

Адаптивная радиоастрономия – 1. Коррекция фазового запаздывания и поворота плоскости поляризации в ионосфере по данным GPS зондирования и ионосферного моделирования

Э. Л. Афраймович, Ю. В. Ясюкевич

*Институт солнечно-земной физики РАН СО,
а/я 291, г. Иркутск, 664033, Россия
E-mail: afra@iszf.irk.ru*

Статья поступила в редакцию 18 июля 2007 г.

Для того чтобы правильно интерпретировать радиоастрономические данные, необходимо учитывать возможные искажения сигналов в ионосфере. Мы разработали метод и программное обеспечение для расчета ионосферного вклада в меру вращения RM и меру дисперсии DM . Мы использовали модель ионосферы IRI-2001, модель магнитного поля IGRF-10 и значения полного электронного содержания, полученные по данным сети двухчастотных приемников GPS. По значениям DM и RM затем вычислялись величины фазовой задержки, поворота плоскости поляризации и значения функции амплитудной модуляции. Мы выполнили расчеты для различных уровней геомагнитной активности, а также для различных углов прихода радиоизлучения.

Основная наша идея состоит в использовании сигналов навигационных спутников (GPS, GLONASS, GALILEO) как тестового сигнала “реперного” источника, расположенного на минимальном угловом расстоянии от исследуемого радиоисточника. Наш проект открывает путь к разработке методов и систем адаптивной радиоастрономии, адаптивной к неоднородной и нестационарной ионосфере, по аналогии с известными системами адаптивной оптики, которые предназначены для адаптации оптических телескопов к меняющимся условиям оптически неоднородной и нестационарной тропосферы.

1. Введение

Регистрация интенсивности УКВ радиоизлучения Солнца имеет большое научное и прикладное значение как эффективный метод мониторинга выбросов корональной массы [1]. Для непрерывного мониторинга этих процессов создана широкая сеть УКВ станций (ARTEMIS-IV [2], TRST [3], Nancaу [4], глобальная сеть RSTN [5]). Для того чтобы обеспечить круглосуточный (по UT) мониторинг, дополнительно развертывается сеть из 6 солнечных радиоспектрографов CALLISTO [6]. 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, возникающий 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, [7]), NANCAУ (от 150 МГц, [4]), УТР-2 (25 МГц, [8]) и т. д. Кроме того, в Нидерландах развертывается гигантская низкочастотная радиоастрономическая решетка LOFAR (30 ÷ 240 МГц, [9]), состоящая из 25000 индивидуальных приемных диполей, распределенных на площади радиусом 170 км. Аналогичная решетка из 8000 диполей MIRA (80 ÷ 300 МГц, [10]) создается на западе Австралии.

С другой стороны, все более тонкие детали профиля интенсивности и спектра излучения связывают с физическими процессами в наблюдаемых объектах. При этом должным образом не учитываются искажения радиосигнала в ионосфере Земли, которые возрастают при уменьшении частоты, особенно вблизи критической частоты максимума электронной концентрации ($5 \div 15$ МГц). Во многом это связано с тем, что величина ионосферных эффектов обратно пропорциональна квадрату частоты [11-13]. 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 [14]. 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 (иозондов, радаров HP), навигационных систем GPS, GLONASS (в ближайшие годы GALILEO) [15-17], двухчастотных спутниковых высотомеров (TOPEX, Jason-1, [18]). Эти данные широко используются не только для изучения ионосферы, но и непосредственно для тестирования фазовых искажений в трансionoсферном канале систем навигации и радиопеленгации [19]. Разработаны ионосферные модели типа IRI, NeQuick, PIM, позволяющие рассчитать передаточную характеристику ионосферы.

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 поляризационному разрешению радиотелескопов нового поколения.

Целью настоящей работы является анализ влияния ионосферы на радиоастрономические сигналы УКВ диапазона на основе использования современных возможностей GPS-зондирования ионосферы и ионосферного моделирования [20], а также краткое изложение разработанной нами концепции адаптивной (к ионосфере) радиоастрономии. Эта статья является первой работой цикла “Адаптивная радиоастрономия”, в последующем планируется рассмотрение методов коррекции ионосферной модуляции спектра радиоизлучения, компенсации фазового запаздывания в разнесенных системах типа расширенного варианта LOFAR и VLBI и т. д.

2. Расчет передаточной характеристики ионосферы

При распространении сигнала в ионосфере фазовое запаздывание определяется величиной полного электронного содержания (ПЭС) вдоль направления распространения [11-13]

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

где N_e – электронная концентрация, m^{-3} ; f – частота сигнала, Гц. Здесь и далее мы, как правило, используем систему единиц СИ (использование других систем единиц оговаривается отдельно). 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. В литературе по физике ионосферы меру дисперсии DM измеряют в единицах ПЭС TECU (total electron content units), равного 10^{16} электронов на m^2 , в радиоастрономической литературе

наиболее часто используют единицы пк/см³ (1 пк/см³ = 3.085678 · 10²² м⁻² = 3.085678 · 10⁶ ТЕСУ).

Амплитудные искажения трансионосферного сигнала вследствие фокусировки, весьма существенные в КВ диапазоне [21], пренебрежительно малы в УКВ диапазоне из-за обратной квадратичной зависимости от частоты [11-13].

Более значимы и хорошо исследованы амплитудные мерцания, обусловленные рассеянием на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях, расположенных на высотах максимума ионизации [22]. 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 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) [11-13]. В работах [23, 24] дано определение такого вида модуляции как фарадеевской амплитудной модуляции (ФАМ).

При квазипродольном распространении угол поворота плоскости поляризации определяется выражением [11-13]

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

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

Условие квазипродольного распространения (значение $\cos \theta \approx 1.0$) выполняется для радиотелескопов, расположенных на средних и экваториальных широтах, практически для всех направлений на источники. Однако при некоторых направлениях это условие нарушается, что может привести к искажению результатов анализа. Для контроля мы выполняем расчет текущего значения $\cos \theta(t)$ (см. ниже).

Величина $\int_s N_e B_0 \cos \theta ds$ имеет характер “меры вращения”. Мера вращения RM в радиоастрономической литературе определяется

различными способами (с точностью до коэффициента). Например, при исследовании пульсаров меру вращения определяют как коэффициент при множителе λ^2 [25; <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>]. В рамках настоящей работы мы определяем меру вращения как коэффициент при $1/f^2$ в (2):

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

Соотношение, связывающее эти два способа измерения меры вращения, имеет вид $\frac{RM_f}{RM_\lambda} = c^2$ (где RM_f , RM_λ – значения меры дисперсии, определяемые как коэффициент при $1/f^2$ и λ^2 соответственно; c – скорость света в вакууме).

Для расчета меры вращения и поворота плоскости поляризации часто используют [13] 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):

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

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

Здесь $\langle B_0 \cos \theta \rangle$ – 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 поверхностью 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 $M(t)$ [14]:

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

$$M(t) = \sqrt{1 + a^2 + 2a \cdot \cos[2\Omega(t) + \varphi_0]}, \quad (6)$$

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

Набор формул (1)–(6) позволяет рассчитать эффекты ионосферной модуляции фазы, поворота плоскости поляризации и ФАМ [23] при известных значениях меры дисперсии DM и меры вращения RM . В настоящее время есть несколько вариантов расчета DM и RM , основанных на данных ионосферного GPS мониторинга и результатов моделирования с использованием ионосферных моделей и моделей магнитного поля Земли.

3. Расчет меры дисперсии по данным двухчастотных фазовых измерений сигналов GPS

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 IGS [26]. Эти карты представлены в Интернете в формате IONEX [27]. Однако возникают значительные трудности в пересчете вертикального ПЭС в значения наклонного ПЭС вдоль луча зрения на источник при различных значениях угла места χ и азимута α направления на источник, особенно при малых значениях угла места. Это обстоятельство обусловлено существенным отличием пространственного распределения ионизации от сферически однородного на средних и экваториальных широтах во время прохождения солнечного терминатора, и особенно при геомагнитных возмущениях. Кроме того, представленные для свободного использования карты GIM имеют низкое пространственное (2.5° по широте и 5° по долготе) и временное (2 ч) разрешение,

так что отмеченное выше ограничение весьма существенно.

