

В. А. Игнатюк¹

С. И. Сметанин²

В. С. Марус³

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток. Россия

Способ организации расширенной системы спутникового GNSS мониторинга

Представлен способ организации расширенной системы спутникового мониторинга с использованием собственных базовых станций и мобильных терминалов. Приведено описание разработанного устройства (мобильного терминала) на базе Raspberry Pi, оценены результаты эффективности подобной системы в сравнении со стандартной системой спутникового мониторинга.

Ключевые слова и словосочетания: дифференциальный метод, SiRF-протокол, повышение точности, определение координат, расширенная система мониторинга, Raspberry Pi, мобильный терминал.

V. A. Ignatyuk

S. I. Smetanin

V. S. Marus

Vladivostok State University of Economics and Service
Vladivostok. Russia

Way of the organization of expanded system of satellite GNSS of monitoring

The way of the organization of expanded system of satellite monitoring with use of own base stations and mobile terminals is presented in this article. The description of the developed device (the mobile terminal) on the basis of Raspberry Pi is provided, results of efficiency of similar system in comparison with standard system of satellite monitoring are estimated.

Keywords: differential method, SiRF-protocol, increase of accuracy, determination of coordinates, expanded system of monitoring, Raspberry Pi, mobile terminal.

В данной статье рассматривается реализация расширенной системы спутникового мониторинга (программная + аппаратная часть) за счёт использования специальных алгоритмов, позволяющих осуществлять мониторинг транспортных средств и других объектов с повышенным уровнем точности. Актуальность данного подхода связана с полным отсутствием каких-либо подобных систем, которые позволяют предоставлять с повышенной точностью координаты наблюдаемого объекта мониторинга.

¹ Игнатюк Виктор Александрович – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры информационных технологий и систем; e-mail: viktor.ignatyuk@vvsu.ru.

² Сметанин Станислав Игоревич – аспирант кафедры информационных технологий и систем; e-mail: Sardo1@mail.ru.

³ Марус Виталий Сергеевич – студент 4 курса кафедры информационных технологий и систем.

Существуют лишь глобальные DGPS системы, такие, как EGNOS, WAAS, но коррекции первой доступны лишь в пределах территории Европы, а WAAS – только на территории США. В России дифференциальные станции GPS доступны только в определённых местах узкому кругу лиц – геодезистам для межевания территории. Попыток создать собственную систему DGPS и объединить её с системой мониторинга не предпринималось вообще. При этом точность такой системы, обрабатывающей координаты в пределах, например, определённого города, будет на порядок выше точности глобальной DGPS системы.

Область использования данной системы – спутниковый мониторинг различных объектов, основанный на использовании данных системы GPS и применяемый в различных диспетчерских службах, осуществляющих контроль спецтранспорта, также его используют службы спасения и частные лица.

В рамках проделанной работы были достигнуты следующие результаты:

- 1) разработано программное обеспечение для мобильного терминала расширенной системы мониторинга и серверов контроля точности (СКТ), реализующее базовые принципы системы мониторинга;
- 2) подготовлены компоненты для сборки мобильного терминала;
- 3) проведены исследования по определению дальности и точности СКТ-серверов.

Использованное оборудование. Мобильный терминал состоит из следующих основных элементов:

1. *Raspberry Pi. Одноплатный микрокомпьютер на аппаратной платформе ARM11.* На подключаемой SD-карте устанавливается ОС Raspbian, основанная на коде Debian, что даёт возможность запускать программы, написанные на языке C# (рис. 1).

