

МЕТОД СГЛАЖИВАНИЯ ДАННЫХ КОДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРОГРАММАХ ГНСС-ОБРАБОТКИ

И.В. Безменов, И.Ю. Блинов, А.В. Наумов, С.Л. Пасынок

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Солнечногорский район
bezmenov@vniiftri.ru

В настоящей статье дано детальное изложение известного метода сглаживания данных кодовых измерений, получаемых с двухчастотных ГНСС-приемников в виде RINEX-файлов (Receiver INdependent EXchange format) наблюдений. Данный метод широко используется в программах обработки при решении прикладных задач в области геодинамики, координатно-временного и навигационного обеспечения, в частности, в хорошо известном Бернском ППО ГНСС. В работе дается оценка уровня шума сглаженных кодовых данных в предположении, что случайные составляющие измерений являются независимыми и центрированными величинами. Метод основан на решении ряда вспомогательных задач: 1) детектирование скачков в часах приемников, 2) обнаружение и удаление из обработки грубых измерений (выбросов) и 3) разрешение фазовых неоднозначностей несущих. Для решения этих задач используются линейные комбинации из данных наблюдений. Сформулированы условия, при которых скачок в шкале времени приемника надежно обнаруживается на фоне шума измерений и возможных скачков в фазовых неоднозначностях. Отдельно рассмотрены т.н. миллисекундные скачки. Для обнаружения выбросов предложен новый алгоритм, минимизирующий количество необоснованно отбракованных измерений. Для обнаружения скачков в т.н. широкополосной фазовой неоднозначности, входящей в комбинацию Мельбурна-Вуббена, предложен новый алгоритм, основанный на формировании т.н. кластеров. Приведены результаты численных экспериментов по сравнению новых алгоритмов с алгоритмами, применяемыми в Бернском ППО ГНСС.

This article provides a detailed description of well-known method of smoothing the data of code measurements received from dual-frequency GNSS-receivers in the form of RINEX observation files (Receiver INdependent EXchange format). This method is widely used in processing programs for solving the applied problems in the field of geodynamics, time positioning and navigation service, in particular, in well-known Bernese GNSS Software. In the article the noise level evaluation for smoothed code data in the assumption that random components of the measurements are independent and centered values is presented. The method is based on solving the range of sub problems: 1) detection of receiver time jumps, 2) detection and removal of rough measurements (outliers) from data processing and 3) resolution of the carrier phase ambiguities. To solve these problems the techniques based on linear combinations from observation data are used. Conditions under which a receiver time jump is reliably detected against the background of measurement noise and possible jumps in phase ambiguities are formulated. So-called millisecond jumps are considered separately. For outlier detection a new algorithm minimizing a number of unreasonably rejected measurements is proposed. For detection of jumps in the so-called wide-lane phase ambiguity included in Melbourne-Wubben combination a new algorithm based on formation of so-called clusters is proposed. The results of numerical experiments on comparison of the new algorithms with the algorithms applied in the Bernese GNSS Software are given.

Ключевые слова: ГНСС, метод сглаживания, кодовые и фазовые данные измерений, линейные комбинации, фазовые неоднозначности, комбинация Мельбурна-Вуббена, двухчастотный ГНСС-приемник, скачок.

Key words: Global Navigation Satellite Systems (GNSS), smoothing method, code and phase measurement data, linear combinations, phase ambiguities, Melbourne-Wubben combination, dual-frequency GNSS-receiver, jump.

Введение

Исходными данными в современных методах решения прикладных задач в области геодинамики, координатно-временного и навигационного обеспечения, а также сопутствующего ему метрологического обеспечения средств и систем измерений, часто выступают данные наблюдений, получаемые с ГНСС-приемников, входящих в международную сеть [1]. Одним из важнейших этапов предварительной обработки данных, составляющих RINEX-файл наблюдений, является процедура сглаживания данных кодовых измерений, используемая в широко известном Бернском ППО ГНСС версии 5.2 (Bernese GNSS Software Version 5.2) [2], и которая особенно важна при синхронизации шкал времени удаленных станций с помощью ГНСС-анализа. Суть метода состоит в уменьшении уровня шума, присутствующего в данных кодовых измерений, до уровня шума фазовых измерений. Кроме того, в задачу метода входят детектирование и устранение из дальнейшей обработки грубых измерений (выбросов), а также детектирование скачков часов в приемниках. Метод основан на использовании линейных комбинаций, формируемых из данных наблюдений. С помощью специальных алгоритмов производится чистка от выбросов и детектирование скачков в линейной комбинации Мельбурна — Вуббена [3, 4], позволяющей находить эпохи и размеры скачков в т.н. широкополосной неоднозначности (wide-lane ambiguity). Окончательное определение скачков в фазовых неоднозначностях несущих осуществляется с помощью т.н. свободной от геометрии линейной комбинации L_4 .

В статье дается детальное описание метода сглаживания. В разделе 2 приведены формулы, позволяющие получить с помощью линейных комбинаций из данных наблюдений «сглаженные» (с уменьшенным уровнем шума) кодовые измерения. При этом рассматриваются случаи, когда в фазовых неоднозначностях: 1) скачки отсутствуют; 2) скачки присутствуют с априори известными эпохами и размерами. Указанные упрощения сделаны лишь для того, чтобы лучше понять идею метода, и описанные в последующих разделах алгоритмы дополняют описание метода до общего случая. В конце раздела приведены оценки уровня шума в сглаженных кодовых измерениях (см. Утверждение 1).

Раздел 3 посвящен описанию скачков часов в приемниках. События такого рода обычно игнорируются в обработке двойными разностями. Для безразностной обработки, например, в случае вычисления поправок часов спутников, пренебрежение влиянием скачков часов может привести к деградации

точности получаемых результатов и к непредсказуемой работе программного обеспечения. Скачки часов определяются на основе проверки согласованности данных кодовых и фазовых измерений двухчастотных ГНСС-приемников. Дается определение скачка часов в приемнике, и приводятся условия (Утверждение 2), когда скачок может быть гарантированно обнаружен на фоне шумовых составляющих и скачков в фазовых неоднозначностях. Отдельно упоминаются т.н. миллисекундные скачки.

В разделе 4 дается описание нового алгоритма детектирования и устранения выбросов из данных измерений, которые, как предполагается, состоят из независимой от времени неизвестной постоянной компоненты и шума. Данные условия выполняются, например, для комбинации Мельбурна — Вуббена на интервалах между скачками в фазовых неоднозначностях. Алгоритм основан на поиске т.н. оптимального решения с наименьшим количеством неоправданно отбракованных данных измерений. Приводится сравнение предложенного алгоритма с подобным алгоритмом Т. Спрингера (Springer T.A.), используемом в Бернском ППО ГНСС версии 5.2 [2]. Результаты численного тестирования показали, что для отдельных спутников разность в количестве отбракованных данных может достигать ~25 % от общего числа наблюдений в пользу нового алгоритма.

В разделе 5 предложен новый алгоритм определения скачков в комбинации Мельбурна — Вуббена, позволяющий более эффективно по сравнению с аналогичными известными алгоритмами определять скачки и очищать данные от выбросов с минимальным количеством брака. Преимущество нового алгоритма в сравнении с аналогичным алгоритмом, применяемым в Бернском ППО ГНСС версии 5.2, особенно наглядно проявляется в случае многократных (каскадных) потерь фазы приемником. В этом случае для отдельных спутников разность в количестве отбракованных данных может достигать ~50 % от общего числа наблюдений в пользу нового алгоритма. Данная особенность алгоритма имеет существенное значение в случае обработки данных измерений удаленных станций, когда есть необходимость наблюдать общие спутники (режим “common view”). В этом случае число одновременно наблюдаемых спутников может не превышать 1–2, и неоправданная отбраковка данных может привести к невозможности их дальнейшей обработки.

В разделе 6 приводится заключительная часть алгоритма сглаживания, позволяющая найти значения скачков в фазовых неоднозначностях несущих, что позволяет применить метод сглаживания в общем случае.

В заключении рассмотрен пример обработки реальных данных, полученных со станции ZIMM в 2010 г., день года 207, демонстрирующий эффект процедуры сглаживания кодовых измерений.

1. Определения и обозначения

1.1. Уравнения наблюдений

Как известно (см. [2, 5]), спутники GPS передают сигналы в микроволновом L -диапазоне на двух несущих частотах f_1 и f_2 , которые формируются из опорной частоты $f_0 = 10,23$ МГц: $f_1 = 154 f_0$ и $f_2 = 120 f_0$. Эти фундаментальные частоты, обозначаемые ниже, как L_1 и L_2 , и соответствующие им длины волн ($\lambda_1 \approx 19,0$ см и $\lambda_2 \approx 24,4$ см), одинаковы для всех спутников GPS.

В отличие от GPS, значения несущих частот L_1 и L_2 сигналов спутников ГЛОНАСС различны (см. [5]); совпадения возможны только для спутников-антиподов. Номинальные несущие частоты зависят от спутников и могут быть записаны следующим образом:

$$f_1^i = f_1^0 + n(i) \cdot \Delta f_1, \quad (1.1a)$$

$$f_2^i = f_2^0 + n(i) \cdot \Delta f_2, \quad (1.1b)$$

где

$n(i) \in \{-7, \dots, +6\}$ — номер частотного канала, соответствующего спутнику i , $n(0) = 0$;

$f_1^0 = 1602$ МГц — L_1 частота для спутника ГЛОНАСС с номером канала 0;

$\Delta f_1 = 0,5625$ МГц — приращение частоты на L_1 для двух последовательных номеров каналов;

$f_2^0 = 1246$ МГц — L_2 частота для спутника ГЛОНАСС с номером канала 0,

$\Delta f_2 = 0,4375$ МГц — приращение частоты на L_2 для двух последовательных номеров каналов.

Уравнения кодовых и фазовых измерений (наблюдений) для двухчастотных ГНСС-приемников, принимающих сигналы от спутников ГНСС, с учетом задержек в ионосфере и тропосфере имеют вид [2]:

$$P_{1k}^i(t) = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i + I_k^i + T_k^i + B_{1k}^i + N_{1k}^i, \quad (1.2a)$$

$$P_{2k}^i(t) = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i + \left(\frac{f_1^i}{f_2^i}\right)^2 I_k^i + T_k^i + B_{2k}^i + N_{2k}^i, \quad (1.2b)$$

$$L_{1k}^i(t) = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i - I_k^i + T_k^i + b_{1k}^i + v_{1k}^i + \lambda_1^i n_{1k}^i, \quad (1.2c)$$

$$L_{2k}^i(t) = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i - \left(\frac{f_1^i}{f_2^i} \right)^2 I_k^i + T_k^i + b_{2k}^i + v_{2k}^i + \lambda_2^i n_{2k}^i, \quad (1.2d)$$

где обозначено:

- $P_{Fk}^i(t)$ — кодовая псевдодальность для несущей частоты L_F ; $F = 1, 2$;
- $L_{Fk}^i(t)$ — фазовая псевдодальность (выраженная в метрах) для частоты L_F ;
- ρ_k^i — геометрическое расстояние между i -м спутником (в момент излучения сигнала) и k -м приемником (в момент t приема сигнала);
- δ_k — погрешность часов приемника в момент времени t по отношению ко времени GPS/ГЛОНАСС;
- δ^i — погрешность часов спутника в момент излучения сигнала;
- I_k^i — погрешность в определении псевдодальности из-за ионосферной рефракции;
- T_k^i — погрешность в определении псевдодальности из-за тропосферной рефракции. Предполагается, что тропосферная рефракция не зависит от частоты радиосигнала и что один и тот же эффект имеет место как для фазовых, так и для кодовых измерений;
- f_F^i — значение несущей частоты L_F спутника i ;
- λ_F^i — длина волны несущей частоты L_F спутника i : $\lambda_F^i = c / f_F^i$;
- c — значение скорости света в вакууме;
- n_{Fk}^i — неизвестное целое число циклов так называемая фазовая неоднозначность (ambiguity) на частоте L_F ;
- B_*^*, b_*^* — систематические погрешности кодовых и фазовых измерений для каждой пары станция-спутник;
- N_*^*, v_*^* — немоделируемые случайные или квазислучайные погрешности кодовых и фазовых измерений.

Здесь мы приняли во внимание хорошо известный факт, что в первом (но хорошем) приближении рефракция ионосферы пропорциональна $1/f^2$, где f — несущая частота. В нашем обозначении величина I_k^i представляет собой влияние ионосферы на первую несущую частоту L_1 . Из-за этой зависи-

мости от частоты ионосферная рефракция на второй несущей записывается

$$\text{как } \left(\frac{f_1^i}{f_2^i} \right)^2 I_k^i.$$

1.2. Линейные комбинации из данных наблюдений

В данном разделе мы приводим выражения для известных линейных комбинаций (см. [2]).

1.2.1. Линейные комбинации с исключенной ионосферной задержкой (т.н. «свободные от ионосферы»)

Составим из кодовых измерений P_1 и P_2 (ради простоты записи мы опустили индексы “ i ” и “ k ”) линейную комбинацию вида

$$P_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2). \quad (1.3a)$$

Это выражение часто называется линейной комбинацией, «свободной от ионосферы» (см., напр., [2]), т.к. часть задержки из-за ионосферы виртуально исключается. То же верно и для соответствующей линейной комбинации из фазовых измерений L_1 и L_2 (не путать с обозначением частот)

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2). \quad (1.3b)$$

С учетом (1.2) выражения для линейных комбинаций (1.3) приобретают следующий вид:

$$P_{3k}^i(t) = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i + T_k^i + \tilde{B}_k^i + \tilde{N}_k^i, \quad (1.4a)$$

$$L_{3k}^i(t) = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i + T_k^i + \tilde{b}_k^i + \tilde{v}_k^i + (\lambda_{21k}^i n_{1k}^i - \lambda_{12k}^i n_{2k}^i) \cdot \kappa^i. \quad (1.4b)$$

Здесь обозначено

$$\tilde{B}_k^i = \frac{(f_1^i)^2 B_{1k}^i - (f_2^i)^2 B_{2k}^i}{(f_1^i)^2 - (f_2^i)^2}, \quad (1.5a)$$

$$\tilde{b}_k^i = \frac{(f_1^i)^2 b_{1k}^i - (f_2^i)^2 b_{1k}^i}{(f_1^i)^2 - (f_2^i)^2}, \quad (1.5b)$$

$$K^i = \frac{\lambda_1^i \lambda_2^i}{(\lambda_2^i)^2 - (\lambda_1^i)^2}. \quad (1.5c)$$

Выражения для \tilde{N}_k^i и \tilde{V}_k^i аналогичны (1.5a, b).

