

АДАПТИВНАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ

© 2008 г. Э. Л. Афраймович, Г. Я. Смольков, Ю. В. Ясюкевич

Представлено академиком Н.С. Кардашевым 21.09.2007 г.

Поступило 01.10.2007 г.

Регистрация интенсивности УКВ- и КВ-радиоизлучения Солнца имеет большое научное и прикладное значение как эффективный метод мониторинга выбросов корональной массы [1]. Особый интерес проявляется к регистрации радиоизлучения в низкочастотной части УКВ-диапазона, поскольку это позволяет расширить размеры наблюдаемой радиокороны Солнца. Большое значение для фундаментальной науки имеет исследование радиоизлучения пульсаров. Ряд астрофизических задач, возникающих при исследованиях пульсаров, необходимо решать в диапазоне низких частот. В качестве примера работающих в настоящее время низкочастотных систем можно привести антенны БСА ФИАН (111 МГц; <http://www.prao.psn.ru/radiotelescopes/telescopes.html>), УТР-2 (25 МГц, <http://www.ira.kharkov.ua/UTR2/download.htm>) и т.д. В настоящее время реализуются амбициозные проекты, использующие самые современные методы и технологию приема и цифровой обработки радиосигналов. Примером может служить развертываемая в Европе гигантская низкочастотная радиоастрономическая решетка LOFAR (30–240 МГц; <http://www.astron.nl/p/lofarframe.htm>), состоящая из 25000 индивидуальных приемных диполей, распределенных на площади диаметром 350 км. К 2020 г. планируется сооружение международного радиотелескопа SKA с эффективной площадью всех антенн решетки 1 км², предназначенного в том числе для исследования пульсаров и радиолокации выбросов корональной массы на Солнце. Новый инструмент будет примерно в 100 раз чувствительнее крупнейших современных радиотелескопов (<http://www.inaauka.ru/news/article61050.html>).

В то же время все более тонкие детали профиля интенсивности и спектра излучения связывают с физическими процессами в наблюдаемых объектах. При этом должным образом не учитываются искажения радиоастрономических сигналов в ионосфере Земли, которые возрастают при

уменьшении частоты. Во многом это связано с тем, что величина ионосферных эффектов обратно пропорциональна квадрату частоты [2]. Именно поэтому до сих пор предполагается, что в УКВ-диапазоне ионосферные искажения радиоастрономических сигналов пренебрежимо малы и их можно не учитывать при интерпретации наблюдений. Между тем это далеко не так. Эффекты многолучевой и поляризационной интерференции, приводящей к сильным искажениям интенсивности радиоастрономических сигналов при распространении в неоднородных средах (корона Солнца, ионосфера), были описаны еще в 1981 г. в работе [3]. В этой работе введено понятие передаточной характеристики ионосферы для радиоастрономических сигналов. Однако 25 лет назад еще не было возможности реконструировать эту функцию для конкретных условий и полученные оценки были основаны на средних характеристиках ионосферы.

В настоящее время ситуация существенно изменилась. Появились средства непрерывного и глобального мониторинга ионосферы по данным наземных средств (ионозондов, радаров некогерентного зондирования), навигационных систем GPS, ГЛОНАСС [4] (в ближайшие годы GALILEO, <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>), двухчастотных спутниковых высотомеров (TOPEX, Jason-1; <http://www.avisio.oceanobs.com/>). Эти данные широко используются не только для изучения ионосферы, но и непосредственно для тестирования фазовых искажений в трансionoсферном канале систем навигации и радиопеленгации [4]. Разработаны ионосферные модели, такие как международная эмпирическая модель IRI [5], широко используемые в расчетах параметров ионосферных радиоканалов. Однако в отличие от современных спутниковых систем навигации и радиолокации, в которых все более точное восстановление параметров ионосферы является встроенной функцией, в радиоастрономии это направление должного развития не получило. Это входит в противоречие с все возрастающими требованиями к точности анализа амплитудного профиля излучения, угловому и поляри-

зационному разрешению радиотелескопов нового поколения.

Авторы предлагают новый метод адаптации радиотелескопов к изменяющимся условиям распространения радиоастрономических сигналов в ионосфере, основанный на использовании данных навигационных систем GPS–ГЛОНАСС–GALILEO и расчетов с использованием моделей ионосферы IRI-2001 (<ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/space/model/ionos/iri.html>) и магнитного поля IGRF (http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/igrf_form.shtml).

