

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Серія: Радіофізика та іоносфера

№ 33 (1066) 2013

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ “ХПІ”, 2013

Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 33 (1066). – 104 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету “ХПІ” внесено до “Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук”, затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).

Координаційна рада:

Л.Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (голова);
К.О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (секретар);
А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є.І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
Є.Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М.Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;
А.І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В.Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;
В.В. Спифанов, канд. техн. наук, проф.; Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;
В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;
О.К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В.І. Николаєнко, канд. іст. наук, проф.;
П.Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;
М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;
Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю.В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.;
Н.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор:

В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар, технічний редактор:

М.В. Ляшенко, канд. фіз.-мат. наук

Члени редколегії: Д.А. Дзюбанов, канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.; І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

Ф.В. Ківва, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О.С. Мазманішвілі, д-р фіз.-мат. наук, проф.;

Є.В. Рогожкін, д-р фіз.-мат. наук, проф.; В.І. Таран, д-р фіз.-мат. наук, проф.;

Г.С. Хрипунов, д-р техн. наук, проф.; Л.Ф. Чорногор, д-р фіз.-мат. наук, проф.;

І.В. Яковенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.

У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету “ХПІ”, серія “Радіофізика та іоносфера”, включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich’s Periodicals Directory (New Jersey, USA).

**Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ “ХПІ”,
протокол № 10 від 22 листопада 2013 р.**

А.В. БОГОМАЗ, н.с., Институт ионосферы, Харьков;
Д.А. ИСКРА, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИМИТАЦИИ НЕКОГЕРЕНТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА

В статье описан разработанный имитатор некогерентно рассеянного сигнала на базе персонального компьютера.

Ключевые слова: некогерентное рассеяние, имитация, тестирование, персональный компьютер.

Введение. Использование звуковой платы (ЗП) персонального компьютера (ПК) в радиофизических исследованиях довольно распространено. В качестве примеров применения ЗП при исследовании ионосферы можно привести реализацию системы наклонного зондирования [1] и экспериментальную систему обработки радара некогерентного рассеяния (НР) [2].

Кроме аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и сигнального процессора в состав ЗП входят не менее двух цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), позволяющих синтезировать аналоговый сигнал звукового диапазона (0,02–20 кГц) практически любой формы. Максимальная частота дискретизации ЗП может достигать 192 кГц, а разрядность оперируемых ею чисел – 32 бит [3]. Это делает ЗП пригодной для формирования сигнала, подобного НР сигналу.

Это необходимо для тестирования аппаратуры и программного обеспечения (ПО) обработки данных радара НР.

Программная составляющая имитатора НР сигнала. Синтез сигнала основан на формировании смеси случайных шумоподобных сигналов (полезного и помехи) с известными спектральными плотностями мощности (СПМ) и отношением сигнал/помеха [4]. Для синтеза сигнала, учитывающего высотные зависимости мощности НР сигнала и параметры ионосферной плазмы, можно использовать основанный на [4] способ [5, 6]. В соответствии с ним мгновенные значения сигнала:

$$S^{\text{сигн+пом}}(t, h) = k(h) \cdot \sum_{i=1}^N \left[A_i^{\text{сигн}}(h) \cdot \sin(\omega_i t + \theta_i) \right] + \sum_{j=1}^M \left[A_j^{\text{пом}}(h) \cdot \sin(\omega_j t + \theta_j) \right],$$

где h – высота, $A_i^{\text{сигн}}(h) = \sqrt{W_i^{\text{сигн}}(h)}$ и $A_j^{\text{пом}}(h) = \sqrt{W_j^{\text{пом}}(h)}$ – амплитуды гармоник, определяемые высотными зависимостями СПМ сигнала и помехи

© А.В. Богомаз, Д.А. Искра, 2013

$W_i^{\text{сигн}}(h)$ и $W_j^{\text{пом}}(h)$, ω_i и ω_j – частоты составляющих, θ_i и θ_j – случайные начальные фазы, равномерно распределённые в интервале $[-\pi; \pi]$, $k(h)$ – нормирующий коэффициент, зависящий от высотного распределения мощности НР сигнала, и необходимый для задания нужного отношения сигнал/помеха. Рассчитывается $k(h)$ до синтеза смеси по формуле:

$$k(h) = \sqrt{q(h)} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M (A_j^{\text{пом}}(h))^2}{\sum_{i=1}^N (A_i^{\text{сигн}}(h))^2}} .$$

Здесь q – отношение сигнал/помеха (сигнал/шум).

Для синтеза сигнала было разработано ПО. На один из каналов ЗП осуществляется вывод сигнала, подобного НР сигналу. На второй канал осуществляется вывод сигнала синхронизации, который подобный импульсу запуска передатчика (ИЗП) радара НР и служит для отсчёта начала новой радиолокационной развёртки.

Аппаратная составляющая имитатора НР сигнала. Имитатор может использоваться совместно с системой обработки радара НР на базе сигнальных процессоров TMS320 [7], с многоканальным программируемым коррелятором [8] и системой обработки на базе модуля АЦП E20-10.

В состав программно-аппаратного комплекса входит один или два персональных компьютера (в зависимости от целей тестирования системы обработки радара НР) и формирователь импульса ИЗП. Структурная схема программно-аппаратного комплекса для имитации НР сигнала показана на рис. 1.

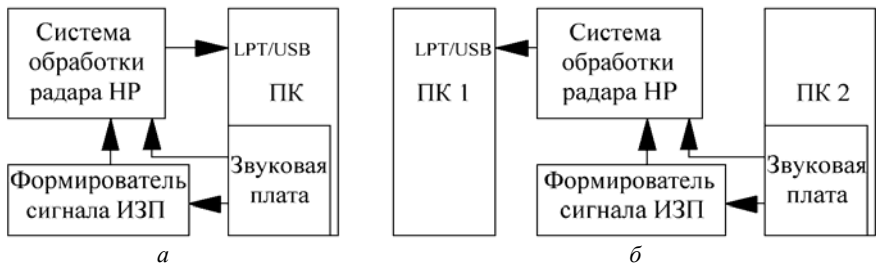


Рис. 1 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса для имитации НР сигнала: а – на базе одного компьютера; б – на базе двух компьютеров

Формирователь сигнала ИЗП (рис. 2), позволяющий получить короткие импульсы ТТЛ-уровня, состоит из транзисторного ключа (транзистор $VТ1$ – BC547A) и триггера Шмитта (микросхема DD1 – 7414).

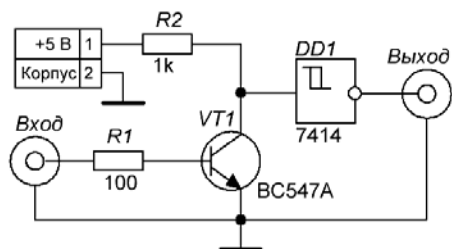


Рис. 2 – Схема принципиальная электрическая формирователя сигнала ИЗП

Результаты работы программно-аппаратного комплекса для имитации НР сигнала. На рис. 3 представлена осциллограмма синтезированных имитатором сигналов. Масштаб по оси x – 5 мс/дел., по оси y – 2 В/дел. Во время, когда сигнал на выходе отсутствует, производится расчёт мгновенных значений смеси следующей радиолокационной развёртки. Продолжительность расчёта зависит от производительности компьютера, задаваемой точности вычисления тригонометрических функций и выбранного числа гармоник, которыми представлены полезный сигнал и шум. В данном моделировании параметры ионосферы были выбраны не изменяющимися с высотой (температура электронов и температура ионов были равны 1000 К, относительное ионов атомарного кислорода – 100%). Отношение сигнал/шум до высоты 1450 км было равно 10, а выше неё – равно нулю (что означает отсутствие полезного сигнала).

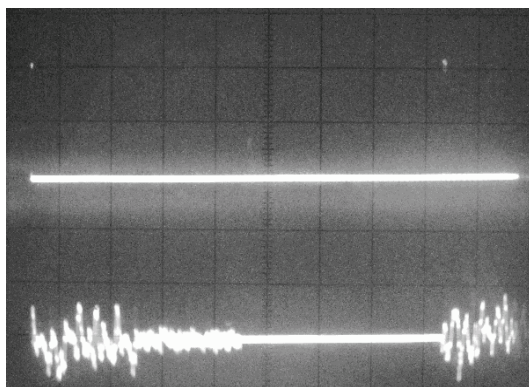


Рис. 3 – Осциллограммы синтезированных сигналов на двухлучевом осциллографе (верхний луч – синтезированный сигнал ИЗП, нижний луч – сигнал, подобный НР сигналу).

Работа имитатора была проверена с системой обработки данных радара НР на базе модуля E20-10. Результаты приведены на рис. 4 и 5.

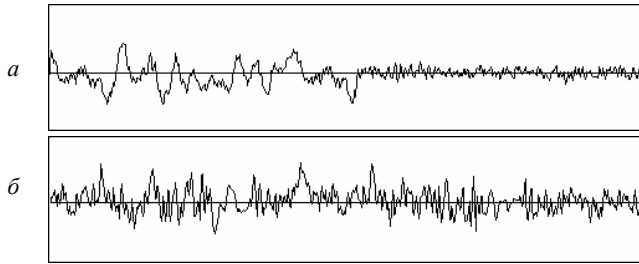


Рис. 4 – Сигналограммы развѳрток: $a - q=10$, $b - q=1$

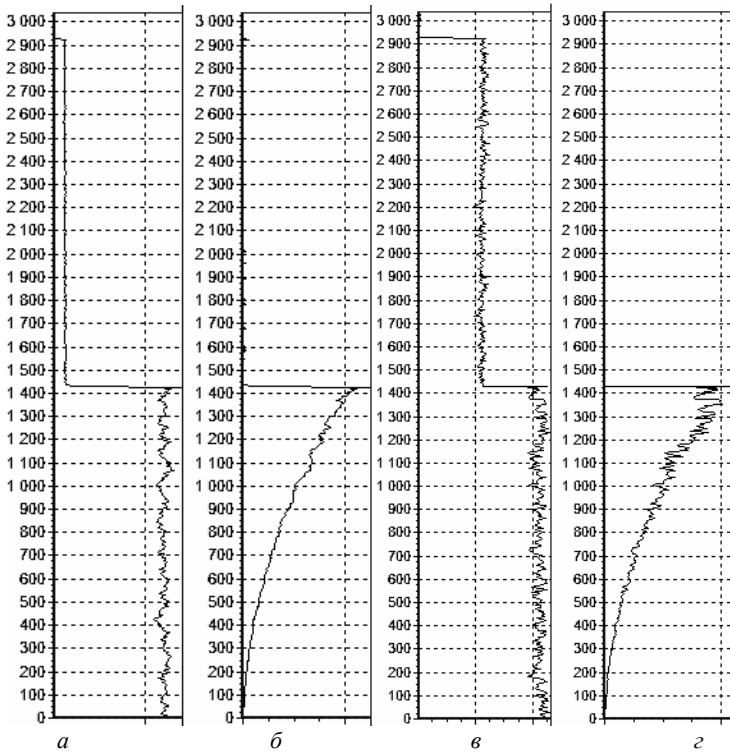


Рис. 5 – Мощность сигнала (a и $б$) и сечение рассеяния ($в$ и $г$) для $q=10$ (a и $б$) и $q=1$ ($в$ и $г$), усреднённые по 1464 радиолокационным развѳрткам

На рис. 4 представлены сигналограммы развѳрток до высоты 3000 км для разных значений отношения сигнал/шум. Количество гармоник, описывающих полезный сигнал, было равным 80. Такое же количество гармоник описывает помеху. Параметры ионосферной плазмы те же, что и в случае сигнала, представленного на рис. 3.

Усреднив мощность сигнала по 1464 развёрткам (что соответствует минутному накоплению во время работы радара), можно рассчитать отношение сигнал шум принятого сигнала q и сечение рассеяния qh^2 . Для рассматриваемых случаев вид высотных зависимостей этих параметров показан на рис. 5.

Выводы. Разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет получать сигналы для настройки и тестирования аппаратной составляющей системы обработки радара НР, а также для отладки ПО.

Создано ПО имитатора (в котором реализованы расчёт СПМ НР сигнала и шума, расчёт мгновенных значений смеси сигнала и шума, вывод сигнала на выход ЗП) и необходимое аппаратное обеспечение в виде формирователя сигнала ИЗП. Комплекс позволит упростить процесс отладки ПО для обработки данных радара НР и повысить точность расчёта параметров ионосферной плазмы.

Список литературы: 1. *Щирый А.О.* Математическое и программное обеспечение комплекса ЛЧМ-зондирования ионосферы / *А.О. Щирый, А.Е. Недопёкин* // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2012. – № 57 (963). – С. 49–56. 2. *Ерёмин А.Н.* Экспериментальная система обработки сигнала, некогерентно рассеянного от ионосферы / *А.Н. Ерёмин* // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Радиофизика и ионосфера». Харьков: НТУ «ХПИ». – №9, т.5. – 2002. – С. 34–36. 3. *Гуж М.Ю.* Аппаратные средства IBM PC. 3-е изд. / *М.Ю. Гуж.* – СПб. : Питер. – 2006. – 1072 с. 4. *Пуляев В.О.* Спосіб імітації суміші шумоподібного сигналу та завади із заданими спектрами / *В.О. Пуляев, О.В. Богомаз, Д.В. Котов* // Патент України на корисну модель UA № 42311. Опубліковано 25.06.2009 в бюл. № 12/2009. 5. *Богомаз О.В.* Спосіб імітації висотного розподілу сигналу некогерентного розсіяння та завади / *О.В. Богомаз* // Патент України на корисну модель UA № 45547. Опубліковано 10.11.2009 в бюл. № 21/2009. 6. *Пуляев В.О.* Імітація сигналів некогерентного розсіяння з урахуванням висотного розподілу іоносферних параметрів, динаміки плазми та заводових складових / *В.О. Пуляев, О.В. Богомаз* // Космічна наука і технологія. – Київ. – 2011. – Т. 17. № 5. – С. 24–28. 7. *Лысенко В.Н.* Программируемый коррелятор для измерения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния / *В.Н. Лысенко* // Вестник ХГПУ. – №31. – 1999. – С. 96–99. 8. *Лысенко В.Н.* Корреляционная обработка сигнала некогерентного рассеяния / *В.Н. Лысенко, А.Ф. Кононенко, Ю.В. Черняк* // Вестник НТУ «ХПИ». – №23. – 2004. – С. 49–62.

Поступила в редколлегию 18.11.2013

УДК 621.396

Программно-аппаратный комплекс для имитации некогерентно рассеянного сигнала / А.В. Богомаз, Д.А. Искра // Вісник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2013. – № 33 (1066). – С. 3-7. Бібліогр.: 8 назв.

У статті описано розроблений імітатор некогерентно розсіяного сигналу на базі персонального комп'ютера.

Ключові слова: некогерентне розсіяння, імітація, тестування, персональний комп'ютер.

In the article an imitator of the incoherent scattered signal based on personal computer is described.

Keywords: incoherent scatter, imitation, testing, personal computer.

Т.А. СКВОРЦОВ, д-р техн. наук, с.н.с., Институт ионосферы, Харьков;
А.В. ФИСУН, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ЭФФЕКТИВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ РАССЕЙНИЯ ЭЛЕКТРОНА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Получены соотношения для расчета поля, рассеянного электроном, а также его эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) с учетом влияния магнитного поля, в котором он находится. Показано, что в диапазоне радиочастот, на которых работают радары дистанционного зондирования ионосферы методом некогерентного рассеяния геомагнитное поле слабо влияет на ЭПР электрона.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, электрон, магнитное поле, ионосферная плазма, поляризация зондирующей волны.

Введение. Параметры некогерентно рассеянного (НР) ионосферой сигнала зависят от геомагнитного поля (ГМП). Зависимость поляризации, а также спектра такого сигнала от ГМП рассмотрены в работах [1], [2], [3]. Однако в известной литературе отсутствуют сведения о зависимости мощности рассеянного сигнала от ГМП. Известно, что ГМП влияет на движение электронов в ионосфере, а значит, оно должно влиять и на их эффективную поверхность рассеяния (ЭПР).

Поэтому **целью** данной работы является получение соотношений для вычисления ЭПР электрона, находящегося в магнитном поле, а также численная оценка влияния ГМП на ЭПР электрона в диапазоне работы радиолокатора НР.

Вывод основных соотношений. Пусть на первоначально неподвижный электрон падает волна, электрическое поле которой равно

$$\mathbf{E} = E_0 \exp\{jk_0 \mathbf{r} - \omega t\}, \quad (1)$$

где k_0 и \mathbf{r} – волновой вектор и радиус-вектор точки нахождения электрона.

Исходя из уравнения для силы Лоренца при гармонически изменяющихся величинах, получаем соотношение для комплексных векторных амплитуд

$$\mathbf{V} = -j\alpha(E_0 + \mathbf{V} \times \mathbf{B}), \quad (2)$$

где $\alpha = \frac{e}{m\omega}$, e , m – заряд и масса электрона. Записывая (2) в виде системы уравнений

$$\begin{aligned} V_x - j\alpha[V_y B_z - V_z B_y] &= -j\alpha E_x, \\ V_y - j\alpha[V_z B_x - V_x B_z] &= -j\alpha E_y, \\ V_z - j\alpha[V_x B_y - V_y B_x] &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

© Т.А. Скворцов, А.В. Фисун, 2013

и, решая эту систему, получим

$$\begin{aligned} V_x &= -j\alpha \frac{A_x E_x + \alpha C E_y}{A_x E_y + \alpha^2 C^2}, \\ V_y &= -j\alpha \frac{A_y E_y + \alpha C E_x}{A_x E_y + \alpha^2 C^2}, \\ V_z &= \alpha^2 \frac{(A_x B_y + \alpha C B_x) E_x + (A_y B_x + \alpha C B_y)}{A_x A_y + \alpha^2 C^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$A_x = (1 - \alpha^2 B_x^2); A_y = (1 - \alpha^2 B_y^2); A_z = (jB_z + B_x B_y).$$

Движение электрона можно рассматривать как эквивалентное элементарному току $\mathbf{j} = e\mathbf{V}$. Рассеянные им поля могут быть рассчитаны по векторному потенциалу $\mathbf{A}_S = \frac{\mathbf{j}}{cR}$, так, что $\mathbf{B}_S = \text{rot } \mathbf{A}_S$, $\mathbf{E}_S = -\mathbf{s} \times \mathbf{B}_S$.

Векторный потенциал рассеянной волны

$$\mathbf{A}_S = \mathbf{j} \frac{r_e}{k_s R} (E_0 + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \exp\{j\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t})\}, \quad (5)$$

где $\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t}) = k_0 \mathbf{r} + k_s(R - \mathbf{r}) - \omega t$, r_e – эффективный радиус электрона, k_s – волновой вектор рассеянной волны, \mathbf{R} – радиус-вектор определяющий точку наблюдения рассеянной волны.

Магнитное поле рассеянной волны определяется по формуле

$$\mathbf{B}_S = \text{rot} \mathbf{A}_S = -\frac{r_e}{R} [\mathbf{s} \times E_0 + \mathbf{s} \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \exp\{j\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t})\}], \quad (6)$$

где \mathbf{s} – орт направления движения рассеянной волны, а ее электрическое поле определяется по формуле

$$\mathbf{E}_S = \frac{r_e}{R} \{ \mathbf{s} \times (\mathbf{s} \times E_0) + \mathbf{s} \times [\mathbf{s} \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B})] \} \exp\{j\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t})\}. \quad (7)$$

Пользуясь соотношениями (6), (7) можно определить вектор Пойнтинга

$$\mathbf{S}_M = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{E}_S \times \mathbf{B}_S^*] \quad (8)$$

и ЭПР электрона с учетом влияния магнитного поля

$$\sigma_{eM} = \sigma_e \frac{\mathbf{S}_M}{S}, \quad (9)$$

где S и σ_e – плотность потока мощности и ЭПР электрона при отсутствии магнитного поля.

Частный случай. Для большинства практических случаев $\alpha B \ll 1$. Исключая слагаемые порядка $(\alpha B)^2$ в числителях и знаменателях (4) получим

$$V_x = -j\alpha E_x + \alpha^2 B_z E_y V_y = -\alpha^2 B_z E_x - j\alpha E_y V_z = 0. \quad (10)$$

Рассмотрим волну, рассеянную в обратном направлении. Тогда, с учетом малости слагаемых порядка $(\alpha B)^2$ из (6), (7), (8) получим

$$\mathbf{E}_S = -\frac{r_e}{R} \left\{ \mathbf{x}_0 (E_x + j\alpha B_z E_y) + \mathbf{y}_0 (E_y + j\alpha B_z E_x) \right\} \exp\{j\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t})\}, \quad (11)$$

$$\mathbf{B}_S = -\frac{r_e}{R} \left\{ \mathbf{y}_0 (E_x - j\alpha E_y B_z) - \mathbf{x}_0 (E_y + j\alpha E_x B_z) \right\} \exp\{j\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t})\}, \quad (12)$$

где $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0$ – орты, ортогональные друг другу и волновому вектору первичной волны, Φ – разность фаз между ортогональными составляющими вектора поля первичной (падающей) волны.

Из (8), (11) и (12) получаем плотность потока мощности

$$|S_M| = \frac{c}{4\pi} \left(\frac{r_e}{R} \right)^2 \left(|\mathbf{E}_x|^2 + |\mathbf{E}_y|^2 - 2\alpha B_z |\mathbf{E}_x| \cdot |\mathbf{E}_y| \sin \varphi \right). \quad (13)$$

При отсутствии магнитного поля (13) сводится к известному результату [1]

$$|S| = \frac{c}{4\pi} \left(\frac{r_e}{R} \right)^2 \left(|E_x|^2 + |E_y|^2 \right). \quad (14)$$

Поскольку ЭПР в данном рассмотрении пропорционально плотности потока мощности, то из (13) и (14) получаем ЭПР электрона, находящегося в магнитном поле

$$\sigma_{eM} = \sigma_e \left(1 - \frac{2\alpha B_z |E_x| |E_y| \sin \varphi}{|E_x|^2 + |E_y|^2} \right), \quad (15)$$

где σ_e – ЭПР электрона при отсутствии магнитного поля.

Заклучение. Полученные соотношения позволяют определить поле волны рассеянной электроном, а также его ЭПР, с учетом влияния магнитного поля.

Как видно из соотношения (15) ЭПР электрона, а значит и объем ионосферной плазмы, зависит от поляризации волны зондирующего радиоимпульса. В частности для линейной поляризации получаем равенство $\sigma_{eM} = \sigma_e$, а для круговой поляризации

$$\sigma_{eM} = \sigma_e (1 \pm \alpha B_z). \quad (16)$$

Например, на рабочей частоте харьковского радиолокатора НР $\sigma_{eM} = \sigma_e (1 \pm 0,008)$ так, что ЭПР электрона на левой и правой круговой поляризациях отличаются приблизительно в 1,016 раз.

Для большинства практических задач зависимость ЭПР электрона от ГМП можно считать пренебрежимо малой.

Список литературы: 1. Брунелли Б.Б., Кочкин М.И., Пресняков И.Н. и др. Метод некогерентного рассеяния радиоволн. – Л.: Наука, 1979. – 188 с. 2. Брунелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 522 с. 3. Ткачев Г.Н. Карлов В.Д. Измерение разности фаз между обыкновенными и необыкновенными компонентами сигнала, рассеянного на тепловых флуктуациях электронной концентрации ионосферы // Вестник Харьковского политехнического института. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. – 1981. – № 183, вып. 3. – С. 18–27.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 550.380

Эффективная поверхность рассеяния электрона в магнитном поле / Т.А. Скворцов, А.В. Фисун // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 8-11. Бібліогр.: 3 нав.

Отримані співвідношення для розрахунку поля, яке було розсіяне електроном, а також його ефективна поверхня розсіяння (ЕПР) з врахуванням впливу магнітного поля, в якому він знаходиться. Показано, що в діапазоні роботи радарів дистанційного зондування іоносфери методом некогерентного розсіяння геомагнітного поля слабо впливає на ЕПР електрона.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, електрон, магнітне поле, іоносферна плазма, поляризація зондувальної хвилі.

Correlations for the calculation of the field that scattered by electron and his cross section (CS) in magnetic response are got. It is shown that in the bandwidth of work of radars of the remote sensing of ionosphere by the method of incoherent scattering the geomagnetic field slight impact on CS of electron.

Keywords: radar of incoherent scatter, electron, magnetic field, ionospheric plasma, polarization of sounding wave.

С.В. ПАНАСЕНКО, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт ионосферы, Харьков;
А.О. МАМЕДОВ, магистр, студент, НТУ “ХПИ”

ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЯХ МОЩНОСТИ НЕКОГЕРЕНТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА

Выявлены временные интервалы, на которых мощность некогерентно рассеянного радиосигнала испытывала квазипериодические вариации с периодами 5 – 120 мин на высотах 100 – 400 км. В предположении, что эти вариации вызваны прохождением перемещающихся ионосферных возмущений, определены их параметры. Показано, что использование зондирующего импульса длительностью 663 мкс приводит к завышенной оценке вертикальной фазовой скорости волновых процессов на нижних высотах.

Ключевые слова: мощность радиосигнала, квазипериодические вариации, волновые процессы, параметры перемещающихся ионосферных возмущений.

Введение. Акустико-гравитационные волны (АГВ) являются важной составляющей динамических процессов в атмосфере Земли. Они играют ключевую роль в переносе импульса и энергии между различными атмосферными областями, способствуя взаимодействию подсистем в системе Земля – атмосфера – геокосмос. АГВ могут генерироваться движением солнечного терминатора, солнечными затмениями, землетрясениями и т. д. Большинство крупномасштабных АГВ возникают в высоких широтах во время вариаций космической погоды и распространяются почти горизонтально к экватору. Источники среднемасштабных АГВ обычно локализованы в нижней атмосфере и представляют собой движения погодных фронтов, грозы, струйные течения и т. д. Кроме естественных, существуют и искусственные источники АГВ, такие как мощные взрывы, старты ракет и модификация ионосферы мощным радиоизлучением (см., например, [1]).

Многообразие источников, а также существенная зависимость параметров АГВ от места наблюдения и гелиогеофизических условий являются причинами отсутствия адекватных моделей этих волновых процессов. Поэтому актуальной является задача обнаружения и оценки параметров АГВ над каждым отдельным регионом земного шара в течение длительного интервала времени и в широком диапазоне высот.

Ионосферными проявлениями АГВ являются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). При прохождении ПИВ имеют место квазипериодические вариации концентрации электронов, температуры ионов и электронов и других ионосферных параметров. Поскольку мощность некогерентно рассеянного (НР) сигнала прямо пропорциональна концентрации электронов, существует принципиальная возможность обнаружения ПИВ с использованием данных харьковского радара НР.

© С.В. Панасенко, А.О. Мамедов, 2013

Результаты предыдущих исследований волновых возмущений в ионосфере с помощью харьковского радара, описаны, в частности, в [2 – 4].

Целью работы является анализ квазипериодических вариаций мощности некогерентно рассеянного сигнала, вызванных прохождением перемещающихся ионосферных возмущений над Харьковом, а также оценка параметров этих возмущений.

Данные и методы их обработки. Для нахождения параметров ПИВ использовались временные зависимости мощности НР радиосигнала, полученные с помощью харьковского радара на протяжении 2010 – 2013 гг. в интервалы времени, близкие к весеннему и осеннему равноденствиям, а также зимнему и летнему солнцестояниям. Эти данные вначале подвергались предварительной фильтрации с целью удаления различных помех в соответствии с методикой, описанной в [5]. Далее проводилась статистическая обработка, приведенная в [2], с небольшими улучшениями. В частности, для вычисления тренда использовалась аппроксимация мощности НР сигнала полиномом 3-го порядка по методу наименьших квадратов на интервале времени 120 мин с шагом 1 мин. Это позволило более эффективно отфильтровать аperiodические вариации сигнала, чем при нахождении тренда методом скользящего среднего, как описано в [2]. Однако, при этом также происходит некоторое уменьшение амплитуд квазипериодических процессов. Сравнение результатов, полученных с помощью приведенной в [2] и слегка модифицированной статистической обработки представлены на рис. 1 и 2.

При последующем анализе определялись интервалы времени, на которых мощность НР сигнала испытывала квазипериодические вариации длительностью не менее двух периодов и в широком диапазоне высот. Для уточнения параметров этих возмущений применялась полосовая фильтрация с использованием цифрового фильтра [6].

Результаты и обсуждение. На рис. 3 представлены примеры высотно-временных зависимостей относительных вариаций мощности НР сигнала совместно с отношением сигнал / шум q , полученных при зондировании ионосферы радиоимпульсом длительностью $\tau \approx 135$ мкс (высотное разрешение $\Delta h \approx 20$ км) для двух исследуемых суток. Как видно из рисунка, на фоне случайных вариаций мощности, четко прослеживаются ее квазипериодические вариации особенно на высотах 150 – 300 км. При этом имеет место запаздывание фазы колебаний с уменьшением высоты, а также некоторое увеличение их относительных амплитуд вблизи утреннего и вечернего солнечного терминаторов. Интересно, что такое же поведение присуще и высотным профилям q (см. рис. 3).

Подобные фазовые профили имеют и наблюдаемые различными авторами АГВ / ПИВ, если их источники расположены на Земле либо в нижней атмосфере, а вертикальная групповая скорость направлена вверх (см., например, [7 – 10]).

