

УДК 550.388.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЙЯНИЯ РАДИОСИГНАЛА GPS НА ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ, ВЫТЯНУТЫХ ПО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

<sup>1</sup>А.Б. Ишин, <sup>1</sup>Э.Л. Афраимович<sup>†</sup>, <sup>2</sup>М.В. Тинин, <sup>1</sup>Ю.В. Ясюкевич

### EXPERIMENTAL STUDY OF GPS RADIO SIGNAL SCATTERING AT IONOSPHERIC INHOMOGENEITIES ELONGATED ALONG THE MAGNETIC FIELD

<sup>1</sup>A.B. Ishin, <sup>1</sup>E.L. Afraimovich<sup>†</sup>, <sup>2</sup>M.V. Tinin, <sup>1</sup>Yu.V. Yasyukevich

В настоящей работе проведено исследование угловых характеристик рассеяния радиосигнала GPS. На основе данных плотной региональной сети станций GPS в Японии (GEONET) за 12 февраля 2000 г. был проведен анализ количества наблюдаемых сбоев на частоте L2 GPS в зависимости от угла между магнитным полем и лучом спутник–приемник. Впервые обнаружено, что рассеяние трансionoсферного радиосигнала происходит как вдоль магнитной силовой линии, так и поперек. Количество приемников, на которых наблюдались сбои на частоте L2 при прохождении сигнала вдоль магнитной силовой линии, достигает 6–7 %, а для отдельных спутников эта величина может доходить до 30 %.

The present paper deals with the analysis of GPS signal scattering angular characteristics. Data from the Japanese dense regional GPS network (GEONET) were used to analyze the amount of L2 phase slips depending on the angle between the line-of-sight “GPS site–satellite” and the magnetic field over Japan on February 12, 2000. It has first been found that a transionoсpheric signal scattering occurs both along the magnetic field line and across it. The number of GPS receivers registering L2 phase slips for lines-of-sight along the magnetic field line runs to 6–7 %. For some satellites this value may be as much as 30 %.

#### Введение

До недавнего времени считалось, что основные процессы генерации ионосферных неоднородностей проходят в экваториальной и авроральной областях, где создаются условия для развития неустойчивостей ионосферной плазмы. В экваториальной области это сложная динамика экваториальной аномалии, а в авроральных областях – высыпания частиц. Основные усилия и большое количество приборов для исследования ионосферы создавалось как раз в этих областях. С появлением современных средств, включая плотные сети наземных приемников GPS, стало доступно более детальное изучение неоднородностей ионосферной плазмы на средних широтах.

За последнее время появилось множество работ, посвященных исследованию фазовых флуктуаций и сбоев сопровождения фазы несущей частоты в системе GPS во время геомагнитных возмущений [1–9].

В статье [10] сообщается о регистрации многочисленных сбоев сопровождения сигналов на вспомогательной частоте L2 системы GPS, вызванных рассеянием сигнала на ионосферных неоднородностях. Авторы считают, что это показательный пример проявления так называемых ионосферных пузырей (super bubbles). У плазменного пузыря есть характерная структура – он развивается вдоль линии магнитного поля Земли, удлиняясь в меридиональном направлении, но оставаясь достаточно узким в зональном. Однако в [10] не содержится данных, доказывающих факт вытянутости наблюдаемых неоднородностей вдоль магнитного поля. Настоящая статья посвящена исследованию, целью которого было выявление зависимости количества сбоев в системе GPS от взаимного расположения луча спутник–приемник и магнитного поля.

#### Данные и методы обработки

В работе использовались данные региональной японской сети GPS GEONET, состоящей из более

чем 1200 станций. Приемники японской сети не измеряют амплитуду принятого сигнала, поэтому выявить зависимость амплитуды принятого сигнала от угла между лучом спутник–приемник и магнитным полем в явном виде нельзя. Однако становится понятным, что при падении уровня принимаемого сигнала ниже определенного значения приемник перестанет обнаруживать сигнал на фоне шумов. Таким образом, имея статистику срывов сопровождения фазы несущей частоты на плотной сети станций при большом количестве измерений, можно сделать вывод о наличии зависимости количества сбоев (а следовательно, и рассеяния трансionoсферного радиосигнала) от взаимного расположения луча спутник–приемник и направления магнитного поля.

На рис. 1 представлены подионосферные точки для тех лучей спутник–приемник, на которых наблюдались сбои сопровождения фазы на вспомогательной частоте L2. Для примера были выбраны данные для двух спутников – PRN-13 и PRN-24 – с 11:00 до 14:00 UT. Для каждой из этих точек вычислялся угол  $\gamma$  между лучом спутник–приемник и направлением магнитного поля на высоте ионосферы (рис. 2). За высоту ионосферы была принята условная высота 350 км. Имеющиеся в свободном доступе данные GPS содержат измерения с временным разрешением в 30 с. В каждый момент времени наблюдается не менее 6 спутников. Учитывая при этом, что приемников в сети GEONET более 1200, получаем за сутки более  $2 \cdot 10^7$  измерений.