Тем не менее в последнее время появились региональные карты ПЭС, обладающие более высоким пространственным разрешением: северо-американская карта US TEC (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO/USTEC/home.html>), временное разрешение 15 мин, пространственное – 1° по широте и долготе; европейская карта (http://ionosphere.rcru.rl.ac.uk/cgi-bin/SWWpagedis.pl?page=TEC/TEC_index&sel=2), временное разрешение 10 мин, пространственное – 1° ; южно-американская карта LPIM (<http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar/products/iono/grids/>), временное разрешение 1 ч, пространственное – 1° ; японская карта (http://wdc.nict.go.jp/IONO/contents/E011_TECmap.html), пространственное разрешение 0.5° , временное – 5 и 15 мин и т. д. Таким образом, по мере использования сигналов других навигационных систем (GLONASS, GALILEO), расширения глобальной и региональных сетей навигационных приемников разрешение карт ПЭС в ближайшее время станет вполне приемлемым для расчетов параметров модуляции транс-ионосферных сигналов.

Мы предлагаем другой способ расчета, основанный на данных двухчастотных измерений фазового запаздывания сигналов GPS вдоль направления на ИСЗ GPS, представленных в Интернете в формате RINEX [28]. Методика восстановления наклонного ПЭС по данным двухчастотных приемников GPS в достаточной степени разработана и описана в ряде источников [15, 16, 19]. Приведем лишь конечные формулы для вычисления ПЭС вдоль луча зрения из точки приема на навигационный ИСЗ:

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

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + nL], \quad (8)$$

где f_1, f_2 – рабочие частоты спутниковой радионавигационной системы (СРНС); P_1, P_2 – дополнительные пути радиосигналов, обусловленные групповым запаздыванием в ионосфере, м; $L_1\lambda_1, L_2\lambda_2$ – дополнительные пути радиосигналов, обусловленные фазовым запаздыванием в ионосфере, м; L_1, L_2 – число полных оборотов фазы на рабочих частотах СРНС; λ_1, λ_2 – длины волн, м; K – неизвестная постоянная составляющая фазового пути, м; nP, nL – погрешности определения группового и фазового пути; δP – неизвестная постоянная величина, определяемая сдвигом часов на двух рабочих частотах GPS.

Существует множество алгоритмов восстановления абсолютного значения наклонного ПЭС, некоторые из них используются лабораториями, создающими глобальные и региональные карты вертикального ПЭС. В настоящей работе для восстановления ПЭС по формуле (8) в качестве первого приближения нами была использована простая методика грубого разрешения неоднозначности фазовых измерений.

Выходными данными после первичной обработки являются значения азимута и угла места на ИСЗ GPS из пункта расположения приемника и значения наклонного ПЭС, восстановленные по формулам (7), (8).

Поскольку величина K не известна, для оценки абсолютного наклонного ПЭС необходимо привлечение дополнительных данных. Мы использовали значения вертикального ПЭС I_{GIM} , получаемые 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 χ_{max} на ИСЗ GPS. Далее определялось значение I_{GIM} для момента времени UT_{max} , после чего оно пересчитывалось в величину наклонного ПЭС $I_{GIM_SLANT} = I_{GIM} / \sin \chi_{max}$. Соответствующая поправка к значению абсолютного наклонного ПЭС $\Delta I = I_{GIM_SLANT} - I_{max}$. Исправленные значения наклонного ПЭС использовались далее для проведения расчетов.

Таким образом, основная наша идея состоит в использовании сигналов навигационных спутников (GPS, GLONASS, GALILEO) как тестового сигнала “реперного” источника, располо-

женного 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.

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.

Каковы ограничения такого способа при наблюдении радиоизлучения Солнца или дискретных источников типа пульсаров? Прежде всего, геометрия перемещения такого искусственного радиоисточника, как ИСЗ GPS, существенно отличается от соответствующей зависимости для космических радиоисточников. Угловая скорость перемещения ИСЗ GPS может оказаться в ряде случаев заметно больше соответствующих значений для радиоисточников.

Определенные ограничения на возможности такого способа GPS-зондирования ионосферы накладывает геометрия спутникового созвездия GPS, обусловленная выбранным наклонением орбиты в 55° (56° для GALILEO). На рис. 1 представлено суточное распределение координат подионосферных точек для углов места на ИСЗ GPS, превышающих 30° , в экваториальных, средних, авроральных широтах. Координаты подионосферных точек (проекции на земную поверхность точек пересечения луча “приемник – ИСЗ” и сферического слоя на выбранной высоте) рассчитаны в топоцентрической декартовой системе координат, центр которой ($X = 0; Y = 0$) совпадает с приемником GPS. Как видно из рисунка, наиболее равномерное распределение подионосферных точек реализуется для экваториальных широт. Чем дальше от экватора, тем более расширяется обращенная к полюсу область ионосферы, через которую не проходят трассы “приемник – ИСЗ”. Однако это ограничение не принципиально для большинства радиотелескопов, расположенных на средних и экваториальных широтах, тем более при наблюдениях радиоизлучения Солнца. Кроме

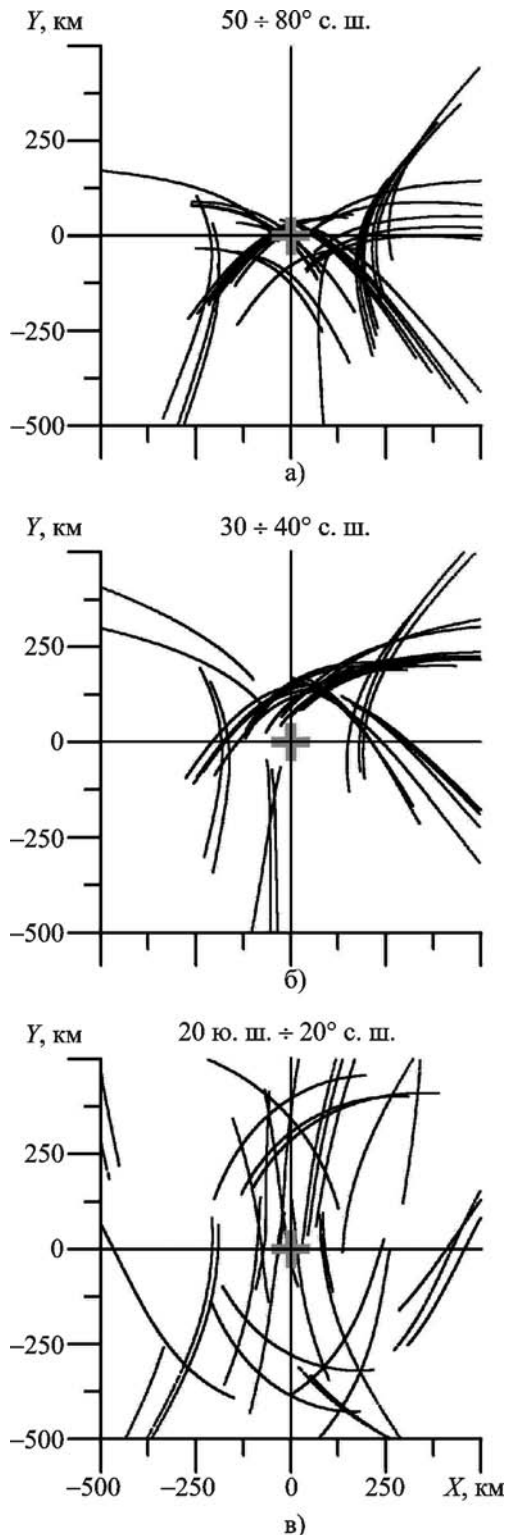


Рис. 1. Суточное распределение координат подионосферных точек ИСЗ GPS для авроральных (а), средних (б) и экваториальных (в) широт для тонкого сферического слоя на высоте 300 км. По осям X и Y нанесено отклонение на восток и север соответственно

того, для российской системы GLONASS более высокое значение наклона орбиты, 66° , расширяет сферу применения предложенного метода.

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

4. Расчет меры дисперсии и меры вращения с использованием ионосферной модели

Для наших расчетов необходимо использовать ионосферные модели, которые адекватно воспроизводят, по крайней мере для средних и экваториальных широт, профиль электронной концентрации на высотах существенно выше максимума F2 слоя. Сейчас имеется несколько таких ионосферных моделей, в том числе хорошо известная и широко используемая международная эмпирическая модель IRI-2001 [29-31] и модель NeQuick [32-34]. Обе модели рекомендованы International Telecommunication Union, Radiocommunication sector ITU-R [35] для использования при расчете трансionoносферного радиоканала спутниковых систем.

