

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 315 (2017), 71 – 74

UDC: 528.06:51-7

Zh.Sh. Zhantaev, A.P. Stikharny, A.V. Vilyayev

Institute of Ionosphere, National Center of Space Research and Technology,
Republic of Kazakhstan, Almaty, Kamenskoe Plateau
stix_qwa@mail.ru, vilyayev@gmail.com

**THE ALGORITHM FOR FILTERING THE ERRORS
OF TIME SERIES GPS MONITORING
OF ACTUAL MOVEMENTS OF THE EARTH'S SURFACE**

Abstract. The experience of measurements at ten GPS stations of Almaty Prognostic polygon showed that in the initial data there can be long time intervals of measurement skipping, random single errors and systematic deviations of measurements over long time intervals. An algorithm for filtering measurement errors by methods of mathematical statistics is developed.

Key words: GPS measurements, time series, mathematical interference filtering

УДК: 528.06:51-7

Ж.Ш. Жантаев, А.П. Стихарный, А.В. Виляев

Институт ионосферы, Национальный центр космических исследований и технологий,
Республика Казахстан, Алматы, Каменское плато

**АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ ПОМЕХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ GPS
МОНИТОРИНГА СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Аннотация. Опыт измерений на десяти GPS-станциях Алматинского прогностического полигона показал, что в исходных данных могут присутствовать длительные временные интервалы пропуска измерений, случайные единичные выбросы и систематические отклонения измерений на продолжительных временных интервалах. Разработан алгоритм фильтрации помех методами математической статистики.

Ключевые слова: GPS-измерения, временные ряды, математическая фильтрация помех.

Введение

В практике мониторинга геодинамического состояния земной коры конечной информацией для вычисления скорости современных движений земной поверхности используют временные ряды координат GPS-станций. Обработка первичных Rinx файлов выполняется универсальным пакетом анализа GPS-данных GAMIT/GLOBK, разработанным в Массачусетском технологическом институте, Гарвард-Смисонском Астрофизическом Центре (CfA) и Океанографическом институте имени Скриппса (SIO).

В определении координат станции учитываются влияние тропосферной и ионосферной рефракции на распространение радиосигналов, атмосферные задержки, относительные положения набора станций, орбитальные параметры и параметры вращения Земли, задержки зенита, неточности фазы навигационного сигнала и прочее [1]. Данный подход к обработанным пакетом

GAMIT/GLOBK GPS-данным позволяет при двухчастотном измерении достигать миллиметровой точности позиционирования.

Скорость движения GPS-станции вычисляется по временному ряду полученных координат как приращение линейного тренда за период наблюдений. Для исключения влияния сезонной составляющей в определение уравнения линейного тренда продолжительность такого временного ряда должна составлять не менее 4-х лет.

Исходные данные представляют собой текстовый файл с записанными последовательностями отсчетов в виде колонок чисел, где первая колонка определяет время вычисленной суточной координаты. Опыт измерений на 10 GPS-станциях Алматинского прогностического полигона показал, что в наблюдаемом временном ряду могут присутствовать длительные временные интервалы пропуска измерений, случайные единичные выбросы и систематические отклонения измерений (далее «ступеньки») на продолжительных временных интервалах (до года). Не останавливаясь на причинах появления указанных помех, нами разработан алгоритм фильтрации последних методами математической статистики.

Исходные помехи временных рядов

В ряду значений могут присутствовать следующие погрешности (рис. 1):

1. Пропуск значений (отсутствие электроэнергии, ремонт приёмной аппаратуры и т.п.) отмечается несвойственным для данного ряда значением

2011-02-01	00:00:00.000	032 24806.30	2124.30	48827.90	54809.02
2011-02-02	00:00:00.000	033 99999.00	99999.00	99999.00	99999.00
2011-02-03	00:00:00.000	034 24807.70	2124.10	48827.90	54809.65

Временная координата – первая колонка год, вторая – месяц, третья число. Отсутствуют данные за 2 февраля 2011 года (99999.00 вместо наблюденного значения).

2. Отсутствие измерений за определенный промежуток времени

2016	345	2016.9399	7.92107	9.39982	2.18584
2016	350	2016.9535	7.92208	9.3992	2.18142
2016	351	2016.9563	7.92208	9.39926	2.18869

Временная координата – первая колонка год, вторая – день года. Отсутствуют данные за 346 – 349 дни 2016 года.

3. Отдельные выбросы (сбой аппаратуры или аномальное значение, вызванное физическим явлением).

4. Относительный уровень некоторых участков ряда значительно отличаются от уровня всего ряда («ступеньки»).

