разделением снижение помехоустойчивости проявляется в искажении оценок задержки и фазы несущей частоты из-за присутствия во входной смеси сигналов нескольких НКА. Для суммы сигналов двух НКА в наихудшем случае, когда доплеровские частоты НКА совпадают, результат свертки определяется выражением:

$$R = U_k \rho_{kk}(\tau) + \xi U_j \rho_{kj}(\tau - \tau_0),$$

где U_k , U_j – амплитуды сигналов k -го и j -го НКА; $\xi = \pm 1$; $\rho_{kk}(\tau)$ и $\rho_{kj}(\tau)$ – авто- и взаимнокорреляционные функции ПСП; τ_0 – положение максимума $\rho_{kj}(\tau)$. В окрестности τ_0 справедлива аппроксимация: $\rho_{kj}(\tau) \approx A(1 - |\tau - \tau_0|)$, где $A = \rho_{kj}(\tau_0)$. С уменьшением интервала корреляции величина A увеличивается, что приводит к искажению результатов свертки и, как следствие, к изменению случайной и появлению систематической погрешности оценок задержки и фазы несущей частоты. Первый эффект связан с изменением крутизны дискриминационной характеристики (ДХ), а второй – с ее смещением. Для ССЗ и ФАПЧ получены аналитические зависимости параметров ДХ от длительности интервала корреляции и соотношения уровней полезного сигнала и помехи. Показано, что ФАПЧ остается устойчивой во всем диапазоне отношений сигнал/шум, характерных для космического потребителя, даже в наихудших условиях. Даны рекомендации по выбору длительности интервала корреляции и использованию измерений задержки в наихудшем случае.

Заключение

1. Разработан программный комплекс для моделирования условий приема сигналов GPS/ГЛОНАСС в БАСН, с помощью которого выявлены особенности приема сигналов космическим потребителем и определены основные параметры алгоритмов первичной обработки.

2. На основе анализа существующих подходов к проектированию приемников спутниковых навигационных систем предложена архитектура БАСН с динамически изменяемым числом каналов МКК на базе вычислительной платформы, удовлетворяющей требованиям к аппаратуре космического базирования. Приведены примеры реализации основных функциональных блоков БАСН.
3. Предложен метод адаптивной обработки сигнала в МКК, позволяющий существенно снизить требования к производительности ЦП по сравнению с известными схемами программной реализации коррелятора. Показана эффективность предложенного метода.
4. Предложен метод комбинированного поиска сигналов СРНС в навигационном приемнике космического базирования, включающий в себя несколько типов поиска. При этом наиболее эффективная схема поиска выбирается автоматически на основании априорной информации о доплеровском смещении частоты. Приведена методика расчета параметров поиска.
5. Предложен метод с временным разделением систем слежения за задержкой огибающей и фазой несущей частоты, позволяющий уменьшить вычислительные затраты по сравнению с традиционным подходом. Обоснован выбор параметров петель слежения.
6. Исследовано влияние внутрисистемных помех на характеристики систем слежения за задержкой огибающей и параметрами несущей частоты, а также алгоритма выделения информационных символов при использовании неполного ансамбля входных отсчетов для вычисления квадратурных составляющих свертки. Получены аналитические зависимости погрешностей оценок задержки огибающей и фазы несущей частоты от параметров помехи в наихудшем случае, когда доплеровские смещения частоты сигнала и помехи совпадают.

Таким образом, в диссертации представлено обоснованное решение важной научно-технической задачи проектирования архитектуры приемника сигналов GPS/ГЛОНАСС для навигации космических аппаратов и разработки методов первичной обработки сигналов, снижающих уровень требований к производительности вычислительной платформы.

Цитируемая литература:

1. Радионавигационный план Российской Федерации [Электронный ресурс] / Сетевое издание Российский навигационный сервер ОАО НТЦ «Интернавигация». – Режим доступа: <http://www.internavigation.ru/documents/RNP2011.doc>.
2. Montenbruck, O. GNSS Receivers for Space Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.iapg.bv.tum.de/mediadb/14973/14974/04_ACES_WS_08_SGNSS.pdf.
3. Осипенко, П. Н. Микропроцессоры для космических применений / П. Н. Осипенко // Электронные компоненты. – 2010. – №1. – с. 66-69.
4. Сайт компании EADS Astrium [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://www.astrium.eads.net/en/equipment/mosaicgnss-receiver.html>.

