

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ОШИБОК ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

И. Ф. Гамаюнов, В. В. Демьянов

SPATIAL TEMPORAL DYNAMICS OF GPS USER POSITIONING ERRORS

I.F. Gamayunov, V.V. Demyanov

Предлагается методика визуализации пространственно-временной динамики ошибок позиционирования стационарных пользователей GPS на основании обработки данных от опорной сети GPS-станций. С помощью разработанной методики проведены исследования пространственно-временной динамики ошибок позиционирования. Показано, что во время геомагнитных возмущений существуют области повышенных значений ошибок позиционирования, достаточно четко локализованные в пространстве. Эти области перемещаются вместе с южной границей аврорального овала, достигая среднеширотного региона. Отмечены также области повышенного значения ошибки позиционирования, не связанные с границей аврорального овала, которые наблюдались на низких широтах.

The paper presents the method of two-dimensional mapping of GPS receiver positioning errors. The method allows investigating of spatial temporal dynamics of GPS receiver positioning errors under different near Earth space conditions.

Введение

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС), используемые для автономной навигации, позволяют также осуществлять коррекцию других бортовых навигационных средств и обеспечивать пользователя точным временем.

При решении указанных задач выдвигаются жесткие требования к точности навигационно-временных определений (НВО) и непрерывности обслуживания пользователя СРНС. Однако в реальных условиях потенциально достижимые показатели качества функционирования СРНС снижаются по ряду причин. Одним из значимых факторов, ограничивающих потенциально возможное качество работы СРНС, является среда околоземного космического пространства (ОКП), в которой распространяются сигналы навигационных спутников (НС). При распространении сквозь среду ОКП возникают мерцания фазы и амплитуды радиосигнала (ионосферные мерцания), которые являются следствием рассеяния на неоднородностях электронной концентрации (ЭК).

Уровень ионосферных мерцаний радиосигналов значительно возрастает даже в периоды умеренных геомагнитных возмущений ОКП [1] и может привести к срыву сопровождения сигналов одного или нескольких навигационных спутников СРНС [2]. Установлено, что на второй (закрытой) частоте GPS количество сбоев измерения амплитуды и фазы сигнала в периоды геомагнитных возмущений в 3–5 раз больше, чем на основной частоте GPS [3]. В работе [4] показано, что во время магнитной бури наблюдаются резкие флуктуации фазы несущей, амплитуда которых достигает 12.8 радиан. Такие фазовые мерцания, происходящие на коротком временном интервале, могут вызвать срыв сопровождения фазы несущей в следящем контуре ФАПЧ навигационного приемника (НП) и, соответственно, срыв сопровождения сигнала НС.

Срыв сопровождения сигналов НС приводит к снижению точности, а в худшем случае - к сбоям позиционирования. Так, во время магнитной бури 25–26 сентября 2001 г. на ряде среднеширотных станций Североамериканского региона и Восточной

