

МЕТОДЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ ПРИЕМНИКАХ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Приведены результаты анализа особенностей космического базирования, влияющих на проектирование алгоритмов поиска и сопровождения сигнала. Описан алгоритм поиска сигналов, относящийся к классу усеченных последовательных алгоритмов. Проведен синтез алгоритмов сопровождения сигнала, даны примеры расчета следящих цепей для БАСН и рекомендации по выбору параметров цепей слежения для обеспечения работы на пониженных отношениях сигнал/шум. Формулируются основные задачи, стоящие перед проектировщиками методов первичной обработки сигналов в БАСН.

Введение

Аппаратура пользователя, использующая американскую спутниковую радионавигационную систему (СРНС) GPS и российскую ГЛОНАСС, применяется в настоящее время для навигации наземных, воздушных и морских объектов. Создание бортовой аппаратуры спутниковой навигации (БАСН) является сложной научно-технической задачей, поскольку СРНС не предназначены для использования на борту искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Теория оптимальной фильтрации позволяет решить навигационную задачу в общем виде. Однако получающиеся при этом алгоритмы фильтрации достаточно сложны и в настоящее время не реализуются. Для упрощения аппаратуры потребителя задачу получения оценок вектора потребителя разбивают на два этапа обработки – первичную и вторичную. На этапе первичной обработки решается задача фильтрации радионавигационных параметров сигнала, а на этапе вторичной обработки вычисляются оценки вектора потребителя с использованием полученных на первом этапе оценок радионавигационных параметров. Поскольку успешное решение задачи фильтрации параметров сигнала возможно лишь в случае, когда начальная ошибка между истинным значением фильтруемого параметра и его оценкой достаточно мала, то на практике различают два режима работы: поиск сигнала и его сопровождение, называемое также слежением за сигналом.

В статье проводится синтез архитектуры программного обеспечения и синтез методов первичной обработки, пригодных для использования в БАСН. Также рассмотрены алгоритмы сопровождения сигнала с примерами расчета следящих цепей для БАСН, даются рекомендации по выбору параметров цепей слежения для обеспечения работы

Михайлов Николай Викторович (1967). Кандидат физико-математических наук, глава Представительства компании «Мстар Семикондактор» (С.-Петербург).

Михайлов Виктор Федорович (1938). Доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Статья по докладу на XVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

на пониженных отношениях сигнал/шум^{*}. Заключительная часть статьи посвящена реализации методов первичной обработки сигналов на низкопроизводительных центральных процессорных устройствах (ЦПУ).

Анализ особенностей космического базирования

Задача проектирования методов первичной обработки сигналов для аппаратуры спутниковой навигации наземного базирования не является новой, она была предметом интенсивных исследований в последние десятилетия и широко освещена как в отечественной, так и в зарубежной литературе [1-4]. До настоящего времени не было показано, что методы первичной обработки, применяемые в наземной аппаратуре, могут быть использованы в БАСН без изменения. Более того, очевидно, что особенности космического базирования (космические скорости движения потребителя; ограниченная радиовидимость и многие др.) изменяют условия задачи проектирования, внося дополнительные требования на обработку сигналов.

В статье проведен анализ особенностей космического базирования, цель которого – получение требований к методам первичной обработки сигналов. Разработан программный комплекс для моделирования движения НС и спутников потребителей для получения зависимостей отношения сигнал/шум на входе приемника, доплеровского сдвига несущей частоты сигнала и его первой производной от времени. Моделирование проводилось для всех типов орбит ИСЗ – низкоорбитальных (низкоорбитальных космических аппаратов (НКА)), геостационарных (ГКА) и высокоэллиптических (ВКА). Типы орбит, использовавшихся для моделирования, схематично изображены на рис. 1, а параметры орбит – в табл. 1.

На рис. 1 серым цветом выделена часть основного лепестка диаграммы направленности излучающей антенны, не затененная Землей.

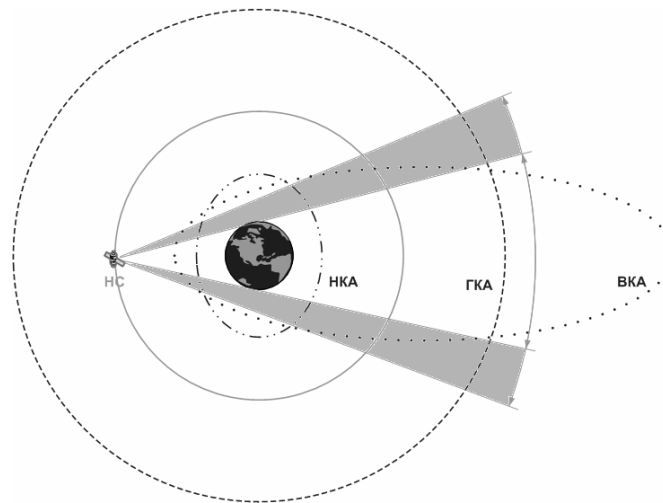


Рис. 1. Взаимное геометрическое расположение НС и НКА, ВКА, ГКА

^{*} Далее вместо отношения сигнал/шум используется мощность сигнала к спектральной плотности шума C/N_0 .

