

УДК 528-187.4

## ПОЛУЧЕНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ КООРДИНАТ С САНТИМЕТРОВОЙ ТОЧНОСТЬЮ НА ПРИЕМНИКЕ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

## ACQUIRING OF NAVIGATIONAL COORDINATES WITH CENTIMETER PRECISION USING A GENERAL PURPOSE RECEIVER

**С. П. Лобанок**

инженер-конструктор I категории НПООО «ОКБ ТСП»

**S. Lobanok**

Дата поступления в редакцию — 04.08.2015 г.

В статье рассмотрен вопрос получения навигационных координат с сантиметровой точностью, приведен краткий обзор существующих методов увеличения точности с помощью дифференциальных поправок, описаны возможные проблемы применения поправок и варианты их решения, а также результаты проведенных автором экспериментов.

In this article it was discussed the question of navigation coordinates' acquiring with centimeter precision, was provided the short review of present means for precision improvement using differential corrections, were described probable issues of corrections' application and ways of their solutions. Also results of experiments, conducted by the author, were shown.

### **Введение.**

Глобальные навигационные спутниковые системы, такие как GPS и ГЛОНАСС, допускают ошибку определения координат на уровне 5–15 м, что многократно превышает допустимую для многих прикладных задач. Например, параллельное вождение сельскохозяйственной техники в рамках систем точного земледелия требует точность порядка 10 см «от прохода к проходу», получаемую в режиме реального времени.

Основными источниками ошибки, приводящими к ухудшению точности, являются искажения сигнала от спутника в результате его прохождения через атмосферу, а также погрешности определения координат спутников, вычисляемых по принимаемым от них эфемеридам. Данные ошибки можно уменьшить с помощью постобработки навигационных дан-

ных, используя более точные модели атмосферы и точные значения эфемерид для интервала измерения, однако в реальном времени единственным возможным вариантом являются системы дифференциальной коррекции. В общем случае они состоят из одной или нескольких наземных базовых станций, координаты которых известны с большой точностью, и канала передачи поправок от них к потребителю. Существует множество глобальных и региональных сервисов предоставления поправок, сильно отличающихся как по своей стоимости и доступности, так и по точности.

– Открытые спутниковые системы дифференциальных поправок (американская WAAS, европейская EGNOS, японская MSAS и т. д., объединенные под общим названием SBAS), требующие для работы только поддержку данного

вида поправок в навигационном приемнике, что встречается очень широко, и нахождение в зоне охвата системы. Обеспечивают точность до единиц метров.

– Коммерческие спутниковые системы дифференциальных поправок (OmniSTAR, StarFire), требующие для работы наличие специализированного профессионального приемника и дополнительную оплату за право пользования сервисом. Как правило, они предоставляют на выбор несколько различных типов поправок, обеспечивающих точность менее 1 м (OmniSTAR VBS, StarFire SF1), 10 см (OmniSTAR HP/XP, StarFire SF2), 3,8 см (CenterPoint RTX), 2,5 см (CenterPoint RTK, StarFire RTK).

Кроме этого существуют различные локальные системы, обычно предоставляющие поправки через радиомодемы, сотовые модемы или Интернет.

По принципу действия дифференциальные поправки можно разделить на две группы — DGPS (поправки к кодовым псевдодальностям) и RTK (поправки к фазе несущей сигналов). Сантиметровая точность может быть обеспечена только использованием фазовых поправок RTK, имеющих, однако, ряд недостатков — необходимость наличия базовой станции не далее 10–20 км от приемника (с увеличением расстоя-

ния до базовой станции получение точного решения сильно затрудняется), необходимость дополнительных временных затрат на сходимость решения (от нескольких секунд до нескольких десятков минут, в зависимости условий приема, расстояния до базовой станции и много другого), большая чувствительность к условиям приема (изменение группировки используемых спутников может привести к срыву точного решения и необходимости повторения длительного периода сходимости). Кроме того, алгоритм применения RTK поправок связан с разрешением неопределенности, возникающей при определении фазы навигационного сигнала, и поэтому имеет два возможных состояния, соответствующих разрешенной и неразрешенной неоднозначности [1].