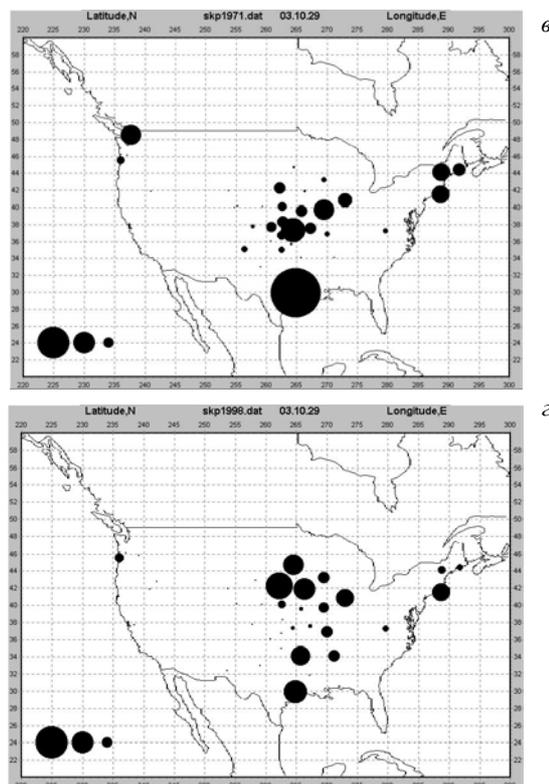
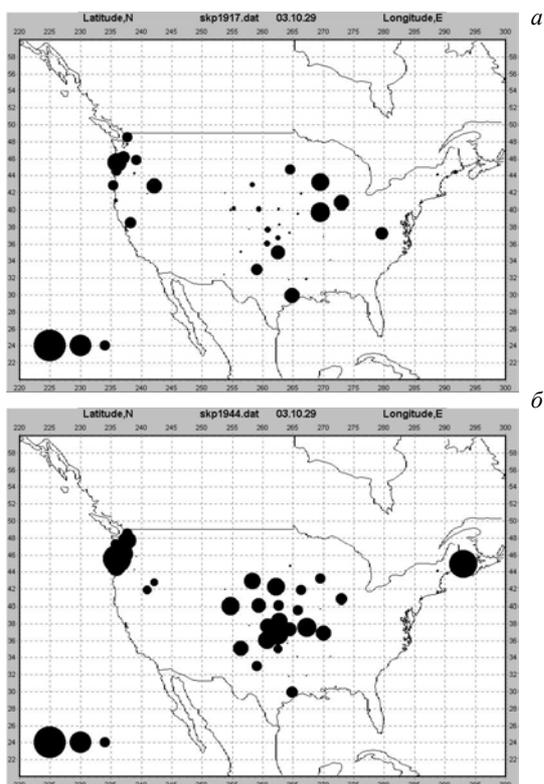
Сибири наблюдалось резкое возрастание ошибки позиционирования пользователей GPS (до 120–280 м) [5]. Резкие увеличения уровня погрешности позиционирования совпадают, как правило, с периодами наиболее резких и глубоких вариаций напряженности геомагнитного поля во время главной фазы магнитной бури.

В [6] была выявлена не только временная, но и пространственная зависимость ошибок позиционирования от уровня геомагнитной возмущенности и географического местоположения НП. Установлено, что для станций, расположенных на высоких ($\varphi > 50^\circ$) и низких ($\varphi < 30^\circ$) широтах, величина погрешности позиционирования в среднем в 1.5–2 раза выше, чем для НП аналогичных типов, установленных на средних широтах. Указанная закономерность проявляется более ярко в периоды геомагнитных возмущений. Имеются данные [6], что на отдельно взятой GPS-станции резкие увеличения уровня погрешности позиционирования совпадают по времени с моментом прохождения через точку расположения станции южной границы аврорального овала. Здесь же показано, что увеличение погрешности позиционирования наблюдались на GPS-станциях, расположенных на достаточно низких широтах (30–35°), в тот период времени, когда над этим районом были зафиксированы повышенные значения полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере и большие значения пространственных градиентов ПЭС. Последнее обстоятельство косвенно показывает наличие в тот момент времени над данным регионом области, содержащей интенсивные неоднородности ЭК различных масштабов.

Указанные свидетельства дают нам основание предположить, что существует определенная пространственно-временная динамика распределения ошибок позиционирования пользователя СРНС, особенно выраженная в периоды геомагнитных возмущений. Нами разработана методика и программно-алгоритмическое обеспечение визуализации пространственно-временной динамики ошибок позиционирования пользователя СРНС [7]. Исходными данными для обработки служат файлы типа RINEX 2.0 [8] формата «navigation» и «observation», которые получены в

результате суточных измерений на стационарных пунктах, оснащенных двухчастотными навигационными приемниками GPS (GPS-станциях). Разработанный нами ранее пакет программ «NAVIGATOR» [5] содержит алгоритм навигационно-временных определений (НВО), восстанавливающий по дальномерным измерениям, содержащимся в RINEX-файлах, координаты GPS-станций. В качестве меры для оценки величины ошибки позиционирования нами используется величина текущей среднеквадратичной сферической (пространственной) погрешности позиционирования. Для наблюдений нами выбраны данные, измеренные на сети GPS-станций, которые размещены с большой плотностью на территории Северной Америки.

