

Н. В. МИХАЙЛОВ, В. В. ЧИСТЯКОВ

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА «SOFTFLEX» В АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Приведены примеры успешного использования метода, позволяющего снизить загрузку центрального процессорного устройства (ЦПУ) в аппаратуре потребителей (АП) спутниковой навигации. Идея метода состоит в экономии ресурсов ЦПУ за счет прореживания отсчетов промежуточной частоты (ПЧ) при обработке сигнала. Метод был использован при реализации программного коррелятора в АП космического базирования MosaicGNSS для улучшения эксплуатационных характеристик приемника сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS/ГЛОНАСС, разработанного фирмой Mstar Semiconductor (Тайвань) для массового рынка.

Введение

При проектировании АП СРНС GPS/ГЛОНАСС разработчикам приходится решать проблему выбора ЦПУ, на котором должна быть реализована цифровая обработка сигналов. С одной стороны, для реализации оптимальных алгоритмов в приемниках реального времени необходимо ЦПУ с высокой производительностью. Особенно актуально это требование для приемников, в которых функции коррелятора реализованы программным путем. С другой – выбор ограничивается жесткими требованиями к энергопотреблению и стоимости АП. В некоторых приложениях к АП имеются дополнительные требования, например, к радиационной стойкости элементной базы, как в случае с АП космического базирования. Поэтому разработчикам часто приходится идти на компромисс и использовать ЦПУ с невысокой производительностью, на котором невозможно реализовать сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов.

Между тем существует простой и эффективный метод, позволяющий значительно уменьшить загрузку ЦПУ в АП спутниковой навигации [1]. Идея метода состоит в экономии ресурсов ЦПУ за счет прореживания отсчетов ПЧ при обработке входного сигнала, при этом количество пропущенных отсчетов прямо пропорционально уровню мощности принимаемого сигнала. Освободившиеся ресурсы ЦПУ могут быть использованы либо для реализации более сложных алгоритмов цифровой обработки, либо для улучшения эксплуатационных характеристик АП. Побочным эффектом метода является незначительное увеличение среднеквадратической погрешности (СКП) местоопределения. Однако для ряда приложений точность местоопределения, которую обеспечивает СРНС GPS/ГЛОНАСС, является избыточной, что позволяет пренебречь этим эффек-

Михайлов Николай Викторович. Кандидат физико-математических наук. Глава Представительства коммерческой компании «Уайт Дварф Лимитед» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Чистяков Валерий Валентинович. Ведущий инженер Представительства коммерческой компании «Уайт Дварф Лимитед».

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

том. Например, СКП местоопределения космических аппаратов (КА) связи и ретрансляции должна быть не хуже 200 м по всем координатам, что существенно больше потенциальной точности СРНС GPS/ГЛОНАСС. Типичные требования к точности автономной навигации наземных транспортных средств составляют 7...10 м [8].

Описанный подход был реализован при разработке АП MosaicGNSS, предназначенной для автономной навигации КА по сигналам СРНС GPS на частоте L1 [5, 6]. Приемник разработан на базе аппаратной платформы Mosaic020, выполненной с учетом требований к радиационной стойкости элементной базы, и имеет возможность приема и независимого слежения за сигналами 8 (трех) навигационных КА (НКА) GPS для потребителя, расположенного ниже (выше) орбиты НКА. В качестве ЦПУ в приемнике используется аналог процессора ADSP21020, разработанный компанией Atmel для космических приложений, с тактовой частотой 20 МГц. Вся цифровая обработка сигнала, включая функции коррелятора, в АП MosaicGNSS реализована программно.

АП космического базирования MosaicGNSS

При проектировании АП MosaicGNSS были учтены особенности приема сигналов СРНС GPS/ГЛОНАСС для разных типов опорных орбит. В таблице приведены результаты моделирования условий приема сигналов СРНС GPS/ГЛОНАСС для низкоорбитальных (LEO) и геостационарных (GEO) КА, а также для неподвижного наземного потребителя. Результаты моделирования согласуются с данными, собранными во время эксперимента «Союз–Мир» с помощью GPS/ГЛОНАСС приемника ASN-2401P [2].

