

Секция 3 «Распространение радиоволн в условиях повышенной солнечной, циклонической и сейсмической активности»

**ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ ПРИ
РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ**

**IONOSPHERE INFLUENCE ON RADIOASTRONOMICAL SIGNALS
FOR DIFFERENT LEVELS OF GEOMAGNETIC ACTIVITY**

Э.Л. Афраймович, П.В. Татаринов, Ю.В. Ясюкевич

Институт солнечно-земной физики СО РАН

VHF signals are widely used for observations of the Sun and pulsars. Nowadays huge VHF radio astronomical arrays (LOFAR, 30-240 MHz; MIRA, 80-300 MHz) are being constructed to record pulsar radiation at maximum possible distance. Registration of VHF solar radio emission is very important along with other methods of monitoring of coronal mass ejections. At the interpretation of the data it is necessary to take into account the possible distortions of these signals at the Earth ionosphere. We have developed a method and software for calculation of the ionosphere measure of rotation (RM), and the measure of dispersion (DM). We used the ionosphere model IRI-2001, magnetic field model IGRF-10 and values of ionosphere total electron content as deduced from GPS measurements. The obtained values of the ionosphere DM and RM were recalculated into characteristics of phase delay, Faraday amplitude modulation and polarization changes.

1. Введение

Регистрация интенсивности УКВ радиоизлучения Солнца имеет большое научное и прикладное значение как эффективный метод мониторинга выбросов корональной массы [5]. 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 [6]. И в этом случае понижение частоты позволяет регистрировать излучение радио пульсаров на предельно больших расстояниях. Для этих исследований в Нидерландах разворачивается гигантская радиоастрономическая решетка LOFAR (30-240 МГц); аналогичная решетка MIRA (80-300 МГц) создается на западе Австралии.

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 ионосфере были описаны ранее в [7]. Однако 25 лет назад еще не было возможности провести точные расчеты для конкретных условий эксперимента, и полученные оценки были основаны на средних характеристиках ионосферы.

В настоящее время появились средства непрерывного и глобального мониторинга ионосферы по данным наземных средств (иозондов, радаров НР) и навигационных систем GPS, ГЛОНАСС [1]. Разработаны ионосферные модели типа IRI, NeQuick, PIM, позволяющие рассчитать модулирующую функцию ионосферы (МФИ) [9, 10]. Однако в отличие от современных систем навигации и радиолокации, в которых все более точное восстановление параметров ионосферы является встроенной функцией [1], в радиоастрономии это направление должного развития не получило. Это входит в противоречие с все возрастающими требованиями к точности анализа амплитудного профиля излучения, угловому и поляризационному разрешению радиотелескопов нового поколения. Целью данной работы является анализ влияния ионосферы на

радиоастрономические сигналы УКВ диапазона на основе использования современных возможностей GPS-зондирования ионосферы и ионосферного моделирования.

2. Расчет модулирующей функции ионосферы

При распространении сигнала в ионосфере фазовое запаздывание определяется величиной полного электронного содержания (ПЭС) вдоль направления распространения [4]

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

где f - частота сигнала, Гц; N_e - электронная концентрация (ЭК) в m^3 . Величина

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

Амплитудные искажения трансionoсферного сигнала вследствие фокусировки, весьма существенные в КВ диапазоне, пренебрежительно малы в УКВ диапазоне из-за обратной квадратичной зависимости от частоты.

Более значимы и хорошо исследованы амплитудные мерцания, обусловленные рассеянием на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях, расположенных на высотах максимума ионизации [1]. В УКВ диапазоне глубина амплитудных мерцаний в обычных условиях незначительна, а период мерцаний (1-30 сек) достаточно мал, что позволяет компенсировать влияние мерцаний радиоастрономических сигналов с помощью хорошо известных и достаточно простых способов обработки сигнала.

Однако в случае линейно или эллиптически поляризованного сигнала более значимым может оказаться амплитудный эффект, обусловленный вращением плоскости поляризации (эффектом Фарадея) [4]. В работе [2] дано определение такого вида модуляции как Фарадеевской Амплитудной Модуляции (ФАМ).