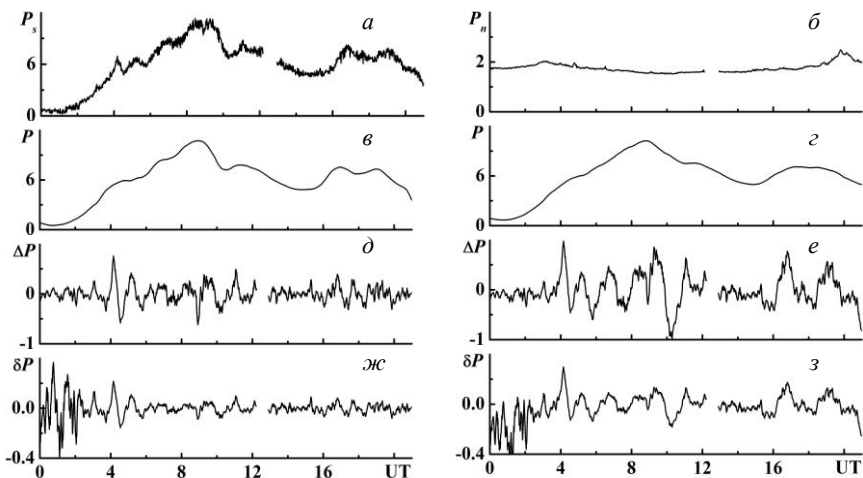


Рис. 1 – Этапы статистической обработки данных радара НР, полученных 29 августа 2012 г. для высоты 255 км: временные зависимости мощности сигнала (*a*) и шума (*б*); тренды, найденные с помощью аппроксимации полиномом 3-го порядка (*в*) и методом скользящего среднего (*з*); абсолютные (*д*, *е*) и относительные (*жс*, *з*) вариации мощности НР сигнала, вычисленные с использованием трендов, найденных аппроксимацией полиномом 3-го порядка (*д*, *жс*) и методом скользящего среднего (*е*, *з*)

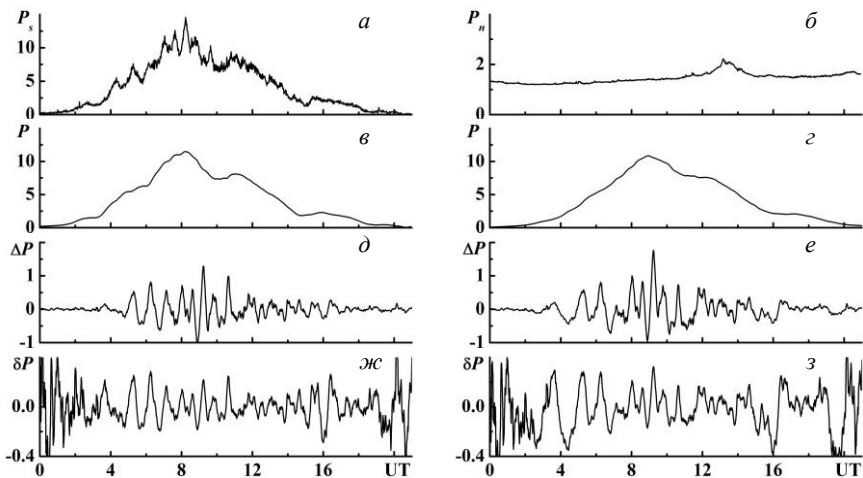


Рис. 2 – То же, что и на рис. 1, для 23 ноября 2012 г. и высоты 225 км

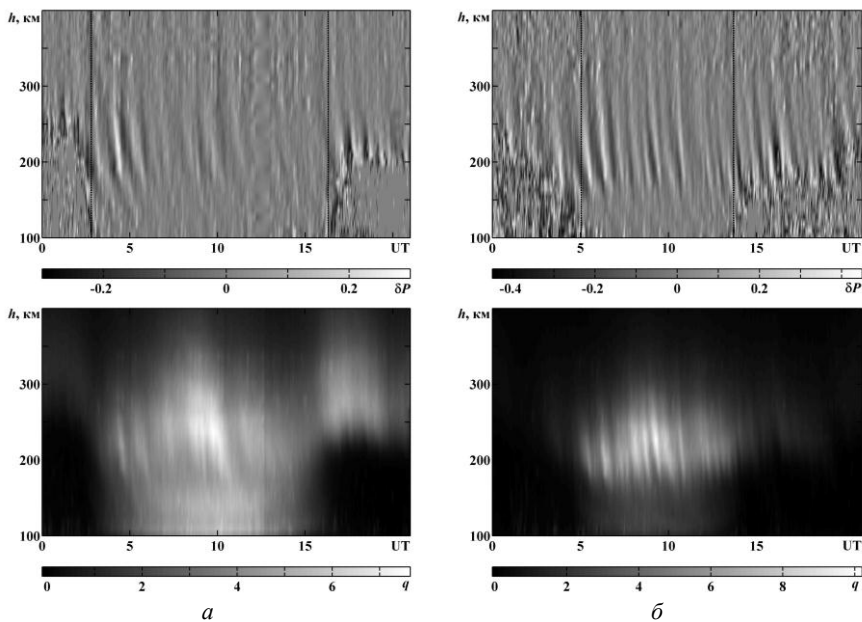


Рис. 3 – Относительные вариации мощности НР сигнала (верхняя панель) и отношение сигнал / шум (нижняя панель) для 29 августа (*а*) и 23 ноября (*б*) 2012 г. Вертикальными пунктирными линиями показано прохождение утреннего и вечернего солнечного терминаторов на поверхности Земли.

В предположении, что обнаруженные квазипериодические вариации мощности вызваны прохождением АГВ / ПИВ над местом наблюдения, нами были оценены относительные амплитуды δ_m , вертикальные фазовые скорости v_z и вертикальные длины волн λ_z последних. Результаты этих оценок для двух суток представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что 29 августа и 23 ноября 2012 г. значения δ_m лежали в пределах 0,03 – 0,15. С ростом высоты эти амплитуды вначале увеличивались за счет уменьшения плотностей нейтральной и ионизирующей составляющих атмосферы, достигали максимума на высотах 180 – 250 км и далее уменьшались за счет усиления роли молекулярной вязкости, теплопроводности и амбиполярной диффузии. С этими процессами связано увеличение с ростом высоты вертикальных фазовой скорости и длины волны, которые к тому же еще повышались за счет увеличения скорости звука [11]. Значения v_z обычно лежали в пределах 50 – 200 м/с, а λ_z – 100 – 900 км (см. рис. 4).

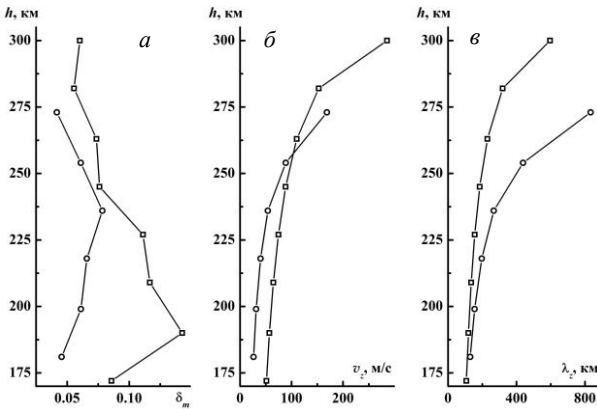


Рис. 4 – Высотные профили относительных амплитуд (а), вертикальных фазовой скорости (б) и длины волны (в) для ПИВ, обнаруженных 29 августа 2012 г. (кружки), $T \approx 85$ мин и 23 ноября 2012 г. (квадраты), $T \approx 35$ мин

Основным недостатком при зондировании ионосферы импульсами с $\tau \approx 135$ мкс является невозможность определения температур электронов и ионов. Поэтому данный импульс используется лишь как дополнительный, а основным является импульс с $\tau \approx 663$ мкс [12].

На рис. 5 представлены высотные зависимости v_z ПИВ, оцененные по данным, полученным одновременно с помощью этих двух импульсов.

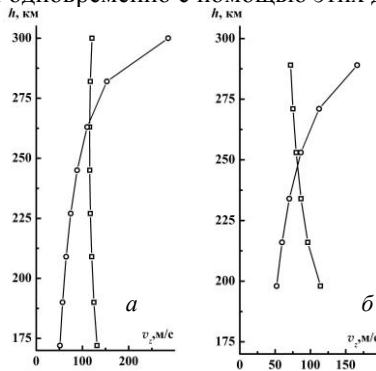


Рис. 5 – Сравнение оценок вертикальной фазовой скорости ПИВ в диапазоне периодов: а – 20 – 40 мин и б – 40 – 80 мин, полученных 23 ноября 2012 г. с использованием зондирующих радиимпульсов с $\tau \approx 135$ мкс (кружки) и $\tau \approx 663$ мкс (квадраты)

Как видно из рисунка, значение v_z , оцененное по данным, полученным с помощью импульса с $\tau \approx 663$ мкс в среднем близко к 100 м/с и слабо зависит от высоты. На высотах 170 – 250 км имеет место завышение v_z на 70 – 20 м/с, а на высотах 250 – 300 км – ее занижение на величину вплоть до 150 м/с. Действительно, при импульсном зондировании оценивается

среднее значение v_z . При $\tau \approx 663$ мкс $\Delta h \sim \lambda_z$ и имеет место более существенное различие между оценкой и реальным значением v_z , чем в случае применения импульса с $\tau \approx 135$ мкс, для которого $\Delta h < \lambda_z$. Этот факт необходимо учитывать при оценке параметров ПИВ температур электронов и ионов, а также ПИВ концентрации электронов, если данные, полученные с помощью радиоимпульса с $\tau \approx 135$ мкс, имеют низкие значения q (см. рис. 3).

Выводы. Таким образом, анализ квазипериодических вариаций мощности некогерентно рассеянного сигнала в широком диапазоне высот позволяет обнаружить перемещающиеся ионосферные возмущения и оценить их параметры. Показано, что эти возмущения в диапазоне периодов 5 – 120 мин на высотах 100 – 400 км имеют относительные амплитуды 0,03 – 0,15; вертикальные фазовые скорости 50 – 200 м/с и вертикальные длины волн 100 – 900 км. Выявлено существенное завышение оценки вертикальной фазовой скорости на низких высотах (100 – 250 км) при использовании данных, полученных с помощью зондирующего импульса длительностью 663 мкс.

Список литературы: 1. Chernogor L.F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes / L.F. Chernogor // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – V. 32, No 11. – P. 3199 – 3218. 2. Бурмака В.П. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния / Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 4 – 35. 3. Burmaka V.P. Wave Activity in the Ionosphere during the Magnetospheric Storm of November 7 – 10, 2004 / V.P. Burmaka, L.F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2011. – V. 51, No 3. – P. 305 – 320. 4. Domnin I.F. Results of Radiophysical Study of Wave Disturbances in the Ionospheric Plasma During Its Heating by High-Power HF Radio Transmission of “Sura” facility / I.F. Domnin, S.V. Panasenko, V.P. Uryadov, L.F. Chernogor // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2012. – V. 55, No 4. – P. 253 – 265. 5. Панасенко С.В. Фильтрация временных вариаций мощности некогерентно рассеянного сигнала при наличии нерегулярных помех и сбоях аппаратуры / С.В. Панасенко // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Радіофізика та іоносфера. – 2011. – № 44. – С. 40 – 44. 6. Лизунов Г.В. Спектральный анализ спутниковых измерений атмосферных гравитационных волн / Г.В. Лизунов, А.А. Кузьмич // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Радіофізика та іоносфера. – 2010. – № 48. – С. 57 – 63. 7. Tedd B.L. The Height Dependence of TID and Gravity Wave Parameters / B.L. Tedd, M.G. Morgan, K.A. Ballard // J. Geophys. Res. – 1984. – V. 89, No A9. – P. 9023 – 9033. 8. Hocke K. Phases and amplitudes of TIDs in the high latitude F-region observed by EISCAT / K. Hocke, K. Shlegel, G. Kirchengast // J. Atm. Terr. Phys. – 1996. – V. 58, No 1 – 4. – P. 245 – 255. 9. Medvedev A.V. Method for Studying the Spatial-Temporal Structure of Wave-Like Disturbances in the Ionosphere / A.V. Medvedev, K.G. Ratovsky, M.V. Tolstikov, D.S. Kushnarev // Geomagnetism and Aeronomy. – 2009. – V. 49, No 6. – P. 775 – 785. 10. Djuth F.T. Arcibo’s thermospheric gravity waves and the case for an ocean source / F.T. Djuth, L.D. Zhang, D.J. Livneh et al. // J. Geophys. Res. – 2010. – V. 115, A08305, doi:10.1029/2009JA014799. 11. Брюнелли Б.Е. Физика ионосферы. / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 522 с. 12. Пуляев В.А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Пуляев В.А., Дзюбанов Д.А., Домнин И.Ф. – Х.: Підручник, 2011. – 240 с.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

Виявлення рухомих іоносферних збурень у квазіперіодичних варіаціях потужності некогерентно розсіяного сигналу / С.В. Панасенко, А.О. Мамедов // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 12-18. Бібліогр.: 12 назв.

Виявлено часові інтервали, на яких потужність некогерентно розсіяного сигналу мала квазіперіодичні варіації з періодами 5 – 120 хв на висотах 100 – 400 км. За припущення, що ці варіації викликані проходженням рухомих іоносферних збурень, визначені їх параметри. Показано, що використання зондуючого імпульсу тривалістю 663 мкс призводить до суттєво завищеної оцінки вертикальної фазової швидкості хвильових процесів на нижніх висотах.

Ключові слова: потужність радіосигналу, квазіперіодичні варіації, хвильові процеси, параметри рухомих іоносферних збурень.

Time intervals with incoherent scatter signal power varying quasi-periodically with periods of 5 – 120 min at altitudes between 100 km and 400 km are detected. Assuming these variations are caused by passage of travelling ionospheric disturbances, their parameters are estimated. Using a 663 μ s transmitted pulse is shown to result in overestimation of vertical phase velocity of wave processes at low altitudes.

Keywords: radio signal power, quasi-periodic variations, wave processes, parameters of travelling ionospheric disturbances.

В.П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, проф., проф., НТУ “ХПІ”;
О.М. НІКУЛІНА, канд. техн. наук, доц., НТУ “ХПІ”;
М.І. АХТИРЦЕВ, студент, НТУ “ХПІ”

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ОДНОСТУПЕНЕВОГО ГЕНЕРАТОРА ІМПУЛЬСІВ НАПРУГИ

З використанням законів Кірхгофа розроблена математична модель одноступеневого генератора імпульсів напруги в режимі розряду. На основі створеної математичної моделі запропоноване програмне забезпечення для імітаційного моделювання електричних процесів у генераторі.

Ключові слова: генератор імпульсів напруги, математична модель, диференціальні рівняння, системний метод інтегрування, імітаційне моделювання, програмне забезпечення.

Вступ. З появою потужної комп'ютерної техніки вчені й винахідники значно прискорили впровадження теоретичних досліджень у технічні об'єкти. Головним інструментом цього прискорення є імітаційне моделювання фізичних процесів математичними методами. В галузі математичного моделювання є актуальним дослідження процесів, які мають місце в радіоелектронних схемах, що призначені для генерації потужних короткострокових електричних імпульсів [1, 2]. Перехідні процеси в таких схемах протікають занадто швидко і зареєструвати їх фізичними інструментами та дослідити практично неможливо [3]. Великі матеріальні затрати на проведення таких експериментів не дозволяють виконувати їх багаторазово, що також викликає доцільність методів математичного моделювання [4]. Найбільш поширеними серед потужних електричних генераторів є багатокаскадні генератори імпульсів напруги (ГІН) – генератори Маркса [1, 2]. Генератор Маркса – це генератор електричних імпульсів високої напруги, принцип дії якого заснований на заряді електричним струмом з'єднаних паралельно конденсаторів, які після заряду миттєво з'єднуються послідовно за допомогою швидких комутуючих пристроїв, наприклад, газових розрядників.

Удосконалена схема генератора Маркса, що включає суттєві паразитні електричні елементи, які впливають на формування швидкоплинних потужних імпульсів напруги, запропонована Г.Г. Губаревим [5]. Але ця схема дуже важка для математичного моделювання, тому доцільно з неї виділити один каскад для попередніх досліджень. Оскільки потужні генератори електричних імпульсів є досить складними радіоелектронними приладами з багатьма електричними елементами, їх математичні моделі представляють жорсткі системи диференціальних рівнянь (СДР) високого порядку. Одним з

© В.П. Северин, О.М. Нікуліна, М.І. Ахтирцев, 2013

ефективних методів для розв'язання жорстких СДР є системний метод інтегрування, заснований на обчисленні матричної експоненти та її інтегралу, з нескладним алгоритмом реалізації [6].

Мета статті полягає в представленні математичної моделі та програмного забезпечення для імітаційного моделювання електричних процесів в потужному одноступеневому генераторі імпульсів напруги.

Математична модель генератора імпульсів напруги. Для розробки математичної моделі ГН, вибрана удосконалена одноступінчата схема генератора, що зображена на рис. 1 [5].

На цій схемі позначені еквівалентні параметри генератора: R_s, L_s, C_s – параметри розрядного конденсатора; R_f, C_f – параметри розрядника; R_d, L_d – параметри демпфуючого опору; R_l, L_l – параметри зарядного опору; R_e, L_e – параметри розрядного опору; C_1 – ємність елемента, що має зарядний потенціал під час заряду; C_2 – ємність елемента, що має нульовий потенціал під час розряду; K_1 – ємність елемента між ступенями, що мають зарядний потенціал під час заряду; K_2 – ємність елементів між ступенями, що мають нульовий потенціал під час розряду; R_b і L_b – еквівалентні параметри навантаження. За законами Кірхгофа, а також на основі резистивної моделі розрядника, складена математична модель генератора у вигляді алгоритму, де індекси струму i та напруги U відповідають елементам схеми на рис. 1.

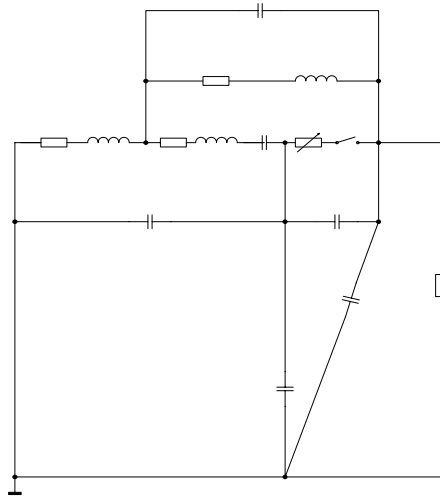


Рис. 1 – Електрична схема одноступінчатого генератора

Крок 1. Задати значення параметрів і початкові умови: $C_s, C_f, C_1, C_2, K_1, K_2, L_s, L_d, L_e, L_b, R_s, R_d, R_e, R_c, R_d, R_{min}, d, K_T, U_s, K_{Q_e}, i_s = i_d = i_e = i_b = i_f = 0, U_{C_s} = U_{C_f} = U_s, U_{K_2} = 0, U_{C_1} = -U_s, Q = 0$.

Крок 2. Обчислити значення допоміжних параметрів: $C_{si} = 1/C_s, K_{2i} = 1/K_2, L_{bi} = 1/L_b, L_{di} = 1/L_d, L_{ei} = 1/L_e, L_{si} = 1/L_s, K_{di} = 1/(K_T \cdot d),$

$$U_{f \max} = 1,2 \cdot U_s, \quad Q_0 = K_{Qe} \cdot C_s \cdot U_s, \quad G_{\max} = 1/R_{\min}, \quad C_{11} = K_1 - C_1, \\ C_c = C_2 + C_f.$$

Крок 3. Обчислити провідність розрядника $G = Q \cdot K_{di}$ і якщо $G > G_{\max}$, то покласти $G = G_{\max}$; обчислити $i_f = -U_{cf} \cdot G$ і скласти рівняння $dQ/dt = |i_f|$.

Крок 4. Обчислити $U_{c2} = U_{cf} + U_{c1}$ і сформуванати рівняння струмів:

$$\begin{cases} di_s/dt = (U_{cf} - U_{k2} - U_{cs} - R_s \cdot i_s) \cdot L_{si}, \\ di_d/dt = (U_{k2} - U_{c2} - R_d \cdot i_d) \cdot L_{di}, \\ di_e/dt = (U_{k2} - R_e \cdot i_e) \cdot L_{ei}, \\ di_b/dt = (U_{c2} - R_b \cdot i_b) \cdot L_{bi}. \end{cases}$$

Крок 5. Обчислити $i_{k2} = i_s - i_d - i_e$ та скласти рівняння напруг:

$$\begin{cases} dU_{cs}/dt = i_s \cdot C_{si}, \\ dU_{k2}/dt = i_{k2} \cdot K_{2i}. \end{cases}$$

Крок 6. Сформуванати матрицю ємностей

$$A = \begin{pmatrix} C_f & C_{11} \\ C_c & C_2 \end{pmatrix}.$$

Крок 7. Скласти рівняння напруг, що не розв'язані відносно похідних:

$$A \cdot \begin{pmatrix} dU_{cf}/dt \\ dU_{c1}/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_f - i_s \\ i_f - i_e - i_{k2} - i_b \end{pmatrix}.$$

Унаслідок нелінійності розрядника ця модель генератора є нелінійною.

Програмне забезпечення для моделювання процесів у генераторі.

Оскільки програмне забезпечення є специфічним та його алгоритмізація в цілому складна задача, програма моделювання генератора розкладена на блоки і представлена у вигляді структурної схеми, яка зображена на рис. 2.

Конструктивно програма поділена на шість блоків, які логічно завершені. Кожен блок описує відповідний етап обробки даних, створює умови для подальшого виконання загального алгоритму програми. Програма розпочинається з блоку введення і початкової обробки інформації. Підпрограма читання та запису значень параметрів генератора виконує зчитування та запис значень параметрів генератора, зчитування та запис масштабних коефіцієнтів, масштабування параметрів, завдання початкових

умов.

Блок основних розрахунків об'єднує чотири блоки: формування вектора змінних, формування СДР, формування матриці ємностей, розв'язання СДР. Блок формування вектора змінних – частина програми, яка формує набір змінних для розрахунків і графічного відображення. Блок формування СДР реалізований процедурою *ModGin*, у якій формується рівняння розрядника, рівняння струмів та рівняння напруг. Останній розрахунковий блок – блок розв'язання СДР у вигляді процедури *Proc*, де вхідними параметрами є файл запису результату, а також посилання на процедури формування СДР і вектора змінних. В даній процедурі реалізований системний метод першого ступеня.

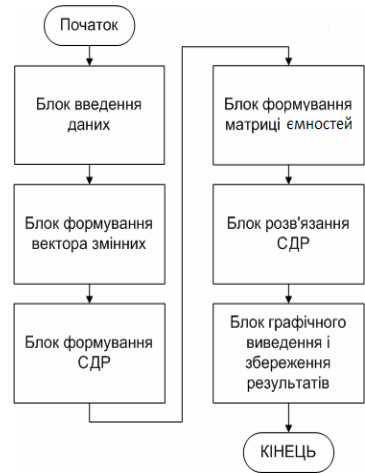


Рис. 2 – Структурна схема

Блок графічного відображення реалізовано в головному тілі програми, а також в модулі *Graf*. В ході виконання процедури *Proc* формується матриця, де в першому рядку записані моменти часу, а в стовпцях – відповідні значення графічних змінних.

Однією з найважливіших задач при розробці програмного забезпечення моделювання генератора є задача створення інтерфейсу користувача для зручної, а головне – швидкої й точної роботи дослідника.

При завантаженні програми перед користувачем з'являється розгорнуте на весь екран вікно, яке включає пункти меню «Дані», «Розрахувати», «Вихід». У вікні представлена схема одноступеневого генератора імпульсів напруги та кнопки для розрахунку: з даними за замовченням; з останніми даними, які були введені раніше; з новими даними, які вводяться користувачем програми. При виборі режиму ручного введення з'являється поле для введення значень параметрів генератора, показано на рис. 3.

Відображені три поля, які розділені на ємності, індуктивності та опори. Кожна клітинка поля має свою назву, що відповідає елементу, зображеному на схемі. При наведенні курсору на клітинку з'являється підказка з діапазоном можливих значень, тому що при неконтрольованому введенні даних модель становиться нестабільною і не має розв'язків. Щоб ввести зміст в клітинку, необхідно просто на неї натиснути. При введенні всієї інформації можна натиснути на кнопку «Розрахувати», але перед початком розрахунків програма перевіряє правильність всіх введених даних: відсутність зайвих символів, друкарські помилки та відповідність значень допустимим

інтервалам. Коли всі умови введення даних вірні, програма переходить до етапу розрахунків.

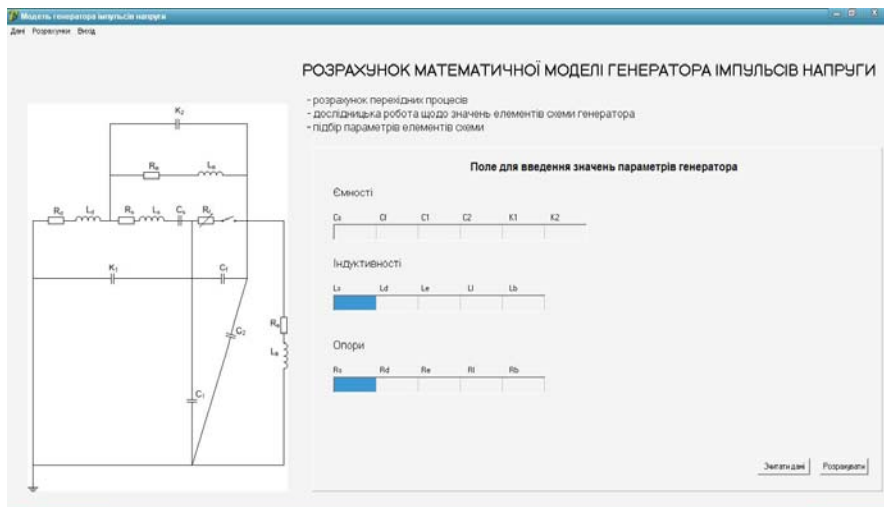


Рис. 3 – Вікно для введення значень параметрів генератора

При натисканні на кнопку «Розрахувати», програма розпочинає імітаційне моделювання, результатом якого є масив точок, що описують значення змінних системи СДР. Цей масив зберігає значення перехідних процесів в певний період часу. Тому наступним пунктом користувацького інтерфейсу є форма з графіком перехідних процесів та списком редагування графіків, а також з текстовим полем координат. Дана форма представлена на рис. 4. Показані перехідні процеси, що відбуваються в генераторі, а також їхню назву з легенди. Програмне забезпечення дозволяє переглянути всі точки будь-якого графіка в числовому форматі.

Висновки. З використанням законів Кірхгофа та нелінійної математичної моделі газового розрядника розроблена математична модель одноступеневого генератора імпульсів напруги в режимі розряду у вигляді алгоритму для формування жорсткої системи диференціальних рівнянь. Для розв'язання створеної системи використано системний метод першого ступеня. Представлена структурна схема програмного забезпечення, яке дозволяє проводити імітаційне моделювання генератора імпульсів напруги. Конструктивно розроблені складові частини програми – підпрограми початкової обробки інформації, операцій матричної алгебри, методів розрахунку матричної експоненти та її інтегралу, системного методу першого ступеня та інші. Розроблений користувацький інтерфейс, що дозволяє значно спростити роботу дослідника в проведенні моделювання.

Я.Н. ЧЕПУРНЫЙ, гл. инж., Институт ионосферы, Харьков;
Г.М. ТИНЯКОВ, вед. инж.-электроник, Институт ионосферы, Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОМБИЧЕСКИХ АНТЕНН ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ “БАЗИС”

Проведено компьютерное моделирование ромбических антенн станции вертикального зондирования ионосферы “Базис” поддиапазонов 1 – 6 МГц и 5 – 20 МГц. Проанализированы полученные технические характеристики. Определена оптимальная частота переключения станции между антеннами двух поддиапазонов.

Ключевые слова: вертикальное зондирование ионосферы, ромбическая антенна, компьютерное моделирование.

Введение. Станция вертикального зондирования “Базис” входит в состав радара некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы и предназначена для исследования параметров ионосферы на высотах ниже максимума ионизации [1, 2]. Антенно-фидерное устройство (АФУ) станции состоит из двух приёмных и двух передающих ромбических антенн линейной поляризации. Функциональная схема АФУ приведена на рис. 1.

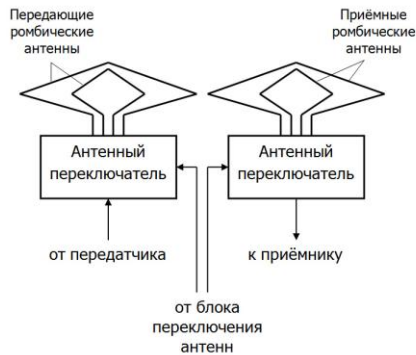


Рис. 1 – Функциональная схема АФУ станции “Базис”

Рабочий диапазон частот 1 – 20 МГц разбит на два поддиапазона: 1 – 6 МГц (большой ромб) и 5 – 20 МГц (малый ромб). Подключение антенн требуемого поддиапазона осуществляется электромеханическими антенными переключателями. Для увеличения развязки приём – передача приёмные и передающие антенны расположены в пространстве ортогонально. Пространственное расположение антенн приведено на рис. 2. Высота центральной мачты – 24 м. Четыре боковых мачты высотой 13.5 м

© Я.Н. Чепурный, Г.М. Тиняков, 2013

установлены на расстоянии 50 м от центральной. Длины сторон большого ромба – 51 м, малого – 22 м.

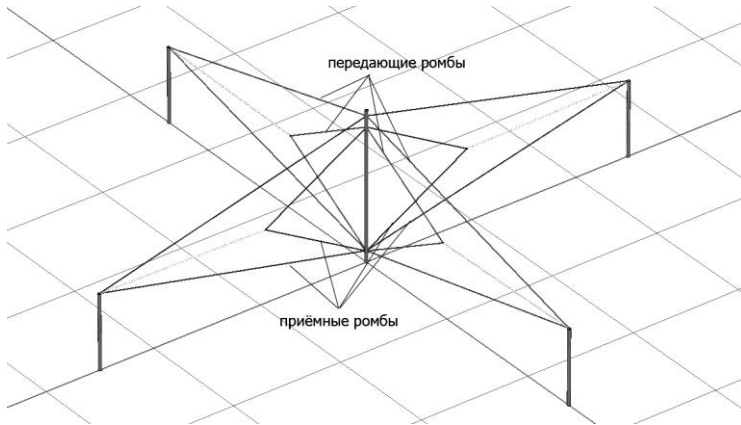


Рис. 2 – Пространственное расположение приёмных и передающих антенн

Подключение приемных и передающих фидеров осуществляется в нижней части ромбов с помощью симметрирующих устройств. В вершине каждого ромба установлено согласующее сопротивление номиналом 600 Ом.

Цель статьи – определение и анализ технических характеристик ромбических антенн двух поддиапазонов, выработка рекомендаций относительно частоты переключения станции с большой ромбической антенны на малую.

Моделирование ромбических антенн проводилось с помощью программы MMANA-GAL Basic, использующей метод моментов [3]. Большой и малый ромб моделировались отдельно. Материал проводов – медь, диаметр всех проводов 6 мм. Модели учитывают отражение от поверхности земли. Земля задана – “реальная”, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 13$, проводимость $\sigma = 5$ мСм/м. Конструктивные размеры антенн в моделях соответствуют приведенным в документации, дополнительно проведены их контрольные замеры.

На рис. 3 приведены полученные в результате моделирования частотные зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) для большого и малого ромбов. КСВН определялся по отношению к волновому сопротивлению $W = 600$ Ом. Для большого ромба КСВН не превышает 2.6 в диапазоне частот 1 – 6 МГц, для малого – КСВН не превышает 1.92 на частотах 5 – 20 МГц. Волнообразный характер кривых КСВН связан с конструктивными размерами сторон большого и малого ромбов, а также влиянием отражений от поверхности земли.