#### Экспериментальные исследования.

Целью экспериментов было выяснить, возможно ли получить точность определения координат в течение времени измерения и от измерения к измерению в пределах единиц сантиметров, как в статике, так и в динамике, используя при этом непрофессиональные навигационный приемник и антенну, вкупе с одним из доступных сервисов предоставления дифференциальных поправок RTK.

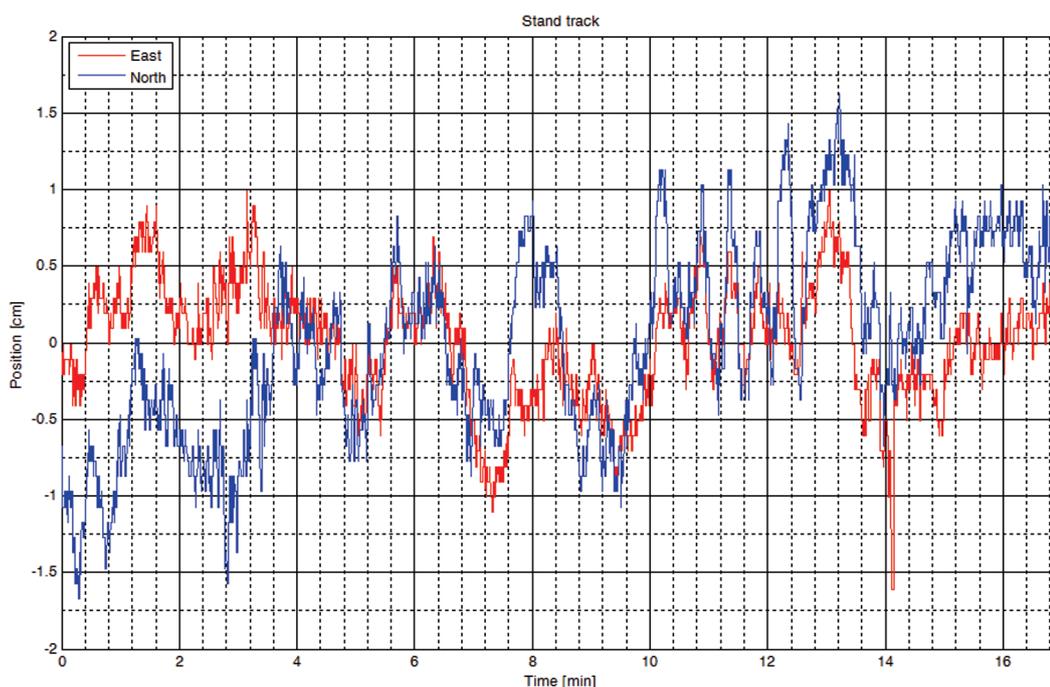


Рис. 1. Дрейф координаты навигационного приемника по широте и долоте со временем

От применения спутниковых систем дифференциальной коррекции принято решение сразу отказаться, ввиду либо их недостаточной точности, либо необходимости наличия специализированных приемников с поддержкой соответствующего типа поправок.

Непрофессиональные навигационные приемники, как правило, либо не имеют поддержки дифференциальных поправок вообще, либо поддерживают только кодовые поправки DGPS. Реализация алгоритмов RTK в стороннем программном обеспечении накладывает важное ограничение на тип используемого приемника — так как поправки применяются к первичной навигационной информации (псевдодальностям, фазе несущей и т. д.), приемник должен поддерживать вывод первичных необработанных данных. Данную функцию имеют, например, следующие навигационные чипы:

- NovAtel OEMStar;
- U-blox LEA-4T / LEA-5T / LEA-6T / NEO-6T;
- SkyTraq S1315F;
- NVS NV08C и, соответственно, все приемники, построенные на основе этих чипов.

