

Анализ и нормализация бортовых часов GPS и ГЛОНАСС-спутников

© П. В. Мовсесян¹, С. Д. Петров¹, Д. А. Трофимов¹, И. В. Чекунов²

¹СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

²МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

Реферат

В настоящее время определение высокоточных координат пунктов из ГНСС-наблюдений осуществляется дифференциальным методом или с помощью абсолютного решения (метод PPP, Precise Point Positioning). При обработке методом PPP возрастает важность навигационных данных, орбит навигационных космических аппаратов и данных об их часах. Орбиты спутников хорошо аппроксимируются гладкими функциями. В отличие от эфемерид, часы спутников гладкими функциями не аппроксимируются, также обработка данных выполняется посуточно, что в итоге приводит к наличию практически во всех центрах обработки скачков поправок часов в полночь Всемирного времени, а зачастую и внутри суток.

На основе анализа рядов поправок часов сделан вывод о том, что имеющиеся скачки на границе суток и многие внутрисуточные скачки не отражают реальный ход бортовых часов, а являются следствием некорректной обработки. К подобным выводам приходят и другие исследователи. Для улучшения поправок часов спутников на данный момент предложены различные методики улучшения, однако во всех случаях предлагается устранять скачки в ручном режиме, что является препятствием для их практического использования при обработке больших массивов наблюдений.

Предложен алгоритм устранения данных ошибок в автоматическом режиме. Кроме определения глобального квадратичного тренда и использования фильтра Калмана, что в том или ином виде предполагают все предложенные методики улучшения часов, авторами сделано предположение о наличии неучтенных локальных линейных трендов. Сделана предварительная реализация данного алгоритма с применением библиотеки RTKLib и проведена обработка ряда поправок часов. Применение данного алгоритма приводит к устранению скачков часов на интервалах сколь угодно большой длительности.

Ключевые слова: ГНСС, моделирование часов, метод PPP.

Контакты для связи: Мовсесян Павел Владимирович (movsesyanpv@gmail.com).

Статья поступила в редакцию 13.12.2019, принята к публикации 09.01.2020, опубликована 12.05.2020.

Для цитирования: Мовсесян П. В., Петров С. Д., Трофимов Д. А., Чекунов И. В. Проблемы передачи времени в ГЛОНАСС // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 36–39.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.52.36-39>

Analysis and Normalization of the GPS and GLONASS Satellite Clocks

P. V. Movsesian¹, S. D. Petrov¹, D. A. Trofimov¹, I. V. Chekunov²

¹St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract

Nowadays, the determination of precise coordinates using GNSS observations can be made with a differential method or with an absolute solution (PPP method – Precise Point Positioning). The precision of navigational data, such as satellite ephemerides and satellite clock biases, is crucial to the PPP method. Usually satellite orbits are approximated with smooth functions. Unlike ephemerides, satellite clock biases are not approximated with smooth function, and clock series are processed not as a continuous time series but as daily fragments, which leads to jumps at 00:00 UTC and during a day.

The analysis of clock biases leads us to the conclusion that the aforementioned jumps don't represent real clock behaviour. They are a result of using incorrect processing methods. This conclusion is also shared by a number of researchers. Different studies propose a variety of satellite clock improvement methods but clock jump removal is performed manually, which is an obstacle for large data array processing.

We propose an automatic jump correction algorithm. Determination of quadratic trend and Kalman filter are employed by other methods in some way or another. Besides, we assume the existence of some additional linear trends that were not properly processed originally. We have processed about two years of satellite clock biases and have come to the conclusion that the use of our algorithm allows the removal of clock jumps on time intervals of any length.

Keywords: GNSS, clock modelling, PPP-method.

Contacts: Pavel Movsesyan (movsesyanpv@gmail.com).

Received December 13, 2019, accepted January 09, 2020, published May 12, 2020.

