

# GNSSTOOLKIT — НОВАЯ БИБЛИОТЕКА ДЛЯ СТАНДАРТНЫХ РАСЧЕТОВ В ОБЛАСТИ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

**М.А. Капитонов** (НПК «Джи Пи Эс Ком»)

В 2013 г. окончил магистратуру «МАТИ» — РГТУ им. К.Э. Циолковского по специальности «прикладная математика и информатика». В 2012 г. проходил обучение в Университете г. Кассель (Германия) по направлению «прикладная математика». С 2011 г. работает в НПК «Джи Пи Эс Ком», в настоящее время — инженер-программист.

**М.И. Татарченко** (НПК «Джи Пи Эс Ком»)

В 2011 г. окончил «МАТИ» — РГТУ им. К.Э. Циолковского по специальности «прикладная математика и информатика». В 2012–2013 гг. изучал компьютерные технологии в Университете г. Фрайбург (Германия). С 2011 г. работает в НПК «Джи Пи Эс Ком», в настоящее время — инженер-программист.

Для осуществления успешной коммерческой деятельности в современных условиях требуется обеспечить максимально быструю разработку и выпуск новой продукции. Особенно это касается такой динамично развивающейся области, как спутниковое позиционирование. Геодезические приемники и программное обеспечение, используемые при работе с ГНСС, представляют собой сложные программно-аппаратные комплексы. При этом типовые задачи, решаемые подобными системами, зачастую схожи. В свете этого особую важность приобретает создание стандартных решений, которые могли бы легко и эффективно использоваться производителями навигационного оборудования и программного обеспечения. Инструментарий этих решений должен позволять разработчику не задумываться о типовых низкоуровневых алгоритмах и концентрироваться на решении конечной задачи.

Данная цель являлась основной в проекте GNSStoolkit —

библиотеке разработчика, написанной на языке C++ и предоставляющей интерфейс программирования приложений (API) для стандартных расчетов в области спутниковой навигации. Библиотека позволяет осуществлять спутниковое позиционирование на базе ГНСС ГЛОНАСС и GPS, является полностью объектно-ориентированной и может работать на многих операционных системах (Windows, Windows CE, Linux, Android и др.).

Существует ряд других открытых и коммерческих проектов, направленных на решение аналогичных задач. Одной из наиболее известных открытых разработок является библиотека GPSTk. Она написана на языке C++ и содержит алгоритмы для решения широкого спектра задач, связанных с навигацией. Основная идея разработчиков — предоставить пользователю или исследователю возможность сосредоточиться непосредственно на решении требуемой задачи, а не на низкоуровневом программировании типовых ма-

тематических алгоритмов. К сожалению, в GPSTk в настоящее время не поддерживается работа со спутниковой системой ГЛОНАСС.

Аналогичный проект под названием «The Essential GNSS Project» представляет собой минималистичную C++ библиотеку для решения задач навигации. Как и в случае с GPSTk, все реализованные математические алгоритмы позволяют работать только со спутниковой системой GPS.

Компания NovAtel предлагает коммерческое решение Waypoint SDK, предоставляющее широкие возможности постобработки данных и реализующее функциональность, аналогичную программным комплексам GrafNav и Inertial Explorer. При этом поддерживается только операционная система Windows в двух вариантах интерфейса — C++ и .NET.

Следует отметить также открытую разработку RTKLIB, представляющую собой набор готовых приложений. Они предназначены для постобработки и

решения задач позиционирования в режиме реального времени, конвертации данных и визуализации результатов. Кроме того, имеются утилиты для организации сетевого взаимодействия.

#### ▼ Структура библиотеки GNSSToolkit

Изучив существующие аналоги, авторы пришли к выводу о необходимости разработки собственной библиотеки, поддерживающей работу с любой конфигурацией наблюдаемых спутников ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, GPS + ГЛОНАСС) и навигационным оборудованием различных производителей. Библиотека написана на языке программирования C++ (ANSI), что позволяет легко использовать ее на многих операционных системах. Структурно библиотека состоит из трех модулей — Core, Receiver Basics и Utility.

