Секция 3 «Распространение радиоволн в условиях повышенной солнечной, ииклонической 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 развертывается 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 (ионозондов, радаров HP) 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 является встроенной функцией [1]. восстановление параметров ионосферы 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]

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

где f - частота сигнала, Γu ; 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 трансионосферного 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

$$\Omega = 2.365 \cdot \frac{10^4}{f^2} \int_{S} N_e B_0 \cos q \, ds \tag{2}$$

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

Величина
$$\int_{S} NB_0 \cos q \, ds$$
 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).

$$RM = 2.365 \cdot 10^4 \int_{s} NB_0 \cos q \, ds \tag{3}$$

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)

 $RM \approx 2.365 \cdot 10^4 \langle B_0 \cos q \rangle \int_{S} N ds$

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

 $\langle B_0 \cos q \rangle$ - среднее значение произведения $B_0 \cos q$ вдоль луча на источник, которое можно вычислить для фиксированного значения угла места на источник *с* 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]

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

$$M(t) = \sqrt{1 + a^2 + 2a \cdot \cos[2\Omega(t) + j_0]},$$
(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 (Φ AM) [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 c 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:

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

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 I_1 - L_2 I_2) + K + nL],$$
(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 определяемая группового и фазового пути, dP - неизвестная постоянная величина, определяемая сдвигом часов на двух рабочих частотах GPS.

(4)

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

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

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 (a) 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 (Puc.2a) по модели IRI-2001 рассчитаны модельные значения наклонного ПЭС (Puc.1a, тонкие кривые), а также мера вращения RM(t), рассчитанная с использованием модели магнитного поля IGRF-10 (Puc.16, 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 10³ рад. до 10⁴ 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 МФИM(t) – панели б-г.

Такие сильные искажения вызваны тем, что во время главной фазы большой магнитной бури 30 октября значения вертикального ПЭС достигали 200 ТЕСИ, а градиенты ПЭС – до 5-8 ТЕСИ 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 ТЕСИ.

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 радиоастрономических систем.

Список литературы

- 1. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. 2006. Институт солнечно-земной физики. Иркутск : 480 с.
- 2. Афраймович 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. T. 97, N2. P. 366-372.
- 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.
- 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.

ВАРИАЦИИ ФАЗЫ И АМПЛИТУДЫ СДВ ПОЛЯ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 9 МАРТА 1997 г.

VARIATIONS OF PHASE AND AMPLITUDE OF ULW FIELD DURING SOLAR ECLIPSE ON MARCH 9, 1997

И.Н. Поддельский, А.И. Поддельский

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Radio observations during a solar eclipse allow to study the ionospheric processes occuring in conditions of fast change of intensity of solar radiation at almost constant zenit corner of the Sun. Some results concerning to an eclipse on March, 9 1997, are discussed in this message.

Известно, что по сравнению с другими методами ионосферное зондирование сверхдлинными радиоволнами (СДВ) оказывается наиболее чувствительным к вариациям ионизации в самых нижних слоях ионосферы. Явления в ионосфере, происходящие во время солнечного затмения представляются наиболее подходящими для анализа процессов формирования состава нейтральной атмосферы, температурного профиля и концентраций заряженных частиц, поскольку в большей степени исключаются другие различные факторы воздействия на параметры СДВ-сигнала. Поэтому представляется интересным изменение амплитудных и фазовых характеристик СДВ-сигналов в зависимости от условий освещенности трассы распространения в период солнечного результаты затмения. Лля анализа использованы регистрации сигналов радионавигационной системы «Омега» в приемном пункте п. Стекольный (вблизи Магадана, 60° N, 151°E) в диапазоне частот 10,2 – 13,6 кГц в марте 1997 года, в том числе во время полного (более 90% закрытия солнечного диска) солнечного затмения 9 марта, отличительной особенностью которого был охват широкой материковой области сибирской части России. При этом полоса лунной тени перемещалась от средних широт до полярных областей в течении около полутора часов и пересекла 5 часовых поясов с запада на восток. Геометрия эксперимента приведена на рис.1, где указаны





Рис.1. Местоположение приемного пункта (п. Стекольный), проекции траекторий радиотрасс (фрагменты) и границ движения полной фазы солнечного затмения (СЗ) на земную поверхность.