При квазипродольном распространении **угол поворота плоскости поляризации** определяется выражением

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

где B_0 - напряженность магнитного поля, Тл; q - угол между вектором магнитного поля и направлением распространения сигнала.

Величина $\int_s N B_0 \cos q ds$ имеет характер «меры вращения». Мера вращения RM в радиоастрономической литературе определяется различными способами (с точностью до коэффициента). В рамках данной работы мы определяем меру вращения как коэффициент при $1/f^2$ в (2).

$$RM = 2.365 \cdot 10^4 \int_s N B_0 \cos q ds \quad (3)$$

Для расчета меры вращения и поворота плоскости поляризации часто [4] используют приближенные формулы (при этом предполагается, что магнитное поле меняется достаточно слабо вдоль луча распространения сигнала, по крайней мере, в той области, где концентрация электронов существенна)

$$RM \approx 2.365 \cdot 10^4 \langle B_0 \cos q \rangle \int_s N ds \quad (4)$$

$$\Omega \approx 2.365 \cdot \frac{10^4}{f^2} \langle B_0 \cos q \rangle \int_s N ds = 2.365 \cdot \frac{10^4}{f^2} \langle B_0 \cos q \rangle \cdot DM$$

$\langle B_0 \cos q \rangle$ - среднее значение произведения $B_0 \cos q$ вдоль луча на источник, которое можно вычислить для фиксированного значения угла места на источник с использованием подходящей модели магнитного поля.

Для сигнала линейной (эллиптической) поляризации **изменение амплитуды сигнала** при приеме на антенну линейной поляризации определяется коэффициентом передачи $M(t)$ [7]

$$A(t) = M(t) \cdot R(t), \quad (5)$$

$$M(t) = \sqrt{1 + a^2 + 2a \cdot \cos[2\Omega(t) + j_0]}, \quad (6)$$

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); j_0 - начальная фаза.

Набор формул (1-6) позволяет рассчитать эффекты ионосферной модуляции фазы, поворота плоскости поляризации и фарадеевской амплитудной модуляции (ФАМ) [2] при известных значениях меры дисперсии DM и меры вращения RM . В настоящее время есть несколько вариантов расчета меры дисперсии DM и меры вращения RM , основанных на данных ионосферного GPS мониторинга и результатов моделирования с использованием ионосферных моделей и моделей магнитного поля Земли.

Один из вариантов расчета DM и RM заключается в использовании глобальных ионосферных карт (GIM) вертикального ПЭС, рассчитываемых на основе данных международной сети приемников GPS различными научными центрами [11]. Эти карты представлены в Интернет в формате IONEX [1]. Однако возникают значительные трудности в пересчете вертикального ПЭС в значения наклонного ПЭС вдоль луча зрения на источник при различных значениях угла места ϵ и азимута α направления на источник, особенно при низких углах места.

Мы предлагаем другой способ расчета, основанный на данных двухчастотных измерений фазового запаздывания сигналов GPS вдоль направления на ИСЗ GPS, представленных в Интернет в формате RINEX [1]. Методика восстановления наклонного ПЭС по данным двухчастотных приёмников GPS в достаточной степени разработана и описана в ряде источников [1]. Приведем лишь конечные формулы для вычисления ПЭС вдоль луча зрения из точки приёма на навигационный ИСЗ:

$$I = -\frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_1 - P_2) + nP + dP], \quad (7)$$

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 I_1 - L_2 I_2) + K + nL], \quad (8)$$

где f_1, f_2 - рабочие частоты СРНС; P_1, P_2 - дополнительные пути радиосигналов, обусловленные групповым запаздыванием в ионосфере, м; $L_1 I_1, L_2 I_2$ - дополнительные пути радиосигналов, обусловленные фазовым запаздыванием в ионосфере, м; L_1, L_2 - число набегов фазы на рабочих частотах СРНС; I_1, I_2 - длины волн, м; K - постоянная величина, определяемая неоднозначностью фазы; nP, nL - погрешности определения группового и фазового пути, dP - неизвестная постоянная величина, определяемая сдвигом часов на двух рабочих частотах GPS.