1.2.2. Линейные комбинации с исключенной геометрической дальностью (т.н. «свободные от геометрии»)

Составим из данных фазовых и кодовых измерений линейные комбинации (см. [2])

$$L_4 \stackrel{def}{=} L_1 - L_2 \quad (1.6a)$$

и

$$P_4 \stackrel{def}{=} P_1 - P_2. \quad (1.6b)$$

Здесь и ниже ради простоты записи мы опустили индексы “ i ” и “ k ”, относя дальнейшие рассуждения к некоторой фиксированной паре приемник–спутник. Нетрудно видеть, что определенные комбинации не зависят от поправок часов приемника и спутника, а также от геометрических параметров (орбит, координат станций). Они содержат только слагаемые, учитывающие задержки в ионосфере, и фазовые неоднозначности. Наряду с этими часто используемыми линейными комбинациями нам понадобятся в дальнейшем комбинации

$$Q_4 \stackrel{def}{=} L_1 - P_1 \quad (1.6c)$$

и

$$R_4 \stackrel{def}{=} L_2 - P_2, \quad (1.6d)$$

также свободные от геометрии. Из приведенных выше уравнений (1.2) имеем:

$$L_4(t) = - \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \right) I(t) + b_1 - b_2 + v_1(t) - v_2(t) + \lambda_1 n_1(t) - \lambda_2 n_2(t), \quad (1.7a)$$

$$P_4(t) = \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \right) I(t) + B_1 - B_2 + N_1(t) - N_2(t), \quad (1.7b)$$

$$Q_4(t) = -2I(t) + b_1 - B_1 + v_1(t) - N_1(t) + \lambda_1 n_1(t), \quad (1.7c)$$

$$R_4(t) = -2 \frac{f_1^2}{f_2^2} I(t) + b_2 - B_2 + v_2(t) - N_2(t) + \lambda_2 n_2(t). \quad (1.7d)$$

1.2.3. Линейная комбинация Мельбурна — Вуббена

Эта линейная комбинация из фазовых (L_1 и L_2) и кодовых (P_1 и P_2) измерений псевдодальностей между приемником и спутником на двух несущих частотах определяется выражением (см., напр., [2]):

$$L_6 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) - \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 P_1 + f_2 P_2). \quad (1.8)$$

Подстановка (1.2) в (1.8) приводит к следующему выражению:

$$L_6 = A + B + v, \quad (1.9)$$

где $A = \lambda_5 n_5$; B — систематическая погрешность, которая, как предполагается, не зависит от времени; v — случайная составляющая; λ_5 — формальная длина волны; n_5 — широкополосная фазовая неоднозначность:

$$\lambda_5 = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1), \quad (1.10)$$

$$n_5 = n_1 - n_2 \quad (1.11)$$

($\lambda_5 = 86,16$ см для всех спутников GPS, и $\lambda_5 = 84,0$ – $84,36$ см для спутников ГЛОНАСС). Пренебрегая случайными погрешностями фазовых измерений, имеем для v выражение:

$$v = - \frac{\lambda_2 v_1 + \lambda_1 v_2}{\lambda_1 + \lambda_2}. \quad (1.12)$$

Отсюда видно, что $\sigma_v \leq \max(\sigma_{v_1}, \sigma_{v_2})$ и, следовательно, с «хорошими» кодовыми данными ($\text{СКО} \leq 1$ м) будем иметь $\sigma_v \leq 1$ м, и данная линейная комбинация может использоваться для разрешения т.н. широкополосных (wide-lane) неоднозначностей. Таким образом, в комбинации L_6 исключены эффекты задержки сигналов, связанные с ионосферой и тропосферой, параметры геометрической дальности, а также погрешности часов приемника и спутника.

Обе части (1.9) выражены в метрах. В то же время комбинацию L_6 часто выражают в циклах длины волны λ_5 . Разделив обе части (1.9) на λ_5 и вводя обозначения $y = L_6/\lambda_5$, $\beta = B/\lambda_5$ и $\xi = \nu/\lambda_5$, получим:

$$y = n_5 + \beta + \xi. \quad (1.13)$$

Здесь β — постоянная величина, ξ — случайная величина.

2. Сглаживание данных кодовых измерений

В данном разделе мы приводим описание метода сглаживания кодовых измерений, начиная с наиболее простых случаев, когда скачки в начальных фазовых неоднозначностях отсутствуют, а также когда эти скачки имеются, и априори известны времена и размеры скачков.

2.1. Формулировка задачи

Процедура сглаживания, описанная ниже по тексту, проводится для конкретной пары приемник-спутник на временном интервале $[t_1, t_N]$, соответствующем т.н. дуге, которую определим следующим образом.

Определение 1. Назовем дугой четырехмерный временной ряд, содержащий не менее предустановленного числа (например, 10) последовательных измерений 4-х типов величин (кодовых и фазовых псевдодальностей на обеих несущих частотах) с промежутком времени между двумя последовательными измерениями, не превышающим предустановленной величины (например, 180 с).

Опуская нижний и верхний индексы “ k ” и “ i ” соответственно, перепишем уравнения наблюдений (1.2) в следующем виде

$$P_1(t) = \rho^*(t) + I(t) + B_1 + N_1(t), \quad (2.1a)$$

$$P_2(t) = \rho^*(t) + \frac{f_1^2}{f_2^2} I(t) + B_2 + N_2(t), \quad (2.1b)$$

$$L_1(t) = \rho^*(t) - I(t) + b_1 + \nu_1(t) + \lambda_1 n_1(t), \quad (2.1c)$$

$$L_2(t) = \rho^*(t) - \frac{f_1^2}{f_2^2} I(t) + b_2 + \nu_2(t) + \lambda_2 n_2(t), \quad (2.1d)$$

где $\rho^*(t) = \rho(t) + c(\delta_k - \delta^i) + T(t)$; $t \in \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$, t_1, t_2, \dots, t_N — моменты времени (эпохи) измерений.

В равенствах (2.1) левые части суть известные величины — результаты измерений. Остальные величины, фигурирующие в правых частях этих равенств, не известны. В фазовых неоднозначностях $n_1(t)$ и $n_2(t)$, принимающих целочисленные значения, допускаются скачки, величины и эпохи которых заранее неизвестны. Ниже мы предполагаем, что

- 1) систематические погрешности B_F и b_F , вызванные инструментальными задержками, постоянны на интервале $[t_1, t_N]$;
- 2) случайные погрешности $N_F(t)$ и $v_F(t)$ являются центрированными:

$$\overline{N_1(t)} = \overline{N_2(t)} = \overline{v_1(t)} = \overline{v_2(t)} = 0, \quad (2.2)$$

где горизонтальная черта означает усреднение по времени на отрезке $[t_1, t_N]$.

Обозначим среднеквадратичные отклонения этих величин σ_{N_1} , σ_{N_2} , σ_{v_1} , σ_{v_2} . Особенность кодовых измерений состоит в том, что СКО составляющих шума значительно больше (на два порядка) СКО шума фазовых измерений:

$$\sigma_{v_1}, \sigma_{v_2} = \sigma_{N_1}, \sigma_{N_2}.$$

Наличие значительного шума в кодовых измерениях может приводить в процессе обработки данных к неоправданной отбраковке станций и, как следствие, к снижению точности получаемого решения, вплоть до невозможности его получения из-за нехватки данных.

Целью процедуры сглаживания, применяемой на предварительном этапе обработки данных [2], является уменьшение СКО шума в кодовых измерениях (2.1а, б). В идеальном случае при полном отсутствии систематических и случайных составляющих шума при измерении кодовых псевдодальностей мы получили бы вместо (2.1а, б) величины:

$$P_{1,ideal}(t) = \rho^*(t) + I(t), \quad (2.3a)$$

$$P_{2,ideal}(t) = \rho^*(t) + \frac{f_1^2}{f_2^2} I(t), \quad (2.3b)$$

которые, однако, мы не имеем возможности наблюдать непосредственно.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы, исходя из имеющихся данных измерений (2.1), получить приближенные значения величин (2.3) с шумовыми добавками, СКО которых будет сравнимо с СКО шума фазовых измерений.

На первый взгляд, этой цели можно было бы легко достигнуть, составив надлежащие линейные комбинации из фазовых наблюдений (2.1с, d), представляющие зашумленные значения неизвестных величин ρ^* и I , после чего исключить с помощью этих комбинаций величины ρ^* и I в уравнениях (2.3). Однако ясно, что помимо шума такие комбинации будут содержать неизвестные величины n_1 и n_2 , которые также войдут и в выражения (2.3). Последнее обстоятельство существенно усложняет решение поставленной задачи, тем более что n_1 и n_2 могут претерпевать скачкообразные изменения в заранее неизвестные моменты времени. Отсюда следует, что для решения поставленной задачи по сглаживанию кодовых измерений необходимо решить задачу по разрешению фазовых неоднозначностей n_1 и n_2 . Решение последней задачи, в свою очередь, основывается на решении ряда вспомогательных подзадач, рассматриваемых в последующих разделах данной статьи.

2.2. Наблюдения без потери захвата фаз несущих

Основную идею метода сглаживания мы изложим сначала в наиболее простом случае, предполагая, что на временном интервале, соответствующем рассматриваемой дуге, приемник не теряет захвата фазы. В этом случае фазовые неоднозначности сохраняют свои значения на всей дуге, и уравнения наблюдений запишутся в виде:

$$P_1(t) = \rho^*(t) + I(t) + B_1 + N_1(t), \quad (2.4a)$$

$$P_2(t) = \rho^*(t) + \frac{f_1^2}{f_2^2} I(t) + B_2 + N_2(t), \quad (2.4b)$$

$$L_1(t) = \rho^*(t) - I(t) + b_1 + v_1(t) + \lambda_1 n_{10}, \quad (2.4c)$$

$$L_2(t) = \rho^*(t) - \frac{f_1^2}{f_2^2} I(t) + b_2 + v_2(t) + \lambda_2 n_{20}, \quad (2.4d)$$

где $n_{10} = n_1(t_1)$ и $n_{20} = n_2(t_1)$ — начальные фазовые неоднозначности.

Применим технику формирования линейных комбинаций. Прежде всего, отметим, что все необходимые математические действия мы можем производить только с известными данными измерений, каковыми являются левые части равенств (2.4).

Найдем среднее на рассматриваемой дуге величин P_4 , Q_4 и R_4 , определяемых равенствами (1.6). Принимая во внимание (1.7) и (2.2), имеем:

$$\overline{P}_4 = \overline{P_1 - P_2} = \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right) \cdot \overline{I} + B_1 - B_2, \quad (2.5a)$$

$$\overline{Q}_4 = \overline{L_1 - P_1} = -2\overline{I} + b_1 - B_1 + \lambda_1 n_{10}, \quad (2.5b)$$

$$\overline{R}_4 = \overline{L_2 - P_2} = -2\frac{f_1^2}{f_2^2}\overline{I} + b_2 - B_2 + \lambda_2 n_{20}. \quad (2.5c)$$

Чтобы исключить \overline{I} из приведенных выше равенств, введем в рассмотрение величины

$$\Lambda_1 \stackrel{def}{=} \overline{Q}_4 - 2\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\overline{P}_4, \quad (2.6a)$$

$$\Lambda_2 \stackrel{def}{=} \overline{R}_4 - 2\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}\overline{P}_4, \quad (2.6b)$$

представляющие, как нетрудно убедиться (выкладки опускаем), зашумленные значения $\lambda_1 n_{10}$ и $\lambda_2 n_{20}$ соответственно. Далее, составим разности

$$\widetilde{L}_1(t) \stackrel{def}{=} L_1(t) - \Lambda_1, \quad (2.7a)$$

$$\widetilde{L}_2(t) \stackrel{def}{=} L_2(t) - \Lambda_2, \quad (2.7b)$$

из которых сформируем следующие линейные комбинации:

$$\widetilde{P}_1(t) \stackrel{def}{=} \widetilde{L}_1(t) + 2\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(\widetilde{L}_1(t) - \widetilde{L}_2(t)), \quad (2.8a)$$

$$\widetilde{P}_2(t) \stackrel{def}{=} \widetilde{L}_2(t) + 2\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}(\widetilde{L}_1(t) - \widetilde{L}_2(t)). \quad (2.8b)$$

Простые выкладки дают

$$\widetilde{P}_1(t) = P_{1,ideal}(t) + B_1 + \widetilde{v}_1(t), \quad (2.9a)$$

$$\widetilde{P}_2(t) = P_{2,ideal}(t) + B_2 + \widetilde{v}_2(t), \quad (2.9b)$$

где обозначено:

$$\widetilde{v}_1(t) = \alpha v_1(t) - \beta v_2(t), \quad (2.10a)$$

$$\widetilde{v}_2(t) = -\alpha v_2(t) + \gamma v_1(t), \quad (2.10b)$$

$$\alpha = \frac{f_1^2 + f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad \beta = \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad \gamma = \frac{2f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}. \quad (2.10c)$$

Выражения (2.8) для величин $\widetilde{P}_1(t)$ и $\widetilde{P}_2(t)$, как легко убедиться, совпадают с аналогичными формулами из [2] (см. раздел 6.2.5). Таким образом, следуя [2], примем величины $\widetilde{P}_1(t)$ и $\widetilde{P}_2(t)$ за «сглаженные» значения кодовых измерений.

В предположении, что v_1 и v_2 — независимые случайные величины и $\sigma_{v_1} = \sigma_{v_2} = \sigma_v$, из (2.10) находим

$$\sigma_{\widetilde{v}_1} = \frac{\sqrt{4\lambda_1^4 + (\lambda_1^2 + \lambda_2^2)^2}}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} \sigma_v, \quad (2.11a)$$

$$\sigma_{\widetilde{v}_2} = \frac{\sqrt{4\lambda_2^4 + (\lambda_1^2 + \lambda_2^2)^2}}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} \sigma_v. \quad (2.11b)$$

Для спутников GPS, например, отсюда получаем: $\sigma_{\widetilde{v}_1} = 5,1 \cdot \sigma_v$,

$\sigma_{\widetilde{v}_2} = 6,5 \cdot \sigma_v$. Подытоживая, сформулируем следующее

Утверждение 1. Величины $\widetilde{P}_1(t)$, $\widetilde{P}_2(t)$, рассматриваемые в качестве сглаженных кодовых измерений для конкретной пары приемник–спутник, при условии сохранения приемником захвата фаз несущих на протяжении всей дуги, и вычисляемые по формулам (2.5)–(2.8), связаны с идеальными значениями кодовых измерений $P_{1,ideal}(t)$, $P_{2,ideal}(t)$ (см.(2.3)) формулами

(2.9). Случайные шумовые составляющие \tilde{V}_1 и \tilde{V}_2 , входящие в (2.9), выражаются через величины V_1 и V_2 — шум фазовых измерений — формулами (2.10). В предположении, что V_1 и V_2 независимы и имеют одинаковые СКО, равные σ_V , для СКО шума сглаженных кодовых измерений справедлива формула (2.11).

2.3. Обработка наблюдений при наличии скачков в фазовых неоднозначностях

Рассмотрим теперь случай, когда величины $n_1(t)$ и/или $n_2(t)$ претерпевают в моменты времени $t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_p}$ скачки, вызванные потерями захвата фаз несущих (одной или двух). Величины скачков обозначим: $\Delta n_{1,j_1}$,

$\Delta n_{2,j_1}, \dots, \Delta n_{1,j_p}, \Delta n_{2,j_p}$, где

$$\Delta n_{1,j_k} \stackrel{def}{=} n_1(t_{j_k}) - n_1(t_{j_k-1}), \quad (2.12a)$$

$$\Delta n_{2,j_k} \stackrel{def}{=} n_2(t_{j_k}) - n_2(t_{j_k-1}). \quad (2.12b)$$

Здесь $k = 1, \dots, p$. Предположим, что нам априори известны как моменты времени (эпохи) $t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_p}$, так и соответствующие им величины

$\Delta n_{1,j_k}, \Delta n_{2,j_k}$ скачков. Покажем, как в данном случае задача по сглаживанию кодовых данных наблюдений сводится к задаче, рассмотренной в разделе 2.2. Для этого восстановим данные фазовых измерений, откорректировав их на известные величины скачков с помощью следующей процедуры из p шагов, которые запишем рекуррентно:

$$L_F^{(k)}(t) = \begin{cases} L_F^{(k-1)}(t); & t < t_{j_k} \\ L_F^{(k-1)}(t) - \Delta n_{F,j_k}; & t \geq t_{j_k} \end{cases}, \quad (2.13)$$

где $L_F^{(0)}(t) \stackrel{def}{=} L_F(t)$; $k = 1, \dots, p$ и $F = 1, 2$.