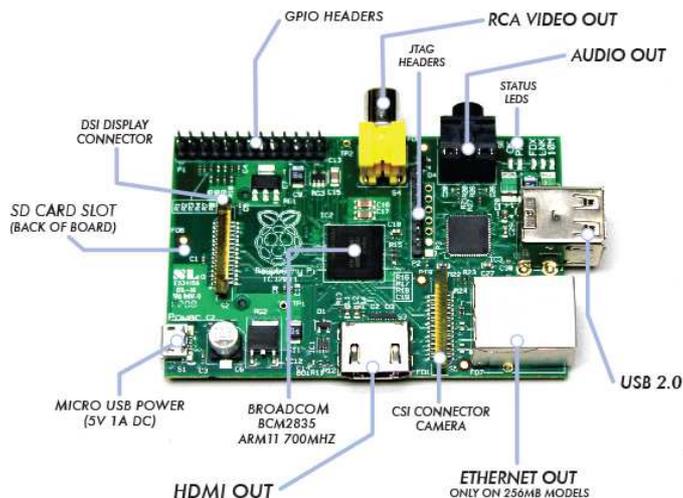


Рис. 1. Raspberry Pi, основа для разрабатываемого мобильного терминала

К данному устройству через GPIO-порты Raspberry Pi подключается плата расширения Raspberry Pi Expansion Board X100 для работы с сенсорным экраном через видео порт VGA. Стандартный Raspberry Pi имеет только HDMI выход, кроме того, данная плата оснащена часами точного времени (англ. Real Time Clock, RTC), которые используются для работы таймеров в разработанном программном обеспечении (рис. 2).

Через шину CSI также подключается модуль Raspberry Pi Camera Board (рис. 3) – 5-мегапиксельная камера, данные с которой транслируются через TCP/IP протокол на сервер отдельными jpeg-кадрами. На данный момент удалось достичь скорости передачи

кадров только «один кадр раз в секунду», что связано с большой затратностью ресурсов Raspberry на непрерывную видеосъемку.

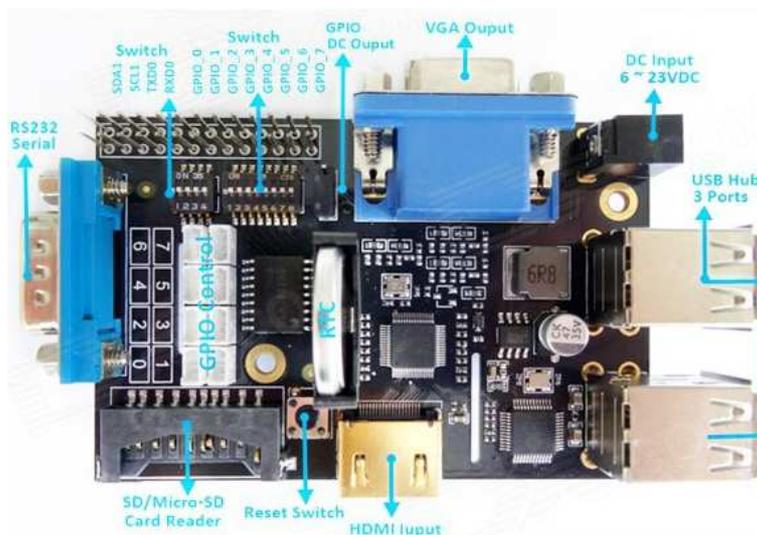


Рис. 2. Raspberry Pi Expansion Board X100

Подключение дополнительной оперативной памяти должно решить эту проблему. Данный модуль позволяет отображать на сервере системы мониторинга визуальные данные с мобильного терминала.

Указанные компоненты, собранные вместе, показаны на рис. 4.



Рис. 3. Raspberry Pi Camera Board



Рис. 4. Raspberry Pi Camera Board

2. *GPS-приёмник Quectel SIRF IV L20.* Новейший GPS-приёмник с заявленным классом точности 2,5 метра. Отличительной его особенностью является наличие GPS-чипа SiRF Star IV (рис. 5), производители которого включили в обменный формат возможность передачи данных бинарного протокола – расширенного протокола, данные которого содержат необработанную приёмником информацию: псевдодальности до спутников, азимут и угол возвышения каждого из спутников, погрешность биения часов. Все эти данные необходимы для реализации DGPS-режима, способствующего существенному повышению точности.

3. *Дополнительные комплектующие части.* Сенсорный монитор с платой управления, подключаемой к Raspberry Pi через VGA видео-порт и USB-разъём. Отображает

видимые в данный момент спутники, уровень их сигнала и статистику лога: отправку данных на сервер, подключение и смену подключения к СКТ-серверам, а также показывает возможные ошибки при передаче данных. Данный монитор отображён на рис. 6, демонстрирующем устройство в собранном виде.



Рис. 5. Quoctel SIRF IV L20



Рис. 6. Мобильный терминал

Передача данных на сервер осуществляется с помощью подключаемого модема Yota.

Программное обеспечение. Разработанное программное обеспечение реализует концепцию расширенной системы мониторинга и предназначено для работы в двух средах: на микрокомпьютере Raspberry Pi, являющемся мобильным терминалом системы мониторинга, и для работы на ОС поддерживающих полный функционал .NET Framework – в качестве сервера.