	Диапазон C/No	Доплер	Число видимых НКА	Интервал видимости НКА
GEO	22...38 дБГц	± 10 кГц	0...4	30...100 мин
LEO	40...50 дБГц	± 45 кГц	6...14	45 мин
Наземный потребитель		± 4.5 кГц	7...15	до 8 ч

Аппаратуре потребителя космического базирования в отличие от наземной аппаратуры свойственна высокая взаимная динамика АП и НКА. Так, с учетом неопределенности по частоте, вызванной уходом частоты опорного генератора, максимальный диапазон изменения доплеровского сдвига частоты составляет ± 50 кГц. Высокая взаимная динамика АП и НКА, а также сравнительно небольшой интервал видимости НКА определили стратегию поиска сигнала по частоте и параметры петель слежения за несущей частотой. В АП MosaicGNSS реализована 2-ступенчатая процедура поиска сигналов СРНС. При отсутствии априорной информации о положении сигнала в частотно-временной области (условия «холодного» старта) реализован параллельный поиск сигнала по частоте с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ). Затем осуществляется последовательный поиск сигнала по коду с перебором частотных позиций в узком диапазоне. Такая процедура поиска позволила получить приемлемое время первого решения. Другим важным отличием АП космического базирования от наземного потребителя является минимальное число НКА, находящихся в зоне радиовидимости АП. Если для наземного потребителя это число не может быть меньше 6-7, то для АП, установленной на КА с гео-

стационарной орбитой, наиболее вероятное число видимых НКА равно 2-3, что не позволяет осуществлять позиционирование по одномоментным измерениям. В этом случае использован метод, описанный в работе [4]. Ниже рассмотрены детали аппаратной и программной реализации АП MosaicGNSS.

Основные аппаратные блоки АП MosaicGNSS представлены на рис. 1. Выход маломощного усилителя (МШУ) антенны соединен с входом радиочастотного (РЧ) блока АП, реализованного на основе СБИС GEC Plessey GP2015. Тактируемая частотой 10 МГц, СБИС GP2015 преобразует входной сигнал на частоте L1 в вещественный сигнал с ПЧ, равной 4.31 МГц, и полосой 2 МГц.

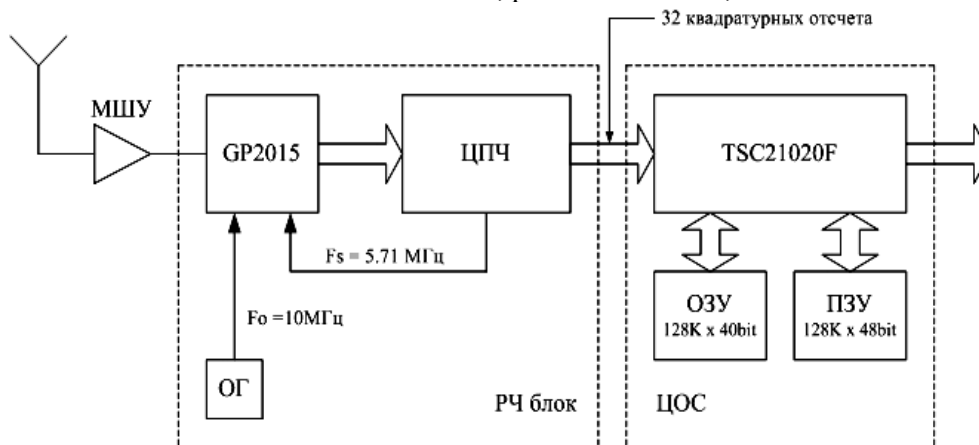


Рис. 1. Блок-схема АП MosaicGNSS

Аналого-цифровой преобразователь осуществляет преобразование этого сигнала в цифровую форму с частотой дискретизации 5.71 МГц. Отсчеты сигнала на выходе СБИС GP2015 представлены двумя разрядами (знак и амплитуда), что приводит к энергетическим потерям порядка 0.55 дБ. В цифровом преобразователе частоты (ЦПЧ) последовательность этих отсчетов преобразуется в квадратурные с ПЧ, равной 1.41 МГц. При этом в блок цифровой обработки сигнала (ЦОС) передаются только 1-разрядные результаты, упакованные в 32-разрядные слова. Таким образом, общие энергетические потери в РЧ-блоке АП MosaicGNSS составляют ~2.55 дБ. СБИС GP2015 разработана для использования с активной антенной. Коэффициент усиления МШУ антенны выбран достаточно большим, поэтому коэффициент шума всего РЧ-блока АП определяется коэффициентом шума МШУ, равным 3 дБ. Следовательно, потери в отношении C/No на входе блока ЦОС АП MosaicGNSS составляют около 6 дБ, что было учтено при моделировании условий приема сигналов СРНС GPS/ГЛОНАСС. Цифровая обработка сигнала, включая функции коррелятора, в АП MosaicGNSS осуществляется программно под управлением ЦПУ TSC21020F с тактовой частотой 20 МГц.