местоположение приемного пункта (п. Стекольный), проекции траекторий радиотрасс (фрагменты) и границ движения полной фазы солнечного затмения (СЗ) на земную поверхность. Полоса полной тени на земной поверхности начиналась на границе КНР и России и проходила далее по территориям Монголии и России вблизи городов Чита (полное затмение), Иркутск, Улан-Удэ, Улан-Батор. Наибольшая ширина полосы полной тени на поверхности земли достигала около 380 км, скорость ее перемещения составляла 0.7-1.0 км/сек. На высотах распространения СДВ радиоволн область полной тени южнее. Геофизическая обстановка пролегала несколько в лни наблюдений характеризовалась солнечной активностью и спокойной низкой геомагнитной обстановкой (несколько повышенной в предшествующий солнечному затмению день 8 марта). Эффекты СЗ наблюдались в восходный период и полуденное время. Измерения параметров СДВ поля проводилось на компьютеризированном приемно-регистрирующем комплексе. Усредненные за минуту значения амплитуды и фазы сигнала регистрировались и автоматически обрабатывались. Аппаратурная погрешность измерения фазы составляла 0,05 мкс, амплитуды не более 1%. Наблюдения велись одновременно на восьми трассах на всех излучаемых частотах. Для рассмотрения указанного явления были взяты СДВтрассы Норвегия-Магадан (длина трассы-6040 км), Либерия-Магадан (12200 км) и Реюньон-Магадан (12300 км), траектории которых проходили через зону солнечного затмения. Трасса Реюньон-Магадан характеризуется совпадением с направлением перемещения полосы полной тени, т.е. распространение СДВ-сигнала происходило вдоль движения границ СЗ. Трассы Норвегия-Магадан и Либерия-Магадан располагались поперек движения границ солнечного затмения. Такое расположение СДВ-трасс привело к тому, что полное солнечное затмение на трассе Реюньон-Магадан наблюдалась в течении 45 минут (с 00:50 до 01:35 UT), а на двух других только в течении нескольких минут, зато скорость перемещения тени на этих трассах была максимальной. Таким образом, условия распространения СДВ-сигналов на различных трассах сильно отличались друг от друга. На рис.2 представлены результаты измерений вариации фазы и относительное изменение амплитуды СДВ радиосигналов для различных частот на разных по направлению и протяженности трассах. На первых двух трассах (Норвегия-Магадан, 6000 км и Либерия-Магадан, 12000 км), расположенных поперек движения границ солнечного затмения на поверхности земли, наблюдалось увеличение фазы, составляющее 40-50 процентов от регулярной суточной вариации. Причем основное изменение приходилось на небольшой период времени с 01:42-01:47 UT, когда пятно полной тени пересекалось с направлением распространения СДВ-волны. Начало увеличение фазы сигнала совпадает с началом закрытия трассы тенью, после прохождения которой, спустя некоторое время, начинается восстановление регулярных фазовых характеристик. На более длинной трассе Либерия-Магадан восстановление обычных параметров несколько затягивается по сравнению с трассой средней протяженности. Небольшое увеличение амплитуды сигнала (до 10-25 % на трассе средней протяженности и до 25-40 % на длинной трассе) начинается за 15-20 минут и заканчивается за 5-10 минут до начала закрытия трассы распространения СДВсигнала лунной тенью. Совсем по другому происходят изменения параметров СДВ-поля в случае совпадения направления трассы (Реюньен-Магадан) с направлением перемещения полосы полной тени, т.е. при распространение СДВ-сигнала вдоль движения границ СЗ. В этом случае еще до закрытия трассы лунной тенью сначала происходит двускачковое (увеличение-уменьшение-увеличение) увеличение фазы сигнала на 60-70 % от обычного значения, которое в момент закрытия трассы тенью сменяется резким уменьшением до регулярных значений. После закрытия трассы лунной тенью снова начинается увеличение фазы сигнала, величина которой сохраняется до конца затмения, после чего величина фазы сигнала возвращается к регулярному значению. Аналогичным образом меняется и амплитуда сигнала, сначала наблюдается скачкообразное увеличение на 35-50 процентов (за 25-30 минут до начала закрытия трассы тенью), затем некоторое уменьшение и снова