Переключение между обычным режимом работы и режимом выдачи первичных данных обычно осуществляется с помощью специальных команд для навигационного чипа (если используется готовый приемник, он должен поддерживать возможность передачи внешних команд управления на чип). Для выдачи первичной информации разные производители, как правило, используют свой собственный формат данных. Частота выдачи данных также может сильно отличаться — от 1 до 20 Гц и более. Для лучшей работы алгоритма RTK желательно использовать как можно большую частоту выдачи данных.

В экспериментах использовался модуль на основе чипа NVS NV08C и GPS/ ГЛОНАСС антенна, подключаемые к компьютеру через COM-порт. Навигационный чип NV08C позволяет принимать сигналы L1 GPS и L1 ГЛОНАСС, имеет 32 канала и частоту выдачи данных до 10 Гц. Для разрешения фазовой неоднозначности приема применялась стратегия LAMBDA [2] и ее расширение MLAMBDA [3]. В качестве источника дифференциальных поправок использовался локальный сервис, передающий данные от базовых станций через Интернет.

В первую очередь была исследована работа приемника в статическом режиме. На рис. 1 изо-

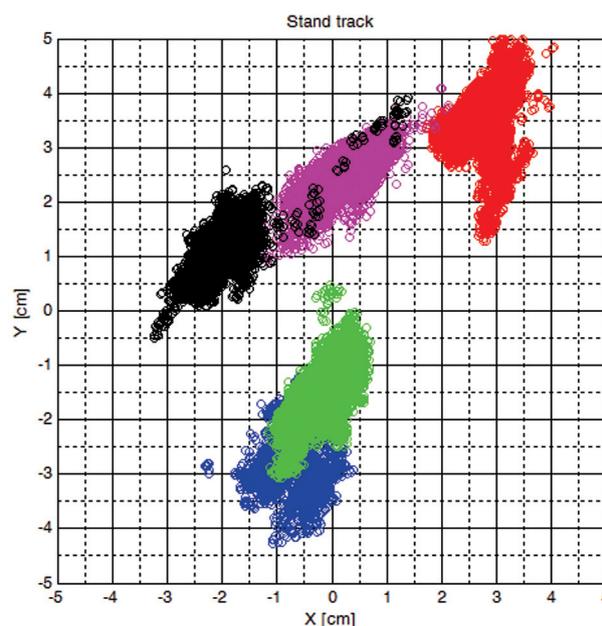


Рис. 2. Разница определения координат одной точки от измерения к измерению

бражены два графика, представляющие собой дрейф определяемой приемником координаты по широте и долготе с течением времени в установленном режиме (шаг сетки по времени — 1 мин, по координатам — 1 см). СКО отклонения полученной координаты от своего среднего значения составило менее 1 см, максимальное отклонение не превышало 2 см.

Чтобы оценить статическую ошибку определения координат от измерения к измерению, был проведен ряд одинаковых опытов в течение месяца, в которых приемник располагался в одной и той же точке, и полученные в них результаты были сведены на одном графике (рис. 2). СКО результатов всех измерений составило 3 см, что говорит о том, что применяемая методика измерений удовлетворяет требуемой точности не только относительного, но и абсолютного определения координат.

Как уже упоминалось, на сходимость решения RTK влияет множество различных факторов. Одним из самых критичных является смена рабочего созвездия спутников, часто приводящая к срыву точного решения. В случае неустойчивого приема сигнала некоторых спутников из-за наличия перекрывающих обзор объектов, смена созвездия может происходить достаточно часто, в результате чего достигнуть стабильного