5. TerraSAR-X Precise Trajectory Estimation and Quality Assessment / Y. Yoon [et al] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – № 6. – pp. 1859-1868.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных трудах.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Михайлов, Н.В. Опыт использования метода «SoftFlex» в аппаратуре потребителей спутниковой навигации / Н.В. Михайлов, В.В. Чистяков // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 4. – с. 105-114.
2. Михайлов, Н.В. Методы поиска сигналов спутниковых навигационных систем в приемниках космического базирования. Часть 1. Комбинированный поиск / Н.В. Михайлов, В.В. Чистяков // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 4 (83). – с. 60-71.
3. Михайлов, Н.В. Методы поиска сигналов спутниковых навигационных систем в приемниках космического базирования. Часть 2. Расчет параметров комбинированного поиска / Н.В. Михайлов, В.В. Чистяков // Гироскопия и навигация. – 2014. – № 1 (84). – с. 70-80.
4. Михайлов, Н.В. Метод слежения за задержкой сигнала в бортовой аппаратуре спутниковой навигации с программным коррелятором / Н.В. Михайлов, В.В. Чистяков // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2013. – № 5. – с. 60-66.
5. Mikhailov, N.V. The SoftFlex Approach in the User Equipment for Satellite Navigation: Examples of Application / N.V. Mikhailov, V.V. Chistyakov // Gyroscopy and navigation. – 2013. – № 1. – pp. 50-56.
6. Mikhailov, N.V. Signal Search Methods for Space-Based GNSS Receivers. Part 1. Combined Search / N.V. Mikhailov, V.V. Chistyakov // Gyroscopy and navigation. – 2014. – № 2. – pp. 83-89.
7. Mikhailov, N.V. Signal Search Methods for Space-Based GNSS Receivers. Part 2. Computation of the Combined Search Parameters / N.V. Mikhailov, V.V. Chistyakov // Gyroscopy and navigation, в печати.

Другие статьи и материалы конференций:

8. Botchkovski, A., Chistyakov, V., Golubev, M., Mikhailov, N., Pospelov, S., Vasilyev, M., Krauss, P.A., Fichter, W., Mittnacht, M., Gottzein, E. SoftFlex: An Advanced Approach to Design of GNSS Receiver with Software Correlator // In Proceedings of ION GPS-99. – Nashville, Tennessee, 1999. – с. 353-362.
9. Krauss, P.A., Fichter, W., Mittnacht, M., Bruder M., Chistyakov, V. Development of the MosaicGNSS, a spaceborne GPS/GNSS Receiver to be used in LEO, GEO and GTO // In

Proceedings of the Conference on Data Systems in Aerospace (DASIA 2000). – Montreal, Canada, 22-26 May 2000.

10. Krauss, P.A., Berberich, S., Mittnacht, M., Bruder M., Botchkovsky, A., Chistyakov, V., Golubev M. Correlation in Software in Comparison to Correlation in Hardware // International Workshop on Aerospace Applications of the Global Positioning System. – Breckenridge, Colorado, January 2000.
11. Михайлов, Н.В. Опыт использования метода «SoftFlex» в аппаратуре потребителей спутниковой навигации / Н.В. Михайлов, В.В. Чистяков // Материалы XIX Санкт-Петербургской межд. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»». – 2012. – с. 324-330.

Монографии:

12. Михайлов, Н.В. Приемники спутниковой навигации космического базирования : архитектура и первичная обработка сигналов / Н.В. Михайлов, В.В. Чистяков. – Воронеж : изд-во «Научная книга», 2014. – 124 с.

Патент:

13. Бочковский, А.Л., Васильев, М.В., Голубев, М.А., Михайлов, Н.В., Поспелов, С.С., Чистяков, В.В. Пат. 2140090 Российская Федерация, МПК 6G01S1PФ G01S1/30, G01S5/12 Цифровой приемник спутниковой радионавигационной системы / заявитель и патентообладатель ООО «Софт Нав». – № 99104407/09 ; заявл. 12.03.99 ; опубл. 20.10.99. – 14 с. : 5 ил.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

14. Комплекс встроенного программного обеспечения для навигационного приемника GPS на основе программного коррелятора: свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ 990066 Российская Федерация / ООО «Софт Нав» – № 980694 ; опубл. 15.02.99.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве

Личный вклад автора состоит в том, что в работах [1, 5, 8, 11, 13] проанализированы и обобщены исходные данные по архитектуре приемников с программным коррелятором и сформулирована идея метода адаптивной обработки сигналов; в работах [2, 3, 6, 7] предложена идея комбинированного метода поиска сигналов и получены аналитические соотношения для расчета параметров поиска; в работе [4] предложен метод слежения за параметрами сигнала и обоснован выбор параметров петель слежения; в работе [9] изложено содержание работы виде научной публикации; в работе [10] выполнены экспериментальные исследования загрузки ЦП; в работе [14] реализовано программное обеспечение многоканального коррелятора. Работа [12]

представляет собой систематизированное изложение предыдущих работ автора, кроме того, в работе [12] автором лично получены оценки энергетических потерь при реализации программного коррелятора и выполнен анализ характеристик квадратурных отсчетов на выходе коррелятора, получены аналитические соотношения для оценок задержки и фазы несущей частоты и вероятности ошибки приема символов при адаптивной обработке сигнала, а также разработан программный комплекс для исследования особенностей приема сигналов спутниковых навигационных систем в космосе.