На рис. 4 приведены частотные зависимости коэффициента усиления G большого и малого ромба. Видно, что усиление большого ромба не

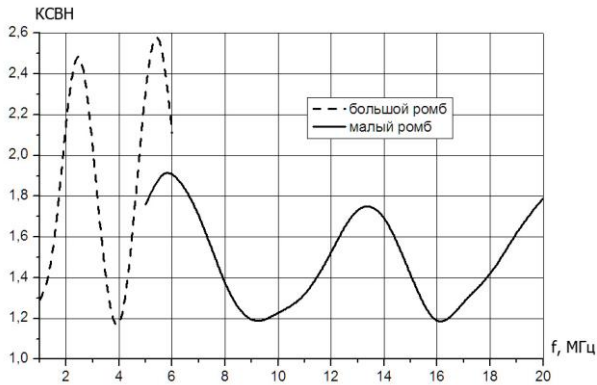


Рис. 3 – Частотная зависимость КСВН ромбических антенн станции “Базис”

превышает 5.5 дБ, а малого 8 дБ. На частоте 5 МГц коэффициенты усиления большого и малого ромбов равны, на участке от 5 до 6 МГц коэффициент усиления большого ромба резко снижается с 2 дБ до –5 дБ. Таким образом, целесообразно проводить переключение антенн с большого ромба на малый на частоте 5 МГц.

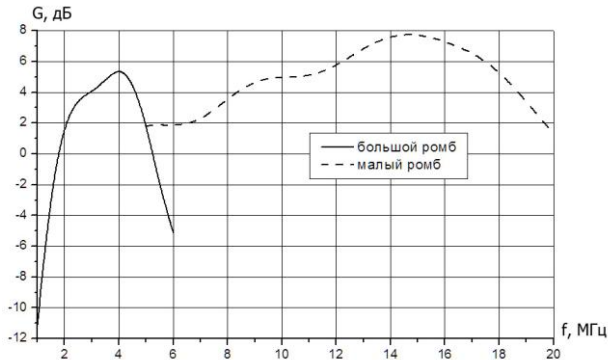


Рис. 4 – Частотная зависимость коэффициента усиления

На рис. 5 и 6 приведены трехмерные диаграммы направленности (ДН) большого и малого ромбов на ряде частот диапазона. Видно, что уменьшение коэффициента усиления в направлении зенита в верхней части каждого из поддиапазонов связано с возрастанием уровня боковых лепестков ДН. Боковые лепестки становятся существенными на частотах выше 4 МГц для большого и выше 12 МГц – для малого ромба.

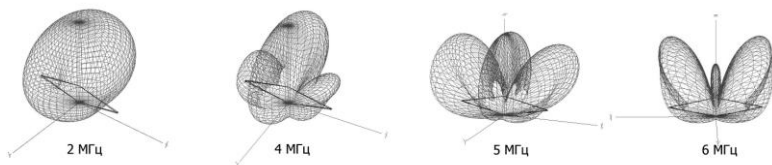


Рис. 5 – ДН антенны “большой ромб”

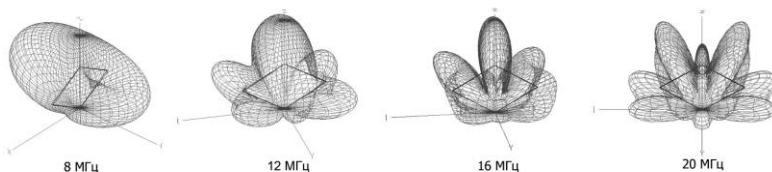


Рис. 6 – ДН антенны “малый ромб”

Выводы. Проведенное компьютерное моделирование позволило определить основные технические характеристики ромбических антенн станции “Базис”. Установлено, что оптимальная частота переключения антенн станции с большого ромба на малый ромб равна 5 МГц.

Список литературы: 1. *В.Н. Лысенко, И.Б. Скляров.* Перспективы применения ионозонда в составе радара некогерентного рассеяния Института ионосферы // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – № 23. – С. 63 – 68. 2. *В.В. Барабаш, И.Б. Скляров.* Станция вертикального зондирования Института ионосферы. // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Автоматика и приборостроение. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – № 23. – С. 7 – 12. 3. *Гончаренко И.В.* Антенны КВ и УКВ. Часть 1. Компьютерное моделирование. ММАНА - М.: ИП РадиоСофт, 2004 – 128 с.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 621.396.677.43

Моделирование ромбических антенн ионосферной станции “Базис” / Я.Н. Чепурный, Г.М. Тиняков // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 25-28. Бібліогр.: 3 назв.

Проведено комп’ютерне моделювання ромбічних антен станції вертикального зондування іоносфери “Базис” піддіапазонів 1 – 6 МГц та 5 – 20 МГц. Проаналізовано отримані технічні характеристики. Визначена оптимальна частота перемикання станції між антенами двох піддіапазонів.

Ключові слова: вертикальне зондування іоносфери, ромбічна антена, комп’ютерне моделювання.

A computer simulation of the rhombic antennas of ionosonde “Basis” for operation in the subbands 1-6 MHz and 5-20 MHz was performed. The obtained antenna specifications were analyzed. The optimal frequency of switching between antennas for two subbands was evaluated.

Keywords: vertical sounding of the ionosphere, the rhombic antenna, computer simulation.

С.В. КАЦКО, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков;
Л.Ф. ЧЕРНОГОР, д-р физ.-мат. наук, проф., ХНУ имени В.Н. Каразина,
Харьков

ОСОБЕННОСТИ ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ ВО ВРЕМЯ СВЕРХСИЛЬНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 5–6 АВГУСТА 2011 Г. НАД ХАРЬКОВОМ

Приведены результаты исследования отклика области F и внешней ионосферы на сверхсильную геомагнитную бурю 5–6 августа 2011 г. Наблюдения проведены с помощью радара некогерентного рассеяния в Харькове. Рассмотрены основные механизмы, формирующие изменения в ионосферной плазме во время бури.

Ключевые слова: ионосферная плазма, некогерентное рассеяние, магнитная буря, возмущение.

Введение. Многообразие процессов в геокосмосе и сложность их взаимодействия [1, 2] делают индивидуальной каждую магнитную бурю, что, в свою очередь, затрудняет прогнозирование ее развития. Анализ каждой новой бури дает дополнительную информацию для представления полной картины физических процессов, которые ее формируют.

Цель работы – рассмотрение основных механизмов, формировавших изменения в ионосферной плазме во время сверхсильной магнитной бури 5–6 августа 2011 г.

Результаты исследования. Исследования магнитной бури (МБ) 5–6 августа 2011 г. проводились на харьковском радаре некогерентного рассеяния [3], предназначенного для получения параметров ионосферы в различных геофизических условиях на средних широтах центрально-европейского региона в широком диапазоне высот.

МБ началась внезапно 5 августа в 19:03 UT (здесь и далее время в формате UT) [4]. Главная фаза бури имела место с 20:00 5 августа до 04:00 6 августа 2011 г. На рис. 1 представлены временные вариации индексов геомагнитной активности в период с 4 по 9 августа 2011 г.: $AE_{\max} = 1741$ нТл, $K_p_{\max} = 8-$, $D_{st\min} = -113$ нТл. По классификации [5, 6] МБ относится к сверхсильным бурям.

Над Харьковом МБ сопровождалась отрицательной ионосферной бурей (ИБ) с 6 по 7 августа (подробное описание см. [4, 7]). Относительное отклонение критической частоты максимума слоя F2 достигало -45% .

С началом МБ высота максимума слоя F2 z_mF2 начала подниматься (см. рис. 2) и около 23:00 5 августа (главная фаза МБ) достигала 510 км, что на 170–190 км больше, чем при невозмущенных условиях. При этом относительное отклонение δz_mF2 составило около 60% . Рост z_mF2

© С.В. Кацко, Л.Ф. Черногор, 2013

наблюдался и 6 августа. Высота $z_m F2$ увеличилась до ~ 320 км (при невозмущенных условиях ~ 250 км).

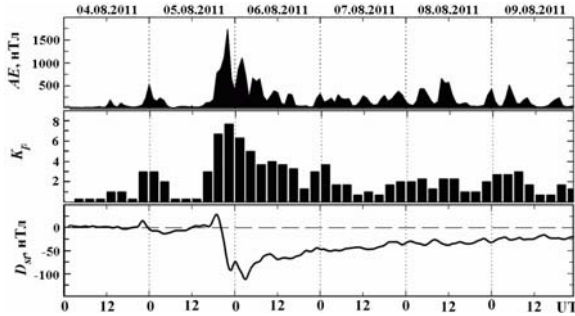


Рис. 1 – Временные вариации индексов геомагнитной активности AE , K_p и D_{st} (WDC, Kyoto University) в течение 4–9 августа 2011 г.

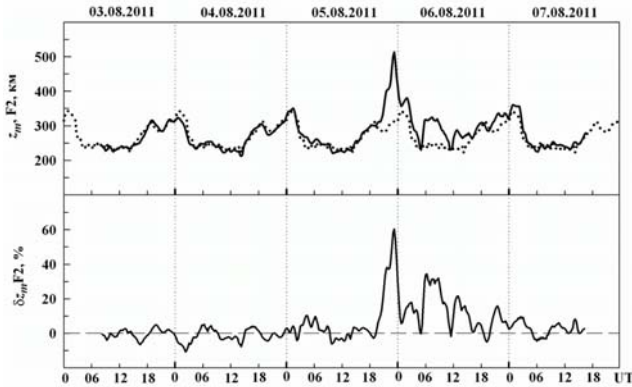


Рис. 2 – Временные вариации высоты максимума $z_m F2$ слоя F2 (сплошная линия) и ее относительного отклонения $\delta z_m F2$ с 3 по 7 августа. Точками показаны значения $z_m F2$ в магнитоспокойный день 4 августа

7 августа уже наблюдается восстановление суточного хода параметра $z_m F2$ к значениям, характерным для магнитоспокойных условий.

Начало МБ также сопровождалось резким увеличением концентрации электронов N (до 90 %) на высотах выше 400 км (рис. 3). В свою очередь, при $z \approx 200\text{--}400$ км было зарегистрировано уменьшение N до 91–27 % соответственно.

Во время отрицательной ИБ 6 августа в 23:00 концентрация N уменьшилась во всем диапазоне исследуемых высот (200–600 км), а 7 августа последовала фаза восстановления.

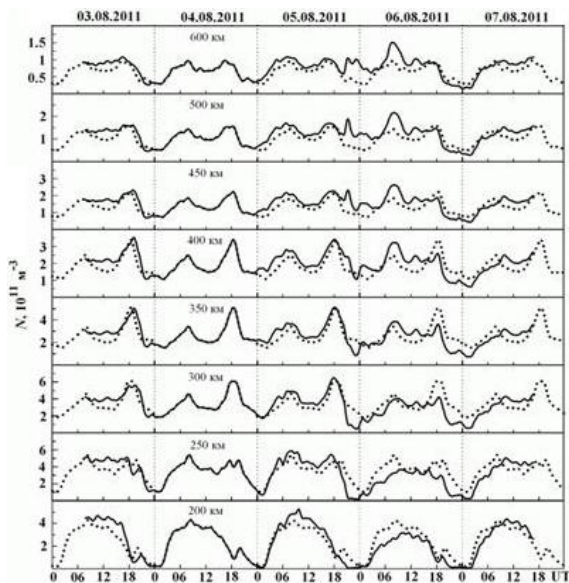


Рис. 3 – Временные вариации концентрации электронов N на фиксированных высотах в период с 3 по 7 августа 2011 г. (линия). Точки – данные N в контрольный день 4 августа 2011 г.

Известно, что в периоды интенсивных МБ в высоких и средних широтах отрицательные возмущения являются наиболее распространенными и, при этом, часто сопровождаются значительным увеличением высоты z_mF2 [8]. Такой быстрый рост z_mF2 во время бури в ночное время и увеличение вблизи полудня, по-видимому, был связан с расширением термосферы и перестройкой глобальной термосферной циркуляции за счет усиления высокоширотного источника нагрева нейтрального газа. Результатом возмущения циркуляции является дополнительный меридиональный ветер, направленный из высоких широт к экватору. Ночью он усиливает основную компоненту атмосферной циркуляции, поднимая слой F2 на более высокие уровни, а днем ослабляет ее и препятствует снижению слоя [8].

Возможной причиной роста z_mF2 также могло послужить смещение к экватору главного ионосферного провала (ГИП). Провалы во время бури могут расширяться в ночное время вплоть до низких широт. При этом за увеличением z_mF2 следует депрессия (провал) концентрации электронов, что мы наблюдаем на рис. 3 для высот 200–350 км.

Рассмотрим поведение температур электронов T_e и ионов T_i . В ночное время с 5 на 6 августа имел место существенный нагрев плазмы (до 40 % по сравнению с магнитоспокойными условиями) (см. рис. 4).

5 августа около 22:30 (главная фаза МБ) в диапазоне высот 200–700 км T_e составляла 800–2500 К, а T_i – 800–1500 К соответственно.

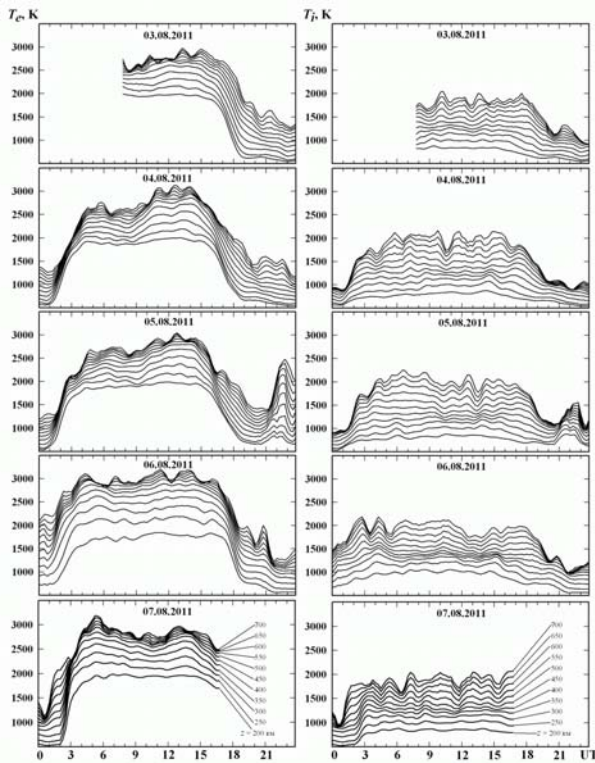


Рис. 4 – Временные вариации температур электронов T_e (слева) и ионов T_i (справа) в период с 3 по 7 августа 2011 г. на фиксированных высотах

Во время ИБ с 6 на 7 августа значения T_e и T_i оставались завышенными, чем при невозмущенных условиях.

Известно, что смещение ГИП также сопровождается увеличением температуры электронов [8], что и подтверждают вариации T_e на рис. 4.

Однозначная интерпретация увеличения $z_m F2$ действием только одного источника возмущения затруднена, поскольку эффекты разных источников сходны. Наряду с перечисленными причинами можно рассматривать также возможность вклада в рост высоты максимума слоя F2 эффекта проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты [8]. Только для этого следует проводить оценки компонент электрического поля, а также, для ясности более полной картины физических процессов в

ионосфере, расчет и моделирование не измеренных параметров ионосферной плазмы.

Выводы. Результаты измерений параметров ионосферной плазмы на радаре некогерентного рассеяния в Харькове и их последующий анализ показали, что сверхсильная МБ 5–6 августа 2011 г. сопровождалась сильным ионосферным возмущением. В свою очередь ИБ вызвала ряд существенных изменений в суточном ходе основных параметров ионосферы и повлияла на ее структуру.

Список литературы: 1. Черногор Л.Ф. Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 / Л.Ф. Черногор // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4. № 12. – С. 655–697. 2. Черногор Л.Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 / Л.Ф. Черногор // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198–231. 3. Таран В.И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния / В.И. Таран // Геомагнетизм и аэрономия. – 2001. – Т. 41, № 5. – С. 659–666. 4. Кацко С.В. Результаты наблюдения магнитной бури 5–6 августа 2011 г. по данным харьковского радара некогерентного рассеяния / С.В. Кацко // Материалы научн.-техн. конфер. Студентов, аспирантов и молодых ученых, 24–25 дек. 2012 г. «Актуальные проблемы автоматизации и приборостроения Украины» – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – С. 17–18. 5. Григоренко Е.И. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1 / Е.И. Григоренко, В.Н. Лысенко, В.И. Таран, Л.Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 58–76. 6. Григоренко Е.И. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2 / Е.И. Григоренко, В.Н. Лысенко, В.И. Таран, Л.Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 77–96. 7. Домнин И.Ф. Ионосферные процессы, сопровождавшие геокосмическую бурю 5–6 августа 2011 г. / И.Ф. Домнин, Л.Я. Емельянов, М.В. Ляшенко, С.В. Харитонова, Л.Ф. Черногор // Радиофизика та радиоастрономія. – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 320–332. 8. Брюнелли Б.Е. Физика ионосферы / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 550.388, 520.16 + 523.31 + 523.9 : 520.86

Особенности ионосферных эффектов во время сверхсильной геомагнитной бури 5–6 августа 2011 г. над Харьковом / С.В. Кацко, Л.Ф. Черногор // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 29–33. Бібліогр.: 8 назв.

Наведено результати дослідження відгуку шару F та зовнішньої іоносфери на надсильну геомагнітну бурю 5–6 серпня 2011 р. Спостереження проведені за допомогою радара некогерентного розсіяння в Харкові. Розглянуто головні механізми формування змін в іоносферній плазмі під час бурі.

Ключові слова: іоносферна плазма, некогерентне розсіяння, магнітна буря, збурення.

The study results of the F region and topside ionosphere response to the severe magnetic storm on 5–6 August 2011 are presented in this paper. The observations are carried out by the Kharkiv incoherent scatter radar. The basic mechanisms forming ionospheric plasma changes during the storm are considered

Keywords: ionospheric plasma, incoherent scatter, magnetic storm, disturbance.

Д.А. ИСКРА, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ СИГНАЛА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Предложено устройство и разработано программное обеспечение для определения автокорреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния. Использование модуля АЦП типа E20-10 позволило в 6 раз уменьшить интервал дискретизации сигнала и повысить точность определения автокорреляционной функции.

Ключевые слова: сигнал некогерентного рассеяния, автокорреляционная функция сигнала, аналого-цифровой преобразователь, интервал дискретизации сигнала.

Введение. Для определения параметров ионосферной плазмы на радаре некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы используется корреляционная обработка сигнала рассеяния. Одним из этапов обработки является преобразование сигнала в цифровой вид и вычисление его автокорреляционной функции (АКФ). Существующий 19-канальный коррелятор радара выполнен на основе жесткой логики [1]. В режиме излучения длинного зондирующего импульса интервал дискретизации входного сигнала составляет около 30 мкс. Это позволяет получить требуемый интервал задержек до 540 мкс. При синусно-косинусной обработке НР-сигнала на каждую составляющую выделяется по 9 каналов. Соответственно, интервал задержек увеличивается вдвое, до 60 мкс. Таким образом, измеренная АКФ сигнала представляется в виде 9 отсчетов. На больших высотах, вследствие уменьшения интервала корреляции среды, информативными часто оказываются только первые 4-5 отсчетов [2]. Это ведет к повышению неопределенности при решении обратной задачи – сопоставлении измеренных АКФ с модельными и определении параметров ионосферной плазмы. Уменьшение интервала задержек и, соответственно, интервала дискретизации входного сигнала ограничивается числом каналов коррелятора [3].

Современное состояние вычислительной техники позволяет реализовать определение АКФ чисто программными средствами.

Цель статьи – рассмотрение возможности повышения точности определения АКФ НР сигнала путем создания коррелятора на базе модуля АЦП и существенного уменьшения интервала дискретизации сигнала.

Разработанный в Институте ионосферы коррелятор нового поколения использует модуль АЦП E20-10. Модуль позволяет вести непрерывный сбор

© Д.А. Искра, 2013

16-битных данных с частотой до 10 МГц по интерфейсу USB2.0. архитектура модуля – 4-канальная с одним 14-разрядным АЦП, коммутатором, входными буферными усилителями и фильтрами в каждом канале. Частота преобразования АЦП может быть задана в диапазоне от 1.00 до 10.0 МГц и может задаваться внутренним либо внешним источником тактовых импульсов. Внутренний буфер FIFO размером 8 МВ буферизирует данные, исключая их потерю. В качестве аналого-цифрового преобразователя модуля E20-10 используется 14-битный высокочастотный АЦП типа LTC2245 компании Linear Technology, имеющий глубоко конвейеризованную архитектуру.

На аналоговые входы устройства подаются сигналы с выходов четырех каналов радиоприемного устройства. Логика управления процессом сбора данных заключается в запуске конвейера “АЦП-FIFO-USB-интерфейс” (рис. 1) от внешнего перепада сигнала START, в качестве которого используется импульс ИЗП от синхронизатора радары НР. Частота квантования устанавливается программно (от 1 до 10 МГц). Данные, считанные с четырех каналов АЦП, поступают в ПЛИС. Производится калибровка данных, а затем передача в буфер FIFO. Данные, накопленные в буфере под управлением микроконтроллера, по USB-интерфейсу передаются в персональный компьютер.

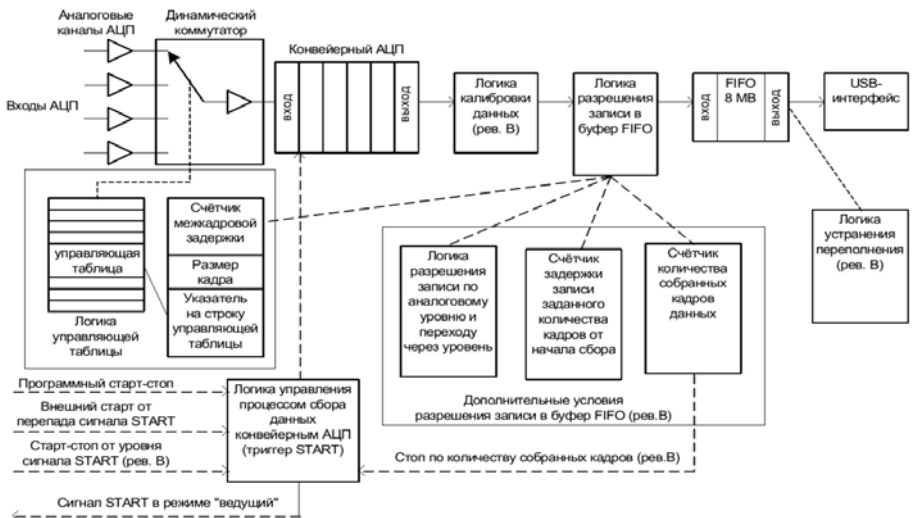


Рис. 1 – Логика управления процессом сбора данных

Программное обеспечение, разработанное для модуля E20-10, разделено на 2 потока:

- 1-й поток осуществляет непрерывный сбор данных и передачу их 2-му потоку, тем самым предотвращает переполнение внутреннего буфера модуля E20-10;

- 2-й поток осуществляет первичную обработку (накопление АКФ) и по достижению заданного времени накопления производит запись файлов.

Данное решение позволило обрабатывать значительно больший объем данных по сравнению с корреляторами на основе жесткой логики и уменьшить интервал дискретизации входного сигнала с 30.555 мкс до 5.1 мкс. При этом число отсчетов АКФ возросло в 6 раз.

В качестве примера на рис. 2 приведена АКФ шума на выходе радиоприемного устройства, а на рис. 3 АКФ сигнала на высоте 800 км, измеренные с интервалами дискретизации 30.555 мкс и 5.1 мкс. Видно, что благодаря уменьшению шага дискретизации, точность определения формы АКФ значительно увеличилась. Существенно повысилась точность определения значений первого минимума АКФ. Количество отсчетов АКФ сигнала некогерентного рассеяния на высоте 800 км на участке от $t=0$ до первого минимума увеличилось до 16.

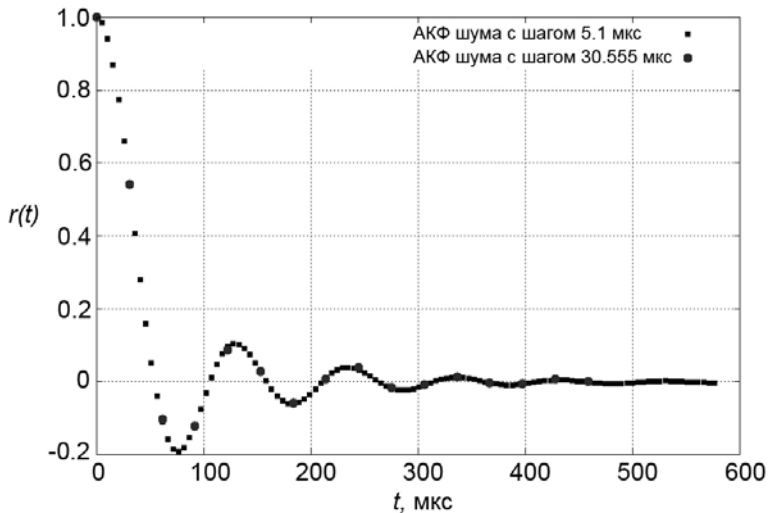


Рис. 2 – АКФ шума на выходе радиоприемного устройства

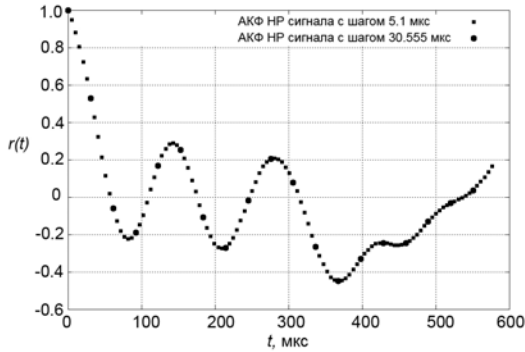


Рис. 3 – АКФ сигнала некогерентного рассеяния на высоте 800 км

Выводы. Разработанный коррелятор позволил в 6 раз уменьшить интервал дискретизации входного сигнала и увеличить количество отсчетов АКФ. Тем самым, существенно уменьшилась неопределенность при решении обратной задачи, что позволит повысить точность определения ионосферных параметров на высотах 600 - 2000 км.

Список литературы: 1. *Рогожкин Е.В., Забирко М.Н., Паун М.Н., Шаталова Н.Ф.* Коррелометр измерительного комплекса Харьковского политехнического института. // Вестн. Харьк. политехн. ин-та, № 155, «Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния», вып. 1, Харьков, изд. объединение «Вища школа», 1979. – С. 40-44. 2. *Рогожкин Е.В., Пуляев В.А., Лысенко В.Н.* Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния: монография, Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 256 с. 3. *Пуляев В.А., Дзюбанов Д.А., Домнин И.Ф.* Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн: монография. – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – 240 с.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 681.323

Повышение точности определения автокорреляционных функций сигнала некогерентного рассеяния / Д.А. Искра // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 33 (1066). – С. 34-37. Бібліогр.: 3 назв.

Запропоновано пристрій та розроблено програмне забезпечення для визначення автокорреляційної функції сигналу некогерентного розсіяння. Застосування модуля АЦП типу E20-10 дозволило в 6 разів зменшити інтервал дискретизації сигналу та підвищити точність визначення автокорреляційної функції.

Ключові слова: сигнал некогерентного розсіяння, автокорреляційна функція сигналу, аналого-цифровий перетворювач, інтервал дискретизації сигналу.

Proposed device and software for determining of the autocorrelation function of the incoherent scattering signal is developed. Using of the ADC E20-10 is allowed to reduce the sampling interval of the signal in 6 times and increased the accuracy of determining of the autocorrelation function.

Keywords: the incoherent scatter signal, the autocorrelation function of the signal, an analog-to-digital converter, sampling interval signal.

Я.Н. ЧЕПУРНЫЙ, гл. инж., Институт ионосферы, Харьков;
А.И. ЛЯЛЮК, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ОЦЕНКА УРОВНЯ ПОМЕХ ОТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА РАДАРЕ НР С АНТЕННОЙ НДА-100

В статье произведена оценка уровня и времени воздействия помех, обусловленных отражениями от космического мусора при проведении ионосферных измерений на радаре НР с антенной НДА-100.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, измерения ионосферных параметров, космический мусор, уровень помех.

Введение. К космическому мусору относят все искусственные объекты и их фрагменты в космическом пространстве, которые уже неисправны и невозстановимы. С начала освоения космического пространства его количество непрерывно увеличивается [1].

На рис. 1 приведена зависимость количества каталогизированных объектов на низких (высотой до 2000 км) околоземных орбитах с 1957 по 2012 гг. [2]. Видно, что с 1972 г., когда были начаты измерения ионосферных параметров методом некогерентного рассеяния (НР) в Харькове, число только наиболее крупных космических объектов, включенных в каталоги, выросло более чем в 4.5 раза.



Рис. 1 – Количество каталогизированных объектов на низкой околоземной орбите

Пространственное распределение каталогизированных объектов по состоянию на конец 2010 г. представлено на рис. 2 [3]. Максимальная пространственная плотность космических объектов наблюдается вблизи высот орбиты 700 – 1000 км. Значительный вклад в и без того высокую плотность на этих высотах внесли два события: столкновение космических

аппаратов Космос-2231 и Иридиум-33 10 февраля 2009 г., а также уничтожение китайскими средствами противоракетной обороны спутника Фэньюнь-1С 11 января 2007 г. Второй максимум находится на высотах 1400 – 1550 км.

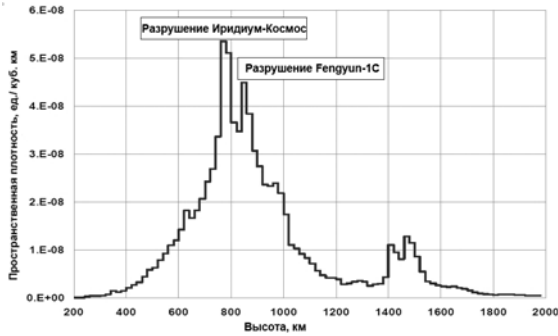


Рис. 2 – Пространственная плотность каталогизированных объектов на низкой околоземной орбите

Некаталогизированные объекты космического мусора имеют размеры 10 см и менее, часть их фиксируется средствами наблюдения. Оценки же общего количества и плотности их распределения на орбите делаются на основе различных моделей. На рис. 3 приведены, основанные на моделях значения существующей пространственной плотности мелких некаталогизированных объектов [4]. Данные соответствуют 1999 г.



Рис. 3 – Пространственная плотность мелких некаталогизированных объектов на низкой околоземной орбите

Отражения от космического мусора создают помехи при измерениях ионосферных параметров методом НР на высотах 100 – 2000 км. Значительно

возросший в последние годы уровень этих помех требует применения специальных методов обработки результатов ионосферных измерений.

Целью настоящей работы является оценка уровня и времени воздействия помех, обусловленных отражениями от космического мусора при проведении ионосферных измерений на радарх НР с антеннами НДА-100 и ППА-25.