Архитектура программного обеспечения (ПО) MosaicGNSS изображена на рис. 2. ПО MosaicGNSS состоит из четырех основных блоков: многоканального коррелятора (МКК), блоков первичной и вторичной обработки сигнала, а также менеджера каналов. В МКК осуществляется формирование отсчетов опорного сигнала, свертка этих отсчетов с отсчетами сигнала с выхода ЦПЧ, а также интегрирование результата свертки для получения первичных квадратурных накоплений I и Q. В блоке первичной обработки эти накопления используются для оценки текущей фазы кода и фазы несущей, а также отношения C/No для

каждого из каналов. На основании оценок фаз кода и несущей производятся измерения псевдодальности и псевдоскорости. Кроме того, в блоке первичной обработки осуществляется декодирование навигационного сообщения.



Рис. 2. Архитектура ПО MosaicGNSS

В блоке вторичной обработки на основании измерений псевдодальности и псевдоскорости, полученных в разных каналах, вычисляется вектор состояния (ВС) потребителя. Кроме того, на основании альманаха системы, передаваемого в навигационном сообщении, и ВС потребителя вычисляется набор НКА, находящихся в зоне радиовидимости АП. Управление обработкой сигналов в МСК осуществляется при помощи менеджера каналов, который на основании данных о наборе видимых НКА, статусе канала и отношении C/No, устанавливает время интегрирования для каждого из каналов, а также принимает решение об изменении числа параллельных каналов МСК.

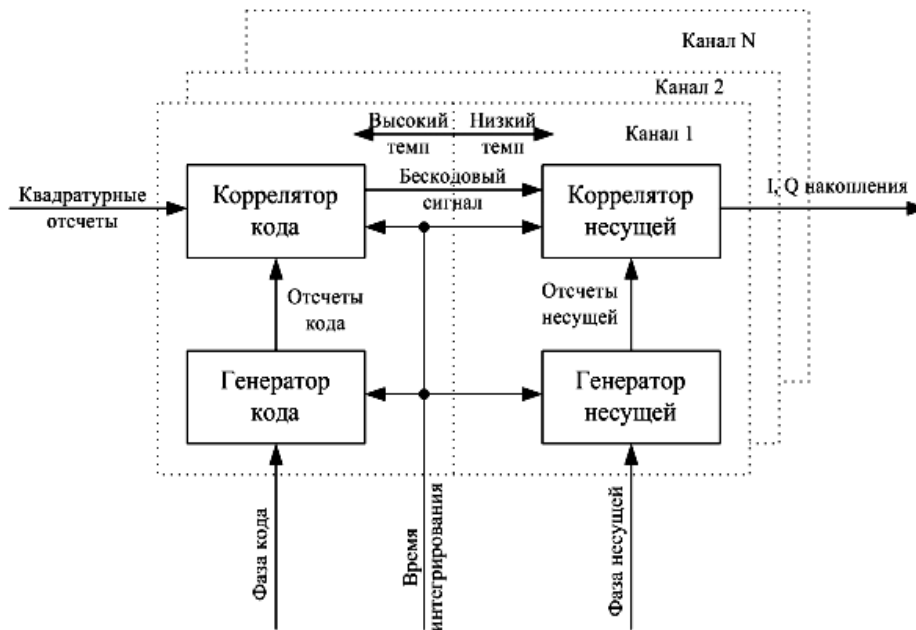


Рис. 3. Блок-схема программного МСК с переменным временем интегрирования

На рис. 3 приведена блок-схема программного МКК, который можно рассматривать как многоканальное устройство, на вход каждого из каналов которого подается сигнал после квадратурного преобразования, а на выходе получаются синфазная (I) и квадратурная (Q) составляющие свертки опорного сигнала с входным. В программном МКК различают операции, исполняемые с высоким и низким темпом. С высоким темпом исполняются операции, необходимые для получения демодулированного сигнала, а именно формирование отсчетов опорной псевдослучайной последовательности (ПСП) и их свертка с входными отсчетами. К операциям, исполняемым с низким темпом, относится формирование опорной частоты и ее свертка с демодулированным сигналом. Для формирования отсчетов опорного сигнала используются оценка фазы кода ПСП, подаваемая на вход генератора кода, и оценка фазы несущей частоты, подаваемая на вход генератора несущей.