Модель IRI-2001 справедлива до высот порядка 2000 км, модель NeQuick– до высот порядка 20000 км. В последнее время ведутся интенсивные исследования точности указанных моделей в области выше максимума F2 слоя, в основном с использованием данных спутниковых измерений [36]. Многие исследователи отмечают существенное завышение плотности электронной концентрации моделью IRI-2001 на высотах выше максимума F2 слоя, особенно для высоких широт [37-40]. Тем не менее мы использовали эту модель как наиболее доступную и проверенную в эксперименте.

В новой версии IRI-2007, которая опубликована совсем недавно, была сделана корректировка профиля электронной концентрации на высотах выше максимума F2 слоя [41], в том числе путем расчета профиля электронной концентрации до высот 20000 км на основе NeQuick [32-34]. В будущем приведенные ниже расчеты необходимо будет уточнить с использованием модели нового поколения. Однако основные выводы нашей работы останутся справедливыми и для усовершенствованной модели. Главная причина, по которой мы решили ограничиться оценками на основе IRI-2001, заключается в том, что IRI-2001 является апробированной и проверенной моделью, существует множество работ, в которых проводится сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов IRI-2001, чего пока нельзя сказать о IRI-2007.

Представленную в сети Интернет рабочую программу модели IRI-2001 [42] 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 (2) и (3). Для расчетов меры вращения RM мы использовали также модель магнитного поля Земли IGRF-10 [43].

Приведенные ниже результаты вычислений 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 модулирующей функции ФАМ $M(t)$ (6) необходимо задать глубину модуляции a и начальную фазу φ_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 φ_0 .

Известно, что при малых углах места χ искажения сигналов радиоисточников в тропосфере становятся сравнимы с ионосферными. Кроме того, становятся некорректными рас-

четы с использованием модели IRI-2001. Поэтому мы проводим наш анализ для углов места χ , превышающих 10° .

5. Общее 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.

В качестве первого шага мы выбрали для анализа данные станций GPS, расположенных в различных регионах земного шара вблизи радиотелескопов LOFAR, Нидерланды [9] – станция WSRT; MIRA, Австралия [10] – YAR2; Arecibo, Пуэрто-Рико [44] – PUR3. Геометрия эксперимента представлена на рис. 2. Зачерненными треугольниками и подписями отмечено расположение радиотелескопов и ближайших к ним наземных станций GPS (см. таблицу).

Для того чтобы оценить пределы искажений радиоастрономических сигналов в ионосфере, нам необходимо провести анализ данных GPS для магнитоспокойных и возмущенных условий, для дневного и ночного времени, при различных направлениях на ИСЗ. Мы выбрали спокойный день 4 декабря 2004 г. (день 339, среднесуточные значения геомагнитных индексов $Kp \sim 0$, $Ap \sim 0$) и возмущен-

Таблица. Координаты радиотелескопов и ближайших к ним приемных станций GPS

Станция	f , МГц	Широта, °	Долгота, °
GPS-WSRT	1227/1575	52.915	6.605
RT LOFAR	30 ÷ 240	53	6
GPS-YAR2	1227/1575	-29.047	115.347
RT MIRA	80 ÷ 300	-27	116
GPS-PUR3	1227/1575	18.463	-67.067
RT Arecibo	300 ÷ 10000	18.33	-66.75

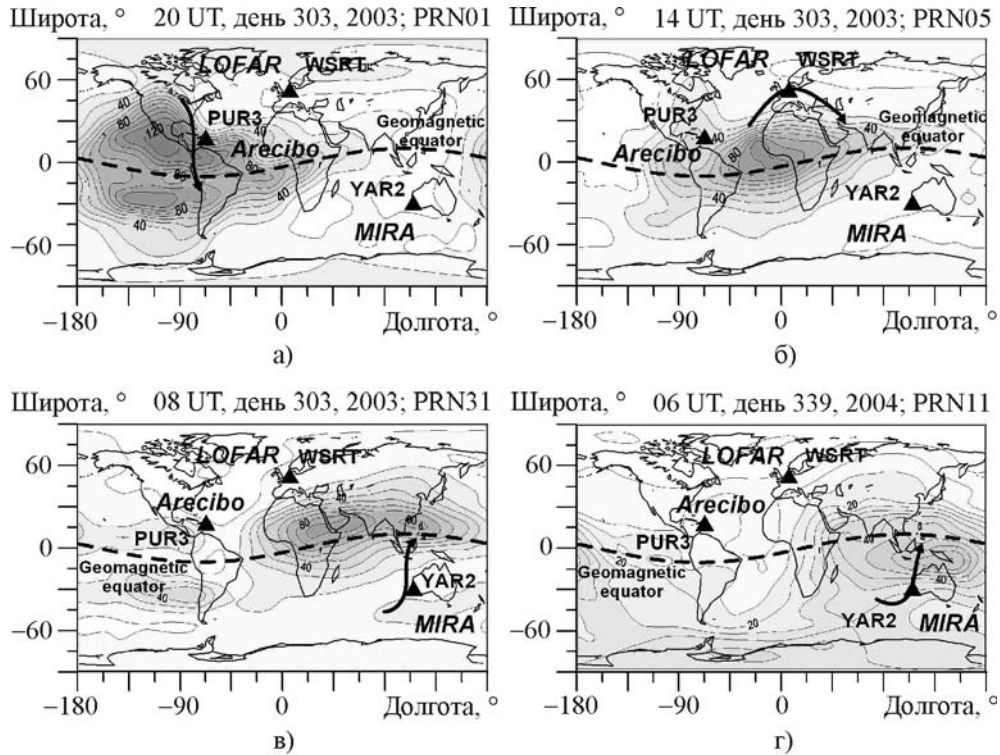


Рис. 2. Глобальное распределение вертикального ПЭС, полученное по IONEX данным JPLG, для различных условий эксперимента: во время магнитной бури 30 октября 2003 г. в 20:00 UT (а), в 14:00 UT (б), в 8:00 UT (в); для спокойного дня 4 декабря 2004 г. в 6:00 UT (г). Изолинии ПЭС нанесены в единицах TECU. В заголовке панелей указано время UT, номер дня года, год и номер спутника GPS. Стрелками отмечены траектории подионосферных точек на высоте 2000 км, соответствующие зависимости азимута и угла места в соответствующий день для спутников PRN01, PRN05, PRN31 и PRN11. Зачерненными треугольниками и подписями отмечено расположение радиотелескопов и ближайших к ним наземных станций GPS. Пунктирной кривой показан геомагнитный экватор

ный день 30 октября 2003 г. (день 303, $K_p \sim 7$, $A_p \sim 191$), когда произошла большая магнитная буря, исследованию которой посвящено множество публикаций [45].

На карту рис. 2, а нанесено пространственное распределение вертикального ПЭС 30 октября 2003 г., построенное по IONEX картам JPLG для 20:00 UT. Это время соответствовало максимальной фазе бури, когда наблюдалось наиболее кардинальное перераспределение ионизации по всему земному шару, сопровождающееся возникновением областей повышенной ионизации и резких градиентов ПЭС. В районе радиотелескопа Arecibo момент времени 20:00 UT соответствовал дневному времени, значения верти-

кального ПЭС достигали величины 180 TECU, а градиенты ПЭС в северо-западном направлении – до $5 \div 8$ TECU/°. В то же время в северо-восточном и юго-восточном направлениях значения ПЭС были уже существенно ниже, всего до $20 \div 40$ TECU, а градиенты ПЭС не превышали 0.5 TECU/°. Поскольку в Европе и в Австралии в это время наступила ночь, значения ПЭС не превышали 20 TECU, а градиенты были меньше 0.5 TECU/°. Однако и для этих регионов значения ПЭС и градиентов ПЭС в разных направлениях от станции различались весьма существенно.

Ниже будет показано, что именно эти отличия определяют разнообразие временных зависимостей относительного фазового за-

паздывания, поворота плоскости поляризации и ФАМ.

Результаты расчетов рассмотрим последовательно для регионов радиотелескопов LOFAR (WSRT), MIRA (YAR2), и Arecibo (PUR3).