Основные расчетные соотношения. Мощность отраженного от космического объекта сигнала, принимаемая антенной, равна [5]

$$P_{\text{отр}} = \frac{P_{\text{пер}} G_a S_{\text{отр}} A_{\text{эфф}}}{16\pi^2 r^4}, \quad (1)$$

где $P_{\text{пер}}$ – импульсная мощность передатчика, G_a – коэффициент усиления антенны, $S_{\text{отр}}$ – эффективная отражающая площадь объекта, $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь антенны, r – расстояние до объекта.

Мощность шума определяется как [5]

$$P_{\text{ш}} = kT_c \Delta f, \quad (2)$$

где $k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T_c – шумовая температура системы, Δf – полоса пропускания приемника.

Эффективная площадь, соответствующая усилению по главному и боковым лепесткам ДН, определяется из соотношения [6]

$$A_{\text{эфф}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_a, \quad (3)$$

где λ – рабочая длина волны радара НР.

Для привязки результатов вычислений к данным о количестве объектов космического мусора, будем полагать, что рассматриваемые объекты являются металлическими сферами диаметром l . Тогда эффективная отражающая площадь объекта [7]

$$S_{\text{отр}} = 690 \frac{l^6}{\lambda^4}, \quad (4)$$

где $\lambda = 1.9$ м – рабочая длина волны радара НР.

Определим время пролета объектов через главный лепесток ДН антенны, а также отсчитывая её ширину по уровням соответствующих боковых лепестков. Для этого воспользуемся соотношениями для скорости V и периода обращения T космического объекта в предположении невозмущенной круговой орбиты [8]:

$$V = \sqrt{\frac{\mu_0}{R}}, \quad (5)$$

$$T = 2\pi R/V, \quad (6)$$

где $\mu_0 = 3.98602 \times 10^{14}$ м³/с² – гравитационный параметр Земли, R – радиус орбиты объекта, отсчитываемый от центра Земли. Для вычисления времени

пролета объекта через ДН необходимо пересчитать ширину сечения ДН на высоте h (отрезок BC на рис. 4) в центральный угол α .

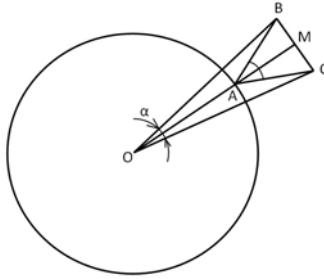


Рис. 4 – К определению центрального угла α

Из геометрических соотношений, показанных на рис. 4 можно найти, что

$$\alpha = 2 \arctg \left(\frac{h}{R_3 + h} \operatorname{tg} \theta \right), \quad (7)$$

где:

θ – угол MAC , равный половине ширины ДН антенны по заданному уровню;
 $h = AM$ – высота орбиты космического объекта над поверхностью Земли;
 $R_3 = 6371$ км – радиус Земли.

Время пролета объекта через ДН антенны равно

$$t_{\text{пр}} = T\alpha/360, \quad (8)$$

где T – период обращения объекта, α – угол в градусах.

Допустим, что космический мусор распределен вокруг Земли равномерно. Тогда, используя информацию о количестве объектов N и ширине ДН антенны по уровню соответствующего лепестка, можно оценить количество объектов n , одновременно находящихся в пределах луча ДН. Это количество будет пропорциональным отношению объема, занимаемого ДН антенны (усеченный конус) $V_{\text{ДН}}$ к объему сферической оболочки Земли $V_{\text{со}}$, в которой располагаются орбиты объектов космического мусора:

$$n = NV_{\text{ДН}}/V_{\text{со}}, \quad (9)$$

где
$$V_{\text{ДН}} = \frac{\pi}{3} \operatorname{tg}^2 \theta (h_{\text{макс}}^3 - h_{\text{мин}}^3), \quad V_{\text{со}} = \frac{4}{3} \pi [(R_3 + h_{\text{макс}})^2 - (R_3 + h_{\text{мин}})^2].$$

Поскольку мы рассматриваем объекты космического мусора на низких околоземных орбитах, примем $h_{\text{мин}} = 100$ км, $h_{\text{макс}} = 2000$ км.

При малых значениях n более наглядной характеристикой является периодичность появления объектов космического мусора в ДН антенны t_n .

Можно показать, что

$$t_n = \frac{T}{n} \cdot \frac{\alpha}{360}, \quad (10)$$

где T и α определяются из (6), (7), n – из (9). При $h = h_{\max}$ получим $t_n = t_{n \max}$.

Результаты расчетов. Для объектов с поперечными размерами 1 мм, 1 см, 10 см и 30 см определим из (4) соответствующую им эффективную отражающую площадь $S_{\text{отр}}$. Подставив значения $P_{\text{пер}}$, $S_{\text{отр}}$, а также усиления G_a и эффективной площади $A_{\text{эфф}}$ главного и боковых лепестков ДН НДА-100 в (1) и вычислив мощность шума из (2), получим зависимости отношения мощности отражений к мощности шума (далее – отношение отражение/шум) $q = P_{\text{отр}}/P_{\text{ш}}$ от расстояния до объекта r . Полученные зависимости представлены на рис. 5 – 8.

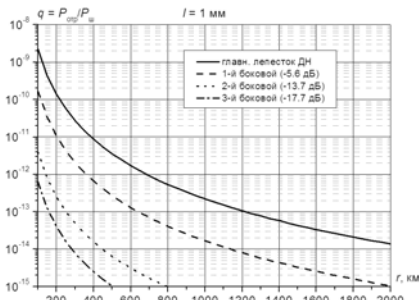


Рис. 5 – Зависимость отношения отражение/шум от расстояния до объекта с $l = 1$ мм

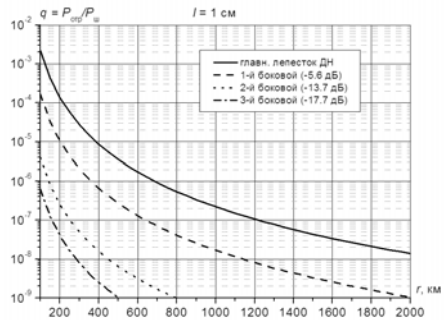


Рис. 6 – Зависимость отношения отражение/шум от расстояния до объекта с $l = 1$ см

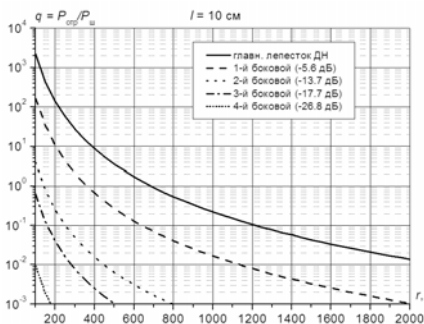


Рис. 7 – Зависимость отношения отражение/шум от расстояния до объекта с $l = 10$ см

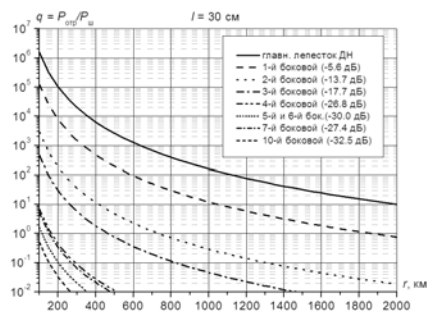


Рис. 8 – Зависимость отношения отражение/шум от расстояния до объекта с $l = 30$ см

Из представленных зависимостей следует, что мощность отражений от космического мусора с поперечными размерами 1 см и менее не превышает мощности шума системы. Объекты космического мусора с поперечником 10 см создают помехи по главному лепестку ДН антенны НДА-100 на высотах до 700 км. Объекты с размерами 30 см и более создают мощные отражения по главному лепестку на высотах до 2000 км и более, а также по 1-му, 2-му и 3-му боковым лепесткам на высотах до 1900, 750 и 450 км соответственно. По 4 – 7 боковым лепесткам возникновение отражений возможно только на очень низких высотах – до 150 км.

Время пролета объектов через ДН по уровню главного и первых семи боковых лепестков представлено в виде графиков на рис. 9.

Из приведенных зависимостей следует, что для объекта, пересекающего ДН антенны через её центр (по диаметру горизонтального сечения), время пролета главного лепестка составляет от 0,45 до 10 с в зависимости от высоты орбиты объекта. Для уровня 7-го бокового лепестка это время увеличивается до 6 – 140 с.

Поскольку орбиты объектов пересекают ДН не только по диаметру горизонтального сечения, но и по хордам, то приведенные на рис. 9 времена пролета следует рассматривать как максимальные.

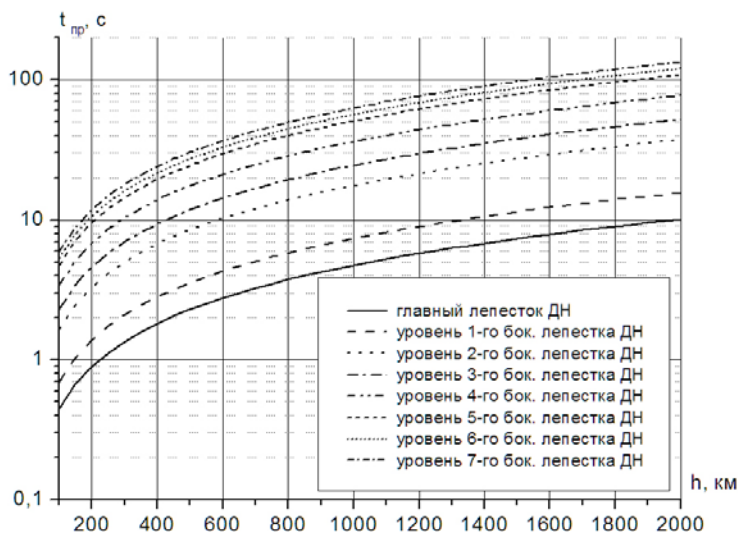


Рис. 9 – Время пролета объектов через ДН антенны НДА-100

Количество объектов космического мусора, одновременно присутствующих в луче ДН антенны НДА-100 и периодичность их появления определены из (9), (10) и приведены в таблице.

Таблица – Количество объектов космического мусора в луче ДН антенны НДА-100

Размер объекта в поперечнике	0.1 – 1 см	1 – 10 см	>10 см
Количество на низкой околоземной орбите	$2 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^4$
Количество в главном лепестке ДН	38	0.77 (1 объект не реже, чем через 13 с)	0.029 (1 объект не реже, чем через 349 с)
Количество в ДН по уровню 1-го бокового лепестка	– ($q \ll 1$)	1.85	0.07 (1 объект не реже, чем через 224 с)
Количество в ДН по уровню 2-го бокового лепестка	– ($q \ll 1$)	11	0.4 (1 объект не реже, чем через 94 с)
Количество в ДН по уровню 3-го бокового лепестка	– ($q \ll 1$)	21	0.77 (1 объект не реже, чем через 68 с)

Выводы. Произведенные вычисления показали количество объектов космического мусора, присутствующих в луче ДН антенны НДА-100. В формировании помех от космического мусора, в основном, участвуют главный и 1 – 3 боковые лепестки ДН антенны. В радаре НР с антенной НДА-100 образование помех происходит от объектов космического мусора с поперечными размерами 1 см и более. Для устранения влияния отражений от космического мусора на результаты ионосферных измерений необходимо использование специального программного обеспечения, которое позволит отфильтровать сильные отражения.

Список литературы: 1. *Chen Shenyan*. Orbital Debris Characteristic Analysis and A Small Debris Collection Concept // Presentation at 2010 Beijing Orbital Debris Mitigation Workshop. Oct 18 – 19, 2010, Beijing, China – (<http://swfound.org/media/28341/Shenyan-SmallDebrisCollection.pdf>). 2. *Johnson N*. USA Space Debris Environment, Operations and Policy Updates // Presentation to the 49th Session of the Scientific and Technical Subcommittee Committee on the Peaceful Uses of Outer Space United Nations. 6 – 7 February 2012 – (<http://www.unoosa.org/pdf/pres/stsc2012/tech-26E.pdf>). 3. *NASA*. USA Space Debris Environment, Operations, and Policy Updates // Presentation to the 48th Session of the Scientific and Technical Subcommittee Committee on the Peaceful Uses of Outer Space United Nations 7 – 18 February 2011 – (<http://www.oosa.unvienna.org/pdf/pres/stsc2011/tech-31.pdf>). 4. *Смирнов Н.Н.* Эволюция «космического мусора» в околоземном космическом пространстве // Успехи механики. – 2002. – № 2. – С. 37-104. 5. Радиолокационные устройства (теория и практика применения). / Под ред. В.В. Григорина-Рябова. – М.: Сов. радио, 1970. – 680 с. 6. *Шубарин Ю.В.* Антенны сверхвысоких частот. – Х.: ХГУ, 1960. – 284 с. 7. Теоретические

основы радиолокации. / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1964. – 732 с. 8. Инженерный справочник по космической технике. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. А.В. Соловьева. – М.: Воениздат, 1977. – 430 с.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 550.388.1; 629.78

Оценка уровня помех от космического мусора при измерении ионосферных параметров на радаре НР с антенной НДА-100 / Я.Н. Чепурный, А.И. Лялюк // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 38-45. Бібліогр.: 8 назв.

У статті проведена оцінка рівня і часу впливу перешкод, зумовлених відбиттям від космічного сміття при проведенні іоносферних вимірювань на радарі НР з антеною НДА-100.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, вимірювання іоносферних параметрів, космічне сміття, рівень перешкод.

This paper describes the evaluation of the level and timing of interference caused by reflections from debris during ionospheric measurements on IS radar with antenna NDA -100.

Keywords: incoherent scatter radar, measuring ionospheric parameters, space debris, level of interference.

А.Е. МИРОШНИКОВ, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков;
А.В. БОГОМАЗ, н.с., Институт ионосферы, Харьков

КРОСС-ПЛАТФОРМЕННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАБОТЫ С БАЗОЙ ДАННЫХ ИНСТИТУТА ИОНОСФЕРЫ

Описывается подход к выбору уже существующего готового и разработки нового кросс-платформенного программного обеспечения для работы с базой данных Института ионосферы. Описаны программы импорта, экспорта, экспресс-обработки и преобразования форматов данных.

Ключевые слова: база данных, система экспресс-обработки, открытое программное обеспечение, преобразование форматов.

Введение. В настоящее время хранение данных, полученных с помощью радара некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы, производится на удалённом сервере, который доступен через локальную сеть.

Структура таблиц базы данных (БД) воссоздает структуру данных, полученных с помощью радара НР Института ионосферы, а именно форматы файлов системы первичной обработки на базе сигнальных процессоров TMS320 [1] и программируемого многоканального коррелятора [2].

Разработанное программное обеспечение (ПО), установленное на сервере, позволяет производить не только импорт и экспорт данных, а и выполнять экспресс-обработку данных, задача которой – предоставить пользователю информацию (в текстовом и графическом виде) об объёме и качестве присутствующих данных [3–6].

Система экспресс-обработки. Система экспресс-обработки данных радара НР основана на применении исключительно открытого ПО, а именно системы управления базами данных (СУБД) PostgreSQL, программы визуализации данных gnuplot, веб-сервера Apache, архиватора 7-zip и оригинального программного обеспечения, написанного с использованием фреймворка Qt, в котором реализуются основные этапы обработки данных радара НР [7]. В качестве операционной системы (ОС) используется Ubuntu Server Linux.

PostgreSQL – свободно распространяемая объектно-реляционная СУБД. Её преимуществами являются надёжность и устойчивость на больших нагрузках, кросс-платформленность, высокий уровень соответствия ISO/ANSI, интерфейс C++, расширяемость, быстроедействие, поддержка БД практически неограниченного размера.

Веб-сервер Apache также является кросс-платформенным открытым ПО. Основными достоинствами Apache считаются надёжность и гибкость конфигурации.

© А.Е. Мирошников, А.В. Богомаз, 2013

Средство визуализации с открытым исходным кодом `gnuplot` и свободный архиватор `7-zip` используются на финальных стадиях работы основной программы и предназначены для построения графиков и сжатия файлов с рассчитанными параметрами [8].

Основное пользовательское ПО, представляющее собой CGI-приложение, запускается по запросу клиента и формирует содержание web-страницы. Благодаря использованию фреймворка `Qt` разработку и отладку ПО можно производить в таких ОС, как `Linux`, `Windows` и `Mac OS X`.

Основное приложение выполняет экспресс-обработку данных радара НР, результатами которой являются следующие временные зависимости:

- оценок мощности шумов (космических и усилительных каскадов радиоприёмного устройства);
- оценок отношение сигнал/шум в максимуме ионизированной области и высоты этого максимума;
- оценок температур ионов и электронов на высотах 200–400 км.

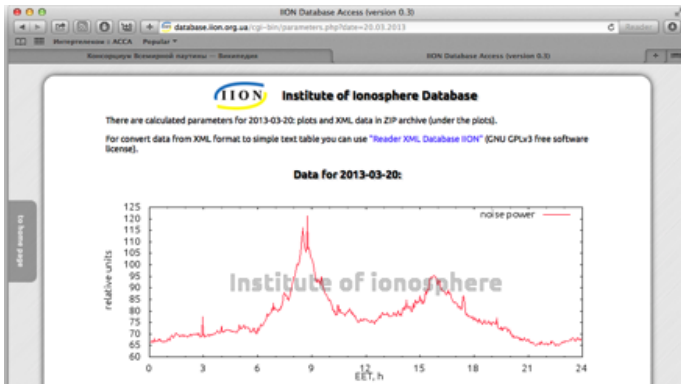


Рис. 1 – Web-страница, сформированная программой сетевой системы экспресс-обработки Института ионосферы

Для получения информации о присутствующих в БД сеансах измерений была разработана программа, которая также представляет собой CGI-приложение. Пример результата работы программы представлен на рис. 2.

Программа опрашивает БД на наличие дат измерений присутствующих в базе и подготавливает универсальный указатель ресурса (URL) для работы основного CGI-приложения обработки данных радара НР.

Web-страницы, формируемые рассмотренными CGI-приложениями, создаются в едином стиле с официальным сайтом Института ионосферы (рис. 3), который также разработан на базе открытого ПО, а именно

WordPress. При разработке web-интерфейса учитывались современные стандарты W3C.

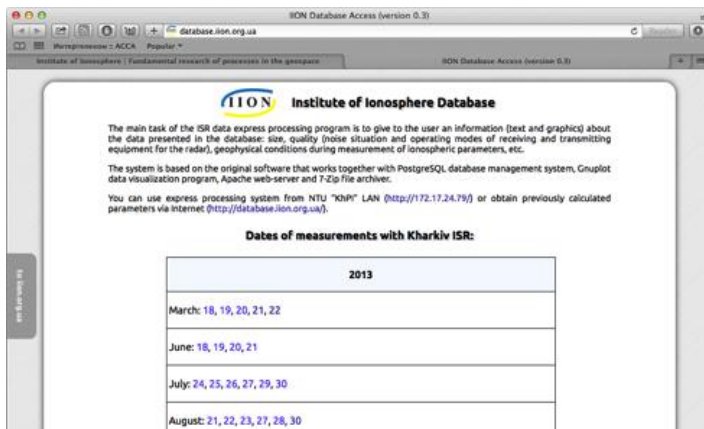


Рис. 2 – Web-страница, сформированная программой получения информации о наличии данных в БД

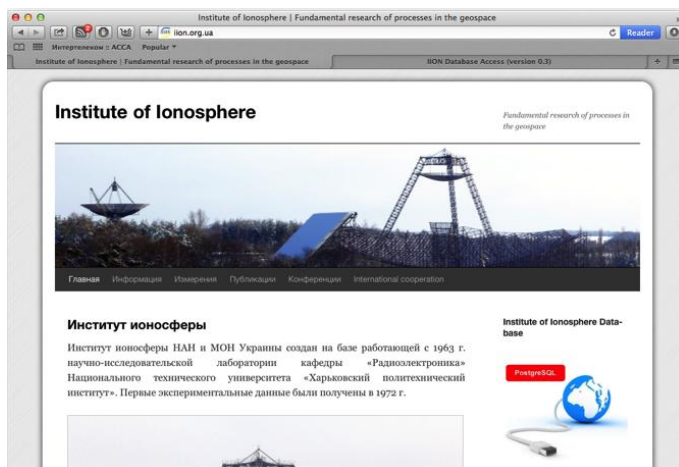


Рис. 3 – Главная страница официального сайта Института ионосферы

ПО импорта и экспорта данных. Для экспорта и импорта данных, полученных с помощью радара ИР, были разработаны кросс-платформенные консольные приложения на языке C++ с использованием фреймворка Qt, которые могут работать в ОС Windows, Linux и Mac OS X.

На рис. 4 представлен внешний вид программы экспорта.

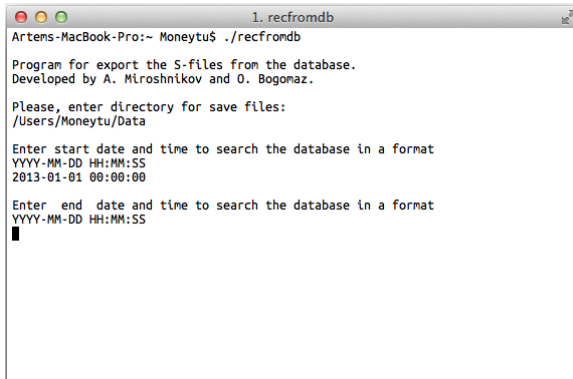


Рис. 4 – Окно программы экспорта данных

Преобразование форматов. Программа экспресс-обработки, работающая на стороне сервера, кроме web-страницы формирует также файл с рассчитанными параметрами в формате XML [9]. Для преобразования из XML в текстовый формат разработана специальная кросс-платформенная программа, работающая на стороне пользователя.

Программа написана на языке FreePascal и скомпилирована для различных платформ и архитектур. Исходный код и исполняемые файлы доступны на сайте разработчиков и распространяется по свободной лицензии. Внешний вид окна программы показан на рис. 5.

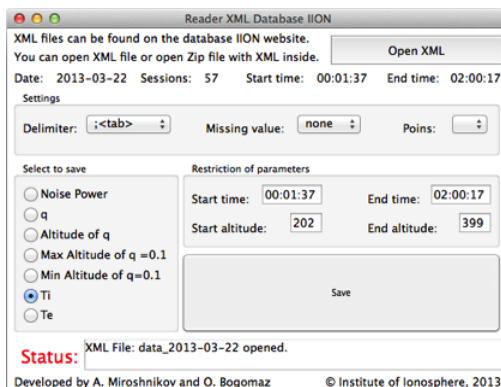


Рис. 5 – Окно программы преобразования форматов

Выводы. Разработан комплекс программ для работы с БД Института ионосферы. Программы позволяют производить импорт и экспорт данных, выполнять их экспресс-обработку, результаты которой могут быть

представлены в удобном для пользователя формате. Разработанное ПО использует открытые технологии, что делает возможным использование их на различных платформах, значительно ускоряет разработку и отладку кода. Само же ПО при этом обладает большой гибкостью.

Список литературы: 1. *Лысенко В.Н.* Программируемый коррелятор для измерения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния / *В.Н. Лысенко* // Вестник ХГПУ. – №31. – 1999. – С. 96–99. 2. *Лысенко В.Н.* Корреляционная обработка сигнала некогерентного рассеяния / *В.Н. Лысенко, А.Ф. Кононенко, Ю.В. Черняк* // Вестник НТУ «ХПИ». – №23. – 2004. – С. 49–62. 3. *Miroshnikov A.E.* Incoherent scatter radar data processing on a remote server [Электронный ресурс] / *A.E. Miroshnikov, O.V. Bogomaz* // 12th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics. – Kharkiv, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). 4. *Богомаз А.В.* Преимущества обработки данных радара НР на удалённом сервере / *А.В. Богомаз, А.Е. Мирошников* // Актуальные проблемы автоматизации и приборостроения Украины: материалы Науч.-техн. конфер. студентов, аспирантов и молодых ученых, 24–25 дек. 2012 г. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – С. 27–28. 5. *Miroshnikov A.E.* Kharkiv Institute ionosphere incoherent scatter radar (Ukraine) express data processing on a remote server and visualization of results [Электронный ресурс] / *A.E. Miroshnikov, O.V. Bogomaz* // 16th International EISCAT symposium, 12–16 August 2013, Lancaster UK. – Lancaster, 2013. – http://eiscat2013.lancs.ac.uk/wp-content/uploads/2013/08/3_Miroshnikov_Miroshnikov_Abstract.pdf. 6. *Богомаз А.В.* Экспресс-обработка данных радара некогерентного рассеяния на удалённом сервере / *А.В. Богомаз, А.Е. Мирошников* // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2013. – № 28 (1001). – С. 63–68. 7. *Богомаз А.В.* Этапы обработки данных радара некогерентного рассеяния / *А.В. Богомаз* // Конференция молодых учёных «Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН-2012)» (Харьков, Украина, 18–20 апреля 2012 г.). – Сборник тезисов. – 2012. – С. 7. 8. *Мирошников А.Е.* Візуалізація результатів обробки даних радара некогерентного розсіяння на віддаленому сервері / *А.Е. Мирошников, О.В. Богомаз* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції, Ч. III (29–31 травня 2013 р., Харків). Секція 17. Навколосезний космічний простір. Радіофізика та іоносфера – Харків: НТУ «ХПИ». – С. 200. 9. *Miroshnikov A.* Program of data exchange in XML format of ISR express data processing system running on the server-side / *A. Miroshnikov, O. Bogomaz, A. Zhuk* // International School-Conference “Remote radio sounding of the ionosphere (ION-2013)”, September, 30 – October, 4, 2013, Malyi Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine. – Book of abstracts. – 2013. – P. 51.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 621.396, 004.032, 004.031

Кросс-платформенное программное обеспечение для работы с базой данных Института ионосферы / А.Е. Мирошников, А.В. Богомаз // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: «Радиофизика и ионосфера». – Х. : НТУ «ХПИ», 2013. – № 33 (1066). – С. 46-50. – Бібліогр.: 9 назв.

Описується підхід до вибору вже існуючого і розробки нового крос-платформного програмного забезпечення для роботи з базою даних Інституту іоносфери. Представлені програми імпорту, експорту, експрес-обробки та перетворення форматів даних.

Ключові слова: база даних, система експрес-обробки, відкрите програмне забезпечення, перетворення форматів.

An approach to the choosing of the existing and developing the new cross-platform software to work with the Institute of ionosphere database is described. Programs for import, export, express-processing and format conversion of data are presented.

Keywords: database, express-processing system, open-source software, format conversion.

И. Ф. ДОМНИН, д.т.н., проф., директор, Институт ионосферы, Харьков;
М. М. РЕЗИНКИНА, д.т.н., в.н.с., НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Выполнен численный расчет тепловых процессов, которые имеют место при действии электромагнитного поля (ЭМП) на нефтепродукты. С помощью численных экспериментов проанализированные зависимости продолжительности нагрева для достижения заданной температуры от частоты приложенного ЭМП. Показано, что использование нескольких источников ЭМП, расположенных вдоль длины цилиндрической емкости с нефтепродуктами, может позволить существенно уменьшить продолжительность нагрева.

Ключевые слова: электромагнитное поле, нагрев, источник, нефтепродукты, тепловой процесс.

Введение. Как отмечается в ряде работ (см., например, [1–5]), одним из перспективных методов борьбы с выпадением парафинов и газогидратов, которые при определенных условиях закупоривают нефтяные и газовые скважины или трубопроводы в процессе их эксплуатации, является применение высокочастотного электромагнитного излучения. Однако данная технология еще не доведена до широкого промышленного применения. Целью работы является расчетное исследование тепловых процессов при высокочастотном нагреве нефтепродуктов для выбора оптимальных режимов обработки.

Постановка задачи математического моделирования процесса микроволнового нагрева. Для описания процесса нагрева по сечению цилиндрического резервуара с нефтепродуктами, подвергающимися воздействию высокочастотного электромагнитного излучения, используем двумерное уравнение теплопроводности [3]:

$$\rho c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + Q(z, t),$$

где T – температура; ρ , c_T , λ – плотность, теплоемкость и теплопроводность нагреваемой среды соответственно; $Q(z, t)$ – плотность мощности объемного тепловыделения.

Будем полагать, что мощность излучения распределяется равномерно по сечению цилиндра, а показатель поглощения электромагнитного излучения [2, 3, 5]:

$$\alpha = \frac{2\pi f}{3 \cdot 10^8} \sqrt{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; ε – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости независимая от температуры,

поскольку рассматривается случай приложения электромагнитных полей частотой f не меньшей десятков мегагерц [3]. Тогда Q можно записать в виде [3]:

$$Q = \frac{P \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha z)}{\pi R^2},$$

где P – мощность ЭМП; R – радиус цилиндрического резервуара.

Как показано в [5], потери в стенках металлического резервуара малы по сравнению с высокочастотными потерями в объеме обрабатываемых нефтепродуктов, поэтому поглощение излучения в стенках труб обычно не учитывается [3].

Рассмотрим случай теплоизолированной трубы. Тогда граничные условия при $r = R$, $z = 0$, $z = H$ (где H – высота цилиндрического резервуара): $\partial T / \partial z |_{r=R} = 0$, $\partial T / \partial z |_{z=0} = 0$, $\partial T / \partial z |_{z=H} = 0$. Граничное условие при $r = 0$ – условие аксиальной симметрии – $\partial T / \partial r |_{r=0} = 0$.

При расчетах будем полагать, что теплопроводность и плотность обрабатываемых нефтепродуктов не зависят от температуры их нагрева, а теплоемкость можно представить в виде функции, имеющей δ -особенность при температуре фазового перехода T_S (см., например, [5]):

$$c_T = c_0 + L \cdot \delta(T - T_S),$$

где L – скрытая теплота фазового перехода; δ -дельта-функция.

Численные эксперименты по исследованию влияния частоты электромагнитного излучения на характер процесса нагрева нефтепродуктов. При расчетах были использованы следующие значения констант, которые характеризуют электрофизические параметры нефтепродуктов и для высокопарафинистой нефти имеют следующие значения: $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$, $c_0 = 3 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$, $T_S = 50^\circ\text{C}$, $L = 300 \text{ кДж/кг}$, $\lambda = 0.125 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\varepsilon = 2.3$, $\text{tg}\delta = 0.012$ [5].

Для того чтобы оценить эффективность применения высокочастотного электромагнитного излучения для разогрева нефтепродуктов, рассмотрим случай, когда нефть перевозится в железнодорожной цистерне, и необходимо расплавить образовавшиеся в ней и выпавшие в осадок тяжелые фракции. Полагалось, что цистерна представляет собой цилиндр длиной 20 м с диаметром внутреннего сосуда 2.5 м [6]. Определим расчетным путем время, необходимое для нагрева нефти от $T_0 = 20^\circ\text{C}$ до $T_{н1} = 49^\circ\text{C}$ – температуры, близкой к температуре фазового перехода. Рассмотрим идеализированный случай применения источников, генерирующих плоские волны. При расчете полагалось, что источник расположен в торце цистерны и генерирует волны в одну сторону. На рис. 1 показаны рассчитанные зависимости времени, требуемого для достижения температуры нефти не ниже $T_{н1}$ в исследуемом

объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП при различной мощности источника излучения P .