Таблица 1

Параметры моделируемых орбит

Параметр	НКА	ГКА	ВКА
Описание	МКС	Ямал «102»	
Период, ч	1,5	24	10,5
Высота перигея, км	365	35777	349
Высота апогея, км	385	35797	57402
Эксцентриситет	0,0015	0,000242	0,53846
Склонение, °	51,33	0,25	28,5
Ориентация ИСЗ	к Земле	к Земле	к Земле
Конфигурация антенн	в зенит	в надир	в надир

Примечание: зенит – точка пересечения небесной сферы с отвесной линией над наблюдателем; надир – точка небесной сферы, в которой ее пересекает нижняя часть отвесной линии.

Диаграмма направленности излучающей антенны НС, использованная при моделировании, приведена на рис. 2.

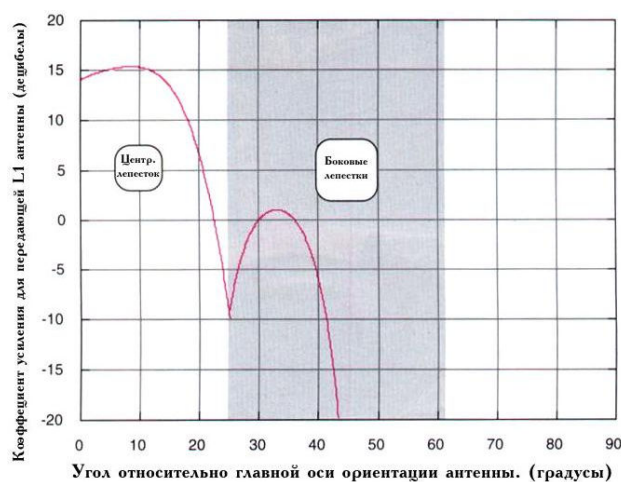


Рис. 2. Диаграмма направленности излучающей антенны НС

Одним из основных и наиболее очевидных различий между космическими и наземными объектами являются динамические характеристики потребителя. Наземные потребители являются по сравнению с ИСЗ низкодинамичными объектами, а скорости ИСЗ сравнимы со скоростями НС. Взаимная динамика потребителя и НС важна при проектировании БАСН, поскольку величина доплеровского смещения частоты прямо пропорциональна радиальной скорости сближения потребителя и НС.

Значение доплеровского эффекта влияет на методы первичной обработки сигналов в навигационных приемниках, определяя диапазон поиска сигнала и параметры следящих петель. Зависимость радиальной компоненты взаимной скорости ИСЗ и НС от параметров орбиты ИСЗ была получена аналитически и подтверждена моделированием. Значения частоты Доплера и ее производной для трех видов моделируемых орбит приведены в табл. 2.

Таблица 2

Доплеровское смещение и его производная для моделируемых орбит

Параметр	НКА	ГКА	ВКА
Частота Доплера, кГц	- 55 ... 55	- 6 ... 6	- 60 ... 60
Производная частоты Доплера, кГц/с	-80 ... 0	- 2 ... 2	-90 ... 10

Отметим, что для наземного пользователя значения частоты Доплера не превышают нескольких кГц, в то время как в БАСН они достигают ± 60 кГц. Кроме того, моделирование выявило несколько особенностей поведения частоты Доплера и ее производной для приемников космического базирования:

для НКА диапазон изменения и скорость изменения частоты Доплера значительно превышают соответствующие характеристики для наземного потребителя; скорость изменения частоты Доплера всегда отрицательна – потребитель, расположенный на НКА, всегда «догоняет» и «обгоняет» НС;

для ГКА диапазон изменения частоты Доплера немного выше, чем для наземного потребителя, что объясняется видимостью в боковом лепестке диаграммы направленности НС;

для ВКА диапазон изменения и скорость изменения частоты Доплера сравнимы с НКА, так как в перигее высота орбиты ВКА близка к высоте орбиты НКА; ВКА высота орбиты в апогее близка к высоте орбиты на ГКА, и зависимости частоты Доплера и ее производной похожи на зависимости для ГКА.