6. Результаты анализа

На рис. 3 представлена динамика наклонного ПЭС $I(t)$ для дневного (а) и ночного (в) времени, вычисленные с использованием формул (7), (8) по данным измерений фазового

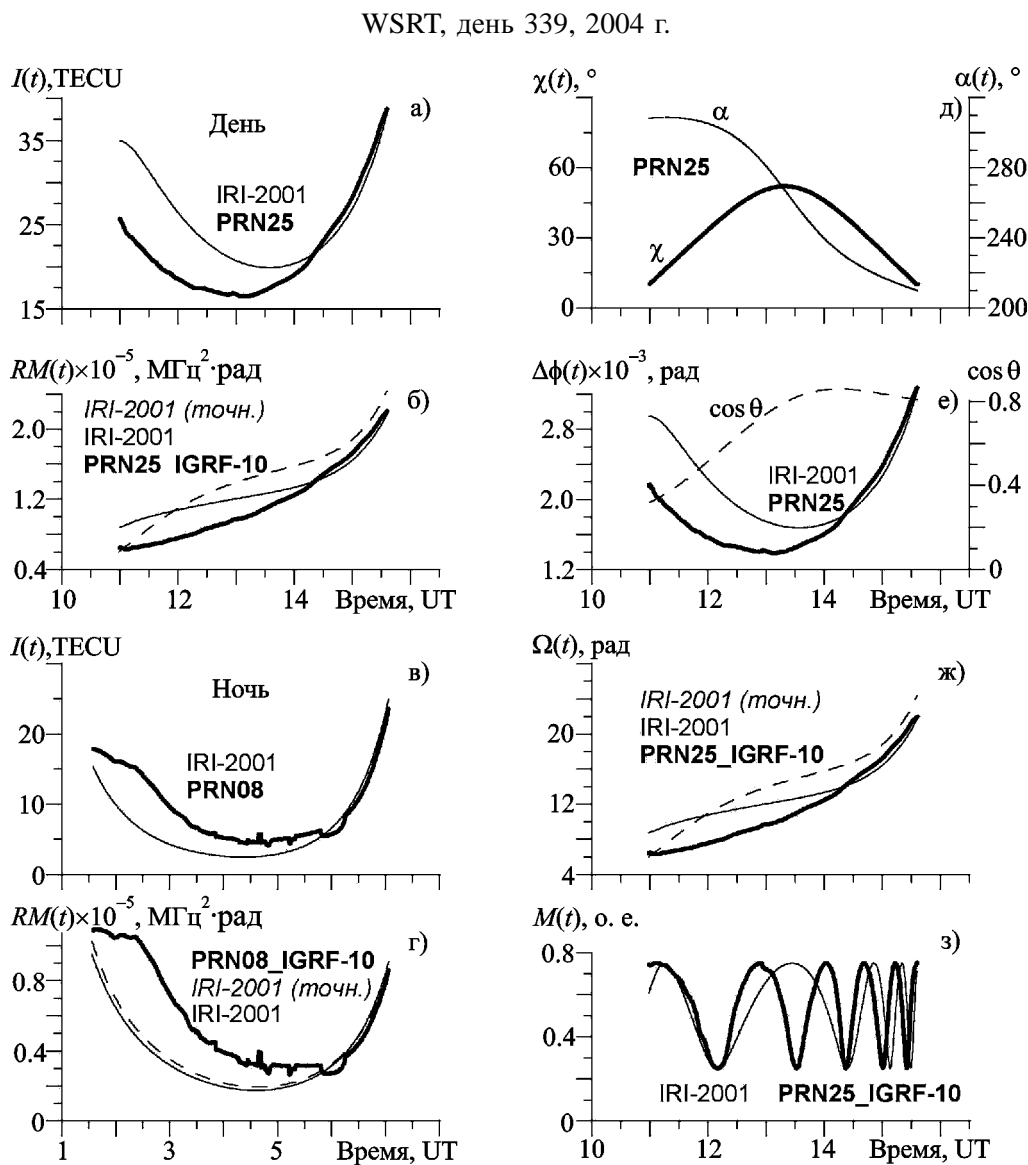


Рис. 3. Передаточные характеристики ионосферы в районе радиотелескопа LOFAR для магнитоспокойного дня 4 декабря 2004 г.: а), в) – наклонное ПЭС $I(t)$ (жирные кривые – данные GPS станции WSRT, тонкие кривые – модель IRI-2001); б), г) – мера вращения $RM(t)$ (жирные кривые – экспериментальные данные, тонкие кривые – приближенный расчет IRI-2001, пунктирные кривые – точный расчет IRI-2001); д) – азимут $\alpha(t)$ и угол места $\chi(t)$ луча зрения от станции WSRT на ИСЗ PRN25 (тонкая и жирная линии соответственно); е), ж), з) – рассчитанные для частоты 100 МГц фазовое запаздывание $\Delta\phi(t)$, угол поворота плоскости поляризации $\Omega(t)$ и модулирующая функция ФАМ $M(t)$ соответственно (обозначения те же, что на панелях б) и г), пунктирная кривая на панели е) – зависимость $\cos\theta(t)$). На панелях отмечены номера спутников GPS (PRN)

и группового запаздывания на GPS станции WSRT для магнитоспокойного дня 4 декабря 2004 г. (жирные кривые). Соответствующие зависимости углов места и азимута направления на ИСЗ с номером PRN25 показаны на рис. 3, д (жирная и тонкая кривые). Для этих же зависимостей рассчитаны значения наклонного ПЭС по модели IRI-2001 (рис. 3, а, в, тонкие кривые), а также мера вращения $RM(t)$, полученная с использованием модели магнитного поля IGRF-10 (рис. 3, б, з) по экспериментальным данным (жирные кривые) и ионосферной модели IRI-2001 (тонкие кривые – приближенный расчет, формула (4); пунктирные кривые – точный расчет, формула (3)). На панелях отмечены номера спутников GPS (PRN25 и PRN08).

Минимальные значения наклонного ПЭС соответствуют максимальным значениям угла места χ . Дневные значения ПЭС при больших углах χ более чем в два раза превышают ночные. При малых χ значения наклонного ПЭС могут достигать $30 \div 40$ TECU в дневное время и $20 \div 25$ 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 (рис. 3, е – пунктир) позволяет проконтролировать, на каком интервале времени пролета ИСЗ GPS условие квазипродольного распространения выполнялось строго.

Рассчитанные по данным PRN25 для частоты 100 МГц фазовое запаздывание $\Delta\phi(t)$, угол поворота плоскости поляризации $\Omega(t)$ и модулирующая функция $M(t)$ представлены на рис. 3, е, ж, з соответственно, (жирные кривые – эксперимент, тонкие кривые – приближенный расчет, пунктирные – точный расчет).

Как видно из рис. 3, е, дополнительное фазовое запаздывание в ионосфере может изменяться в пределах 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 радиоастроно-

мической решетки) фазовое запаздывание будет значительно различаться. Это может приводить к ошибкам в радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой (VLBI).

Угол поворота плоскости поляризации (рис. 3, ж) меняется от единиц до десятков радиан, что при приеме сигнала на антенну линейной поляризации приводит к заметной модуляции амплитуды сигнала с характерным периодом от 90 до 30 мин (рис. 3, з).

Несмотря на то что во время магнитной бури 30 октября 2003 г. станция WSRT находилась достаточно близко от сильно возмущенной экваториальной аномалии (рис. 2, б), из-за того что луч проходит в стороне от ее гребня, экспериментальные зависимости ПЭС и меры вращения RM (рис. 4) отличаются незначительно от магнитоспокойного дня (рис. 3). Однако для дневного времени при больших углах χ значения ПЭС и всех остальных параметров модуляции превышали соответствующие величины для ночного времени почти в 2 раза.

Для станции YAR2 (рис. 5, б), расположенной вблизи радиотелескопа MIRA, нами был получен на первый взгляд достаточно странный результат: в магнитоспокойный день значения ПЭС (рис. 5, а) оказываются выше, чем в возмущенный (рис. 6, а). Экспериментальные значения ПЭС при аналогичных углах места отличаются почти в два раза. Минимальное значение периода ФАМ 4 декабря 2004 г. достигает 8 мин, а во время магнитной бури 30 ноября 2003 г. минимальный период модуляции даже при малых углах места χ не достигает 20 мин. Это обусловлено в первую очередь не столько расположением телескопа (MIRA) вблизи станции YAR2, сколько особенностями траектории движения луча по отношению к гребню экваториальной аномалии (рис. 2, з). Луч на выбранный нами спутник PRN11 4 декабря 2004 г. погружается в северный гребень экваториальной аномалии. Высокие градиенты ПЭС на гребне аномалии приводят к сильной модуляции, период которой уменьшается до 8 мин. В возмущенный день в рассматриваемый нами момент времени главная фаза магнитной бури еще не наступила и наблюдается обратная ситуация: луч

WSRT, день 303, 2003 г.