Блок-схема одного канала программного МКК изображена на рис. 4. Ширина спектра сигнала на входе МКК составляет 2046 кГц, т.е. удвоенную частоту следования символов ПСП. Этот сигнал в корреляторе кода перемножается с опорной кодовой последовательностью (блок XOR), а результат интегрируется. Благодаря упаковке входных отсчетов в 32-разрядные слова за один такт работы ЦПУ осуществляется перемножение 32 последовательных отсчетов. Ширина полосы интегратора со сбросом должна быть достаточной, чтобы пропускать сигналы частотного диапазона, в котором содержатся возможные значения доплеровского сдвига и смещение частоты, вызванное уходом опорного генератора. Для АП космического базирования этот диапазон не превышает ± 50 кГц. Следовательно, полоса пропускания интегратора должна быть не меньше 100 кГц. Выходы интеграторов коррелятора кода представляют собой отсчеты демодулированного сигнала, которые поступают на вход коррелятора несущей с частотой 128 кГц. Коррелятор несущей состоит из комплексного смесителя демодулированного и опорного сигналов с последующим за ним интегратором. Таким образом, в корреляторе несущей производятся синфазное (I) и квадратурное (Q) накопления сигнала. Время накопления задается менеджером каналов и для режима поиска составляет 1 мс (эпоха кода), а для режима слежения зависит от уровня сигнала в канале МКК.

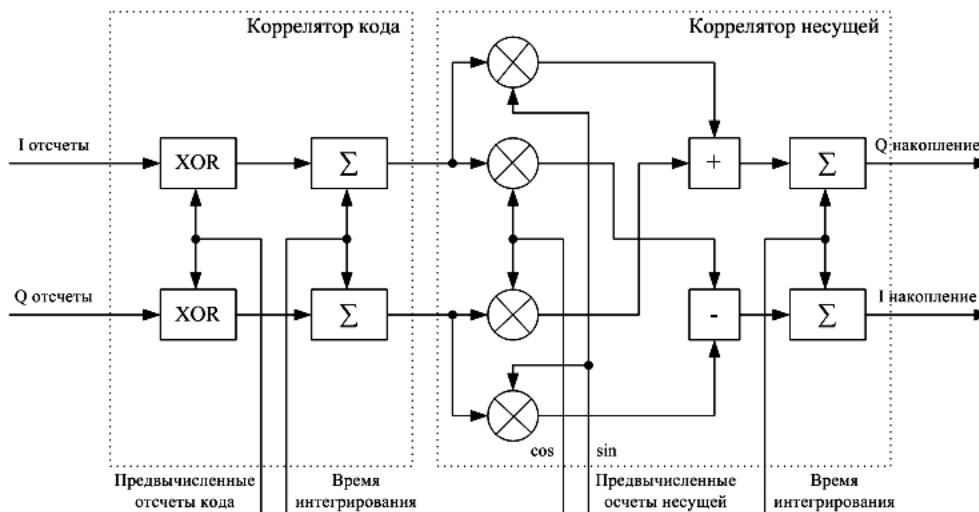


Рис. 4. Блок-схема канала МКК

Производительность TSC21020F (20 MIPS) позволяет реализовать программно не более трех каналов МКК без прореживания входных отсчетов. Эффективность метода «SoftFlex» можно оценить отношением числа каналов МКК, которое может быть реализовано в режиме слежения за сигналами НКА, к базовому числу каналов. Эмпирически было получено отношение C/N_0 , начиная с которого целесообразно использование метода «SoftFlex». Для АП MosaicGNSS пороговое отношение C/N_0 выбрано равным 37 дБГц. Это означает, что при отношении C/N_0 в канале МКК, равном 40 дБГц, число входных отсчетов сигнала для этого канала может быть уменьшено вдвое. Освободившихся ресурсов ЦПУ достаточно для реализации по крайней мере еще одного канала МКК в режиме слежения. Таким образом, при использовании АП MosaicGNSS для автономной навигации низкоорбитальных ИСЗ минимальное число каналов МКК в режиме слежения равно 6, а среднее число каналов – 12. Прореживание отсчетов входного сигнала приводит к увеличению СКП измерений радионавигационных параметров (РНП), которое определяется увеличением шумовой составляющей погрешности, и не превосходит отношения C/N_0 к выбранному пороговому значению.