Вторым принципиальным отличием космического базирования является иная по сравнению с наземным пользователем трасса распространения сигнала от НС до потребителя. Во-первых, на характеристики принимаемого на ИСЗ сигнала иное влияние оказывает атмосфера, и, во-вторых, характер изменения расстояния от НС до потребителя существенно отличается по сравнению с наземным базированием. Оба этих фактора оказывают влияние на C/N_0 на входе приемника. Значения C/N_0 для трех моделируемых орбит приведены ниже, откуда видно, что по сравнению с наземным пользователем существенно меняются значения C/N_0 и диапазон его изменения.

Параметр	НКА	ГКА	ВКА
C/N_0 , дБГц	44 ... 48	28 ... 38	28 ... 55

Отметим также несколько особенностей поведения C/N_0 :

- для ГКА максимальное значение C/N_0 наблюдается тогда, когда спутник выходит из затемнения Землей и длительность его не превышает 90 мин, так как спутник быстро выходит из главного лепестка диаграммы направленности НС;
- для ГКА в боковом лепестке диаграммы направленности НС спутник становится виден при отношении сигнал/шум меньше 28 дБГц и время видимости в нем не превышает 6 ч;
- для ГКА диапазон C/N_0 резко увеличивается, причем нижний порог определяется чувствительностью приемника;
- ВКА отличается еще большим диапазоном отношения сигнал/шум, чем у ГКА; нижний порог также определяется чувствительностью приемника.

Обобщены результаты анализа требований к БАСН в виде основных задач, стоящих перед разработчиками:

- разработка методов поиска сигналов, обеспечивающих работу на пониженных отношениях сигнал/шум и способных осуществлять поиск в большом диапазоне частот;
- разработка методов слежения за сигналами, способными работать на пониженных отношениях сигнал/шум;
- разработка методов и алгоритмов обработки сигналов, не предъявляющих высоких требований к производительности ЦПУ.

Последняя задача не следует из результатов анализа и требует пояснения. В БАСН используется радиационно-стойкая элементная база, выбор которой ограничен. В частности, одним из магистральных направлений разработки БАСН является использования корреляторов с программной реализацией [5]. Такой подход позволяет избежать использования дорогостоящей и рискованной разработки аппаратного коррелятора. В то же время программная реализация требует значительных ресурсов ЦПУ, оставляя незначительные вычислительные мощности для решения других задач, в частности задач первичной обработки.

Следующие разделы статьи посвящены разработке методов решения этих задач.

Методы поиска сигналов в БАСН

Задачу поиска сигналов удобно рассматривать как оценивание двух его параметров – задержка сигнала и частота несущей. Поскольку задержка сигнала пропорциональна фазе кода псевдослучайной последовательности (ПСП), будем говорить об оценивании фазы кода, а не задержки. Известно [1], что условная плотность вероятности является монотонной функцией достаточной статистики, представляющей собой сумму квадратов синфазной и квадратурной составляющих. Решение задачи сводится к перебору всех возможных значений фазы кода и частоты, вычислению достаточной статистики и сравнению статистики с порогом для принятия решения об обнаружении сигнала.

На практике область возможных значений дискретизируется, т.е. разбивается на ячейки, как показано на рис. 3. Обнаружитель, вычисляющий достаточную статистику, последовательно анализирует ячейки, принимая решение о наличии или отсутствии сигнала путем сравнения с порогом. При принятии решения об отсутствии сигнала осуществляется переход к следующей ячейке поиска, а при принятии решения о наличии сигнала параметры сигнала передаются в схему слежения.

