

ПОЛНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ПО ДАННЫМ ГЛОНАСС/GPS/GALILEO: ПРОБЛЕМЫ ФИЛЬТРАЦИИ

^{1,2}**Б.М. Малецкий**, ^{1,2}**Ю.В. Ясюкевич**, ¹**А.М. Веснин**

¹Институт солнечно земной физики, Иркутск, Россия
maletskiy@iszf.irk.ru

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

TOTAL ELECTRON CONTENT VARIATIONS FROM GLONASS/GPS/GALILEO: FILTERING PROBLEMS

^{1,2}**B.M. Maletckij**, ^{1,2}**Yu.V. Yasyukevich**, ¹**A.M. Vesnin**

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
yasyukevich@iszf.irk.ru

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. Глобальные навигационные спутниковые системы в последние годы все активнее используются для изучения околоземного космического пространства. Основой для исследований являются измерения полного электронного содержания (ПЭС), получаемые на основе двухчастотных измерений. Стандартные процедуры выделения вариаций ПЭС требуют устранения тренда, обусловленного движением спутников, а также фильтрации рядов ПЭС. Наш опыт показал, что артефакты, возникающие в рядах данных, могут значительно сказываться на интерпретации данных, особенно при автоматической обработке. При этом в литературе проблемы фильтрации данных ПЭС плохо освещены. В настоящей работе мы анализируем ошибки, возникающие при различных вариантах устранения тренда и различных вариантах фильтрации. Основные результаты получены для моделирования, когда можно непосредственно оценить ошибку. Завершает работу анализ экспериментальных данных.

Ключевые слова: ионосфера, полное электронное содержание, фильтрация данных, обработка данных.

Abstract. Over the recent years, Global Navigation Satellite Systems have been increasingly used to study the near-Earth space. The basis for such studies are the total electron content (TEC) data. TEC is obtained based on dual-frequency measurements. The standard procedures for detecting TEC variations require filtering and detrending. Our experience showed that the artifacts originating in data series may affect upon data interpretation, particularly strong for automated processing. The filtering issues are not paid enough attention in literature. In this study we analyze the errors originating from various detrending as well as from various filtering algorithms. The principal results were obtained for the modeling, when we control input and can directly estimate the error. Experimental data analysis finalizes this study.

Keywords: ionosphere; total electron content, global navigation satellite system, data filtering, data processing.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предоставили огромный набор данных для изучения ионосферы Земли. Ключевым параметром является полное электронное содержание (ПЭС), измеряемое на основе двухчастотной комбинации [Afraimovich et al., 2013]. Измерения ПЭС включают в себя тренд, обусловленный движением спутника, а также набор вариаций различных периодов, обусловленных процессами в ионосфере. Стандартные процедуры выделения вариаций ПЭС включают в себя фильтрацию и устранения тренда. В большинстве работ для удаления тренда используется скользящее среднее с окном равным верхней границе диапазона периодов исследуемых вариаций [Tsugawa et al., 2018] или полином высоких порядков [Heki, Ping, 2015]. Для селекции вариаций чаще всего используются скользящее среднее [Afraimovich et al., 2013] или фильтр Баттлорда [Komjathy et al., 2012]. В работе [Şentürk et al., 2018] использовалось оконное преобразование Фурье, чтобы избежать проблемы выделения вариаций. К сожалению, такой подход не всегда можно использовать для ряда использующихся в настоящее время алгоритмов таких, как например, интерферометрия [Afraimovich, 2000] или детектирование эффектов солнечных вспышек [Afraimovich, 2001].

РАССМАТРИВАЕМЫЕ МЕТОДЫ

Мы проанализировали следующие методы для устранения тренда в данных ПЭС: полосовой фильтр на основе скользящего среднего; полосовой фильтр на основе скользящей медианы; полином шестой степени; фильтр Ходрика–Прескотта; фильтр I_1 ; кубический сглаживающий сплайн; двойное применение полосового фильтра на основе скользящего среднего.

Наибольший интерес представляют следующие диапазоны для фильтрации данных: 2–10 мин (периоды АГВ), 10–20 мин и 20–60 мин (периоды внутренних гравитационных волн). Были проанализированы следующие методы для селекции вариаций: полосовой фильтр на основе скользящего среднего; полосовой фильтр на основе скользящей медианы; фильтр Баттлорда (восьмого порядка); фильтр Чебышева первого рода (восьмого порядка).