Как видно из (2.13), на первом шаге в исходных данных фазовых наблюдений устраняются скачки в момент времени t_{j_1} , на втором шаге — из $L_1^{(1)}$ и $L_2^{(1)}$ устраняются скачки в момент времени t_{j_2} и т.д. На последнем p -м шаге мы получаем фазовые данные $L_1^{(p)}, L_2^{(p)}$, в которых помимо шума присутствуют только начальные фазовые неоднозначности n_{10} и n_{20} , сохраняющие свои значения в пределах всей рассматриваемой дуги. В качестве обновленных данных фазовых измерений возьмем эти величины $L_1^{(p)}, L_2^{(p)}$. Очевидно, что слагаемые шума, изначально присутствующие в L_1 и L_2 , войдут в $L_1^{(p)}$ и $L_2^{(p)}$ без изменения. Далее процедура сглаживания проводится в соответствии с описанием, изложенным в предыдущем разделе, в котором $L_F(t)$ должны быть заменены на $L_F^{(p)}$.

В реальной ситуации на этапе предварительной обработки ни моменты времени потерь захвата фаз несущих, ни значения скачков фазовых неоднозначностей не известны. Кроме того, имеющиеся данные могут содержать грубые измерения (т.н. выбросы), которые необходимо обнаружить и устранить из дальнейшей обработки, чтобы не допустить их влияния на конечный результат. Наконец, в самом приемнике могут возникать скачки в формируемой им шкале времени, которые в свою очередь порождают скачки в кодовых и/или фазовых данных. Такие события также необходимо обнаруживать при анализе данных и учитывать их при обработке. В противном случае решение может быть сильно искажено. Именно методам и алгоритмам, предназначенным для решения задач: 1) по детектированию скачков часов в приемниках, 2) очистке данных наблюдений от выбросов, и, наконец, 3) обнаружению скачков в фазах несущих, посвящены последующие разделы данной статьи.

3. Скачки в часах приемника

3.1. Предпосылки

За прошедшие десятилетия было предложено много методов для обработки фазовых неоднозначностей, заложенных в измерениях фаз несущих, но немного исследований было посвящено скачкам часов приемника, которые могут оказывать нежелательные влияния на обработку данных ГНСС. Такие события обычно игнорируются в обработке двойными разностями. Для безразностной обработки, например, в случае использования методов точного пози-

ционирования (PPP), пренебрежение влиянием скачков часов может привести к деградации точности получаемых результатов. Отказ от надлежащих обнаружения и обработки скачков часов приемника может вызвать неожиданное поведение программного обеспечения ГНСС и привести к большим погрешностям в получающемся решении PPP.

Явлению скачков в часах приемника и вопросам их детектирования посвящен ряд работ (см., например, [2, 6–11]). Отметим, что процедура детектирования скачков в показаниях часов приемников представляет собой один из этапов обработки в методе сглаживания данных кодовых измерений в Бернском ППО ГНСС [2], [7]. Данная процедура особенно важна, в частности, при осуществлении высокоточных сравнений удаленных шкал времени (ШВ) с помощью ГНСС-анализа. Применительно к методам точного позиционирования см., например, [6].

Следует заметить, что на подавляющем большинстве пунктов ГНСС измерений отсутствует типовая время-частотная аппаратура (высокоточные стандарты частоты и частотомеры), которая могла бы обеспечить непосредственное высокоточное измерение разностей ШВ приемника и задающего частоту водородного стандарта, как это делается, например, в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ). Кроме того, не во всех приемниках предусмотрен вывод импульсного сигнала 1 Гц (PPS) внутренней ШВ приемника, что обеспечивает саму возможность таких измерений.

В данном разделе мы приводим описание алгоритма детектирования скачков часов в ГНСС-приемниках, основанного на анализе линейных комбинаций, образованных из результатов кодовых и фазовых измерений на двух несущих частотах. Скачок в часах приемника может быть вызван различными факторами, и его детектирование основано на несоответствии (см. ниже) кодовых и фазовых данных измерений. В Утверждении 2 сформулированы условия, при которых скачок в показаниях часов приемников может быть надежно определен на фоне шумовой составляющей и возможных скачков в фазовых измерениях, вызванных пропусками циклов.

3.2. Моделирование скачка часов приемника

Возможный скачок в показаниях часов приемника, проявляющийся в виде внезапного сдвига во внутренней ШВ приемника, вызван, как правило, внутренними процессами, например, генерацией и/или слиянием часовых RINEX-файлов наблюдений (см. Dach R. и др. [2]), а также несовершенством внутреннего ПО приемника при плохих условиях приема сигнала. В некоторых случаях приемники сами осуществляют скачкообразные изменения показаний часов (resets) (см. Kim and Langley [8]; Lonchay и др. [9]), чтобы пре-

дотвратить чрезмерное увеличение сдвига между своей внутренней ШВ и ШВ GPS в стремлении сохранить синхронизацию генераторов часов с системным временем GPS. Хотя реальный механизм подстройки часов приемника варьируется от одного производителя к другому, обычно считается, что приемник вводит дискретные скачки в формируемую им ШВ. Эти скачки, как правило, в ± 1 мс (часто ± 19 мс) происходят тогда, когда смещение ШВ часов превышает по абсолютной величине 0,5 мс (10 мс) и, следовательно, называются «миллисекундными скачками» (см., напр., Guo F., Zhang X. [10]). Главное отличие миллисекундных скачков часов в приемнике от остальных заключается в том, что они происходят под контролем ПО приемника.

Между процессами кодовых и фазовых измерений существует принципиальное различие, состоящее в том, что кодовые измерения жестко привязаны к ШВ приемника, т.к. кодовые псевдодальности определяются непосредственно из измерений времени распространения сигнала от спутника к приемнику. Поэтому скачок в ШВ приемника приводит к соответствующим скачкам в измеренных значениях псевдодальностей для всех спутников. При этом захват фазы сигналов от спутников может не теряться, т.к. алгоритм удержания фазы несущей осуществляется параллельно кодовым измерениям (см. Freymueller [11], IGSMAIL-4318). (Предполагается, что генератор часов приемника работает без сбоев.)

Рассмотрим схематично процесс формирования кодовых и фазовых данных в случае, когда на временном интервале (t_1, t_2) между двумя последовательными записями в RINEX-файл наблюдений в ШВ приемника произошел не миллисекундный (не контролируемый ПО приемника) скачок величиной — Δt_{rec} .

При отсутствии скачка запись данных в RINEX-файл произошла бы в момент времени t_2 (по системной ШВ) (см. рис. 1). В случае скачка величиной Δt_{rec} эта запись будет смещена (относительно системной ШВ) на Δt_{rec} (в нашем случае вправо) и соответствовать моменту времени $t_2 + \Delta t_{rec}$. Если бы скачка не было, то в этот момент значения кодовых и фазовых измерений были бы равны $P_F(t_2 + \Delta t_{rec})$ и $L_F(t_2 + \Delta t_{rec})$ соответственно. Наличие скачка не влияет на фазовые данные, и они останутся без изменения. Напротив, для кодовых измерений в случае скачка вместо $P_F(t_2 + \Delta t_{rec})$ будет измерена величина $P_F(t_2 + \Delta t_{rec}) - c\Delta t_{rec}$, что равносильно дополнительной добавке $-\Delta t_{rec}$ к поправке δ_k часов приемника.

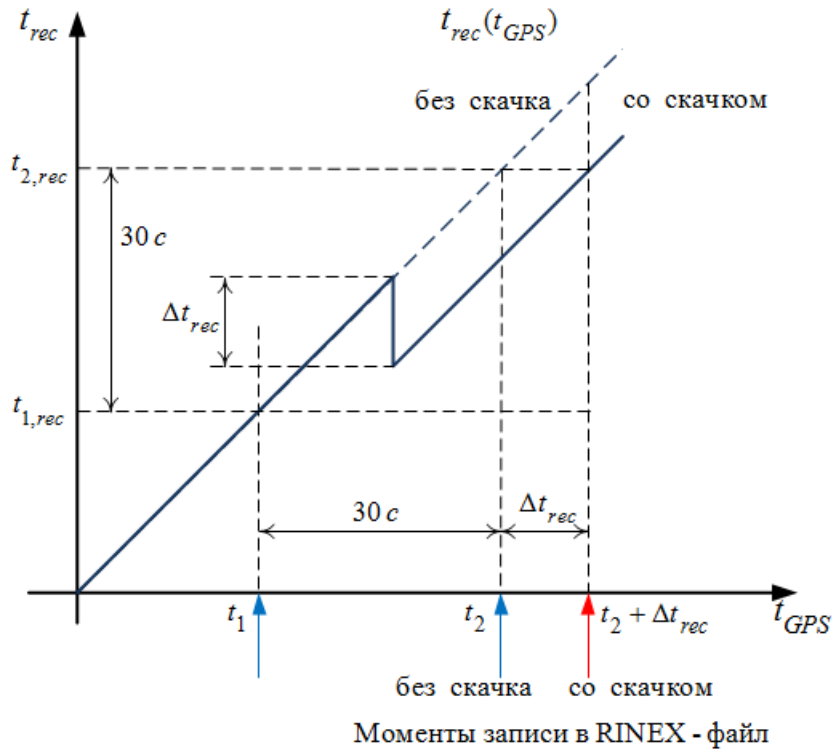


Рис. 1. Схема записи данных в RINEX-файл наблюдений при не миллисекундном скачке в ШВ приемника

Таким образом, в связи со сказанным выше мы моделируем скачок в часах приемника в виде появления в уравнениях кодовых (но не фазовых) измерений дополнительного слагаемого $c \Delta t_{rec}$, при этом значение δ_k в равенствах для фазовых и кодовых измерений остается неизменным.

Скачок в часах может быть обнаружен как несогласованность кодовых и фазовых данных (см. ниже) при сравнении данных измерений для двух последовательных эпох записи данных в RINEX-файл. Чтобы детектировать факт появления скачка в часах, необходимо задать значение порога. Обычно оно задается на уровне 10 нс, т.е. пикосекундные изменения в шкале времени приемника между двумя эпохами не рассматриваются как скачки, поскольку они неотличимы от шума кодовых измерений.

При обработке данных ГНСС-измерений в случае обнаружения скачка часов в приемнике дуга разбивается в этот момент времени на две части, и для нового отрезка дуги вводятся новые параметры фазовых неоднозначностей для каждого спутника. Исключение составляют миллисекундные скачки, которые обрабатываются, как скачки в фазовых неоднозначностях без

разбиения дуги. При этом корректируются только фазовые данные (см. [2]), кодовые же измерения остаются без изменения. Причина этого заключается, по-видимому, в том, что миллисекундные скачки происходят под контролем внутреннего ПО приемника, автоматически учитывающего сдвиг ШВ. Коррекция фазовых данных объясняется в этом случае необходимостью обеспечить согласованность кодовых и фазовых измерений. Подробнее о миллисекундных скачках см., напр., Guo F., Zhang X. [10].

3.3. Начало алгоритма. Формирование разностей

$$\Delta P_3^i, \Delta L_3^i \text{ и } \Delta P_3^i - \Delta L_3^i$$

Алгоритм проверки возникновения скачка в часах приемника основан на поиске несоответствия между кодовыми и фазовыми измерениями для двух последовательных эпох записи данных. Основная проблема — это отличить именно скачок Δt_{rec} в ШВ приемника от возможных скачков в фазовых данных и шумовых составляющих кодовых измерений.

Пусть Δt — временной интервал между двумя последовательными моментами записи данных наблюдений в файл приемником (обычно 30 с) и пусть $\Delta F = F(t + \Delta t) - F(t)$ обозначает приращение F на интервале $[t, t + \Delta t]$. Используя выражения (1.4) (в которых мы опускаем нижний индекс «k», рассматривая конкретный приемник), сформируем разности ΔP_3^i , ΔL_3^i , а также разности $\Delta P_3^i - \Delta L_3^i$, обозначаемые ниже D_3^i , для следующих четырех возможных случаев а)–д).

Случай а). На интервале $[t, t + \Delta t]$ не происходит скачков часов и/или потери фазовых циклов. Пренебрегая разностями $c \Delta \delta_k$, $c \Delta \delta^i$, изменениями $\Delta \tilde{B}^i$ и $\Delta \tilde{b}^i$ систематических составляющих, а также случайной шумовой компоненты $\Delta \tilde{v}^i$ в уравнениях фазовых наблюдений, получим из (1.4):

$$\Delta P_3^i = \Delta \rho^i + \Delta T^i + \Delta N^i, \quad (3.1a)$$

$$\Delta L_3^i = \Delta \rho^i + \Delta T^i, \quad (3.1b)$$

где $\Delta N^i = \tilde{N}^i(t + \Delta t) - \tilde{N}^i(t)$ — шум кодовых измерений.

Отсюда видно, что разность $D_3^i = \Delta P_3^i - \Delta L_3^i$ содержит только случайный шум:

$$D_3^i = \Delta N^i. \quad (3.2a)$$

Случай б). На интервале $[t, t + \Delta t]$ происходит скачок Δt_{rec} в показаниях часов приемника без потери захвата фазы. В равенстве (3.1a) появляется дополнительное слагаемое $c \Delta t_{rec}$, которым пренебречь нельзя. Равенство (3.1b) при этом не изменится. В результате получаем:

$$D_3^i = c \Delta t_{rec} + \Delta N^i. \quad (3.2b)$$

Случай с). На интервале $[t, t + \Delta t]$ происходит потеря захвата фазы для r спутников с индексами $i = 1, \dots, r$ (для простоты изложения считаем, что индексы таких спутников следуют по порядку); скачок в часах приемника отсутствует. Из равенств (3.1a, b) только в равенствах (3.1b) возможно появление дополнительного слагаемого, что приводит к выражениям:

$$D_3^i = \Delta A^i + \Delta N^i; \quad i = 1, \dots, r, \quad (3.2c)$$

$$D_3^i = \Delta N^i; \quad i = r + 1, \dots, N. \quad (3.2c')$$

Здесь $\Delta A^i \stackrel{def}{=} (\lambda_2^i \Delta n_1^i - \lambda_1^i \Delta n_2^i) \cdot \kappa^i$; Δn_1^i и Δn_2^i — изменения значений фазовых неоднозначностей для несущих частот L_1 и L_2 ; N — количество спутников, наблюдаемых в обе эпохи.

Случай д). На интервале $[t, t + \Delta t]$ происходит скачок Δt_{rec} в часах приемника и потеря захвата фазы для r спутников. Тогда:

$$D_3^i = c \Delta t_{rec} + \Delta A^i + \Delta N^i; \quad i = 1, \dots, r, \quad (3.2d)$$

$$D_3^i = c \Delta t_{rec} + \Delta N^i; \quad i = r + 1, \dots, N. \quad (3.2d')$$

3.4. Заключительная часть алгоритма детектирования скачка в часах на интервале $[t, t + \Delta t]$

Шаг 1. Критерий отбора спутников. Для N спутников, наблюдаемых в обе эпохи t и $t + \Delta t$, рассмотрим числовой ряд D_3^1, \dots, D_3^N . Пусть D_3^{med} — медиана этого ряда. (В случае четного количества чисел опреде-

ления медианы ряда в литературе различны. Здесь мы за медиану ряда чисел в случае их четного числа принимаем одно из двух стоящих посередине чисел упорядоченного по возрастанию ряда.) Обозначим: I — множество индексов $i = 1, \dots, N$, для которых выполнено:

$$\left| D_3^i - D_3^{med} \right| \leq 4 \cdot RMS_1, \quad (3.3)$$

где RMS_1 — заданное пороговое значение (например, 2 м). Пусть N_1 — число спутников, удовлетворяющих (3.3). В случае $N_1 < 3$ скачок на рассматриваемом временном интервале не детектируется и в алгоритмах обработки выполняется переход к следующему временному интервалу. Ниже считаем $N_1 \geq 3$.