При распространении сигнала в ионосфере фазовое запаздывание определяется величиной полного электронного содержания (ПЭС) вдоль направления распространения [2]

$$\Delta\phi = \frac{8.44 \cdot 10^{-7}}{f} \int_s N_e ds, \quad (1)$$

где N_e – электронная концентрация, м^{-3} ; f – частота сигнала, Гц. Величина $\int_s N_e ds \equiv I \equiv DM$ равна

значению ПЭС I вдоль луча зрения на источник и определяет меру дисперсии DM радиосигнала при вычислении фазового запаздывания (1) на различных частотах. Общепринятой единицей измерения ПЭС является TECU (total electron content units), равная 10^{16} электронов на м^2 .

Амплитудные искажения трансионосферного сигнала вследствие фокусировки, весьма существенные в КВ-диапазоне [6], пренебрежительно малы в УКВ-диапазоне из-за обратной квадратичной зависимости от частоты [2]. Более значимы и хорошо исследованы амплитудные мерцания, обусловленные рассеянием на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях, расположенных на высотах максимума ионизации [7]. В УКВ диапазоне глубина амплитудных мерцаний в обычных условиях незначительна, а период мерцаний (1–30 с) достаточно мал, что позволяет компенсировать влияние мерцаний радиоастрономических сигналов использованием хорошо известных и простых способов обработки сигнала.

Определенное искажение радиосигнала вносят эффекты рефракции в ионосфере. В рамках данной работы мы не делаем оценки влияния эффектов рефракции на точность угловых измерений, оставляя этот вопрос в качестве предмета дальнейших исследований.

В случае линейно или эллиптически поляризованного сигнала более значимым может оказаться амплитудный эффект, обусловленный вращением плоскости поляризации (эффектом Фарадея) [2, 3]. В работе [8] дано определение такого вида модуляции, как фарадеевская амплитудная модуляция.

При квазипродольном распространении угол поворота плоскости поляризации определяется выражением [2, 3]

$$\Omega = \frac{RM}{f^2}, \quad RM = 2.365 \cdot 10^4 \int_s N_e B_0 \cos\theta ds, \quad (2)$$

где B_0 – напряженность магнитного поля, Тл; θ – угол между вектором магнитного поля и направлением распространения сигнала, рад. Величина RM имеет характер меры вращения. Для расчета меры вращения и поворота плоскости поляризации часто используют приближенные формулы [9] (предполагается, что магнитное поле меняется достаточно слабо вдоль направления распространения):

$$RM \approx 2.365 \cdot 10^4 \langle B_0 \cos\theta \rangle \int_s N_e ds, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Omega &\approx 2.365 \frac{10^4}{f^2} \langle B_0 \cos\theta \rangle \int_s N_e ds = \\ &= 2.365 \frac{10^4}{f^2} \langle B_0 \cos\theta \rangle \cdot DM; \end{aligned}$$

$\langle B_0 \cos\theta \rangle$ – среднее значение произведения $B_0 \cos\theta$ вдоль луча на источник, которое можно вычислить для фиксированного значения угла места на источник χ (угла между лучом на источник и поперечностью Земли в топоцентрической системе координат) с использованием подходящей модели магнитного поля.

Для сигнала линейной (эллиптической) поляризации изменение амплитуды сигнала при приеме на антенну линейной поляризации определяется модулирующей функцией $M(t)$ [3, 8]

$$A(t) = M(t) \cdot R(t), \quad (4)$$

$$M(t) = \sqrt{1 + a^2 + 2a \cos[2\Omega(t) + \varphi_0]},$$

где $R(t)$ – исходный сигнал до ионосферы, $A(t)$ – выходной сигнал, a – глубина модуляции (соотношение амплитуд компонент электромагнитной волны с правым и левым направлением вращения), φ_0 – начальная фаза.

Мы предлагаем способ расчета меры дисперсии DM и меры вращения RM , основанный на данных двухчастотных измерений фазового запаздывания сигналов GPS вдоль направления на ИСЗ GPS, представленных в Интернете в формате RINEX (<http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/dbDataByDate.cgi>). Методика восстановления наклонного ПЭС по данным двухчастотных приемников GPS в достаточной степени разработана и описана в ряде источников [4]. Выходными данными после первичной обработки являются значения азимута $\alpha(t)$ и угла ме-

ста $\chi(t)$ на ИСЗ GPS из пункта расположения приемника и значения наклонного ПЭС $I(t)$.