точного решения RTK становится почти невозможным. На рис. 3 показаны результаты одного из измерений, хорошо иллюстрирующие данную зависимость. На первом графике показано изменение количества спутников, используемых в навигационном решении, с течением времени. В данном эксперименте оно колебалось в пределах от 14 до 16. На втором графике показан коэффициент, характеризующий сходимость используемого алгоритма разрешения неоднозначности. Когда данный коэффициент превышает установленный порог (показан на графике горизонтальной жирной линией), фазовая неоднозначность считается разрешенной, а полученное решение точным. На графике видно, что добавление или удаление из навигационного решения даже одного спутника, в большинстве случаев приводит к сбросу коэффициента разрешения неоднозначности до 1, что означает полный перезапуск алгоритма сходимости. На третьем графике приведены полученные в решении координаты по широте и долготе. При

наличии точного решения (коэффициент разрешения неоднозначности больше порога) обе координаты достаточно стабильны и отклоняются от своего среднего значения не более чем на 2 см. При срыве решения они скачком смещаются на 5–15 см в сторону и их колебания заметно увеличиваются.

Одним из возможных решений данной проблемы является предварительная фильтрация используемых спутников. Два основных доступных для анализа параметра, содержащихся в навигационной информации — отношение сигнал/шум и угол возвышения спутника над горизонтом. Проанализировав изменение рабочего созвездия, было установлено, что больше всего проблем вызывают спутники с углами возвышения менее 15–20°, хотя отношение сигнал/шум для них обычно не значительно меньше спутников с отличной видимостью (40–45 дБ/Гц в среднем). Необходимую величину порога угла возвышения стоит выбирать исходя из условий работы навигационного приемника — в городе

