

8. СБОИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ GPS, ВЫЗВАННЫЕ РАССЕЯНИЕМ СИГНАЛА НА СРЕДНЕШИРОТНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ

Ишин А.Б., Ясюкевич Ю.В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН

Аннотация. 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 проведён 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 поперёк. 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 достигать до 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 статей посвященных исследованию фазовых флуктуаций и сбоев сопровождения фазы несущей частоты в системе GPS [1-9] во время геомагнитных возмущений.

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, удл

иняясь в меридиональном направлении, но оставаясь достаточно узким в зональном. Однако статья [10] не содержит 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.

ДААННЫЕ 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, потому выявить зависимость амплитуды принятого сигнала от угла между лучом спутник-приемник и магнитным полем в явном виде нельзя. Однако, понятно, 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 трансионосферного радиосигнала) от взаимного расположения луча спутник-приемник и направления магнитного поля.

На рисунке 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 PRN13 и PRN24 с 11:00 до 14:00 UT. Для каждой из этих точек вычислялся угол γ 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 секунд. 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.).

**12 февраля 2000 г.
11:00-14:00 UT**

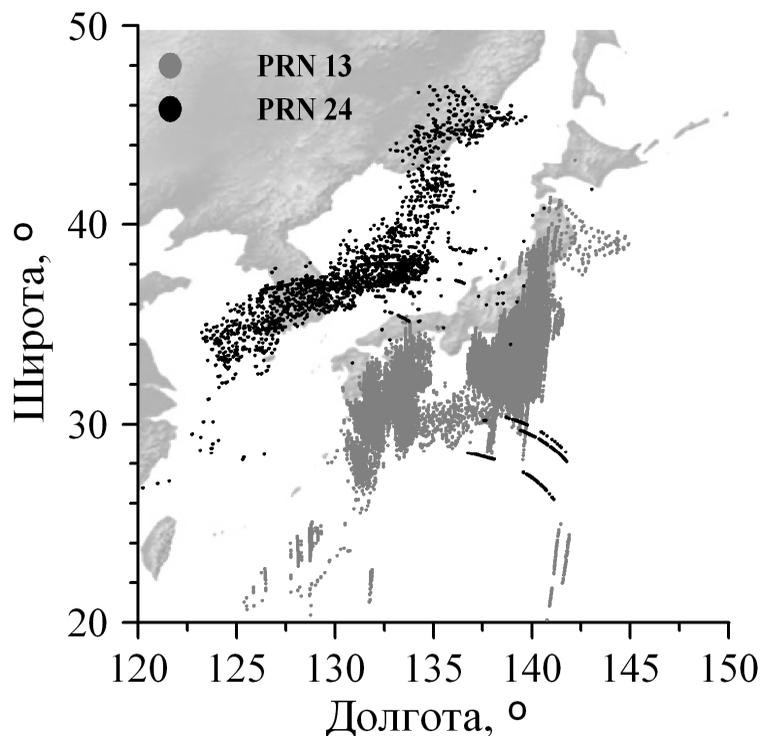


Рис. 1. Общая геометрия эксперимента. На карту серыми точками нанесены подионосферные точки для лучей «спутник GPS – приемник GPS», для которых наблюдались сбои сопровождения фазы L2 вспомогательной частоты с 11:00 до 14:00

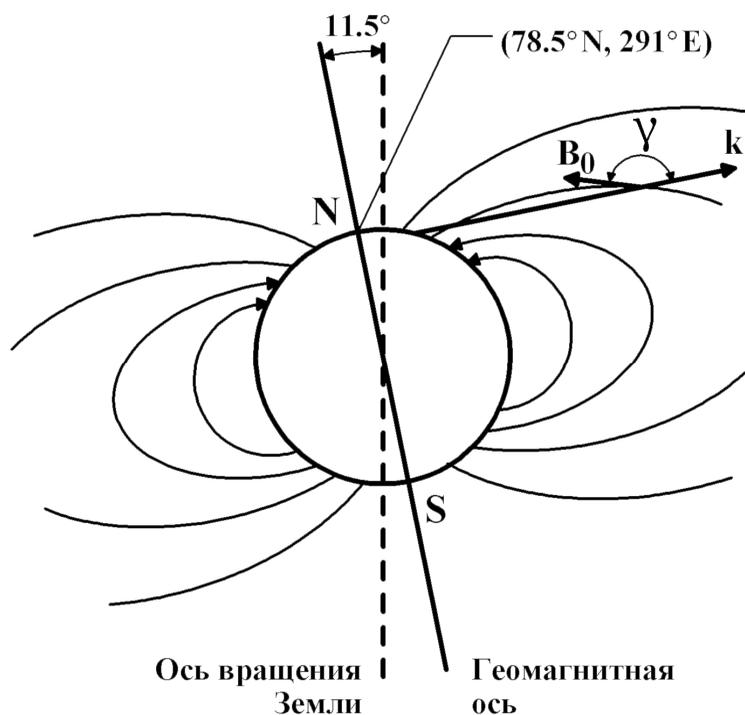


Рис. 2. Схема определения угла γ между волновым вектором k и направлением вектора магнитного поля B .