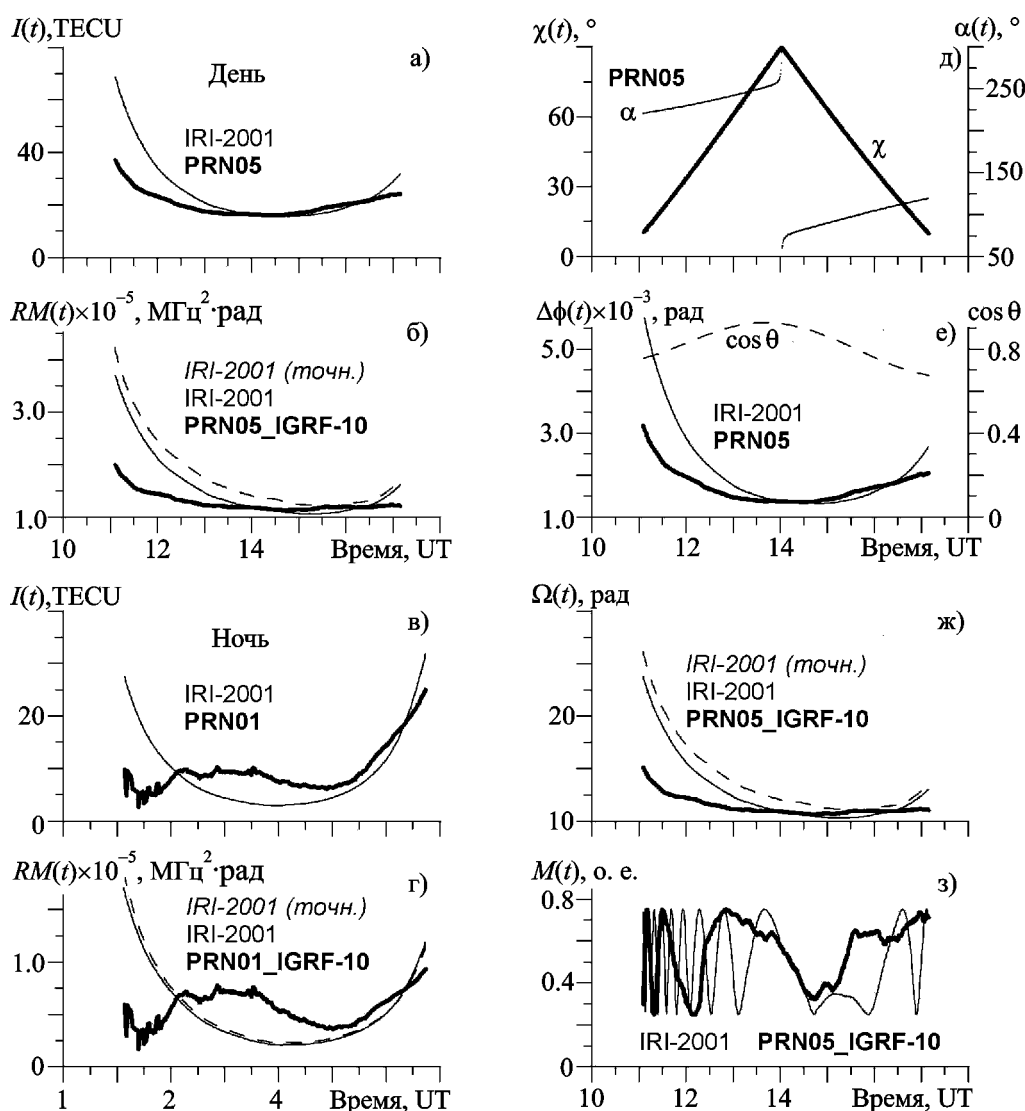


Рис. 4. Передаточные характеристики ионосферы в районе радиотелескопа LOFAR для магнитной бури 30 октября 2003 г.

не достигает гребня аномалии, проходя через более спокойную часть ионосферы (рис. 2, в).

Кардинально отличаются результаты расчетов для станции PUR3, находящейся вблизи радиотелескопа Агесибо в районе северного гребня экваториальной ионосферной аномалии. Даже для магнитоспокойного дня (рис. 7) наблюдаются достаточно существенные градиенты ПЭС и высокие значения угла поворота плоскости поляризации. Стоит обратить вни-

мание на то, что значения меры вращения и ПЭС, рассчитанные по “точным” (2), (3) и “приближенным” (4) выражениям, достаточно близки как для дневного, так и ночного времени, несмотря на достаточно высокие значения абсолютных величин. Исключение, пожалуй, составляют лишь те моменты времени, когда нарушается условие квазипродольного распространения (рис. 7, е), но в этом случае расчеты (4) не совсем корректны.

YAR2, день 339, 2004 г.

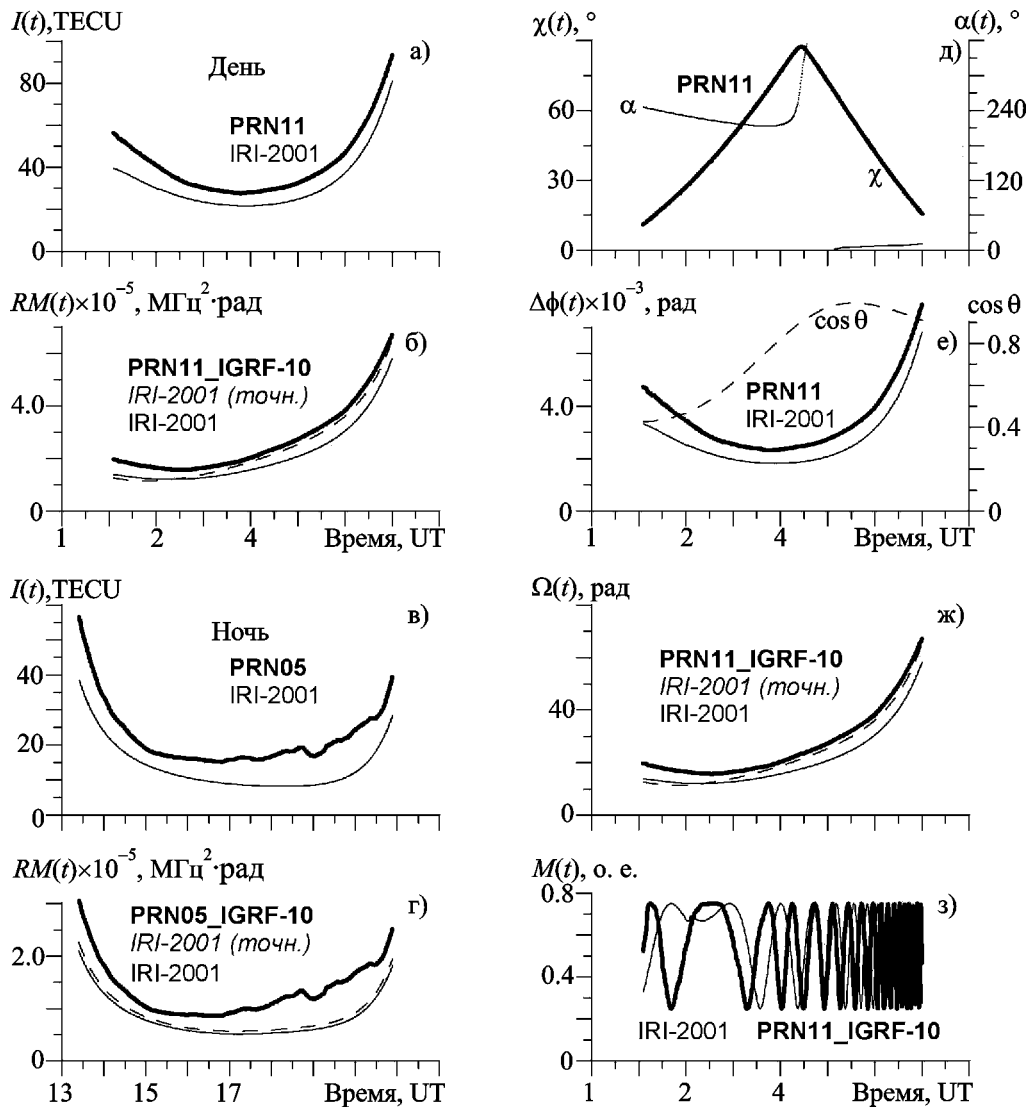


Рис. 5. Передаточные характеристики ионосферы в районе радиотелескопа MIRA для магнитоспокойного дня 4 декабря 2004 г.