Оценка характеристик АП MosaicGNSS осуществлялась с помощью симулятора сигналов GPS. Было создано два сценария, в которых оценивались такие параметры, как точность определения положения и время первого решения для «холодного» старта. В качестве опорной была выбрана орбита LEO. В 1-м сценарии приемник функционировал непрерывно в течение 2 ч. Затем вычислялись отклонения полученных координат от координат опорной орбиты (рис. 5). Среднее значение отклонений по всем координатам за весь интервал тестирования составило 80 м. Значения отклонений, превышающие 100 м, соответствуют условиям плохой геометрии рабочего созвездия, когда в зоне радиовидимости приемника находилось всего 4 НКА. Во втором сценарии приемник функционировал в режиме «холодного» старта до получения первого решения. Затем сценарий перезапускался. Начальное положение АП на орбите LEO и время были случайными параметрами. По результатам моделирования (рис. 6) среднее время первого решения в «холодном» старте составило 176 с, что с запасом укладывается в требования к MosaicGNSS.

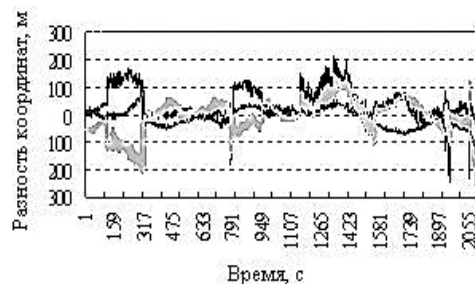


Рис. 5. Разность координат АП MosaicGNSS и опорной орбиты

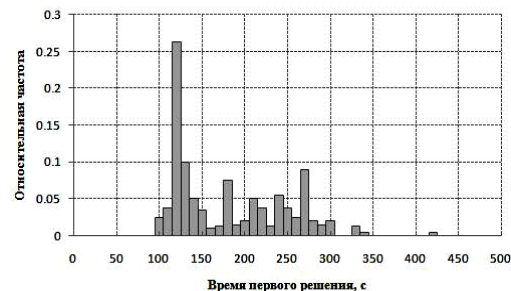


Рис. 6. Распределение времени 1-го решения для условий «холодного» старта

АП СРНС GPS/ГЛОНАСС для массового рынка

Еще одним примером успешного использования метода «SoftFlex» в АП спутниковой навигации является двухсистемный приемник, разработанный фирмой Mstar Semiconductor (Тайвань) для массового рынка [7]. Возможность

приема сигналов СРНС ГЛОНАСС приводит к усложнению радиочастотной части приемника и увеличению энергопотребления приемника в целом по сравнению с односистемной АП. Использование в этом случае метода прореживания входных отсчетов ПЧ в зависимости от уровня мощности входного сигнала и одновременного отключения на время прореживания неиспользуемого РЧ-блока позволило снизить энергопотребление приемника при незначительном увеличении СКП местоопределения.

Отличительной особенностью этого приемника является использование в нем «разомкнутой» петли слежения за сигналами НКА в основном режиме работы. Такое слежение не использует систем фазовой и частотной автоподстройки частоты, а предполагает предвычисление параметров сигнала на основании данных о векторе состояния потребителя и НКА, формирование двухмерной решетки мощностей с центром в предполагаемой точке обнаружения корреляционного пика и вычисление оценок РНП сигнала – псевдодальности и псевдоскорости для этой решетки. Формирование решетки мощностей осуществляется с использованием аппаратно реализованного 64-точечного БПФ. Размер решетки, а также шаг по коду и частоте задается программно в зависимости от режима работы приемника. Вычисление мощности для одной ячейки решетки схематично изображено на рис. 7.