Наша идея состоит в использовании сигналов навигационных спутников (GPS, GLONASS, GALILEO) как тестового сигнала реперного источника, расположенного на минимальном угловом расстоянии от исследуемого радиоисточника, по аналогии с известными системами адаптивной оптики, которые предназначены для адаптации оптических телескопов к меняющимся условиям оптически неоднородной и нестационарной тропосферы. Учитывая, что в ближайшее время появятся комбинированные приемники систем GPS–GLONASS–GALILEO, в поле видимости которых практически в любое время будут находиться до 30 спутников, для любых условий эксперимента можно будет подобрать соответствующий спутник, находящийся на минимальном угловом расстоянии от исследуемого радиоисточника.

Для уточнения расчетов необходимо привлечение современных численных ионосферных моделей, которые адекватно воспроизводят, по крайней мере для средних и экваториальных широт, профиль электронной концентрации существенно выше максимума слоя F2. На данный момент имеется несколько таких ионосферных моделей, в том числе модели IRI-2001 и IRI-2007 (<http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/ionospheric/iri/iri2007/>). Для расчетов меры вращения RM мы использовали также модель магнитного поля Земли IGRF-10.

Приведенные ниже результаты расчетов относятся к частоте 100 МГц. Для любой другой выбранной частоты вид зависимостей остается прежним, меняются только масштабные множители $\frac{1}{f}$

(для фазы) и $\frac{1}{f^2}$ (для угла поворота). В рамках ка-

чественного рассмотрения влияния ионосферы на радиоастрономические сигналы мы ограничились значением глубины модуляции $a = 0.5$, характерным для эллиптической поляризации, и нулевым значением начальной фазы ϕ_0 .

Для иллюстрации значимости ионосферных эффектов и эффективности предложенного способа адаптации мы выбрали для анализа данные станций GPS, расположенных в различных регионах земного шара вблизи радиотелескопов LOFAR (Нидерланды, <http://www.astron.nl/p/lofar-frame.htm> – станция WSRT) и Arecibo (Пуэрто-Рико, <http://www.naic.edu/~PUR3>). Мы выбрали спокойный день 4 декабря 2004 г. (day 339, среднесуточные значения геомагнитных индексов $K_p \sim 0$, $A_p \sim 0$) и возмущенный день 30 октября 2003 г. (day 303, $K_p \sim 7$, $A_p \sim 191$), когда произошла большая магнитная буря [10].

На рис. 1 для дневного и ночного времени представлена динамика наклонного ПЭС $I(t)$, вы-

численного для станции WSRT для магнитоспокойного дня по данным GPS (жирные кривые) и с использованием модели IRI-2001 (тонкие кривые). Здесь же приведены зависимости углов $\chi(t)$ и $\alpha(t)$ направления на ИСЗ с номером PRN25. Мера вращения $RM(t)$ рассчитана по экспериментальным данным (жирные кривые) и с использованием ионосферной модели IRI-2001 (тонкие кривые – формула (3); штриховые кривые – формула (2)).

Дневные значения ПЭС при больших углах χ более чем в два раза превышают ночные. При малых величинах угла места χ значения наклонного ПЭС могут достигать 30–40 TECU в дневное время и 20–25 TECU в ночное время. Можно отметить также заметное расхождение данных эксперимента и модели для некоторых направлений на источник. Анализ зависимости $\cos\theta(t)$ для PRN25 позволяет проконтролировать, на каком интервале времени пролета ИСЗ GPS-условие квазипродольного распространения выполнялось строго.

Для частоты 100 МГц функции $\Delta\phi(t)$, $\Omega(t)$ и $M(t)$, рассчитанные по экспериментальным данным ИСЗ PRN25, нанесены жирными кривыми; тонкие и штриховые кривые – приближенный и точный расчет на основе IRI-2001 (см. рис. 1). Дополнительное фазовое запаздывание в ионосфере может изменяться от одной тысячи радиан при максимальных углах места χ до нескольких тысяч радиан при малых углах χ . Очевидно, что для различных радиотелескопов (либо различных приемных антенн одной радиоастрономической решетки) фазовое запаздывание будет значительно различаться. Это может приводить к ошибкам в радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой. Угол $\Omega(t)$ меняется от единиц до десятков радиан, что при приеме сигнала на антенну линейной поляризации приводит к заметной модуляции амплитуды сигнала с характерным периодом от 30 до 90 мин.