For citation: Movsesian P. V., Petrov S. D., Trofimov D. A., I. Chekunov I. V. Analysis and normalization of the GPS and GLONASS satellite clocks // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 52. P. 36–39.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.52.36-39>

Введение

В последнее время все большее значение приобретает метод точного абсолютного решения (ТАР) или Precise Point Positioning (PPP) для координатных определений по наблюдениям НКА. Точность координат пунктов, определяемых методом ТАР, уже приближается к точности координат, определяемых относительными методами. Однако успех применения метода ТАР обусловлен точностью эфемерид НКА, бортовых шкал времени, а также фазово-кодowych сдвигов. В точности оценивания эфемерид НКА в настоящее время достигнут большой прогресс, центры анализа ГНСС предоставляют пользователям спутниковые эфемериды с точностью 2–3 см. Кроме того, в силу динамических причин, эфемериды космических аппаратов изменяются гладко. Фазово-кодowe сдвиги также оцениваются с высокой точностью и несущественно влияют на точность координатных определений. Что касается бортовых шкал времени, то точность их оценивания центрами анализа явно недостаточна для достижения сантиметровой точности координатного оценивания методом ТАР. Ряды поправок к бортовым шкалам времени обладают на сегодняшний день двумя недостатками. Во-первых, оценивание поправок часов выполняется центрами анализа независимо на каждые сутки. Это зачастую приводит к фиктивным скачкам в ноль часов Всемирного времени. Во-вторых, при оценке поправок, последние не представляются гладкими функциями, как в случае эфемерид. Для устранения данных недостатков авторами был разработан метод анализа и нормализации бортовых шкал времени, основанный на алгоритме поиска фиктивных скачков и стохастической фильтрации.

В настоящее время в качестве бортовых стандартов времени и частоты на аппаратах GPS / ГЛОНАСС используются рубидиевые (Rb) и цезиевые (Cs) стандарты частоты. В спутниках GPS используются генераторы 10.23 МГц [1], в ГЛОНАСС – 5 МГц [2]. Поправки бортовых часов передаются в навигационных сообщениях ряду с эфемеридами.

Центры анализа ГНСС оценивают точные поправки бортовых часов. В *sp3*-файлах содержатся поправки на каждые 15 мин, в *clk*-файлах – на каждые 30 или 5 сек. Наименьшую временную задержку в предоставлении точной эфемеридно-временной информации имеет центр анализа ИАЦ КВНО.

Заявленная точность финальных эфемерид и часов не хуже 3 см. Эфемериды определяются по модели движения спутника как гладкие функции времени на интервалах от 1 до 9 сут. Поправки к бортовым часам – как свободные параметры с опциональным расчетом линейного и квадратично-

го тренда, что приводит к появлению разрывов в шкале и частоте. Встречаются разрывы до нескольких наносекунд.

Анализ разрывов в рядах поправок бортовых часов показал следующее:

- у разных центров анализа получаются разные скачки;
- много скачков приходится на 00:00 UTC (начало *clk*-файла).

Это показывает, что подавляющее большинство скачков поправок бортовых часов является фиктивными артефактами обработки, что подтверждают и другие авторы [3].

Предлагаются различные методики улучшения качества рядов поправок бортовых часов [4–6], однако они требуют предварительного устранения глобальных скачков [7].

Описание алгоритма

Устранение глобальных изменений

Выполняется поиск значений поправок, сильно отличающихся от соседних значений. При обнаружении такого выброса выполняется коррекция по формуле

$$b_j = \frac{b_{j+1} + b_{j-1}}{2}, \quad (1)$$

где b – поправка, j – ее номер.

При значительном изменении квадратичного тренда ряда поправок разделяются участки, для которых вычисляется тренд. Определяется это следующим образом:

- 1) вычисляются значения второй производной;
- 2) при значительном отклонении значения второй производной от ее среднего значения (> 500 раз) считается, что произошло изменение параметров тренда.

Устранение скачков

Выполняется поиск значительных (> 0.55 нс) разностей между двумя соседними по времени точками ряда с удаленным квадратичным трендом. При обнаружении такой разности (пусть точка с номером k) запускается поиск следующей такой разности, отстоящей от первой не более чем на 3 дня. Если ряд заканчивается раньше, чем находится следующий разрыв, и при этом ограничение на длительность скачка не превышено, то правой границей корректируемого отрезка принимается соответствующая граница ряда (пусть точка с номером n).

