

СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДА RTK

И. О. Митрахович

Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

e-mail: immitrik@gmail.com

Настоящее исследование связано с расширением области применения глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС). Все проведенные эксперименты были посвящены разработке алгоритма получения углов ориентации мобильных объектов с помощью спутниковых сигналов. Для получения и обработки экспериментальных данных использовались адаптивные фильтры. Полученные результаты применимы для решения ряда проблем, связанных с глобальным позиционированием и навигацией.

Ключевые слова: ГНСС; RTK; фильтр Калмана; углы ориентации.

SYSTEM FOR DETERMINING OBJECTS ORIENTATION ANGLES IN SPACE BY REAL TIME KINEMATIC METHOD

I. A. Mitrakhovich

Belarusian State University

Minsk, Belarus

This research is connected with the expansion of global satellite navigation systems application. All the experiments conducted were devoted to the development of the algorithm of obtaining the mobile objects orientation angles using satellite signals. For obtaining and processing of experimental data adaptive filters were used. The results obtained can be applied for solving a number of problems connected with global positioning and navigation.

Keywords: GNSS; RTK; Kalman filter; orientation angles.

ВВЕДЕНИЕ

Логическим развитием глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) стала разработка метода относительной кинематики. При использовании этого подхода во время измерений один спутниковый приемник (локальная базовая станция) находится на одной и той же точке (как правило с известными координатами), а другой – перемещается. Метод относительной кинематики позволял определять приращения координат между базовой станцией и снимаемой точкой, расположенными на расстоянии в 2–5 км друг от друга, с точностью до 1 см [1].

Усовершенствованием этого подхода, обладающего более высокой оперативностью, стал метод RTK (относительная кинематика в режиме реального

времени) для определения координат снимаемых точек местности без предварительного сбора информации. Использование радиосвязи со схемой передачи сигнала «один-ко-многим» позволяло определять приращения координат между базовой станцией и подвижными приемниками, расположенными друг от друга на расстоянии 2–20 км, за время, не превышающее нескольких минут. При этом достигаемый данным подходом уровень погрешности навигационных решений не превышает 1 м [2].

Метод RTK, в свою очередь, может использоваться не только для решения задачи определения координат приемника. Если расширить данный подход и установить на один объект 2 приемника, условно назвав их базой и ровером, то при таком методе позиционирования можно определить вектор направления данных приемников. А это дает возможность для определения углов пространственной ориентации объекта. В статье рассматривается именно такое применение данного подхода, что позволит по новому посмотреть на возможности спутниковой навигации

МЕТОД RTK ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ ОРИЕНТАЦИИ

Для определения координат используются измерения фаз несущей ГНСС-сигналов L1, L2 или L5 одновременно на двух приемниках. Расстояние между ними должно быть фиксированно для точного определения вектора, на котором эти приемники расположены.

На пути радиосигнала со спутника до приемника он подвергается различным искажениям. На сигнал оказывают влияние задержки в ионосфере и тропосфере, помехи от стационарных и подвижных объектов, а также переотражение самого сигнала. Свой вклад также вносят ошибки в часах спутников и приемника. Все эти факторы не способствуют точному решению навигационной задачи, так как в результате определяется уже не точка поперечным размером в несколько миллиметров, а пятно диаметром от 5 до 100 м (в зависимости от широты, количества видимых спутников и других условий). Однако стоит заметить, что на малом расстоянии и при одинаковом типе принимающих устройств ошибки, вызванные атмосферными помехами и смещением часов спутника, равны с точностью до тысячных долей измеряемых значений. Таким образом, разница полученных навигационных решений двух приемников является тем самым искомым вектором их расположения (\vec{br} на рис. 1), только без учета ошибок,

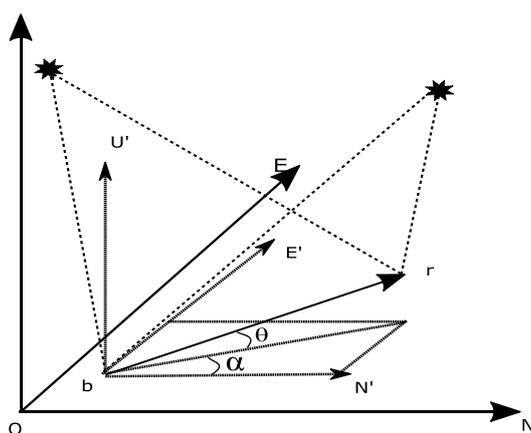


Рис. 1. Схема метода RTK для углов

которые нивелируются этой разностью, в силу их идентичности. При известных координатах вектора представляется возможность определить и углы ориентации этого вектора и того объекта, на котором он расположен.