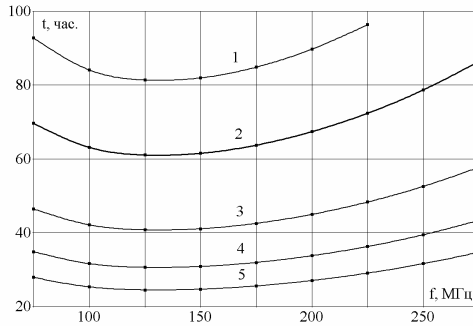


Рис. 1 – Рассчитанные зависимости t - времени, требуемого для достижения температуры нефти не ниже 49°C в исследуемом объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП f при различной мощности источника излучения P (1 – $P = 75$ кВт, 2 – $P = 100$ кВт, 3 – $P = 150$ кВт, 4 – $P = 200$ кВт, 5 – $P = 250$ кВт)

Как видно из рис. 1, зависимости $t(f)$ имеют выраженный минимум, величина которого слабо зависит от уровня P и составляет для рассмотренных случаев порядка 120 МГц.

Как показало проведенное математическое моделирование процесса прогрева, при размещении источника излучения в торце цилиндрической емкости, содержащей нефтепродукты, как описано в большинстве публикаций (см. например [1–4]), распределение температуры по длине цистерны оказывается весьма неравномерным, а нагрев до $T_{\text{н1}}$, близкой к T фазового перехода (49°C) достигается за достаточно большой промежуток времени: $t > 24$ ч (см. рис. 1). Для решения данной проблемы предлагается размещать несколько источников электромагнитного излучения по длине цистерны. Для оценки эффективности такого подхода рассмотрен идеализированный случай применения источников, генерирующих плоские волны в обе стороны. При этом суммарная мощность источников электромагнитного излучения полагается той же, что и для случая наличия одного источника, расположенного в торце цистерны (см. рис. 1). На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости времени, требуемого для достижения минимальной температуры нефти $T_{\text{н1}}$ в исследуемом объеме, от частоты приложенного ЭМП для случая использования четырех одинаковых источников, расположенных равномерно по длине цистерны (на расстоянии 2.5 м от ее торцов и 5 м друг от друга). Суммарная мощность источников при этом составляла P .

Как видно из рис. 2, как и для случая использования одного источника (см. рис. 1), зависимости $t(f)$ имеют минимум, величина которого для рассмотренного случая составляет порядка 500 МГц.

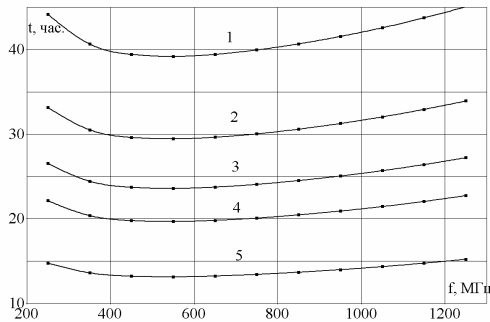


Рис. 2 – Рассчитанные зависимости t – времени, требуемого для достижения температуры нефти не ниже 49°C в исследуемом объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП при различной суммарной мощности источников излучения P (1 – $P = 60$ кВт, 2 – $P = 80$ кВт, 3 – $P = 100$ кВт, 4 – $P = 120$ кВт, 5 – $P = 180$ кВт)

Из анализа проведенного моделирования электротепловых процессов следует, что использование нескольких источников, расположенных по длине цистерны, оказывается существенно эффективнее, чем при расположении одного источника в ее торце, как предлагается в [1–4].

Закключение. Для выбора оптимальных режимов электромагнитного воздействия на нефтепродукты целесообразно использовать математическое моделирование происходящих электротепловых процессов. С помощью такого подхода на примере разогрева нефтепродуктов, перевозимых в железнодорожной цистерне, показано, что использование нескольких источников электромагнитного излучения, расположенных по длине цистерны и излучающих электромагнитные волны в обе стороны, существенно эффективнее, чем нагрев с одного из торцов: время нагрева при этом может быть уменьшено в 2 – 2.5 раза.

Список литературы: 1. Кислицын А.А., Нигматулин Р.И. Численное моделирование процесса нагрева нефтяного пласта высокочастотным электромагнитным излучением // ПМТФ. – 1990. – № 4. – С. 59-64. 2. Кислицын А.А. Численное моделирование прогрева и фильтрации нефти в пласте под действием высокочастотного электромагнитного излучения // ПМТФ. – 1993. – № 7. – С. 97-103. 3. Кислицын А.А. Численное моделирование высокочастотного электромагнитного прогрева диэлектрической пробки, заполняющей трубу // ПМТФ. – 1996. – Т. 37, № 3. – С. 75-82. 4. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. Разрушение асфальто-парафиновых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником высокочастотного электромагнитного излучения // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, вып. 9. – С. 1-8. 5. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. ВЧ метод устранения парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и нефтяных трубопроводах // Электромагнитные

явления. – 1998. – Т. 1, № 4. – С. 552-561. 6. Большая энциклопедия нефти и газа [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ngpedia.ru/id365000p1> (дата обращения: 01.11.2013).

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 621.317.42

Расчетное исследование тепловых процессов при высокочастотном нагреве нефтепродуктов / И.Ф. Домнин, М.М. Резинкина // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 51-55. Бібліогр.: 6 назв.

Виконано чисельний розрахунок теплових процесів, які мають місце при дії електромагнітного поля (ЕМП) на нафтопродукти. За допомогою чисельних експериментів проаналізовані залежності тривалості нагріву щодо досягнення заданої температури від частоти прикладеного ЕМП. Показано, що використання кількох джерел ЕМП, розташованих уздовж довжини циліндричної ємності з нафтопродуктами, може дозволити суттєво зменшити тривалість нагріву.

Ключові слова: електромагнітне поле, нагрів, джерело, нафтопродукти, тепловий процес.

Numerical calculations of the heat processes, which occur upon electromagnetic field (EMF) influence on petrol have been performed. Dependencies of heating duration for achievement of the assigned temperature from frequency of the applied EMF have been analyzed with the help of numerical experiments. It is shown that usage of several EMF sources, located along the length of the cylindrical volume containing petrol may allow substantial reduction of the heating duration.

Keywords: electromagnetic field, heating, source, petrol, thermal process.

Л.Ф. ЧЕРНОГОР, д-р физ.-мат. наук, проф., проф., ХНУ имени В.Н. Каразина, Харьков;
В.В. БАРАБАШ, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СЛОЕ F2 ВБЛИЗИ ПЕРИОДОВ ВЕСЕННЕГО И ОСЕННЕГО РАВНОДЕНСТВИЯ

Выполнен анализ суточных вариаций концентрации электронов N в слое F2 ионосферы в период весеннего и осеннего равноденствий в 2011 г. Приведены результаты спектрального анализа, для осуществления которого было применено оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Для рассмотренных периодов в слое F2 ионосферы обнаружено преобладающее колебание с периодом 140–200 мин, амплитудой $\Delta N_e \approx (0.2 - 2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Его продолжительность в зависимости от сезона изменялась от 5–7 до 15 ч.

Ключевые слова: метод вертикального зондирования, равноденствия, концентрация электронов, регулярные и квазипериодические возмущения, спектральный анализ, внутренние гравитационные волны.

Введение. Ионосфера – один из основных каналов распространения радиоволн это. Особую роль играют нестационарные процессы в ионосфере, которые ограничивают потенциальные характеристики различных радиосистем [1].

Важное место в нестационарных процессах ионосферы отводится квазипериодическим (волновым) процессам. Существует большое количество экспериментальных и теоретических работ относящихся к их исследованию (см., например, [2,3]). Тем не менее, можно сказать, что систематическое изучение таких процессов только начинается (см., например, [4]).

Поскольку непрерывные наблюдения в глобальных масштабах являются невозможными, исследователи ограничиваются измерениями для характерных геофизических периодов (см., например, [4]). К ним относятся весеннее и осеннее равноденствия, а также летнее и зимнее солнцестояния.

Цель данной работы – исследование суточных вариаций концентрации электронов и её волновых возмущений в максимуме слоя F2 ионосферы, для периодов весеннего и осеннего равноденствия 2011.

Методика анализа. Для спектрального анализа использовались оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП). Формат представления данных анализа такой же, как в работе [5]. Системный спектральный анализ выполнен для диапазона периодов 30–360 мин.

© Л.Ф. Черногор, В.В. Барабаш, 2013

Суточные вариации концентрации электронов. Рассмотрим отдельно регулярные и нерегулярные вариации концентрации электронов.

Регулярные вариации. Во время весеннего и осеннего равноденствий временные вариации концентрации электронов N в максимуме слоя F2 в основном были подобными (рис. 1а и 1б). В промежутке времени 0000 – 0400 LT (здесь и далее время LT, местное) $N \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. После восхода Солнца на высотах слоя F2 концентрация электронов постепенно возросла до значений $(6-7) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в период весеннего равноденствия и до величин $(1.0-1.1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ в период осеннего равноденствия. Максимальное значение N имело место в 1200 – 1300 и 1000 – 1200 в периоды осеннего и весеннего равноденствий соответственно. После этого наблюдался медленный спад значений N до $(5-7) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ до момента захода Солнца на уровне Земли. После захода Солнца в ионосфере скорость уменьшения N возросла. К 2200 достигалось минимальное значение концентрации (около $(2-3) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$).

В соседние дни с днями равноденствий временные вариации N в целом были подобными.

На регулярные изменения $N(t)$ накладывались квазипериодические возмущения.

Нерегулярные вариации. В период весеннего равноденствия возмущения концентрации электронов ΔN носили квазипериодический характер (рис. 2а, верхняя панель). В ночное время амплитуда ΔN_a была около $(1-2) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в дневное время – $(5-6) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, т.е. в 3 – 10 раз больше (рис. 2а, верхняя панель).

В период осеннего равноденствия в ночное время $\Delta N_a \approx (1-5) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в дневное время – $\Delta N_a \approx (1.0-3.5) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, т.е. в 3 – 10 раз больше (рис. 2б, верхняя панель).

Спектральный состав абсолютных значений колебаний концентрации электронов. В период весеннего равноденствия в дневное время преобладали колебания концентрации с медленно увеличивающимся периодом T от 140 до 230 мин и продолжительностью $\Delta T \approx 10-12$ ч, эпизодически также наблюдалось колебание с $T \approx 40$ мин и $\Delta T \approx 1-2$ ч (см. рис. 2а). В вечернее время также имело место колебание с $T \approx 60-100$ мин.

Во время осеннего равноденствия в утренние и дневные часы было ярко выражено колебание с $T \approx 170-210$ мин (рис. 2б). Его продолжительность была не меньше 10 ч. В вечернее и ночное время основным было колебание с $T \approx 230-300$ мин и $\Delta T \approx 6-7$ ч.

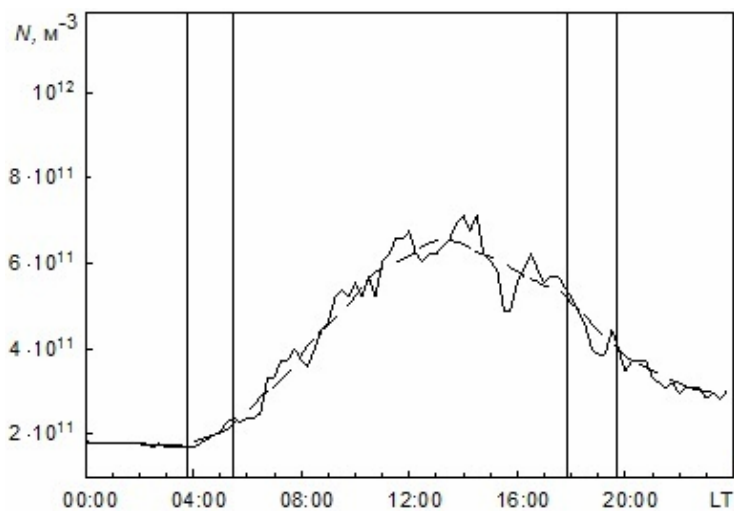


Рис. 1 а – Временные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 23 марта 2011 г. Здесь и далее штриховая линия – результат усреднения на интервале времени, равном 3 ч. Вертикальными линиями показаны моменты восхода и захода Солнца на высотах 0 и 300 км.

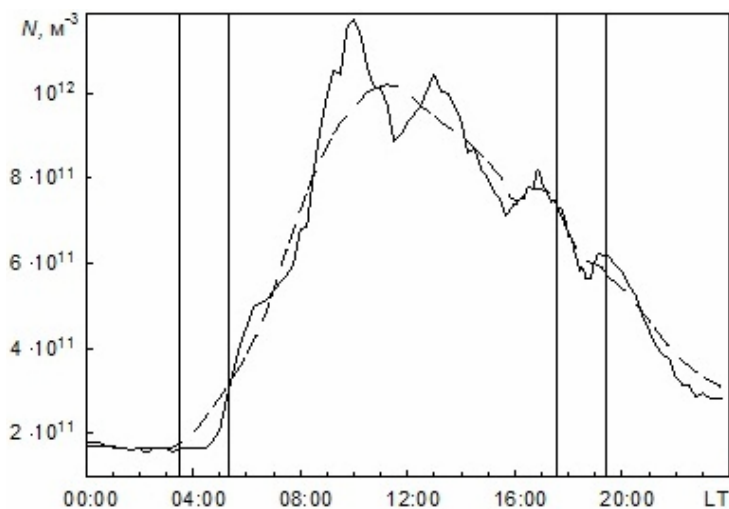


Рис. 1 б – Временные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 20 сентября 2011 г.

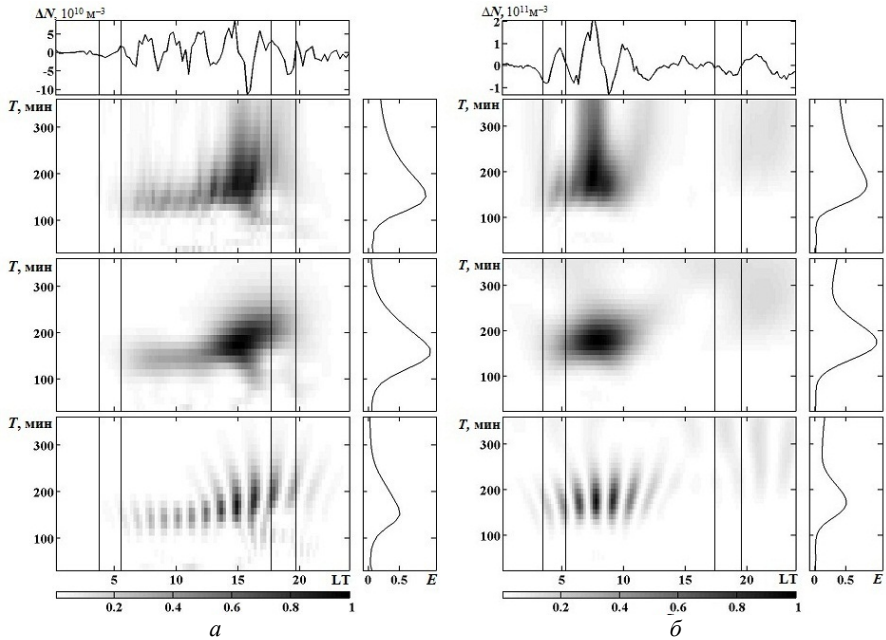


Рис. 2 – Зависимость $\Delta N(t)$ для a – 23 марта 2011 г.; b – 20 сентября 2011 г. Результаты спектрального анализа при помощи ОПФ, АПФ, и ВП (панели сверху вниз). Справа показаны соответствующие энергограммы

Обсуждение. Суточные вариации регулярных значений \bar{N} в период весеннего и осеннего равноденствия полностью соответствуют имеющимся представлениям о физико-химических процессах в ионосфере (см., например, [6, 7]). Полученные данные хорошо согласуются с измерениями методом некогерентного рассеяния значениями \bar{N} в данном регионе в период роста солнечной активности [8].

Обобщенные сведения о квазипериодических вариациях концентрации электронов в дневное и ночное (в скобках) время приведены в таблице.

Таблица – Сведения о квазипериодических вариациях концентрации электронов в дневное и ночное (в скобках) время

Сезон	Амплитуда колебаний, m^{-3}	Период преобладающего колебания, мин	Продолжительность квазипериодического процесса, ч
Весеннее равноденствие	$(5 - 6) \cdot 10^{10}$ $((1 - 2) \cdot 10^{10})$	120 – 160 (60 – 70, 180 – 220)	15
Осеннее равноденствие	$(1.0 - 1.5) \cdot 10^{11}$ $((1 - 5) \cdot 10^{10})$	140 – 190 (230 – 300)	10 (6 – 7)

Из таблицы видно, что большие значения амплитуд ΔN_a имели место в осеннее время, несколько меньшие значения – в весеннее время. В ночное время амплитуда ΔN_a в 3 – 10 раз меньше, чем в дневное время.

Период преобладающих колебаний в различные сезоны года составляли 140 и 175 мин (см. табл.). Этот период близок к периоду третьей гармоники приливных процессов в атмосфере, равному 180 мин. Эпизодически также появлялось колебание с периодами около 60, 100, 220 и 300 мин. Возможно, что эти периоды относятся к гармоникам единого процесса с периодом около 300 мин. Волновые процессы с указанными периодами и амплитудами свойственны внутренним гравитационным волнам [2–4].

Продолжительность преобладающих колебаний была от 5 – 7 до 15 ч.

Полученные сведения о квазипериодических процессах в максимуме слоя F2 в целом также хорошо согласуются с результатами наших наблюдений в этом же регионе на радаре некогерентного рассеяния [4].

Выводы.

1. Регулярные суточные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 для весеннего и осеннего равноденствия полностью соответствуют существующим представлениям о физико-химических процессах в ионосфере и данным других исследований.

2. На регулярный ход $N(t)$ накладывались квазипериодические вариации концентрации электронов.

3. В период весеннего и осеннего равноденствий в слое F2 ионосферы проявлялось преобладающее квазипериодическое колебание N с периодом 140 – 200 мин, имеющее амплитуду $(0.2 - 2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

4. Продолжительность преобладающего колебания в период осеннего равноденствия составляла 5 – 7 ч, а в период весеннего равноденствия – 15 ч.

5. Эпизодически в спектре вариаций N также возникали колебания с периодами от 60 – 100 до 300 мин. Их амплитуда была в несколько раз меньше амплитуды преобладающего колебания.

Список литературы: 1. *Кравцов Ю.А.* Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / *Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г.* – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с. 2. *Григорьев Г.И.* Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли / *Григорьев Г.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, № 1. – С. 3-25. 3. Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде / Под ред. *Л.Н. Литвиненко, Ю.М. Ямпольского.* – Х.: РИНАН, 2005. – 331 с. 4. *Черногор Л.Ф.* Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния / *Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 4-35. 5. *Черногор Л.Ф.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов / *Черногор Л.Ф.* // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681-702. 6. *Брюнелли Б.Е.* Физика ионосферы / *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* – М.: Наука, 1988. – 528 с. 7. *Schunk R.W.* Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry / *Schunk R.W., Nagy A.F.* – Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p. 8. *Черногор Л.Ф.* Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период роста солнечной активности / *Ляшенко М.В., Пуляев В.А., Черногор Л.Ф.* // Космічна наука і технологія. – 2006. – Т. 12, № 5/6. – С. 58-68.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

Изменения концентрации электронов в слое F2 вблизи периодов весеннего и осеннего равноденствия / Л.Ф. Черногор, В.В. Барабаш // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 33 (1066). – С. 56-61. Бібліогр.: 8 назв.

Виконано аналіз добових варіацій концентрації електронів N в шарі F2 іоносфери в період весняного та осіннього рівнодення 2011 р. Наведено результати спектрального аналізу, для здійснення якого було застосовано віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. Для розглянутих періодів в шарі F2 іоносфери, виявлено переважаюче коливання з періодом 140–200 хв, та амплітудою $\Delta N_a \approx (0.2 - 2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Його тривалість в залежності від сезону змінювалася від 5–7 до 15 год.

Ключові слова: метод вертикального зондування, рівнодення, концентрація електронів, регулярні та квазіперіодичні збурення, спектральний аналіз, внутрішні гравітаційні хвилі.

Daily variations of electron concentration N , in ionospheric F2- layer during the vernal and autumnal equinoxes in 2011 are analyzed. Short-time Fourier transform, adaptive Fourier transform and wavelet transform were applied to the system spectral analysis. For the period under review in ionospheric F2- layer prevailing oscillation with the period of 140 ÷ 200 min, amplitude $\Delta N_a \approx (0.2 - 2) \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$ was shown. Duration of this oscillation depending on a season changed from 5–7 to 15 h.

Keywords: vertical sounding method, the equinoxes, the concentration of electrons, regular and quasi-periodic disturbances, spectral analysis, internal gravity waves.

М.Н. СЮСЮК, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДНЕЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

В статье приведены методы, средства и методики обработки данных, полученных при помощи метода некогерентного рассеяния. Описан банк экспериментальных данных за 1996 – 2002 гг.

Ключевые слова: метод некогерентного рассеяния, сложный радиозондирующий импульс, индексы солнечной и геомагнитной активности, банк данных.

Введение. Исследование средней ионосферы (высоты 100 – 300 км) является важным для изучения распространения радиоволн. Для решения различного рода практических задач распространения радиоволн необходимы детальные сведения о параметрах средней ионосферы в различных гелиофизических условиях. Однако ограниченность экспериментального материала, обусловленная сложностью проведения измерений на высотах средней ионосферы, а также многообразие условий в этой части ионосферы существенно затрудняют создание надежных эмпирических моделей этой части ионосферы [1].

Цель статьи – описание особенностей получения экспериментальных данных с высот средней ионосферы при помощи радара некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы, а также банка данных.

Средства и методы. Радар НР расположен в Ионосферной обсерватории (49°36'с.ш., 36°18'в.д.) [2]. Основные параметры радара следующие: частота – 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны – 100 м, эффективная площадь антенны – около 3700 м², коэффициент усиления антенны – около 10⁴, ширина основного лепестка диаграммы направленности – около 1°, импульсная и средняя мощности радиопередающего устройства достигают 3.6 МВт и 100 кВт соответственно.

Для расширения круга задач, возникающих при исследовании ионосферы, предусмотрена возможность работы комплекса в четырех режимах, отличающимися параметрами радиозондирующего импульса [3]. Для измерения параметров ионосферы на высотах 150 – 500 км существует, так называемый, четвертый режим. В этом режиме передатчик излучает два коротких импульса (~ 150 мкс) с переменной задержкой между ними (160 – 1000 мкс), изменяющейся от периода к периоду излучения на постоянную величину (40 мкс). Тип излучаемого импульса приведен на рис. 1.

Такой сложный характер сигнала вызван необходимостью разрешить противоречие, возникающее при выполнении требований, которым должен удовлетворять зондирующий импульс. С одной стороны, его спектр должен

© М.Н. Сюсюк, 2013

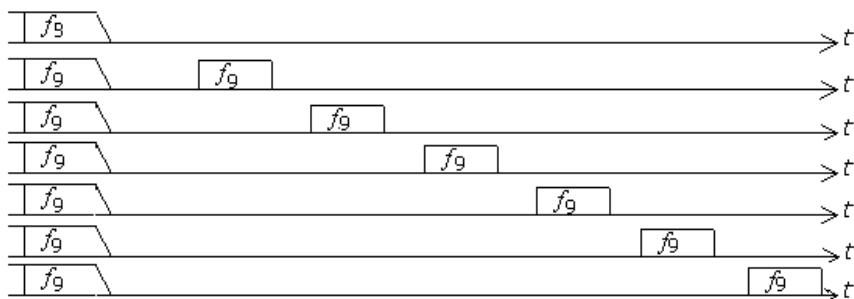


Рис. 1 – Тип импульса, применяемый в четвертом режиме работы радара

быть как можно более узким, чтобы можно было с возможно большей точностью измерить параметры спектра НР сигнала; с другой стороны, этот спектр должен быть достаточно широким, что бы обеспечить требуемую в средней ионосфере разрешающую способность по высоте.

Методика обработки. Алгоритм определения параметров ионизированной среды в нижней части ионосферы при двухкомпонентном (O⁺ и M⁺) ионном составе, использующий регуляризацию и статистический анализ решений в обратной задаче рассеяния и предназначенный для сужения диапазона возможных ее неоднозначных решений, описаны в работе [4].

Ионная структура единого иона M⁺ средней ионосферы характеризуется суммой молекулярных ионов [M⁺] = [NO⁺] + [O₂⁺] + [N₂⁺] и имеет результирующую массу $m_{M^+} = 30$ а.е.м. Процесс определения плазменных параметров сводится к минимизации функционала:

$$\chi^2_{n \in S}(\theta) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[r_3(\tau_i; \theta) - r_T^n(\tau_i; \theta) \right]^2,$$

где θ – вектор ионосферных параметров; $\tau_i = i\Delta\tau$ – значения задержек АКФ (с дискретностью $\Delta\tau$), где $i = 7 \dots 12$ (рис. 2).

Банк экспериментальных данных. Предполагается использовать данные, полученные на радаре НР, работающем в четвертом режиме. Даты проведения измерений близки к характерным геофизическим датам – весеннему и осеннему равноденствиям, летнему и зимнему солнцестояниям.

Информация о датах измерений, характеристика солнечной активности (дневное значение индекса $F_{10.7}$ и усредненное за три оборота Солнца значение $\langle F_{10.7} \rangle$) и значениях планетарного индекса геомагнитной активности A_p представлена в табл.

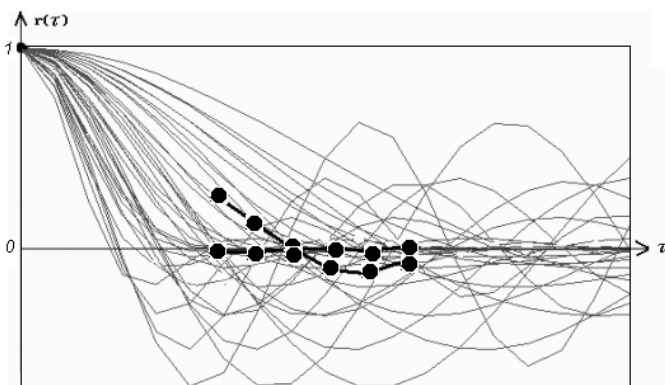


Рис. 2 – 7 ÷ 12 точки АФК для синусных и косинусных составляющих (излучение чередующихся пар коротких зондирующих импульсов)

Таблица – Информация о датах измерений

Дата измерений	$F_{10.7}$	$\langle F_{10.7} \rangle$	$\langle A_p \rangle$ для периода измерений	$\langle A_p \rangle$ для предыдущих суток
21 – 25 сентября 1998 г. (МБ)	133.3	133.5	27.6	4.6
8 – 9 декабря 1998 г.	157.1	138.9	3.9	7.5
12 – 13 января 1999 г.	109.1	141.8	5.1	5.5
9 – 12 февраля 1999 г.	148.4	136.9	5.5	5.6
18 – 19 февраля 1999 г.	164.2	131.6	4.0	16.8
9 – 12 марта 1999 г.	125.0	128.6	11.1	12.4
6 – 8 июля 1999 г.	163.7	168.0	6.1	2.5
19 – 20 июля 1999 г.	145.8	173.2	3.6	4.0
11 – 13 июля 2001 г.	138.3	157.5	5.5	8.9
11 – 13 сентября 2001 г.	238.1	200.3	9.0	3.4
9 – 11 октября 2001 г.	178.1	217.6	6.9	16.1
14 – 15 ноября 2001 г.	212.6	213.8	8.9	4.0
11 – 12 декабря 2001 г.	213.9	217.1	4.1	3.5
12 – 14 марта 2002 г.	182.1	193.3	2.8	9.8
15 – 17 апреля 2002 г.	197.2	183.8	6.6	13.1
2 – 3 октября 2002 г.	136.0	176.9	4.5	6.7
9 – 10 октября 2002 г.	166.8	172.2	15.9	33.0
12 – 14 ноября 2002 г.	178.6	162.5	8.3	11.9
19 – 23 марта 2003 г. (МБ)	90.3	125.7	26.1	28.1
25 – 26 июня 2003 г.	120.2	128.6	16.5	22.6
19 – 20 мая 2004 г.	111.4	100.6	13.0	3.8
13 – 16 сентября 2004 г.	110.8	107.2	8.5	2.0

Выводы. Созданный банк данных, полученных на радаре НР в четвертом режиме работы, можно считать приемлемым для построения надежной эмпирической модели средней ионосферы. Данные охватывают все периоды солнечной активности и характерные гелиофизические периоды и в основном соответствуют спокойному состоянию космической погоды (за исключением двух дат, когда имели место магнитные бури (МБ)).

Список литературы: 1. Данилов А.Д. Уточнение модели ионного состава. Международной справочной модели IRI / А.Д. Данилов, Н.В. Смирнова // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1995. – Т. 35, № 1. – С. 80-88. 2. Таран В.И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния / В.И. Таран // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2001. – Т. 41, № 5. – С. 659-666. 3. Головин И.В. Наблюдения ионосферы с помощью метода некогерентного рассеяния. 2. Аппаратурные и методические особенности. / И.В. Головин, Е.В. Рогожкин, В.И. Таран // Вестник ХПИ – 1979. – № 155. – С. 12-22. 4. Пуляев В.А. Инструкция и описание процедуры обработки данных радиолокатора НР с помощью компьютерных программ вторичной обработки. / В.А. Пуляев // Х.: Институт ионосферы, – 2007. – 16 с. 5. Брюнелли Б.Е. Физика ионосферы. / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – с. 528. 6. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 550.388,521.33

Особенности исследования средней ионосферы методом некогерентного рассеяния / М.Н. Сюсюк // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 62-65. Бібліогр.: 6 назв.

У статті наведено методи, засоби та методики обробки даних, отриманих за допомогою методу некогерентного розсіяння. Описано банк експериментальних даних за 1996 – 2002 рр..

Ключові слова: метод некогерентного розсіяння, складний імпульс радіозондування, індекси сонячної та геомагнітної активності, банк даних.

Methods, tools and techniques of data obtained by the method of incoherent scattering are presented in this paper. The bank of the experimental data for 1996 – 2002 years is described.

Keywords: method of incoherent scattering, complex radio pulse, indices of solar and geomagnetic activity, database.

С.И. РЫМАРЬ, аспирант, НТУ “ХПИ”

УСТАНОВКА ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ СОРБЕНТОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассмотрен вопрос применения технологии объемного нагрева сорбента в электромагнитном поле высокой частоты и предложена установка для промышленной регенерации сорбентов.

Ключевые слова: регенерация, сорбент, электромагнитное поле.