#### Результаты измерений

В каждый конкретный момент времени определенный процент функционирующих приемников не принимает сигнал от выбранного спутника GPS. Сбой сопровождения фазы несущей частоты может происходить из-за различных «случайных» причин (сбой в аппаратуре приемника, внезапное отключение электричества, пролетающий самолет и т. д.).

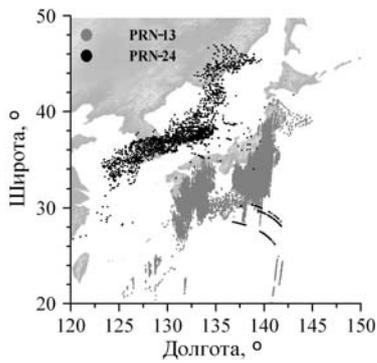


Рис. 1. Общая геометрия эксперимента. Серыми и черными точками нанесены подыоносферные точки для лучей спутник GPS – приемник GPS, для которых наблюдались сбои сопровождения фазы L2 вспомогательной частоты с 11:00 до 14:00 UT 12 февраля 2009 г.

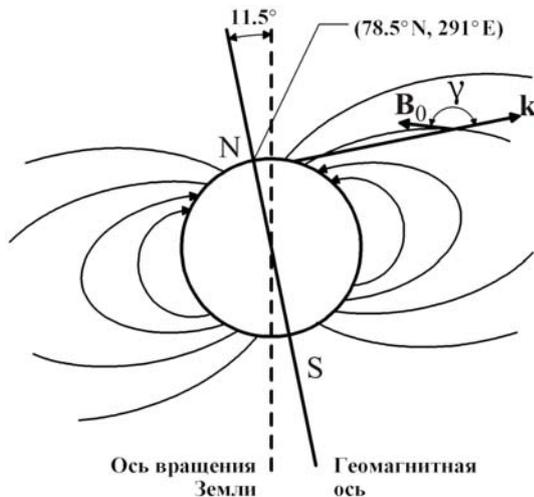


Рис. 2. Схема определения угла  $\gamma$  между волновым вектором  $\mathbf{k}$  и направлением вектора магнитного поля  $\mathbf{B}$ .

Будем считать, что процент этих случайных сбоев со временем остается, во-первых, не очень большим, во-вторых, в достаточной степени постоянным. На рис. 3 представлена зависимость количества приемников  $N(t)$ , на которых наблюдались срывы сопровождения фазы на несущей частоте L2 от времени, для четырех выбранных спутников. Видно, что для PRN-13 количество не принимающих сигнал приемников на протяжении получаса (12:10–12:40) оставалось более 200, т. е. для PRN-13 больше 17 % приемников не принимали сигнал на частоте L2. Для других спутников количество приемников, на которых регистрировались сбои частоты L2, тоже было значительным (рис. 3). На рис. 4 представлены траектории выбранных спутников в пространстве «угол места–азимут». Для каждого из четырех спутников выделены участки траектории с 11:00 до 14:00 UT. Именно в это время и наблюдается максимальное количество сбоев. Указанные участки соответствуют области, где луч спутник–приемник проходит вблизи магнитной силовой линии, либо вблизи ее нормали на высоте 350 км. Зависимость количества сбоев для сети GEONET представлена на рис. 5. Максимальный процент сбоев (до 33%) наблюдается именно для тех спутников, траектории радиосигналов от которых проходят вдоль магнитной силовой линии.

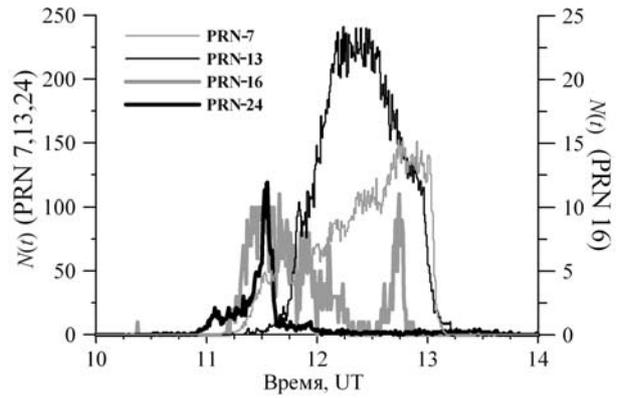


Рис. 3. Зависимость количества приемников, на которых регистрировались сбои определения фазы вспомогательной частоты L2 GPS, от времени, для отдельных спутников (12 февраля 2009 г.).