Кардинально различаются результаты расчетов для станции PUR3 (рис. 2), находящейся вблизи радиотелескопа Arecibo в районе северного гребня экваториальной ионосферной аномалии. Во время главной фазы большой магнитной бури 30 октября 2003 г. в 22^h00^m UT значения вертикального ПЭС достигали 180 TECU, а градиенты ПЭС – до 5–8 TECU/градус. Период фарадеевской амплитудной модуляции $M(t)$ в интервале времени 21^h–22^h UT уменьшился до 200–300 с. В этом случае вариации амплитуды принимаемого сигнала могут быть ошибочно приняты за амплитудные мерцания, вызванные рассеянием на мелкомасштабных неоднородностях, особенно если сигнал имеет не линейную, а эллиптическую поляризацию. Это может, в свою очередь, привести к неадекватному использованию известных методов компенсации мерцаний при наблюдениях пульса-

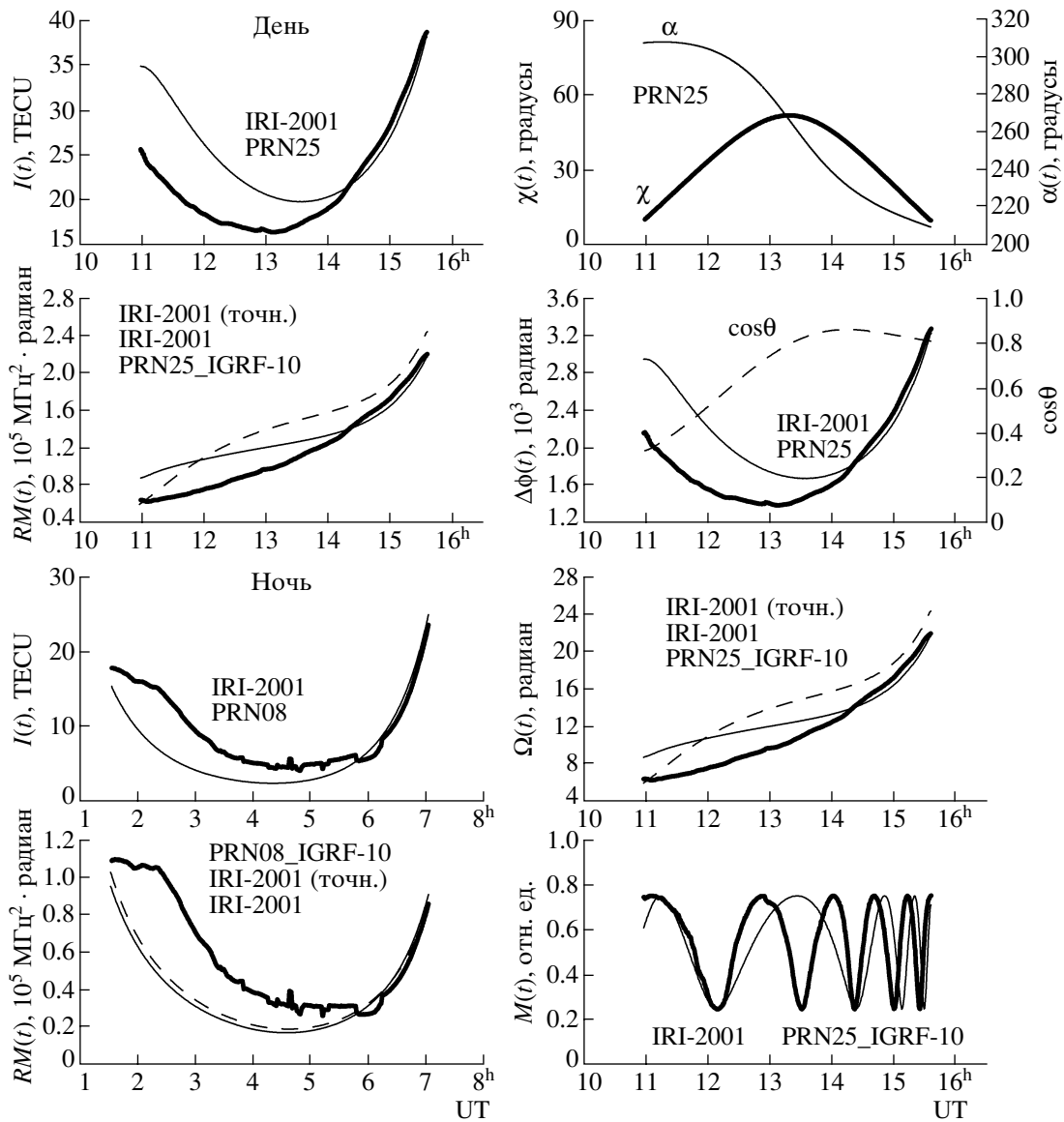


Рис. 1. Передаточные характеристики ионосферы в районе радиотелескопа LOFAR для магнитоспокойного дня 4 декабря 2004 г.

ров, а также к ошибкам оценки интенсивности и характерных размеров неоднородностей электронной концентрации при исследовании характеристик солнечного ветра или межзвездной среды [11, 12].

Таким образом, основным фактором влияния ионосферы на радиоастрономический сигнал в УКВ-диапазоне является дополнительный поворот плоскости поляризации, который необходимо учитывать при оценке и компенсации вклада ионосферы в интегральное значение этого параметра от радиоисточника до телескопа. Кроме того, при приеме сигнала на антенну линейной поляризации вариации поляризационного угла могут привести к значительной амплитудной модуляции.

Наблюдаемая при этом модуляция амплитуды импульсов пульсаров [11, 12] может быть обусловлена изменениями поворота плоскости поляризации сигнала в ионосфере. При современных требованиях к характеристикам радиотелескопов подобные воздействия нельзя не учитывать.

Результаты моделирования с использованием модели IRI-2001 достаточно близки к экспериментальным значениям, поэтому в том случае, если не удастся подобрать подходящий луч на исследуемый радиоисточник и восстановить ПЭС по данным GPS-измерений, можно использовать современные ионосферные модели. В ближайшее время после проведения необходимого тестирования для различных условий эксперимента