Как уже отмечалось выше (пункт 5), во время главной фазы большой магнитной бури 30 октября 2003 г. в районе 22:00 UT значения вертикального ПЭС достигали 180 TECU, а градиенты ПЭС в северо-западном направлении – $5 \div 8 \text{ TECU}/^\circ$ (рис. 2, а). Направление луча на PRN-01 в интервале времени 17 ÷ 21 UT изменялось от северо-западного до юго-западного. Сначала луч пересекал области с низким значением ПЭС, по мере движения в южном направлении луч входил

в область северного гребня экваториальной аномалии, для которого в дневное время характерны высокие значения вертикального ПЭС [46]. Соответственно при уменьшении угла места χ значение наклонного ПЭС увеличивается до величины 250 TECU (рис. 8, а). Геометрия зондирования такова, что при этом угол между направлением на ИСЗ и направлением вектора магнитного поля начинает уменьшаться, а значение $\cos\theta(t)$ приближаться к 1.0, что обеспечивает выполнение условия

YAR2, день 303, 2003 г.

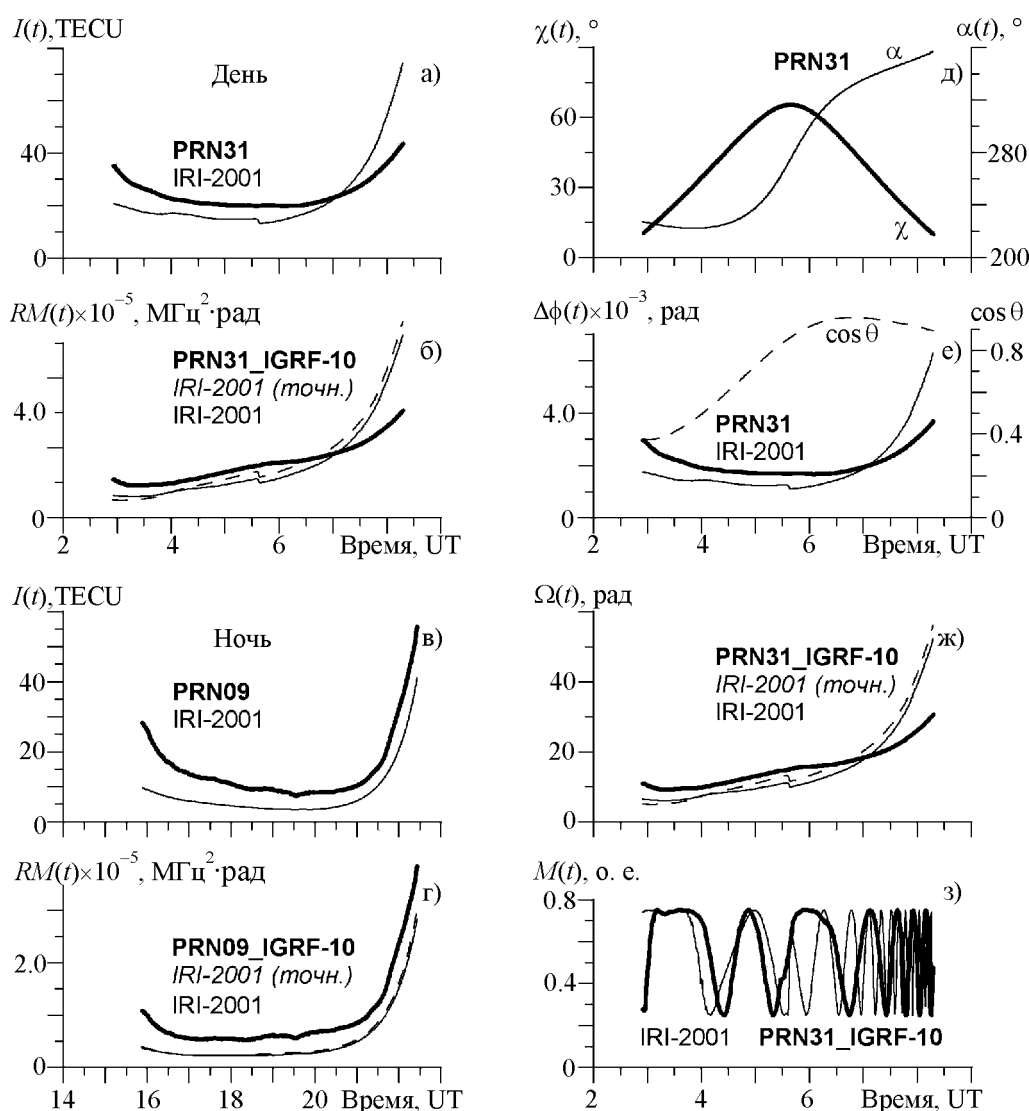


Рис. 6. Передаточные характеристики ионосферы в районе радиотелескопа MIRA для магнитной бури 30 октября 2003 г.

квазипродольного распространения (рис. 8, е, пунктир).

Период ФАМ $M(t)$ в интервале времени 21 ÷ 22 UT оказался порядка 200 ÷ 300 с (рис. 8, з). При таких значениях периода 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, приве-

сти к неадекватному использованию известных методов компенсации мерцаний при наблюдениях пульсаров, а также к ошибкам оценки интенсивности и характерных размеров неоднородностей электронной концентрации при исследовании характеристик солнечного ветра или межзвездной среды [25, 47].

Наблюдаемые значения наклонного ПЭС до 300 TECU в вечернее местное время (рис. 8, в), обусловлены эффектом магнитной бури 29 октября 2003 г. [45].

PUR3, день 339, 2004 г.