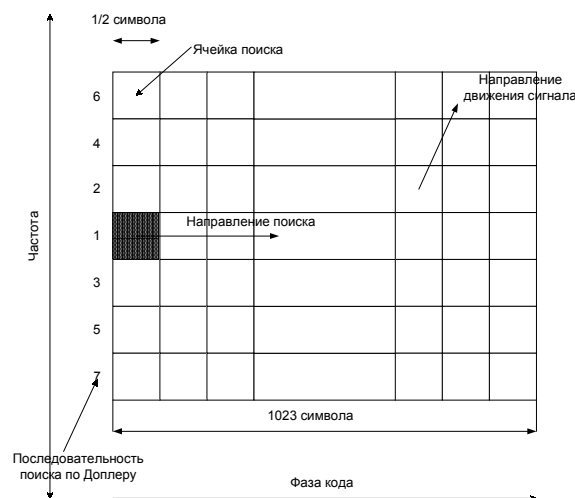


Рис. 3. Схема поиска сигнала

Был разработан и внедрен в BACH MOSAIC GNSS алгоритм поиска сигналов, относящийся к классу последовательных, т.е. основанных на критерии Вальда. Классические алгоритмы последовательного обнаружения используют накопление статистики и двух-пороговую схему – статистика кумулятивно накапливается до тех пор, пока она не становится или меньше нижнего порога (в этом случае принимается решение об отсутствии сигнала), или больше верхнего порога (принимается решение о наличии сигнала). Очевидным недостатком такого подхода является возможное неограниченное время поиска: если статистика находится между верхним и нижним порогами, то процедура поиска может теоретически длиться бесконечно. Предлагаемый алгоритм лишен этого недостатка за счет установления предельного времени поиска.

Предлагается использовать усеченную модификацию классического алгоритма Вальда, заключающуюся в том, что в процессе кумулятивного накопления статистика P сравнивается с переменным порогом (рис. 4). Значение порога ρ увеличивается с увеличением времени накопления таким образом, что его значение возрастает быстрее, чем статистика чистого шума, но медленнее, чем возрастает статистика сигнала. Решение об отсутствии сигнала принимается тогда, когда наблюдаемая статистика оказывается ниже порога. Решение о наличии сигнала принимается в случае, если решение об отсут-

вии сигнала не было принято за заданное количество итераций N . Именно из-за наличия N предложенная модификация называется усеченной, в противном случае процедура поиска могла бы длиться бесконечно.

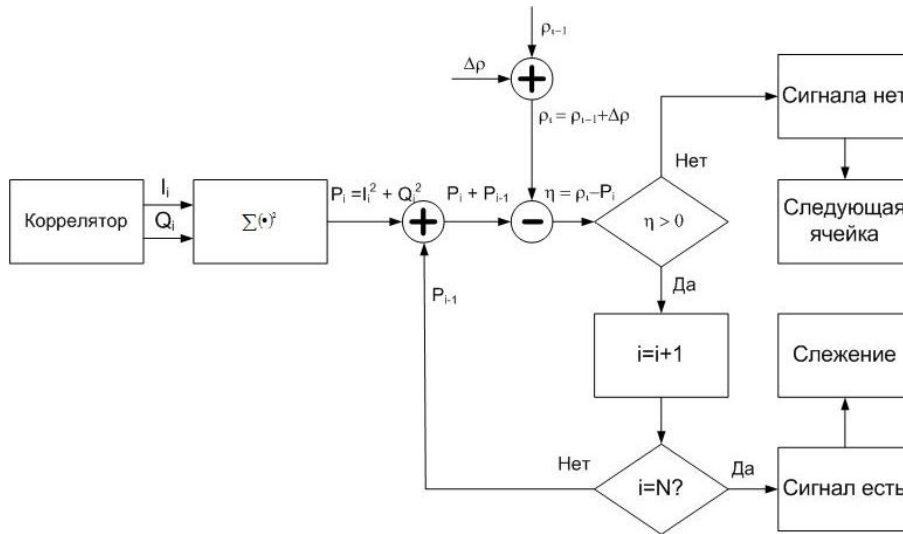


Рис. 4. Алгоритм поиска сигнала

Для предложенного алгоритма необходимо выбрать четыре параметра (см. рис. 4). Это ρ_0 – начальное значение порога; $\Delta\rho$ – инкремент увеличения порога на каждом шаге алгоритма; T – время когерентного накопления; N – итерация, после которой принимается решение о прекращении процедуры поиска. Критериями выбора параметров являются классические характеристики обнаружителя – статистические, т.е. вероятность ложной тревоги P_{FA} и вероятность пропуска сигнала P_{MS} и временные, т.е. среднее время принятия решения об отсутствии сигнала при его фактическом отсутствии, называемое также временем отвержения гипотезы T_R . На практике значения этих критериев меняются от ситуации к ситуации и критерии, приемлемые в одном случае приводят к неработоспособному обнаружителю в другом случае. Например, временные характеристики обнаружителя важны для НКА, на котором значения параметров сигнала меняются быстро, а для ГКА, на котором мощность сигнала мала, на первый план выходит минимальная вероятность пропуска сигнала. Поэтому приходится комбинировать эмпирические способы поиска сигналов в зависимости от текущей ситуации на борту ИСЗ. Авторами были разработаны и применены на практике четыре способа поиска – стандартный, на основе БПФ, допоиск и сверхчувствительный. Выбор способа поиска осуществляется автоматически на основании анализа неопределенности целеуказания по частоте. Эта неопределенность представляет собой область возможных значений частоты, т.е. диапазон поиска по частоте. Например, в условиях «холодного старта» неопределенность целеуказания по частоте составляет, как было показано выше, 130 кГц, а при наличии дополнительной информации о местоположении пользователя и видимом созвездии НКА эта неопределенность может уменьшаться до единиц килогерц.

