

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Радіофізика та іоносфера

№ 47 (1268) 2017

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2017

ISSN 2078-9998

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 47 (1268). – 68 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

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 наказом МОН України від 21.12.15 р. № 1328 (додаток 8).

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України (**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. С. 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. ЄПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;
П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;
С. І. КОНДРАШОВ, 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. НІКОЛАЄНКО, 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.; М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: М.В. Ляшенко, канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

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.; Г.С. Хрипунов, д-р техн. наук, проф.;
Л.Ф. Черногор, д-р фіз.-мат. наук, проф.; І.В. Яковенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Радіофізика та іоносфера», індексується в наукометричних базах **WorldCat** і **Google Scholar** і включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 10 від 24 листопада 2017 р.

УДК 621.391

А.В. БРЕЗГУНОВ, С.А. БРЕЗГУНОВ**ФИЛЬТРАЦИЯ РАДИОСИГНАЛА ЗА СЧЁТ ПЕРЕСТАНОВКИ МЕЖДУ СОБОЙ ЕГО ЧАСТЕЙ НА ДРУГИЕ ВРЕМЕННЫЕ ИНТЕРВАЛЫ**

Розглянуто ідея зниження потужності шуму, що надійшов з каналу зв'язку і не пригніченого в попередніх каскадах обробки сигналів, і зниження потужності шуму внесеного каскадами тракту радіоприйому. Мета досягається за рахунок розбиття сигналу на частини малої тривалості і їх перестановки на інші тимчасові інтервали з подальшою смуговий фільтрацією. Розглянуто можливість додаткової реалізації методу накопичення.

Ключові слова: сигнал, шум, кореляція, фільтрація, амплітуда, потужність, перестановка частин шуму.

Рассмотрена идея понижения мощности шума, поступившего из канала связи и не подавленного в предыдущих каскадах обработки сигналов, и понижения мощности шума внесённого каскадами тракта радиоприёма. Цель достигается за счёт разбиения сигнала на части малой длительности и их перестановки на другие временные интервалы с последующей полосовой фильтрацией. Рассмотрена возможность дополнительной реализации метода накопления.

Ключевые слова: сигнал, шум, корреляция, фильтрация, амплитуда, мощность, перестановка частей шума.

We consider the idea of lowering the noise power delivered from the communication channel and not suppressed in the previous stages of signal processing, and reducing the noise power without saving cascades reception path. The aim is achieved at the expense of signal splitting apart of short duration and their transposition to other time slots followed by a band-pass filtering. The possibility of an additional implementation of the method of accumulation is considered.

Keywords: signal, noise, correlation, filtration, amplitude, power, rearrange the pieces of noise.

Введение. Радиоимпульсы с постоянным значением частоты несущего высокочастотного колебания нашли широкое применение в системах связи и радиолокации [1, 2]. Возрастающие потребности к повышению энергетической эффективности радиотехнических систем способствовали совершенствованию способов обработки радиосигналов, для этих целей стали широко использовать средства вычислительной техники [1, 2]. Если частота принятого сигнала имеет значения, при которых возможна цифровая обработка сигналов или может быть понижена до этих значений, например, путём переноса сигнала на промежуточную частоту, то появляются новые возможности по “очистке” принятого сигнала, как от флюктуационных гауссовых шумов каналов связи, так и от внутренних шумов, создаваемых элементами тракта приёма.

Цель статьи – рассмотреть идею по понижению средней мощности P_N шума $n(t)$, поступившего из канала связи и не подавленного в предыдущих каскадах обработки сигналов, и понижение мощности шума, внесённого каскадами тракта приёма. Реализация цели – повышения соотношения P_S/P_N мощности P_S принятого сигнала к мощности P_N шума достигается за счёт разбиения шума $n(t)$ на части малой длительности (“дробления” шума) и их перестановки на другие временные интервалы с последующей полосовой фильтрацией.