Шаг 2. Критерий наличия скачка. Найдем среднее величин D_3^i :

$$\bar{D}_3 = \frac{1}{N_1} \sum_{i \in I} D_3^i, \quad (3.4)$$

где суммирование производится по всем спутникам, удовлетворяющим (3.3).

Будем считать, что в часах приемника произошел скачок, если выполнено неравенство

$$\left| \bar{D}_3 \right| > c \cdot difEvt, \quad (3.5)$$

где $difEvt$ — заданное пороговое значение (например, $50 \cdot 10^{-9}$ с, так что $c \cdot difEvt \approx 15$ м). В противном случае будем считать, что скачок отсутствует.

3.5. Обоснование алгоритма

Нашей текущей задачей будет сформулировать условия, при которых скачок в часах приемника будет детектирован (или нет) по критерию (3.5).

Справедливо следующее

Утверждение 2. Пусть $N \geq 4$ и на временном интервале $[t, t + \Delta t]$ количество спутников, для которых в приемнике происходит потеря захвата фазы, равно r , $0 \leq r < N/2$. Пусть случайная составляющая удовлетворяет условию

$$\left| \Delta N^i \right| \leq 2 \cdot RMS_1. \quad (3.6)$$

$c \cdot difEvt$ — заданное пороговое значение, $c \cdot difEvt \geq 2 \cdot RMS_1 \left(\frac{4r}{N} + 1 \right)$.

Тогда:

А) если в ШВ приемника произошел скачок и его величина удовлетворяет условию

$$c \left| \Delta t_{rec} \right| > c \cdot difEvt + 2 \cdot RMS_1 \left(\frac{4r}{N} + 1 \right), \quad (3.7)$$

то вышеприведенный алгоритм детектирует скачок в часах;

В) если в ШВ приемника не было скачка или его величина не превышает

$$c \left| \Delta t_{rec} \right| \leq c \cdot difEvt - 2 \cdot RMS_1 \left(\frac{4r}{N} + 1 \right), \quad (3.8)$$

то скачок в часах приемника детектирован не будет;

С) в остальных случаях детектирование скачка в часах может произойти или не произойти в зависимости от конкретных значений величин Δn_1^i , Δn_2^i и ΔN^i .

◁ Так как приведенные в разделе 4 случаи а)–с) вытекают из случая d) при $\Delta t_{rec} = 0$ и/или $r = 0$, то достаточно рассмотреть только случай d). Будем считать также, что для всех ΔA^i , фигурирующих в равенствах (3.2d), выполняется:

$$\left| \Delta A^i + \Delta N^i \right| > 2 \cdot RMS_1; \quad i = 1, \dots, r.$$

(В противном случае мы переобозначим величину $\Delta A^i + \Delta N^i$, обозначив ее снова как ΔN^i (условие (11) для нее, очевидно, выполнено), и переместим соответствующее равенство из группы (3.2d) в (3.2d'), уменьшив на 1 число r .)

Как явствует из (3.2d'), все числа D_3^i при $i \geq r + 1$ попадают в промежуток $[c \Delta t_{rec} - 2 \cdot RMS_1; c \Delta t_{rec} + 2 \cdot RMS_1]$, а остальные D_3^i ($i = 1, \dots, r$) ввиду последних неравенств — нет. Отсюда, а также из условия $r < N/2$, вытекает, что медианой ряда D_3^1, \dots, D_3^N будет одно из значений $D_3^i = c \Delta t_{rec} + \Delta N^i; i = r + 1, \dots, N$. Мы его запишем как $D_3^{med} = c \Delta t_{rec} + \Delta N^{med}$. Поэтому неравенства отбора (3.3) запишутся так:

$$\left| \Delta A^i + \Delta N^i - \Delta N^{med} \right| \leq 4 \cdot RMS_1; \quad i = 1, \dots, r, \quad (3.9)$$

$$\left| \Delta N^i - \Delta N^{med} \right| \leq 4 \cdot RMS_1; \quad i = r + 1, \dots, N. \quad (3.9')$$

Группа неравенств (3.9') в силу (3.6) выполнена. Рассмотрим группу неравенств (3.9). Предположим, что эти неравенства не выполнены для r_1 спутников; $0 \leq r_1 \leq r$. Удалим их из дальнейшего анализа. Произведя перенумерацию индексов, перепишем (3.9) в виде:

$$\left| \Delta A^i + \Delta N^i - \Delta N^{med} \right| \leq 4 \cdot RMS_1; \quad i = 1, \dots, r - r_1, \quad (3.10)$$

$$\left| \Delta N^i - \Delta N^{med} \right| \leq 4 \cdot RMS_1; \quad i = r - r_1 + 1, \dots, N - r_1. \quad (3.10')$$

В силу (3.4) \bar{D}_3^\bullet запишется так:

$$\bar{D}_3^\bullet = \frac{1}{N - r_1} \sum_{i=1}^{N-r_1} D_3^i = c \Delta t_{rec} + \overline{\Delta A}^\bullet + \overline{\Delta N}^\bullet. \quad (3.11a)$$

Здесь обозначено

$$\overline{\Delta A}^\bullet = \frac{1}{N - r_1} \sum_{i=1}^{r-r_1} \Delta A^i; \quad \overline{\Delta N}^\bullet = \frac{1}{N - r_1} \sum_{i=1}^{N-r_1} \Delta N^i. \quad (3.11b)$$

Для дальнейшего оценивания величины \bar{D}_3^\bullet произведем оценку величин ΔA^i . Перепишем неравенства (3.10), произведя оценку снизу их левых частей:

$$4 \cdot RMS_1 \geq \left| \Delta A^i + \Delta N^i - \Delta N^{med} \right| \geq \left| \Delta A^i \right| - \left| \Delta N^i \right| - \left| \Delta N^{med} \right|;$$

$$i = 1, \dots, r - r_1,$$

откуда с учетом (3.6) получаем

$$\left| \Delta A^i \right| \leq 4 \cdot RMS_1 + \left| \Delta N^i \right| + \left| \Delta N^{med} \right| \leq 8 \cdot RMS_1; \quad i = 1, \dots, r - r_1.$$

Используем последние неравенства для оценивания $\overline{\Delta A}^\bullet$. Имеем из (3.11b):

$$\left| \overline{\Delta A}^\bullet \right| \leq \frac{1}{N - r_1} \sum_{i=1}^{r-r_1} \left| \Delta A^i \right| \leq 8 \cdot RMS_1 \frac{r - r_1}{N - r_1}. \quad (3.12)$$

А) Покажем теперь, что выполнение условия (3.7) влечет выполнение (3.5), и, таким образом, в часах приемника будет детектирован скачок. Действительно, из (3.11a) находим:

$$\left| \bar{D}_3 \dot{\cdot} \right| = \left| c \Delta t_{rec} + \overline{\Delta A} \dot{\cdot} + \overline{\Delta N} \dot{\cdot} \right| \geq c \left| \Delta t_{rec} \right| - \left| \overline{\Delta A} \dot{\cdot} \right| - \left| \overline{\Delta N} \dot{\cdot} \right|.$$

Оценим снизу выражение в правой части последнего неравенства. Применяя к каждому из трех слагаемых в этом выражении неравенства (3.7), (3.12) и (3.6), получим:

$$c \left| \Delta t_{rec} \right| - \left| \overline{\Delta A} \dot{\cdot} \right| - \left| \overline{\Delta N} \dot{\cdot} \right| > \\ c \cdot difEvt + 2 \cdot RMS_1 \left(\frac{4r}{N} + 1 \right) - 8 \cdot RMS_1 \frac{r - r_1}{N - r_1} - 2 \cdot RMS_1 \geq c \cdot difEvt.$$

Здесь мы приняли во внимание неравенство $\frac{r}{N} - \frac{r - r_1}{N - r_1} \geq 0$. Таким образом,

$\left| \bar{D}_3 \dot{\cdot} \right| > c \cdot difEvt$, и неравенство (3.5) выполнено.

В) Пусть выполнено (3.8). Тогда из (3.11a) по аналогии с предыдущим находим:

$$\left| \bar{D}_3 \dot{\cdot} \right| \leq c \left| \Delta t_{rec} \right| + \left| \overline{\Delta A} \dot{\cdot} \right| + \left| \overline{\Delta N} \dot{\cdot} \right| \leq c \cdot difEvt,$$

т.е. неравенство (3.5) не выполнено и, следовательно, алгоритм проверки наличия скачка укажет на его отсутствие. В частности, если $\Delta t_{rec} = 0$, то, несмотря на шумовые составляющие и возможные скачки в фазовых измерениях, вызванные потерями захвата фазы для некоторых спутников, ложной детекции скачка в ШВ приемника не произойдет.

Случай С) очевиден. \triangleright

4. Алгоритм чистки данных измерений от выбросов

Неотъемлемой частью метода сглаживания является процедура чистки данных от грубых измерений (выбросов), которая применяется на различных его этапах. В данном разделе мы описываем алгоритм детектирования и устранения выбросов из данных измерений, которые, как предполагается, состоят из независимой от времени неизвестной компоненты и шума. Алгоритм основан на поиске т.н. оптимального решения, для которого СКО и величина максимального абсолютного отклонения измеренных данных от среднего не превышает заданных пороговых значений, при этом количество детектированных выбросов минимально. Предложенный алгоритм позволяет более эффективно по сравнению с аналогичным алгоритмом, используемым, например,

в широко известном Бернском ППО ГНСС версии 5.2 (Bernese GNSS Software Version 5.2), очищать данные от выбросов, сводя к минимуму количество неоправданно отбракованных данных. Тестирование алгоритмов проводилось для линейной комбинации Мельбурна — Вуббена, образованной из данных ГНСС-измерений на двух несущих частотах. Показано, что для отдельных спутников разность в количестве отбракованных данных может достигать ~25 % от общего числа наблюдений в пользу нового алгоритма. Следует заметить, что уменьшение количества наблюдений в обработке из-за неоправданной их отбраковки может существенно повлиять на точность получаемых значений оцениваемых величин и к ухудшению их метрологических характеристик.

4.1. Постановка задачи

Пусть данные y_j измерений, выполненных в пронумерованные индексом j моменты времени, представлены в виде:

$$y_j = z + \xi_j; \quad j = 1 \dots N, \quad (4.1)$$

где z — неизвестная постоянная, не зависящая от j ; ξ_j — шумовая составляющая. Такое представление справедливо, в частности, для комбинации Мельбурна — Вуббена (1.13) на временном интервале, на котором фазовые неоднозначности не изменяются.

В задачу предварительной обработки входит процедура отбраковки данных грубых измерений и выбросов, т.е. отыскание такого набора $Y_P = \{y_{j_1}, \dots, y_{j_P}\}$ из P элементов (длины P), для которого выполняется

$$\sigma_{Y_P} = \sqrt{\frac{1}{P-1} \sum_{j \in \{j_1, \dots, j_P\}} (y_j - z)^2} \leq \sigma_{\max}, \quad (4.2a)$$

$$|y_j - z| \leq 3 \cdot \sigma_{\max}; \quad y_j \in \{y_{j_1}, \dots, y_{j_P}\}, \quad (4.2b)$$

$$P \geq \text{MINOBS}. \quad (4.2c)$$

Здесь σ_{\max} — заданное пороговое значение; MINOBS — параметр, ограничивающий снизу длину (количество элементов) искомого набора измеренных значений (например, 10); ниже считаем $\text{MINOBS} < N$. Значения y_j , не входящие в Y_P , рассматриваются как выбросы и удаляются из дальней-

шей обработки. Часто условия (4.2) являются единственными условиями, учитываемыми при удалении из исходного набора грубых измерений и выбросов в программе сглаживания данных (см. [2] и имеющуюся там литературу). В данной работе мы формулируем задачу для поиска т.н. оптимального решения (см. ниже), дополнив (4.2) двумя условиями экстремума. Во-первых, потребуем, чтобы помимо (4.2) длина искомого набора была максимальной (количество отбракованных значений минимально):

$$P \rightarrow \max . \tag{4.3}$$

Нетрудно видеть, что при заданных значениях y_j решения задачи (4.2) может не существовать (например, если y_j есть арифметическая прогрессия с шагом $> \sigma_{\max}$). В том случае, когда решение существует, значение P , при котором достигается максимум (4.3), обозначим P_{\max} . Заметим, что условие (4.3) не обеспечивает единственности решения, т.к. может оказаться несколько наборов длиной P_{\max} , удовлетворяющих (4.2). Поэтому, во-вторых, среди всех возможных наборов, для которых выполнено (4.2)–(4.3), будем искать тот, для которого величина σ_{Y_P} принимает наименьшее значение:

$$\sigma_{Y_P} \xrightarrow{Y_P = \{y_{j_1}, \dots, y_{j_{P_{\max}}}\}; P = P_{\max}} \min . \tag{4.4}$$

Дадим следующее

Определение 2. Для заданной последовательности значений $y_j, j = 1, 2, \dots, N$ набор значений $Y_{opt} = \{y_{j_1}, \dots, y_{j_{P_{\max}}}\}$, удовлетворяющий условиям (4.2–4.4), назовем оптимальным. Соответствующее значение СКО обозначим σ_{opt} .

Таким образом, задача состоит в построении алгоритма для отыскания оптимального решения задачи (4.2–4.4).

Сформулируем утверждение, являющееся ключом к построению эффективного алгоритма поиска (см. раздел 4.2).

Утверждение 3. Пусть набор $Y_{opt} = \{y_{j_1}, \dots, y_{j_{P_{\max}}}\}$ значений является оптимальным для заданной последовательности значений $\{y_j\}$. Пусть

$y_{\min} = \min\{y_{j_1}, \dots, y_{j_{P_{\max}}}\}$, $y_{\max} = \max\{y_{j_1}, \dots, y_{j_{P_{\max}}}\}$. Тогда в интервале (y_{\min}, y_{\max}) не содержится значений y_j , не входящих в Y_{opt} .

◁ Действительно, предположим противное. Пусть $y_j \notin Y_{opt}$, но $y_{\min} < y_j < y_{\max}$, и пусть y_k, y_l — два значения из Y_{opt} , для которых $y_k = y_{\min}$ и $y_l = y_{\max}$. Возможен один из двух случаев:

$$1) \quad z < y_j, \quad \text{и, следовательно,} \quad 0 < (y_j - z) < (y_l - z) \quad \Rightarrow \\ (y_j - z)^2 < (y_l - z)^2,$$

либо

$$2) \quad z \geq y_j, \quad \text{откуда} \quad 0 \leq (z - y_j) < (z - y_k) \Rightarrow (y_j - z)^2 < (y_k - z)^2.$$

В первом случае заменим в наборе Y_{opt} значение y_l на y_j , а во втором — y_k на y_j . В любом из случаев мы получим другой набор той же длины P_{\max} , для которого выполнены (4.2a), (4.2b), но СКО, как явствует из (4.2a), меньше, чем σ_{opt} . Отсюда следует, что набор Y_{opt} не является оптимальным, т.к. для него не выполнено требование (4.4). Полученное противоречие доказывает справедливость сформулированного утверждения. ▽

В реальной ситуации точное значение z , входящее в (4.2a), (4.2b), неизвестно. Мы приближенно определим его формулой

$$z = \frac{1}{P} \sum_{j \in \{j_1, \dots, j_P\}} y_j. \quad (4.5)$$

Таким образом, величина z , входящая в (4.2a), (4.2b), сама зависит от искомого решения, что затрудняет его поиск.