Рис.2.Вариации фазы (Δf) и относительное изменение амплитуды (ΔI) СДВ радиосигналов РНС «Омега» для различных частот на различных по направлению и протяженности трассах. Желтым цветом выделены периоды, когда на указанных трассах наблюдается полное солнечное затмение.

увеличение амплитуды сигнала, значение которой сохраняется до окончания солнечного затмения. На длинных трассах фазовые изменения СДВ-сигнала имеют более сложный характер. При изменениях фазы и амплитуды сигналов имеется определенная частотная зависимость. Низкие частоты более подвержены изменениям фазы и амплитуды сигнала при изменении условий распространения волны.

Радиоволны СДВ диапазона распространяются в сферическом волноводе Земляионосфера за счет последовательных отражений от границ волновода. В дневное время суток верхняя граница волновода определяется областью D, в ночное-областью E. При этом в суточном ходе амплитуды и фазы сигнала в переходное время суток и во время солнечного затмения наблюдаются резкие колебания. В среднем отклонения фазы радиосигналов составляют в период затмения 30-35 %, а возрастание амплитуды- 30-40 % суточного хода, причем наблюдается опережение начала роста этих параметров СДВ сигнала относительно времени прохождения полосы полной фазы затмения через эту трассу.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ PROBABILISTIC CHARACTERISTIC OF IONOSPHERIC SCINTILLATIONS

И.Н. Поддельский, А.И. Поддельский

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

In the report probabilistic characteristics of the ionospheric scintillations are considered. They were received by the results of registration of amplitude fluctuations of radio signals from an artificial satellite at the frequency 150 MHz in the Nort-East of Russia. It was determined, that the probability of observation of ionospheric fluctuations is maximal in the morning and minimal in the evening. Day maximum of probability of ionospheric scintillations is observed in northern latitudes. Increase of solar and geomagnetic activity leads to the general increase of probability of observation of scintillations though there are some peculiarities. These data give an idea about seasonal, daily and latitudinal distributions of probability of ionospheric scintillations in various geophysical conditions.

В мировой практике радиосвязи все большее значение приобретают космические линии связи УКВ-диапазона, что требует знание конкретных данных о среде распространения. Для оценки помехоустойчивости и надежности спутниковых навигационных и связных систем, использующих ионосферные каналы распространения, необходимо иметь информацию о распределении вероятностей уровня радиосигналов и о возможных механизмах их искажений в зависимости от состояния ионосферы (наличия и концентрации неоднородных образований, их высоты расположения, эффективных размеров и т.д.).

Наземные спутниковые методы изучения ионосферных неоднородностей основаны на регистрации радиосигналов искусственных спутников Земли (ИСЗ) и анализе изменений их параметров на неоднородных образованиях ионосферной плазмы, приводящих к замиранию и усилению амплитуды радиоволны, флуктуациям ее фазы и изменениям угла прихода, т.е. к ионосферным мерцаниям [1, 2, 4].

В настоящей работе представлены результаты исследования вероятности наблюдения ионосферных мерцаний радиосигналов в Северо-Восточном регионе России методом радиопросвечивания [3] ионосферы сигналами орбитальных ИСЗ (полярная орбита с высотой около 1000 км от поверхности Земли) навигационной системы "Транзит" на частоте 150 МГц. Прием осуществлялся в п. Стекольный Магаданской области (60° N, 151° E) и п. Мыс Шмидта (68,6° N, 180,8°E) на три, пространственно разнесенные (база разнесения 400 м) в направлении север – юг (с учетом максимального совпадения с проекцией траектории движения спутника) и восток – запад, антенны [5-8].

