

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОВМЕЩЕННОГО ПРИЕМНИКА GPS/ГЛОНАСС И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Описывается недавно разработанный фирмой MStar Semiconductor (Тайвань) совмещенный приемник спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS/ГЛОНАСС для массового рынка. Анализируются особенности и архитектура приемника. Представлены первые результаты предварительных испытаний приемника GPS/ГЛОНАСС в условиях ограниченной видимости космических аппаратов СРНС при работе в движущемся автомобиле и в помещении.

Введение

Совмещенные приемники спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS/ГЛОНАСС давно и успешно реализуются на рынке профессиональной аппаратуры для высокоточных применений. Прежде всего это геодезическая аппаратура, в которой использование двух СРНС позволяет сократить время разрешения неоднозначности фазовых измерений и, следовательно, время местоопределений, а также повысить их точность. Фирмой MStar Semiconductor (Тайвань) проведена разработка совмещенного приемника спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС для массового рынка.

Преимущества совмещенного двухсистемного приемника заключаются в способности принимать большое число сигналов двух СРНС, что обеспечивает повышенную вероятность местоопределений при затрудненных условиях приема, например среди плотной городской застройки или в помещениях.

Так, в [1], основываясь на расчетах геометрического фактора HDOP (Horizontal Dilution of Position) сделан вывод, что в ряде случаев добавление сигналов от космических аппаратов (КА) других (помимо GPS) систем может суще-

Бочковский Андрей Леонардович. Специалист представительства компании «Уайт Дварф Лимитед» (С.-Петербург).

Михайлов Николай Викторович. Кандидат физико-математических наук, глава представительства компании «Уайт Дварф Лимитед». Действительный член Академии навигации и управления движением.

Поспелов Сергей Сергеевич. Специалист представительства компании «Уайт Дварф Лимитед».

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

ственно улучшать качество навигации.

Другие исследователи [2] применительно к условиям плотной городской застройки говорят о примерно 10-процентном улучшении в двухсистемном приемнике доступности местоопределений и их избыточности, желательной для повышения надежности навигации, но в то же время отмечают отсутствие существенного повышения точности местоопределений. Объяснением этого может служить то, что дополнительные КА системы ГЛОНАСС, так же, как и КА GPS, сигналы которых принимаются в условиях резкого ограничения прямой видимости высотной застройкой, находятся в узком телесном угле и, таким образом, не наблюдается существенного улучшения геометрических факторов местоопределения.

Проводя моделирование приема сигналов СРНС в условиях плотной застройки в Гонконге, авторы [3] делают вывод о недостаточности для качественной навигации в этих условиях приема даже сигналов трех СРНС, включая и будущую СРНС «Галилео». Правда, следует отметить, что принятое в моделировании условие приема только прямых сигналов, исключая переотраженные, возможно, является излишне жестким.

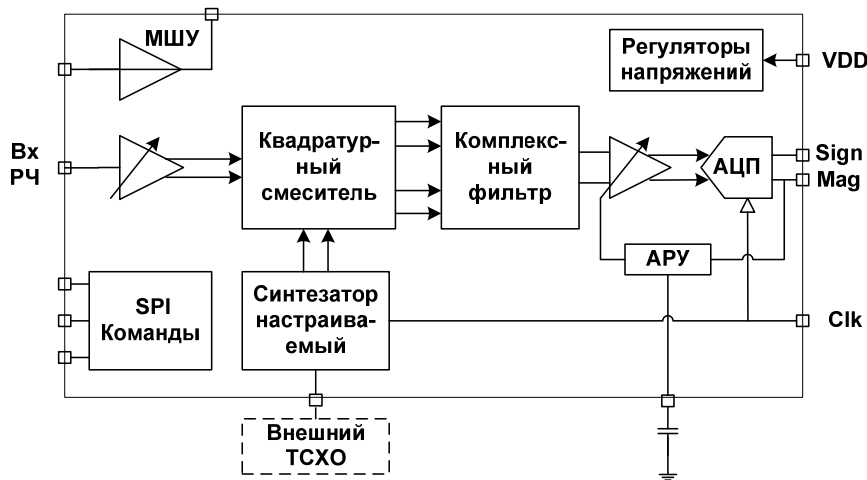
ЗаклЮчить обзор можно ссылаясь, например, на доклад [4], где отмечено, что в благоприятных условиях приема сигналов односистемный приемник GPS и так обеспечивает достаточно качественную навигацию, а в сложных условиях приема и добавление второй системы (ГЛОНАСС) не решает всех проблем. Окончательный ответ сможет дать только опыт достаточно широкой эксплуатации двухсистемных приемников СРНС.