Модуль Core является главным в системе. Именно здесь содержатся основные средства для работы со временем и информацией о спутниках (эфемериды, пространственное положение спутников и т. п.), а также полный набор алгоритмов для решения задач позиционирования. Кроме того, в модуле содержатся конвертеры, позволяющие работать с наиболее распространенными форматами данных (NMEA, RINEX, RTCM 2 и RTCM 3) и протоколами приемников ГНСС компаний NovAtel, Navis и Trimble.

Модуль Receiver Basics реализует набор типовых средств, необходимых для обработки данных приемников ГНСС. Здесь содержится модуль, позволяющий унифицированным образом управлять оборудованием различных производителей. Также в этом модуле имеется алгоритм, реализующий основные механизмы режима кинематики реального времени (RTK). Присутствует функция сбора данных, которая обеспечивает

получение и хранение «сырых» данных различными типами спутниковых приемников. Еще одно средство — управление конфигурациями, требующееся для упрощения настройки параметров решения.

Модуль Utility содержит ряд общих средств, которые могут понадобиться при разработке прикладного программного обеспечения — работа с потоками, файлами, межпоточное взаимодействие, общие математические функции и т. п.

#### ▼ Математические алгоритмы

В разработанной системе реализовано три варианта решений навигационных задач: автономное кодовое, дифференциальное кодовое и в режиме плавающей фазы. Поддерживается ряд механизмов фильтрации: сглаживание кодовых данных по фазе, фильтр Калмана, RAIM. При построении решений задач позиционирования использовались стандартные модели, принятые в данной области.

#### Автономное кодовое решение

Алгоритм автономного кодового решения позволяет определять координаты приемника, опираясь только на данные, получаемые в навигационных сообщениях от спутников, наблюдаемых им.

Общее уравнение псевдодальности ( $P$ ) имеет следующий вид [1]:

$$P^A_i = R^A_i + c(dt_A - dt^i) + I^A_i + T^A_i + dm^A_i + \varepsilon^A_i,$$

где  $R^A_i$  — геометрическая дальность между спутником  $i$  и приемником  $A$ ;

$dt_A$  — поправка часов приемника  $A$ ;

$dt^i$  — поправка часов спутника  $i$ ;

$I^A_i$  — значение ионосферной поправки;

$T^A_i$  — значение тропосферной поправки;

$dm^A_i$  — влияние многопутности на сигнал;

$\varepsilon^A_i$  — ошибка измерений (включая шум измерений, задержки аппаратуры приемника и спутника).

Включить приведенное уравнение псевдодальности в расчеты можно после вычисления моделируемых поправок и координат спутников. При этом используются модель Клобучара для учета ионосферной поправки [2], модель Хопфилда со значениями стандартной атмосферы для вычисления тропосферной задержки [3], определение координат и поправки часов спутника по данным навигационного сообщения [4, 5] и др.

Окончательный вид уравнения псевдодальности представлен следующим образом [1]:

— для расчета по одной ГНСС:

$$-a^A_i dR^A_i + c dt_A = P^A_i - R^A_i + c dt^i - I^A_i - T^A_i + \varepsilon^A_i;$$

— для расчета по объединенному созвездию спутников двух ГНСС:

$$-a^A_i dR^A_i + c dt(GPS)_A + c dt(GЛОНАСС)_A = P^A_i - R^A_i + c dt^i - I^A_i - T^A_i + \varepsilon^A_i.$$

По данным измерений составляется система линейных уравнений, где неизвестными параметрами являются поправки к координатам приемника, а также поправки часов приемника. Подробный алгоритм инициализации и решения системы представлен в [1, 6].

Процесс автономного кодового решения сходится независимо от существования априорных координат приемника. Наличие и качество исходных координат влияет только на количество эпох, необходимых для получения решения достаточного уровня точности.