Постановка проблемы. В энергетической промышленности в больших количествах используется трансформаторное масло. В процессе эксплуатации в масло попадают различного рода примеси и образуются продукты старения, снижающие его эксплуатационные характеристики и подлежащие удалению. Одной из наиболее опасных примесей в трансформаторном масле является вода, поглощаемая маслом из атмосферы. Удаление продуктов старения масла может производиться либо постоянно в процессе эксплуатации оборудования, либо периодически при достижении эксплуатационными характеристиками предельно допустимых значений [1].

Анализ литературы. Наибольшее распространение для очистки масла в эксплуатации получили термосифонные фильтры и адсорберы. Принцип действия этих устройств основан на поглощении соответствующих продуктов старения масел поверхностно-активными веществами – сорбентами. В термосифонных фильтрах осуществляется термодиффузная циркуляция масла сверху вниз через внешний цилиндр, заполненный сорбентом. В адсорберах циркуляция масла принудительная, осуществляемая с помощью масляного насоса, прокачивающего масло снизу вверх. Эффективность очистки масла определяется в основном скоростью потока масла и свойствами сорбента.

Действие сорбента основано на процессах адсорбции, т.е. на поглощении вещества (адсорбата) поверхностью сорбента. Молекулы адсорбата испытывают притяжение со стороны поверхности сорбента и оседают на ней, покрывая эту поверхность слоем адсорбируемых молекул. При этом химической реакции не происходит, и адсорбированные молекулы сохраняют свою индивидуальность. Адсорбционные силы имеют ту же природу, что и силы межмолекулярного взаимодействия, и начинают проявляться при приближении молекул адсорбата к поверхности сорбента на расстояние, соизмеримое размерами молекул. Поэтому наибольшей эффективностью обладают сорбенты, имеющие пористую структуру с размерами пор, соизмеримыми с размерами молекул адсорбата. Для удаления растворённой влаги применяются мелкопористые сорбенты, цеолиты [2].

© С.И. Рымарь, 2013

Скорость адсорбции по мере эксплуатации сорбентов уменьшается и после достижения сорбентом равновесия процесс адсорбции прекращается. При этом необходимо либо заменять сорбент, либо регенерировать его. Экономичность адсорбционного процесса в значительной степени зависит от режима регенерации сорбента, требующего наибольших энергозатрат.

Ранее использовались три метода регенерации сорбента:

1. Выжигание в высокотемпературной печи (400 – 600 °С).
2. Продувка сухим горячим воздухом (установки типа “Суховой”, “ФСМ”).
3. Сушка термовакуумным способом с использованием точечных нагревателей (установка типа ПС-1).

Основными недостатками этих методов является либо большое время регенерации (более 30 часов), либо коксование замасленного сорбента с потерей его до 30%.

Основными факторами, влияющими на эффективность регенерации сорбента, являются:

- выбор оптимальной температуры десорбции сорбента;
- нагрев сорбента до заданной температуры;
- создание равномерного температурного поля внутри адсорбера.

Максимальная температура, которая определяется термической стойкостью цеолитов, составляет 500 – 600 °С. Они переносят продолжительный нагрев под разрежением при температуре 300 – 450 °С без заметных структурных изменений.

Условия проведения процесса десорбции накладывают свои ограничения на выбор оптимальной температуры. В первую очередь необходимо учитывать степень разреженности, создаваемую внутри адсорбера, а также тот факт, что цеолит находится в масляной среде. При больших температурах происходит сначала испарение масла, а затем коксование его на гранулах цеолита, что ведёт к понижению его адсорбционной способности [3, 4].

Одним из основных факторов, определяющим длительность регенерации, является время нагрева сорбента до заданной температуры.

С одной стороны для увеличения скорости нагрева требуется увеличение мощности нагревателей, с другой стороны существуют ограничения по механическим свойствам цеолитов – скорость нагрева не должна превышать 5 – 6 °С/мин.

Равномерность температурного поля внутри адсорбера в первую очередь определяется скоростью нагрева сорбента. Все применяемые ранее нагреватели для нагрева сорбентов достаточно больших объёмов (30 – 50 кг) представляют собой точечные нагреватели. Тепло от локально нагретого сорбента, непосредственно прилегающего к нагревателю, поступает к участкам, удалённым от нагревателя. Теплопередача в системе сорбент-масло происходит, в основном, за счёт теплопроводности самих частиц сорбента и

масла между этими частицами. Так как теплопроводность этих материалов достаточно низкая, между центральными и периферийными участками создаётся большой температурный градиент (десятки градусов). Увеличение мощности нагрева, которое необходимо для уменьшения времени выхода устройства на рабочий режим, приводит к тому, что температурный градиент внутри адсорбера превышает предельно допустимые изменения температуры, тем самым, накладывая ограничения на увеличение скорости нагрева сорбента.

Цель работы. Решить вышеописанное противоречие была призвана технология объёмного нагрева сорбента с помощью электромагнитного поля (ЭМП).

Технология регенерации сорбентов в ЭМП. Практически выяснено, что во всём радиодиапазоне, воздействие электромагнитного поля на вещество является неионизирующим и основные эффекты воздействия обусловлены поляризацией вещества и рассеянием энергии ЭМП вследствие конечных значений мнимой части диэлектрической проницаемости. При таких условиях подводимая к веществу энергия ЭМП, вследствие объёмного рассеяния превращается в тепло, причём основными “мишенями” воздействия является сорбент и влага, заполняющая поры сорбента. Передача тепла от сорбента к влаге происходит за счёт их теплопроводности. Нагрев поглощённой сорбентом влаги в электромагнитном поле КВ-диапазона также обусловлен наличием токов проводимости и поляризацией её молекул [5].

Нагреваясь до критических значений при заданном давлении, вода, кроме расширения, начинает испаряться, мигрируя по микропорам сорбента до его поверхности и далее в направлении потока, создаваемого вакуумным насосом.

Рассмотрение кинетики удаления влаги из объёма сорбента показывает, что вакуумная сушка в комбинации с объёмным нагревом сорбента в поле КВ-диапазона обладает оптимальными свойствами по производительности процесса сушки и длительности сохранения адсорбционных свойств цеолитов.

При электромагнитной сушке разрушение кристаллической решётки исходного цеолита практически не происходит вплоть до температур 400 – 500 °С, однако при этих температурах могут наблюдаться отдельные “спекания” (не более 5%) гранул, а также их разрушение вблизи токонесущих электродов адсорбера.

При реализации адсорбера, в котором высушивание сорбента производится в электромагнитном поле КВ-диапазона при относительно низких давлениях ($p = 0,1 - 0,01$ атм), достигается оптимальное сочетание между производительностью процесса и общей стоимостью оборудования. В частности увеличение глубины вакуумирования приводит к нелинейному возрастанию технических требований и стоимости реализации технологии вакуумирования (насос, герметизация соединений, чистота материалов, в том

числе сорбента и др.), а понижение глубины вакуумирования – к росту рабочих температур в адсорбере и, следовательно, к увеличению энергозатрат.

Установка регенерации и подготовки сорбента. Установка регенерации и подготовки сорбента состоит из двух частей: системы тепловой обработки (нагрева) сорбента и вакуумно-гидравлической системы.

Система тепловой обработки сорбенте предназначена для проведения термической десорбции, т.е. выделения поглощённого компонента (воды) из адсорбента. Она состоит из следующих основных узлов: генератора высокой частоты с блоком питания, согласующего устройства и блока управления.

Вакуумно-гидравлическая система состоит из: адсорбера, индикатора визуального контроля, теплообменника, сборника конденсата и вакуумного насоса, вентилей и отстойника. Она предназначена для удаления влаги из адсорбера.

Принцип действия установки. Принцип действия установки состоит в следующем.

Энергия высокой частоты от генератора через коаксиальную линию поступает в адсорбер, который представляет для генератора ВЧ комплексную нагрузку. Если генератор и нагрузка согласованы, т.е. коаксиальная линия настроена на режим бегущей волны, то вся энергия электромагнитной волны рассеивается в нагрузке. Согласование генератора и нагрузки осуществляется с помощью согласующего устройства, реактивное сопротивление которого компенсирует реактивное сопротивление нагрузки, а активное согласуется с выходным сопротивлением генератора.

Для уменьшения температуры испарения воды и повышения эффективности десорбции в адсорбере создаётся вакуум порядка 10000 Па. Вакуум создаётся с помощью вакуумного насоса (типа 2НВП-5ДМ). Пары влаги через сильфонные металлические рукава поступают в теплообменник, где и происходит их конденсация. Далее сконденсированная вода поступает в сборник конденсата, в котором имеется мерная линейка для определения количества сконденсированной влаги.

Между адсорбером и теплообменником вмонтирован индикатор визуального контроля испарения, по которому можно визуально определить начало процесса испарения.

Оперативная количественная оценка процесса испарения осуществляется с помощью контрольного теплообменника, расположенного за индикатором визуального контроля.

Управление мощностью генератора и контроль температуры внутри адсорбера осуществляется с помощью датчика температуры, вмонтированного в адсорбер. Кроме того, в конструкции адсорбера предусмотрены три технологические измерителя температуры, используемые для исследования температурного поля внутри адсорбера.

Включение установки и контроль режимов работы электрических агрегатов осуществляется с помощью блока управления.

Выводы. Разработанная установка регенерации сорбента в ЭМП увеличить начальную сорбционную емкость сорбента на 6 – 15%, увеличить количество циклов регенерации вследствие снижения пространственно-временных градиентов температуры и давления, снизить общие энергозатраты на регенерацию трансформаторных масел вследствие оптимальности сочетания режимов нагревания, вакуумирования и охлаждения водяного пара.

Эффективность предложенной установки подтверждается модельными расчетами распределения электрических полей и рядом новых технических решений, защищенных Патентами Украины [6, 7].

Список литературы: 1. *Кельцев Н. В.* Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1984. – 590 с. 2. *Монастырский А.Е.* Регенерация, сушка и дегазация трансформаторного масла. Учебное пособие. СПб.: Петербургский энергетический институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов Минэнерго РФ, 1997. – 42 с. 3. *Лукин В.Д., Анципович И.С.* Регенерация адсорбентов. – Л.: Химия, 1983. – 256 с. 4. *Головко Г.А.* Установка для производства инертных газов. – Л.: Машиностроение, 1974. – 384 с. 5. *Кивва Ф.В., Горобец В.Н., Зотов С.М.* и др. Новые технологии обработки сорбентов // Новини енергетики – 2003. – № 1-2. – С. 26-31. 6. Патент 55348 Україна, МПК F26B 3/00 Пристрій для сушіння сипучих дисперсних матеріалів / *Горобець В.М., Кивва Ф.В., Зотов С.М., Головко М.І., Гончаренко Ю.В., Ковортний О.Л., Говорищев О.І., Домнін І.Ф., Римар С.І., Дорошенко С.М.*; власник Інститут іоносфери. – № u201006982; заявл. 07.06.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23, 2010. 7. Патент 56705 Україна, МПК F26B 3/00 Пристрій для сушіння сипучих дисперсних матеріалів / *Горобець В.М., Кивва Ф.В., Зотов С.М., Головко М.І., Гончаренко Ю.В., Ковортний О.Л., Говорищев О.І., Домнін І.Ф., Римар С.І., Дорошенко С.М.*; власник Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Ускової НАН України. – № u201008157; заявл. 30.06.2010; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2, 2011.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 621.371

Установка для регенерации сорбентов в электромагнитном поле / С.И. Рымарь // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 66-70. Бібліогр.: 7 нав.

Розглянуто питання застосування технології об'ємного нагріву сорбенту в електромагнітному полі високої частоти і запропонована установка для промислової регенерації сорбентів.

Ключові слова: регенерація, сорбент, електромагнітне поле.

The question of the application of technology volumetric heating the sorbent in the electromagnetic field of high frequency and proposed systems for industrial regeneration of sorbents are considered.

Keywords: regeneration, sorbent, electromagnetic field.

Ю.И. ПОДЪЯЧИЙ, канд. физ.-мат. наук, доц., НТУ “ХПИ”

РАКЕТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ЗОНДИРОВАНИЯ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Предложена методика обработки данных зондирования ионосферы методом некогерентного рассеяния с целью выделения возмущений сечения рассеяния ионосферной плазмы после стартов мощных ракет-носителей. Приведены примеры обработки реальных данных зондирования ионосферы над Харьковом во время запусков ракет с космодрома Байконур.

Ключевые слова: ионосфера, некогерентное рассеяние, ионосферные возмущения, запуски ракет, методики обработки данных зондирования.

Постановка проблемы. Метод некогерентного рассеяния (НР) радиоволн широко используется для исследования регулярной структуры ионосферы. С помощью радаров НР одновременно в большом диапазоне высот измеряют основные параметры ионосферной плазмы – электронную концентрацию, электронную и ионную температуры, скорость дрейфа заряженных частиц, частоты столкновений и многое другое. Также хорошо известны успехи, достигнутые с помощью метода НР, в изучении ионосферных возмущений естественной природы. Наиболее значительные результаты в этом направлении получены в исследованиях перемещающихся ионосферных возмущений, вызываемых внутренними гравитационными волнами с периодами от 30 минут до 3 часов. В частности, на основе экспериментальных данных, полученных методом НР, создана физическая модель образования и распространения таких возмущений и оценен их вклад в энергетический баланс ионосферы.

Менее известны результаты исследования методом НР антропогенных ионосферных возмущений, вызываемых, в частности, запусками баллистических ракет, строительными взрывами большой мощности, подземными ядерными взрывами и прочими явлениями человеческой деятельности, сопровождающимися выделением в окружающую среду значительной энергии за относительно небольшое время. Научные публикации по этому вопросу сравнительно немногочисленны, хотя этот аспект проблемы ионосферных исследований представляет несомненный интерес как для теории образования и динамики ионосферы, так и для различных практических приложений.

В Институте ионосферы НАН и МОН Украины исследование ионосферных возмущений, вызванных ракетными пусками, ведется около 40 лет. За это время накоплен определенный опыт в проведении зондирования ионосферы, в применении обычных и специальных

© Ю.И. Подъячий, 2013

аппаратурных режимов, использовании различных методик обработки данных. Можно с определенной долей уверенности констатировать, что основной проблемой на сегодняшний день является обработка данных зондирования с целью выделения возмущений ионосферы, вызванных запуском ракеты, на фоне естественных возмущений ионосферы. Для решения этой задачи часто используются апробированные во многих экспериментах надежные методики спектрального анализа, которые, тем не менее, отличаются определенной сложностью в практической реализации. В данной статье предлагается достаточно простая методика обработки первичных данных, которая, как показывают примеры ее использования, дает хорошие результаты при регистрации ионосферных возмущений после запусков тяжелых ракет-носителей. Для иллюстрации этого в статье приводятся результаты наблюдений методом НР ионосферных возмущений непосредственно после запусков с российского космодрома Байконур ракет носителей "Протон" и "Союз".

Анализ литературы. Проблема влияния запусков мощных ракет-носителей на состояние ионосферы исследуется во многих организациях уже несколько десятилетий. При этом регистрация возмущений ионосферной плазмы осуществляется методами НР, вертикального зондирования, вертикального доплеровского зондирования, спутниковыми методами и др. [1 – 9, 12]. Обнаружение ракетных возмущений на фоне естественных вариаций параметров ионосферной плазмы производится современными методами – адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и аналитического вейвлет-преобразования (АВП) [10, 11]. Выявлены три группы возмущений, имевшие зависящие от времени суток запаздывания 6 – 7, 30 – 70 и 70 – 130 мин.

Цель статьи – разработка достаточно простой и прозрачной методики обработки данных зондирования ионосферы методом НР во время запусков мощных космических ракет и выделение сопутствующих им ионосферных возмущений на фоне естественных вариаций параметров ионосферной плазмы. Для иллюстрации возможностей предложенной методики приводятся примеры обработки данных зондирования во время запусков российских космических ракет.

Методика обработки данных зондирования. При зондировании ионосферы с помощью радара НР измеряется автокорреляционная функция рассеянного сигнала и/или его мощность. В первом случае с помощью специальной достаточно сложной процедуры обработки принятого сигнала можно оценить большинство ионосферных параметров – концентрацию, кинетическую температуру электронов и основных ионов, частоту столкновений заряженных частиц с нейтральными, скорость дрейфа плазмы и пр. Для измерения электронной концентрации и температур с погрешностью не более 10 – 20% необходимо накапливать сигнал в течение 10 – 15 мин в зависимости от условий. Такое временное разрешение в

большинстве случаев непригодно для регистрации антропогенных ионосферных возмущений.

Для этой цели была разработана методика оценки обобщенного параметра ионосферы – относительного сечения рассеяния ионосферной плазмы. Для однородной ионосферы этот параметр определяется выражением

$$\sigma_0(h) = \frac{kN_e(h)}{1 + T_e/T_i}, \quad (1)$$

где $N_e(h)$, $T_e(h)$, $T_i(h)$ – высотные распределения электронной концентрации, электронной и ионной температуры в ионосфере, k – коэффициент пропорциональности, определяемый характеристиками аппаратуры. Сечение рассеяния зависит также и от наличия в плазме неоднородностей электронной концентрации.

Мощность некогерентно рассеянного сигнала при $T_e=T_i$ можно записать в виде $P_C(h) = k\sigma(h)/h^2$ или $P_C/P_{Ш} = k_1\sigma_0(h)/h^2$. Отсюда сечение рассеяния в относительных единицах $\sigma_0(h) = q(h) \cdot h^2$, где $q(h) = P_C(h)/P_{Ш}$, а $P_{Ш}$ – мощность шума. Следовательно, для оценки относительного сечения рассеяния σ_0 достаточно измерить отношение мощности рассеянного сигнала к мощности шума и знать высоту рассеяния h . Следует отметить, что относительная погрешность оценки σ_0 в 2 раза больше, чем погрешность оценки мощности сигнала. При накоплении рассеянного сигнала в течении 1 мин погрешность оценки относительного сечения рассеяния не превышает 1 – 5%.

Исходными данными для обработки являются файлы высотных профилей отношения мощностей сигнала некогерентного рассеяния и шума, накопленных в течение сеанса измерения длительностью 1 мин. Каждое значение отношения $q(h) = P_C(h)/P_{Ш}$ умножается на величину $(h[\text{км}]/100)^2$. Получаемая в результате величина $\sigma_0(h) = q(h)(h/100)^2$ является сечением рассеяния ионосферной плазмы, измеренным в относительных единицах. По этим данным строятся графики зависимостей сечения рассеяния от времени на постоянных высотах: $\sigma_0 = \sigma_0(t)$ при $h = \text{const}$. Затем проводится визуальный анализ графиков $\sigma_0(t, h)$ с целью отбраковки "испорченных" сеансов измерения. В таких сеансах величина относительного сечения рассеяния на всех высотах чаще всего превосходит значение σ_0 в соседних по времени сеансах в несколько раз (реже – уменьшается практически до нуля). Данные этих сеансов заменяются средним значением предыдущего по времени и последующего сеансов на соответствующих высотах. Следует отметить, что таких "испорченных" профилей относительно немного. На следующем этапе обработки вычисляется скользящая дисперсия флуктуаций сечения рассеяния. На каждой высоте для первых N сеансов вычисляется дисперсия флуктуаций по формуле

$$D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\sigma_{0,i} - \bar{\sigma}_0)^2,$$

где $\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{0,i}$ – среднее значение сечения рассеяния в выбранных N

сеансах. Затем вычисляется дисперсия для следующих N сеансов, сдвинутых по номеру на единицу. Значение N может изменяться.

Такая обработка позволяет выявить интенсивные флуктуации сечения рассеяния ионосферной плазмы, вызванные ракетным стартом, на фоне естественных флуктуаций, имеющих гораздо меньшую интенсивность. Если вариации параметров ионосферы, вызванные стартом, по интенсивности сравнимы с естественными вариациями или даже меньше их, то такая методика не позволит обнаружить ракетные ионосферные возмущения.

Ионосферные возмущения, зарегистрированные после старта РН “Протон-К”. *Краткие сведения о ракете.* “Протон-К” (УР-500, 8К82) – ракета-носитель тяжёлого класса, предназначенная для выведения автоматических космических аппаратов на орбиту Земли и далее в космическое пространство. В зависимости от модификации ракета способна вывести 20 – 22 т полезной нагрузки на орбиту высотой 200 км. Стартовая масса – 700 т. Тяга двигательной установки: первой ступени – 9500 кН, второй ступени – 2300 кН, третьей ступени – 583 кН. Продолжительность работы двигателей первой ступени составляет 130 с, второй – 230 с, третьей – 250 с. Общее время работы маршевых двигателей – около 10 мин. Запуски осуществляются только с космодрома Байконур.

25 декабря 2006 года на исследовательском радаре некогерентного рассеяния проводилось зондирование ионосферы в режиме измерения мощности рассеянного сигнала (точнее – отношения мощностей сигнал/шум) с временным разрешением 1 мин и высотным – 10 км. Цель эксперимента – регистрация ионосферных ракетных возмущений. В 2218 (здесь и далее время LT) с космодрома Байконур с помощью РН “Протон-К” осуществлен запуск спутника глобальной навигационной системы “Глонас-М”.

На рис. 1 представлен график относительного сечения рассеяния ионосферной плазмы для высот 290 – 410 км в период времени с 2100 до 2350 (нижняя кривая соответствует высоте 290 км, верхняя – высоте 410 км) и график усредненной по всем высотам скользящей по 10 точкам дисперсии. Время запуска отмечено стрелкой.

Как видно из графиков, незначительный флуктуационный фон наблюдался с 2100 до 2220. Уровень дисперсии этих флуктуаций составлял примерно 0,25 отн. ед. Через 8 мин после запуска (в 2226) дисперсия флуктуаций начинает возрастать и достигает максимальной величины (~0,45 отн. ед.) в 2236, т.е. через 18 мин после старта ракеты, после чего начинает уменьшаться. В 2246 уровень флуктуаций возвращается к

естественному фону. Учитывая, что временное окно вычисления дисперсии составляет 10 мин, время существования повышенного уровня флуктуаций сечения рассеяния в этом случае составляет около 10 мин.

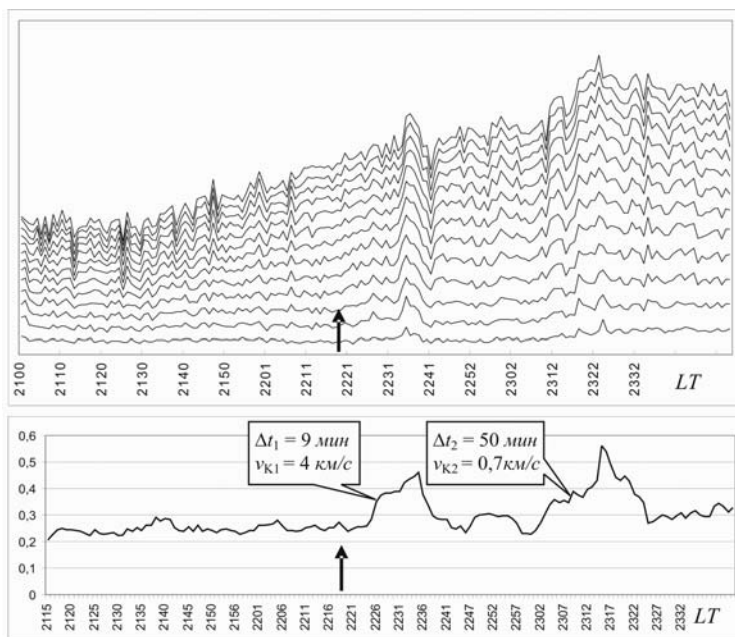


Рис. 1 – Относительное сечение рассеяния ионосферной плазмы на высотах 290 – 410 км над Харьковом 25 декабря 2006 г. (верхняя панель) и усредненная по высотам скользящая дисперсия по 10 точкам относительного сечения рассеяния ионосферной плазмы (нижняя панель). Запуск РН “Протон-К” осуществлен в 2218

Второй максимум дисперсии флуктуаций сечения рассеяния ионосферной плазмы наблюдался, примерно, через 40 мин после запуска. Он начинается в 2300 и достигает максимального значения (~0,55 отн. ед.) в 2315. Затем величина дисперсии начинает уменьшаться и достигает фонового уровня около 2330. Таким образом, продолжительность этого максимума составляет 30 мин, или, с учетом временного окна вычисления дисперсии – 20 мин.

Ионосферные возмущения, зарегистрированные после старта РН “Союз-2-16”. *Краткие сведения о ракете.* “Союз-2-16” – ракета-носитель среднего класса, предназначенная для выведения космических аппаратов на орбиту Земли. Масса полезного груза, выводимая на круговую орбиту высотой 200 км с наклонением 51° – 7,1 т. Стартовая масса – 313 т. Тяга

двигательной установки: первой ступени – 821 кН, второй ступени – 780 кН, третьей ступени – 300 кН. Продолжительность работы двигателей первой ступени составляет 120 – 140 с, второй – 285 – 320 с, третьей – 300 с. Общее максимальное время работы маршевых двигателей – около 12 мин. Запуски осуществляются с космодромов Байконур и Плесецк.

27 декабря 2006 года с космодрома Байконур ракетой-носителем “Союз-2-1б” (первый пуск) выведен на орбиту французский космический телескоп *COROT*. Старт произведен в 1623. Зондирование ионосферы на радаре НР осуществлялось в том же режиме, что и 25 декабря. На рис. 2 приведен график сечения рассеяния для высот 100 – 300 км в период времени с 1600 до 1800 и график усредненной по всем высотам скользящей дисперсии флуктуаций сечения рассеяния.

Как видно из графика, существенные вариации сечения рассеяния наблюдались в основном в верхней части высотного интервала 100 – 300 км, т.е. на высотах выше 200 км. Фоновый уровень флуктуаций в этот день составлял примерно 0,15 отн. ед. Первое существенное увеличение дисперсии флуктуаций зарегистрировано с 1626 до 1643 с максимумом в 1633. Значение дисперсии в максимуме примерно в 1,6 раза превышало фоновый уровень. С 1653 до 1712 зарегистрировано второе увеличение дисперсии флуктуаций, максимальное значение которого в 2,3 раза выше фонового уровня. Последнее в данном эксперименте значительное возрастание относительного сечения рассеяния наблюдалось с 1728 до 1741. Дисперсия флуктуаций сечения рассеяния примерно в 2,2 раза превысила фоновый уровень.

Анализ результатов. В экспериментах, результаты которых представлены выше, зарегистрировано увеличение дисперсии флуктуаций сечения рассеяния ионосферной плазмы над Харьковом после запусков мощных ракет-носителей на расстоянии 2100 км. Следует сразу же отметить, что связь между этими событиями (запуском ракеты и интенсивностью флуктуаций) только временная. Для установления причинно-следственной связи нужна другая экспериментальная база. По этой же причине нет возможности по представленным данным определить реальную скорость распространения возмущений. Во-первых, неизвестна среда их распространения (нейтральный газ атмосферы или ионосфера), и, во-вторых, неизвестен момент генерации волн, переносящих возмущение. Поэтому, говоря здесь о скорости распространения возмущений, мы будем иметь в виду кажущуюся скорость, определяемую по расстоянию от космодрома до Харькова и времени задержки регистрации возмущения по уровню половины максимума от момента старта.

В обоих экспериментах первое возмущение зарегистрировано через несколько минут после момента старта (25 декабря – $\Delta t_1 = 9$ мин; 27 декабря –

$\Delta t_1 = 6$ мин). Кажущиеся скорости распространения возмущений равны, соответственно, $v_{K1} = 4$ км/с и $v_{K1} = 5$ км/с. Их длительности также примерно равны и составляют около 20 мин. С учетом 10-минутного окна вычисления дисперсии

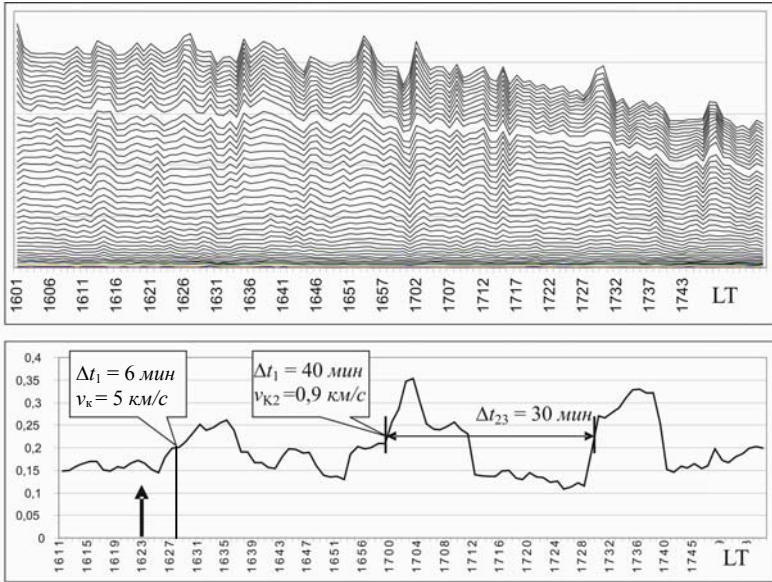


Рис. 2 – Относительное сечение рассеяния ионосферной плазмы на высотах 100 – 300 км над Харьковом 27 декабря 2006 г. (верхняя панель) и усредненная по высотам скользящая дисперсия по 10 точкам относительного сечения рассеяния ионосферной плазмы (нижняя панель). Запуск РН “Союз-2” осуществлен в 1623

реальная длительность существования возмущений составляет около 10 мин.

Второе возмущение 25 декабря наблюдалось через $\Delta t_2 = 50$ мин после запуска, а 27 декабря – через $\Delta t_2 = 40$ мин. Соответственно, кажущиеся скорости этих возмущений составляют 0,7 км/с и 0,9 км/с. В эксперименте 27 декабря примерно через 30 мин после второго зарегистрировано также и третье возмущение такой же интенсивности.

На основе представленных здесь экспериментальных данных о физической природе наблюдаемых возмущений можно высказать следующие предположения. Первые по времени возмущения вызваны распространяющимися в ионосфере медленными магнитогидродинамическими волнами, которые, как известно, на ионосферных высотах имеют скорости в несколько км/с. По-видимому, такие волны генерируются факелом работающих ракетных двигателей. В пользу этого предположения говорит

совпадение времени работы двигателей РН “Протон” и “Союз” (10 – 12 мин) и продолжительности регистрации возмущений.

Второе возмущение имеет кажущуюся скорость около 1 км/с; примерно с такой скоростью на ионосферных высотах распространяются внутренние гравитационные волны (ВГВ). Их периоды на высотах 200 – 300 км могут составлять 25 – 120 мин. Третье возмущение, зарегистрированное в эксперименте 27 декабря, по-видимому, является вторым периодом распространяющейся ВГВ. Если это так, то период основной гармоника волны равен примерно 30 мин, что также соответствует теоретическим представлениям.

Из графиков на рис. 1 и 2 видно, что в обоих случаях дисперсия флуктуаций сечения рассеяния увеличивается примерно в 2 раза. Это значит, что интенсивность флуктуаций в точке наблюдения не зависит от мощности возмущающего фактора, т.к. суммарная тяга двигателей РН “Протон-К” почти на порядок больше, чем у РН “Союз-2”.