Для получения характеристик пространственных и временных изменений мерцаний радиосигналов спутников проводилась количественная оценка уровня мерцаний, т.е. измерялась относительная величина флуктуаций интенсивности - индекс мерцаний (SI).

 $SI = (A_{max} - A_{min})/(A_{max} + A_{min})$

где A_{max} и A_{min} - соответственно усредненный по интервалу обработки максимум и минимум амплитуды сигнала.

Благодаря перемещению орбитального ИСЗ имеется возможность рассмотрения зависимости SI от географической широты для различных времен суток и сезона наблюдений. В результате проведенных в 1978 - 1993 годах наблюдений собраны данные о 10000-12000 пролетах ИСЗ, относящихся к различному времени суток, года, состоянию геомагнитной и солнечной активности. Получен обширный материал, анализ которого позволяет сделать некоторые выводы о характере ионосферных мерцаний, в частности, о вероятности наблюдения (Р) на данной широте мерцаний определенной интенсивности в соответствующее время суток и сезон наблюдений.

Вероятность регистрации флуктуаций радиосигналов с индексом мерцаний (SI) больше определенной величины (SI>K) определялась по формуле

 $P_{SI>K} = N_{SI>K}/N_0$

где N_0 – общее число записей с зарегистрированными флуктуациями сигналов в данный период времени и на определенной широте, $N_{SI>K}$ – число записей с SI>K. Пример этих вероятностных зависимостей представлен на рис.1 (осенне-зимний период, октябрьянварь) и рис.2 (весенне-летний период, март-июнь). Знание зависимости P(ϕ , LT)



Рис.1. Вероятность наблюдения флуктуаций радиосигналов ИСЗ (150 МГц) с определенным индексом мерцаний (SI>...) в осеннее-зимний период. 1 – SI>0,01; 2 – SI>0,025; 3 – SI>0,05; 4 – SI>0,1.

позволяет прогнозировать изменение уровня флуктуаций сигнала спутника в зависимости от широты, сезона и времени наблюдения, что имеет важное практическое значение. Из представленных зависимостей видно, что в зимний период наблюдений максимум вероятности регистрации мерцаний средней интенсивности (SI>0.05) приходится на южные (56° с.ш., Р~0,55) и центральные (64° с.ш., Р~0,45) участки широтного интервала в 12-16 и 8-12 ч. местного времени соответственно. На широте 60° вероятность наблюдения таких мерцаний сильно падает и приблизительно составляет 0,15-0,2, значение P SI > 0,05 в дневное время сравнивается с ночным периодом (Р~0,22 на 60° с.ш.), при этом наблюдается общее снижение Р на фоне небольших суточных изменений. В суточном распределении вероятности регистрации мерцаний на всех широтах четко выделяются два минимума – в утреннее (04-08) и вечернее (16-20) местное время (LT) и два максимума – в (22-02) и полдень (10-14). На северных широтах (72° с.ш.) суточное полночь распределение вероятности регистрации мерцаний имеет сглаженный характер в сравнении с южным (56°) и средним (64°) участками широтного интервала наблюдений.

Весной отмечается уменьшение вероятности наблюдения ионосферных мерцаний радиосигналов ИСЗ на всех широтах, кроме среднего участка (64°) широтного интервала, где она возрастает. В этот период наблюдений суточное изменение Р становится более резким (изменяется в течении суток в 5-10 раз) от и сдвигается по времени. На всех широтах в этот период выделяются утренний максимум и дневной минимум. Наибольшие значения вероятности наблюдения мерцаний средней интенсивности (SI>0,05) приходятся на южный участок (56°, P~0,4) с 4 до 8 ч. утра и на северный (72°, P~0,6) в ночное и утреннее время. Минимальные значения отмечаются в послеполуденные и вечерние часы. Необходимо отметить, что небольшие (SI>0.01) флуктуации радиосигналов ИСЗ

