

УДК 550.388.2

## АДАПТИВНАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ

Э.Л. Афраимович, Ю.В. Ясюкевич

## ADAPTIVE RADIO ASTRONOMY

E.L. Afraimovich and Yu.V. Yasyukevich

При интерпретации данных наземных радиотелескопов необходимо принимать во внимание искажения радиосигналов в ионосфере. Нами предложен метод восстановления характеристик исходного радиосигнала («до ионосферы»), основанный на использовании модели магнитного поля IGRF-10 и значений полного электронного содержания, полученных по данным GPS-измерений. Наш проект открывает путь к разработке методов и систем адаптивной радиоастрономии, адаптивной к неоднородной и нестационарной ионосфере – по аналогии с известными системами адаптивной оптики. В качестве «реперного источника», с помощью которого восстанавливаются параметры среды, мы предлагаем использовать спутники систем навигации.

In order to interpret radio astronomical data it is necessary to take into account possible distortions of radio astronomical signals in the Earth ionosphere. We suggest the method of reconstruction of an initial radio signal characteristic (“before ionosphere”). It is based on the using of magnetic field model IGRF-10 and values of ionosphere total electron content as deduced from GPS measurements. Our project opens a way to development of methods and systems of adaptive (to inhomogeneous and non-stationary ionosphere) radio astronomy by analogy with known systems of adaptive optics. We suggest using satellites of navigation systems as a reference source.

### Введение

Регистрация интенсивности УКВ-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. И в этом случае понижение частоты позволяет регистрировать излучение радиопульсаров на предельно больших расстояниях.

При этом, как правило, должным образом не учитываются искажения радиосигнала 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. Между тем 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.

### Расчет передаточной характеристики ионосферы

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

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{c} \int_s^f \frac{40.308}{f^2} N_e ds = \frac{8.44 \cdot 10^{-7}}{f} \int_s^f N_e ds. \quad (1)$$

Величина  $\int N_e ds = I$  равна значению ПЭС вдоль луча зрения и определяет меру дисперсии  $DM$  радиосигнала при вычислении фазового запаздывания (1) на различных частотах.

В случае линейно или эллиптически поляризованного сигнала достаточно значителен амплитудный эффект, обусловленный вращением плоскости поляризации (эффект Фарадея или Фарадеевская амплитудная модуляция – ФАМ) [2, 4]. При квазипродольном распространении угол поворота плоскости поляризации определяется выражением [2]:

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

где  $\theta$  – угол между вектором магнитного поля и направлением распространения сигнала;  $B_0$  – напряженность магнитного поля, Тл. Среднее значение произведения  $B_0 \cos \theta$  вдоль луча можно вычислить для фиксированного угла места  $\chi$ , используя подходящую модель магнитного поля. Величина  $\int N_e B_0 \cos \theta ds$  имеет характер «меры вращения». Мера вращения  $RM$  определяется различными способами (с точностью до коэффициента). В рамках данной работы мы определяем меру вращения как коэффициент при  $1/f^2$  в (2).

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

При использовании приближенных формул предполагается, что магнитное поле меняется достаточно слабо вдоль луча распространения сигнала, по крайней мере, в той области, где концентрация электронов существенна.

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

$$A(t) = M(t)R(t),$$

$$M(t) = \sqrt{1 + a^2 + 2a \cos[2\Omega(t) + \varphi_0]}, \quad (4)$$

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),  $\varphi_0$  – начальная фаза.

Набор формул (1–4) позволяет рассчитать эффекты ионосферной модуляции фазы, поворота плоскости поляризации и ФАМ при известных значениях меры  $DM$  и  $RM$ .

Мы использовали два метода для определения ПЭС: восстановление данным GPS и ионосферное моделирование. Методика восстановления наклонного ПЭС по данным двухчастотных приемников GPS в достаточной степени разработана и описана в ряде источников [5], поэтому мы приводим лишь конечные формулы для вычисления ПЭС вдоль луча зрения из точки приема на навигационный ИСЗ:

$$I = - \frac{f_1^2 f_2^2 (P_1 - P_2) + nP + \delta P}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \frac{1}{40.308},$$

$$I = \frac{f_1^2 f_2^2 (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + nL}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \frac{1}{40.308}. \quad (5)$$

Основная наша идея состоит в использовании сигналов навигационных спутников (GPS, GLONASS, GALILEO) как тестового сигнала «реперного источника», расположенного на минимальном угловом расстоянии от исследуемого радиосточника – по аналогии с известными системами адаптивной оптики, которые предназначены для адаптации оптических телескопов к меняющимся условиям оптически неоднородной и нестационарной тропосферы. Такой подход вполне обоснован, поскольку расстояние до ИСЗ превышает 20200 км и условие дальней зоны в УКВ-диапазоне для антенн с размерами не более 10 км выполняется с достаточной степенью точности.