Основная часть. Пусть в линию связи был передан сигнал с амплитудой A , на несущей частотой ω , с начальной фазой φ_0 .

$$n(t) = B(t) \cdot \cos[(\omega t + \Delta\omega(t))]. \quad (1)$$

С выхода фильтров усилителя радиочастоты частоты поступает сигнал

$$S^*(t) = A' \cos(\omega t + \varphi_0) + n(t). \quad (2)$$

После частотной фильтрации в тракте приёма флюктуационный гауссов шум $n(t)$ с центральной частотой ω изменяется по частоте в полосе пропускания Π относительно ω на величину $\pm\Delta\omega(t)$ и имеет амплитуду $B(t)$ [1] ($\Delta\omega/\omega \ll 1$):

$$n(t) = B(t) \cdot \cos[(\omega t + \Delta\omega(t))]. \quad (3)$$

Полагаем, что в системе обеспечена высокоточная синхронизация. Видно (см. рис. 1, а), что на каждом временном интервале $\Delta t_1, \dots, \Delta t_7$, в данном случае $\Delta t_j = T$ (T – период колебаний сигнала $S(t)$), отрезки сигнала $S(t)$ одинаковы, а отрезки шума $n(t)$ отличаются по форме, но разрыв фаз между отрезками шума $n(t)$ отсутствует. Шум $n(t)$ представляет сигнал с амплитудно-частотной модуляцией, по виду близкий к периодическому сигналу. Если сигнал $S(t)$ широкополосный, тогда $\Delta\omega/\omega < 1$, и отличие отрезков шума $n(t)$ будет ещё более существенным, т.к. через широкополосные фильтры могут “просочиться” и помеховые импульсы различной длительности, амплитуды и формы. После перестановки отрезков шума $n(t)$ на другие временные интервалы (рис. 1, б), получаем шум $n^*(t)$ после разбиения шума $n(t)$ на части и перестановки его частей у которого отрезки шума $n(t)$ стыкуются с разрывом фаз между отрезками шума $n(t)$. Перестановка отрезка 2 шума $n(t)$ на позицию 7, отрезка 3 шума $n(t)$ на позицию 7 и т.д. (см. рис. 1) позволила без нарушения формы сигнала $S(t)$, получить непериодический сигнал – шум $n^*(t)$, состоящий из импульсов разной формы. Если интервал Δt_j выбрать $\Delta t_j < T$, например, $\Delta t_j < T/4$ или ещё

© А. В. Брезгунов, С. А. Брезгунов

короче, то даже части импульсов не будут состоять из полупериодов гармонических колебаний. Без применения дополнительных средств обработки сигналов средняя мощность P_N^* шума $n^*(t)$ полученного из шума после $n(t)$ будет равна средней мощности шума P_N .

Область частот, в которой спектральная плотность мощности непериодического сигнала – шума $n^*(t)$ составляет 90% его мощности, определяется длительностью и формой импульсов, из которых он состоит. Для радиоимпульса с прямоугольной огибающей длительностью Δt , эта область частот равна [1, 2]:

$$\Delta f_{\Pi} = 2/\Delta t. \tag{4}$$

Для помехового радиоимпульсов с прямоугольной огибающей сложной формы в соотношении (4) знак равенства нужно заменить:

$$\Delta f \approx 2/\Delta t. \tag{5}$$

Полагая, что спектральная плотность мощности шума $n(t)$ N_0 в полосе пропускания Π фильтров близка к равномерной, то на их выходе (выход системы перестановки отрезков шума) средняя мощность шума будет равна