Проектирование и особенности приемника

В настоящее время на массовом рынке дешевой аппаратуры для индивидуальных потребителей появляется двухсистемная аппаратура, работающая по сигналам СРНС GPS и ГЛОНАСС. Однако разнообразие такой аппаратуры невелико, и она не составляет реальной конкуренции односистемной аппаратуре GPS. Причиной этого является дополнительная сложность совмещенной аппаратуры и, соответственно, увеличенные стоимость и потребляемая мощность по сравнению с приемниками GPS.

Главными требованиями к совмещенным GPS/ГЛОНАСС приемникам для массового рынка являются высокая чувствительность, короткое время до первого местоопределения, малые габариты и энергопотребление, удобство интегрирования в пользовательскую аппаратуру, малая стоимость. В то же время эти требования должны удовлетворяться при достаточной точности местоопределений, в том числе в затрудненных условиях приема сигналов.

В ходе проектирования фирмой MStar Semiconductor совмещенного приемника СРНС GPS/ГЛОНАСС главным исходным положением было обязательное наличие в приемнике GPS-ядра, отвечающего самым высоким требованиям к навигационным приемникам для массового рынка. Добавление функциональности ГЛОНАСС рассматривалось как средство некоторого (не доказанного) повышения точности и надежности навигационных определений. Поэтому в условиях отсутствия массового рынка совмещенных приемников, а следовательно, и неопределенности перспектив массового производства GPS/ГЛОНАСС аппаратуры потребителя как первого опыта такой разработки при определении архитектуры приемника было решено сделать выбор в пользу уменьшения затрат на разработку, а не минимизации единичной стоимости.



Радиочастотный преобразователь выполнен по распространенной схеме с одним преобразованием частоты и низким значением выходной промежуточной частоты (ПЧ) – около 4 МГц в режиме GPS и около 6 МГц в режиме ГЛОНАСС. Выходная ПЧ квантуется на четыре уровня в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) – выходы Sign и Mag. Усилитель с переменным коэффициентом усиления управляется системой автоматической регулировки усиления (АРУ), использующей статистику выхода магнитуды квантованного выходного сигнала ПЧ. Синтезатор на базе устройства фазовой автоподстройки (ФАП) с управляемым делителем с дробным коэффициентом деления формирует гетеродинную частоту и частоту дискретизации отсчетов из частоты внешнего термокомпенсированного кварцевого опорного генератора TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator). Блоки РЧП – прежде всего синтезатор и комплексный фильтр – являются перестраиваемыми и обеспечивают выбор режима приема сигналов GPS или ГЛОНАСС. Блок SPI-команд (Serial Peripheral Interface) обеспечивает управление настройкой элементов РЧП цифровым навигационным процессором. Встроенные линейные регуляторы напряжений обеспечивают блоки РЧП необходимыми номиналами напряжений при использовании единого внешнего питающего напряжения 1,8 В / 3,3 В. В составе РЧП имеется мал шумящий усилитель (МШУ), подключаемый внешними соединениями, который позволяет использовать пассивную антенну без внешнего МШУ.

Цифровой навигационный процессор – единый, одновременно обеспечивающий обработку сигналов как СРНС GPS, так и ГЛОНАСС. На рис. 2 приведена блок-схема кристалла ЦНП.