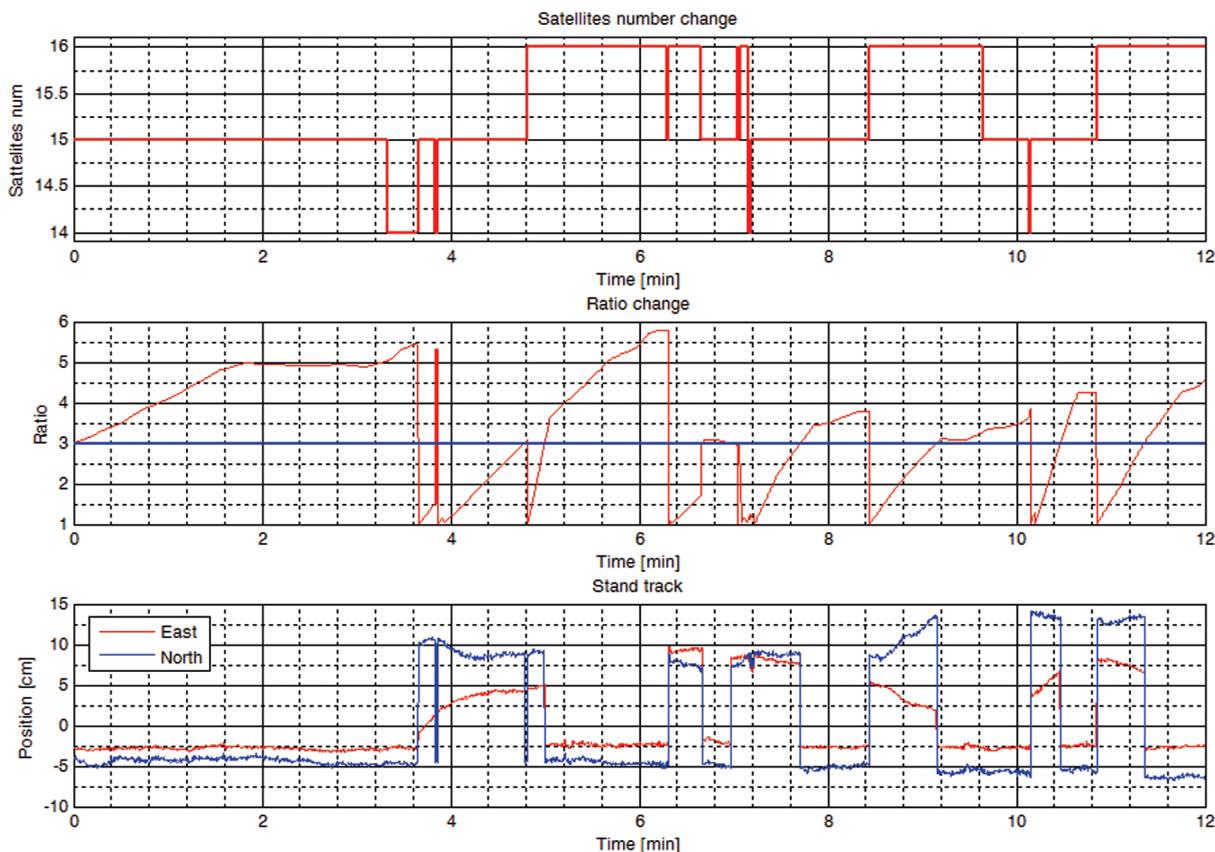


Рис. 3. Влияние изменения состава используемых спутников на получение навигационного решения

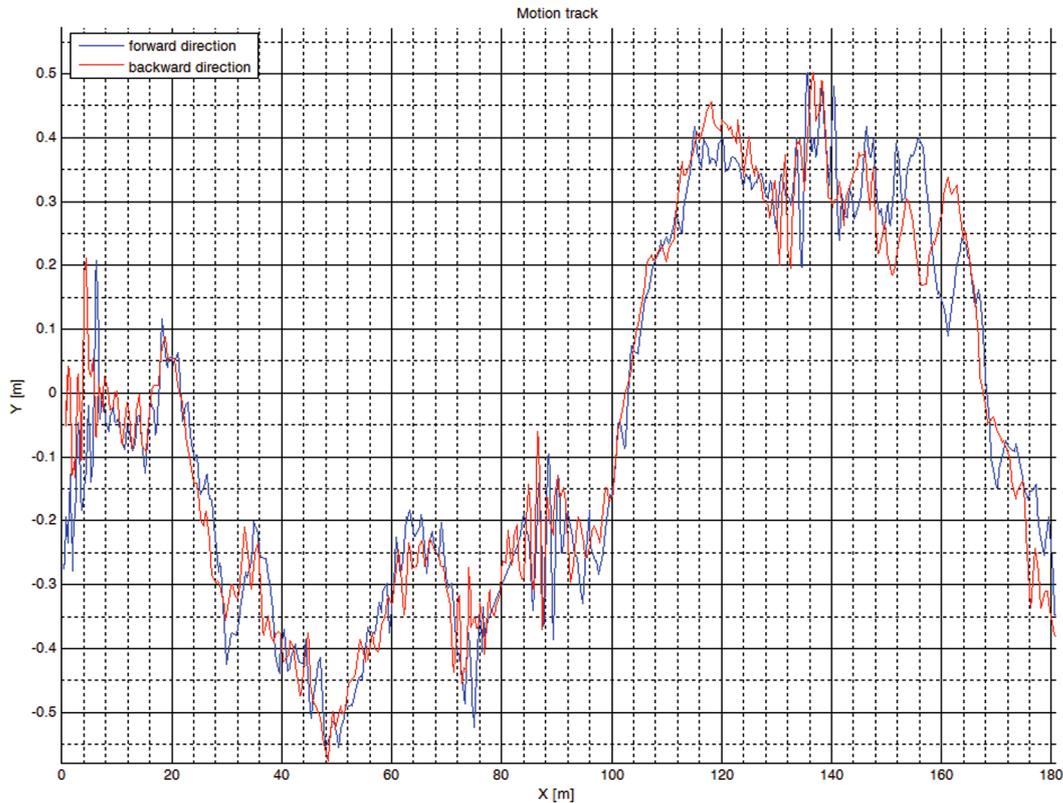


Рис. 4. Трек движения навигационного приемника вдоль колеи в прямом и обратном направлении

она зависит от высоты и плотности находящейся рядом застройки и может составлять 25–30°, в то время как в чистом поле ее можно снизить до 10–15°. Однако введение высокого порога уменьшает количество используемых спутников и ухудшает их геометрический фактор, что может снизить точность и стабильность полученного решения, в том числе до полной невозможности решения навигационной задачи из-за снижения количества спутников ниже 4.