$$P_N \approx \Pi \cdot N_0. \tag{6}$$

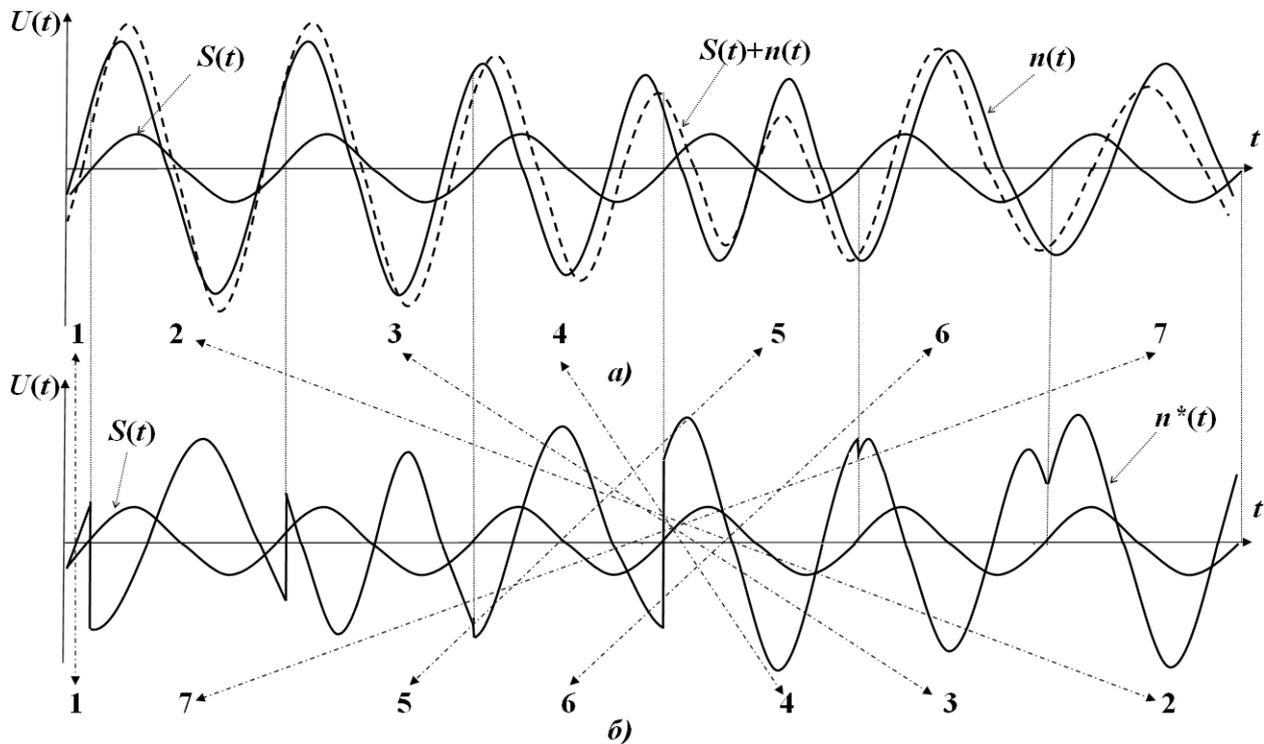


Рис. 1 – Изменение переданного сигнала $S(t)$; принятого сигнала $S^*(t)=S(t)+n(t)$; шума канала связи $n(t)$: а – принятый сигнал $S(t)$ и шум $n(t)$; б – принятый сигнал $S(t)$ и шум $n^*(t)$ после дробления и перестановки по определённому правилу частей шума $n(t)$, длительностью равной длительности периода сигнала $S(t)$

Осуществив полосовую фильтрацию сигнала $S_{\Pi}^*(t) = A' \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + n^*(t)$ в полосе частот $\Pi \gg \Delta f$ на выходе схемы получим сигнал с мощностью P_N^* шума $n^*(t)$. Тогда получим, что мощность шума $n(t)$ уменьшена в M раз.

$$M \approx \Delta f / \Pi. \tag{6}$$

Чем короче интервал Δt_j периода T сигнала $S(t)$, тем выше значение M .

При частоте $f = \omega/2\pi = 10^6$ Гц сигнала $S(t)$ и полосе частот фильтрации $\Pi = 10^4$ Гц, при длительности Δt частей шума $n(t)$ равной длительности периода сигнала $S(t)$ ($\Delta t = T$) согласно (5) $\Delta f \approx 2 \cdot 10^6$ Гц. Согласно (6) мощность шума $n(t)$

уменьшена в $M \approx 200$ раз. Выбрав интервал Δt_j в k раз короче, значение M возрастёт в k раз. Например, при $\Delta t_j = T/4$ мощность шума $n(t)$ будет уменьшена в $M \approx 800$ раз.

Также можно заметить (рис. 1), что количество правил перестановки частей шума $n(t)$ может быть очень значительным. Тогда, можно получить L вариантов шума $n^*(t)$. Отдаляя части шума $n(t)$ как можно дальше от своего начального временного положения, получим L реализаций сигналов $S_{\Pi}^*(t)$:

$$\begin{aligned} S_{\Pi 1}^*(t) &= A' \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + n_1^*(t); \\ S_{\Pi 2}^*(t) &= A' \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + n_2^*(t); \\ &\dots \dots \dots \\ S_{\Pi L}^*(t) &= A' \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + n_L^*(t). \end{aligned} \tag{7}$$

В выражениях (7) для простоты записи коэффициенты передачи всех сигналов $S_{Pi}^*(t)$ написаны одинаковыми (равными единице). Можно добиться, при правильной перестановке частот шума $n(t)$, чтобы все реализации шума $n^*(t)$ были некоррелированы между собой. Тогда, не трудно осуществить реализацию известного метода накопления [2]. Организовав L каналов обработки в соответствии с (7), и суммируя их выходные сигналы, получим на выходе сумматора сигнал:

$$Y(t) = \Sigma[S(t) + n_i^*(t)] \approx LS(t) + \Sigma n_i^*(t). \quad (8)$$

Полагаем, что во всех каналах обеспечивается одинаковый коэффициент передачи, средняя мощность шума в них практически одинакова. Так как шумы $n_i^*(t)$ в каналах можно считать некоррелированными, получим результат такой же, как для обработки L последовательных повторов сигнала известным методом накопления [2]. Отношение мощностей сигнала и помехи на выходе сумматора возрастёт в $\sim L$ раз.