Поскольку аналитические зависимости характеристик алгоритма от его параметров получить не удалось, то выбор параметров алгоритма осуществлялся для каждого из способов поиска при помощи моделирования методом Монте-Карло. В процессе моделирования были получены зависимости статистических и временных характеристик алгоритма от его параметров. В качестве примера мы остановимся подробно на выборе параметров алгоритма для стандартного способа поиска.

Стандартный поиск используется при неопределенности целеуказания по частоте до

5 кГц и представляет собой процедуру двухмерного перебора в области размером 2046 кодовых ячеек на 7 частотных по 750 Гц, т.е. 14322 ячейки поиска. На рис. 5–7 для стандартного поиска приведены зависимости характеристик алгоритма от инкремента увеличения порога на каждом шаге алгоритма $\Delta\rho$ при разных величинах начального значения порога ρ_0 для C/N_0 33 дБГц. При моделировании предполагалось, что средняя мощность шума в процессе поиска нормализована. Нормализации шума можно добиться на практике путем соответствующего выбора значений коэффициентов усиления АРУ, уровней квантования сигнала и т.п. Допуская одну ложную тревогу на всю область поиска, получаем уровень ложных тревог в одной ячейке поиска $1/14322 \approx 7 \cdot 10^{-5}$. Из рис. 6 получим для $\rho_0 = 0,0$ и $\Delta\rho = 2,0$ среднее время отвержения гипотезы около 3 мс, в то время как время принятия решения о наличии сигнала составляет 32 мс.