Исходными данными для вычисления ПЭС являются файлы в формате RINEX, в которых содержатся значения L_1, L_2, P_1, P_2 . Для восстановления ПЭС по формуле (8) в качестве первого приближения нами была использована простая методика грубого разрешения неоднозначности фазовых измерений по значениям P_1 и P_2 в предположении, что $dP = 0$. Постоянная неоднозначности K определялась для каждого непрерывного интервала наблюдения как

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_2 - P_1 - (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2))_i, \quad (9)$$

где i – номер текущего отсчёта значений L_1, L_2, P_1, P_2 ; N – количество отчётов в интервале наблюдения.

Выходными данными после первичной обработки являются значения азимута и угла места на ИСЗ GPS из пункта расположения приёмника и значения наклонного ПЭС, восстановленные по формулам (8, 9).

Поскольку величина dP неизвестна, для получения оценки абсолютного наклонного ПЭС необходимо привлечение дополнительных данных. Мы использовали значения вертикального ПЭС I_{GIM} , получаемые по картам GIM для ячеек GIM, ближайших к приемной станции GPS. Для расчета этой поправки фиксировались экспериментальные значения I_{max} и время UT_{max} , соответствующие максимальным значениям угла места g_{max} . Далее определялось значение I_{GIM} для момента времени UT_{max} , после чего оно пересчитывалось в величину наклонного ПЭС $I_{GIM_SLANT} = I_{GIM} / \sin c_{max}$. Соответствующая поправка к значению абсолютного наклонного ПЭС $\Delta I = I_{GIM_SLANT} - I_{max}$. Исправленные значения наклонного ПЭС использовались далее для проведения расчетов.

Для расчетов на основе моделирования необходимо использование таких ионосферных моделей, которые адекватно воспроизводят профиль электронной концентрации существенно выше максимума F2 слоя. Имеется несколько таких ионосферных моделей, в том числе широко используемая международная эмпирическая модель IRI-2001 [9] и модель NeQuick [10]. Модель IRI-2001 справедлива до высот порядка 2000 км, модель NeQuick - до высот порядка 20000 км. В новой версии IRI-2006, выход которой ожидается в ближайшее время, предполагается корректировка профиля электронной концентрации выше максимума F2 слоя [10], в том числе путем расчета профиля электронной концентрации до высот 20000 км на основе NeQuick.

Представленную в сети Интернет рабочую программу модели IRI-2001 [<ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models>] мы использовали прежде всего для расчетов меры дисперсии DM . Знание меры дисперсии DM позволяет вычислить угол поворота плоскости поляризации Ω по формуле (4) достаточно приближенно, поэтому вполне очевидно, что больший интерес представляет «точное» значение меры вращения RM и соответствующее ей значение угла Ω , вычисленные по формулам (3) и (2).

Приведенные ниже результаты расчетов относятся к частоте 100 МГц. Для любой другой выбранной частоты вид зависимостей остается прежним, меняются только масштабные множители $1/f$ (для фазы) и $1/f^2$ (для угла поворота). При расчетах (6) модулирующей функции ФАМ $M(t)$ необходимо задать глубину модуляции a и начальную фазу j_0 . В рамках качественного рассмотрения влияния ионосферы на радиоастрономические сигналы мы ограничились значением $a = 0.5$, характерным для эллиптической поляризации, и нулевым значением начальной фазы j_0 .

3. Результаты расчетов

Для того, чтобы продемонстрировать максимально ожидаемые искажения радиоастрономических сигналов в ионосфере, мы выбрали возмущенный день 30 октября 2003 г. (день 303, Кр~7, Ар~191), когда произошла большая магнитная буря [3].