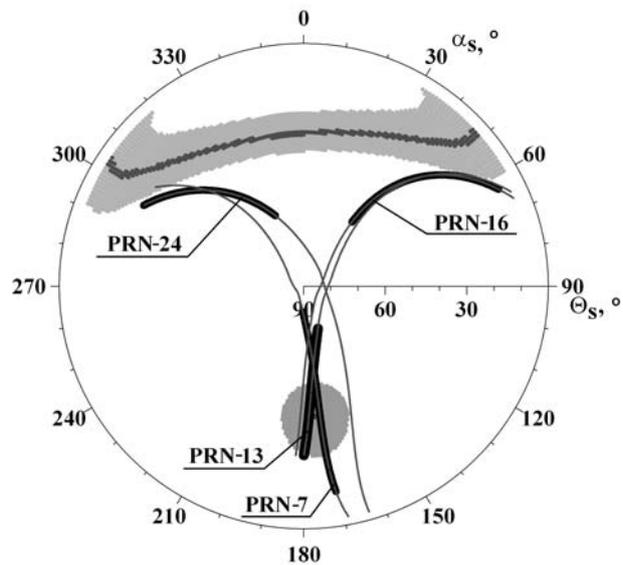


Рис. 4. Траектории четырех спутников в координатах «угол места–азимут». Серые области – область параллельности  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{B}$  ( $0^\circ < \gamma < 10^\circ$ ) и перпендикулярности  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{B}$  ( $85^\circ < \gamma < 90^\circ$ ). Утолщенные участки траекторий – положение спутников с 11:00 до 14:00 UT (12 февраля 2009 г.). Траектории построены для средней части Японии.

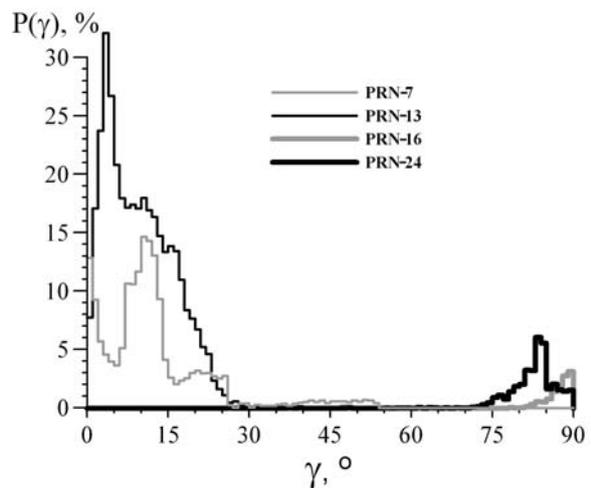


Рис. 5. Зависимость относительного количества сбоев  $P(\gamma)$  от угла  $\gamma$  для выбранных спутников GPS (12 февраля 2009 г. 11:00–14:00 UT).

Сбои также наблюдаются для спутников с направлением распространения радиосигнала поперек магнитной силовой линии, но в меньшем количестве (3–6 %).

При определении общей статистики сбоев учитывались данные для всех спутников. Их траектории в координатах угол места – азимут представлены на рис. 6. Только небольшая часть траекторий проходит в той части небосвода, для которой выполняется условие параллельности луча спутник–приемник с магнитной силовой линией на высоте ионосферы. Однако общая статистика дает нам наибольшее количество сбоев сопровождения фазы несущей частоты в приемниках именно для этой области. На рис. 7 серой линией представлена зависимость количества сбоев от угла  $\gamma$ . Число сбоев растет при приближении  $\gamma$  к  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . Однако общее ожидаемое количество измерений для различных углов  $\gamma$  различно. Например, для  $\gamma$  вблизи  $0^\circ$  наблюдений было в разы меньше, чем для  $\gamma$  вблизи  $65^\circ$  (рис. 7, черная штриховая линия). Для того чтобы составить адекватную картину сбоев, необходимо было провести нормировку результатов и вычислить относительное количество сбоев для каждого угла  $\gamma$ . Относительное количество сбоев в процентах приведено на рис. 7 черной сплошной линией. Видно, что при  $\gamma$  вблизи  $0^\circ$

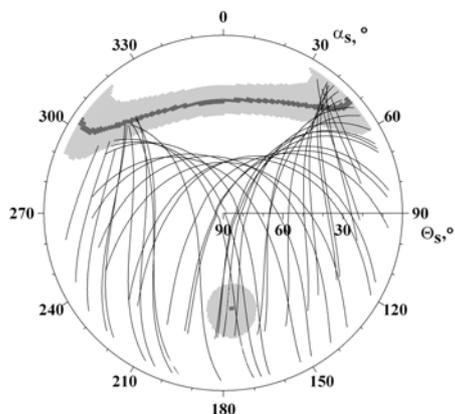


Рис. 6. Траектории всех спутников, наблюдавшихся 12 февраля 2000 г. (00:00–23:59 UT) в средней части Японии, в координатах угол места–азимут. Серые области – область параллельности  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{B}$  ( $0^\circ < \gamma < 10^\circ$ ) и перпендикулярности  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{B}$  ( $85^\circ < \gamma < 90^\circ$ ).