Расширенная система мониторинга базируется на серверах контроля точности (СКТ).

В стандартных системах мониторинга координаты мобильных терминалов передаются в уже готовом виде, без попытки каким-либо образом обработать их для улучшения итоговой точности. При этом отклонение от точного местоположения, определенное с помощью спутниковой системы GPS, полученное в хороших условиях, исключая городских каньоны и высокий уровень растительности, а также при хорошем уровне видимости наблюдаемых спутников и выносной активной антенне, обычно находится в диапазоне до 6 метров.

Разработанное программное обеспечение реализует так называемый режим DGPS (англ. differential global positioning system) – систему повышения точности сигналов GPS,

закрывающуюся в учёт и измерении разницы между известными псевдодальностями до спутников и фактическими кодовыми псевдодальностями.

Псевдодальностями называются дальности до спутников GPS, которые измеряются GPS-приёмником. Такое название они получили по причине наличия в них многочисленных ошибок. Большая часть из них – это атмосферные ошибки, включающие в себя ионосферную и тропосферную задержку при распространении сигнала. Подобные ошибки остаются практически полностью неизменными для объектов, находящихся на некоторой дистанции друг от друга. Следовательно, если точно знать значение дальности до спутника, то GPS-приёмник, находящийся в неподвижном состоянии, сможет убрать совокупность этих ошибок из получаемых им значений псевдодальностей. Величина этой ошибки, отнятая от псевдодальностей другого движущегося объекта, будет способствовать повышению точности при определении его местоположения.

На данном принципе реализована работа СКТ-серверов.

Структура серверной части расширенной системы мониторинга включает:

1) основной сервер, который принимает итоговые данные: данные логина/пароля пользователя, информацию о привязанном к терминалу объекте, скорректированные координаты широты и долготы, значение скорости;

2) серверы СКТ, корректирующие координаты мобильного терминала. Кроме самих координат они также принимают всю дополнительную информацию, которая необходима для последующей передачи на основной сервер.

В то время как СКТ-серверов может быть бесконечно много, основной сервер всегда только один, он служит для приёма данных по TCP/IP протоколу и занесения информации в базу данных, которая используется для отображения положения объектов мониторинга на карте.

Для реализации режима DGPS было решено использовать приёмники на чипах SiRF Star благодаря расширенному функционалу, который предоставляют производители указанного чипсета. Данный функционал заключается в наличии двух протоколов: стандартного NMEA-протокола и собственного бинарного протокола.

Отличие бинарного протокола от NMEA-протокола заключается в большем количестве поставляемой информации: в то время как текстовый NMEA-протокол предоставляет только уже рассчитанную GPS-приёмником информацию (готовые координаты широты и долготы в системе WGS-84), бинарный SiRF протокол позволяет получить доступ к так называемым «сырым данным» (англ. «raw data»), необходимым для реализации собственного DGPS режима.

Программному обеспечению для СКТ сервера нужен указанный в перечне оборудования приёмник Quectel SIRF IV L20, подключаемый к ОС с установленным .NET Framework 4.0 и старше, или Mono с аналогичными параметрами. Знание точной позиции данного приёмника важно для правильной работы системы.

Запущенная программа открывает заданный в параметрах порт и начинает прослушивать его, ожидая входящие подключения. Одновременно запускается процесс чтения данных из виртуального COM-порта приёмника: после переключения порта в бинарный режим, поступающие данные разбиваются по символам начала/конца сообщения. Из принятого массива сообщений затем отбираются необходимые для создания дифференциальных коррекций и последующего расчёта итоговой позиции мобильного терминала.

Эти сообщения приводятся ниже. Подробная информация может быть найдена в мануале [5].

MID28 – Navigation Library Measurement Data, предоставляет данные о псевдодальностях видимых спутников и метке TOW (англ. Time of Week – время недели GPS).

MID4 – Measured Tracker Data Out, позволяет получить доступ к информации об азимуте и углу высоты видимых спутников (эти данные используются для фильтрации «по маске»: при сложной географии места расположения СКТ-сервера данные спутников с низким углом высоты часто нежелательны из-за существенного ослабления GPS-сигнала, вызванного, в свою очередь, его переотражением от закрывающих небо зданий).