Оценка положения объекта, как правило, производится на основе таких параметров, как псевдодальность и фазовое расстояние.

В самом общем виде псевдодальность определяется как расстояние от антенны приемника до спутниковой антенны, включая спутниковую синхронизацию смещений (и других смещений, таких как атмосферные задержки), так же $P_{r,i}^s$ может быть представлена через время приема сигнала \bar{t}_r и время отправки сигнала в системе времени часов спутника \bar{t}^s , умноженная на скорость света. Однако на самом деле псевдодальность содержит в себе реальную дальность между спутником и приемником ρ_r^s , смещение часов спутника и приемника dt_r , dT^s , ионосферную $I_{r,i}^s$ и тропосферную задержку T_r^s и ошибку измерений ε_p [3]:

$$P_{r,i}^s = \rho_r^s + c(dt_r(\bar{t}_r) - dT^s(\bar{t}^s)) + I_{r,i}^s + T_r^s + \varepsilon_p. \quad (1)$$

Фазовое расстояние $\Phi_{r,i}^s$ в свою очередь определяется как фаза несущей, умноженная на несущую частоту λ_i (в метрах), которая может быть преобразована с помощью смещений несущей фазы (фазовых неопределенностей) $B_{r,i}^s$ и поправочных членов $d\Phi_{r,i}^s$ (смещение фазового центра антенн и вариаций, станции вытеснения земных приливов, коррекция относительности на спутниковых часах), а также упоминавшихся выше тропосферных, ионосферных задержек и ошибок измерений [3]:

$$\Phi_{r,i}^s = \rho_r^s + c(dt_r(\bar{t}_r) - dT^s(\bar{t}^s)) - I_{r,i}^s + T_r^s + d\Phi_{r,i}^s + \lambda_i B_{r,i}^s + \varepsilon_\phi \quad (2)$$

$$\Phi_{rb,i}^{jk} = \rho_{rb}^{jk} + \lambda_i (B_{rb,i}^j - B_{rb,i}^k) + d\Phi_{r,i}^s + \varepsilon_\phi \quad (3)$$

$$P_{rb,i}^{jk} = \rho_{rb}^{jk} + \varepsilon_p. \quad (4)$$

Для позиционирования системы с короткой длиной базовой линии (менее 10 км), где базовая линия – расстояние между ровером r и базой b , нам необходимы следующие измерения (двойная разность) (3) и (4). Они выполняются для фазового расстояния (3) и псевдодальности (2) на каждой из частот, транслируемых спутником. При этом отнимая значения на ровере от значений на базе, в измерениях будут отсутствовать ошибки в ионосфере и тропосфере, а также сдвиг часов в силу их идентичности.

Далее из этих измерений можно получить значения координат и скоростей. Данная операция производится при помощи расширенного фильтра Калмана

$$B_{r,i}^s = \phi_{r,0,i} - \phi_{0,i}^s + N_{r,i}^s. \quad (5)$$

Следующий этап решения поставленной задачи – разрешение фазовых неопределенностей (5). Поскольку нигде в параметрах фильтра Калмана невозможно указать, что данные величины являются целыми числами, то, соответственно, эта проблема требует иного подхода. При нахождении истинных значений фазовых неопределенностей уточняется вектор состояния системы, а следовательно, увеличивается и точность позиционирования. Для этого необходимо решить уравнение (6):

$$\tilde{N} = \arg \min_{N \in Z} ((N - \hat{N})^T Q_N^{-1} (N - \hat{N})). \quad (6)$$