#### Дифференциальное кодовое решение

Основой дифференциального кодового определения местоположения мобильной станции является внесение поправок для значений псевдодальности,

рассчитанных на базовой станции, в процесс вычисления координат на мобильной станции. Оба приемника теоретически могут наблюдать отличающиеся по составу созвездия спутников ГНСС, однако в вычислениях, в ходе рассматриваемого метода, принимают участие измерения, полученные только от одного и того же набора наблюдаемых спутников.

Одним из стандартных методов учета поправок измерений базовой станции для коррекции данных приемника мобильной станции является формирование так называемых одинарных разностей — разностей аналогичных параметров для обоих приемников для одного и того же наблюдаемого спутника. Параметр одинарной разности псевдодальностей можно выразить с помощью разности составляющих в следующем виде [1]:

$$\Delta P_{BS,MS^i} = (R_{MS^i} - R_{BS^i}) + c(dt_{MS} - dt_{BS}) + (I_{MS^i} - I_{BS^i}) + (T_{MS^i} - T_{BS^i}) + (e_{MS^i} - e_{BS^i}).$$

Здесь верхний индекс  $i$  указывает на образование разностей для данных одного спутника, а нижние индексы  $BS$  и  $MS$  обозначают базовую и мобильную станцию, соответственно.

Очевидно, что формирование подобного рода разности наблюдений исключает влияние поправки часов спутника на результаты измерений, однако из-за влияния остаточных ошибок (шумы приемника, многопутность и другие) одновременно двух приемников аналогичная ошибка одинарной разности наблюдений имеет большую величину. Особенно сильно данный эффект проявляется в том случае, если базовая и мобильная станции находятся достаточно далеко друг от друга.

В процессе решения используется одинарная разность между значениями скорректированных псевдодальностей, определяемых следующим об-

разом: из параметра псевдодальности, полученного из навигационного сообщения, вычитаются значения моделируемых ионосферной и тропосферной поправок для приемников базовой и мобильной станций.

При формировании одинарных разностей для всех используемых спутников инициализируется система линейных уравнений, аналогичная построенной для автономного кодового решения. Для расчета применяются невязки одинарных разностей геометрических расстояний и скорректированных псевдодальностей для соответствующего спутника. Также введена диагональная весовая матрица, которая заполняется в соответствии со значениями углов возвышения наблюдаемых спутников.

Окончательное решение в ходе данного метода позиционирования строится аналогично методу, описанному для автономного кодового решения, за исключением того, что в случае переопределенной системы линейных уравнений используется взвешенный метод наименьших квадратов, призванный уменьшить влияние измерений наблюдаемых спутников, находящихся вблизи горизонта.

#### Решение по плавающей фазе

Фазовые данные, получаемые приемниками в навигационном сообщении, как известно, намного точнее, чем кодовые. Однако их использование несет в себе дополнительную сложность в связи с наличием неизвестного параметра — фазовой неоднозначности. При получении решения по плавающей фазе параметр фазовой неоднозначности только оценивается, но не используется для получения поправок к координатам приемника.

Аналогично дифференциальному кодовому решению, в этом алгоритме используются коор-

динаты самого приемника, которые подлежат уточнению, а также данные базовой станции. Наряду с фазовыми данными с обоих приемников, в алгоритме применяются также и значения псевдодальности.

В качестве априорных координат мобильной станции используются координаты, полученные в ходе дифференциального кодового решения.

В основе рассматриваемого метода лежит внесение поправок для кодовых и фазовых данных приемника, рассчитанных на базовой станции. За счет образования двойных разностей (между двумя приемниками и между текущим и опорным спутником) сокращается ряд параметров, участвующих в образовании кодовых и фазовых данных, а также уменьшаются некоторые возможные ошибки, вносящие погрешность в конечный результат вычислений. Параметры псевдодальностей и фазовых данных для обоих приемников корректируются с учетом значений моделируемых атмосферных поправок.