На Рис.1а, 1в представлены вариации наклонного ПЭС $I(t)$ для дневного (а) и ночного (в) времени, вычисленные с использованием формул (7-9) по данным измерений фазового и группового запаздывания на GPS станции **PUR3**, расположенной вблизи радиотелескопа **Arecibo** в районе северного гребня экваториальной ионосферной аномалии (жирные кривые). Для соответствующих зависимостей углов места и азимута направления на ИСЗ PRN 01 (Рис.2а) по модели IRI-2001 рассчитаны модельные значения наклонного ПЭС (Рис.1а, тонкие кривые), а также мера вращения $RM(t)$, рассчитанная с использованием модели магнитного поля IGRF-10 (Рис.1б, 1г) по экспериментальным данным (жирные кривые) и ионосферной модели IRI-2001 (тонкие кривые – приближенный расчет, формула (4); пунктирные кривые – точный расчет, формула (3)).

Рассчитанные для частоты 100 МГц фазовое запаздывание $\Delta f(t)$, угол поворота плоскости поляризации $\Omega(t)$ и модулирующая функция ионосферы $M(t)$ представлены на Рис.2 б, в, г соответственно. Дополнительное фазовое запаздывание может изменяться по порядку величины от 10^3 рад. до 10^4 рад., а угол поворота плоскости поляризации - от десятков до нескольких сотен рад. При приеме сигнала на антенну линейной поляризации это приводит к заметной модуляции амплитуды сигнала с характерным периодом от часа до единиц минут. Этот эффект следует учесть при анализе вариаций амплитуды линейно поляризованного радиоизлучения пульсаров [6].

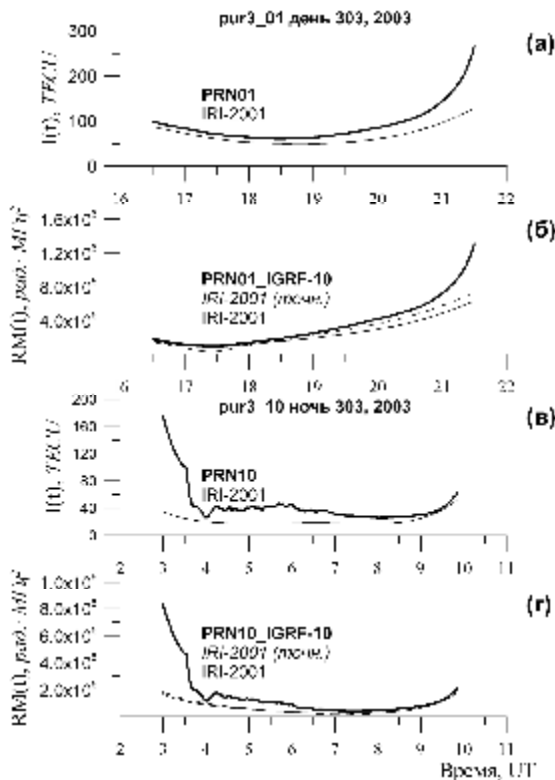


Рис.1 Наклонное ПЭС $I(t)$, измеренное на GPS станции PUR3 и рассчитанное по модели IRI-2001; мера вращения $RM(t)$, рассчитанная с использованием модели магнитного поля IGRF-10 по экспериментальным данным и ионосферной модели IRI-2001.