Алгоритм Спрингера (Springer T.A.), реализованный в программе сглаживания данных (см. [2], [7]), предназначен для отыскания набора Y , удовлетворяющего условиям (4.2). Он основан на итерациях (номер итерации обозначен верхним индексом в скобках):

Шаг 1. Инициализация: $Y^{(0)} = \{y_1, \dots, y_N\}$; $Level^{(0)} = 10^{20}$; $k = 0$.

Шаг 2. Проверка длины набора $Y^{(k)}$; если она меньше MINOBS, то процесс заканчивается, решение не найдено.

Шаг 3. По имеющемуся набору $Y^{(k)}$ вычисляются значения $z^{(k)}$ и $\sigma^{(k)}$ (формулы (2a), (2b)).

Шаг 4. Проверяется выполнение неравенства $\sigma^{(k)} \leq \sigma_{\max}$. Если оно выполнено, то набор $Y^{(k)}$ принимается за решение и процесс поиска заканчивается. В противном случае — переход к шагу 5.

Шаг 5. Определяется уровень $Level^{(k+1)}$ для детектирования выбросов:

$$Level^{(k+1)} = 3 \cdot \sigma^{(k)}.$$

Чтобы избежать бесконечного повторения итераций, осуществляется проверка: $Level^{(k+1)} < Level^{(k)}$. Если это неравенство не выполнено, то полагаются: $Level^{(k+1)} = Level^{(k)} / 2$.

Шаг 6. Определяется новый набор $Y^{(k+1)}$, включающий те и только те y_j , для которых

$$\left| y_j - z^{(k)} \right| \leq Level^{(k+1)}.$$

Шаг 7. k++. Переход к Шагу 2.

Если предположить, что в описанном выше процессе значения $\sigma^{(k)}$ монотонно убывают по k и сходятся к некоторому значению $\sigma^{(\infty)}$, так что $Level^{(\infty)} = 3 \cdot \sigma^{(\infty)}$, то для решения, полученного на Шаге 4, будет выполнено $\sigma^{(\infty)} \leq \sigma_{\max}$ и $\left| y_j - z^{(\infty)} \right| \leq 3 \cdot \sigma^{(\infty)} \leq 3 \cdot \sigma_{\max}$. Таким образом, мы получаем решение задачи (2).

В реальности убывание $\sigma^{(k)}$ может не быть монотонным, что приводит на шаге 5 к двукратному изменению уровня детектирования выбросов и, как следствие, к неоправданной отбраковке данных. Понятно, что оптимальное решение таким способом можно не найти, что подтверждают численные расчеты (см. раздел 4.3).

4.2. Алгоритм решения задачи (4.2–4.4)

Для поиска оптимального решения сформулированной выше задачи (4.2–4.4) рассмотрим следующий алгоритм. Предварительно расположим значе-

ния $\{y_j\}$ в порядке возрастания. Чтобы избежать сложностей в обозначениях, мы будем считать, что $y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_N$. Более того, для простоты рассуждений будем считать, что все y_j различны, т.е. $y_1 < y_2 < \dots < y_N$.

Далее, заметим, что в силу Утверждения 2, если Y_{opt} — оптимальный набор и y_k, y_l — его наименьшее и наибольшее значения соответственно, то все значения y_j из интервала (y_k, y_l) принадлежат Y_{opt} , следовательно, $Y_{opt} = \{y_k, \dots, y_l\}$. Таким образом, вместо перебора всевозможных наборов различной длины с общим количеством 2^N нам для поиска решения (4.2), (4.3) достаточно варьировать только два параметра — k и l , связанных условием:

$$k + \text{MINOBS} < l. \quad (4.6)$$

Количество всех пар индексов (k, l) , подчиненных (4.6), равно $(N - \text{MINOBS})(N - \text{MINOBS} + 1) / 2$.

Введем обозначения

$$z(k;l) = \frac{1}{l-k+1} \sum_{j=k}^l y_j, \quad (4.7a)$$

$$\sigma^2(k;l) = \frac{1}{l-k} \sum_{j=k}^l \left(y_j - z(k;l) \right)^2. \quad (4.7b)$$

Имеют место следующие рекуррентные соотношения:

$$z(k;l) = z(k;l+1) - A_{k,l+1} \cdot (y_{l+1} - z(k;l+1)), \quad (4.8a)$$

$$\sigma^2(k;l) = B_{k,l+1} \cdot \sigma^2(k;l+1) - C_{k,l+1} \cdot (y_{l+1} - z(k;l+1))^2, \quad (4.8b)$$

$$A_{kl} = \frac{1}{l-k}; \quad B_{kl} = \frac{l-k}{l-k-1}; \quad C_{kl} = \frac{l-k+1}{(l-k)(l-k-1)}, \quad (4.8c)$$

позволяющие находить $z(k;l)$ и $\sigma^2(k;l)$ через вычисленные значения $z(k;l+1)$ и $\sigma^2(k;l+1)$ за 7 арифметических действий (значения дробей могут быть вычислены заранее как элементы двумерного массива). Анало-

гичные формулы выражают $z(k;l)$ и $\sigma^2(k;l)$ через $z(k-1;l)$ и $\sigma^2(k-1;l)$:

$$z(k;l) = z(k-1;l) - A_{k-1,l} \cdot (y_{k-1} - z(k-1;l)), \quad (4.9a)$$

$$\sigma^2(k;l) = B_{k-1,l} \cdot \sigma^2(k-1;l) - C_{k-1,l} \cdot (y_{k-1} - z(k-1;l))^2. \quad (4.9b)$$

Условия (4.2а, б) запишутся в новых обозначениях так:

$$\sigma^2(k;l) \leq \sigma_{\max}^2, \quad (4.10a)$$

$$\begin{cases} y_l - z(k;l) \leq 3 \cdot \sigma_{\max} \\ z(k;l) - y_k \leq 3 \cdot \sigma_{\max} \end{cases}. \quad (4.10b)$$

Алгоритм, описанный ниже, основан на переборе всевозможных пар (k, l) с условием (4.6). Организуем этот перебор следующим образом. Разобьем алгоритм на шаги, на каждом из которых будем рассматривать наборы заданной длины, начиная с наибольшего значения N и уменьшая его на 1 на каждом следующем шаге, пока не достигнем значения MINOBS-1 или не найдем решение. На первом шаге имеется один набор длины N : $\{y_1, \dots, y_N\}$. Проверим его на выполнение условий (4.10). Если они выполнены, то этот набор является решением и дальнейший поиск прекращается. В противном случае переходим к рассмотрению наборов длиной $N-1$.

В общем случае, если не найдено решения среди наборов длиной большей L , то переходим к наборам длиной L . При этом если $L = \text{MINOBS}-1$, то процесс поиска заканчивается — решение не найдено. При $L \geq \text{MINOBS}$ рассматриваем $N-L+1$ наборов длиной L :

$$\{y_1, \dots, y_L\}, \{y_2, \dots, y_{L+1}\}, \dots, \{y_{N-L+1}, \dots, y_N\}. \quad (4.11)$$

Каждый из этих наборов проверяется на выполнение условий (4.10). Если ни один из них не удовлетворяет (4.10), то переходим к рассмотрению наборов длиной $L-1$. В противном случае: а) если найден только один набор из (4.11), удовлетворяющий (4.10), то он и будет решением нашей задачи; б) если условиям (4.10) удовлетворяют несколько наборов, то в качестве решения выбирается тот из них, для которого величина $\sigma^2(k,l)$ оказывается наименьшей. Процесс поиска на этом прекращается, при этом $P_{\max} = L$.

Для вычисления величин $z(k,l)$ и $\sigma^2(k,l)$ используются рекуррентные формулы (4.8), (4.9) в соответствии с приведенной ниже схемой (показаны только $z(k,l)$):

$$\begin{array}{ccccccc}
 z(1, N) & & & & & & \\
 \downarrow & \searrow & & & & & \\
 z(1, N-1) & z(2, N) & & & & & \\
 \vdots & \vdots & \ddots & & & & \\
 \downarrow & \downarrow & & \searrow & & & \\
 z(1, L+1) & z(2, L+2) & \cdots & z(N-L, N) & & & \\
 \downarrow & \downarrow & & \downarrow & & \searrow & \\
 z(1, L) & z(2, L+1) & \cdots & z(N-L, N-1) & z(N-L+1, N) & &
 \end{array} \tag{4.12}$$

Согласно этой схеме на первом шаге алгоритма по формулам (4.7) вычисляются $z(1; N)$ и $\sigma^2(1; N)$, для чего требуется $4N$ арифметических операций. Для вычисления величин $z(k, l)$ и $\sigma^2(k, l)$ на всех последующих шагах используются рекуррентные формулы (4.8) и (4.9), позволяющие вычислять значения указанных пар величин за 7 арифметических операций каждая, исходя из результатов вычислений предыдущего шага. Так, например, на втором шаге, исходя из известных значений $z(1; N)$ и $\sigma^2(1; N)$, с помощью формул (4.8) находим значения $z(1; N-1)$ и $\sigma^2(1; N-1)$ (вертикальная стрелка на схеме), а с помощью формул (4.9) — значения $z(2; N)$ и $\sigma^2(2; N)$ (косая стрелка на схеме). В общем случае переход на следующий шаг в направлении вертикальных стрелок (см. схему выше) осуществляется согласно формулам (4.8), а в направлении косых — согласно (4.9). Общее количество арифметических действий, необходимых для отыскания решения, не превосходит $4N + 9 \cdot ((N - P_{\max} + 2) \cdot (N - P_{\max} + 1) / 2 - 1)$. Здесь мы приняли во внимание затраты на проверки выполнения неравенств (4.10): от 0 до 2-х арифметических действий.

4.3. Результаты расчетов

Для проверки работоспособности предлагаемого алгоритма были взяты данные измерений станции ONSA для спутника GPS с системным номером PRN = 26 за 2010 год, день года = 207 (данные, поставляемые вместе с дистрибутивом Бернского ППО ГНСС версии 5.2). На рисунке 2 представлены значения комбинации Мельбурна — Вуббена на временном интервале ~73 минуты ($N = 145$). По горизонтальной оси отложены номера эпох, отсчитываемых от начала суток с 30 секундным интервалом. По вертикальной

оси отложены значения комбинации, выраженные в длинах волн $\lambda_5 \approx 0.86$ м (см. [2]). На рисунке 3 представлены значения отклонений от среднего данных, очищенных от выбросов с помощью алгоритма, применяемого в Бернском ППО ГНСС версии 5.2 с установленными значениями параметров $\sigma_{\max} = 0.6$, MINOBS = 10. Эпохи, в которых данные были забракованы, обозначены незаполненными кружками. Всего было отбраковано 46 данных измерений, что составляет 31,7 % от общего числа данных.

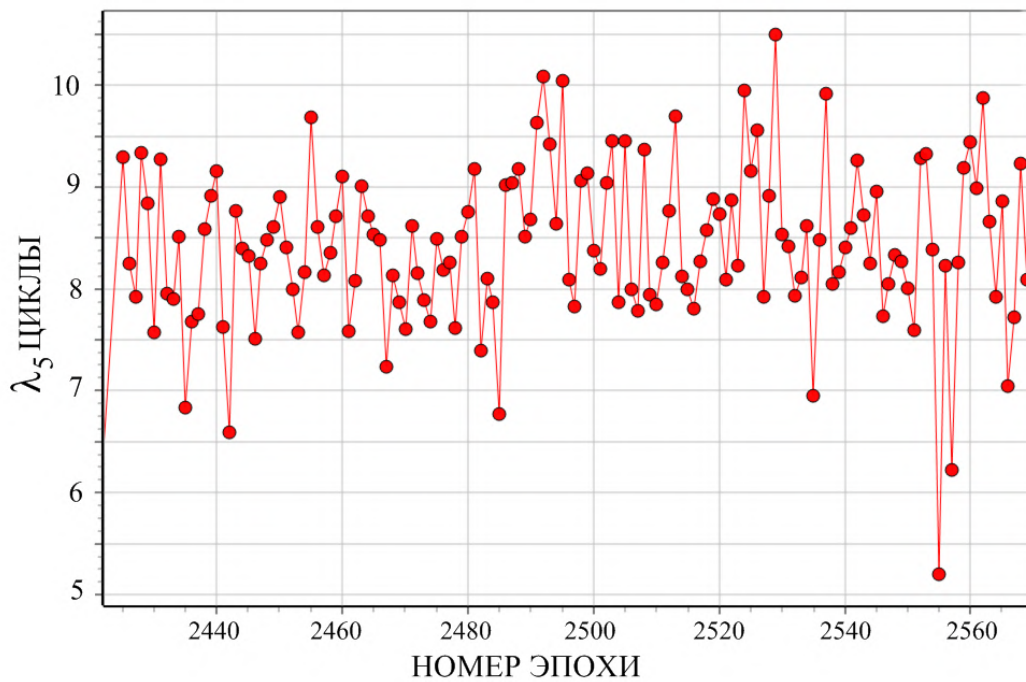


Рис. 2. Значения комбинации Мельбурна — Вуббена для станции ONSA (PRN = 26 за 2010 г., день года 207)

На рисунке 4 представлены отклонения от среднего данных, очищенных от выбросов с помощью предложенного алгоритма, реализованного при тех же самых значениях параметров σ_{\max} и MINOBS. Как видно из рисунка, при отыскании оптимального решения было отбраковано 11 данных измерений (7,5 %), что почти на 25 % меньше, чем в предыдущем расчете.