MID2 – Measure Navigation Data Out – рассчитанные приёмником скорость движения объекта и его координаты в системе ECEF (англ. Earth-Centered, Earth-Fixed). Скорость используется как один из параметров для передачи на основной сервер. Рассчитанная приёмником позиция на данный момент используется только для проверки итоговой точности в сравнении с точностью GPS-приёмника без использования дифференциальных коррекций.

MID7 – Clock Status Data – данные о биении часов спутника. Поскольку точность псевдодальностей зависит от времени, устранение этой погрешности заметно влияет на итоговую точность дифференциальных коррекций при неточном знании позиции СКТ-сервера.

Сообщения читаются односекундными «эпохами», после чего заносятся в массив данных спутников с ключом TOW в качестве метки времени.

Опознав входящее подключение, СКТ-сервер присваивает ему личный код и считывает посланные мобильным терминалом данные. Найдя соответствие массива спутниковых данных конкретного TOW с собственным, сохранённым массивом таких данных, СКТ-сервер высчитывает дифференциальную коррекцию.

Зная своё точное местоположение, СКТ-сервер может определить истинную дальность до спутников по формуле:

$$P = \sqrt{(x_{сп} - x_{скт})^2 + (y_{сп} - y_{скт})^2 + (z_{сп} - z_{скт})^2}, \quad (1)$$

где $x_{сп}$, $y_{сп}$, $z_{сп}$ – координаты спутника;

$x_{скт}$, $y_{скт}$, $z_{скт}$ – известные координаты СКТ-сервера.

После чего коррекция высчитывается как:

$$\Delta DGPS = P - P_{изм} \quad (2)$$

Таким образом, дифференциальные коррекции прибавляются к псевдодальностям спутников, измеренным мобильным терминалом. При известной точной позиции такая коррекция полностью устраняет все возможные ошибки несоответствия часов спутника и приёмника, а также ошибки, вызванные прохождением сигнала через атмосферу [3].

Скорректированные псевдодальности мобильного терминала и координаты спутника затем используются, чтобы рассчитать позицию GPS-приёмника с помощью метода наименьших квадратов. Подробная информация может быть найдена в [1].

Полученная позиция через TCP/IP протокол передаётся на основной сервер, который проверяет логин и закодированный пароль, имя объекта, связанного с данным мобильным терминалом. Эта информация заносится в таблицу на локальной базе данных основного сервера.

Программное обеспечение на мобильном терминале в большей степени схоже с таковым на СКТ-сервере. Процесс инициализации сообщений и чтения данных полностью идентичен. Отличия заключаются в передающей структуре мобильного терминала.

При запуске программы устройство считывает текстовый файл serverList.txt, в котором указаны координаты, IP-адреса и порты всех доступных СКТ-серверов, а также файл параметров, позволяющий динамически настроить работу мобильного терминала (использовать/не использовать камеру; время передачи данных на сервер в секундах; логин/пароль данного устройства; название объекта, связанного с мобильным терминалом; IP-адрес и порт основного сервера). Затем, после окончания каждой «эпохи», осуществляется проверка дистанции между СКТ-сервером и мобильным терминалом. Если она меньше или равняется 100 км, то принимается решение использовать данный СКТ-сервер.

Если в результате такой проверки СКТ-серверов не обнаруживается, то данные отправляются сразу на основной сервер без их последующей коррекции. Если задейст-

вована камера Raspberry Pi, то jpeg-фреймы с неё отправляются сразу на основной сервер, где сохраняются в специальную папку, автоматически создаваемую для каждого объекта системы.

Программа устойчива к разрывам связи и каждый раз пытается восстановить соединение. Это предусмотрено на случай возможных проблем с передачей данных или отключением серверов на определённый промежуток времени. При необходимости пользовательский интерфейс для наблюдения за объектами мониторинга и отображением их на карте может быть разработан самостоятельно. Подробные инструкции по созданию подобного приложения с использованием JavaScript и ASP.NET приводятся в статье [2].

Определение данных о дальности работы СКТ-серверов

В стандарте DGPS указана гарантия действия этого режима на дистанции до 100 км [4]. Необходимо пояснить, что подобная характеристика была дана при условии знания точного местоположения опорного GPS-приёмника (СКТ-сервера). Чтобы скорректированные псевдодальности мобильного терминала давали субметровую точность, необходимо задать положение СКТ-сервера в горизонтальной и вертикальной плоскости с точностью до дециметров.