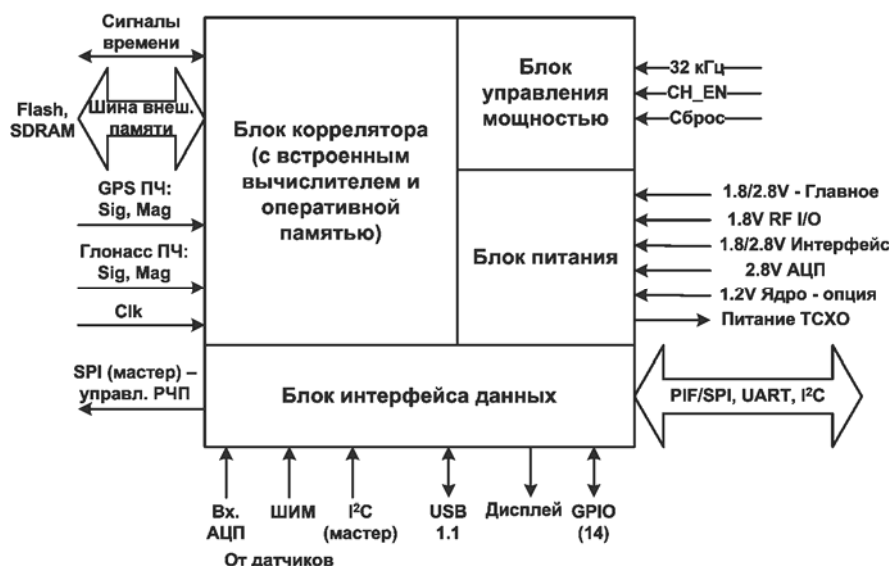


Рис. 2. Блок-схема цифрового навигационного процессора

Основным в составе ЦНП является блок коррелятора, содержащий специализированные цифровые устройства обработки сигналов (СЦУОС) и встроенные вычислитель и оперативную память. СЦУОС совместно с вычислителем обеспечивают поиск и обнаружение оцифрованных в РЧП сигналов обеих СРНС, слежение за сигналами, выделение из них служебной информации и измерение параметров отслеживаемых сигналов. Блок коррелятора позволяет подключить устройства внешней памяти (Flash, SDRAM). Предусмотрен интерфейс сигналов времени, включающий в себя как выдачу метки времени, например, с частотой 1 Гц, так и прием сигналов внешних событий.

Блок интерфейса данных обеспечивает информационное взаимодействие ЦНП с широким спектром внешних устройств. Для связи с внешним прикладным (иначе – главным или хост-процессором) служат интерфейсы PIF/SPI, UART и I²C. Интерфейс PIF – это параллельный 4-битный SPI-подобный интерфейс фирмы MStar Semiconductor. Протоколы обмена по UART – NMEA0183 и бинарный. Для соединения со стандартными пользовательскими устройствами служит интерфейс USB1.1. Предусмотрен интерфейс для подключения дисплея пользовательских устройств, например навигатора (PND). Три вида интерфейса предназначены для подключения внешних датчиков – I²C (мастер) и преобразователь широтно-импульсной модуляции (ШИМ) – для датчиков движения и АЦП (два канала), например, для датчиков температуры. Интерфейс SPI (мастер) предназначается для управления режимами работы РЧП. Предусмотрены также 14 программируемых линий ввода-вывода общего назначения (GPIO) (General Purpose Input/Output).

Блок питания содержит линейные преобразователи напряжения и обеспечивает остальные блоки необходимыми номиналами питания. Во многих применениях возможно электропитание кристалла ЦНП от единственного источника с напряжением 1,8 или 2,8 В.

Блок управления мощностью обладает возможностями гибкой избирательной подачи питания только на активно функционирующие блоки и устройства, обеспечивая тем самым режимы эффективной экономии энергопотребления. В частности, предусмотрено питание от отдельной маломощной батареи схемы

хранения реального времени, что позволяет продолжительно отключать устройства приемника (РЧП и ЦНП) и внешний опорный генератор.

Производительность вычислителя ЦНП в состоянии обеспечивать выполнение всего круга задач сигнальной обработки, а также навигационных вычислений для определения координат потребителя. В то же время в вычислителе ЦНП не была запроецирована внутренняя, энергетически независимая память для хранения программ. Объем оперативной памяти был выбран достаточным для хранения программы сигнальной обработки и соответствующих данных, или, в альтернативном варианте, достаточным для хранения только данных, используемых в полном комплекте программ сигнальной и навигационной обработки. В последнем случае программы должны исполняться из внешней памяти, подключаемой к ЦНП по специальному интерфейсу. То есть очередная команда, подлежащая исполнению, выбирается процессором непосредственно из внешней памяти.