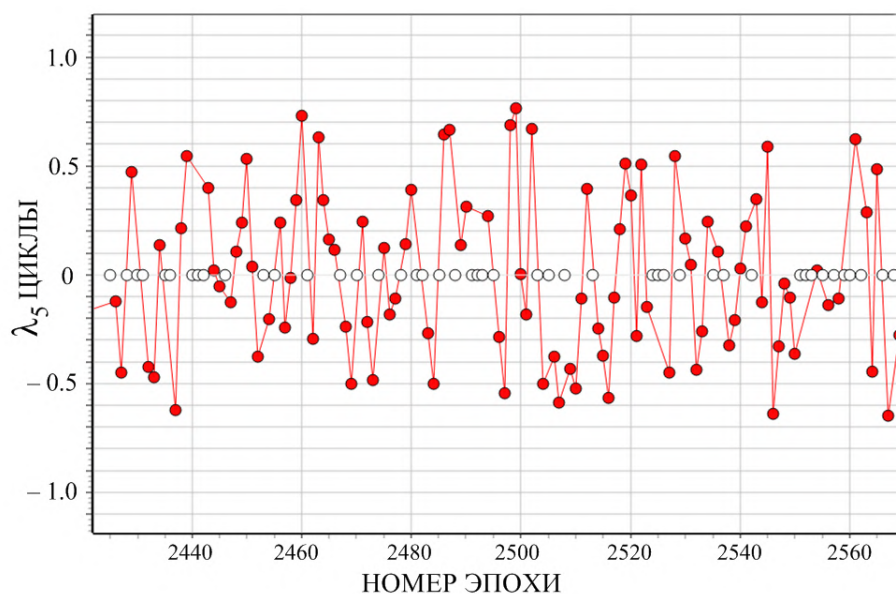


Рис. 3. Значения отклонений от среднего комбинации Мельбурна — Вуббена для станции ONSA (PRN = 26 за 2010 г., день года 207) после очистки от выбросов по алгоритму, используемому в Бернском ППО ГНСС версии 5.2: отбраковано 47 данных (незаполненные кружки)

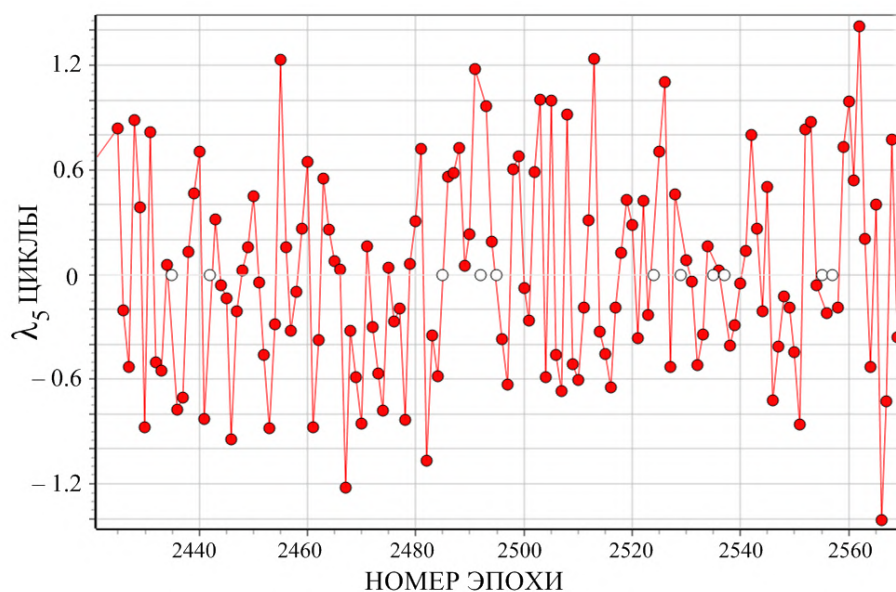


Рис. 4. Значения отклонений от среднего комбинации Мельбурна — Вуббена для станции ONSA (PRN = 26 за 2010 г., день года 207) после очистки от выбросов по предложенному алгоритму: отбраковано 11 данных (незаполненные кружки)

Таким образом, предложенный алгоритм, как показали результаты обработки, позволяет эффективно производить чистку от выбросов данных наблюдений, состоящих из неизвестной компоненты и шума. Оптимизация метода обработки для заданных предустановленных значений параметров σ_{\max} и MINOBS обеспечивает минимальное количество отбракованных данных, при этом для поиска оптимального решения требуется не более $N - \text{MINOBS} + 1$ шагов, за которые решение будет гарантированно найдено, если только оно существует.

5. Алгоритм детектирования скачков в линейной комбинации Мельбуерна — Вуббена

Как было показано в разделе 2, для реализации метода сглаживания в общем случае необходимо определить эпохи и размеры скачков в целочисленных фазовых неоднозначностях n_1 и n_2 . Этот заключительный этап в изложении метода сглаживания мы начинаем с поиска скачков в линейной комбинации Мельбуерна — Вуббена. На этом шаге мы определяем положения и размеры скачков для широкополосной фазовой неоднозначности $n_5 = n_1 - n_2$. На заключительном шаге (см. раздел 6) с помощью анализа линейной комбинации $L_4 = L_1 - L_2$ мы определяем размеры скачков в n_1 и n_2 .

Комбинация Мельбуерна — Вуббена исключает эффекты ионосферы, геометрии, часов и тропосферы (см. уравнение (1.13)). Без учета широкополосной неоднозначности n_5 остаточный сигнал должен быть чистым шумом с СКО примерно равным 0,7 от среднеквадратичного значения кодовых наблюдений на частоте L_1 . Если шум комбинации Мельбуерна — Вуббена имеет среднеквадратичное значение ниже 0,5 от широкополосных циклов (43 см), то почти всегда можно обнаружить все пропуски циклов и выбросы.

Проблема поиска скачков в широкополосной фазовой неоднозначности на основе комбинации Мельбуерна — Вуббена на протяжении последних нескольких десятилетий рассматривалась многими исследователями. Для нахождения эпох и величин скачков был предложен ряд алгоритмов, описания которых можно найти, например, у Blewitt [13], J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza and M. Hernández-Pajares [12], R. Dach и др. [2]. Различаясь в деталях, они базируются на общей идее: на сравнении СКО временных рядов данных измерений, рассматриваемых от левой границы дуги до текущей точки (эпохи). В случае превышения разности СКО, соответствующих двум соседним эпохам, предустановленного порогового значения, в одной из этих

двух эпох декларируется скачок. Недостатком подобных алгоритмов является частое ложное срабатывание на выбросах, которые по величине могут превышать размеры самого скачка. С другой стороны, попытка увеличить пороговое значение приводит к противоположному эффекту — неспособности к распознаванию небольших по величине скачков.

В данном разделе предложен новый алгоритм определения скачков в комбинации Мельбурна — Вуббена, позволяющий более надежно по сравнению с аналогичными известными алгоритмами определять скачки и очищать данные от выбросов с минимальным количеством брака. Преимущество нового алгоритма в сравнении с аналогичным алгоритмом, применяемым в Бернском ППО ГНСС версии 5.2 (Bernese GNSS Software Version 5.2), особенно наглядно проявляется в случае многократных (каскадных) потерь фазы приемником. В этом случае для отдельных спутников разность в количестве отбракованных данных может достигать ~50 % от общего числа наблюдений в пользу нового алгоритма. Отметим, что определение положений и величин скачков в линейных комбинациях осуществляется на фоне шумовой составляющей и выбросов.

5.1. Постановка задачи

Рассмотрим линейную комбинацию Мельбурна — Вуббена, представленную в разделе 1.2.3 равенством (1.13), на временном интервале $[t_1, t_N]$, соответствующем одной дуге

$$y(t) = n_5(t) + \beta + \xi(t); \quad t \in [t_1, t_N]. \quad (5.1)$$

Здесь $n_5(t) = n_1(t) - n_2(t)$ — широкополосная фазовая неоднозначность, которая представляет собой кусочно-постоянную функцию дискретного аргумента, претерпевающую в точках разрыва целочисленные скачки. Наша задача состоит в том, чтобы определить координаты (эпохи) разрывов и величины скачков в них. Очевидно, что именно эти же точки разрывов будут являться точками разрывов $n_1(t)$ и $n_2(t)$. Таким образом, будут обнаружены практически все координаты разрывов в $n_1(t)$ и $n_2(t)$ за исключением тех, в которых $n_1(t)$ и $n_2(t)$ имеют равные по величине скачки. Но этот случай мы считаем маловероятным и в дальнейшем его не рассматриваем.

5.2. Алгоритм Спрингера

Перейдем в равенстве (5.1) от дискретного аргумента к отсчетам:

$$y_j = (n_{1j} - n_{2j}) + \beta + \xi_j; \quad j = 1 \dots N. \quad (5.2)$$

В данном разделе мы рассматриваем подробно алгоритм Т. Спрингера (Springer Т.А. [2], [7]), применяемый в Бернском ППО ГНСС версии 5.2. В следующем разделе приводим описание нового алгоритма, основанного на формировании т.н. кластеров, состоящих из эпох, данные в которых группируются около заданного значения (см. раздел 5.3).

Ядро алгоритма Спрингера Т. может быть представлено в виде следующих шагов.

Шаг 1. Отрезок дуги $[1;N]$ разбивается на две части: левую $[1;N/2]$ и правую $[N/2+1;N]$.

Шаг 2. Если количество точек (эпох) в каждой из двух частей не меньше предустановленного значения MINOBS, то переходим к шагу 3, в противном случае: а) все точки дуги отмечаются как выбросы и из дальнейшей обработки удаляются; б) алгоритм завершается.

Шаг 3. Для каждой из частей вычисляются средние значения m_1, m_2 и среднеквадратичные отклонения σ_1, σ_2 (индекс «1» относится к левой части, «2» — к правой).

Шаг 4. Если $\sigma_1 \geq \sigma_2$, то считается, что скачок (если он есть) находится в левой части дуги, в противном случае — в правой.

Ниже описание алгоритма приводится для случая $\sigma_1 \geq \sigma_2$, т.е. когда скачок предполагается в левой половине дуги.

Шаг 5. Обозначим $J = \{j : 1 \leq j \leq N/2, |y_j - m_2| > SLPMIN\}$, где $SLPMIN = 1$. Количество точек в J обозначим NDIF.

Если NDIF > 0, то переходим к шагу 6, в противном случае алгоритм завершается: скачок в дуге отсутствует.

Шаг 6. При NDIF > 0 определяем приблизительно размер скачка:

$$CYCLES = \frac{1}{NDIF} \sum_{j \in J} |y_j - m_2|.$$

Шаг 7. Определяем положение JUMP скачка, как наибольший из индексов j, $1 \leq j \leq JUMP$, для которого выполняется:

$$|y_j - m_2| > CYCLES.$$

Шаг 8. Если JUMP \geq MINOBS, то переходим к шагу 9. В противном случае: а) все точки отрезка $[1;JUMP]$ маркируются как выбросы, а для остальной части дуги считается, что она не содержит скачков; б) алгоритм завершается.

Шаг 9. Каждый из двух отрезков [1;JUMP] и [JUMP+1;N] проходит процедуру очистки от выбросов (см. раздел 4). Если обнаруживается выброс, то все четыре типа наблюдения (кодовые и фазовые на двух частотах) отбраковываются.

Шаг 10. Для каждого из отрезков [1;JUMP] и [JUMP+1;N] проверяется количество наблюдений, оставшихся после удаления выбросов. Если оно менее MINOBS, то все наблюдения для этого отрезка маркируются как выбросы. Последующие шаги осуществляются только в том случае, если в обоих отрезках количество наблюдений не меньше MINOBS.

Шаг 11. Для каждого из отрезков с данными, очищенными от выбросов, вычисляются средние значения m_1 , m_2 .

Шаг 12. Вычисляется величина скачка:

$$CYCLES = [m_2 - m_1].$$

Если $CYCLES \geq 1$, то считается, что скачок обнаружен, в противном случае считается, что скачок отсутствует.

Шаг 13. Производится коррекция данных после скачка на его величину:

$$y_j = y_j - CYCLES; \quad j = JUMP + 1, \dots, N.$$

Шаг 14. Переход к шагу 1.

Приведенный алгоритм работает вполне надежно в случае не более одного скачка в одной дуге. При наличии более одного скачка работа алгоритма становится неадекватной. Как будет показано ниже, в том случае, когда в пределах одной дуги происходит многократная (каскадная) потеря циклов, данный алгоритм неоправданно бракует многие данные (см. раздел 5.3). Эту особенность можно увидеть из самого алгоритма, проанализировав приведенные выше шаги. Действительно, пусть, например, на шаге 4 выполнено $\sigma_1 \geq \sigma_2$, и в правой части дуги (в которой, как предполагается, скачок отсутствует) примерно на ее середине имеется скачок величиной, большей 2. Дальнейшее действие, которое осуществляется для правой части дуги, — это шаг 9: чистка от выбросов. Метод чистки от выбросов Спрингера Т. (описание см. в разделе 4.1) в этом случае автоматически забракует все точки данной части дуги, т.к. во всех этих точках отклонение от среднего будет больше 1. Несколько лучший результат может быть в этом случае получен с предложенным в 4.2 оптимальным методом чистки от выбросов, который забракует лишь половину данных этой части дуги. В любом случае скачок в правой части дуги по описанному выше алгоритму обнаружен не будет.

5.3. Новый алгоритм решения задачи

Чтобы устранить отмеченные выше недостатки существующих алгоритмов, в данном разделе мы приводим новый алгоритм, основанный на принципиально другом подходе к детектированию скачков. Представим его в виде следующих шагов.

Шаг 0. Инициализация. Задается значение параметра $\Delta = 2 \cdot RMS_5$ (где $RMS_5 = 0.6$ — пороговое значение СКО при обработке линейной комбинации Мельбурна — Вуббена).

Точки дуги маркируются нулями: $flag_j = 0; j = 1, \dots, N$.

Шаг 1. Поиск максимума плотности значений массива y_j . На данном шаге для отрезка заданной длины Δ ищется такое его положение на оси Y , при котором в него попадает максимальное количество значений из массива y_j . При этом рассматриваются только те индексы j , для которых $flag_j = 0$. Поскольку на положение отрезка, при котором число попаданий в него значений y_j максимально и на само число попаданий не влияет перестановка значений внутри массива y_j , то дальнейший поиск будем проводить для упорядоченного по возрастанию массива y_j .

Шаг 1.0. Упорядочим массив y_j по возрастанию. Произведем в нем перенумерацию индексов, расположив их в порядке возрастания. Полученный в результате массив обозначим $Y_j: Y_1 \leq Y_j \leq Y_N$ (см. рис. 5.а).

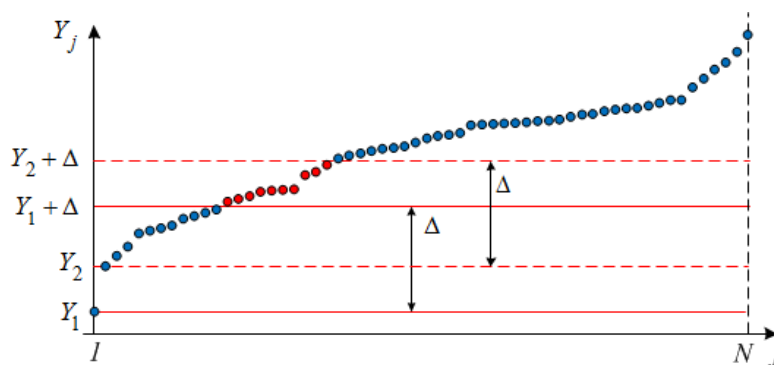


Рис. 5.а. Поиск максимума плотности значений в упорядоченном по возрастанию массиве данных Y_j

Примечание. Процедура упорядочивания выполняется для данной дуги лишь один раз. При повторном прохождении данного шага упорядочивание не выполняется.

Поиск положения на оси ординат отрезка длиной Δ с максимальным количеством попавших в него значений Y_j будем осуществлять перемещением этого отрезка по оси Y , последовательно совмещая его левую границу со значениями Y_1, Y_2, \dots и подсчитывая при этом количество попавших в него значений Y_j .

Шаг 1.1. Совмещаем левую границу отрезка длиной Δ с наименьшим числом Y_1 упорядоченного массива и считаем количество NJ значений Y_j , попавших в отрезок $[Y_1, Y_1 + \Delta]$. Иницилируем значения параметров NJMAX = NJ и JMAX = 1.

Шаг 1.2. Переносим левую границу интервала длиной Δ в точку Y_2 и снова считаем количество NJ точек в полосе $[Y_2, Y_2 + \Delta]$; при этом сначала: а) NJ–, затем: б) увеличиваем NJ на число, равное количеству точек (отмеченных красным цветом на рис. 5.а), вошедших в интервал $(Y_1 + \Delta, Y_2 + \Delta]$. Сравниваем полученное количество точек NJ с NJMAX. Если $NJ > NJMAX$, то переопределяем: NJMAX = NJ, и JMAX = 2 и т.д.