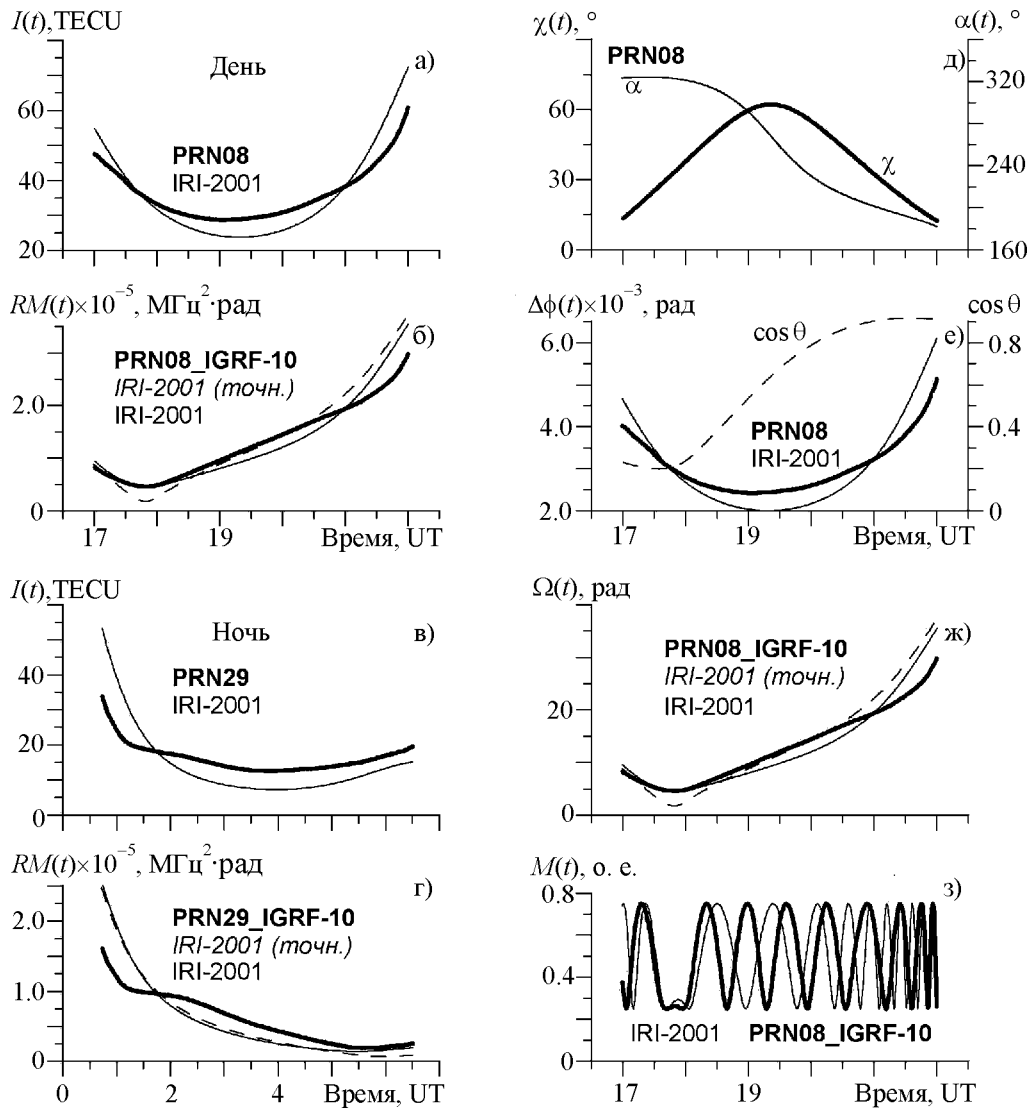


Рис. 7. Передаточные характеристики ионосферы в районе радиотелескопа Arecibo для магнитоспокойного дня 4 декабря 2004 г.

7. Заключение

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, определяемого магнитными полями и распределением электронов в космическом пространстве между радиоисточником и телескопом. Кроме того, при приеме сигнала на антенну линейной поляризации вариации

поляризационного угла могут привести к значительной амплитудной модуляции. При современных требованиях к характеристикам радиотелескопов подобные воздействия нельзя не учитывать.

Эффект ФАМ необходимо учитывать при анализе линейно-поляризованного радиоизлучения пульсаров. Наблюдаемая при этом модуляция амплитуды импульсов пульсаров [25, 47] может быть обусловлена изменениями поворота плоскости поляризации сигнала в ионосфере.

PUR3, день 303, 2003 г.

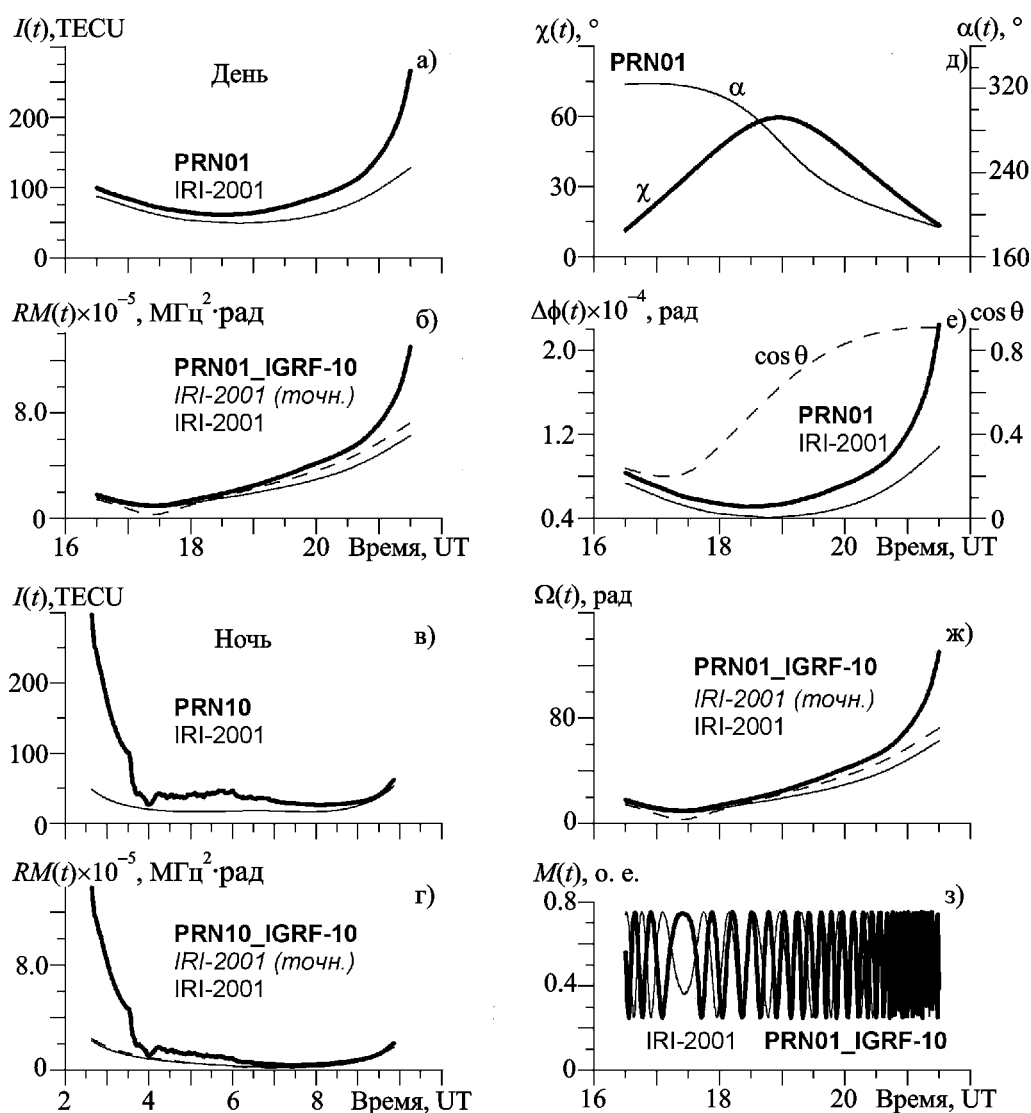


Рис. 8. Передаточные характеристики ионосферы в районе радиотелескопа Arecibo для магнитной бури 30 октября 2003 г.

Интенсивность и период ФАМ сигнала обусловлены в значительной степени географическим расположением радиотелескопа. Для области экваториальной аномалии в дневное время характерны значительные градиенты ПЭС. Во время геомагнитных возмущений усиливается влияние геометрии экваториальной аномалии относительно луча на исследуемый источник.

Что касается применимости приближенных выражений (4) при восстановлении ионосферно-

го вклада в меру вращения RM и поворот плоскости поляризации Ω , то можно сделать вывод о приемлемости данного приближения. Значения меры вращения и поляризационного угла, рассчитанные с помощью модели IRI-2001 по точным (2), (3) и приближенным выражениям (4), в целом достаточно близки. Для непрерывной оценки справедливости применения приближенных выражений для конкретного эксперимента необходим численный расчет поляризационного угла по точным и приближенным выражениям.

Результаты моделирования с использованием модели IRI-2001 достаточно близки к экспериментальным значениям, поэтому в том случае, когда не удается подобрать подходящий луч на исследуемый радиисточник и восстановить ПЭС по данным GPS измерений, можно использовать современные ионосферные модели. В ближайшее время, после проведения необходимого тестирования для различных условий эксперимента, расчеты можно будет проводить на основе современной модели IRI-2007.

В декаметровом 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 [8].

Наши результаты открывают путь к разработке методов и 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.

Авторы выражают благодарность А. Т. Алтынцеву, Г. Я. Смолькову, 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. Особая благодарность О. М. Ульянову за поддержку основной идеи нашего проекта и полезные замечания по рукописи статьи.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 30 “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля”.