Кристалл цифрового навигационного процессора был изготовлен по нормам 64 нм технологического процесса. Оба типа кристаллов прошли глубокое тестирование. На базе кристаллов РЧП и ЦНП запроецирован ряд многокристальных модулей (Multichip Module – MCM). К настоящему времени испытаны два варианта MCM.

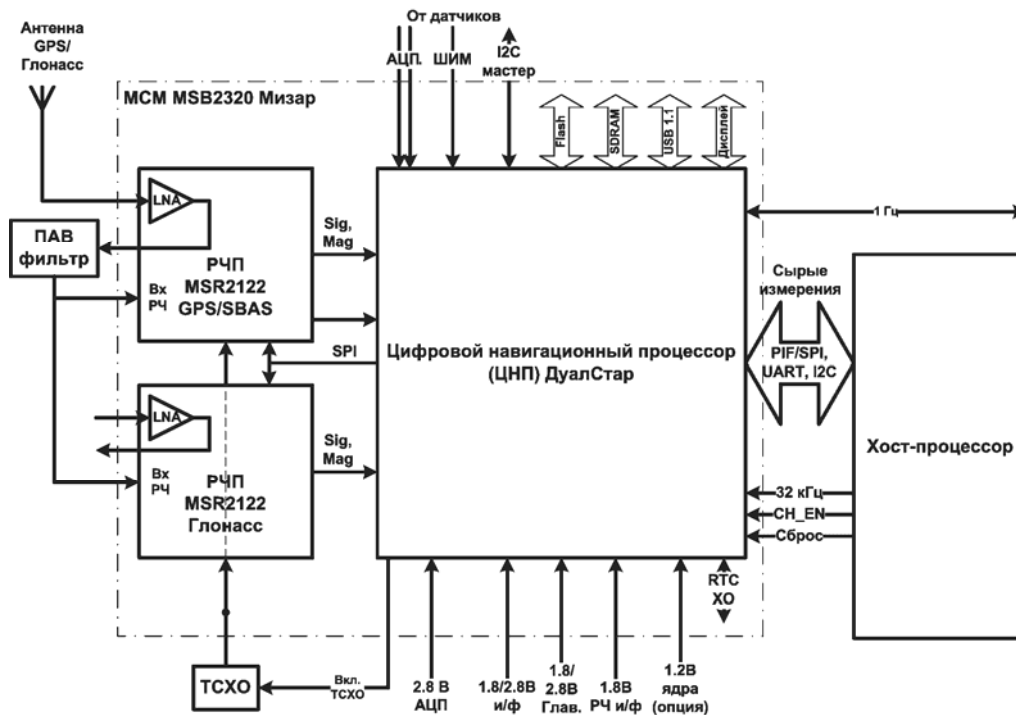


Рис. 3. Блок-схема MCM варианта приемника, базирующегося на главном (хост-) процессоре

Первый вариант включает в себя два кристалла РЧП (для GPS и ГЛОНАСС) и кристалл ЦНП. MCM размещен в корпусе FBGA-125 размером 8×7 мм и реализует вариант приемника, использующий ресурсы главного процессора. Блок-схема MCM приведена на рис. 3.

Встроенным вычислителем ЦНП MCM исполняются программы цифровой обработки, находящиеся в собственной оперативной памяти, и так называемые

«сырые» измерения (псевдодальности и псевдоскорости) выдаются во внешний (главный) процессор пользовательской системы, где и выполняется навигационное решение.

Второй вариант оптимизирован для потребителей, которые намерены минимизировать стоимость и/или энергопотребление приемника за счет отказа от функциональности ГЛОНАСС. Модуль включает в себя один РЧП, ЦНП, Flash память и импульсный преобразователь напряжения. МСМ размещен в корпусе FBGA-165 размером 8×6 мм и реализует полный (автономный) вариант GPS приемника. Блок-схема этого варианта применения МСМ представлена на рис. 4.