Для анализа качества различных алгоритмов мы использовали следующие параметры: математическое ожидание ошибки M_{RF} , где ошибка определяется как разница между моделируемым и восстановленным сигналами; среднеквадратическое отклонение ошибки σ_{RF} ; коэффициент корреляции между известным используемым сигналом и восстановленным сигналом, после проведения процедур фильтрации K_{RF} .

МОДЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предполагается, что временные ряды данных ТЕС аддитивно состоят из тренда, сигнала (вари-

ций ПЭС) и некоторого шума. Моделирование проведено для трех указанных выше диапазонов периодов (2–10, 10–20, 20–60 мин). При этом максимальные ошибки наблюдались для диапазона 20–60 мин. В этой связи, основные результаты, представленные в тексте статьи, даны для этого диапазона. На первом этапе мы генерировали опорный сигнал I_R и тренд I_T , после чего осуществляли процедуру удаления тренда из суммарного сигнала I_R+I_T каждым из описанных выше методов. На основе полученного детрендрованного (отфильтрованного) сигнала проводился анализ параметров K_{RF} , σ_{RF} , M_{RF} .

Модель опорного сигнала имеет вид (1):

$$I_R = e^{-\frac{(t-t_m)^2}{2d_i^2}} \sum_i^n \sin(\omega_i t), \quad (1)$$

где, параметр d_i — полуширина огибающей (для всех временных диапазонов колебаний равен 27.5 мин). Моделью тренда является кубический полином. Результаты моделирования представлены на рис. 1. Верхние три панели показывают зависимость M_{RF} от скорости изменения тренда при различных способах удаления тренда. Средние три и нижние три панели — то же самое для σ_{RF} и K_{RF} , соответственно. Обозначения: А — двойное скользящее среднее (сплошная), полином шестого порядка (пунктир); В — скользящее среднее (сплошная), скользящая медиана (пунктир) С — L1-filter (сплошная), сплайн-фильтрация (пунктир), фильтр Ходрик-Прескотта (штирх-пунктир). Можно выделить группу фильтров с хорошими результатами: двойное скользящее среднее, сплайн-фильтрация, фильтр Ходрик-Прескотта, фильтр L1. Сплайн-фильтрация — лучший среди них.

