

ОБНАРУЖЕНИЕ СКАЧКОВ В ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ С ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫМИ ОПОРНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Александр Сергеевич Пустошилов

Сибирский федеральный университет, ст. преподаватель
Россия, Красноярск, alphasoft@inbox.ru

Аннотация. В работе показан простой способ обнаружения скачков в фазовых измерениях (в том числе и в одночастотных измерениях) навигационных приемников с высокостабильными (водородными) опорными генераторами за счет использования аппроксимации полиномами высоких степеней.

Ключевые слова: фазовые измерения, ГНСС, скачки в фазовых измерениях, полиномиальная аппроксимация.

DETECTING CYCLE SLIPS IN CARRIER-PHASE MEASUREMENTS OF NAVIGATION RECEIVER WITH HIGH STABLE REFERENCE GENERATORS

Alexander S. Pustoshilov

Siberian Federal University, senior lecture, Russia, Krasnoyarsk, alphasoft@inbox.ru

Abstract. The paper shows a simple method for detecting cycle slips in the carrier-phase measurements (including single frequency measurements) of navigation receivers with highly stable (hydrogen) reference oscillators by using approximation by high-degree polynomials.

Keywords: carrier-phase measurement, GNSS, cycle slips, polynomial approximation.

Введение. В настоящее время широкое распространение получило использование фазовых измерений в высокоточной спутниковой навигации. Однако их использование требует решить несколько задач, одна из которых это обнаружения скачков (проскоков счета циклов) в таких измерениях. Проблемам присутствия скачков в фазовых измерениях навигационных приемников и способам их обнаружения посвящено множество работ как российских, так и зарубежных авторов, например [1–4]. В работе [5] были рассмотрены два способа обнаружения скачков в одночастотных фазовых измерениях в зависимости от качества опорного генератора навигационного приемника. Данная работа будет посвящена детализации особенностей обнаружения скачков в фазовых измерениях для навигационных приемников с высокостабильными опорными генераторами с использованием линейной полиномиальной фильтрации медленноменяющегося тренда. Будет показана устойчивость предлагаемого метода к небольшим пропускам (отсутствием измерений) в данных.

Предлагаемый метод. В работе [5] было предложено использовать следующую модель измерений навигационного приемника:

$$y(t_i) = x(t_i) + s(t_i) + n(t_i),$$

где $x(t_i)$ – кусочно-постоянная функция скачков в фазовых измерениях, $s(t_i)$ – медленноменяющийся гладкий тренд, $n(t_i)$ – остаточный шум измерений.

Для случая, когда навигационный приемник использует высокостабильный опорный генератор, предлагается следующий алгоритм обнаружения скачков:

1. Строится матрица линейной фильтрации, исключаящая медленноменяющийся тренд $s(t_i)$ из измерений $y(t_i)$:

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} - \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}^T,$$

где \mathbf{I} – это единичная матрица, \mathbf{M} – это матрица, в ряды которой записаны дискретные ортогональные полиномы Хана до степени d , метод расчета которых описан в работах [6–7].

2. После чего вектор измерений $\mathbf{y}_i = y(t_i)$ умножается на матрицу \mathbf{F} :

$$\mathbf{fy} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{y}.$$

3. По результатам фильтрации \mathbf{y}_F вычисляются первые разности по времени:

$$d\mathbf{fy}_i = \mathbf{fy}_{i+1} - \mathbf{fy}_i.$$

4. Выполняется поиск положений значений вектора $d\mathbf{fy}$, которые превышают заданный пороговый уровень (выбирается из соображений ожидаемой величины разрыва кусочно-постоянной функции).

Для отработки предложенного алгоритма были использованы 1-секундные измерительные данные станции из сети IGS[8] – OH13 подключенной к водородному стандарту частоты. Был выбран интервал измерений (рисунок 1), на котором отсутствовали скачки в фазовых измерениях. После чего на этот интервал добавлялся модельный скачок, а также имитировался пропуск в данных. На всех рисунках линией показан график результатов фильтрации \mathbf{fy} , точками результаты вычисления разности $d\mathbf{fy}$.

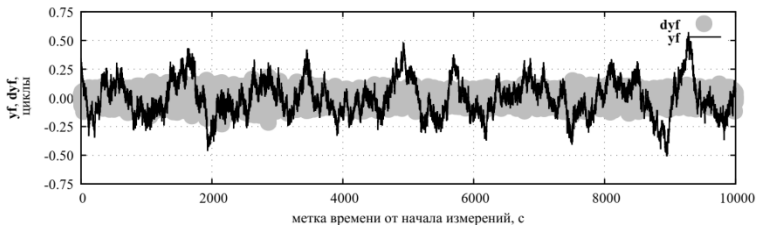


Рисунок 1 – Результаты применения алгоритма (размер базиса $d = 15$) поиска к измерениям спутника R07 станции OH13 19 мая 2019 г.

В данные (рисунок 1) вносится модельный скачок величиной в 1 цикл и имитируется пропуск в данных длительностью 30 секунд, после чего повторно выполняется процедура поиска скачков (рисунок 2).