С учетом скорректированных параметров на базовой станции для данных по каждому наблюдаемому спутнику вычисляются поправки, применяемые затем для данных мобильной станции [6]:

$$\begin{aligned} \alpha_{BS^i} &= R_{BS^i} - R_{BS^0} - P_{BS^i} + P_{BS^0}; \\ \beta_{BS^i} &= R_{BS^i} - R_{BS^0} - \Phi_{BS^i} + \Phi_{BS^0}, \end{aligned}$$

где  $\Phi_{BS^i}$  и  $\Phi_{BS^0}$  — скорректированная фазовая дальность между спутником и базовой станцией;  $P_{BS^i}$  и  $P_{BS^0}$  — скорректированная псевдодальность между спутником и базовой станцией (индекс  $i$  — номер спутника, индекс  $0$  — опорный спутник).

Используемая в вычислениях матрица коэффициентов состоит из направляющих косинусов мобильной станции для обеих групп кодовых и фазовых данных, а также включает значения длины волны сигнала L1 только

для фазовых данных. В матрицу невязок входят двойные разности кодовых и фазовых данных, скорректированные с учетом вычисленных поправок по приведенной выше формуле.

Для спутников ГЛОНАСС процесс решения несколько модифицируется ввиду того, что длина волн сигналов каждого спутника различна. Поэтому в матрице коэффициентов для фазовых данных включено соответствующее значение длины волны, а в матрице невязок двойные разности фазовых данных корректируются не только прибавлением поправки, но и с учетом априорно оцениваемого значения фазовой неоднозначности в данных опорного спутника.

В конечном итоге, после заполнения вспомогательных матриц, система решается с помощью взвешенного метода наименьших квадратов.

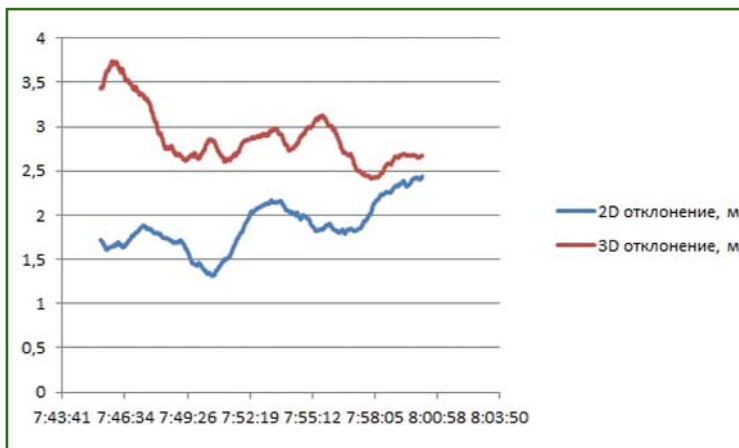
▼ **Экспериментальная проверка**

Для оценки качества работы математических алгоритмов были проведены экспериментальные расчеты. Позиция вычислялась в режиме «нулевой базы» на основании «сырых» данных, собранных с помощью приемников NovAtel OEM 615 и антенны геодезического класса, при хороших условиях приема сигнала. Измерения велись с частотой 1 Гц, использовалась маска угла возвышения 5°. Для оценки точности позиционирования полученные координаты сравнивались с заранее известными координатами точки. На рис. 1–6 приведены отдельные графики решений, построенные по одним и тем же данным за интервал в 15 минут.