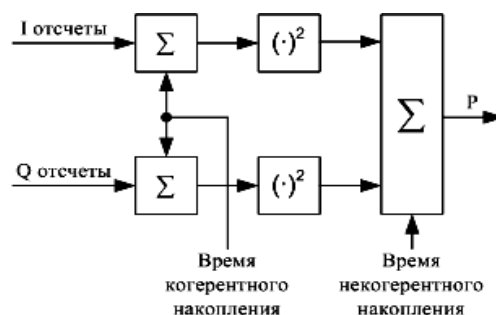


Рис. 7. Вычисление мощности для одной ячейки решетки

Время когерентного и некогерентного накоплений задается программно на основании измеренного отношения C/N_0 и знания положения границы символа данных. Время когерентного накопления ограничено длительностью символа данных. Типичное значение времени когерентного накопления составляет 20 мс, а общее – 1000 мс, что позволяет принимать сигналы с уровнем мощности 18-20 дБГц. Обычно в зоне радиовидимости АП находится достаточное для позиционирования количество НКА с отношением C/N_0 , превышающим это значение, поэтому для этих НКА время некогерентного накопления может быть уменьшено при незначительном увеличении СКП измерений РНП. Уменьшение этого времени, например, в два раза приводит к потере 1.5 дБ в отношении C/N_0 , при этом используется только 50% отсчетов входного сигнала. Это означает, что РЧ-блок приемника может быть использован полсекунды в каждой секунде.

Ток потребления РЧ-блока приемника для одной системы равен 25 мА, что составляет 30% общего потребления приемника. Следовательно, использование 10% отсчетов входного сигнала (общее время накопления 100 мс) при работе по двум системам в режиме разомкнутой петли дает почти 60%-ную экономию потребления тока. Для оценки эффективности режима энергосбережения в ре-

альных условиях были сделаны несколько проездов на автомобиле с двумя приемниками, подсоединенными к одной антенне, в одном из которых был включен режим энергосбережения, а в другом – нет. Примеры сценариев проезда приведены на рис. 8 и 9.



Рис. 8. Сценарий № 1: проезд в условиях плотной городской застройки Синьчжу (Тайвань)



Рис. 9. Сценарий № 2: проезд вокруг высотного здания в г.Тайбей (Тайвань)

Оценка эффективности осуществлялась на основании данных о времени накопления сигнала в каждом из каналов. Минимальное время накопления, равное 100 мс, соответствует максимальной экономии энергии, а время накопления 1000 мс свидетельствует о том, что режим энергосбережения не работает. Типичное поведение времени накопления для выбранных сценариев изображено на рис. 10 и 11.

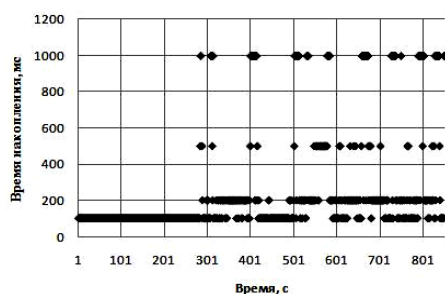


Рис. 10. Типичное поведение времени накопления для сценария № 1

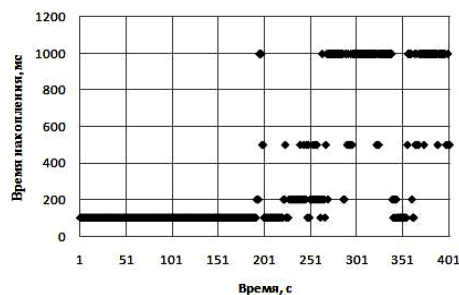


Рис. 11. Типичное поведение времени накопления для сценария № 2

Очевидно, что эффективность режима зависит от условий приема сигналов. Так, в условиях хорошей видимости НКА достигается максимальный эффект экономии, что видно на графиках (оба проезда начинались со стоянки на открытой местности). И наоборот, в условиях ограниченной видимости НКА, как в сценарии № 2, режим энергосбережения почти не функционирует. Среднее время накопления без учета начального участка траектории составило примерно 300 мс для 1-го сценария и 600 мс для 2-го. Таким образом, эффект энергосбережения для этих проездов можно оценить в 47 и 27% соответственно.