Пусть исходный ряд $X = \{x_i\}_{i=0}^M$. Аппроксимационным рядом для X назовём ряд $Y = \{y_i\}_{i=0}^M$, где $y_i = \sum_{i=0}^N A_i \cdot I^i + \sum_{i=1}^K \left(B_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot I}{T_i}\right) + C_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot I}{T_i}\right) \right)$.

Коэффициенты $A_i B_i C_i$ и периоды T_i подбираются методом наименьших квадратов, минимизирующих дисперсию ряда $X - Y$. Некоторые периоды задаются непосредственно. Например, 365.25 суток для годовой гармоникой или 24 часа для суточной. На практике чаще всего применяется линейный тренд ($N = 1, K = 0$).

Алгоритм первичной обработки помех

1. Применяются два способа удаления выбросов (замена на отсутствующее значение). По первому строится ряд приращений $D = \{d_i\}_{i=1}^M$, где $d_i = x_i - x_{i-1}$, на котором строится 3-х сигмовый коридор (3σ). Если d_i и d_{i+1} выходят за этот коридор, причем имеют разные знаки, то x_i – выброс. По второму строится аппроксимационный ряд Y . Для ряда $X - Y$ строится 3-х сигмовый коридор. Выход за этот коридор принимается за выброс. Второй способ применяется после избавления от ступенек. Так как после этого уменьшается сигма, процедура повторяется нужное количество раз.

2. Избавление от ступенек производится в полуавтоматическом режиме. На графике отмечаются начало и конец каждой ступеньки. Каждая ступенька понижается (повышается) на разность линейного тренда ступеньки и линейного тренда ряда без ступенек.

3. Вставка пропущенных значений, по нашему мнению, необходима в случаях, когда дальнейшая обработка невозможна с пропусками, либо требуется сформировать непрерывный ряд для конкретных задач исследователя. Строится аппроксимационный ряд Y . Пропущенные значения ряда X берутся из ряда Y .

4. Сглаживание (осреднение) производится классическим методом скользящего окна. Для каждой i -ой ($0 \leq i < M$) точки ряда X из окна $[i_n, i_k]$, где $i_n = i - r$, если $i < r$ иначе $i_n = 0$ и $i_k = i + r$, если $i < M - r$ иначе $i_k = M - r$ (r – заданный радиус сглаживания) выбираются в отдельный ряд W все присвоенные значения. Количество точек в W $L \leq 2r + 1$. Из этого ряда удаляются либо по o наибольших и наименьших значений (o зависит от L) либо значения, выходящие за 3-х сигмовый коридор. Сглаженное x_i равно среднеарифметическому значению оставшегося ряда (комбинация среднего и медианного сглаживания).

Результаты применения алгоритма обработки помех

Ниже приведены графики ряда после элементов обработки. По оси ординат отложены относительные координаты центра приемной антенны в м. Каждый ряд сопровождается среднеквадратическим отклонением (σ) ряда, за исключением линейного тренда.

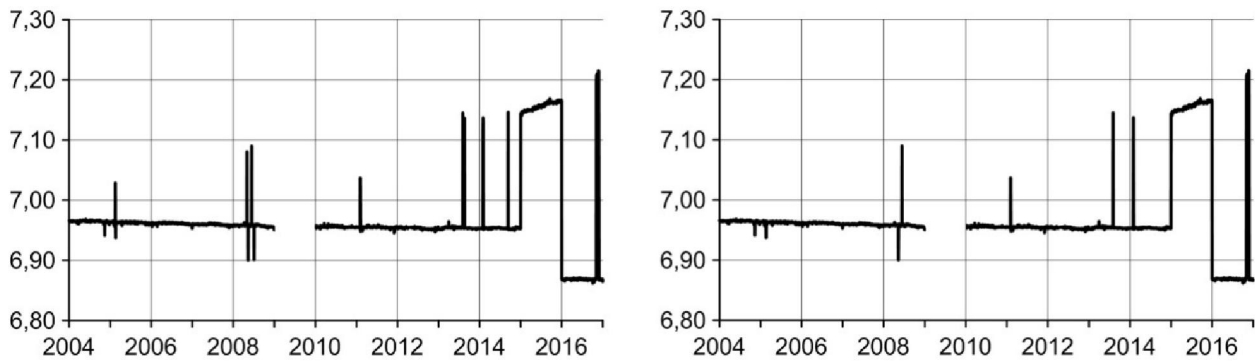


Рисунок 1 - Слева – исходный ряд измерений 4262; отсутствуют значения за 2009 год; отдельные выбросы в 2005, 2008, 2011, 2013, 2014 и 2016 годах; «ступеньки» в 2015 и 2016 годах, $\sigma=0.010431$.
Справа – после удаления по первому способу 7 выбросов за 2 прогона $\sigma=0.009623$