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 радиосточника. Однако для уточнения расчетов необходимо привлечение современных численных ионосферных моделей.

Для проведения моделирования мы использовали модель IRI-2001 [6]. Прежде всего мы рассчитывали  $DM$  и «точное» значение меры вращения  $RM$ . После чего рассчитывали соответствующие им значения угла  $\Omega$ . Для расчетов меры вращения  $RM$  мы использовали также модель магнитного поля Земли IGRF-10 [7].

Приведенные ниже результаты расчетов относятся

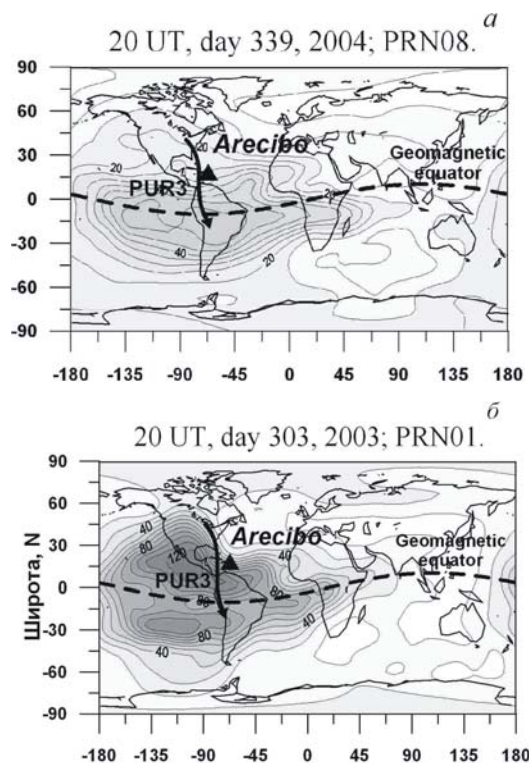


Рис. 1. Геометрия эксперимента. В заголовке панелей указано время UT, номер дня года, год и номер спутника GPS. Изогнутой линией отмечены траектории подионосферных точек на высоте 2000 км, соответствующие зависимости азимута и угла места в соответствующий день для спутников PRN08 (рис. 2, д) и PRN01 (рис. 3, д). Пунктирной кривой показан геомагнитный экватор. На рисунке нанесены глобальные карты вертикального ПЭС, построенные по IONEX-данным JPLG: для спокойного дня 4 декабря 2004 г., 20:00 UT (а) и во время магнитной бури 30 октября 2003 г., 20:00 UT (б). Изолинии ПЭС нанесены в единицах TECU.

к частоте 100 МГц. При расчетах (3) модулирующей функции ФАМ  $M(t)$  необходимо задать глубину модуляции  $a$  и начальную фазу  $\varphi_0$ . В рамках качественного рассмотрения влияния ионосферы на радиоастрономические сигналы мы ограничились значениями  $a=0.5$ ,  $\varphi_0=0$ .

### Описание эксперимента

Цель нашего численного эксперимента состояла в том, чтобы доказать необходимость расчета параметров ионосферной модуляции радиоастрономических сигналов в различных условиях эксперимента и продемонстрировать потенциальные возможности предложенного нами способа вычисления ионосферного вклада в меру вращения и дисперсии как основы для компенсации этого вклада. Мы приводим анализ для станции GPS PUR3, расположенной вблизи радиотелескопа Arecibo, для спокойного дня 4 декабря 2004 г. (день 339, среднесуточные значения геомагнитных индексов  $K_p \sim 0$ ,  $A_p \sim 0$ ) и возмущенного дня 30 октября 2003 г. (день 303,  $K_p \sim 7$ ,  $A_p \sim 191$ ), когда произошла большая магнитная буря.