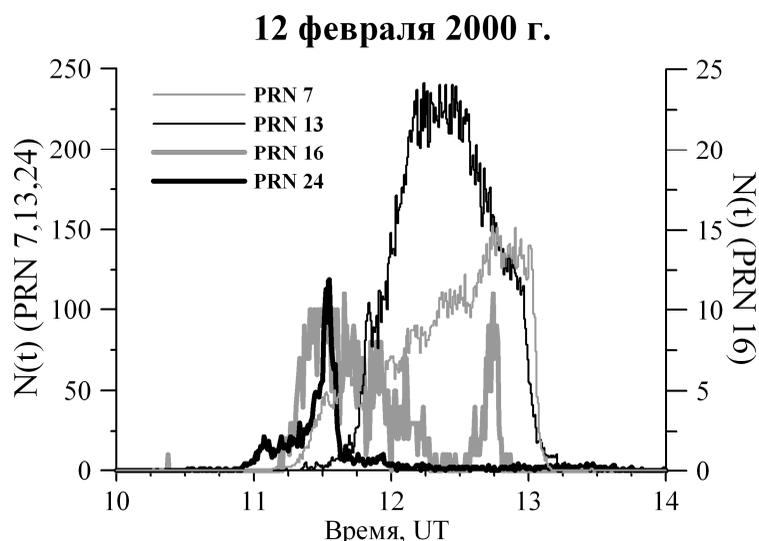


Рис. 3. Зависимость количества приемников, на которых регистрировались сбои определения фазы вспомогательной частоты L2 GPS от времени, для отдельных спутников.

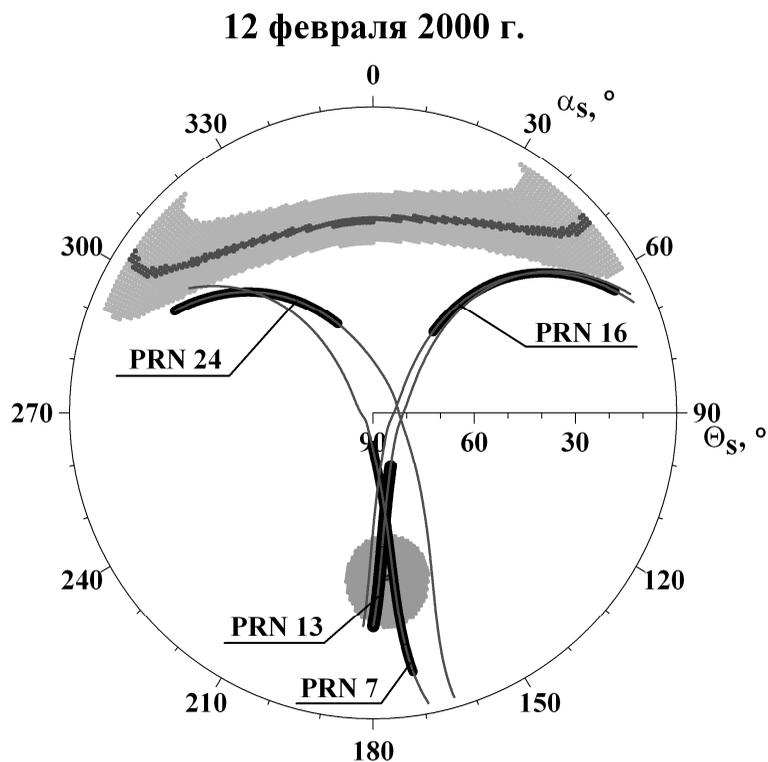


Рис. 4. Траектории четырех спутников в координатах угол места – азимут. Серые области – область параллельности k и B ($0^\circ < \gamma < 10^\circ$) и перпендикулярности k и B ($85^\circ < \gamma < 90^\circ$). Утолщенные участки траекторий – положение спутников с 11:00 до 14:00. Траектории построены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

Будем считать, что процент этих «случайных» сбоев со временем остается во-первых, не очень большим, во-вторых, в достаточной степени постоянным. На рисунке 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 рисунке 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 её нормали на высоте 350 км.