присутствуют всегда и вероятность их наблюдения мало меняется в течении суток . Так, в зимний период наблюдений Р _{SI>0.01} принимает значения от 0,85 до 1.0 на южных широтах



интервала наблюдений (56°) и 0,9 – 0,93 на северном (72°), соответственно весной она имеет значения 0,72 - 0,98 на юге (56°) и 0.97 – 1.0 на севере (72°). Наибольшие суточные изменения вероятности наблюдения мерцаний такой интенсивности регистрируются на широтах 60° - 64° (от 0,7 до 1,0).

Полученные данные по ионосферным мерцаниям УКВ-сигналов ИСЗ свидетельствуют о зависимости значений Р от времени суток и сезона наблюдения и от соответствующей геофизической обстановки. На рис.3 приведена усредненная по периодам наблюдений пространственно-временная зависимость вероятности регистрации мерцаний с SI>0,05.

Весенние периоды включали измерения, проведенные в марте – июне с 1978 по 1993 года, зимние периоды – соответственно в октябре – январе. Результаты измерений разделены по признаку геомагнитной активности: к невозмущенным относятся периоды наблюдений с суммарным суточным К_∑ ≤20, к возмущенным – К_∑ >25. Индекс магнитной активности определялся суммированием 3-часовых значений магнитного К-индекса в течение суток для магнитных станций в пунктах наблюдений. Видно, что в условиях низкой геомагнитной активности в зимний период можно отметить регулярный суточный ход Р _{SI>0.05} с максимумом значений в утренние и минимум в вечерние часы. Наибольшая величина Р~0,3 и наибольший разброс значений (от 0,1 до 0.45) в суточном распределении вероятности наблюдения мерцаний с SI>0,05 наблюдаются на среднем участке широтного интервала наблюдений (64°с.ш.) с максимумом в 04-08 и минимумом в 16-20 часов местного времени. На южном участке суточное изменение Р небольшое (от 0,08 до 0,14), а на северных широтах (68-72°) в суточном распределении вероятности наблюдения мерцаний с SI>0,05 появляется дневной максимум вероятности в 12-16 часов. Весенний период наблюдений отличается от зимнего большими экстремальными значениями Р (максимум – до 0,4, минимум – до0,01). Причем область максимальных значений и перепадов вероятности наблюдения мерцаний средней интенсивности перемещается в область более южных широт (на 60°) по сравнению с зимним периодом. Суточное изменение Р происходит аналогично зимнему, только минимум достигается раньше, в 12-16 ч. На северных широтах (как и зимой) выделяется дневной максимум Р, примерно, той же величины (0,15).



Рис.3. Пространственно-временная зависимость вероятности наолюдения флуктуации радиосигналов ИСЗ (150 МГц) с индексом мерцаний SI>0,05 в период низкой ($K_{\Sigma} \leq 20$, черная линия) и высокой ($K_{\Sigma} > 25$, серая линия) геомагнитной активности.

В период наблюдений с высокой геомагнитной активностью наблюдаем общее увеличение значений вероятности наблюдения мерцаний (с сохранением суточного хода Р). Можно отметить небольшое влияние магнитной возмущенности на рост Р на северных участках интервала наблюдений, уменьшение суточного разброса Р на этих широтах в весеннее время и даже уменьшение значений Р на 66°с.ш.в зимний период. Основное увеличение вероятности регистрации мерцаний при росте геомагнитной возмущенности наблюдается на широтах южнее 64° (в зимнее время больше, чем весной). Например, в случае увеличения значений К-индекса, вероятность $P_{SI>0,05}$ в зимнее время на 60°- 64° с.ш. возрастает с 0,2 до 0,8.