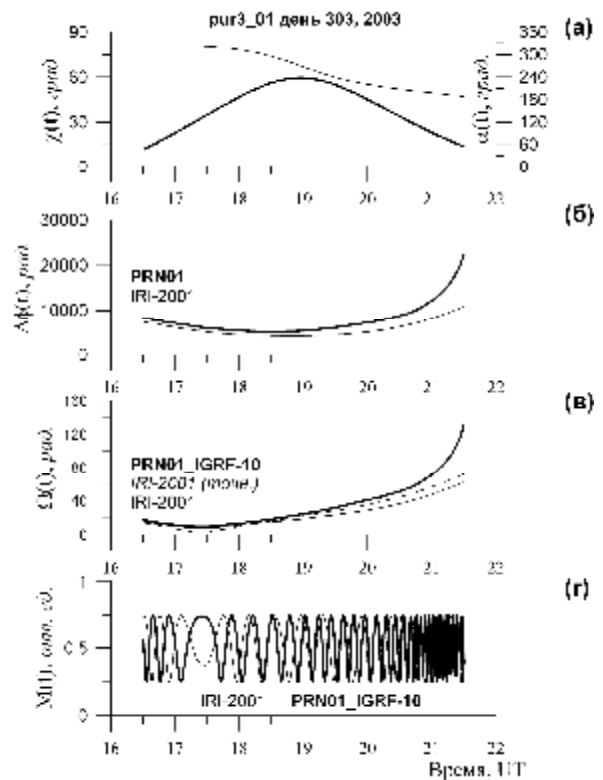


Рис.2. Азимут $\alpha(t)$ и угол места $\chi(t)$ луча зрения от станции PUR3 на ИСЗ PRN01 – а); Рассчитанные для частоты 100 МГц фазовое запаздывание $\Delta f(t)$, угол поворота плоскости поляризации $\Omega(t)$ и МФИМ $M(t)$ – панели б-г.

Такие сильные искажения вызваны тем, что во время главной фазы большой магнитной бури 30 октября значения вертикального ПЭС достигали 200 TECU, а градиенты ПЭС – до 5-8 TECU на градус широты (долготы). Азимут луча на PRN-01 в интервале времени 17-21 UT изменялся от северо-западного до юго-западного направления, где образовалось т.н. «горячее пятно» повышенной ионизации [8]. При этом значения наклонного ПЭС достигали очень большой величины до 400 TECU.

Следует отметить неплохое согласие между результатами как приближенных (4), так и точных расчетов (3) по данным эксперимента и модели IRI-2001. Расхождение между экспериментом и моделью увеличивается, когда пространственное распределение ионизации во время магнитной бури отличается от соответствующего невозмущенного распределения.

В КВ диапазоне эффекты ФАМ еще более существенны, чем в УКВ, тем более, что в этом диапазоне антенны линейной поляризации используются чаще, чем в УКВ, например, антенны типа УТР-2 [<http://www.ira.kharkov.ua/UTR2>].

Искажения радиоастрономических сигналов варьируются в широких пределах, определяемых географическим положением радиотелескопов, местным временем, уровнем геомагнитной активности и направлением на радиоисточник.

4. Заключение

Мы разработали метод и программное обеспечение для расчета меры вращения (RM) и меры дисперсии (DM) радиоастрономических сигналов в ионосфере. Мы использовали модель ионосферы IRI-2001, модель магнитного поля IGRF-10 и значения полного электронного содержания, полученные по данным сети двухчастотных приемников GPS. Значения DM и RM затем пересчитывались в величины фазовой задержки и поворота плоскости поляризации, а также функцию фарадеевской амплитудной модуляции. На примере магнитной бури 30 октября 2003 г. показано, что расчет модулирующей функции ионосферы для конкретных условий эксперимента в радиоастрономии является совершенно необходимым на современном этапе развития радиоастрономических систем.

Список литературы

1. Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. 2006. Институт солнечно-земной физики. – Иркутск : – 480 с.
2. Афраимович Э.Л. Ионосферная фарадеевская модуляция интенсивности радиоастрономических сигналов // Доклады Академии Наук (принято к печати).
3. Веселовский И. С. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космические исследования. 2004. Т. 42. № 5. С. 453-508.
4. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М. : Мир. 1973. – 502 с.
5. Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. – М. : Наука. 1964. – 560 с.
6. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. – М. : Мир. 1980. – 296 с.
7. Afraimovich E.L. Cepstral analysis of broad-band radio emission. New possibilities in radio astronomy // Astron. Astrophys. 1981. Т. 97, N2. P. 366-372.
8. Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Kosogorov E.A. Dynamics of total electron content distribution during strong geomagnetic storms // J. Adv. Space Res. 2007. doi:10.1016/j.asr.2007.03.006.
9. Bilitza D. International reference ionosphere // Rad. Sci. 2001. 36(2). 261-275.
10. Coisson P., Radicella S.M., Leitinger R., Nava B. New option for IRI topside electron density profile using NeQuick model // IRI NewsLetter 2005. 12 (1,2,3). 5-7.
11. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.M., Lindqwister U.J., Runge T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // Radio Sci. 1998. V. 33(3). P. 565-582.