Даже для магнитоспокойного дня (рис. 2.) наблюдаются достаточно существенные градиенты ПЭС и высокие значения угла поворота плоскости поляризации. Стоит обратить внимание на то, что значения ме-

PUR3, day 339, 2004

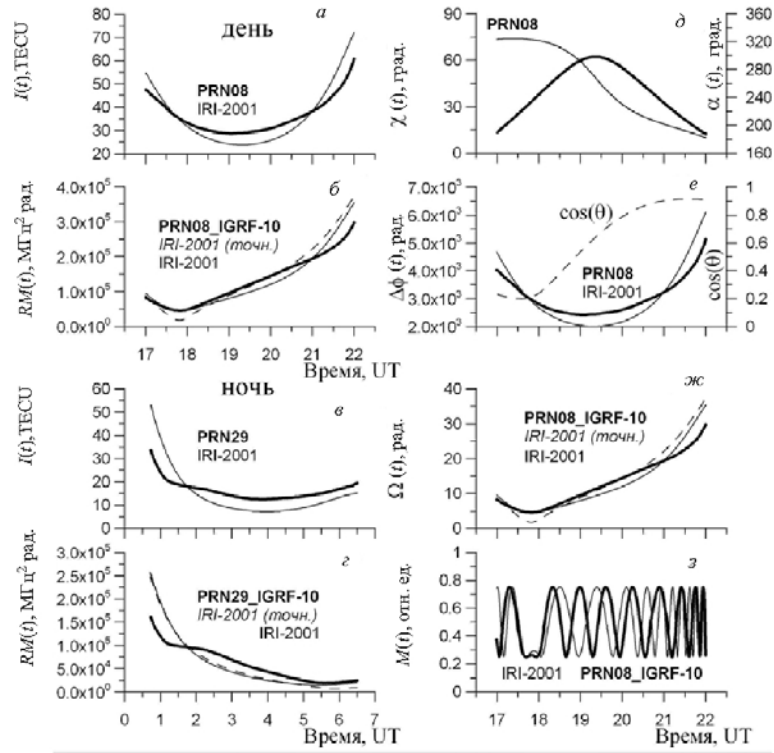


Рис. 2. Панели а, в – наклонные ПЭС  $I(t)$ , измеренное в магнитоспокойный день 4 декабря 2004 г. на GPS станции PUR3 (жирные кривые) и рассчитанное по модели IRI-2001 (тонкие кривые). Панели б, г – мера вращения  $RM(t)$ , рассчитанная по экспериментальным данным (жирные кривые) и модели IRI-2001 (тонкие кривые – приближенный расчет; пунктирные кривые – точный расчет). На панели е пунктиром нанесена зависимость  $\cos[\theta(t)]$ . Азимут  $\alpha(t)$  и угол места  $\chi(t)$  луча зрения от станции WSRT на ИСЗ PRN01 – панель д, тонкие и жирные кривые соответственно. Рассчитанные для частоты 100 МГц фазовое запаздывание  $\Delta\phi(t)$ , угол поворота плоскости поляризации  $\Omega(t)$  и модулирующая функция ФАМ  $M(t)$  – панели е, ж, з; обозначения те же, что на б, г. На панелях отмечены номера спутников GPS (PRN).