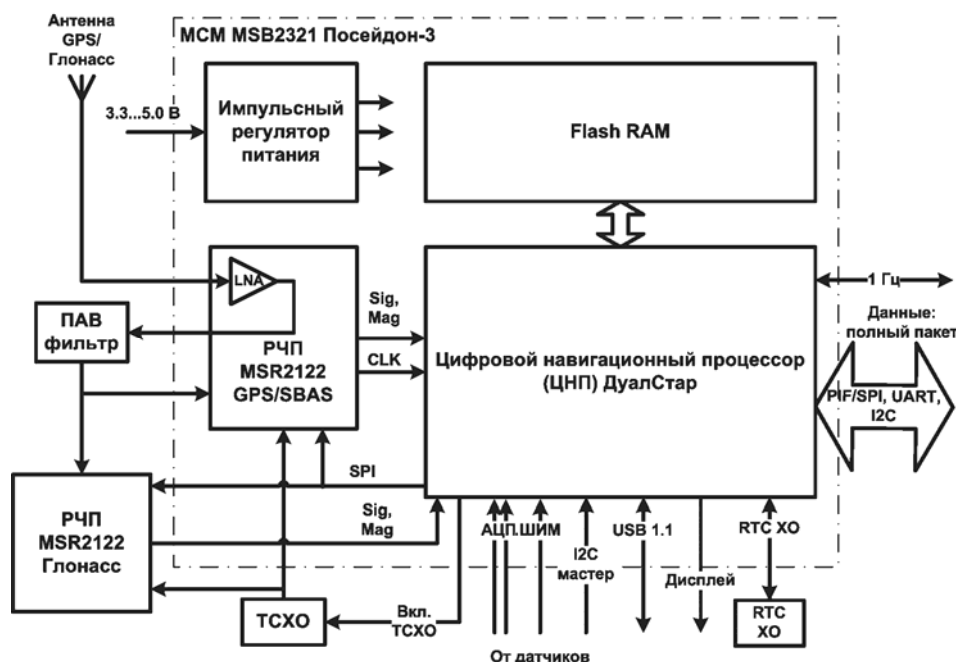


Рис. 4. Блок-схема МСМ полного (stand alone) варианта приемника

Все программы (цифровой обработки сигналов и навигационной обработки) исполняются встроенным вычислителем ЦНП МСМ из Flash памяти, а данные хранятся в оперативной памяти ЦНП. Без дополнительных элементов приемник — односистемный (GPS); функциональность ГЛОНАСС может быть добавлена с помощью второго (внешнего) РЧП.

Приведенные примеры построения модулей МСМ на базе разработанных кристаллов и их применения в приемнике GPS/ГЛОНАСС показывают достаточную гибкость принятых архитектурных решений. Еще одним преимуществом избранного пути с двумя самостоятельными настраиваемыми РЧП является возможность использовать в приемнике как совмещенную антенну GPS/ГЛОНАСС, так и две отдельные антенны. Таким образом, открывается путь к организации режима работы приемника по одной из систем, например GPS, на разнесенные антенны, о преимуществах которого сообщалось, в частности, в [5]. Потенциально прием на разнесенные антенны позволяет повысить отношение сигнал/шум при работе в сложных условиях, например в городских каньонах или в помещении.

Предварительные результаты

Широко распространено мнение, что приемник ГЛОНАСС (или совмещенный приемник GPS/ГЛОНАСС) сложнее из-за используемого в ГЛОНАСС частотного разделения сигналов. Это мнение, по крайней мере, неточно. Правильнее утверждать, что повышенная сложность совмещенного приемника GPS/ГЛОНАСС определяется главным образом отличием частотного диапазона сигналов стандартной точности двух СРНС: для GPS это прежде всего L1=1575.42 МГц, а для ГЛОНАСС – это 14 частот в диапазоне 1602 МГц. В рассматриваемой архитектуре приемника требование приема второго частотного диапазона приводит к появлению второго РЧП и второго тракта обработки отсчетов в ЦНП, включая отдельный буфер памяти для хранения отсчетов. Добавленное для этого оборудование в ЦНП составляет примерно 5-6% от общей площади кристалла. В то же время добавленный цифровой тюнер частотного разделения составляет всего 0,7% от общей площади кристалла ЦНП.

Подробное изучение преимуществ двухсистемного приемника СРНС должно стать предметом дальнейших исследований. В данной статье приводится только несколько примеров сравнения работы приемника в режиме только GPS и совмещенном режиме GPS/ГЛОНАСС, полученных в ходе предварительных испытаний создаваемого приемника. Идентичность условий для двух режимов обеспечивалась записью оцифрованных отсчетов с выходов РЧП и последующим воспроизведением и постобработкой этих отсчетов цифровой частью приемника, работающей соответственно в односистемном или совмещенном режиме. Следует отметить, что использовавшаяся версия программного обеспечения не была предназначена для приема сверхслабых сигналов (отношение мощности несущей принимаемых сигналов к спектральной мощности шума C/N_0 ниже 13 дБГц).