В результате рассмотрения представленных данных можно сделать выводы, что вероятность наблюдения ионосферных флуктуаций радиосигналов ИСЗ принимает наибольшие значения утром, наименьшие вечером. На северных широтах наблюдается выделение дневного максимума Р. Рост геомагнитной активности ведет к общему увеличению Р с сохранением суточного хода, причем основные изменения происходят на южном участке широтного интервала наблюдений (особенно в зимнее время). С точки зрения помехозащищенности космических линий УКВ-радиосвязи от ионосферных мерцаний можно рекомендовать работу на южных широтах (56-60°) в послеполуденные и вечерние часы (12-20LT). На средних широтах (64-66°)наиболее благоприятный период работы на УКВ – с 16 до 20 LT, северный участок характеризуется возможностью работы в любое время, но предпочтительнее в 08-12 LT.

Полученные данные о вероятности наблюдения ионосферных флуктуаций спутниковых сигналов являются недостаточными, их объяснение затрудняется рядом факторов. Однако они дают представление о сезонном, суточном и широтном распределении вероятности наблюдения ионосферных мерцаний радиосигналов ИСЗ, о влиянии на эти характеристики геомагнитного возмущения. Данная работа дополняет ранее опубликованную [9] представлением большего статистического материала и некоторым уточнением.

Список литературы

- 1. Ааронс, Уитни, Аллен. Глобальная морфология ионосферных сцинтилляций // ТИИЭР. 1971. Т. 59, №2. С. 54-66.
- 2. Гундзе Е., Лю Чжаохань. Мерцания радиоволн в ионосфере // ТИИЭР.1982. Т. 70, № 4. С. 5-45.
- 3. Ерухимов Л.М. Исследование неоднородностей электронной концентрации в ионосфере радиоастрономическим методом и с помощью искусственных спутников: Дис. канд. физ.мат. наук. – Горький : 1965.
- 4. Крейн Р.К. Мерцания радиосигналов в ионосфере // ТИИЭР. 1977. Т. 65, № 2. С. 5-29.
- 5. Мясников Е.Н., Поддельский И.Н. О характеристиках неоднородной структуры ионосферы в Северо-Восточном регионе СССР // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т.31, № 2. С. 377
- Поддельский И.Н. Мерцания радиосигналов ИСЗ и параметры ионосферных неоднородностей в период солнечного затмения 18 марта 1988 года // Исследование явлений в ионосфере и магнитосфере Земли: Тр. ИКИР ДВО АН СССР. – Владивосток : 1990. С. 30-36.
- Поддельский И.Н. Некоторые результаты исследования неоднородной структуры ионосферы с помощью искусственного спутника Земли (ИСЗ) // Радиофизические исследования геофизических явлений на востоке СССР: Тр.СВКНИИ ДВО АН СССР. – Магадан : 1987. С. 135-143.
- 8. Поддельский И.Н. Спектральные характеристики ионосферных неоднородностей на Северо-Востоке России // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1999., выпуск 109, часть П. С. 157.
- Поддельский И.Н. Вероятностные характеристики ионосферных мерцаний радиосигналов ИСЗ // Солнечная активность и солнечно-земные связи: Тр. ИКИР ДВО АН СССР. – Владивосток : 1991. С. 97-101.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПОМЕХ В ИОНОСФЕРНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

ATMOSPHERIC NOISE POLARIZATION IN THE IONOSPHERIC COMMUNICATION CHANNEL

В.П. Сивоконь

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

The Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS conducted experiments on application of rotating polarization waves in short-wave range. These waves show considerable increase of noise stability and carrying capacity of ionospheric communication channel. In the course of investigation we specified the polarity properties of atmospheric noise and of total field, formed during the interference of direct waves and those reflected from a semiconducting underlying surface.

Elliptic polarization of atmospheric noise was experimentally derived. We also obtained evaluative values of atmospheric noise polarization coefficient, they are within the limits 0.09-0.37 for the North-Southern direction of Kamchatka peninsular.

Dependence of field fadings at the receiving point from the oscillator location relatively the underlying surface on the transmitting side is shown.

Поляризация атмосферных помех

Оценка временных и пространственных вариаций уровня атмосферных помех возможна только статистическими методами, основанными на результатах обработки наблюдений во многих пунктах земного шара, на разных частотах и в различное время. Исследования проводились во многих странах, результаты их обобщены и опубликованы в [2].