Зависимость количества сбоев для сети GEONET представлена на рисунке 5. Максимальный процент сбоев (до 33%) наблюдается именно для тех спутников, траектории радиосигналов от которых проходят вдоль магнитной силовой линии. Сбои также наблюдаются для спутников с направлением распространения радиосигнала поперёк магнитной силовой линии, но в количестве в несколько раз меньшем (3-6%).

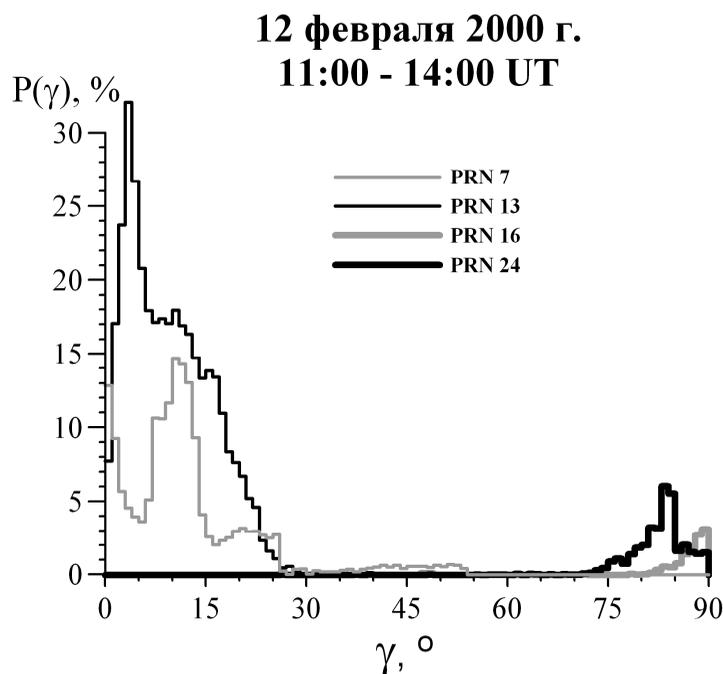


Рис. 5. Зависимость относительного количества сбоев $P(\gamma)$ от угла γ для выбранных спутников GPS

При определении общей статистики сбоев учитывались данные для всех спутников. Их траектории в координатах угол места – азимут представлены на рисунке 6.

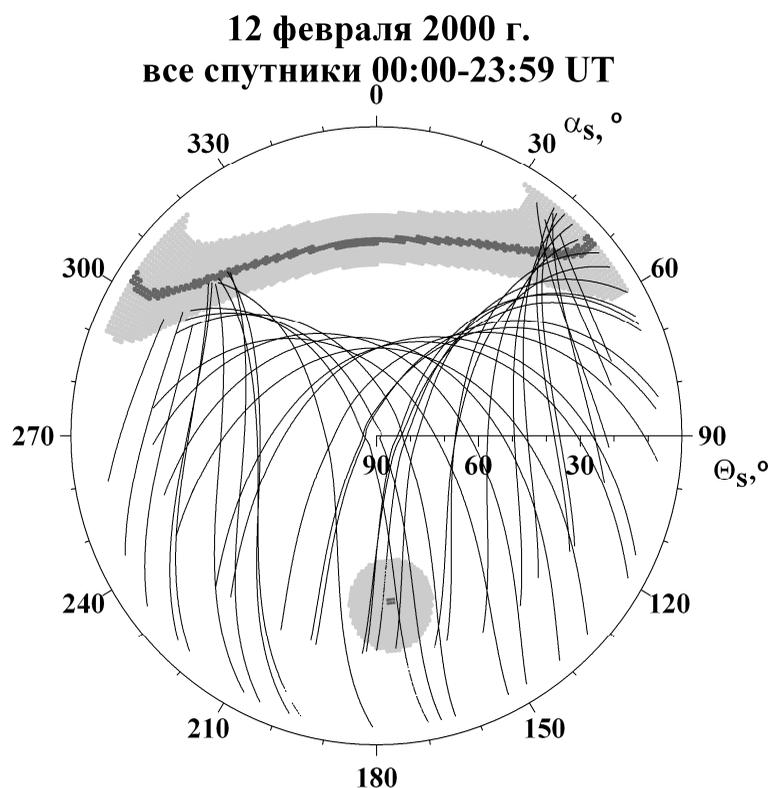


Рис. 6. Траектории всех спутников наблюдавшихся 12 февраля 2000 г. в средней части Японии, в координатах угол места – азимут. Серые области – область параллельности k и V ($0^\circ < \gamma < 10^\circ$) и перпендикулярности k и V ($85^\circ < \gamma < 90^\circ$).