Вызывает также интерес вопрос о причине, вызывающей изменение величины сечения рассеяния. Согласно формуле (1) сечение рассеяния может изменяться из-за изменения электронной концентрации или отношения кинетических температур электронов и ионов ионосферной плазмы. Также сечение рассеяния может увеличиваться при образовании мелкомасштабных неоднородностей в рассеивающем объеме. Прохождение возмущающей волны может вызывать в рассеивающем объеме незначительную турбулизацию плазмы. Если пространственный масштаб турбулентностей будет сравним с длиной зондирующей волны, то сечение рассеяния среды увеличится за счет появления когерентной составляющей (аналог рассеяния Вульфа-Брэгга в кристаллографии).

Выводы. Предложена методика обработки данных зондирования ионосферы методом некогерентного рассеяния с целью обнаружения и регистрации ионосферных возмущений, вызываемых запусками мощных ракет-носителей на расстоянии в несколько тысяч километром от места старта. Методика дает возможность регистрировать вариации сечения рассеяния ионосферной плазмы искусственного происхождения на фоне естественных флуктуаций в том случае, если интенсивность первых вариаций несколько больше, чем вторых. Эта методика не позволяет с достаточной точностью определять момент появления возмущения в точке наблюдения, но сам факт наличия возмущения, как показывают многочисленные примеры, с ее помощью устанавливается достаточно надежно.

Список литературы: 1. Перемещающиеся ионосферные возмущения, обнаруженные методом некогерентного рассеяния / В.И. Таран, Ю.И. Подьячий, В.И. Головин, В.И. Ващенко, И.Д. Аркадьев // Ионосферные исследования. – 1979. – № 27. – С. 102. 2. Об одном типе крупномасштабных возмущений в ионосфере / В.Д. Карлов, С.И. Козлов, В.П. Кудрявцев, В.И. Новожилков, Г.Н. Ткачев // Геомагнетизм и аэронавигация – 1983. – № 2. – С. 319. 3. Долгопериодные возмущения ионосферы техногенного происхождения / В.И. Таран,

Ю.И. Подъячий, А.А. Макашов // Ионосфера. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – 1991. – Вып. 1. – С. 32. 4. Искусственная модификация ионосферы при стартах ракет, выводящих на орбиту космические аппараты / П.М. Нагорский, Ю.Е. Таращук // Изв. вузов. Физика. – 1993 – № 10. – С. 98. 5. Ионосферно-магнитосферные эффекты запусков ракет в сторону высоких широт / М.Г. Деминов, В.Н. Ораевский, Ю.Я. Ружин // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2001. – Т. 41. № 6. – С. 772. 6. Регистрация ионосферных откликов на ударно-акустические волны, генерируемые при запуске ракет-носителей / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова, Плотников А. В. // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2002. – Т. 42. – №6. – С. 790. 7. Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет "Союз" и "Протон" / В.П. Бурмака, Л.Ф. Черногор, Ю.В. Черняк // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, № 3. – С. 254. 8. Волновые процессы в F-области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур / В.П. Бурмака, В.Н. Лысенко, Л.Ф. Черногор, Ю.В. Черняк // 2006. – Геомагнетизм и аэронавигация. – Т. 46, № 6. – С.783. 9. Флуктуации геомагнитного поля вблизи г.Харькова, сопровождавшие старты ракет с космодрома Байконур / Черногор Л.Ф. // 2009. – Геомагнетизм и аэронавигация. – Т.49, № 3, С.403. 10. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов / Л.Ф. Черногор // 2008. – Геомагнетизм и аэронавигация. – Т. 48, № 5. – С. 681. 11. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе / В.П. Бурмака, С.В. Панасенко, Л.Ф. Черногор // 2007. – Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. – № 11. – С.1. 12. Radiophysical observations of ionosphere disturbances generated by heavy class launch vehicle start / Yu. Pod'yachiy, V. Lisenko, Yu. Chernyak // 2008. – Reports of XIX General assembly of URSI.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 550.388.2

Ракетные возмущения ионосферы по данным зондирования методом некогерентного рассеяния / Ю.И. Подъячий // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 33 (1066). – С. 71-79. Бібліогр.: 12 назв.

Запропоновано методику обробки даних зондування іоносфери методом некогерентного розсіяння з метою виділення збурень перетину розсіяння іоносферної плазми після стартів потужних ракет-носіїв. Наведено приклади обробки реальних даних зондування іоносфери над Харковом під час запусків ракет з космодрому Байконур.

Ключові слова: іоносфера, некогерентне розсіяння, іоносферні збурення, запуски ракет, методики обробки даних зондування.

The method of processing of data of sounding of ionosphere the method of non-coherent scatter is offered with the purpose of selection of perturbation of section of dispersion of ionosphere plasma after the starts of powerful rockets. The examples of processing of the real data of sounding of ionosphere are resulted over Kharkov during the starts of rockets from a space center Baikonur.

Keywords: ionosphere, incoherent scattering, ionospheric disturbances, missile launches, sensing data processing technique.

М.М. ШАРКАДИ, магистр, студент, НТУ “ХПИ”;

В.А. ПУЛЯЕВ, д-р техн. наук, проф., зам. дир., Институт ионосферы,
Харьков

КОНТРОЛЬНЫЙ КАНАЛ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Рассмотрена разработка контрольного устройства для вычисления межпериодной корреляции сигнала рассеяния и проведено моделирование алгоритмов его работы.

Ключевые слова: сигнал рассеяния, межпериодная корреляция, отражения от дискретных целей.

Постановка задачи. В настоящее время большое внимание уделяется изучению околоземного космического пространства методом некогерентного рассеяния (НР) радиоволн. Но надежному расчету параметров ионосферной среды мешает ряд факторов – появление в зоне ДН антенн радаров спутников и метеорных потоков, а также возникновение когерентных сигналов из-за работающих радиосистем [1]. Все это приводит к возникновению мешающих отражений, в результате чего дальнейшая статистическая обработка полезного сигнала и его анализ дают неверный результат.

Метод НР предполагает использование процедур предварительного анализа и уточнения данных с последующим устранением аномальных результатов при обработке входной информации [2]. Это способствует максимальному приближению решений к теоретически обоснованному минимуму ошибок в процессе параметрической идентификации состояния ионосферной плазмы. В то же время эффективным подходом является и техническое усовершенствование системы корреляционной обработки для радара НР, а именно – внедрение в его структуру одноканального вспомогательного вычислительного устройства, предназначенного для расчета коэффициентов корреляции сигнала НР на интервале, равном периоду излучения зондирующего импульса.

Целью данных исследований является создание условий для улучшения точности распознавания во входной информации всевозможных помех, а также отражений от дискретных объектов путем дополнительного корреляционного анализа сигнала в контрольном устройстве обработки.

Разработка контрольного канала. Процедура отслеживания аномальных значений элементов числового ряда является крайне важным пунктом контроля ионосферных данных. Она заключается в проверке чисел на отклонения, которые противоречат априорной информации о величине сигнала рассеяния на исследуемых высотных интервалах. В процессе проверки осуществляется фиксация мест появления этих помех с тем, чтобы при последующей обработке иметь возможность их детального учета.

Реализация метода определения высотных интервалов, на которых появляются отражения, производится путем расчета характеристик контролируемого сигнала вдоль числовых выборок (шкалы высот) [2]. К этим характеристикам относятся математическое ожидание оценок и их соответствующие дисперсии, которые используются при анализе попаданий текущих значения сигнала в некоторый задаваемый доверительный интервал.

Суть усовершенствования состоит в разработке вспомогательного одноканального корреляционного устройства [3], устанавливаемого на выходе приемника и предназначенного для расчета и накопления на протяжении сеанса измерений высотного распределения коэффициентов межпериодной (через задержку $T_{изп}$) корреляции сигнала НР, поступающего на протяжении радиолокационной развертки дальности. Результат накопления коррелятора при этом дает возможность для отчетливого наблюдения коррелированных выбросов, место расположения которых указывают на локализацию отражений от целей и импульсных помех.

На рис. 1 приведена функциональная схема предложенного варианта контрольного канала для системы обработки радар НР.

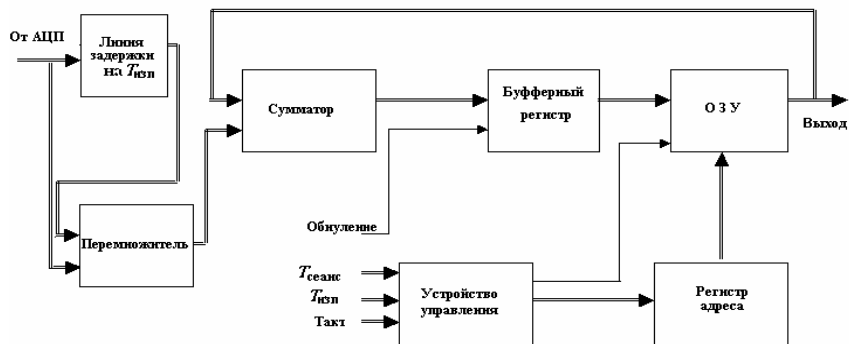


Рис. 1 – Функциональная схема контрольного канала

Информация, поступающая на такой канал с АЦП, имеет разрядность 8 байт. Выходная информация, образованная перемножением случайных чисел соседних разверток, но с одноименных высотных участков и за время сеанса накопления длительностью $T_{сеанс} = 1$ мин, не превышает разрядности 16 байт. Полученный результат поступает на выход канала, и далее через параллельный порт считывается для дальнейшего анализа.

Результаты моделирования процесса обработки информации в контрольном канале приведены на рис. 2.

В качестве исходных данных был взят двумерный информационный массив, полученный на протяжении сеанса длительностью 1 мин, когда напряжения принимаемого вдоль развертки дальности сигнала рассеяния,

содержащие, в том числе, и отражения от летательных объектов, заносились в оперативную память ПК. С использованием этого массива были получены результаты аналитического моделирования процесса расчета высотного распределения межпериодной корреляции $R(T_{и}, h)$ (нижняя часть рисунков).

Как можно видеть, используемое статистическое накопление перемножаемых в соседних развертках некоррелированных отсчетов сигнала рассеяния дает приближающуюся к нулю составляющую, в то время как накопление перемножаемых составляющих от когерентных отражений (а) и импульсных помех (б) оказываются отличными от нуля. Такой результат возможен благодаря тому, что интервал корреляции для мешающих сигналов больше периода повторения $T_{и}$, а для сигнала НР значительно меньше. В целом, применяемый подход увеличивает возможность выявления и идентификации коррелированных сигналов от дискретных объектов с помощью предложенного дополнительного канала. Повышается достоверность получения информации также в том случае, когда возникают отражения в виде сигналов от объектов, захватываемых боковыми лепестками диаграммы направленности антенны.

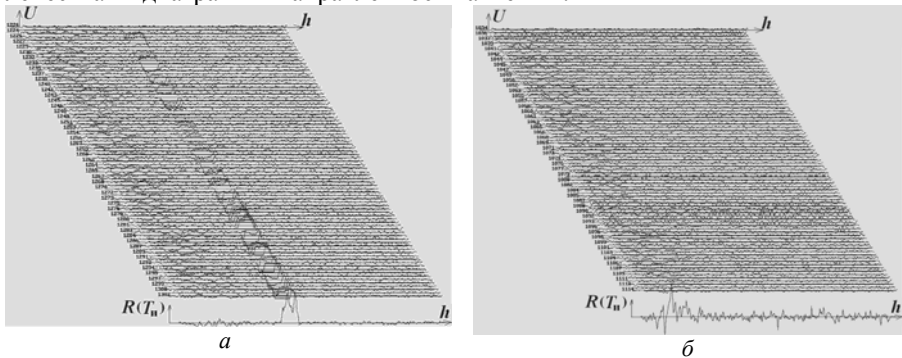


Рис. 2 – Сигнал НР вдоль разверток дальности и полученные с его помощью межпериодные коэффициенты корреляции

Для обеспечения синхронной работы блоков контрольного канала от задающей системы радара НР должны поступать серии импульсов, как это показано на рис. 3.

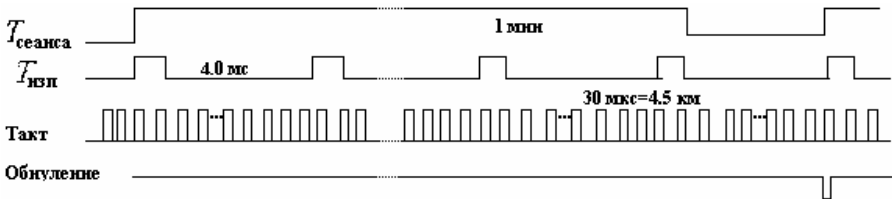


Рис. 3 – Сигналы управления контрольным каналом

Они предназначены для первоначального обнуления оперативной памяти, управления регистром адреса, обеспечения режима тактирования схем блоков во время работы, для задания интервала, предназначенного для считывания данных с контрольного канала и т.д.

Выводы. В работе предложена методика аппаратурного анализа сигнала рассеяния, использование которой позволяет с целью увеличения отношения сигнал/шум уменьшить зависимость результатов обработки от мешающих отражений и импульсных помех. Для ее реализации на первичном этапе анализа данных, непосредственно производимой в процессе прохождения информации через основной канал обработки, необходимо осуществить режим “перехватывания” оцифрованных значений сигнала с выхода приёмника радара НР и осуществить предварительную межпериодную корреляционную обработку. Для этой цели рассмотрена функциональная схема контрольного канала, работающего по предложенному алгоритму, который синхронизируется с помощью управляющих сигналов с радара НР.

Приведены результаты моделирования процесса расчета в таком контрольном канале межпериодных коэффициентов корреляции на примере обработки информации для одного из сеансов экспериментальных данных. Полученная информация о наличии отражений от целей и появлении импульсных помех предназначена оператора при анализе им во время отбора полезной информации из смеси сигнал+шум, фиксируемой в основном канале обработки радара НР.

Список литературы: 1. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую природную среду: справочное пособие / под общ. ред. В.В. Адушкина, С.И. Козлова, А.В. Петрова. – М.: Анкил, 2000. – 640 с. 2. Пуляев В.А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн: монография / В.А. Пуляев, Д.А. Дзюбанов, И.Ф. Домнин. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2011. – 240 с. 3. Шаркади М.М. Контрольный канал радара некогерентного рассеяния / М.М. Шаркади, В.А. Пуляев // Сб. тезисов международной школы-конф. “Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН-2013)”. – Малый Маяк, Крым. – 30 сентября – 4 октября 2013. – С. 54.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 628.396

Контрольный канал радара некогерентного рассеяния / М.М. Шаркади, В.А. Пуляев // Вісник НТУ “ХПИ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 80-83. Бібліогр.: 3 назв.

Розглянуто розробку контрольного пристрою для обчислення міжперіодної кореляції сигналу розсіяння та проведено моделювання алгоритмів його роботи.

Ключові слова: сигнал розсіяння, міжперіодна кореляція, відгуки від дискретних цілей.

The development of a control device for computing the correlation from period to period for scattering signal and modeling algorithms for its work are treated

Keywords: scattering signal, the correlation from period to period, the reflection from the digital objects.

Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт ионосферы, Харьков;

А.А. КОНОНЕНКО, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ВАРИАЦИИ ЧАСТОТЫ f_oF2 СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ В ТЕЧЕНИЕ ДВУХ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Представлены результаты наблюдений ионосферы с помощью ионозонда “Базис” (Харьков) в течение двух циклов солнечной активности. Проведено их сравнение с данными дигизондов DPS-4 в Прухонице (Чехия) и Дурбесе (Бельгия), расположенных на близкой широте.

Ключевые слова: метод вертикального зондирования ионосферы, ионозонд, критическая частота, временные вариации критической частоты, цикл солнечной активности.

Постановка задачи. Метод вертикального импульсного зондирования ионосферы в настоящее время продолжает оставаться одним из основных методов диагностики ионосферы [1–4]. Использование ионозонда «Базис» Ионосферной обсерватории Института ионосферы, которая находится вблизи г. Харькова (49.6° с.ш., 36.3° в.д.), позволяет исследовать долготные эффекты в ионосфере, благодаря удачному расположению на широте, близкой к широтам европейских станций в Прухонице (Чехия, 50.0° с.ш., 14.6° в.д.) [5] и Дурбесе (Бельгия, 50.1° с.ш., 4.6° в.д.) [6]. Выбор этих станций для этой цели обоснован в [7, 8]. В работах [7–9] анализировались данные станций вертикального зондирования для отдельных суток и сезонов. Интерес представляет анализ долговременных вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы (f_oF2) и изучение её связи с солнечной активностью (СА) на протяжении продолжительного периода. Такого рода исследования важны для изучения среднеширотной ионосферы над центральноевропейским регионом. Актуальность состоит также в том, что 24-й цикл активности Солнца отличается от предыдущих циклов задержкой возрастания активности и умеренной активностью в его максимуме.

Цель статьи – анализ данных ионозонда «Базис» Института ионосферы, полученных на протяжении 1997–2012 гг. при различном состоянии космической погоды и сопоставление их с аналогичными данными ионозондов, расположенных на близкой широте.

Аппаратура. Ионозонд “Базис” используется в составе радара некогерентного рассеяния для его калибровки с целью определения концентрации электронов, а также автономно в отдельных экспериментах. Он позволяет проводить вертикальное, наклонное и трансionoсферное импульсное зондирование. Его основные параметры приведены в [7]. В частности, диапазон рабочих частот в режиме вертикального зондирования

1–20 МГц, разрешающая способность по высоте – 3 км, импульсная мощность передатчика не менее 15 кВт, чувствительность приемника – 15 мкВ. Приёмная и передающая антенны – ромбические с вертикальным излучением, расположены ортогонально. Каждая антенна состоит из двух ромбов. Большой ромб работает в диапазоне 1–6 МГц, а малый – 6–20 МГц. Погрешность измерения критической частоты – 0,05 МГц.

Для вертикального зондирования ионосферы в Прухонице и Дурбесе используется дигизонд DPS-4, параметры и описание которого приведены в [10].

Временные вариации критической частоты. Проведен анализ данных ионозона «Базис» Института ионосферы, полученных на протяжении 1997–2012 гг. при различном состоянии космической погоды. На рис. 1 приведены результаты измерений критической частоты слоя F2 ионосферы в характерные для анализа времена суток: полдень и полночь. Здесь же представлены вариации индексов солнечной ($F_{10,7}$) и геомагнитной (Ap) активностей, а также вычисленные тренды f_oF2 и $F_{10,7}$.

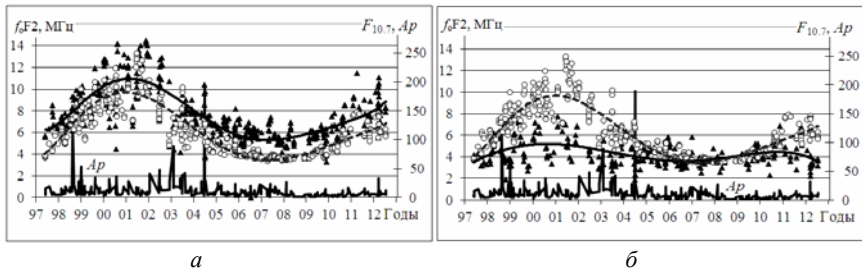


Рис. 1 – Временные вариации полуденных (а) и полуночных (б) значений критической частоты f_oF2 (треугольники) на фоне вариаций индексов солнечной активности $F_{10,7}$ (кружки) и геомагнитной активности Ap . Сплошными линиями показаны тренды временных вариаций f_oF2 , а штриховыми – $F_{10,7}$

Как видно из рис. 1, при наличии возмущений в ионосфере ($Ap > 10$) отклонения значений f_oF2 от тренда возрастают.

На рис. 2, а и 2, б представлены результаты измерений f_oF2 , а также индексов $F_{10,7}$ и Ap , при отсутствии геомагнитных возмущений.

Видно, что временные вариации f_oF2 коррелируют с вариациями индекса солнечной активности (СА) $F_{10,7}$. Экстремальные значения тренда $\langle f_oF2 \rangle$ близки по времени к экстремальным значениям сглаженных временных зависимостей индекса $F_{10,7}$.

Изменение тренда $\langle f_oF2 \rangle$ измеренной в полдень критической частоты на протяжении 23 цикла СА (май 1996 г. – январь 2009 г.) в 1,4 раза больше прироста $\langle f_oF2 \rangle$ во время 24 цикла (начало в январе 2009 г.): отношения максимального значения к минимальному в этих циклах СА составляют 2,4 и 1,7 соответственно. Такое отличие вариаций f_oF2 в двух циклах СА

соответствует отличию вариаций концентрации электронов в максимуме слоя F2 примерно в два раза. Аналогичные соотношения имели место и для индекса $F_{10,7}$: его изменение в 23 цикле СА в среднем в 1,5 раза больше изменения во время 24 цикла. Среднее значение частоты f_oF2 , измеренной в околополуденное время, изменилось в 1,5 и 1,3 раза в течение 23 и 24 циклов соответственно, т. е. отличие составляет около 1,2 раза.

Минимальные значения в вариациях $\langle f_oF2 \rangle$ для обоих циклов близки, также как и минимумы в сглаженных зависимостях индекса $F_{10,7}$. Они равны 5,5 МГц (полдень) и 3,5 МГц (полночь).

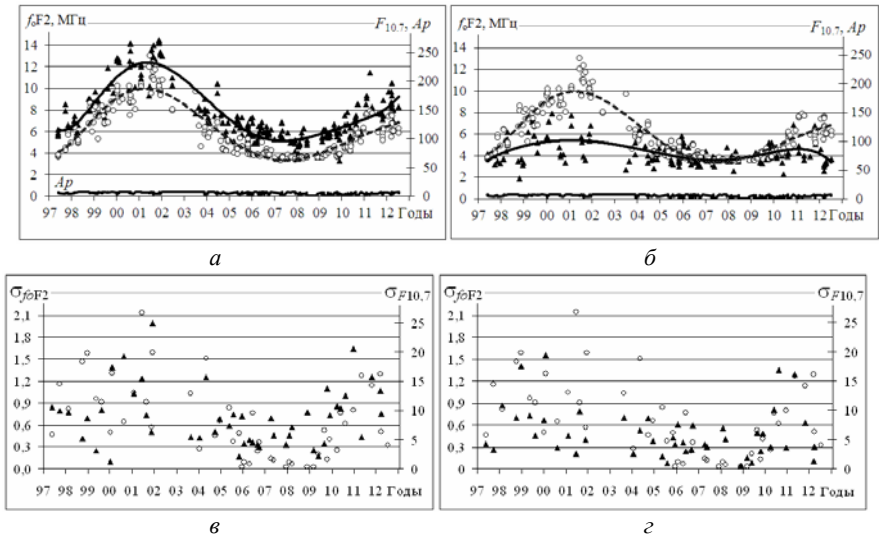


Рис. 2 – Временные вариации полуденных (а) и полуночных (б) значений частоты f_oF2 (треугольники), индекса $F_{10,7}$ (кружки) и их среднеквадратических отклонений (в, г), а также индекса Ap (а, б), при отсутствии геомагнитных возмущений. Сплошными линиями показаны тренды временных вариаций f_oF2 , а штриховыми – $F_{10,7}$

Абсолютные значения среднеквадратических отклонений (σ_{foF2}) частоты f_oF2 , измеряемой в околополуденное время, ниже, но такого же порядка, как и вблизи полудня (рис. 2, в, г). В обоих случаях они увеличивались при росте СА аналогично тому, как возрастал разброс значений индекса $F_{10,7}$. Их относительные значения (σ_{foF2}/f_oF2) в среднем составляли 10–12% для дня и ночи независимо от активности Солнца.

На рис. 3 представлены временные вариации критических частот слоя F2, измеренные в Харькове, Прухонице [5] и Дурбесе [6] при спокойном состоянии ионосферы вблизи местных полудня (рис. 3, а) и полуночи (рис. 3, б). Здесь же приведены относительные расхождения в результатах

измерения f_oF2 в Харькове–Прухонице и Харькове–Дурбесе $\delta = (f_oF2_{\text{Харьков}} - f_oF2_{\text{Прухонице или Дурбес}}) / f_oF2_{\text{Харьков}} \cdot 100\%$.

Видно, что вариации критической частоты качественно подобны. Преобладающие отличия в вариациях f_oF2 имеют место в ночное время между данными Харькова и Дурбеса (рис. 3, б, з). Эти отличия тем больше, чем меньше активность Солнца (период с 2005 по 2010 г.). Наибольшие отличия (до 40–50% для Дурбеса и 30% для Прухонице в полуденное и полуночное время) наблюдались в декабре 2008 г. (рис. 3, в, з). Отметим, что околополуденные вариации f_oF2 на всех трёх станциях имели явный колебательный характер с периодом один год (см. рис. 3, б), что объясняется эффектом «сезонной аномалии» [11]). Причем, амплитуда колебаний с возрастанием СА увеличилась примерно с 0,9 МГц в 2007–2008 гг. до 2,2 МГц в 2011–2012 гг. (т.е. в 2,4 раза). При этом индекс $F_{10,7}$ вырос в среднем в 1,9 раза.

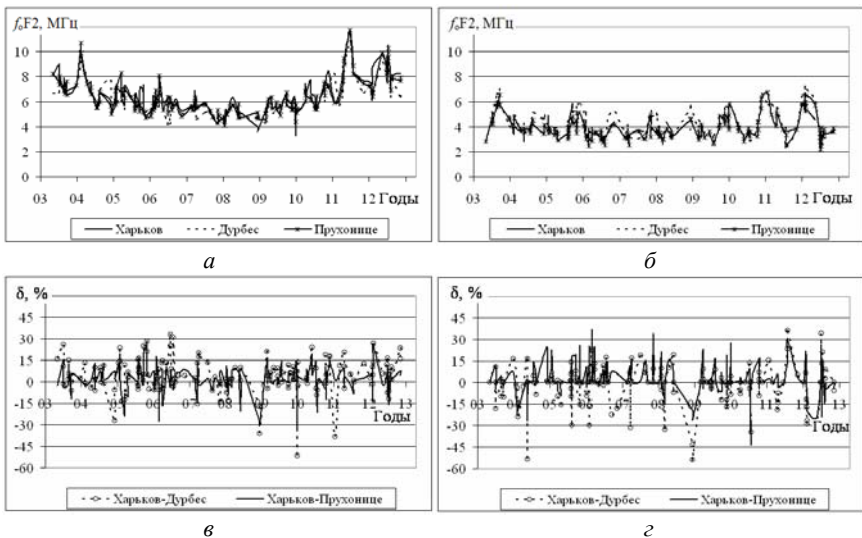


Рис. 3 – Временные вариации критических частот в Харькове, Прухонице и Дурбесе в околополуденное (а) и околополуночное (б) время и их относительные расхождения (в, з)

Выводы. Временные вариации критической частоты f_oF2 коррелируют с вариациями индекса солнечной активности $F_{10,7}$. Изменения трендов $\langle f_oF2 \rangle$ критической частоты, измеренной в полдень и полночь, во время 23 цикла СА в 1,4 (день) и 1,2 (ночь) раза больше изменений $\langle f_oF2 \rangle$ во время 24 цикла: отношения максимального значения $\langle f_oF2 \rangle$ к минимальному в 23 и 24 циклах СА составили соответственно 2,4 и 1,7 днём, 1,5 и 1,3 ночью. Дисперсия значений частоты f_oF2 увеличивается при росте солнечной активности

подобно тому, как возрастает дисперсия индекса $F_{10,7}$. Относительные значения среднеквадратического отклонения частоты f_oF_2 в среднем составили 10–12% при любой активности Солнца. Вариации частоты f_oF_2 , измеренной в околополуденное и околополуночное время в Харькове, Прухонице и Дурбесе, качественно подобны. Наибольшие отличия наблюдались при минимальной СА зимой 2008 г. между вариациями f_oF_2 ионозондов Харькова и Дурбеса. Амплитуда сезонных колебаний ночных значений f_oF_2 с возрастанием солнечной активности увеличилась примерно в 2,4 раза, в то время как индекс $F_{10,7}$ вырос в среднем в 1,9 раза.

Список литературы: 1. *McNamara L.F.* Assimilation procedures for updating ionospheric profiles below the F2 peak / *L.F. McNamara, J. M.J. Angling, S. Elvidge et al.* // *Radio Sci.* – 2013. – V. 48, – P. 143 – 157. 2. *Reinisch B.W.* Recent advances in real time analysis of ionograms and ionospheric drift measurements with digisondes / *B.W. Reinisch, X. Huang, I.A. Galkin et al.* // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 2005. – Vol. 67, No. 12. – P. 1054 – 1062. 3. *McNamara L.F.* Assimilation of ionosonde profiles into a global ionospheric model / *L.F. McNamara, G.J. Bishop, J.A. Welsh* // *Radio Sci.* – 2011. – V. 46. – P. 1 – 14. 4. *Lei J.* Variations of electron density based on longterm incoherent scatter radar and ionosonde measurements over Millstone Hill / *J. Lei, L. Liu, W. Wan, S.-R. Zhang* // *Radio Sci.* – 2005. – V. 40. – P. 1 – 10. RS2008 doi:10.1029/2004RS003106. 5. *Pruhonice / Digisonde-4D / Czech Republic.* – <http://147.231.47.3>. 6. *Dourbes / Digisonde DPS-4/ Belgium* – <http://digisonde.oma.be>. 7. *Емельянов Л.Я.* Ионозонд “Базис” Института ионосферы как средство для мониторинга состояния ионосферы / *Л.Я. Емельянов, А.А. Кононенко* // *Радиотехника: Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб.* – 2011. – Вып. 167. – С. 30 – 33. 8. *Емельянов Л.Я.* Сезонные наблюдения ионосферы с помощью ионозонда “Базис” института ионосферы / *Л.Я. Емельянов, А.А. Кононенко* // *Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: Сборник научных трудов. Тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”, № 57 (963).* Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. С. 29–34. 9. *Черногор Л.Ф.* Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: сезонно-суточные вариации / *Л.Ф. Черногор, В.В. Барабан* // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 353-362. 10. *Ратовский К.Г.* Современный цифровой ионозонд DPS-4 и его возможности / *К.Г. Ратовский, А.П. Потехин, А.В. Медведев, В.И. Куркин* // *Солнечно-земная физика.* – 2004. – Т. 118, № 5. – С. 102 – 104. 11. *Иванов-Холодный Г.С.* Прогнозирование состояния ионосферы / *Г.С. Иванов-Холодный, А. В. Михайлов.* – Л.: Гидрометеиздат, 1980.–190 с.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 550.388:551.510.535:621.396

Вариации частоты f_oF_2 среднеширотной ионосферы в течение двух циклов солнечной активности / Л.Я. Емельянов, А.А. Кононенко // *Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радиофізика та іоносфера.* – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 84-88. *Бібліогр.:* 11 назв.