Более глобальным вариантом является параллельный запуск нескольких вычислительных процессов, каждый из которых получает навигационное решение с учетом своего собственного набора настроек, и выбор в каждый момент времени наилучшего из текущих результатов в соответствии с заранее выбранным критерием. Таким образом можно одновременно получить решения, найденные с помощью всех видимых в данный момент спутников, и решения только с частью видимого созвездия, отдельные результаты для спутников GPS, спутников ГЛОНАСС и совместный GPS+ГЛОНАСС, отдельные результаты для разных настроек алгоритма раз-

решения неоднозначности и т. д. Эксперименты показали, что такое решение наиболее универсально, так как в зависимости от множества внешних факторов наилучший результат может давать то один, то другой набор параметров.

Следующим этапом была проверка точности получаемых координат в движении. На рис. 4 представлены два трека, полученные в результате проездов по полю по заранее размеченному пути в прямом и обратном направлении, имитирующие реальную обстановку и траекторию движения сельскохозяйственной техники при работе.

СКО величины отклонения между двумя треками составило 7 см, максимальное отклонение не превышало 20 см. Так как в данной погрешности есть составляющие неточности определения абсолютных координат и настоящего отклонения от установленного пути в ходе движения, можно говорить, что используемая методика измерений позволяет получить реальную достижимую точность ведения техники по маршруту, параллельному данному, порядка 10 см.

**Заключение.**

Таким образом, получение координат с сантиметровой точностью с помощью навигационного приемника общего назначения, как в статике, так и в динамике, является достижимым, но имеет ряд особенностей.

– Метод DGPS, основанный на использовании кодовых поправок и имеющий встроенную поддержку во многих недорогих навигационных чипах, не позволяет достичь требуемой точности, что ведет к необходимости использования приемников с поддержкой вывода первичной навигационной информации и решения навигационной задачи с применением поправок в стороннем программном обеспечении.

– Метод RTK, основанный на использовании фазовых поправок, сам по себе гораздо более требовательный к качеству приемной антенны, уровню принимаемого сигнала и т. д., чем методы, основанные на использовании кодовых поправок. Необходимость разрешения фазовой неоднозначности ведет к тому, что в отдельных случаях точное решение может быть получено только после длительного этапа накопления, и на очень небольшой интервал времени.

– Решение навигационной задачи с применением фазовых поправок очень чувствительно к изменению используемой группировки спутников, что требует дополнительной фильтрации и

отбрасывания из решения сигналов от потенциально ненадежных спутников.

– Навигационные чипы общего назначения в большинстве случаев позволяют принимать сигналы GPS/ГЛОНАСС только на одной частоте L1, в то время двухчастотный L1/L2 прием, используемый в профессиональных приемниках, позволяет достичь гораздо более высокой точности и стабильности получаемых результатов. Кроме этого, существует и ряд других принципиальных отличий между профессиональными и потребительскими навигационными приемниками, затрудняющих достижение высоких результатов на последних [4].

**Литература:**

1. Carcanague S., Julien O., Vigneau W., Macabiau C. Finding the right algorithm: Low-cost single-frequency GPS/GLONASS RTK for road users. *J. InsideGNSS*, 2013, No. 6, 70–80.
2. Teunissen, P. J. G. The least-square ambiguity decorrelation adjustment: A method for fast GPS ambiguity estimation. *J. Geodesy*, 1995, vol. 70.
3. Chang X.-W., Yang X., Zhou T. MLAMBDA: A modified LAMBDA method for integer least-squares estimation. *J. Geodesy*, 2005, vol. 79.
4. Carcanague S. Low-cost GPS/GLONASS precise positioning algorithm in constrained environment. Toulouse: Institut national polytechnique de l'Universite de Toulouse, 2013.