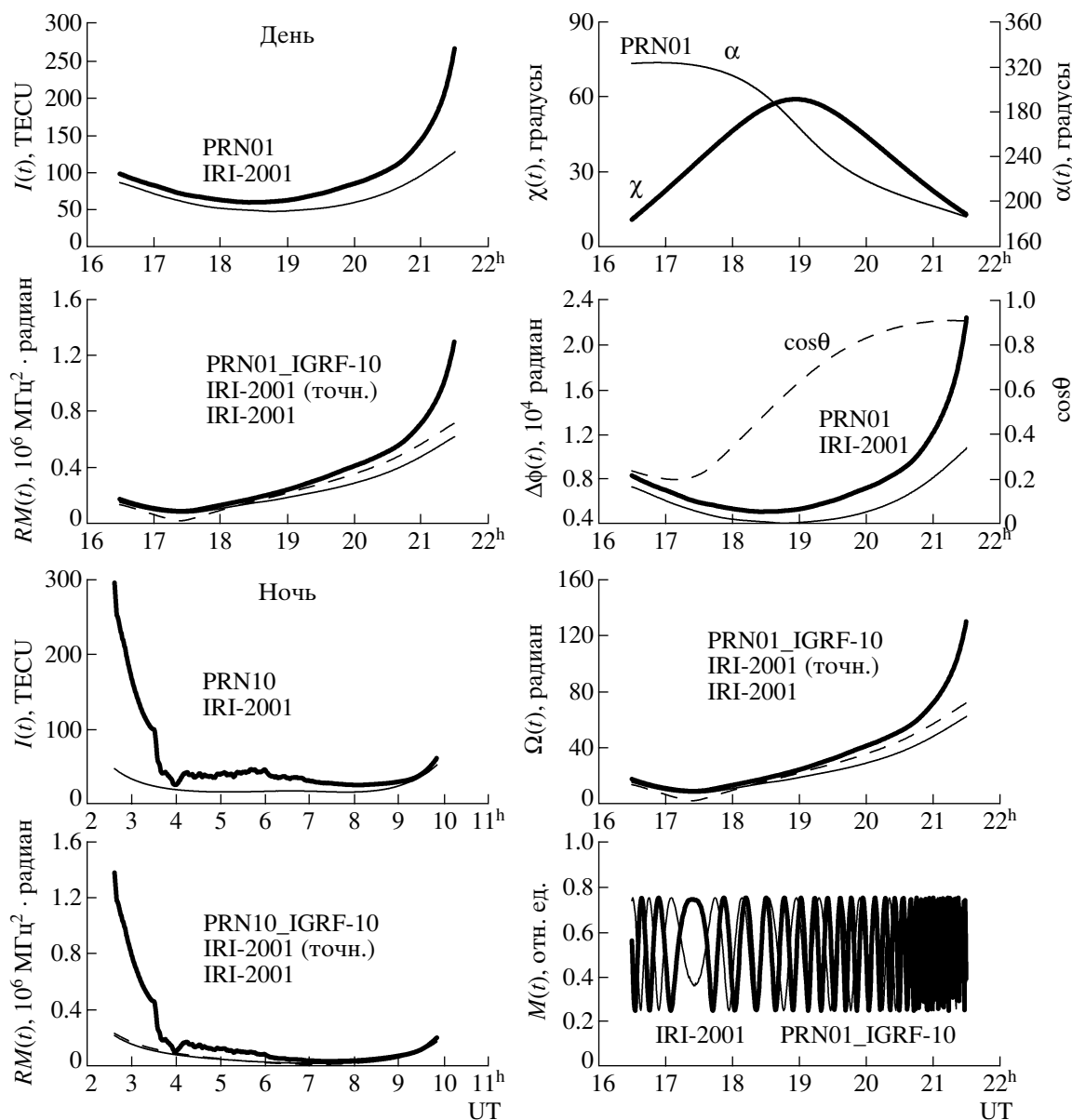


Рис. 2. Передаточные характеристики ионосферы в районе радиотелескопа Arecibo во время магнитной бури 30 октября 2003 г.

расчеты можно будет проводить на основе уточненной модели IRI-2007.

Таким образом, наш метод открывает путь к разработке систем адаптивной радиоастрономии, адаптивной к неоднородной и нестационарной ионосфере, по аналогии с известными системами адаптивной оптики, которые предназначены для адаптации в реальном масштабе времени оптических телескопов к меняющимся условиям оптически неоднородной и нестационарной тропосферы. При высоком отношении сигнал/шум наш метод может быть использован совместно с известным методом фазовой самокалибровки, реализован-

ном при обработке данных радиоинтерферометра VLA [13].

Авторы выражают благодарность Г.А. Жеребцову, А.Т. Алтынцеву, А.М. Уралову, А.П. Потехину, В.Г. Леденеву, А.В. Медведеву за интерес к работе и плодотворные дискуссии, С.В. Воейкову и П.В. Татаринovu за помощь в подготовке данных, сотрудникам Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC), JPLG и CODG за данные глобальной сети наземных двухчастотных приемников GPS.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 30

“Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Benz A., Monstein C., Meyer H. // Solar. Phys. 2005. V. 226. 143–151.
2. Железняков В.В. Электромагнитные волны в космической плазме. М.: Наука, 1964. 560 с.
3. Afraimovich E.L. // Astron. and Astrophys. 1981. V. 97. № 2. 366–372.
4. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Ин-т солнечно-земной физики, 2006. 480 с.
5. Bilitza D. // Radio Sci. 2001. 36. № 2. P. 261–275.
6. Afraimovich E.L., Udodov M.Yu. // J. Atmos. and Terr. Phys. 1993. V. 55. № 1. P. 57–64.
7. Гундзе Е., Чжаохань Лю // ТИИЭР. 1982. Т. 70. № 4. С. 5–45.
8. Афраймович Э.Л. // ДАН. 2007. Т. 417. № 6. С. 818–822.
9. Davies K. // Space Sci. Rev. 1980. V. 25. № 4. P. 357–430.
10. Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Kosogorov E.A. // Adv. Space Res. 2007. DOI:10.1016/j.asr.2007.03.006.
11. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. М.: Мир, 1980. 296 с.
12. Ульянов О.М., Захаренко В.В., Коноваленко А.А. и др. // Радиофизика и радиоастрономия. 2006. Т. 11. № 2. С. 113–133.
13. Kassim N.E., Perley R.A., Erickson W.C., Dwarkanath K.S. // Astron. J. 1993. V. 106. P. 2218–2228.