.....

Шаг 1.п. Переносим левую границу отрезка длиной Δ в точку Y_n и считаем количество NJ точек в полосе $[Y_n, Y_n + \Delta]$; при этом сначала: а) NJ–, затем: б) увеличиваем NJ на число, равное количеству точек, вошедших в интервал $(Y_{n-1} + \Delta, Y_n + \Delta]$. Сравниваем полученное количество точек NJ с NJMAX. Если $NJ > NJMAX$, то переопределяем: NJMAX = NJ и JMAX = п.

Таким образом, полоса шириной Δ (см. рис. 5.а) перемещается вверх по оси ординат, и одновременно подсчитывается число вошедших в нее значений Y_j до тех пор, пока значение Y_N не окажется в полосе (внутри соответствующего отрезка на оси Y). В этом случае поиск прекращается с найденными значениями NJMAX и JMAX (см. рис. 5.б).

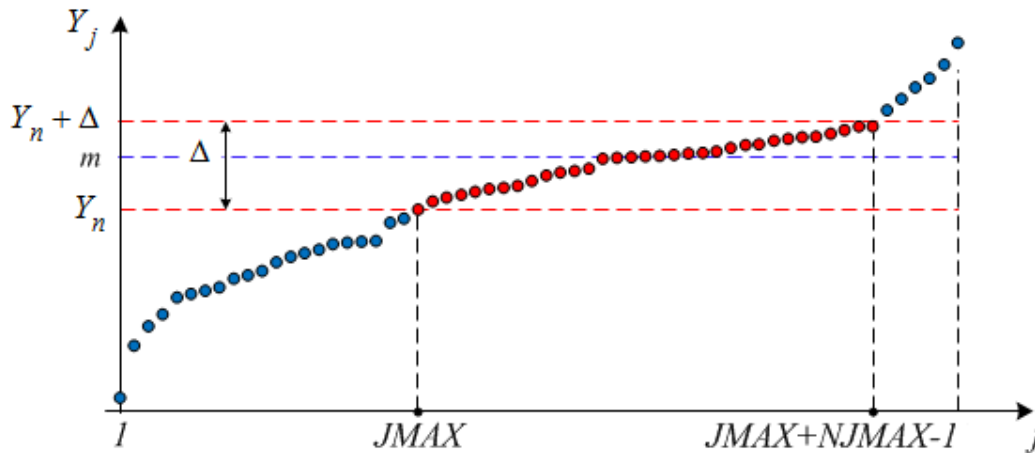


Рис. 5.6. Поиск максимума плотности значений в упорядоченном по возрастанию массиве данных Y_j

Для положения интервала, при котором в него попадает максимальное количество значений Y_j , вычисляем среднее значение (см. рис. 5.6):

$$m = \frac{1}{NJMAX} \sum_{j=JMAX}^{JMAX+NJMAX-1} Y_j.$$

Примечание. К данному шагу 1 алгоритма, оформленного в виде подпрограммы, происходит многократное обращение. Найденное значение среднего m служит в вызывающей программе отправным значением для поиска кластера точек (см. ниже определение 3) на временной оси, значения u_j в которых сгруппированы около m . Найденные точки, образующие кластер, маркируются с помощью массива $flag_j$ числом, отличным от нуля. После этого происходит повторное обращение к данной подпрограмме, при этом точки, маркированные отличными от нуля числами, в последующем процессе поиска не участвуют.

Шаг 2. Поиск кластера. Значения u_j , группирующиеся около найденного на предыдущем шаге среднего m , могут относиться к эпохам, разбросанным по временной оси в хаотичном порядке. Наша задача на данном шаге алгоритма определить скопление таких точек на временной оси, т.е. кластер, который определим следующим образом.

Определение 3. Назовем (m, Δ) кластером множество точек (эпох) временной оси, индексы j которых принадлежат отрезку $[k, l]$ ($1 \leq k < l \leq N$) и для которых выполнены следующие требования:

1) все точки отрезка $[k, l]$ маркированы одним и тем же значением: $flag_k = \dots = flag_l$;

2) в точках k и l левой и правой границ отрезка выполнено неравенство

$$|y_j - m| \leq \Delta; \quad (5.3)$$

3) количество точек, в которых выполнено (5.3), не менее предустановленного значения $MINOBS$;

4) индексы двух соседних точек, в которых выполнено (5.3), отличаются не более чем на предустановленную величину $MAXGAP$;

5) значение k не может быть уменьшено с сохранением требований (1–4);

6) значение l не может быть увеличено с сохранением требований (1–4).

Данное определение иллюстрирует рисунок 5.в.

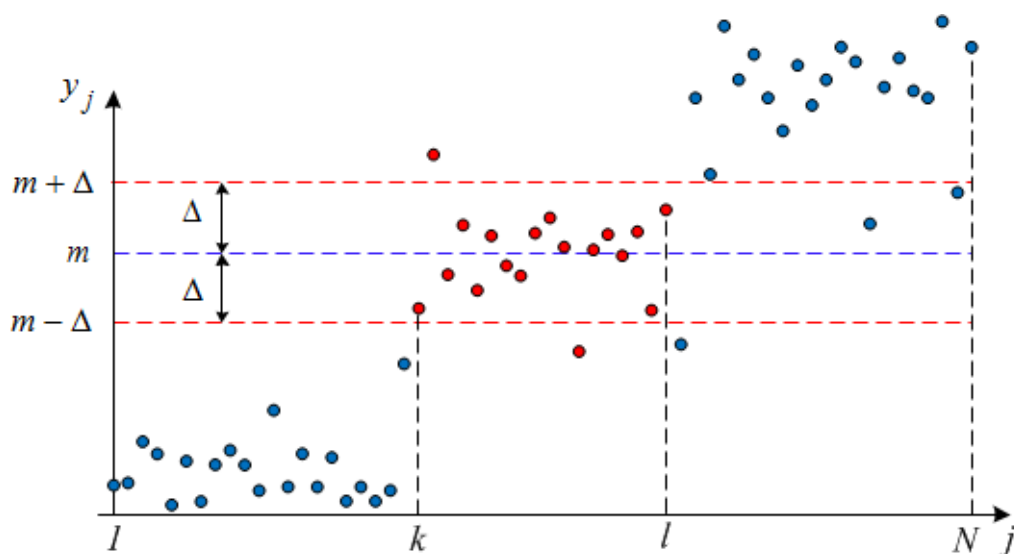


Рис. 5.в. Эпохи с индексами $k \leq j \leq l$ образуют (m, Δ) -кластер

Предположим, что уже найдено n кластеров:

1. $[k_1, l_1]$ – (m_1, Δ) -кластер, $flag_{k_1} = \dots = flag_{l_1} = 1$;

.....

n . $[k_n, l_n]$ – (m_n, Δ) -кластер, $flag_{k_n} = \dots = flag_{l_n} = n$.

На данном шаге алгоритма осуществляется поиск $n+1$ -го (m_{n+1}, Δ) -кластера точек. С этой целью производится проверка выполнения условий (1–4) для всех маркированных нулями точек (эпох), начиная с левой границы дуги до тех пор, пока не найдем очередной кластер, либо не дойдем до правой границы дуги.

После того, как (m_{n+1}, Δ) -кластер $[k_{n+1}, l_{n+1}]$ найден, все его точки маркируются числом $n+1$: $flag_{k_{n+1}} = \dots = flag_{l_{n+1}} = n+1$; После этого переходим к шагу 1.

Если очередной кластер не найден, то поиск кластеров завершен и переходим к шагу 3.

Шаг 3. Найденны ли кластеры? На этом шаге проверяется: найдены ли кластеры? Если найден хотя бы один кластер, то переходим к шагу 4, в противном случае: 1) все точки дуги маркируются как выбросы и удаляются из дальнейшей обработки; 2) работа алгоритма завершается.

Шаг 4. Поиск единичных скачков внутри кластеров. В каждом из найденных кластеров $[k_n, l_n]$ возможны выбросы и/или единичные скачки. Это следует непосредственно из неравенств (5.3) и предустановленного значения $\Delta = 1.2$.

4.1. При проверке кластера на наличие единичного скачка используем алгоритм Спрингера (см. раздел 5.2) с имплементированным в него новым алгоритмом очистки от выбросов (см. раздел 4.2).

Примечание. Предполагаем, что внутри кластера возможно не более одного единичного скачка.

4.2. Найденные эпохи J_k и величины $\overset{def}{\Delta n_{5, J_k}} = n_{5, J_k} - n_{5, J_k - 1}$ ($k = 1, \dots, q$) скачков запоминаются;

4.3. Производится коррекция данных на величину каждого найденного скачка по формулам:

$$y_j^{(k)} = \begin{cases} y_j^{(k-1)}; & j < J_k \\ y_j^{(k-1)} - \Delta n_{5, J_k}; & J_k \leq j < N \end{cases}; \quad k = 1, \dots, q, \quad (5.4)$$

где $y_j^{(0)} = y_j$.

4.4. Переобозначаем: $y_j = y_j^{(q)}$ — откорректированные согласно (5.4)

данные y_j с удаленными скачками внутри кластеров.

Шаг 5. Маркировка точек вне кластеров. Все точки вне найденных кластеров (если они имеются) маркируются как выбросы.

Шаг 6. Упорядочивание кластеров. Перенумеруем кластеры так, чтобы они располагались на временной оси слева направо. Для упорядоченного набора кластеров $[k_n, l_n]$, $n = 1, \dots, p+1$ выполняются:

$$1 \leq k_1 < l_1 < k_2 < l_2 < \dots < k_{p+1} < l_{p+1} \leq N.$$

Шаг 7. Чистка кластеров и уточнение средних значений y_j .

7.1. В соответствии с описанным в разделе 4.2 алгоритмом производим чистку от выбросов внутри каждого из $p+1$ кластеров.

7.2. Для каждого из кластеров, очищенных от выбросов, определяем средние значения m_n .

Шаг 8. Определение величины скачков между двумя соседними кластерами.

Из приведенного выше описания следует, что оставшиеся скачки в y_j располагаются на границах между кластерами. В частности, если найден только один кластер, то после проверки его на наличие скачка, коррекции y_j на величину скачка (если он обнаружен) и чистки от выбросов других скачков больше не будет. Если найдено более одного кластера, то эпохами j_1, \dots, j_p скачков будут являться координаты левых границ кластеров, начиная со второго: $j_1 = k_2, \dots, j_p = k_{p+1}$. Величины скачков в этом случае находятся как округленные к ближайшему целому разности средних значений соседних кластеров:

$$\Delta n_{5, j_n} = NINT(m_{n+1} - m_n), \quad n = 1, \dots, p. \quad (5.5)$$

5.4. Результаты численных расчетов

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма были взяты данные измерений станции MATE для спутника GPS с системным номером PRN = 16 за 2010 год, день года = 207 (данные, поставляемые вместе с дистрибутивом Бернского ППО ГНСС версии 5.2). На рисунке 6 представлены зна-

чения комбинации Мельбурна — Вуббена на временном интервале ~134 минуты ($N=269$). По горизонтальной оси отложены номера эпох, отсчитываемых от начала суток с 30-секундным интервалом. По вертикальной оси отложены значения комбинации, выраженные в длинах волн $\lambda_5 \approx 0.86$ м (см. [2]). На рисунке 7 представлены значения отклонений от среднего данных, очищенных от скачков и выбросов с помощью алгоритма, применяемого в Бернском ППО ГНСС версии 5.2. Эпохи, в которых данные были забракованы, обозначены незаполненными кружками. Всего было отбраковано 144 данных измерений, что составляет 54 % от общего числа данных рассматриваемой дуги.

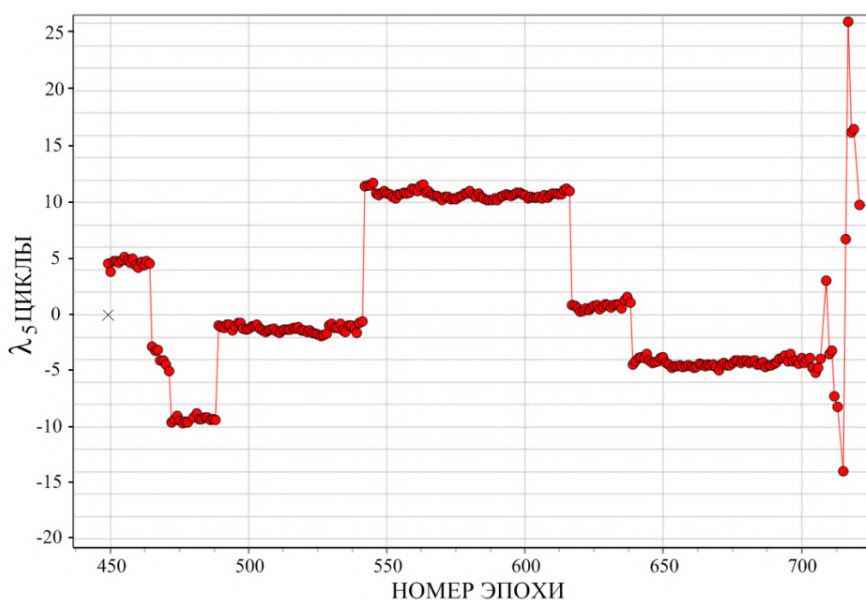


Рис. 6. Значения комбинации Мельбурна — Вуббена для станции МАТЕ (PRN = 16 за 2010 г., день года 207)

На рисунке 8 представлены аналогичные данные, полученные с помощью описанного выше алгоритма. Как видно из рисунка, при отыскании решения было отбраковано 16 данных измерений (6 %), что почти на 50 % меньше, чем в предыдущем расчете. Крестиками отмечены эпохи детектированных скачков.

К счастью, современные приемники достаточно редко теряют захват фазы несущей, и множественные потери циклов на протяжении одной дуги происходят не так уж часто. В результате из-за отмеченных особенностей Бернского ППО ГНСС неоправданно отбраковывается не более 5 % от общего количества всех данных. Тем не менее, в том случае, когда необходимо наблюдать общие спутники для достаточно удаленных станций, вес данных измерений может существенно возрасти, т.к. станции могут наблюдать всего один–два

спутника одновременно. В таком случае отбраковка измерений одного из спутников может привести к невозможности обработки данных.