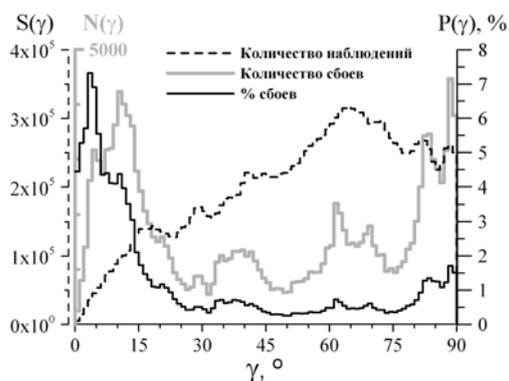


Рис. 7. Зависимость количества наблюдений  $S(\gamma)$  (штриховая кривая), количества сбоев  $N(\gamma)$  (серая кривая) и относительного количества сбоев  $P(\gamma)$  (черная кривая) от угла  $\gamma$  (12 февраля 2009 г., все спутники).

наблюдается увеличение количества сбоев для всех приемников и всех спутников до 7 %. Для  $\gamma$  вблизи  $90^\circ$  эта величина составляет только 1.5 %. Тем не менее, принципиально, что увеличение плотности сбоев наблюдается как в области углов  $\sim 90^\circ$ , так и  $\sim 0^\circ$ .

### Выводы

Впервые применен метод обнаружения магнитно-ориентированных ионосферных неоднородностей на основе анализа данных GPS. Обнаружено, что рассеяние трансionoсферного радиосигнала происходит как вдоль магнитной силовой линии, так и поперек. Рассеяние при распространении вдоль магнитной силовой линии более вероятно. Для отдельного спутника количество неработающих приемников в отдельные моменты времени может достигать 30 %, что совершенно недопустимо для стабильной работы GPS. Количество станций GPS, для которых имеет место срыв сопровождения фазы при распространении радиосигнала вдоль магнитной силовой линии, может достигать в 7–8 %. При использовании GPS этот факт необходимо учитывать. Необходимо, чтобы каждый приемник при выборе спутников для определения своего местоположения учитывал возможные сбои, которые могут возникнуть для спутников с «неблагоприятным» положением в пространстве относительно магнитного поля.

Результаты исследований необходимо учитывать при моделировании трансionoсферного распространения радиоволн.

Работа выполнена при поддержке Фундаментальной исследовательской программы физического отделения РАН (Проект IV.12 «Современные проблемы радиофизики»), а также гранта РФФИ 07-05-00127.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skone S.H. The impact of magnetic storms on GPS receiver performance // *Geodesy* 2001. V. 75, N 9–10. P. 457–468. doi:10.1007/S001900100198.
2. Conker R.S., El-Arini M.B., Hegarty C.J., Hsiao T. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/satellite-based augmentation system availability // *Radio Set.* 2003. V. 38, N 1. P. 1001. doi:10.1029/2000RS002604.
3. 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. P. 10.1029/2002GL014770.
4. Ledvina B.M., Kintner P.M., Makela J.J. Temporal properties of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitudes // *Radio Sci.* 2004. V. 39. P. RS1S18. doi:10.1029/2002RS002832.
5. Ledvina B.M., Makela J.J. First observations of SBAS/WAAS scintillations: Using collocated scintillation measurements and all-sky images to study equatorial plasma bubbles // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. L14101. doi:10.1029/2004GL021954.
6. Afraimovich E.L., Lesyuta O.S., Ushakov I.I., Voykov S.V. Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals // *Annals of Geophys.* 2002. V. 45, N 1. P. 55–71.
7. Afraimovich E.L., Demyanov V.V., Kondakova T.N. Degradation of performance of the navigation GPS system in geomagnetically disturbed conditions // *GPS Solut.* 2003. V. 7, N 2. P. 109–119.

8. Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Demyanov V.V., Gamayunov I.F. Mid-Latitude Amplitude Scintillation of GPS Signals and GPS Performance Slips // *Adv. Space Res.* 2009. V. 43. P. 964–972.

9. Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Voeykov S.V. Generation of secondary waves due to intensive large-scale AGW traveling // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41. P. 1459–1462.

10. Ma G., Maruyama T. A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. P. L21103. doi: 10.1029/2006GL027512.

<sup>†</sup>*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*

<sup>2</sup>*Иркутский государственный университет, Иркутск*