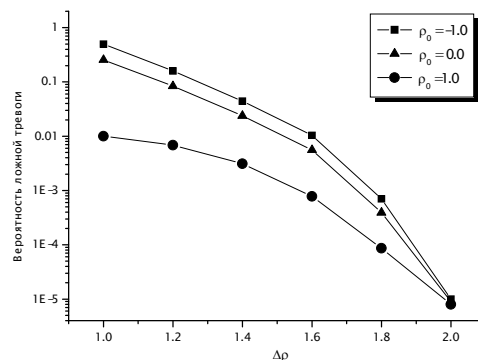


Рис. 5. Вероятность ложной тревоги для $N=32$ и $T=1$ мс

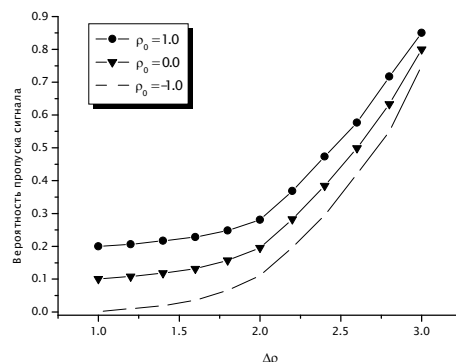


Рис. 6. Вероятность пропуска сигнала для $N=32$ и $T=1$ мс

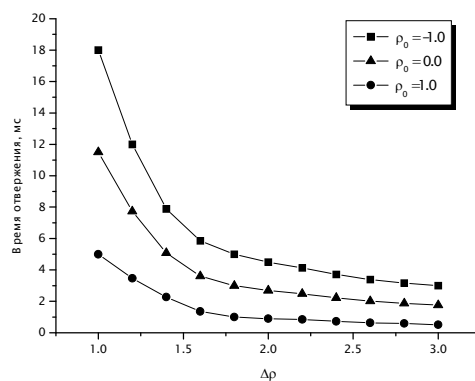


Рис. 7. Среднее время отвержения для $N=32$ и $T=1$ мс

Перед тем как перейти к описанию поиска на основе БПФ, оценим максимальную область неопределенности, в которой осуществляется поиск (см. рис. 3). Размер ячейки по кодовому направлению представляет собой обычно половину длительности символа кода, а по частотному направлению ее обычно выбирают до нескольких сотен герц. Принимая размер ячейки поиска по частоте 500 Гц, получим для диапазона поиска по частоте 130 кГц количество ячеек поиска равным 260. Количество ячеек поиска по задержке составляет 2046, а общее количество ячеек поиска – 531960. Таким образом, при последовательном поиске в худшем случае необходимо проверить количество гипотез, превышающее 500000. Время на отвержение одной гипотезы для низкопроизводительного ЦПУ космического базирования было посчитано аналитически на основании количества необходимых операций, потом подтверждено экспериментально и составляло около 3 мс. Таким образом, в худшем случае максимальное время поиска одного сигнала в одном канале составит около 30 мин. Это неприемлемо, поскольку время поиска должно быть значительно меньше, чем скорость смены созвездия видимых спутников. Для некоторых приемников космического базирования 30 мин значительно превышает время полной смены созвездия, составляя половину периода оборота вокруг Земли. Для решения этой проблемы авторами было предложено для каждой из оценок фазы кода вычислять статистики для всех значений частоты. Эта задача решается при помощи быстрого преобразования Фурье. Все значения статистики для всех частот в диапазоне поиска при фиксированном значении фазы кода получаются в результате БПФ. Принимая во внимание, что время вычисления БПФ для низкопроизводительного ЦПУ космического базирования составляет 2 мс, получаем максимальное время поиска одного сигнала в одном канале при использовании БПФ $2046 \times 3 \times 2$ мс, т.е. около 12 сд.

БПФ-поиск используется в условиях полной априорной неопределенности по частоте, когда диапазон поиска составляет ± 65 кГц. Этот способ поиска позволяет проанализировать за один проход всю область неопределенности по частоте для одного значения фазы кода. Тем самым достигается скорость поиска значительно более высокая, чем при последовательном переборе ячеек в реальном времени. При выборе параметров поиска на основе БПФ необходимо принимать во внимание, что ложная тревога при такой организации поиска вызывает значительные временные затраты и снижает скорость поиска и, следовательно, выбранные параметры должны минимизировать вероятность ложной тревоги. Кроме того, нужно учитывать то, что при использовании БПФ локальная копия кода ПСП остается неподвижной, а в классическом подходе она движется со скоростью равной частоте Доплера. В худшем случае для 65 кГц доплеровского сдвига скорость движения кода ПСП, принятого от НС, относительно локальной копии v составит $v = \lambda \cdot 65000$ Гц, где λ – длина волны несущей. Для сигнала на частоте L1 GPS λ составляет приблизительно 20 см и $v=13$ км/с. Тогда за одну эпоху кода расхождение между фазами опорного и принятого кода составит 13 м. Это означает, что в поиске на основе БПФ значение N не должно превышать 10 – за 10 итераций в худшем случае расхождение между опорным и принятыми кодами составит 130 м, не превысив размеры ячейки поиска по коду, равной 150 м.

Допоиск используется непосредственно после поиска БПФ-поиска. Это время достаточно велико для того, чтобы определенные параметры сигнала, в особенности фаза кода, отличались от истинных настолько, что их сопровождение в цепях слежения было невозможно.

Сверхчувствительный поиск осуществляется при неопределенности целеуказания по частоте до 2,5 кГц и включает в себя два прохода последовательного двухмерного перебора в области размером 2046 кодовых ячеек на 10 частотных по 250 Гц, т.е. 20460 ячеек поиска. Для каждого из проходов длина когерентного накопления T составляет не 1 мс, как для других способов поиска, а 2 мс. Увеличение времени когерентного накопления возможно из-за более низкой по сравнению с другими способами поиска неопределенности по частоте. На первом проходе предполагается, что мощность сигнала не ниже той, на которую рассчитан стандартный поиск (37 дБГц), второй проход способен находить сигналы для $C/N_0 > 30$ дБГц и запускается в том случае, если на первом

проходе сигнал не был найден. Соответственно, значения параметров поиска отличаются для каждого из двух проходов. Для первого прохода важно выбрать параметры поиска таким образом, чтобы минимизировать время отвержения гипотезы и вероятность ложной тревоги, допуская повышенную вероятность пропуска сигнала. Для второго прохода необходимо минимизировать вероятность пропуска сигнала.

В табл. 3 приведены параметры поиска, использовавшиеся на практике, где использованы следующие обозначения: ρ_0 – начальное значение порога; $\Delta\rho$ – инкремент увеличения порога на каждом шаге алгоритма; T – время когерентного накопления; N – итерация, после которой принимается решение о прекращении процедуры поиска; P_{FA} – вероятность ложной тревоги; P_{MS} – вероятность пропуска сигнала; T_R – время отвержения гипотезы.