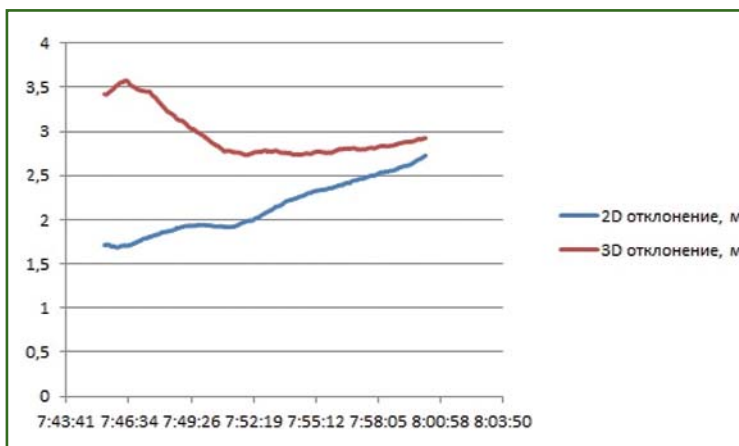
Как видно из приведенных графиков, стабильное решение получается во всех случаях. При этом сглаживание данных дает заметное улучшение при любой конфигурации решения. При построении кодового диф-

ференциального решения по ГЛОНАСС максимальное отклонение от известной точки не превышает 50 см (30 см при сглаживании данных), при при-

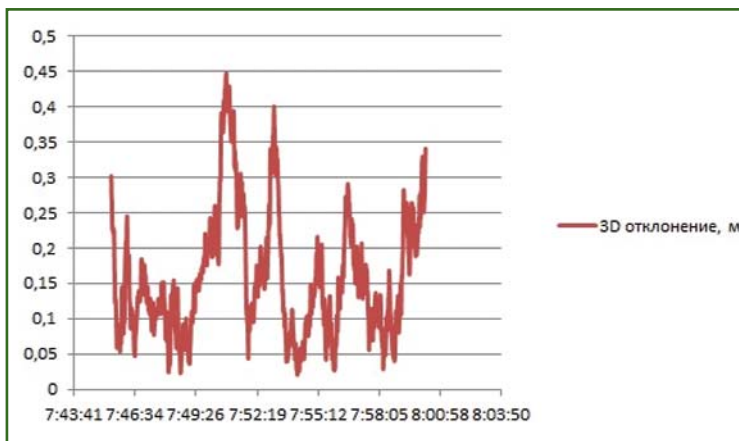
менении GPS этот результат становится еще лучше. Точность определения положения в режиме плавающей фазы по данным спутников GPS составляет



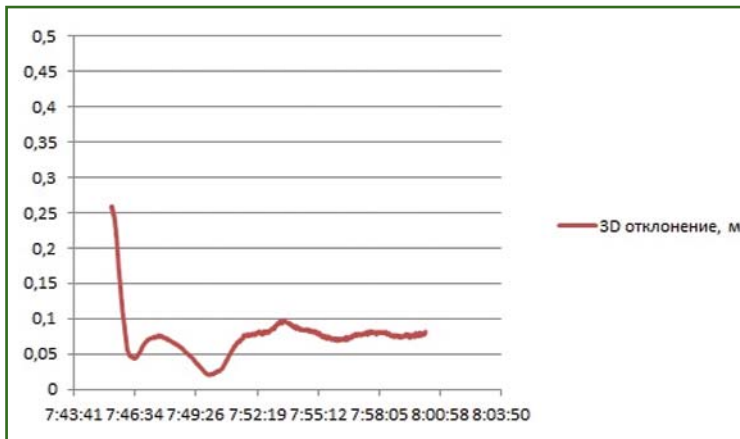
**Рис. 1**  
Автономное кодовое решение (GPS + ГЛОНАСС)