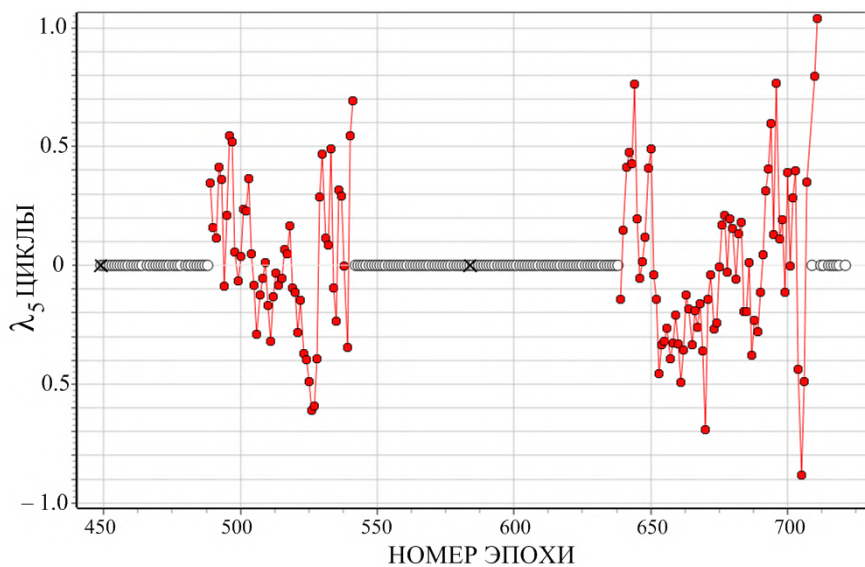


Рис. 7. Значения комбинации Мельбуэрна — Вуббена для станции МАТЕ (PRN = 16 за 2010 г., день года 207) после детектирования и устранения скачков в фазовых неоднозначностях по алгоритму, используемому в Бернском ППО ГНСС версии 5.2: отбраковано 144 данных (незаполненные кружки)

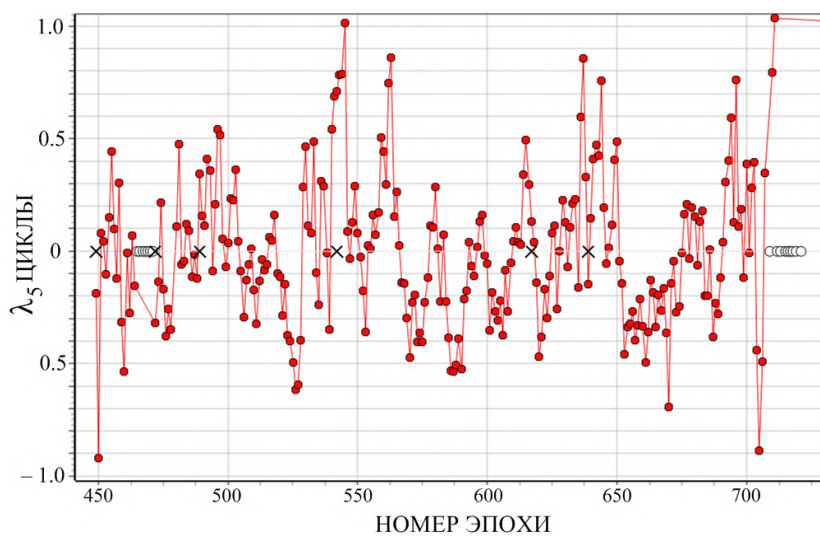


Рис. 8. Значения комбинации Мельбуэрна — Вуббена для станции МАТЕ (PRN = 16 за 2010 г., день года 207) после детектирования и устранения скачков в фазовых неоднозначностях по предложенному алгоритму: отбраковано 16 данных (незаполненные кружки). Крестиками показаны положения детектированных скачков

6. Определение фазовых неоднозначностей

В данном разделе мы приводим заключительную часть метода сглаживания. В предыдущем разделе показано, как с помощью обработки комбинации Мельбурна — Вуббена могут быть найдены эпохи $t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_p}$ и величины скачков широкополосной неоднозначности $n_5 = n_1 - n_2$. Величина скачка n_5 в эпоху t_{j_k} при этом выражается через скачки n_1 и n_2 :

$$\Delta n_{5,j_k} = \Delta n_{1,j_k} - \Delta n_{2,j_k}, \quad k = 1, \dots, p. \quad (6.1)$$

Очевидно, что данных p равенств недостаточно для определения $2p$ неизвестных величин скачков в правых частях этих равенств. Для получения еще p уравнений рассмотрим линейную комбинацию L_4 (см. 1.7a):

$$L_4(t) = -\left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right) I(t) + b_1 - b_2 + v_1(t) - v_2(t) + \lambda_1 n_1(t) - \lambda_2 n_2(t). \quad (6.2)$$

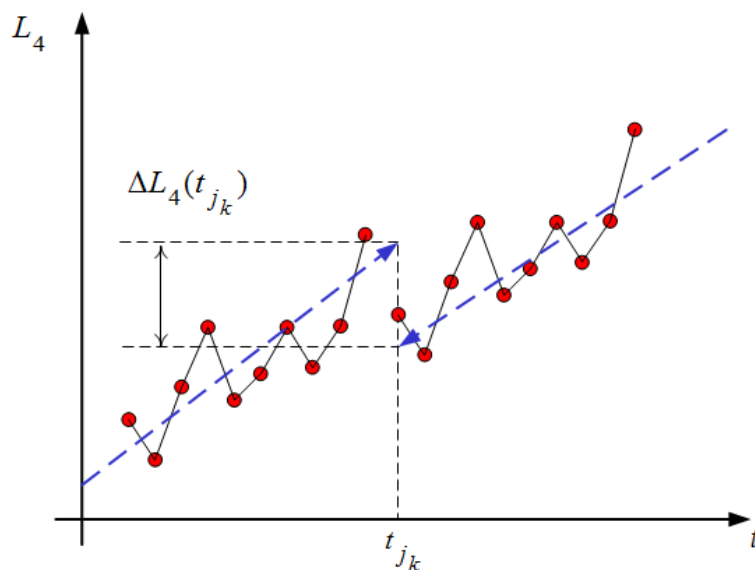
В эпоху t_{j_k} L_4 претерпевает скачок, который в предположении непрерывности $I(t)$ выражается равенством:

$$\Delta L_{4,j_k} = \lambda_1 \Delta n_{1,j_k} - \lambda_2 \Delta n_{2,j_k} + \Delta v_{j_k} \quad (6.3)$$

со случайным слагаемым шума Δv .

Изменением величины $I(t)$, входящей в правую часть (6.2), мы не можем пренебречь даже в пределах нескольких 30-секундных интервалов, т.к. ионосфера изменяется достаточно быстро. Поэтому описанный в предыдущих разделах алгоритм детектирования скачков к данной комбинации не применим. В то же время эпохи скачков нам уже известны. Для определения величины ΔL_4 применим (см. [2]) метод линейной аппроксимации. Суть этого метода отражена на рисунке 9.

Методом наименьших квадратов находятся линейные функции, аппроксимирующие L_4 слева и справа от известной эпохи скачка t_{j_k} . Количество значений, используемых для аппроксимации слева и справа от скачка, задается ~ 10 . Разность значений найденных функций в точке скачка справа и слева дает искомое значение $\Delta L_{4,j_k}$.

Рис. 9. Определение величины скачка в комбинации L_4

В результате для определения значений $\Delta n_{1,j_k}$, $\Delta n_{2,j_k}$ в эпоху t_{j_k} скачка помимо (6.1) имеем еще одно уравнение (6.3) с известной левой частью. Из известных значений $\Delta n_{5,j_k}$ и $\Delta L_{4,j_k}$ составим следующие выражения, дающие, как нетрудно видеть, искомые величины $\Delta n_{1,j_k}$, $\Delta n_{2,j_k}$:

$$\Delta n_{2,j_k} = NINT \left(\frac{\Delta L_{4,j_k} - \lambda_1 \Delta n_{5,j_k}}{\lambda_1 - \lambda_2} \right), \quad (6.4a)$$

$$\Delta n_{1,j_k} = \Delta n_{5,j_k} + \Delta n_{2,j_k}. \quad (6.4b)$$

Здесь NINT — оператор округления к ближайшему целому.

Таким образом, с использованием описанных в разделах 3–5 алгоритмов решаются поставленные ранее задачи по детектированию скачков в часах приемников, чистке данных и определению значений и эпох скачков в фазовых неоднозначностях n_1 и n_2 . Это позволяет полностью решить задачу сглаживания кодовых данных наблюдений в соответствии с описанным в разделе 2 методом.

7. Заключение

В программных комплексах, производящих обработку данных измерений, полученных с ГНСС-приемников, именно кодовые измерения выступают в качестве исходной информации для синхронизации часов приемников с системным временем соответствующей группировки спутников и получения априорных значений поправок к ШВ приемников. Сильно зашумленные кодовые измерения могут привести к значительным погрешностям оцениваемых параметров, неоправданной отбраковке многих станций, а также повлиять на вычислительную устойчивость в программе оценивания параметров. Поэтому на стадии предварительной обработки необходимо применять описанный в разделе 2 метод сглаживания, как это делается, например, в Бернском ППО ГНСС версии 5.2 [2].

Рисунки 10 показывают эффект процедуры сглаживания кодовых измерений. На рисунках представлены остатки (О–С) процедуры точечного позиционирования, в которой оценивается только сдвиг ШВ приемника для каждой эпохи наблюдения и использующей апостериорные орбиты и поправки часов CODE (Center Orbit Determination in Europe). Значения СКО для остатков на рисунках 10а, б составляют 0,98 и 0,22 метра с оригинальными и сглаженными кодовыми наблюдениями соответственно (результаты для некоторых спутников не отображены). Данные получены с приемника, установленного на станции ZIMM.

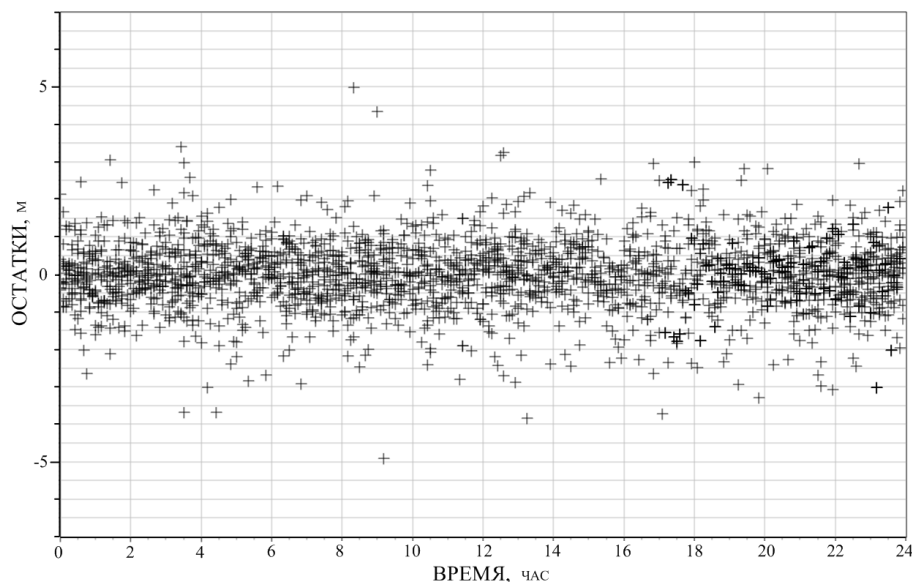


Рис. 10а. Остатки в процедуре точечного позиционирования с использованием оригинальных кодовых измерений, год 2010, день года 207

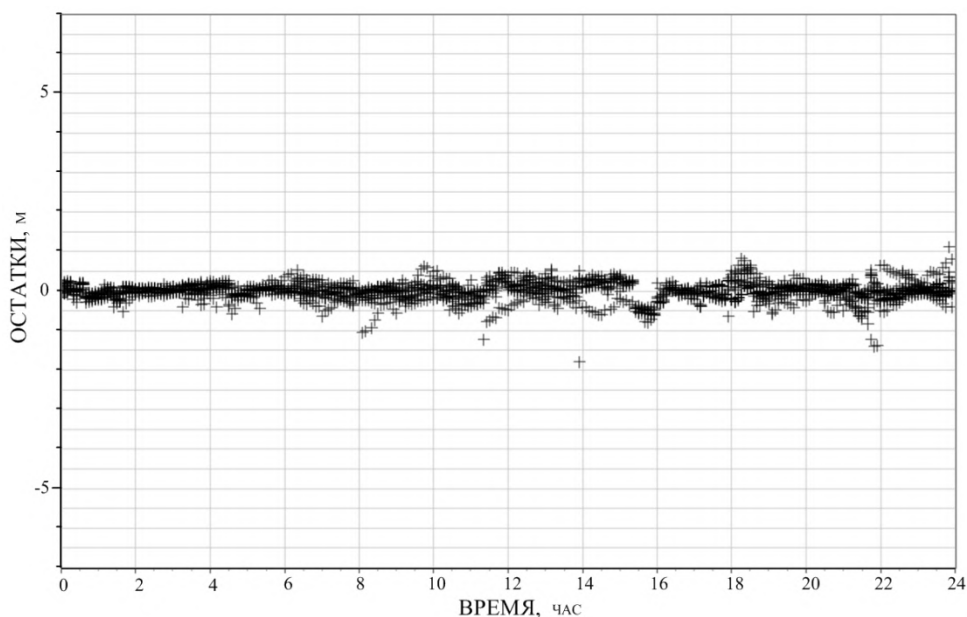


Рис. 10б. Остатки в процедуре точечного позиционирования с использованием сглаженных кодовых измерений, год 2010, день года 207

Сглаженные кодовые данные измерений можно рассматривать как наблюдения, в которых фазовые неоднозначности разрешены лишь приближенно. Более точное их разрешение происходит на последующих стадиях обработки.

Литература

1. Сайт Международной службы GNSS [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.igs.org/network>.
2. Dach R., Andritsch F., Arnold D. et al. Bernese GPS Software Version 5.2 / edited by R. Dach, S. Lutz, P. Walser, P. Fridez. — Astronomical Institute, University of Bern, 2015. — 852 p.
3. Melbourne W.G. The case for ranging in GPS based geodetic systems / edited by C.Goad. Proceedings of the 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System. — Maryland, Rockville: US Department of Commerce, 1985. — P. 373–386.
4. Wubben G. Software developments for geodetic positioning with GPS using TI 4100 code and carrier measurements / edited by C. Goad. Proceedings First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System. — Maryland, Rockville: US Department of Commerce, 1985. — P. 403–412.

5. ГЛОНАСС принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. — 4-е изд, перераб. и доп. — М.: Радиотехника, 2010. — 800 с.
6. Zhang R., Yao Y., Wu R., Song W. Research on Receiver Clock Jump Detection and Processing in Precise Point Positioning / Sun J., Jiao W., Wu H., Shi C. (eds). China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Lecture Notes in Electrical Engineering. — V. 245. — Springer, Berlin, Heidelberg.
7. Springer T.A. Modeling and validating orbits and clocks using the Global Positioning System. Volume 60 of Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz. Schweizerische Geodätische Kommission, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. — Zurich: Technische Hochschule Zurich, 2000.
8. Kim D., Langley R.B. Instantaneous real-time cycle-slip correction of dual frequency GPS data. Proceedings of the international symposium on kinematic systems in geodesy, geomatics and navigation. — Banff, Alberta, Canada, 2001. — 5–8 June.
9. Lonchay M., Bidaine B., Warnant R. An efficient dual and triple frequency preprocessing method for GALILEO and GPS signals. Proceedings of the 3rd international colloquium-scientific and fundamentals aspects of the GALILEO programme. — Copenhagen, Denmark, 2011. — 31 Aug–2 Sept.
10. Guo F., Zhang X. Real-time clock jump compensation for precise point positioning. — 2014. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/257493103>.
11. Freymueller J.T. IGSMAIL-4318: new version of ClockPrep program. IGS central bureau. — 2003
12. Subirana J. Sanz, Zornoza J.M. Juan, Hernández-Pajares M. Detector based in code and carrier phase data: The Melbourne-Wübbena combination. ESA navi-pedia. — 2011. — URL: http://www.navipedia.net/index.php/Detector_based_in_code_and_carrier_phase_data:_The_MelbourneW%C3%BCbbena_combination.
13. Blewitt G. An automatic editing Algorithms for GPS data. Geophysical Research Letters. — 1990. — 17(3). — P. 199–202.