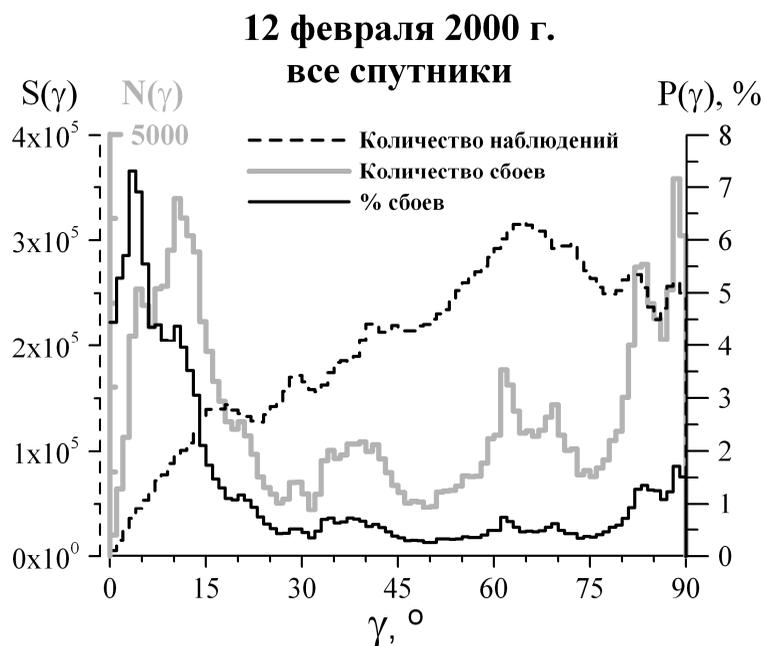


Рис. 7. Зависимость количества наблюдений $S(\gamma)$ (пунктирная кривая), количества сбоев $N(\gamma)$ (серая кривая) и относительного количества сбоев $P(\gamma)$ (черная кривая) от угла γ . На рисунке 7 серой линией представлена зависимость количества сбоев от угла γ .

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.

Число сбоев растет при приближении γ к 0° и 90° . Однако, общее ожидаемое количество измерений для различных углов γ различно. Например для γ вблизи 0° наблюдений было в разы меньше, чем для γ вблизи 65° (рис. 7, черная пунктирная линия). Для того, чтобы составить адекватную картину сбоев, необходимо было провести нормировку результатов и вычислить относительное количество сбоев для каждого угла γ . Относительное количество сбоев в % приведено на рисунке 7 черной сплошной линией. Видно, что при γ вблизи 0° наблюдается увеличение количества сбоев для всех приемников и всех спутников до 7%. Для γ вблизи 90° 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 применён метод обнаружения магнитно-ориентированных ионосферных неоднородностей на основе анализа данных GPS. Обнаружено, что рассеяние трансionoсферного радиосигнала происходит при его распространении, как вдоль магнитной силовой линии, так и поперек магнитной силовой линии. Рассеяние при распространении вдоль магнитной силовой линии более вероятно, чем поперёк. Для отдельного спутника количество не работающих приемников в отдельные моменты времени может достигать величины 30%, что совершенно недопустимо для стабильной работы GPS. Общее количество станций GPS, для которых имеет место срыв сопровождения фазы, при распространении радиосигнала вдоль магнитной силовой линии, может достигать величины 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 наших исследований нужно учитывать при моделировании трансionoсферного распространения радиоволн.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Фундаментальной исследовательской программы физического отделения РАН (Проект IV.12 «Современные проблемы радиофизики») и гранта президента РФ МК-3094.2010.5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Skone, S.H. The impact of magnetic storms on GPS receiver performance // *Geodesy* 75(9-10), doi:10.1007/ S001900100198, 2001, 457-468.
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.*, doi:10.1029/2000RS002604, 2003, 38 (1), 1001.
3. Ledvina, B.M., Makela, J.J., Kintner, P.M. First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude // *Geophys. Res. Lett.*, 10.1029/2002GL014770, 2002, 29 (14)
4. Ledvina, B.M., Kintner, P.M., Makela, J.J. Temporal properties of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitudes // *Radio Sci.*, RS1S18, doi:10.1029/2002RS002832, 2004, 39.
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.*, L14101, doi:10.1029/2004GL021954, 2005, 32.
6. Afraimovich, E.L., Lesyuta, O.S., Ushakov, I.I., Voeykov, S.V. Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals // *Annals of Geophys.*, 2002, 45 (1), 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, 7 (2), 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, 43, 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, 41, 1459-1462.
10. Ma, G., Maruyama, T. A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes // *Geophys. Res. Lett.* L21103, doi: 10.1029/2006GL027512, 2006, 33.