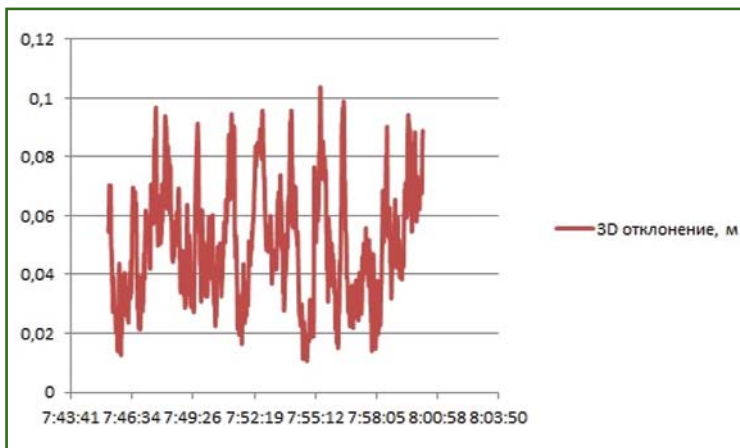
**Рис. 2**  
Автономное кодовое решение со сглаживанием (GPS + ГЛОНАСС)



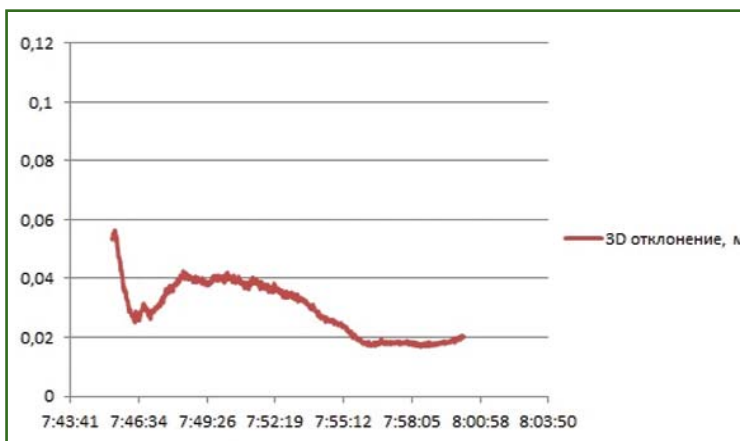
**Рис. 3**  
Кодовое дифференциальное решение (ГЛОНАСС)



**Рис. 4**  
Кодовое дифференциальное решение со сглаживанием (ГЛОНАСС)



**Рис. 5**  
Решение по плавающей фазе (GPS)



**Рис. 6**  
Решение по плавающей фазе со сглаживанием (GPS)

12 см, включение сглаживания данных повышает уровень точности до 6 см.

Разработанная универсальная программная библиотека

GNSSToolkit позволяет решать задачи позиционирования различными методами независимо от конфигурации наблюдаемых спутников, а также содержит

расширенный набор алгоритмов для применения в сфере спутниковой навигации. Результаты тестирования библиотеки подтвердили стабильность ее функционирования, а также достаточный уровень точности при работе в стандартных условиях.

Получить более подробную информацию о библиотеке, задать вопросы и ознакомиться с расширенным отчетом по данным исследованиям можно, обратившись в НПК «Джи Пи Эс Ком» ([info@gpscom.ru](mailto:info@gpscom.ru)).

#### ▼ Список литературы

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. — М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005.
2. John A. Klobuchar. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. — IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — Vol. AES-23, No. 3, May 1987.
3. С. Chaib, Z. Souar, M. Haddadi. Measurements for GPS meteorological applications. — Revue des Energies Renouvelables. — Vol. 10. — # 2(2007). — P. 299–309.
4. Global Positioning Systems Directorate Systems Engineering & Integration Interface Specification IS-GPS-200G. 5 Sep 2012.
5. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.1.2008.
6. Серапинас Б.Б. Глобальные системы позиционирования. Издание 3-е. — М.: ИКФ «Каталог», 2002.

#### RESUME

The GNSSToolkit is considered. It includes a set of standard algorithms. These algorithms allow solving GNSS positioning tasks in three modes including the coded autonomous mode, the coded differential mode and the floating phase mode. The library contains converters for processing data in the NMEA, RINEX, RTCM 2 and RTCM 3 formats as well as the protocols for the receivers of the following manufacturers: NovAtel, Navis и Trimble.