Рис. 5. Автомобильный тоннель на острове Тайвань

Первая часть испытаний проводилась на территории о. Тайвань, в том числе при езде в тоннеле, одна из стен которого закрыта не полностью (рис. 5). При проезде вдоль сплошной стены навигационные определения практически отсутствовали в режиме как GPS, так и GPS/ГЛОНАСС. Проезд в обратном направ-

лении вдоль полуоткрытой стены (от наблюдателя) представляет собой тот случай, когда двухсистемный режим GPS/ГЛОНАСС демонстрирует очевидные преимущества.

На рис. 6 приведены траектории местоопределений для двух режимов. Автомобиль двигался справа налево. Длина тоннеля – около 2200 м, время проезда тоннеля чуть менее 2 мин (110-112 с). Начало траекторий соответствует моменту въезда в тоннель. В режиме GPS слежение за достаточным количеством сигналов (3-4) и местоопределение продолжается еще около 25 с после въезда в тоннель. Примерно в начале последней трети траектории есть второй участок с успешным местоопределением продолжительностью 10 с. В режиме GPS/ГЛОНАСС местоопределение имело место в течение всего проезда.

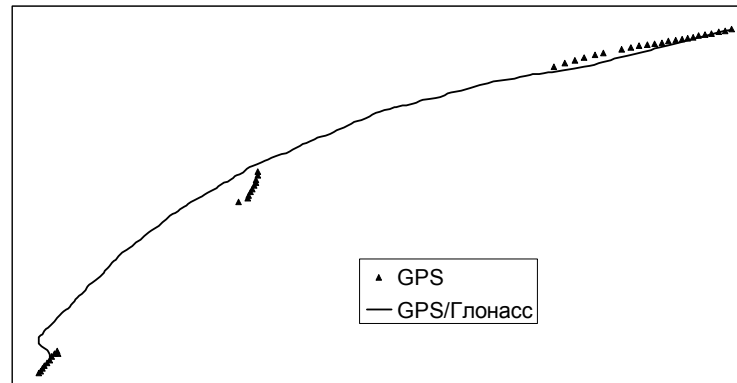


Рис. 6. Траектории местоопределений при работе по GPS и GPS/ГЛОНАСС в тоннеле

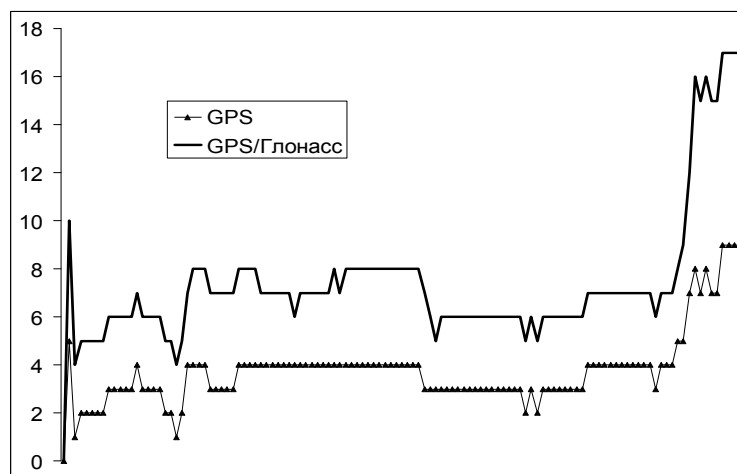


Рис. 7. Количество сигналов КА СРНС GPS и GPS+ГЛОНАСС, принимавшихся при проезде тоннеля

Во время указанного проезда в тоннеле на выбранном для анализа 30-секундном участке отношение мощности несущей принимаемых сигналов к спектральной мощности шума C/N_0 составляло от 16 до 30 дБГц, в среднем – 22,1 дБГц. Графики изменения количества сигналов, по которым осуществля-

лись навигационные измерения, приведены на рис. 7. При работе в режиме GPS количество принимаемых сигналов большую часть времени составляло 2-3, что недостаточно для трехмерной навигации, а на интервалах приема 4 сигналов GPS геометрический фактор по большей части был неудовлетворительным. В режиме GPS/ГЛОНАСС почти все время проезда в тоннеле принималось от пяти до восьми сигналов СРНС, что обеспечило возможность определять координаты непрерывно. В то же время отмеченный низкий уровень мощности принимаемых сигналов свидетельствует о том, что практически все они претерпевали многолучевое распространение.