Т а б л и ц а 3

Параметры поиска

Способ поиска	C/N_0 , дБГц	T , мс	N	ρ_0	$\Delta\rho$	P_{FA}	P_{MS}	T_R , мс
С использованием БПФ	40	1	10	1.0	4.0	$1.3 \cdot 10^{-6}$	0.3	1.5
Стандартный	37	1	32	0.0	2.0	$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.3	3.0
Допоиск	37	1	32	0.0	2.0	$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.3	3.0
Сверхчувствительный (1-й проход)	37	2	32	2.0	4.5	$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.1	3.2
Сверхчувствительный (2-й проход)	30	2	128	-10.0	3.25	$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.3	20

Методы слежения за сигналами в БАСН

В литературе [1–4] подробно описаны методы проектирования следящих систем для спутниковых навигационных систем. Ограничимся очень кратким изложением основных понятий и остановимся на учете особенностей космического базирования.

На практике используют отдельное слежение за задержкой сигнала и его частотой при помощи схемы слежения за задержкой (ССЗ) и схемы частотной автоподстройки (ЧАП). Кроме этих двух схем может также использоваться схема слежения за фазой несущей частоты, называемая также схемой фазовой автоподстройки (ФАПЧ). Каждая из трех схем представляет собой схему автоподстройки с использованием отрицательной обратной связи. В каждой из схем используется управляемый генератор, выходной сигнал которого сравнивается на детекторе с входным, а результат сравнения используется для подстройки управляемого генератора.

При проектировании БАСН MOSAIC GNSS авторы использовали каноническую систему слежения, исходя из следующих соображений. Для уточнения частоты несущей сигнала используется ЧАП. Так как приближенно можно считать, что частота на входе ЧАП изменяется с постоянной скоростью, достаточно использовать схему ЧАП с астатизмом второго порядка. Однако, поскольку реально частота может меняться с небольшим ускорением, необходимо, чтобы рассогласование частот входного сигнала и опорного генератора находилось в полосе захвата схемы ФАПЧ. В качестве цепи слежения за несущей использовались две схемы ФАПЧ с астатизмом второго и третьего порядка (ФАПЧ2 и ФАПЧ3 соответственно). Для ускорения вхождения в синхронизм ФАПЧ2 была реализована с поддержкой по ускорению, значение которого берется из ЧАП, предполагая, что во время работы ФАПЧ2 ускорение можно считать константой. После перехода ФАПЧ2 в установившийся режим включается ФАПЧ3. В качестве ССЗ использовалась схема с кодовым дискриминатором τ -качением [3], следящий фильтр с астатизмом второго порядка и поддержкой по несущей.

Как было показано выше, основной особенностью космического базирования, которую необходимо учитывать при проектировании следящих цепей, является необходимость работы на пониженных отношениях сигнал/шум. Кроме того, при разработке сле-

дует помнить о динамике пользователя, которая влияет на выбор параметров следящих цепей. Для BACH MOSAIC GNSS предполагались динамические значения и нижние пороги работоспособности по отношению сигнал/шум (табл. 4).

Таблица 4

Значения параметров движения пользователя

Параметр	Значение
Ускорение, м/с^2	22
Рывок, м/с^3	0,1
Предельно допустимые пороги работы следящих цепей	
Схема	Нижний порог работоспособности, дБГц
ССЗ	30
ЧАП	34
ФАПЧ	34

Ниже даны практические рекомендации по выбору параметров следящих с учетом особенностей космического базирования.

Схема слежения за задержкой получает поддержку по несущей от ЧАП все время, за исключением нескольких секунд, требуемых для захвата несущей. Поэтому имеет смысл проектировать ССЗ с учетом ее двух режимов работы – захват и слежение. При захвате нет поддержки по несущей, и существенными являются требования на динамику, которую ССЗ должна отслеживать. При слежении, т.е. при наличии поддержки от несущей, на первый план выходят требования к точности слежения. Следует принять во внимание еще два соображения: во-первых, ССЗ второго порядка способна работать в обоих режимах и, во-вторых, полоса пропускания фильтра слежения следует делать регулируемой, а именно уменьшать при переходе в режим слежения. Что касается ФАПЧ, то следует помнить, что программная реализация позволяет совместить цепи ФАПЧ2 и ФАПЧ3 в одной схеме, так как в основном они отличаются только значениями коэффициентов, а ФАПЧ2 является усеченной формой ФАПЧ3 и может использоваться тогда, когда имеется поддержка по ускорению от ЧАП. Фактически, поддержка по ускорению может заменить один из интеграторов в ФАПЧ3. В остальном расчет параметров следящих петель с учетом особенностей динамики пользователя и низкого уровня входного сигнала проводится каноническими методами.

В табл. 5 приведены полосы пропускания фильтров ССЗ, ЧАП и ФАПЧ, использованных в MOSAIC GNSS, а также их расчетные значения погрешностей.