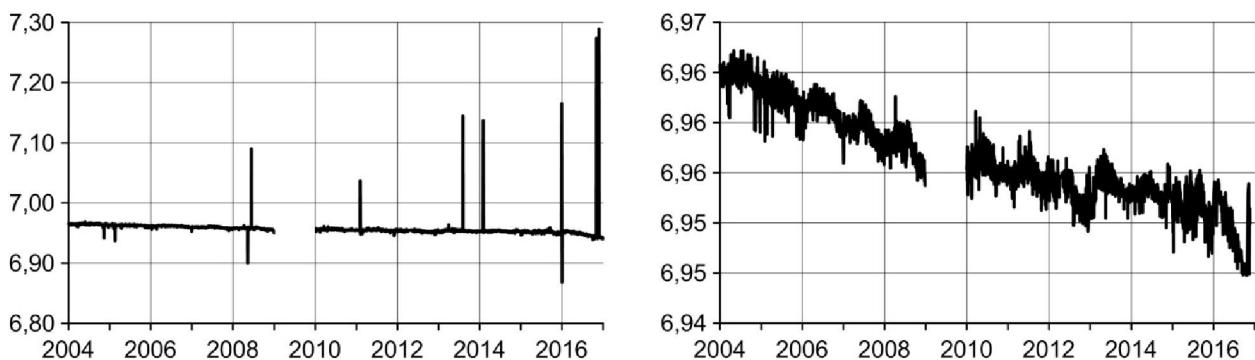


Рисунок 2 - Слева – ряд после исправления 3 «ступеньки» $\sigma=0.001887$. Справа – по второму способу за 5 прогонов удалено 102 выброса, построен аппроксимационный ряд при $N = 1K = 1 T_i = 365.25y_i = A_0 + A_1 \cdot I + B_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot I}{365.25}\right) + C_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot I}{365.25}\right)$ $\sigma=0.001556$.



Рисунок 3 - Исходный ряд после применения алгоритма обработки помех осредненным скользящим окном (радиус сглаживания 7 значений) $\sigma = 0.001623$, прямая линия – линейный тренд очищенного от помех ряда для вычисления скорости движения GPS станции

Разработанный алгоритм предназначен для фильтрации ошибок временных рядов и может использоваться в системах низкочастотного геофизического мониторинга.

Работа выполнялась в рамках проекта «Разработать методологию исследования геомеханического состояния земной коры кризисных территорий с использованием спутниковых технологий и математического моделирования» по Республиканской бюджетной программе 008 «Развитие космических технологий мониторинга процессов на земной поверхности и в литосфере, создание элементной базы и аппаратуры для его проведения, разработка приборов, аппаратно-программных средств и подсистем космической техники».

ЛИТЕРАТУРА

[1] T. A. Herring, R. W. King, S. C. McClusky Gamit: GPS Analysis at MIT Version 10.4// Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2010A. –162 p.

УДК: 528.06:51-7

Ж.Ш. Жантаев, А.П. Стихарный, А.В. Виляев

Ионосфера институты, Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы,
Қазақстан Республикасы, Алматы, Каменское плато

ЖЕРДІҢ ҚАЗІРГІ ЗАМАНҒЫ ҚОЗҒАЛЫСЫНЫҢ GPS БАҚЫЛАУЫНДАҒЫ УАҚЫТТЫҚ КАТАРЛАРЫНЫҢ КЕДЕРГІСІН СҮЗУ АЛГОРИТМІ

Андапта. Алматының болжамдық полигонында орналасқан 10 GPS бекеттерінің өлшеу тәжірибесі, ұзақ уақытқа созылған уақыт аралығында өлшеудің жүйелік ауытқуларын, кездейсоқ бірліктік шығарылу және бастапқы мәліметтерде ұзақ уақыттық аралықтарда өлшемнің болмауын көрсетті. Математикалық талдау әдістемесі бойынша кедергілерді сүзетін алгоритмі өңделді.

Түйін сөздер: GPS өлшемі, уақыттық қатарлар, кедергілердің математикалық сүзгіленуі

Сведения об авторах:

Жантаев Ж.Ш. - д.ф.-м.н, член-корр. НАН РК, ДТОО «Институт ионосферы», г.Алматы, Казахстан, Адрес: 050020, Алматы, Каменское плато, Служ. тел. 380-30-54;

Стихарный А.П. - к.ф.-м.н, ДТОО «Институт ионосферы», г.Алматы, Казахстан, Адрес: 050020, Алматы, Каменское плато, Служ. тел. 385-87-58; e-mail: stix_qwa@mail.ru;

Виляев А.В. - к.г.-м.н., ДТОО «Институт ионосферы», г.Алматы, Казахстан, Адрес: 050020, Алматы, Каменское плато, Служ. тел. 385-09-68; e-mail: vilayev@gmail.com