Следует отметить, что эти измерения не могут дать исчерпывающих сведений о физических свойствах атмосферных помех. Для полного решения проблемы атмосферных помех необходимо получить возможно более подробные сведения о структуре и физических свойствах самого поля атмосферных помех. Одним из физических свойств поля является его поляризация.

При проведении экспериментальных исследований [3] использовались приёмные антенны эллиптической поляризации, и вопрос о поляризационных свойствах атмосферных помех возник в процессе измерений. Для удобства обработки данных, между циклами излучения волн различной поляризации вводилась специальная пауза, которую условно назвали защитной. В этой паузе передатчик запирался, а регистрирующее устройство продолжало записывать информацию, поступающую с антенн различной поляризации. Автор обнаружил отличие сигналов в защитных паузах с антенн противоположной поляризации и задался целью определить причину этого различия.

Анализ помеховой обстановки в пункте проведения эксперимента позволил сделать вывод, о том, что основной вклад в регистрируемые сигналы вносят атмосферные помехи. Поскольку для регистрации использовалось одно радиоприёмное устройство, то различие в характере изменения сигналов могло быть вызвано только антенно-фидерными трактами, вернее их свойствами. Используя поляризационные и резонансные свойства антенн приёмного комплекса удалось установить эллиптическую поляризацию атмосферных помех.

Дальнейшие исследования были направлены на уточнение поляризационных свойств атмосферных помех. В результате были получены оценочные величины коэффициента поляризации атмосферных помех, которые находятся в пределах 0,09-0,37. Можно предположить, что изменение коэффициента поляризации от эксперимента к эксперименту объясняется вариациями грозовой активности в области, где проявляются поляризационные свойства приёмных антенн. С другой стороны, выявлена корреляция

степени поляризации атмосферных помех с состоянием магнитного поля Земли, а именно с вариациями Dst-индекса. Роль геомагнитного фактора Dst вариаций применительно к селективному поляризационному возбуждению ионосферных характеристических волн отмечалась ранее [1] и описывается в [5].

Влияние подстилающей поверхности на поляризационные свойства результирующей волны

В зависимости от способа реализации устройства генерации волн вращающейся поляризации коротковолнового диапазона подстилающая поверхность может играть роль, как нежелательного явления, так и фактора, обеспечивающего получение поля эллиптической поляризации. В случае, когда поле эллиптической поляризации формируется антенной свойства подстилающей поверхности необходимо учитывать, поскольку при определённых условиях результирующее поле может выродиться в поле линейной поляризации. С другой стороны, подстилающая поверхность может выступать в качестве инструмента преобразования линейно поляризованной волны в эллиптическую и, в особых случаях, круговую. Это относится к методу получения поля эллиптической поляризации на основе линейного излучателя, расположенного над полупроводящей поверхностью [6]. Наконец, элементы антенных устройств могут быть не параллельны (не перпендикулярны) подстилающей поверхности, что также оказывает влияние на поляризационные характеристики поля.

На одном из этапов исследований на передающей стороне использовался набор поляризационных характеристик излучаемой волны. Измерения показали, что замирания поля в точке приёма при излучении волны вибратором, наклонённым к поверхности земли под углом 45⁰ больше, нежели под углом 135⁰. При этом замирания больше чем, в случаях, когда излучалась волна горизонтальной или вертикальной поляризации. Наименьшие замирания наблюдались при использовании левосторонней эллиптической поляризации волны.