Таблица 5

Параметры ССЗ, ЧАП, ФАПЧ

Параметр	ССЗ	ЧАП	ФАПЧ
Отношение сигнал/шум, дБГц	34	37	37
Ширина полосы фильтра слежения, Гц	1	1	1
Динамическая погрешность слежения	6,1, м	0,75, Hz	0,003 рад
Шумовая погрешность слежения	7,2, м	10, Hz	0,12 рад

**Реализация методов первичной обработки сигналов
на низкопроизводительных ЦПУ**

В последние годы были предложены несколько подходов к повышению вычислительной эффективности методов первичной обработки сигналов. Среди них можно выделить использованный авторами подход с применением таблиц поиска и алгоритм компании Spirit Corp [6, 7, 9].

Таблица поиска, один из самых широко используемых на практике инструментов

повышения эффективности вычислений, это структура данных, используемая с целью заменить вычисления на операцию простого поиска. При системном проектировании, в частности при разработке частотного плана приемника, необходимо учитывать, что в СРНС-приемниках использование таблиц поиска становится особенно эффективным тогда, когда частота взятия отсчетов гетеродинированного сигнала является кратной частоте кода ПСП (1023 для GPS). В этом случае изменением фазы кода на нескольких эпохах кода можно пренебречь и добиться уменьшения загрузки ЦПУ за счет пересчета значений кода в таблице поиска не на каждой эпохе кода, а реже, раз в несколько эпох.

Алгоритм компании Spirit Corp при реализации на 32-разрядном ЦПУ использует параллельную обработку в 16 каналах при использовании предвычисленных отсчетов кода и несущей. Подробное описание алгоритма приведено в работе [8]. Кроме алгоритмических способов уменьшения загрузки ЦПУ, рассмотренных выше, отметим, что загрузка процессора может быть уменьшена за счет рационального выбора архитектуры программного обеспечения. Высокая вычислительная эффективность обработки может быть обеспечена за счет разделения задач реального времени и фоновых задач. В реальном времени должны исполняться только задачи сопровождения сигнала, в то время как поиск может осуществляться в фоновом режиме.

В целом статья представляет собой обобщение практического опыта авторов по созданию БАСН. На основании анализа особенностей космического базирования проведен синтез методов первичной обработки сигналов в радионавигационных приемниках космического базирования. Описанные алгоритмы и методы первичной обработки сигналов в БАСН были внедрены в радионавигационном приемнике MOSAIC GNSS компании Astrium GmbH (ФРГ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Харисов, В. Н. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / В.Н.Харисов [и др.].- М.: ИПРЖР. 1998.
2. Шебшаевич В.С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С.Шебшаевич [и др.].- М.: Радио и связь, 1993.
3. Kaplan E. (Editor) Understanding GPS: Principles and Applications, Artech House Telecommunications Library.- 1996.- p. 198.
4. Hofman-Wellenhof, B. Global Positioning Systems: Theory and Practice, Springer, 1993.
5. Михайлов, Н.В. Автономная навигация космических кораблей с использованием GPS / Н.В.Михайлов, М.В. Васильев, В.Ф. Михайлов // Гирскопия и навигация.- 2008.- № 1.
6. Михайлов, Н.В. Приемники GNSS с программным коррелятором: современные разработки. / Н.В.Михайлов, А.Л.Бочковский, С.С.Поспелов // VII Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2001.
7. Pospelov, S. GNSS Software Receivers / S.Pospelov [и др.]. GPS Solutions, Vol. 4, № 1, p. 48-55.
8. Семенов, С.А. Методы программной реализации приемников спутниковых радионавигационных систем: дис. канд. техн. наук: 05.12.14.- М., 2005 152 с. РГБ ОД, 61:06-5/2467.
9. Fridman, A. Architectures of the Software GPS Receivers / A.Fridman, S.Semenov.- In Proceedings of ION GPS-99. Nashville, Tennessee: The Institute of Navigation.

Abstract. Development of space-borne satellite navigation receivers is a complicated R&D task since Global Satellite Navigation Systems were not designed for the user equipment to be placed on board of satellites. This article provides the analysis results of the peculiarities of space conditions and its influence on the design of the signal processing. The analysis was carried out for three mission types – geostationary GEO, low-earth orbiting (LEO) and high-elliptic orbits (HEO). Based on the analysis, the requirements for the signal processing in space-borne receivers are given. Furthermore, software architecture for space-borne GNSS receivers is suggested, and an original search algorithm is described. The search algorithm belongs to the truncated sequential search algorithms. Several methods of signal search organization are described, each of them satisfies one or more requirements. Approaches for tracking loops design are provided, recommendations for low C/N0 and low throughput CPU are given.