В ходе многочисленных экспериментов это было подтверждено эмпирическим путём. Антенна установленного СКТ-сервера крепилась на двухметровом кронштейне, закреплённом на стене 12-этажного дома. Это обеспечивало хороший обзор неба и, как следствие, видимых спутников. Проблема заключалась в определении точного местоположения антенны. Спутниковые снимки от сервисов Google и Космоснимки имеют среднеквадратическую погрешность привязки 14 м. Кроме того, было невозможно измерить точную высоту дома с учётом высоты над эллипсоидом WGS-84, требуемую для задания координат СКТ-сервера.

Таким образом, единственным возможным вариантом определения местоположения оказалось усреднение координат GPS-приёмника с наименьшим параметром HDOP (англ. Horizontal Dilution of Precision - снижение точности в горизонтальной плоскости), полученных за большой промежуток времени. Это позволило вычислить итоговые координаты сервера: N43.169454°, E131.910073°, 55 м высоты над эллипсоидом WGS-84. В терминологии геодезии это координаты «опорной точки». Для тестирования базовых возможностей разработанного DGPS-режима второй приёмник крепился в метре от приёмника СКТ-сервера, коррекции которого должны были привязать итоговые координаты практически к местоположению опорной точки.



Рис. 7. Графическое отображение полученных результатов

На рисунке 7 показаны результирующие треки, полученные за час работы программы, где красный соответствует треку, псевдодальности которого были обработаны с помощью дифференциальных коррекций, а синий – трек, записанный приёмником сам по себе.

Необходимо отметить, что в каждом GPS-приёмнике установлен так называемый фильтр Калмана – сглаживающий фильтр, убирающий резкие выбросы измеряемых значений. Данный фильтр не использовался при получении показанного трека, поскольку расчёт позиции проводился программным методом. На данный момент добавление фильтра Калмана к обработке рассчитанных координат является приоритетной задачей данного проекта.

В результате проведённого исследования итоговая точность составила в среднем (по лучшему из рассмотренных результатов) 1,61 метра. Это заметно лучше показателей приёмника 4,36 метра.

Следует пояснить, что позиция СКТ-сервера была задана неточно. С учётом указанной в технических характеристиках точности приёмника Quectel SIRF IV L20 погрешность составляет приблизительно 2,5 метра в горизонтальной плоскости и 3,5 метра в вертикальной плоскости, что также объясняет полученные результаты.

Итак, на данный момент создано и успешно протестировано программное обеспечение для СКТ-сервера и мобильного терминала, подготовлены все необходимые компоненты для сборки устройства.

Ввиду особенностей настройки DGPS-режим, полученная точность дифференциальных коррекций на близкой дистанции составила 2,29 метров. Поскольку DGPS главным образом устраняет эффекты задержки сигнала от его прохождения через атмосферу, данный класс точности сохранится на расстоянии вплоть до 100 км. Возможное ухудшение точности мобильного терминала может быть связано с многократным переотражением сигнала от зданий, в особенности – от вертикальных стен, и составляет 2 метра по стандарту классификации ошибок GPS.

Таким образом, при неточном знании позиции СКТ-сервера выгода от использования расширенной системы мониторинга относительна. Тем не менее, программное обеспечение выполняет поставленные задачи и требует более точных стартовых параметров для корректной работы.

Структура приёма-передачи данных от мобильного терминала к СКТ-серверу и от СКТ-серверов к основному серверу также была протестирована в рамках проведённых испытаний программы и доказала свою работоспособность.

1. Сметанин, С.И. Способ реализации дифференциального режима на базе стандартных GPS-приемников / С.И. Сметанин, В.А. Игнатьев, Ю.А. Левашов // Динамика сложных систем. Радиотехника. – 2014. – №3, Т. 12. – С. 25-28.
2. Jay Farrell, Senior Member, IEEE and Tony Givargis. Differential GPS Reference Station Algorithm – Design and Analysis // IEEE Transactions on control systems technology. – 2000. – №3. – P. 521.
3. Mobinder S., Grewal, Angus P. Andrews, Chris G. Bartone. Global Navigation Sattelite Systems, Inertial Navigation, and Integration. - A john wiley & sons, inc., publication. – 2013. – P. 561.
4. SiRF Binary Protocol Reference Manual // SiRF Technology Inc, 2008. – P. 1–65.