При расположении вибраторов под углом к подстилающей поверхности результирующее поле можно представить как сумму горизонтальной и вертикальной составляющих. Горизонтальная составляющая напряжённости поля вибратора. расположенного под углом 45[°] к горизонту, противоположна по направлению горизонтальной составляющей напряжённости поля вибратора, расположенного под углом 135⁰. При этом вертикальная составляющая опережает по фазе горизонтальную. Принято считать, что результирующий вектор в случае эллиптической поляризации поля вращается от вектора, опережающего по фазе, к вектору, отстающему по фазе. Таким образом, в случае расположения вибратора под углом 45° имеем правостороннюю поляризацию результирующего поля в направлении на корреспондента. Соответственно в случае, когда вибратор расположен под углом 135⁰, результирующее поле имеет левостороннюю поляризацию. В то же время в [1] показано, что направление вращения вектора напряжённости электрического поля результирующей волны в пункте передачи, обусловливает величину замираний поля в пункте приёма.

Направление вращения вектора электрического поля результирующей волны, играет существенную роль и накладывает ограничения на угол азимутального отворота в способе [6] предложенном Фальковичем И.С. При переходе конца вибратора, как результате азимутального отворота, из первого квадранта в четвёртый, или из второго в третий направление вращения вектора электрического поля результирующей волны меняется на противоположное.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают выводы, сделанные в работе [8], о возможности улучшения качества канала связи за счёт случайного поляризационного согласования, как следствие паразитной эллиптической поляризации антенн коротковолнового диапазона. Но равновероятно, что паразитная эллиптическая поляризация может привести к ухудшению качества ионосферного канала связи. В связи

с этим при проектировании коротковолновых линий связи и разработке антенных устройств оценка влияния подстилающей поверхности на поляризационные свойства формируемого поля, должна исходить из свойств, геометрии и структуры реальной земной поверхности, как это показано, к примеру, в [9].

Заключение

Экспериментально установлена эллиптическая поляризация атмосферных помех и получены оценочные величины коэффициента поляризации атмосферных помех, которые для направления север-юг на полуострове Камчатка находятся в пределах 0,09-0,37. Обнаружение эллиптической поляризации атмосферных помех позволяет по-новому подойти к проблеме обнаружения и различения сигналов при наличии поляризованной помехи. Выявлена корреляция коэффициента поляризации атмосферных помех с вариациями Dst-индекса, характеризующего состояние магнитного поля Земли.

Опытным путём показана зависимость замираний поля в точке приёма от положения вибратора относительно подстилающей поверхности на передающей стороне.

Список литературы

- 1. Сивоконь В.П., Дружин Г.И Оценка замираний при излучении волн вращающейся поляризации в КВ диапазоне // Электросвязь. 2005. № 10. С. 39-41.
- 2. Отчёт 322 МККР, Женева, 1963. М. : Связь, 1971. 80 с.
- 3. Сивоконь В.П., Дружин Г.И., Поддельский И.Н., Поддельский А.И., Аллакулиев Ю.Б., Тарасенко Д.В., Цуканов А.В., Шумилов Ю.С. Аппаратурный комплекс для исследования волн вращающейся поляризации в КВ-диапазоне // Электросвязь. 2004. № 8. С. 9-11.
- 4. Поздняк С.И., Мелетицкий В.А. Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн. М. : Советское радио, 1974. 478 с.
- 5. Сивоконь В.П., Дружин Г.И Геомагнитный фактор Dst-вариаций в селективном возбуждении ионосферных характеристических волн // Геомагнетиз и аэрономия. 2006. Т. 46, № 4. С. 492-495.
- Фалькович И.С., Калиниченко И.Н. КВ антенна круговой поляризации на основе линейного диполя, размещённого над полупроводящей землёй // Электросвязь. 1995. № 3. С. 29-31.
- 7. Арефьева Л.Н., Березин Ю.В. Селективное поляризационное возбуждение волн в ионоферном канале связи // Радиотехника. 1991. № 1. С. 6-8.
- 8. Чернов Ю.А. Эллиптическая поляризация волн на КВ трассах. М. : Труды НИИР, 2002. С. 87-90.
- 9. Кузубов Ф.А. Некоторые вопросы взаимодействия радиоволн с реальной земной поверхностью. Рассеяние декаметровых волн на неровных поверхностях конечной проводимости. М. : ИЗМИРАН СССР, 1974. 156 с.