

АНАЛИЗ ОШИБОК НАВИГАЦИОННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ В ГФО «МИХНЕВО»

А.В. Черменин

В настоящей работе проведено исследование причин некорректного определения местоположения глобальной навигационной спутниковой системой GPS. На основе данных геофизической обсерватории (ГФО) «Михнево» за ноябрь 2014 – март 2015 гг. был проведён анализ ошибок определения координат при их статистическом накоплении. Обнаружено, что распределение ошибок не подчиняется нормальному закону, а существующие алгоритмы ионосферной коррекции не в состоянии компенсировать влияние атмосферных планетарных волн, что приводит к периодическому ухудшению точности систем GPS.

Введение

GPS (англ. Global Positioning System – система глобального позиционирования) – спутниковая система навигации, обеспечивающая измерение расстояния, времени и определяющая местоположение. Позволяет в любом месте Земли (исключая приполярные области), почти при любой погоде, а также в околоземном космическом пространстве определять местоположение и скорость объектов. Система была разработана, реализована и эксплуатируется Министерством обороны США, при этом в настоящее время доступна для использования в гражданских целях.

Источниками ошибок GPS могут быть как технические причины (аппаратная задержка сигнала, шумовые эффекты, конструкция приёмной антенны), так и геофизические факторы: ионосферные и тропосферные задержки и сцинтилляции, многолучевая интерференция и т.д. Если некоторые из этих источников устраняются путём проектирования приёмника и программного обеспечения, то вопрос компенсации влияния геофизики остаётся открытым. К примеру, существующий наиболее используемый алгоритм ионосферной коррекции Клобушара [1] позволяет уменьшить, как минимум, на 50% влияние ионосферы на среднеквадратическую погрешность определения координат, подобных алгоритмов для тропосферы нет. Согласно стандарту GPS, точность определения местоположения в худшем случае не превышает 38 метров (в зависимости от условий и приёмника) [2], но на практике отклонение однократного измерения от истинной позиции может достигать и 60 метров (рис. 1).

Теоретически распределение ошибок определения местоположения должно подчиняться гауссовскому закону, но статьи [3, 4] иллюстрируют, что измерения координат могут быть описаны распределением Вейбулла. Отчёт [5] предоставляет похожие результаты, сделанные для системы WAAS (wide area augmentation system). Настоящая статья посвящена исследованию, целью которого был анализ ошибок определения координат и поиск геофизических факторов, определяющих эти ошибки.

Данные и методы обработки

В работе использовались данные приёмника GPS Javad Sigma G3T, установленного на высоте 5 м на территории ГФО «Михнево» (54°57' с.ш., 37°46' в.д.). Эта модель способна работать как со спутниками системы GPS, так и ГЛОНАСС, и выдаёт измеренные координаты и сырые данные с частотой 1 Гц в формате стандарта RINEX 3.02 [6]. Для обработки полученных измерений использовался пакет RTKLib [7].

На рис. 1 представлено распределение измеренных координат, наложенное на карту в программе RTKPlot. Поскольку оно заметно отличается от нормального гауссовского «колокола», при последующем анализе был выбран метод главных компонент для определения параметров эллипса рассеяния [8]. Результаты обработки отображены на рис. 2.

Результаты измерений

Первичный спектральный анализ параметров эллипса рассеяния не выявил периодических компонент отношения осей эллипса (рис. 4). При дальнейшем анали-