Скачки устраняются путем добавления линейного тренда на выделенном интервале. При поиске скачков вычисляется следующая разность: $\Delta b = b_j - b_{j+1}$, используемая в их коррекции. Исправление на интервале от k до n производится по следующей формуле:

$$b_{k+i} = b_{k+i} - \Delta b \frac{i}{n-k}, \quad 0 < i \leq n-k. \quad (2)$$

Фильтрация

Фильтруется ряд, в котором были устранены скачки. Часы моделируются как винеровский процесс $\dot{b} = w$, где w – случайная функция. Используется фильтр Калмана со следующей моделью:

$$P = \begin{cases} \sigma^2 & , \text{если дана погрешность в clk – файле} \\ 10^{-24} \text{c}^2 & , \text{если нет погрешности в clk – файле.} \end{cases}$$

Предсказание состояния системы:

$$b_{\bar{k}+1} = b_k.$$

Предсказание ошибки ковариации:

$$P_{\bar{k}+1} = P_k.$$

Вычисление усиления Калмана:

$$K_{k+1} = \frac{P_{\bar{k}+1} H^T}{H^T P_{\bar{k}+1} H + R},$$

$$H = 1, R = 9 \cdot 10^{-23} \text{c}^2.$$

H – матрица измерений, R – ковариация шума измерения. Обновление оценки с учетом измерения в момент времени $k + 1$:

$$b_{k+1} = b_{\bar{k}+1} + K_{k+1} v_{k+1},$$

$$v_{k+1} = b_{k+1} - b_{\bar{k}+1}.$$

Обновление ошибки ковариации:

$$P_{k+1} = (1 - K_{k+1}) P_{\bar{k}+1}.$$

Результаты применения алгоритма

Анализ проводился для рядов поправок часов центра анализа ИАЦ КВНО за 2017 г.

На рис. 1–4 приведены участки рядов поправок и их разностей вокруг скачка. Заметно, что на обработанных рядах скачки отсутствуют. Также можно отметить, что на правых границах отрезков коррекции разности обработанных и необработанных рядов сбрасываются к нулю, что препятствует накоплению разностей.