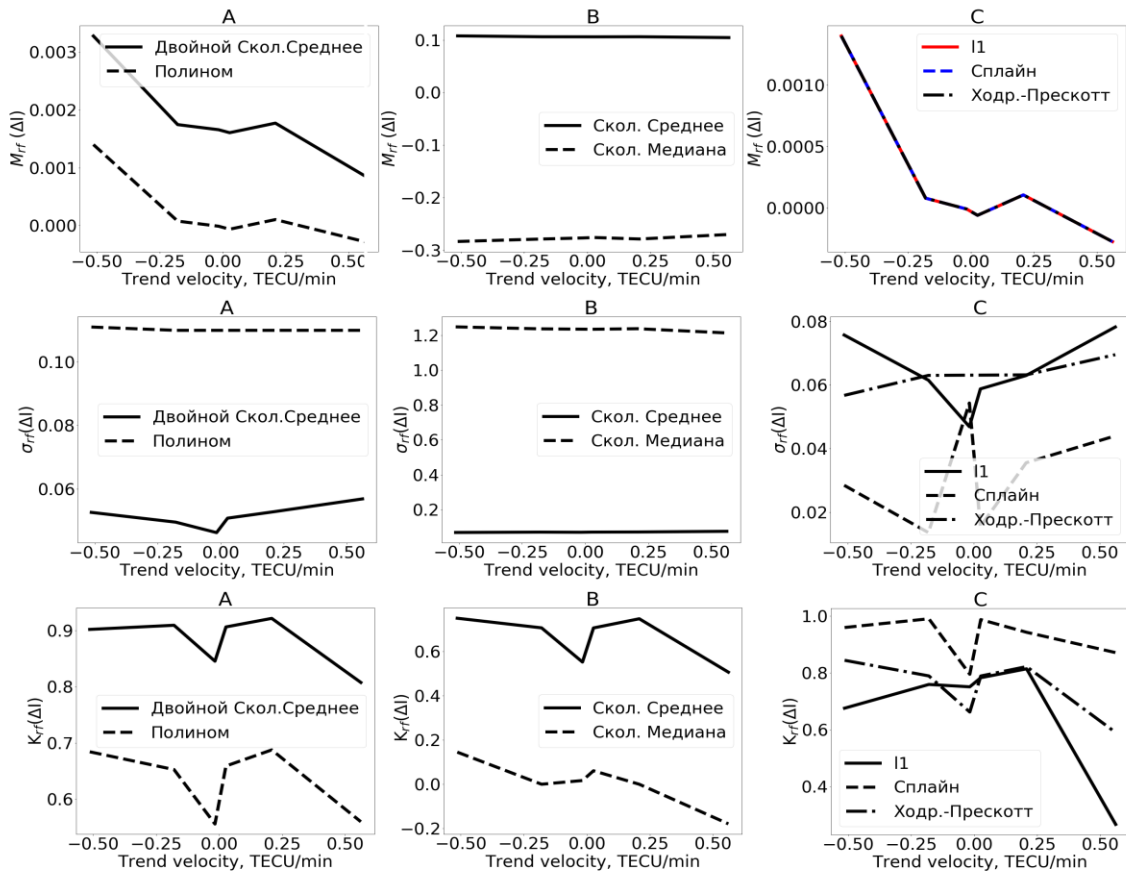


Рис. 1. Зависимость параметров K_{RF} , σ_{RF} , M_{RF} от скорости изменения тренда

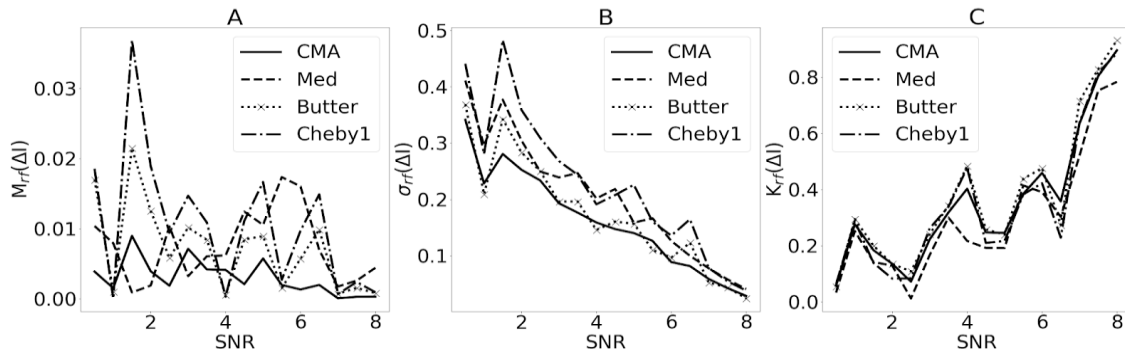


Рис. 2. Критерии качества селекции M_{RF} , σ_{RF} , K_{RF} в зависимости от амплитуды белого шума

Для решения задачи селекции вариаций мы сегментировали сигнал (волновой пакет), состоящий из гармоник, находящихся внутри всех интересующих нас диапазонов и вне них. Амплитуда каждой гармоники — 0.2 TECU. Качество селекции вариаций может зависеть от отношения сигнал-шум. Поэтому, к сигналу мы аддитивно добавляли белый шум различной амплитуды. В качестве «правильного» восстановленного сигнала мы принимаем гармонику в волновом пакете, соответствующую фильтрующему интервалу (2–10 мин, 10–20 мин, 20–60 мин). Результаты представлены на рис. 2.

По критериям K_{RF} и σ_{RF} лучшие результаты показывают скользящее среднее и фильтр Баттерворда, а по критерию M_{RF} лучший результат показывает скользящее среднее.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для понимания, насколько значительно результаты для различных методик могут отличаться при работе с реальными экспериментальными данными, мы обработали данные приемника UZUR сети SibNet [Yasyukevich et al., 2018], расположенном на полигоне ИСЗФ СО РАН в пос. Узур (53 °N, 107 °E). Использовались данные за 14 апреля 2016 г. На рис. 3, 4 представлены результаты для лучей «UZUR–PRN G26».