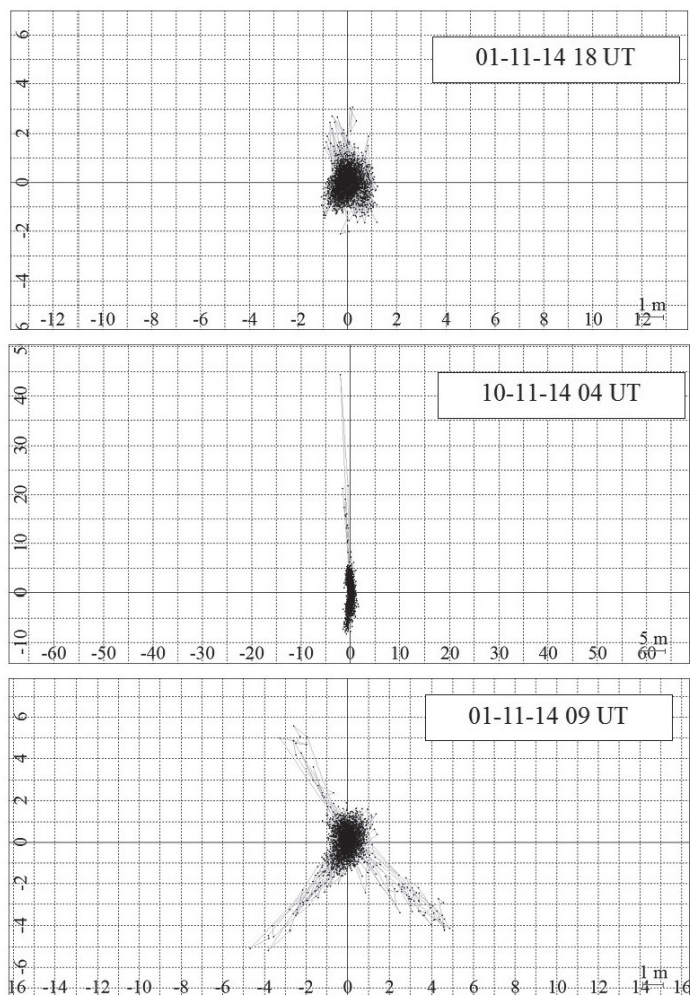


Рис. 1. Основная геометрия эксперимента. На сетку в программе RTKPlot нанесены измерения местоположения приёмника GPS