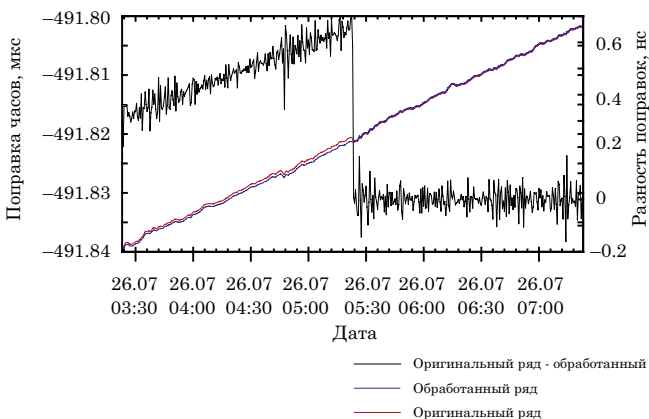


Рис. 1. Пример участка для G21

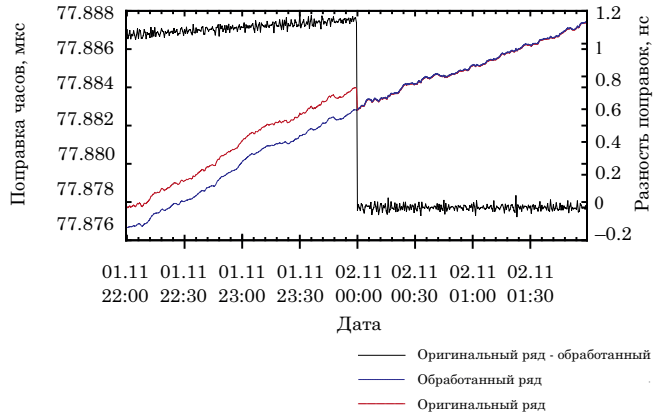


Рис. 2. Пример участка для R16

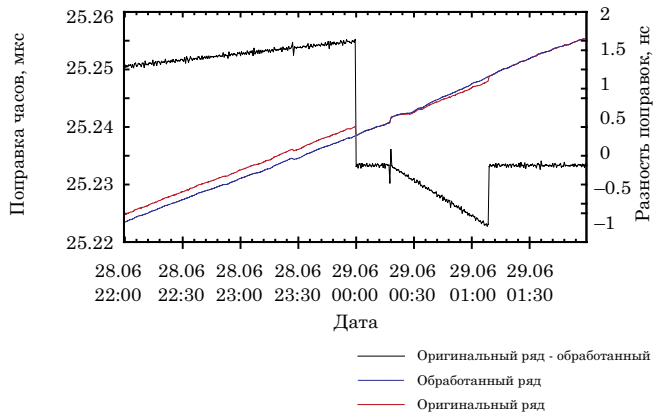


Рис. 3. Пример участка для R09

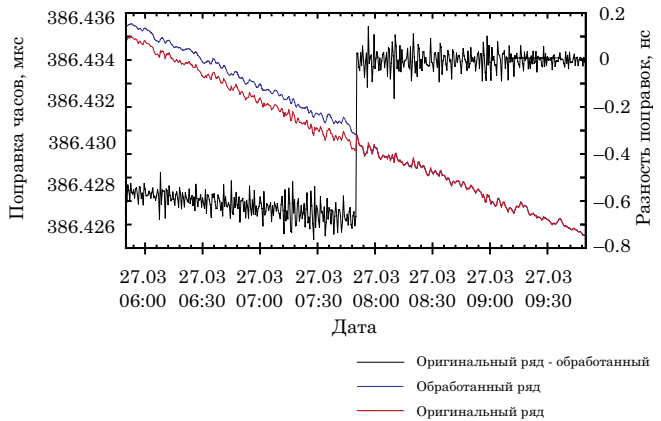


Рис. 4. Пример участка для G13

Заключение

Рассмотренные примеры применения алгоритма к реальным поправкам бортовых часов дают основания для следующих выводов. Во-первых, скачки в рядах поправок бортовых часов, предоставляемых центрами анализа ГНСС, могут достигать нескольких наносекунд, что соответствует ошибкам координатных определений по высоте в несколько десятков сантиметров и несколько сантиметров в плане. Также очевидно, что такие ошибки могут привести к срывам фазы или, во всяком случае, могут затруднить разрешение целочисленной фазовой неоднозначности. Во-вторых, из примеров видно, что на основе

представленного в работе алгоритма можно автоматически находить все фиктивные скачки и эффективно их устранять. Данный алгоритм может быть внедрен в программное обеспечение оценивания поправок бортовых часов, а также может применяться независимо к имеющимся файлам поправок часов навигационных космических аппаратов.

Л и т е р а т у р а

1. Interface Specification IS-GPS-200. 2019. URL: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200K.pdf> (дата обращения 05.01.2020).

2. Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.1. М.: 2008, 74 с.

3. Prange L., Orliac E., Dach R., et al. CODE's five-system orbit and clock solution – the challenges of multi-GNSS data analysis // *Journal of Geodesy*. 2017. Vol. 91, no. 4. P. 345–360.

4. Shi C., Guo S., Gu S., et al. Multi-GNSS satellite clock estimation constrained with oscillator noise model in the existence of data discontinuity // *Journal of Geodesy*. 2019. Vol. 93, no. 4. P. 515–528.

5. Hauschild A. Precise GNSS clock-estimation for real-time navigation and precise point positioning: dissertation. München: Technische Universität München, 2010.

6. Hauschild A., Montenbruck O. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning // *GPS Solutions*. 2009. Vol. 13, no. 3. P. 173–182.

7. Huang G., Zhang Q. Real-time estimation of satellite clock offset using adaptively robust Kalman filter with classified adaptive factors // *GPS Solutions*. 2012. Vol. 16, no. 4. P. 531–539.