На рисунках *a–г* показан пример снимков пространственного распределения ошибок позиционирования для четырех последовательных интервалов времени 29 октября 2003 г.: 19:00 UT (рис. *a*), 19:15 UT (рис. *б*), 19:30 UT (рис. *в*) и 19:45 UT (рис. *г*). Положение центра черных кругов соответствует местам расположения GPS-станций, а диаметр черных кругов пропорционален величине ошибки позиционирования. Масштабные круги в левом нижнем углу рисунков соответствуют ошибке позиционирования в 150, 100 и 50 м соответственно. Наблюдения относятся по времени к первой максимальной фазе большой магнитной бури 29–31 октября 2003 г. Из рисунков видно, что области повышенных значений ошибок позиционирования достаточно четко локализованы в пространстве. Кроме того, в результате наблюдений установлено, что эти области перемещаются вместе с южной границей аврорального овала, достигая среднеширотного региона. Отмечены также области повышенного значения ошибок позиционирования, не связанные с границей аврорального овала, которые наблюдались на достаточно низких широтах ($\varphi < 35^\circ$).



Обсуждение

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, во время геомагнитных возмущений снижение точности позиционирования пользователей СРНС может происходить не только в «традиционно проблемных регионах» – на высоких и экваториальных широтах, – но и в пределах всего среднеширотного региона ($20^\circ < \varphi < 50^\circ$). Во-вторых, имеются локальные области пониженного качества позиционирования, совпадающие в пространстве и времени с областями ионосферы, обладающими существенно неоднородной и быстро изменяющейся структурой. Это свидетельствует в пользу предположений, что главным физическим механизмом, ответственным за снижение качества позиционирования пользователей СРНС, является рассеяние сигналов НС на неоднородностях ЭК и фазовые ионосферные мерцания интерференционного и рефракционного характера. В-третьих, пространственное распределение ошибок позиционирования изменяется довольно динамично и имеет достаточно сложную структуру. Даже при 15-минутном разрешении наблюдений и относительно густой сети GPS-станций не всегда удается полностью проследить направление перемещения и конфигурацию областей повышенной ошибки позиционирования. При дальнейшей разработке методов для построения оперативных карт ошибок координатных определений пользователей СРНС необходимо увеличить частоту времени обновления информации и, в некоторых случаях, плотность сети опорных GPS-станций, а также использовать методы пространственной двумерной интерполяции данных для получения величины ошибки позиционирования в местах, где нет GPS-станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ledvina B.M., Makela J.J., Kintner P.M. First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29, N 14. 10.1029/2002GL014770.
2. Coster A.J., Foster J.C., Erickson P.J., Rich F.J. Regional GPS Mapping of Storm Enhanced Density During the July 15–16 2000 Geomagnetic Storm // *Proceedings of International Beacon Satellite Symposium*, June 4–6, 2001, Boston College, Institute for Scientific Research, Chestnut Hill, MA, USA.
3. Афраймович Э.Л., Демьянов В.В., Кондакова Т.Н. Ухудшение качества функционирования навигационной системы GPS в условиях геомагнитной возмущенности // *Солнечно-земная физика*. 2002. Вып. 3. С. 86–94.
4. Афраймович Э.Л., Демьянов В.В., Гамаюнов И.Ф. Мерцания фазы и срывы сопровождения сигналов GPS в период магнитной бури 29–31 октября 2003 г. // *Современные проблемы радиоэлектроники: материалы Всероссийской НТК*. Красноярск, 5–7 мая 2004 г. С. 380–383.
5. Afraimovich E.L., Demyanov V.V., Kondakova T.N. Degradation of GPS performance in geomagnetically disturbed conditions // *GPS Solutions*. 2003. V. 7, N 2. P. 109–119.
6. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Бернгардт О.И. и др. Среднеширотные амплитудные мерцания сигналов GPS и сбои функционирования GPS на границе аврорального овала // *Известия вузов. Радиофизика*. 2004. Т. 47, № 7. С. 509–526.
7. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Гамаюнов И.Ф. Визуализация пространственно-временного распределения интенсивности вариаций ПЭС по данным фазовых измерений сигналов GPS // *Электронный журнал «Исследовано в России»*. 2004. Т. 254. С. 2737–2742. <http://zhurnal.ape.relam.ru/articles/2004/254.pdf>.
8. Gurtner, W. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format: Version 2. 1993. <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex2.txt>.

*Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище,
Иркутск*