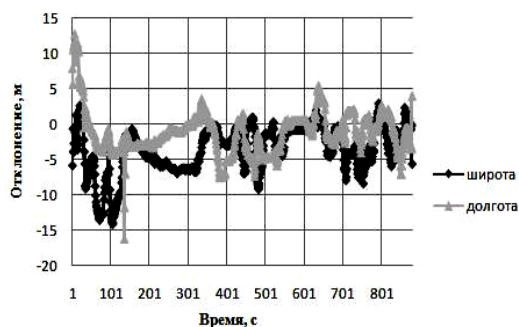


Рис. 12. Отклонение траектории от опорной (сценарий № 1)

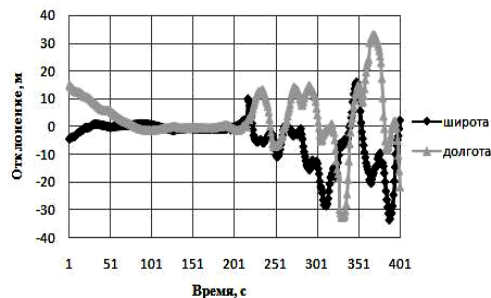


Рис. 13. Отклонение траектории (сценарий № 2)

Влияние режима энергосбережения на качество позиционирования оценивалось по величине отклонения траектории проезда с использованием режима энергосбережения от траектории проезда без этого режима, которая была выбрана в качестве опорной. Тогда величину отклонения можно рассматривать как ошибку, вызванную работой этого режима. Как следует из графиков, изображенных на рис. 12 и 13, максимальное отклонение для выбранных сценариев не превосходит 35 м в наихудших условиях радиовидимости НКА, а среднее отклонение по широте/долготе составляет 3.6 м/1.2 м для 1-го сценария и 4.3 м/3.1 м для 2-го.

Заключение

В статье приведены примеры успешного использования метода прореживания входных отсчетов сигнала в АП спутниковой навигации.

Метод был использован для реализации программного МКК в АП космического базирования MosaicGNSS. Рассмотрены детали реализации МКК и при-

ведены результаты тестирования приемника. В настоящее время АП MosaicGNSS, являясь одним из наиболее распространенных приемников космического базирования в мире, установлена и успешно эксплуатируется на низкоорбитальных КА связи.

Еще одним примером использования метода является приемник СРНС GPS/ГЛОНАСС, разработанный фирмой Mstar Semiconductor (Тайвань) для массового рынка. В этом приемнике метод прореживания входных отсчетов был использован для реализации режима энергосбережения. Показано, что при незначительном увеличении СКП местоопределения экономия энергопотребления приемника может составлять до 60%. Приведены результаты тестирования приемника в условиях городской застройки.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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, September 1999, pp. 353-362.
2. Branets V., Mikhailov M., Stishov Y., Klyushnikov S., Filatchenkov S., Mikhailov N., Pospelov S., Vasilyev M., «Soyuz - Mir Orbital Flight GPS/GLONASS Experiment». In Proceedings of ION GPS-99, Nashville, Tennessee, September, 1999.
3. Пат. 2140090, МПК 6G01S1PФ. Цифровой приемник спутниковой навигационной системы / А.Л.Бочковский, М.В.Васильев, М.В.Голубев, Н.В.Михайлов, С.С.Поспелов, В.В.Чистяков // Бюл. изобретений № 29 от 20.10.1999.
4. Vasilyev M. Real Time Autonomous Orbit Determination of GEO Satellite Using GPS // In Proceedings of ION GPS-99, Nashville, Tennessee, September, 1999.
5. Fichter W., Bruder M., Gottzein E., Mittnacht M., Krauss P.A., Botchkovski A., Chistyakov, V., Vasilyev M. «MosaicGNSS: An Embedded Receiver for Space Applications». International Workshop on Aerospace Applications of the Global Positioning System, Breckenridge, 2000
6. 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.
7. Бочковский, А.Л. Опыт проектирования совмещенного приемника GPS/ГЛОНАСС для массового рынка / А.Л.Бочковский, Н.В.Михайлов, С.С.Поспелов // Материалы XVIII Санкт-Петербургской межд. конф. по интегрированным навигационным системам.- СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»».- 2011.- С. 296-302.
8. Радионавигационный план РФ, 2011.

Abstract. The paper presents a method for offloading CPU of SNS receivers. The idea is to save CPU resources through decimation of IF readings in signal processing. The method was applied in software correlator of space-qualified MosaicGNSS receiver and in GPS/GLONASS receiver for consumer market by Mstar Semiconductor (Taiwan) to improve its performance.

Keywords: GPS, GLONASS, software correlator