Для решения задачи фазовых неопределенностей использовался Лямбда-метод (Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment). Полученные решения после этапа корректировки фильтра Калмана уточнялись согласно (7):

$$\begin{pmatrix} \tilde{r}_r \\ \tilde{v}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{r}_r \\ \hat{v}_r \end{pmatrix} - Q_{RN} Q_N^{-1} (N - \hat{N}). \quad (7)$$

Таким образом, найдя вектор базовой линии, можно определить углы ориентации объекта на основе соотношений (8) – (9):

$$Pitch = \arcsin\left(\frac{z_{rb}}{l_{rb}}\right) \cdot 180 / \pi \quad (8)$$

$$Course = \left(\left(ATAN2(x_{rb}, y_{rb}) \cdot \frac{180}{\pi} \right) + 90^\circ \right) \bmod 360^\circ, \quad (9)$$

где (x_{rb}, y_{rb}, z_{rb}) – компоненты вектора базовой линии, а l_{rb} – длина этого вектора. Таким образом, для определения углов ориентации объекта (углы тангажа и курса) не обязательно использовать инерциальные методы измерения, для этого достаточно двух навигационных приемников. В перспективе возможно расположение на одном объекте трех приемников, образующих плоскость, и реализация поиска третьего угла ориентации (угла крена). Данный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с гироскопами. Навигационные приемники лишены накапливаемой ошибки, при использовании данного метода достигается точность выше, чем у гироскопа (на ошибку в определении базовой линии в 1 мм ошибка в определении угла составляет $0,05^\circ$). При этом на точность метода не влияют атмосферные явления (основной источник ошибок ГНСС). Такой способ определения углов ориентации требует только наличия навигационных приемников.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Описанный метод проходил испытания в реальных условиях. В роли испытуемой системы выступали две антенны Novatel GPS-703-GGG, закрепленные на расстоянии 195 см (рис. 2).

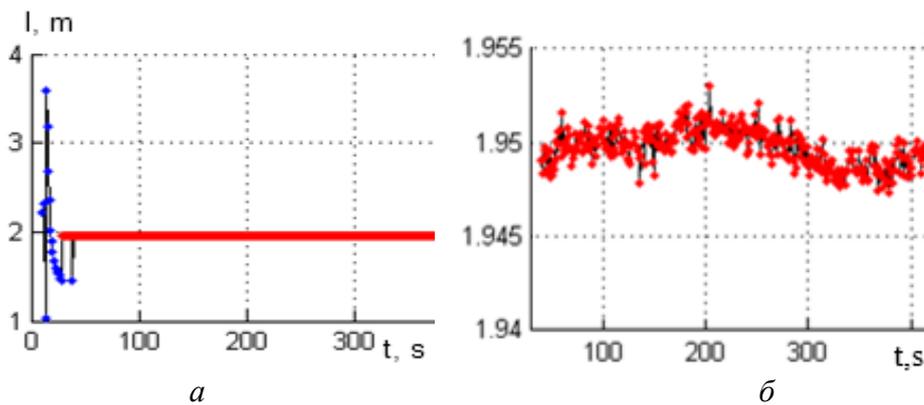


Рис. 2 (а, б). Длина базовой линии (м)

Как видно на рис. 2, *а* переходный период составляет менее 1 мин, это значит, что именно за такое время данный метод способен решить задачу фазовых неопределенностей и увеличить точность до миллиметровой (рис. 2, *б*). Данный переходный период имеет место только при старте работы метода, в дальнейшем подобного не наблюдается. Определяемая алгоритмом длина базовой линии стремится к истинной.