PUR3, day 303, 2003

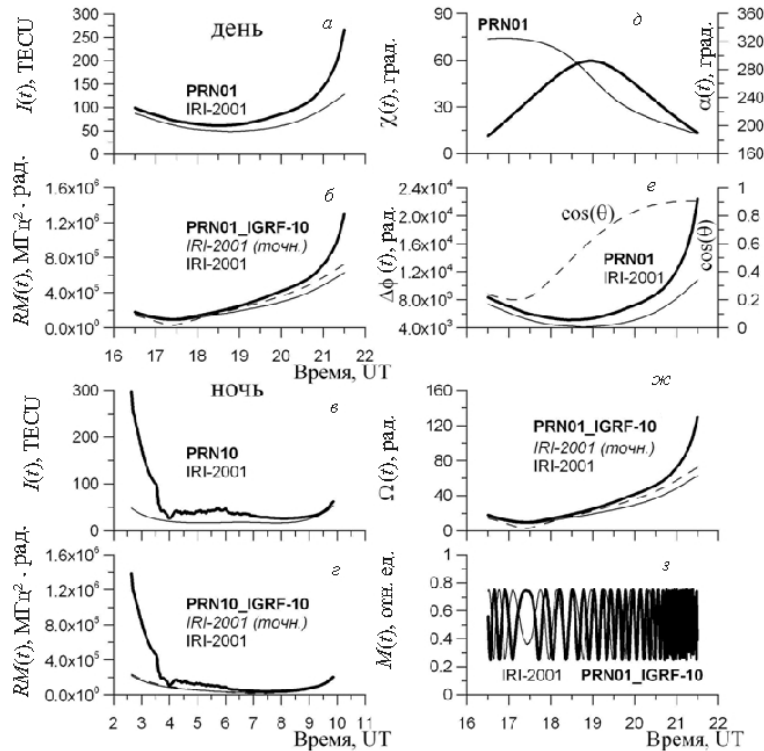


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для магнитной бури 30 октября 2003 г.

ры вращения и ПЭС, рассчитанные по «точным» и «приближенным» выражениям, достаточно близки как для дневного, так и ночного времени, несмотря на высокие значения абсолютных величин.

Момент времени 20:00 UT соответствовал дневному времени, значения вертикального ПЭС 30 октября 2003 достигали 150 TECU (TECU=1016 м<sup>2</sup>), а градиенты ПЭС в северо-западном направлении – 5–8 TECU/градус. Сначала луч пересекал области с низким значением ПЭС, по мере движения в южном направлении луч входил в область северного гребня экваториальной аномалии. Соответственно при понижении угла места  $\chi$  значение наклонного ПЭС увеличивается до величины 250 TECU (рис. 3, а). Геометрия зондирования такова, что при этом  $\cos[\theta(t)]$  (рис. 3, е, пунктир) начинает приближаться к 1.0, обеспечивая условие квазипродольного распространения.

Период ФАМ  $M(t)$  в интервале времени 21–22 UT оказался порядка 200–300 с (рис. 3, з). При таких значениях периода вариации амплитуды принимаемого сигнала могут быть ошибочно приняты за амплитудные мерцания, вызванные рассеянием на мелкомасштабных неоднородностях. Это может, в свою очередь, привести к неадекватному использованию методов компенсации мерцаний при наблюдениях пульсаров, а также к ошибкам оценки интенсивности и характерных размеров неоднородностей электронной концентрации при исследовании характеристик солнечного ветра и межзвездной среды [8].

### Заключение

Основным фактором влияния ионосферы на радиоастрономический сигнал в УКВ-диапазоне является дополнительный поворот плоскости поляризации, который необходимо учитывать при компенсации вклада ионосферы в интегральное значение этого параметра от радиостанции до телескопа. Кроме того, при использовании антенн линейной поляризации вариации поляризационного угла могут привести к значительной амплитудной модуляции. Это нельзя не учитывать при современных требованиях к характеристикам радиотелескопов.

Основная наша идея состоит в использовании сигналов навигационных спутников (GPS, GLON-

ASS, GALILEO) как тестового сигнала реперного источника, расположенного на минимальном угловом расстоянии от исследуемого радиостанции. Наш проект открывает путь к разработке методов и систем *адаптивной радиоастрономии*, адаптивной к неоднородной и нестационарной ионосфере – по аналогии с системами адаптивной оптики, которые предназначены для адаптации в реальном масштабе времени оптических телескопов к меняющимся условиям оптически неоднородной и нестационарной тропосферы.

Авторы выражают благодарность Г.Я. Смолькову, А.В. Медведеву, О.М. Ульянову за интерес к работе и плодотворные дискуссии, С.В. Воейкову и П.В. Татарину 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.O., Monstein C., Meyer H. CALLISTO – a new concept for solar radio spectrometers. *Sol. Phys.* 2005. V. 226. P. 143–151.
2. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.
3. Афраймович Е.Л. Cepstral analysis of broad-band radio emission. New possibilities in radio astronomy // *Astron. Astrophys.* 1981. V. 97. N 2. P. 366–372.
4. Афраймович Э.Л. Ионосферная фарадеевская модуляция интенсивности радиоастрономических сигналов // Доклады Академии Наук (принято к печати).
5. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J.. *Global Positioning System: Theory and Practice.* New York: Springer-Verlag Wien. 1992. 327 p.
6. IRI-2001.  
<ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/space/model/ionos/iri.html>
7. [http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/igrf\\_form.shtml](http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/igrf_form.shtml)
8. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. М.: Мир, 1980. 296 с.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*