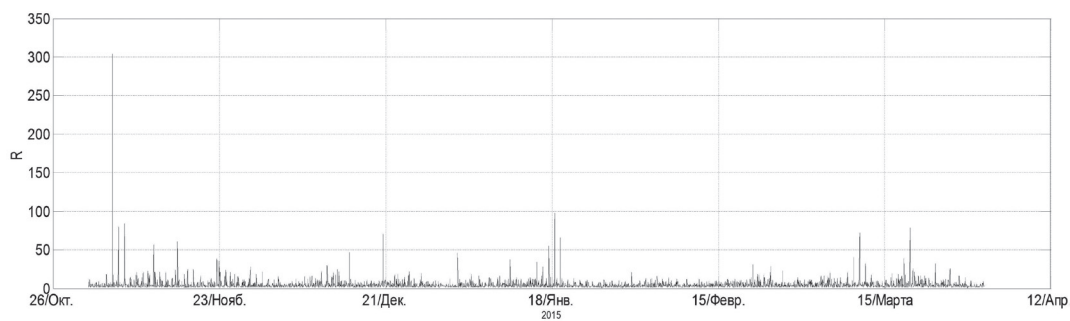


Рис. 2. Динамика изменения отношения осей эллипса рассеяния

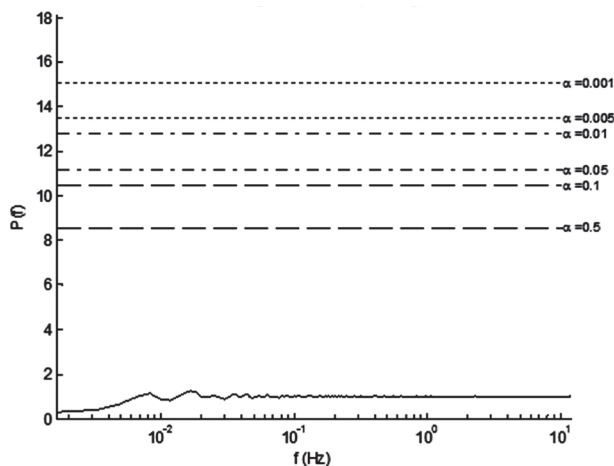


Рис. 3. Периодограмма отношения осей эллипса рассеяния

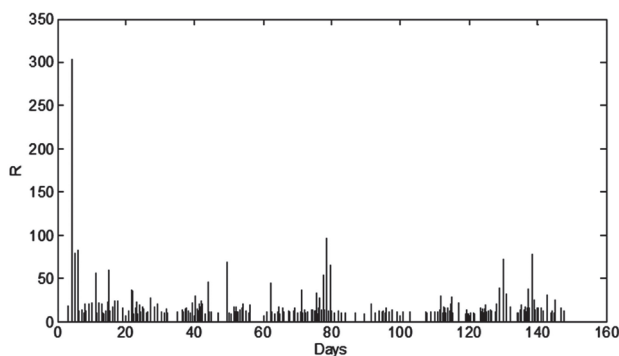


Рис. 4. Экспертная «отсечка» $R > 10$ с переходом к потоку событий

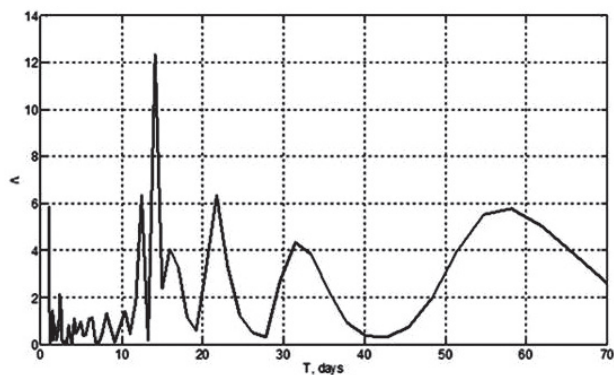


Рис. 5. Интегральный спектр по Любушину за всё время наблюдений. По оси абсцисс приведены периоды в днях, по оси ординат – приращение функции правдоподобия

зе была произведена экспертная оценка величины отношения осей эллипса рассеяния R с переходом к «потоку событий» с $R > 10$ (рис. 6) и реализован с помощью программы PPPeriod (Point Processes Periodicity), предоставленной ИФЗ РАН, метод Любушина выделения периодических компонент интенсивности точечных процессов с помощью оценки приращения логарифмической функции правдоподобия [9]. На основе результатов обработки был построен интегральный спектр и выявлены статистически значимые пики, соответствующие квази-2-дневному, 14- и 21-дневному периодам, что соответствует периодам планетарных атмосферных волн (рис. 7).

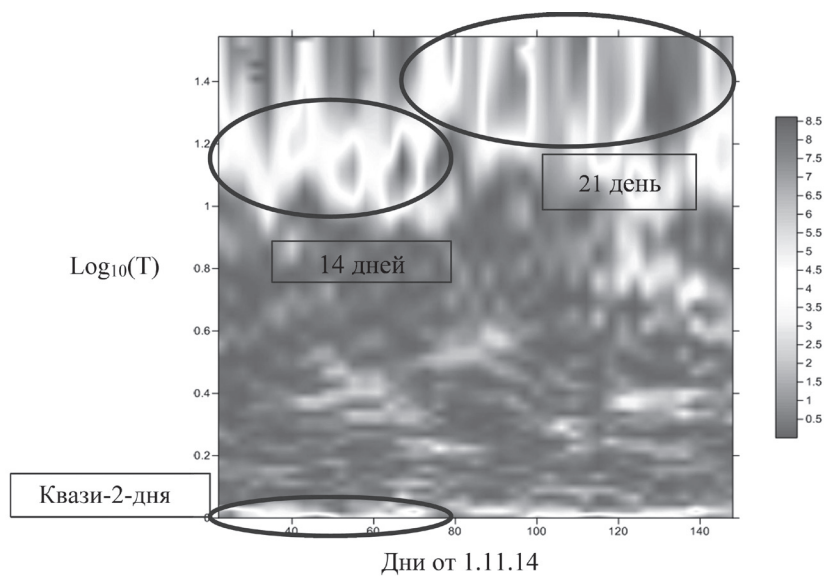


Рис. 6. Эволюция приращения логарифмической функции правдоподобия. Явно наблюдаются квазидвухдневные, 14- и 21-дневные периоды, которые также проявляются и затухают с некоторой периодичностью (признак циклостационарного процесса)