Наведено результати спостережень іоносфери за допомогою іонозонда “Базис” (Харків) на протязі двох циклів сонячної активності. Проведено їх порівняння з даними дигізондів DPS-4 в Прухонице (Чехія) і в Дурбесі (Бельгія), що розташовані на близькій широті.

Ключові слова: метод вертикального зондування іоносфери, іонозонд, критична частота, часові варіації критичної частоти, цикл сонячної активності.

The results of ionospheric observations with ionosonde “Bazis” (Kharkiv) during two solar cycles are presented. A comparison of the Kharkiv ionosonde data with ones of DPS-4 digisondes in Pruhonice (Czech Republic) and Dourbes (Belgium) located at such latitudes is carried out.

Keywords: vertical sounding, ionosonde, critical frequency, temporal variations of the critical frequency, solar cycle.

М.В. ЛЯШЕНКО, канд. физ.-мат. наук, учёный секретарь, Институт ионосферы, Харьков

ЗОНАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ПЕРЕНОС ПЛАЗМЫ ЗА СЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДРЕЙФА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 5 – 6 АВГУСТА 2011 Г.

Представлены результаты моделирования вариаций зонального электрического поля и вертикальной компоненты скорости переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа во время магнитной бури 5 – 6 августа 2011 г. Подтверждено, что во время сильных геомагнитных возмущений имеет место проникновение электрических полей магнитосферного происхождения в среднеширотную ионосферу.

Ключевые слова: ионосфера, геокосмическая буря, зональное электрическое поле, дрейф плазмы.

Введение. Хорошо известно, что в магнитоспокойных условиях вклад магнитосферных источников в электрические поля и токи в средних и низких широтах довольно мал. Как показали приведенные в работах [1 – 4] результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов, величина электрического поля в среднеширотной ионосфере в отсутствие геомагнитных возмущений не превышает единиц мВ/м. На высотах максимума области F2 ионосферы электромагнитный дрейф плазмы, вызванный данными полями, мал, по сравнению с процессами переноса заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии и нейтральных ветров. Во время сильных геомагнитных возмущений имеет место проникновение электрических полей на высоты среднеширотной ионосферы и, вследствие этого, усиление скорости движения плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Следует отметить, что перенос плазмы за счет электромагнитного дрейфа в период геомагнитных бурь оказывает существенное влияние на высотное распределение параметров среднеширотной ионосферы.

Целью данной работы является расчет параметров зонального электрического поля в ионосфере над Харьковом, а также моделирование вариаций скорости переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа во время магнитной бури 5 – 6 августа 2011 г.

В работе [5] представлены результаты исследований вариаций основных параметров геокосмоса во время магнитной бури 5 – 6 августа 2011 г. по данным радара НР в Харькове.

Краткие сведения о магнитной буре 5 – 6 августа 2011 г. Сверхсильная магнитная буря (МБ) началась 5 августа 2011 г. в 19:03 UT. Индекс геомагнитной активности K_p в главную фазу магнитной бури достигал величины 8-, $D_{st} = -113$ нТл. Скорость солнечного ветра (СВ) в течение главной фазы варьировалась в пределах 570 – 620 км/с, температура

частиц СВ достигала величины $6.4 \cdot 10^5$ К, концентрация частиц СВ $N_{sw} \approx 1.9 \cdot 10^7$ м⁻³. Значение B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) составляло $-(15 - 18)$ нТл, значение модуля магнитной индукции ММП равнялось $25 - 27$ нТл. Индекс авроральной активности $AE_{max} \approx 1740$ нТл. Величина функции Акасофу $\varepsilon \approx 37$ Дж/с.

Основные теоретические соотношения. Как известно, в отсутствие возмущений эффектами электрических полей в средних широтах можно пренебречь. Однако во время сильных геомагнитных бурь имеет место усиление электрических полей вследствие магнитосферной конвекции, что существенно влияет на динамику среднеширотной ионосферы. В возмущенных условиях в средних широтах и в пренебрежении эффектами склонения геомагнитного поля основной вклад в вертикальный перенос плазмы вносит зональное электрическое поле. Электрическое поле, направленное на восток, вызывает дрейф плазмы вверх, а поле, направленное на запад – перенос ионосферной плазмы вниз. Оценим величину зональной компоненты электрического поля, а также вклад вертикальной составляющей движения плазмы за счет электромагнитного дрейфа в динамический режим ионосферы во время МБ 5 – 6 августа 2011 г.

Как показали расчеты, представленные в работе [6], имеет место корреляция временных вариаций AE -индекса и значений зональной компоненты электрического поля E_y . В данном случае, электрические поля магнитосферного происхождения и геомагнитный разогрев плазмы являются основными источниками динамических процессов в ионосфере в средних широтах во время сильных геомагнитных возмущений.

На рис. 1 представлены вариации AE -индекса в период с 3 по 9 августа 2011 г.

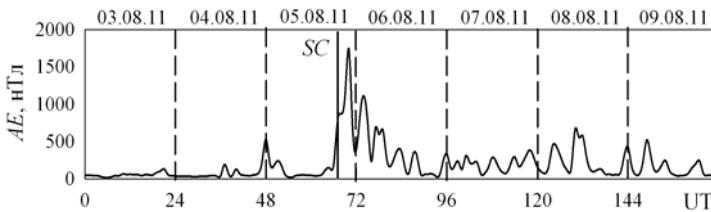


Рис. 1 – Временные вариации индекса авроральной активности AE (WDC Kyoto) в период с 3 по 9 августа 2011 г. Вертикальной линией отмечено внезапное начало магнитной бури (SC).

Для расчета величины E_y , воспользуемся эмпирическим соотношением между величиной электрического поля и индексом авроральной активности, приведенным в [6]:

$$E_y = (0.55 - 0.01AE) \cdot 10^{-3},$$

где AE – индекс авроральной активности (в нТл).

На рис. 2 приведены временные вариации зональной компоненты электрического поля в среднеширотной ионосфере в период с 3 по 9 августа 2011 г. на высоте 300 км.

Выражение для расчета скорости переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа в пренебрежении эффектами склонения имеет вид [7]

$$v_{EB} \approx (E_y/B) \cos I,$$

где B – модуль геомагнитного поля, I – наклонение геомагнитного поля.

На рис. 3 представлены результаты расчета временных вариаций вертикальной составляющей скорости движения плазмы за счет электромагнитного дрейфа во время магнитной бури и спокойных условиях на высоте 300 км.

Результаты моделирования. Как показали расчеты, в главную фазу МБ величина E_y достигала значений -17 мВ/м. Тогда как в спокойных условиях величина зональной компоненты электрического поля не превышала -5 мВ/м.

В главную фазу МБ величина скорости v_{EB} достигала значений 430 м/с, тогда как в магнитоспокойных условиях, перенос плазмы за счет электромагнитного дрейфа практически отсутствовал.

В целом, полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными другими авторами [1, 3, 6].

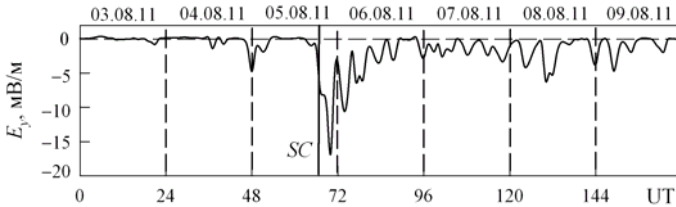


Рис. 2 – Временные вариации величины зонального электрического поля E_y (расчёт) в период с 3 по 9 августа 2011 г.

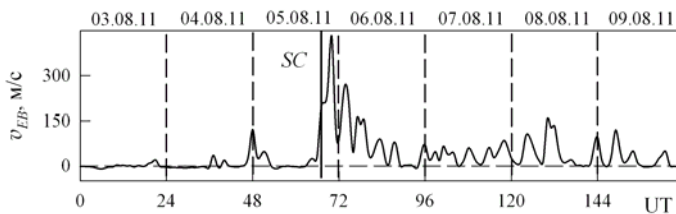


Рис. 3 – Временные вариации вертикальной составляющей скорости переноса частиц за счет электромагнитного дрейфа v_{EB} (расчет) в период с 3 по 9 августа 2011 г.

Выводы. 1) Как показали расчеты, в главную фазу МБ величина зональной компоненты электрического поля достигла величины -17 мВ/м, тогда как в спокойных условиях величина E_y не превышала единиц мВ/м.

2) Величина вертикальной составляющей скорости движения плазмы за счет электромагнитного дрейфа в главную фазу магнитной бури достигала значений 430 м/с, тогда как в невозмущенных условиях перенос плазмы за счет электромагнитного дрейфа был незначительным.

3) Оценка вклада скорости электромагнитного дрейфа в общую скорость переноса плазмы во время сильных геомагнитных возмущений позволит более точно описывать поведение нейтральных ветров в течение магнитных бурь.

Список литературы: 1. *Blanc M., Amayenc P., Bauer P., Taieb C.* Electric field induced from the French incoherent scatter facilities // *J. Geophys. Res.* – 1977. – Vol. 82, No. 1. – P. 87-97. 2. *Blanc M., Amayenc P.* Seasonal variations of the ionospheric $E \times B$ drift above Saint-Santin on quiete days // *J. Geophys. Res.* – 1979. – Vol. 84, No. A6. – P. 2691-2704. 3. *Ogawa T., Tanaka Y., Huzita A., Yasuhara M.* Horizontal electric fields in the middle latitude // *Planet. Space Sci.* – 1975. – Vol. 23. – P. 825-830. 4. *Richmond A.D., Blanc M., Emery B.A., Wand R.H., Fejer B.G., Woodman R.F., Ganguly S., Amayenc P., Behnke R.A., Calderon C., Evans J.V.* An empirical model of quite-day ionospheric electric fields at middle and low latitudes // *J. Geophys. Res.* – 1980. – Vol. 85, No. A9. – P. 4658-4664. 5. *Домнин И.Ф., Емельянов Л.Я., Ляшенко М.В., Харитонова С.В., Черногор Л.Ф.* Ионосферные процессы, сопровождавшие геокосмическую бурю 5–6 августа 2011 г. // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 320 – 332. 6. *Сергеевко Н.П.* Оценки электрических полей во время ионосферных возмущений. – В кн.: *Ионосферное прогнозирование.* – М.: Наука, 1982. – С. 91–96. 7. *Брионелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. – М.: Наука, 1987. – 528 с.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 550.388

Зональное электрическое поле и перенос плазмы за счет электромагнитного дрейфа во время магнитной бури 5 – 6 августа 2011 г. / М.В. Ляшенко // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радиофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 89-92. Бібліогр.: 7 назв.

Представлено результати моделювання варіацій зонального електричного поля та вертикальної компоненти швидкості переносу плазми за рахунок електромагнітного дрейфу під час магнітної бури 5 – 6 серпня 2011 р. Підтверджено, що під час сильних геомагнітних збурень має місце проникнення електричних полів магнітосферного походження у середньоширотну іоносферу.

Ключові слова: іоносфера, геокосмічна буря, зональне електричне поле, дрейф плазми.

The modeling results of the zonal electric field and the vertical component of the plasma transfer velocity due to electromagnetic drift during August 5–6, 2011 magnetic storm were presented. Confirmed that has a penetration of electric fields from magnetospheric origin in the mid-latitude ionosphere during strong geomagnetic disturbances.

Keywords: ionosphere, geospace storm, zonal electric field, plasma drift.

С.В. ГРИНЧЕНКО, н.с., Институт ионосферы, Харьков;
Д.А. ДЗЮБАНОВ, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., зав. отд., Институт
ионосферы, Харьков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОКОЛОПОЛУДЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ В F2-ОБЛАСТИ

Представлены результаты теоретического моделирования скорости переноса и электронной концентрации области F2 околополуденной ионосферы для магнитоспокойных условий в дни летнего и зимнего солнцестояний. Особый интерес представляет расчёт скорости переноса, сезонные изменения которой являются малоизученными. Проведено сопоставление теоретических расчётов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: ионосфера, движение плазмы, горизонтальный ветер.

Введение. Скорость движения ионосферной плазмы играет не менее важную роль в балансе ионизации F-области, чем процессы ионообразования и рекомбинации. Поэтому понимание физики динамических процессов является ключевым для объяснения многих явлений, которые не могут быть интерпретированы только с помощью упрощенных подходов, например теории простого слоя Чепмена. Наиболее успешным в определении скорости движения ионосферной плазмы показал себя метод некогерентного рассеяния [1]. Этот метод дает возможность непосредственно измерить скорость движения плазмы вдоль луча радара. Для радара Института ионосферы – это вертикальная составляющая скорости. Однако этот параметр является все же одной из многих составляющих сложной схемы физических процессов, куда, кроме ионообразования и рекомбинации, входят также процессы глобальной термосферной циркуляции и амбиполярной диффузии. Поэтому в данной работе ставится задача определить скорость движения плазмы в процессе теоретического самосогласованного расчёта с привлечением данных о составе и динамике нейтральной атмосферы, космической погоды. Расчёты проводятся для конкретной даты и местного времени. Используются также данные ионосферных наблюдений. Дальнейшие исследования будут направлены на систематизированное сопоставление расчётных и измеренных значений скорости движения для использования последних при решении обратной задачи определения динамики нейтральной атмосферы.

Цель работы – теоретический расчёт скорости движения плазмы в ионосфере для конкретных гелиогеофизических условий. Результаты наблюдений являются критерием правильности используемой схемы вычислений.

© С.В. Гринченко, Д.А. Дзюбанов, 2013

Роль динамики верхней атмосферы в формировании ионосферной F-области. Динамика верхней атмосферы является одной из важнейших проблем геокосмоса. Это относится как к динамике нейтральной составляющей, так и к динамике ионосферы. При этом следует отметить, что динамика нейтральной составляющей определяется, в основном, приливными силами, вызываемыми нагревом солнечным излучением и, в незначительной степени, лунными приливами. Динамика же ионизированной составляющей включает в себя увлечение плазмы движущейся нейтральной атмосферой, но к этому движению добавляются процессы диффузионного переноса плазмы и ее дрейф в скрещенных электрическом и геомагнитном полях. Электрическое поле, обеспечивающее этот дрейф, генерируется в динамо-области и переносится в верхнюю атмосферу.

Если иметь в виду то, что ось магнитного диполя наклонена под углом $11,5^\circ$ к оси вращения Земли, то можно говорить об отсутствии осевой симметрии как в динамике ионосферной плазмы, так и в глобальном распределении электронной концентрации. То есть картина глобальной циркуляции ионосферной плазмы оказывается гораздо сложнее аналогичной картины для нейтральной компоненты. Поэтому в настоящее время в мировой ионосферной практике предложены и используются модели горизонтальных ветров нейтральной компоненты HWM93 и HWM07 [2, 3]. На рис. 1 и 2 приведены примеры расчётов термосферного ветра по модели HWM93 в северном полушарии для и зимних и летних условий низкой солнечной активности.

На рисунках местоположение Харькова обозначено точкой. Поскольку радар некогерентного рассеяния Института ионосферы позволяет успешно определять вертикальную скорость движения плазмы, то наблюдательные данные при соответствующей обработке могут использоваться для тестирования моделей термосферных ветров. С другой стороны, вертикальная компонента скорости движения плазмы может быть рассчитана теоретически, при решении уравнения непрерывности для ионосферной плазмы [4], учитывающего процессы ионообразования, рекомбинации и переноса. При этом в расчётах используются модельные представления о высотных распределениях нейтральных частиц, скоростях ионообразования, рекомбинации, процессов диффузии, а также о термосферных ветрах.

Результаты расчёта вертикальной скорости для зимних и летних условий низкой солнечной активности представлены на рис. 3 и 4. Теоретические значения скорости движения плазмы рассчитываются вместе с электронной концентрацией.

На рис. 5 и 6 приведены результаты расчётов профилей электронной концентрации для тех же гелиогеофизических условий. Расчётные данные демонстрируют особенности, присущие морфологии зимы и лета, а именно характерные для этих условий значения электронной концентрации, высоты максимума F-области, в том числе известное явление сезонной аномалии.

Видно, что и вертикальная скорость движения плазмы испытывает сезонные различия, как вблизи максимума F-области, так и на границе ионосфероплазмосфера, т.е. в окрестности высоты 600 км.

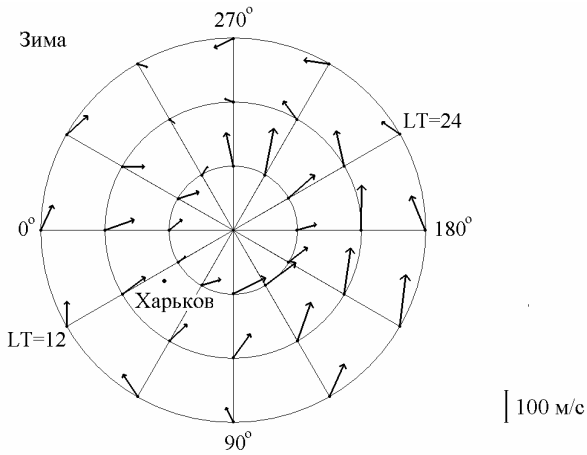


Рис. 1 – Распределения горизонтальных нейтральных ветров в северном полушарии на высоте 300 км в период зимнего солнцестояния в условиях низкой солнечной активности

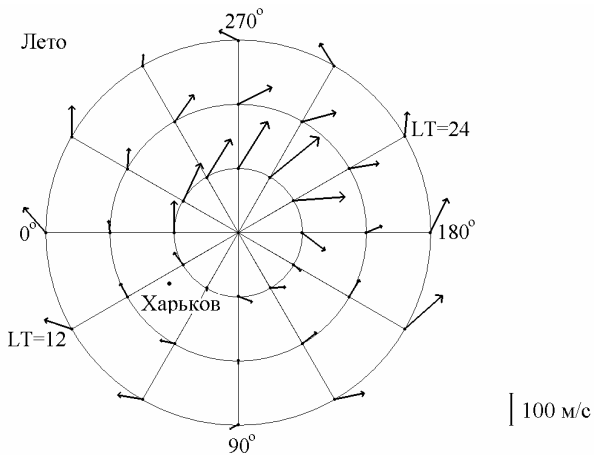


Рис. 2 – Распределения горизонтальных нейтральных ветров в северном полушарии на высоте 300 км в период летнего солнцестояния в условиях низкой солнечной активности

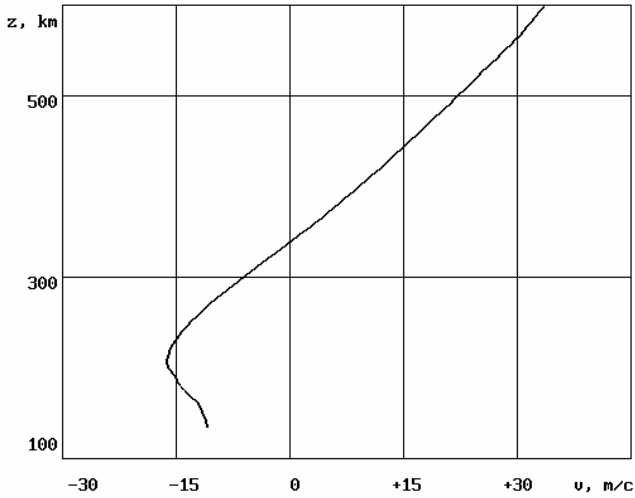


Рис. 3 – Расчёт вертикальной скорости движения плазмы для зимнего солнцестояния в условиях низкой солнечной активности (20 декабря, $F_{10.7} = 72$, $A_p = 14$)

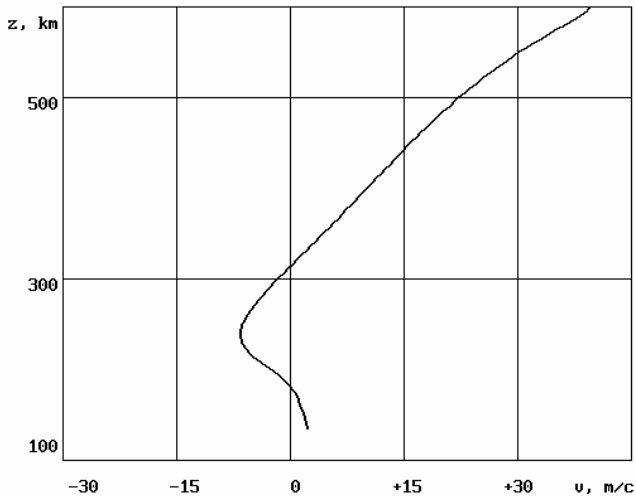


Рис. 4 – Расчёт вертикальной скорости движения плазмы для летнего солнцестояния в условиях низкой солнечной активности (21 июня, $F_{10.7} = 76$, $A_p = 4$)

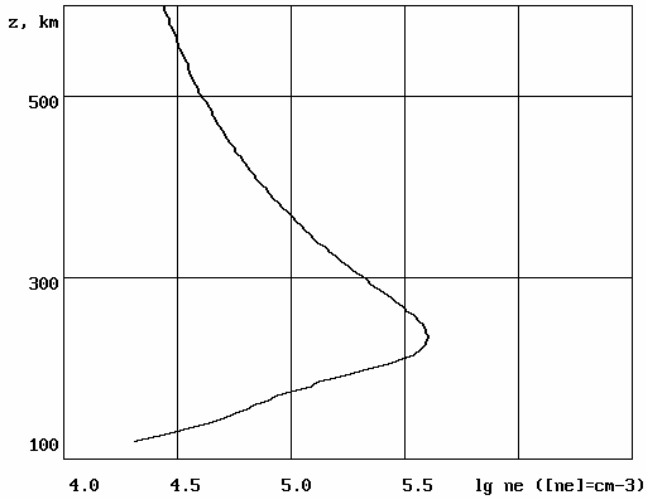


Рис. 5 – Расчёт высотного распределения электронной концентрации для зимнего солнцестояния в условиях низкой солнечной активности

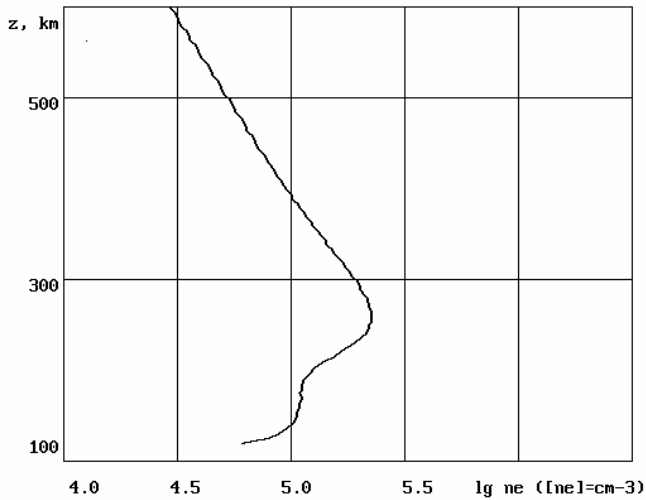


Рис. 6 – Расчёт высотного распределения электронной концентрации для летнего солнцестояния в условиях низкой солнечной активности

Критерием правильности расчёта скорости движения плазмы является сопоставление рассчитанных профилей электронной концентрации с данными региональной модели ионосферы, построенной на основании

данных радара некогерентного рассеяния (НР). Радар НР в Харькове является единственным и наиболее информативным источником сведений о состоянии геосмоса над центрально-европейским регионом [5].

Проведенные вычисления показали достаточно хорошее согласие теоретических и экспериментальных значений высоты и концентрации максимума слоя F2 (см. табл.).

Таблица – Теоретические и экспериментальные значения высоты и концентрации максимума слоя F2

Дата	Высота максимума эксперим. профиля n_e , км	Высота максимума теорет. профиля n_e , км	Концентрация максимума эксперим. профиля n_e , см ⁻³	Концентрация максимума теорет. профиля n_e , см ⁻³
21.06	247	260	$3.5 \cdot 10^5$	$2.3 \cdot 10^5$
20.12	221	234	$4.2 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^5$

Как видим, согласно теоретическим расчётам, зимой высота максимума электронной концентрации меньше, чем летом; а зимнее значение максимума электронной концентрации больше летнего.

Сезонные вариации скорости переноса (т. е. скорости движения) плазмы характеризуются тем, что зимой высота максимального по модулю значения меньше, чем летом; а зимнее значение абсолютной величины скорости больше летнего.

Обсуждение. Представляемые результаты являются определенным этапом более объемной работы по анализу динамики ионизированной и нейтральной компонент верхней атмосферы, в частном случае, над Харьковом. В дальнейшем предполагается сопоставление вертикальной скорости переноса плазмы, полученной как в результате расчёта, так и экспериментально [6], а также будет проведено вычисление термосферных ветров по данным некогерентного рассеяния и сопоставление их с моделью NWM93, как более подходящей для описания динамики среднеширотной верхней атмосферы.

Выводы. Расчёт вертикальной скорости плазмы и распределения электронной концентрации осуществляется в рамках общей схемы. Поэтому можно утверждать, что если расчётные профили электронной концентрации согласуются с результатами наблюдений и, таким образом, отвечают существующим представлениям о морфологии среднеширотной ионосферы (сезонно-суточным и циклическим вариациям), то и рассчитанные значения скорости также соответствуют этим представлениям. Поэтому теоретически рассчитанные значения вертикальной скорости движения плазмы являются дополнительным средством контроля при анализе составляющих динамических процессов ионосферы.

Список литературы: 1. *Емельянов Л.Я.* Обоснование характеристик радара для определения скорости дрейфа ионосферной плазмы методом некогерентного рассеяния // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Тематический выпуск «Радиофизика и ионосфера». – 2004. – № 23. – С. 29-36. 2. *A.E. Hedin et al.* Empirical Wind Model for the Upper, Middle and Lower Atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. – 1996. – Vol. 58. – P. 1421-1447. 3. *D.P. Drob et al.* An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07 // J. Geophys. Res. – 2008. – Vol. 113. – A12304. – doi:10.1029/2008JA013668 – 18 p. 4. *Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В.* Прогнозирование состояния ионосферы (детерминированный подход). – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 192 с. 5. *Дзюбанов Д.А., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф.* Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 44-56. 6. *Дзюбанов Д.А., Емельянов Л.Я., Лойко А.А.* Оценка скорости движения нейтральной атмосферы на высотах максимума F-слоя по данным некогерентного рассеяния // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Серия «Радиофизика и ионосфера». – 2013. – № 28 (1001). – С. 75-81.

Поступила в редколлегию 15.11.2013

УДК 550.388.2

Теоретический расчёт околополуденных значений скорости движения плазмы в F2-области / С.В. Гринченко, Д.А. Дзюбанов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 33 (1066). – С. 93-99. Бібліогр.: 6 назв.

Подано результати теоретичного моделювання швидкості переносу і електронної концентрації області F2 південної іоносфери для магнітоспокійних умов для літнього та зимового сонцестоянь. Особливий інтерес представляє розрахунок швидкості перенесу плазми, сезонні зміни якої є маловивченими. Проведено зіставлення теоретичних розрахунків з експериментальними даними.

Ключові слова: іоносфера, рух плазми, горизонтальний вітер.

The results of theoretical simulation of plasma transport velocity and electron density in F2-region of noontime ionosphere are presented for magnetically quiet terms in equinoctial and solstitial days. Particular interest presents the calculation of transport velocity, seasonal changes of which are insufficiently known. Comparison of theoretical calculations is conducted with experimental data of the Kharkov Incoherent Scatter complex.

Keywords: ionosphere, plasma drift, horizontal wind.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Богомаз А.В., Искра Д.А.</i> Программно-аппаратный комплекс для имитации некогерентно рассеянного сигнала	3
<i>Скворцов Т.А., Фисун А.В.</i> Эффективная поверхность рассеяния электрона в магнитном поле	8
<i>Панасенко С.В., Мамедов А.О.</i> Обнаружение перемещающихся ионосферных возмущений в квазипериодических вариациях мощности некогерентно рассеянного сигнала	12
<i>Северин В.П., Нікуліна О.М., Ахтирцев М.І.</i> Математичне та програмне забезпечення для моделювання одноступеневого генератора імпульсів напруги	19
<i>Чепурный Я.Н., Тиняков Г.М.</i> Моделирование ромбических антенн ионосферной станции “Базис”	25
<i>Кацко С.В., Черногор Л.Ф.</i> Особенности ионосферных эффектов во время сверхсильной геомагнитной бури 5–6 августа 2011 г. над Харьковом	29
<i>Искра Д.А.</i> Повышение точности определения автокорреляционных функций сигнала некогерентного рассеяния	34
<i>Чепурный Я.Н., Лялюк А.И.</i> Оценка уровня помех от космического мусора при измерении ионосферных параметров на радаре НР с антенной НДА-100 ..	38
<i>Мирошников А.Е., Богомаз А.В.</i> Кросс-платформенное программное обеспечение для работы с базой данных Института ионосферы	46
<i>Домнин И.Ф., Резинкина М.М.</i> Расчетное исследование тепловых процессов при высокочастотном нагреве нефтепродуктов	51
<i>Черногор Л.Ф., Барабаш В.В.</i> Изменения концентрации электронов в слое F2 вблизи периодов весеннего и осеннего равноденствия	56
<i>Сюсюк М.Н.</i> Особенности исследования средней ионосферы методом некогерентного рассеяния	62

Рымарь С.И. Установка для регенерации сорбентов в электромагнитном поле.....	66
Подъячий Ю.И. Ракетные возмущения ионосферы по данным зондирования методом некогерентного рассеяния	71
Пуляев В.А., Шаркади М.М. Контрольный канал радара некогерентного рассеяния.....	80
Емельянов Л.Я., Кононенко А.А. Вариации частоты f_oF2 среднеширотной ионосферы в течение двух циклов солнечной активности.....	84
Ляшенко М.В. Зональное электрическое поле и перенос плазмы за счет электромагнитного дрейфа во время магнитной бури 5 – 6 августа 2011 г....	89
Гринченко С.В., Дзюбанов Д.А. Теоретический расчёт околополуденных значений скорости движения плазмы в F2-области.....	93

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК

**Національного технічного університету
“Харківський політехнічний інститут”**

Збірник наукових праць

Серія

Радіофізика та іоносфера

№ 33 (1066)

Науковий редактор: д.т.н., проф. Пуляєв В.О.

Технічний редактор: к.ф.-м.н. Ляшенко М.В.

Відповідальний за випуск: к.т.н. Обухова І.Б.

Адреса редколегії: 61002, м. Харків, МСП, вул. Червонопрапорна, 16
тел. +38 (057) 707-65-27; *e-mail: iion@kpi.kharkov.ua*

Об. вид. № 43-13

Підписано до друку 10.12.2013 р. Формат 60×90 1/16.

Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.

Умовн. друк. арк. 7,00. Наклад 300 прим. Зам. № _____.

Видавничий центр НТУ “ХПІ”. Свідоцтво про державну реєстрацію
суб’єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.

Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16