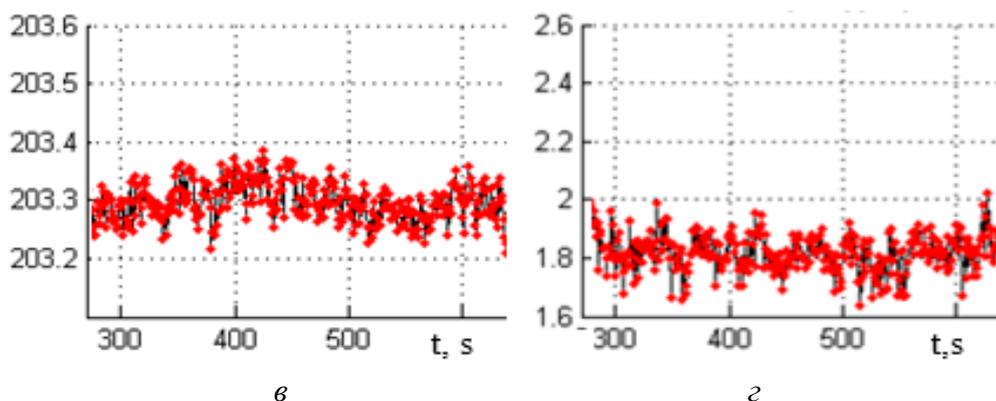


Рис. 2 (в, г). Углы курса и тангажа соответственно (градусы)

В ходе этого эксперимента СКО измерений длины базовой линии составило 0,16 см, по углу курса 0,05°, по углу крена 0,11°.

Следующий опыт проводился в движении, именно поэтому истинные значения угла курса и крена установить не удалось. Однако по точности определения базовой линии можно судить и о точности определения угловых параметров.

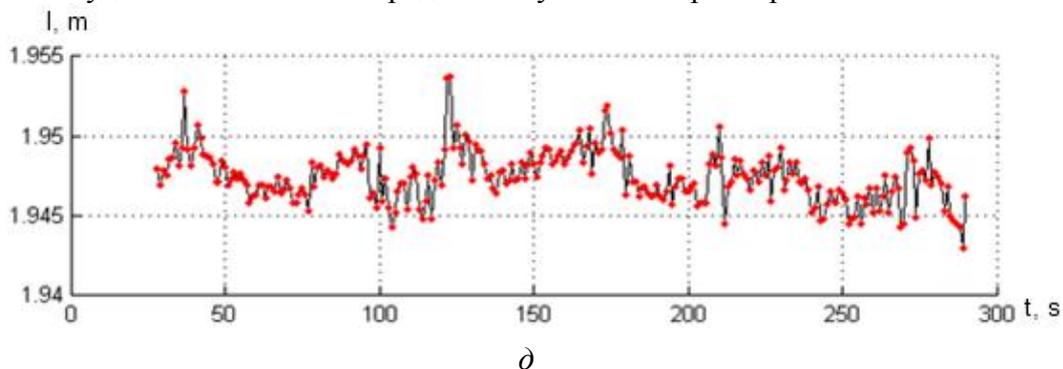


Рис. 2(д). Длина базовой линии (м)

При измерении в динамике СКО измерений длины базовой линии составило 0,17 см. Из этого можно сделать вывод, что движение практически не влияет на точность измерения базовой линии и углов ориентации (так как их вычисление зависит только от нее). Скорость (до 30 м/с) на стабильность системы не влияет. Количество спутников нестабильно (различные помехи, столбы, строения, проезжающие мимо автомобили), однако количество спутников в решении превышает минимально допустимое значение для получения навигационного решения.

ВЫВОДЫ

Предложенная модификация метода RTK позволяет использовать навигационные приемники для определения пространственных координат (углов крена и курса) объекта с точностью, доступной для современных высокоточных гироскопов, однако данная технология определенно выигрывает в соотношении «цена – качество». Поэтому указанная модификация может быть использована там, где на сегодняшний момент используются гироскопы, а это морская навигация, беспилотные летательные аппараты. Предложенное применение метода RTK найдет свою нишу и в военно-промышленном комплексе. Так же из-за высокой точности измерений система, основанная на RTK, может использоваться в точном земледелии и геодезии

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Тучин Д. А. Кодовые измерения псевдодальности системы GPS. Модель ошибок и априорная оценка точности определения вектора положения. М., 2002. С. 27.
2. Elliot D. Kaplan. Understanding GPS. Principles and application. 1996. P. 379–381.
3. Takasu T. RTKLib ver 2.4.2 Manual. 2013. P. 137–139.