Рис. 8. Траектории в двух режимах: GPS (белая), и GPS+ГЛОНАСС (черная)

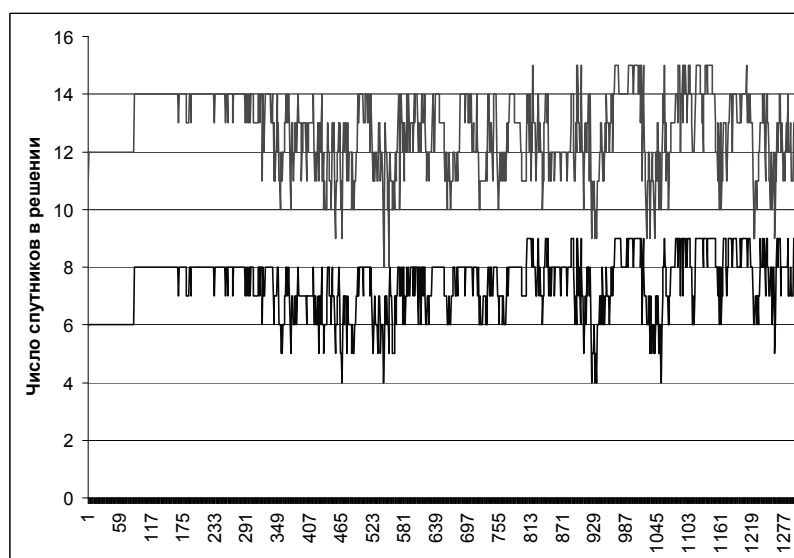


Рис. 9. Количество КА в навигационном решении для двух режимов работы: верхний график – ГЛОНАСС/GPS, нижний график – GPS

На рис. 8 и 9 представлены траектории проезда и количество КА в навигационном решении во время второй серии испытаний, проводившихся также на территории о. Тайвань, в двух режимах работы приемника: в режиме GPS и в совмещенном режиме GPS/ГЛОНАСС. Результаты иллюстрируют повышение точности местоопределений в совмещенном режиме GPS/ГЛОНАСС в условиях плотной городской застройки. Очевидным объяснением причины повышения точности служит почти двукратное увеличение числа КА, используемых в навигационном решении.

Помимо испытаний в движении проводились также испытания при работе в помещении – в сравнительно несложных (для помещений) условиях, а именно при размещении антенны на расстоянии около 1 м от окна пятого (последнего) этажа кирпичного здания с металлической крышей. Испытывались два идентичных приемника, подсоединенных (через СВЧ-разветвитель) к активной GPS/ГЛОНАСС антенне, улавливавшей сигналы СРНС. Один из приемников работал по сигналам исключительно GPS, второй – по сигналам совмещенной СРНС GPS/ГЛОНАСС.

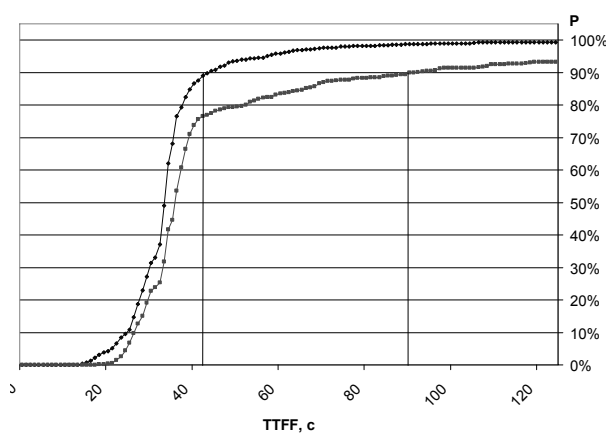


Рис. 10. Вероятности успешного навигационного решения в зависимости от затраченного времени, – тестовый сценарий: работа в помещении, умеренно затрудненный прием сигналов СРНС: верхний график – GPS+ГЛОНАСС, нижний график – GPS

фиксировалось по моменту второго решения (2D) с точностью не хуже 100 м по обоим плановым координатам. Максимальное время до очередного перезапуска ограничивалось – таким образом, часть перезапусков из них не заканчивались успешным решением. Отметим, что в приемнике продолжительность TTFF минимизировалась благодаря использованию метода быстрых местоопределений, описанного в работе [6].