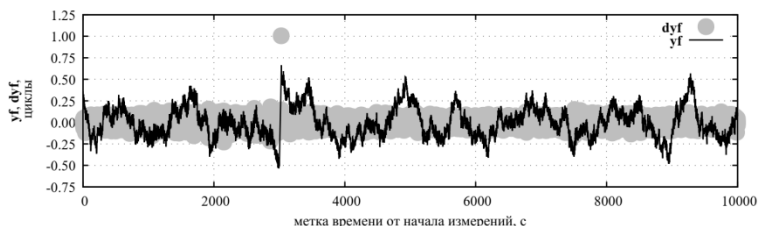


Рисунок 2 – Результаты применения алгоритма (размер базиса $d = 15$) поиска к измерениям спутника R07 станции ОНЗ 19 мая 2019 г. (с модельным скачком в момент пропуска длительностью 30 секунд)

Как видно из рисунка 2 данный алгоритм обнаруживает величину и положения разрыва в фазовых измерениях, даже в отсутствии 30 секунд измерений. Так как данный алгоритм выполняет только линейные операции с данными, мы можем на модельных данных оценить зависимость оценки величины разрыва (скачка) от интервала пропуска в измерениях. Для этого в модельном скачке величиной в 1 цикл будем имитировать отсутствие части измерений и применять предложенный алгоритм. Результаты оценки величины разрыва показаны на рисунке 3.

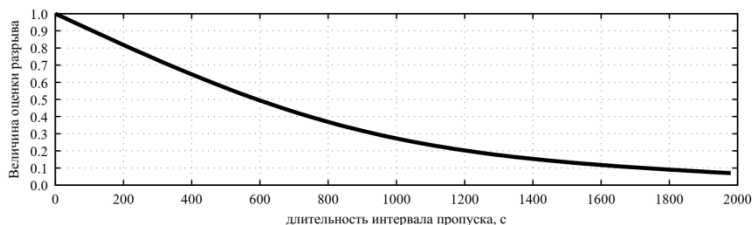


Рисунок 3 – Зависимость оценки величины разрыва от длительности пропуска в измерениях

Как видно из рисунка 3 с увеличением интервала отсутствия измерений оценка происходит с большей ошибкой и при величине пропуска в 600 секунд (10 минут), недооценка составляет порядка 0,5. Исходя из графиков (рисунок 1 и 2) ширина шумовой составляющей приблизительно 0,2-0,3 цикла, такой величины оценки алгоритм будет достигать при интервале пропуска более 900 секунд (15 минут) и как видно из рисунка 4 предложенный алгоритм не может обнаружить смоделированный скачок.

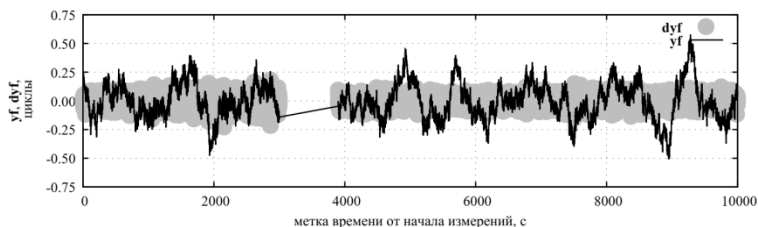


Рисунок 4 – Результаты применения алгоритма (размер базиса 15) поиска к измерениям спутника R07 станции ОНЗ 19 мая 2019 г. (с модельным скачком в момент пропуска длительностью 900 секунд)

Заключение. Предложенный метод позволяет обнаруживать скачки в фазовых измерениях навигационных приемников с высокостабильными опорными генераторами даже в случае небольших пропусков в измерениях (менее 10 минут).

Благодарности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FSRZ-2020-0011).

Список литературы

1. Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical research letters*. 1990;17(3):199–202. DOI: 10.1029/GL017i003p00199
2. Безменов И. В., Блинов И. Ю., Наумов А. В., Пасынок С. Л. Алгоритм определения скачков в комбинации Мельбурна-Вуббена, образованной из кодовых и фазовых данных измерений в глобальных навигационных спутниковых системах. *Измерительная техника*, 2019, № 5, с. 25-30. doi:10.32446/0368-1025it.2019-5-25-30
3. Farooq S. Z., Yang D., Jin T., Ada E. N. J. Survey of Cycle Slip Detection & Correction Techniques for Single Frequency Receivers. 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT), 2018, с. 957-961, doi:10.1109/ICCT.2018.8599879.
4. Farooq S. Z., Yang D., Jin T., Ada E. N. J. CS detection and correction techniques for RTK positioning using single-frequency GNSS receivers: trends and comparison, *Radar Sonar & Navigation IET*, т. 13, №. 11, 2019, с. 1857-1866. doi:10.1049/iet-rsn.2019.0084.
5. Пустошилов А. С., Царев С. П. Обнаружение разрывов в фазовых измерениях одночастотных навигационных приемников при различной нестабильности опорных генераторов. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):144–161. DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.004.
6. Tsarev S. P., Kytmanov A. A. Discrete orthogonal polynomials as a tool for detection of small anomalies of time series: a case study of GPS final orbits. <https://arxiv.org/abs/2004.00414> (дата обращения: 01.06.2020).
7. High degree least squares polynomial fitting using discrete orthogonal polynomials. <https://github.com/sptsarev/high-deg-polynomial-fitting> (дата обращения: 01.06.2020)
8. Crustal Dynamics Data Information System NASA’s Archive of Space Geodesy Data https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/CDDIS_Archive_Access.html (дата обращения: 01.06.2020).

Материал принят к публикации 01.10.21.