Литература

1. Benz A., Monstein C., Meyer H. CALLISTO - a new concept for solar radio spectrometers // *Sol. Phys.* – 2005. – Vol. 226. – P. 143-151.
2. <http://www.cc.uoa.gr/artemis/QuickLooks/2005/01/>
3. <http://radiosun.ts.astro.it/>
4. http://www.obs-nancay.fr/a_index.htm
5. <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarradio.html>
6. http://www.astro.phys.ethz.ch/cgi-bin/showdir?dir=Observation_callisto&file=dir.html
7. <http://www.prao.psn.ru/radiotelesopes/telescopes.html>
8. <http://www.ira.kharkov.ua/UTR2/download.htm>
9. <http://www.astron.nl/p/lofarframe.htm/>
10. Science with the Square Kilometre Array / Eds: C. Carilli, S. Rawlings / *New Astronomy Reviews.* – Elsevier, 2004. – Vol. 48.
11. Lawrence R. S., Little C. G., Chivers J. A. The influence of the ionosphere upon radio wave propagation “Earth-space” // *Proc. IEEE.* – 1964. – Vol. 52, No. 4. – P. 5-30.
12. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
13. Железняков В. В. Электромагнитные волны в космической плазме. – М.: Наука, 1964. – 560 с.
14. Afraimovich E. L. Cepstral analysis of broad-band radio emission. New possibilities in radio astronomy // *Astron. Astrophys.* – 1981. – Vol. 97, No. 2. – P. 366-372.
15. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice.* – New York: Springer-Verlag Wien, 1992. – 327 p.
16. Davies K. and Hartmann G. K. Studying the ionosphere with the Global Positioning System // *Radio Sci.* – 1997. – Vol. 32, No. 4. – P. 1695-1703.
17. <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>
18. <http://www.avisooceanobs.com/>
19. Afraimovich E. L., Karachenshev V. A. Testing of the transionospheric radiochannel using data from the global GPS network // *Ann. Geophys.* – 2003. – Vol. 46, No. 6. – P. 1229-1246.
20. Afraimovich E. L., Nomikos C., Ruzhin Yu. Ya., Tatarinov P. V., Yasukevich Yu. V. Ionosphere Transfer Characteristic for Radio Astronomical Signals as Deduced from GPS Radio-sounding, Ionosphere IRI-2001, and Magnetic Field IGRF-10 Modeling // *CESRA-2007 abstract.* – 2007. <http://users.uoi.gr/anindos/CESRA2007/contributions/node5.html>.
21. Afraimovich E. L., Udodov M. Yu. Travelling ionospheric disturbances and the effectiveness of powerful HF transmitters in ionospheric modification and radio location of the Moon // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1993. – Vol. 55, No. 1. – P. 57-64.
22. Гундзе Е., Чжаохань Лю. Мерцания радиоволн в ионосфере // *ТИИЭР.* – 1982. – Т. 70, № 4. – С. 5-45.
23. Афраимович Э. Л. Ионосферная фарадеевская модуляция интенсивности радиоастрономических сигналов // *ДАН РАН.* (Принято к печати).
24. Афраимович Э. Л., Ружин Ю. Я., Номикос К., Ясюкевич Ю. В. Фарадеевская амплитудная модуляция радиоастрономических сигналов в ионосфере.

- I - радіоізлучення Сонця // Изв. вузов. Радиофизика. (Принято к печати).
25. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. – М.: Мир, 1980. – 296 с.
26. Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere // Proc. of the IGS AC Workshop. – Darmstadt (Germany). – 1998. – P. 307-320.
27. <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>
28. <http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/dbDataByDate.cgi>.
29. Bilitza D. International Reference Ionosphere 1990 // NSSDC. – Greenbelt, Maryland. – 1990. – P. 90-22.
30. Bilitza D. International reference ionosphere // Radio Sci. – 2001. – Vol. 36, No. 2. – P. 261-275.
31. Bilitza D. A correction for the IRI topside electron density model based on Alouette/ISIS topside sounder data // Adv. Space Res. – 2004. – Vol. 33, No. 6. – P. 838-843.
32. Giovanni G., Radicella S. M. An analytical model of the electron density profile in the ionosphere // Adv. Space Res. – 1990. – Vol. 10, No. 11. – P. 27-30.
33. Radicella S. M., Leitinger R. The evolution of the DGR approach to model electron density profiles // Adv. Space Res. – 2001. – Vol. 27, No. 1. – P. 35-40.
34. Leitinger R., Zhang M., Radicella S. M. An improved bottomside for the ionospheric electron density model NeQuick // Ann. Geophys. – 2005. – Vol. 48, No.3. – P. 525-534.
35. ITU-2004: Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems // Recommendation ITU-R. – 2004. – P. 531-7.
36. Huang X., Reinisch B. W., Bilitza D., Benson R. F. Electron density profiles of the topside ionosphere // Ann. Geophys. – 2002. – Vol. 45, No. 1. – P. 125-130.
37. Coisson P., Radicella S. M. The IRI topside parameters // Adv. Radio Sci. – 2004. – Vol. 2. – P. 249-251.
38. Coisson P., Radicella S. M. Ionospheric topside models compared with experimental electron density profiles // Ann. Geophys. – 2005. – Vol. 48, No. 3. – P. 497-503.
39. Coisson P., Radicella S. M., Leitinger R., Nava B. New option for IRI topside electron density profile using NeQuick model // IRI NewsLetter. – 2005. – No. 12. – P. 5-7.
40. Coisson P., Radicella S. M., Nava B. Comparisons of experimental topside electron concentration profiles with IRI and NeQuick models // Ann. Geophys. – 2002. – Vol. 45, No. 1. – P. 111-116.
41. IRI-2007. <http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/ionospheric/iri/iri2007/>
42. IRI-2001. <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/space/model/ionos/iri.html>.
43. http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/igrf_form.shtml
44. <http://www.naic.edu/>
45. Веселовский И. С., Панасюк М. И., Авдюшин С. И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-

- ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космические исследования. – 2004. – Т. 42, № 5. – С. 453-508.
46. Astafyeva E. I., Afraimovich E. L., Kosogorov E. A. Dynamics of total electron content distribution during strong geomagnetic storms // Advances in Space Research. – 2007. – DOI:10.1016/j.asr.2007.03.006.
47. Ульянов О. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Лекашо А., Розолен К., Рукер Х. О. Обнаружение индивидуальных импульсов пульсаров В0809+74; В0834+06; В0943+10; В0950+08; В1133+16 в декаметровом диапазоне волн // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – Т. 11, №2. – С. 113-133.

Адаптивна радіоастрономія – 1. Корекція фазового запізнення та повороту площини поляризації в іоносфері за даними GPS зондування та іоносферного моделювання

Е. Л. Афраїмович, Ю. В. Ясюкевич

Аби вірно інтерпретувати радіоастрономічні дані, слід враховувати можливі спотворення сигналів в іоносфері. Ми розробили метод і програмне забезпечення для розрахунку іоносферного внеску в міру обертання RM та міру дисперсії DM . Ми використовували модель іоносфери IRI-2001, модель магнітного поля IGRF-10 та значення повного електронного вмісту, одержані за даними мережі двох частотних приймачів GPS. За значеннями DM і RM потім підраховувалися величини фазової затримки, повороту площини поляризації та значення функції амплітудної модуляції. Ми виконали розрахунки для різних рівнів геомагнітної активності, а також для різних кутів приходу радіовипромінювання.

Основна наша ідея полягає у використанні сигналів навігаційних супутників (GPS, GLONASS, GALILEO) як тестового сигналу “реперного” джерела, розташованого на мінімальній кутовій відстані від досліджуваного радіоджерела. Наш проект відкриває шлях до розробки методів та систем адаптивної радіоастрономії, адаптивної до неоднорідної та нестационарної іоносфери, за аналогією з відомими системами адаптивної оптики, які призначені для адаптації оптичних телескопів до змінюваних умов оптично неоднорідної та нестационарної тропосфери.

**Adaptive Radio Astronomy – 1. Correction
of Phase Delay and Polarization
Plane Rotation in the Ionosphere
Using GPS Sounding Data
and Ionospheric Modeling**

E. L. Afraimovich and Yu. V. Yasukevich

To correctly interpret radio astronomical data it is necessary to take into account possible distortions of these signals in the Earth ionosphere. We have developed the method and software for calculation of the ionosphere rotation measure (RM) and dispersion measure (DM). We used the ionosphere model IRI-2001, magnetic field model IGRF-10 and values of ionosphere total electron content as deduced from dual-frequency GPS receiver measurements. With the obtained DM and RM values, these of phase delay, polarization twisting and Faraday amplitude modulation were then calculated. We made calculations for different levels of geomagnetic activity and for different angular position of radio sources as well.

Our main idea is to use signals of navigation satellites (GPS, GLONASS, GALILEO) as a testing signal from the “reference” source located at minimal angle distance from the studied one. Our project clears the way to development of the methods and systems of the adaptive radio astronomy, adaptive to non-uniform and non-stationary ionosphere, by analogy with the known systems of adaptive optics intended for adaptation of optical telescopes to varying conditions of optically non-uniform and non-stationary troposphere.