На рис. 10 представлены полученные в эксперименте графики интегральной вероятности успешного навигационного решения в зависимости от времени до этого решения для двух случаев: GPS и GPS/ГЛОНАСС. Эксперимент продолжался около 10 ч. За это время произведено 652 перезапуска приемника GPS и 870 перезапусков приемника GPS/ГЛОНАСС. Как и можно было ожидать, навигационное решение по совмещенной системе GPS/ГЛОНАСС удастся получить быстрее, чем по автономной GPS. Среднее время TTFF составило в данном эксперименте 34,3 с для GPS/ГЛОНАСС и 45,0 с для GPS. Поскольку часть перезапусков не заканчивалась успешным решением, то на интервале 0–120 с 100% не было достигнуто.

Производился многократный циклический перезапуск приемников с определением времени до первого местоопределения (TTFF) в режиме «теплого старта». То есть от старта к старту в приемниках сохранялись альманахи СРНС, грубое время и начальные координаты. При этом, чтобы избежать повторяемости условий приема данных, момент перезапуска назначался случайным образом относительно моментов трансляции характерных элементов служебной информации СРНС (сегментов и подкадров). Время TTFF

Если принять за желаемую вероятность успешного местоопределения 90%, то, как следует из графиков, для этого требовалось в среднем 44 с при работе с GPS/ГЛОНАСС и 92 с при работе с GPS.

Заключение

Совмещенный приемник спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС отвечает всем рыночным требованиям к приемникам GPS и добавляет новые качества – надежность и точность местоопределений в сложных условиях, привносимые за счет увеличения числа принимаемых сигналов.

Оценка повышения качества навигации при использовании двухсистемной СРНС GPS/ГЛОНАСС должна стать предметом будущих подробных исследований. Результаты предварительных испытаний показывают, что существуют сценарии применения приемника, в которых использование второй СРНС дает значительное улучшение качества навигации.

В избранной архитектуре приемника увеличение сложности (а следовательно, и цены) определяется появлением второго радиочастотного преобразователя и увеличением, примерно на 6%, цифровой части приемника.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Cillian O'Driscoll, Gérard Lachapelle, Mohamed Tamazin**, Dynamic Duo. GPS World, NY, January 1, 2011.
2. **Frank van Diggelen**, Down and Deep. GPS World, NY, December 1, 2010.
3. Shengyue Ji, Wu Chen, Xiaoli Ding, Yongqi Chen, Chunmei Zhao, Congwei Hu, Potential Benefits of GPS/GLONASS/GALILEO Integration in an Urban Canyon – Hong Kong. The Journal of Navigation (2010), 63, 681–693.
4. **Михайлов, Н.В.** Коммерциализация ГЛОНАСС - стереотипы и реальность / Доклад на конференции «Оборудование спутниковой навигации, модули и электронные компоненты. Производство и технологии». - М., 26 октября 2010.
5. **John Nielsen, Surendran K. Shanmugam, M. Upal Mahfuz, Gerard Lachapelle**, Enhanced Detection of Weak GNSS Signals Using Spatial Combining. NAVIGATION // Journal of the Institute of Navigation, Vol. 56, No. 2, USA, summer 2009.
6. **Метод** получения сверхбыстрого первого навигационного определения для радионавигационных приемников массового применения / М.В.Васильев [и др.] // Гироскопия и навигация. - 2011. - № 1. - С. 26-36.

Abstract. MStar Semiconductor (Taiwan) has completed design and engineering of a combined GPS/GLONASS receiver for consumer market. The purpose of this paper is to inform the GNSS community about this development; in particular, about specific features and architecture of the receiver. Results of receiver preliminary tests under restricted satellite visibility – first, driving a car in urban environment, and, second, a static test in indoor environment – are also presented.

Key words: satellite radio navigating systems, GPS/GLONASS receiver, spacecraft, car, restricted visibility conditions