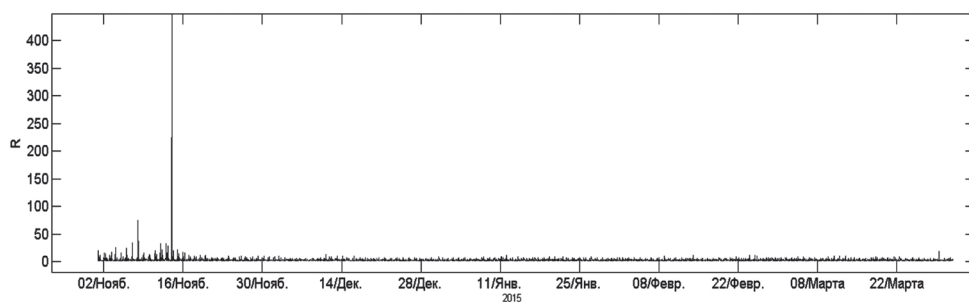


Рис. 7. Динамика изменения отношения осей эллипса рассеяния без ионосферной коррекции

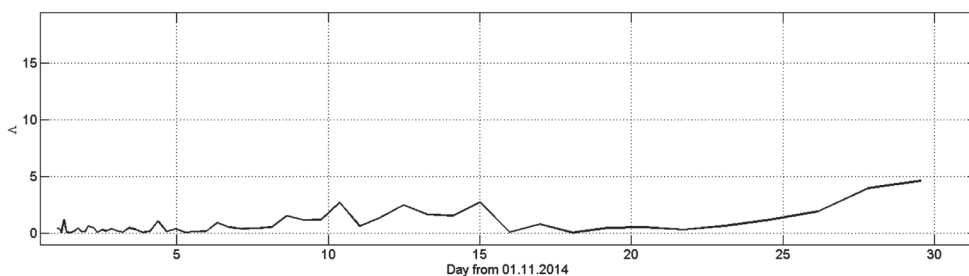


Рис. 8. Интегральный спектр по Любушину для всего периода наблюдений без учёта ионосферной коррекции. Значимых пиков периодичностей не выявлено

Для оценки корректности работы алгоритмов ионосферной коррекции весь эксперимент от измерений местоположения до анализа периодичностей методом Любушина был повторён без использования этих алгоритмов, но с линейной комбинацией всех спутников (то есть вёлся учёт всех наблюдаемых спутников вне зависимости от их угла возвышения), однако подобных периодических компонент обнаружено не было.

Выводы

Применены методы главных компонент для определения параметров эллипса рассеяния ошибок и Любушина для выделения периодических компонент интенсивности точечных процессов. Обнаружено, что распределение ошибок местоположения имеет ненормальный характер, следовательно, статистическое накопление данных GPS требует явного учёта плотности вероятности. Анализ по Любушину показал, что современные алгоритмы ионосферной коррекции страдают от процессов в ионосфере, связанных с генерацией в нейтральной атмосфере Земли планетарных волн. В то же время наблюдения в режиме без ионосферной коррекции не подвержены подобному эффекту, поэтому более пригодны для быстрых оценок работы системы GPS.

Литература

Любушин А.А. Анализ периодических компонент интенсивности точечных процессов. 2006, 20 с.

Померанцев А. Метод главных компонент.

<http://chemometrics.ru/materials/textbooks/pca.htm>

Klobuchar, J., 1987. Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (3), pp. 325-331.

Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, U.S. Department of Defense, October, 2008. 160 p.

<http://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>

GPS HORIZONTAL POSITION ACCURACY

<http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Molin/leb447/Arquivos/GNSS/ArtigoAcuraciaGPSsemAutor.pdf>

Ted Driver. Long-Term Prediction of GPS Accuracy: Understanding the Fundamentals, Analytical Graphics Incorporated.

Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance Analysis Report Submitted To Federal Aviation Administration GPS Product Team 1284 Maryland Avenue SW Washington, DC 20024 Report #86 July 31, 2014 Reporting Period: 1 April – 30 June 2014, p. 22

RINEX, the Receiver Independent Exchange Format, version 3.02, International GNSS Service (IGS), RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM-SC104), 2013. 83 p.

RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning. Copyright (c) 2007-2013, T. Takasu, All rights reserved.