Рисунки 3 и 4 показывают, что наименее удовлетворительные результаты соответствуют использованию скользящего среднего без предварительного удаления тренда. Спектр демонстрирует наличие значительной постоянной составляющей, а во временной динамике мы видим исключительно отрицательные значения. Детрендинг сглаживающим кубическим сплайном убирает этот артефакт. Применение фильтра скользящего среднего для селекции вариаций показывает лучшие результаты: сохраняется вид сигнала и его спектр в заданной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное моделирование позволяет сделать следующие выводы.

1. Для задачи удаления тренда, среди наиболее применяемых методов лучшие результаты дает сглаживающий кубический сплайн. Он характеризуется минимальным значением математического ожидания ошибки и среднеквадратического отклонения ошибки, а также максимумом коэффициента корреляции.

2. Для задачи селекции вариаций, лучшие результаты получены для фильтра скользящего среднего.

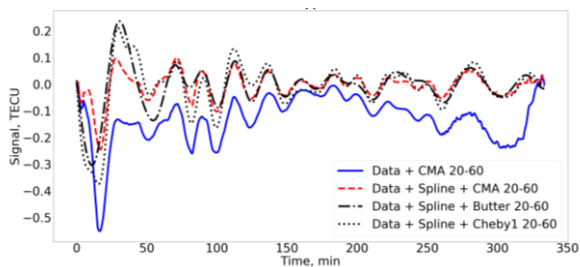


Рис. 3. Вариации ПЭС, полученные после удаления тренда и фильтрации различными методами во временной области

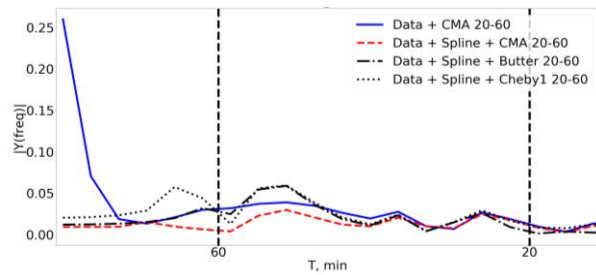


Рис. 4. Спектр вариации ПЭС, полученные после удаления тренда и фильтрации различными методами

Полученные сведения о вариациях в различных диапазонах могут быть использованы для изучения различных процессов в ионосфере, в том числе и в автоматическом режиме.

Авторы благодарны Сидорову Д.Н. за ценные обсуждения. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-77-20005). В работе использовались экспериментальные данные ЦКП «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>] функционирующего в рамках базового финансирования программы ФНИ П.12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., et al. Review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // *J. Space Weather Clim.* V. 3. A27. P. 1–19.
- Tsugawa T., Nishioka M., Ishii M., et al. Total Electron Content Observations by Dense Regional and Worldwide International Networks of GNSS // *J. Disaster Res.* 2018. V. 13, N 3. P. 535–545.
- Heki K., Ping J. Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array // *Earth and Planetary Science Letters.* 2005. V. 236, iss. 3–4. P. 845–855.
- Komjathy A., Galvan D.A., Stephens P., et al. Detecting ionospheric TEC perturbations caused by natural hazards using a global network of GPS receivers: The Tohoku case study // *Earth Planet Space.* 2012. V. 64. P. 1287–1294.
- Şentürk E., Livaoglu H., Çepni M.A. Comprehensive Analysis of Ionospheric Anomalies before the Mw7.1 Van Earthquake on 23 October 2011 // *J. Navigation.* 2019. V. 72, iss. 3. P. 702–720.
- Afraimovich E.L. The GPS global detection of the ionospheric response to solar flares // *Radio Sci.* 2000. V. 35, iss. 6. P. 1417–1424.
- Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Plotnikov A.V., Uralov A.M. The shock-acoustic waves generated by earthquakes // *Ann. Geophys.* 2001. V. 19. P. 395–409.
- Yasyukevich Yu.V., Vesnin A.M., Perevalova N.P. SibNet — Siberian Global Navigation Satellite System Network: Current state // *Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 4, iss. 4. P. 63–72.