Таким образом, мощность шума $n(t)$ может быть уменьшена в $M \cdot L$ раз, а “очищенный” от шума сигнал может быть подвержен дальнейшей “очистке” от шума, например, методом корреляционного приёма [1, 2].

Если $M = (100 \dots 1000)$, а $L = (10 \dots 100)$, то мощность шума при реализации рассмотренной идеи может быть уменьшена в $10^3 \dots 10^5$ раз.

Наиболее реализуемым может быть подход, при котором осуществляется оцифровка сигнала $S^*(t)$ [1, 2] в моменты времени принятия им нулевых значений и между ними. Тогда, перестановка частот шума $n(t)$ может быть успешно реализована с помощью микропроцессорной техники. Обработку сигналов наиболее целесообразно осуществлять на низких промежуточных частотах, если несущая частота переданных сигналов выше частот сигналов, которые могут оцифровывать и обрабатывать современные микропроцессоры. Перестановку частот шума $n(t)$ можно организовать и аппаратными методами, разработав для этого специализированные микросхемы, что обеспечит более высокие скорости обработки сигналов. В качестве элементов полосовой фильтрации могут быть использованы любые фильтры, обеспечивающие заданную полосу частот фильтрации Π , в том числе, и цифровые фильтры [1].

Рассматриваемый подход может быть применён и для обработки радиоимпульсов с изменяющимся значением их амплитуды, например, гауссовой формы, но тогда необходимо осуществлять перестановку между теми частями шума $n(t)$, где амплитуды A' полупериодов сигнала $S(t)$ равны (при перестановке в полупериодах с разной полярностью, знаки инвертируются), число которых мало. Поэтому

здесь получение уменьшения мощности шума $n(t)$ даже в десятки раз может быть затруднительно.

Выводы. 1. Понижение мощности шума, поступившего из канала связи и не подавленного в предыдущих каскадах обработки сигналов, и понижение мощности шума, внесённого каскадами тракта приёма, может быть обеспечено за счёт разбиения шума на части малой длительности и их перестановки на другие временные интервалы с последующей полосовой фильтрацией. Только за счёт этого выигрыш в повышении соотношения P_S/P_N может быть десятки – сотни раз и больше, при обеспечении высокоточной синхронизации в системе передачи сигналов.

2. Так как количество правил перестановки частот шума $n(t)$ может быть очень значительным, то можно получить L вариантов шума $n^*(t)$ и осуществить реализацию известного метода накопления, позволяющего дополнительно повысить соотношение P_S/P_N приблизительно ещё в десять – сто раз и выше. Поэтому, реализация рассматриваемой идеи понижения мощности шумов может позволить повысить соотношение P_S/P_N в тысячи раз.

3. Рассмотренный метод фильтрация радиосигнала может быть реализован на современной элементной базе, как для систем с узкополосными, так и с широкополосными сигналами, однако для повышения скорости обработки сигналов целесообразно разработать специализированные интегральные микросхемы. Целесообразно вести обработку на промежуточной частоте.

4. Наибольший интерес, предложенный метод повышения соотношения P_S/P_N , может представлять для систем, использующих радиоимпульсы с прямоугольной огибающей, например, для систем связи и радиолокации с импульсной модуляцией, фазовой и квадратурной дискретной модуляцией, в научных исследованиях. Он позволяет получить “очищенный” сигнал, который далее может “очищаться” другими методами.

Список литературы

1. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов по специальности “Радиотехника” / С. И. Баскаков. – М.: Высш. школа, 2005. – 462 с.
2. Кузьмин И. В. Основы теории информации и кодирования / И. В. Кузьмин, В. А. Кедров. – К.: Вища школа, 1986. – 238 с.

References (transliterated)

1. Baskakov S. I. *Radiotekhnicheskie cepi i signaly: Uchebnik dlja vuzov po special'nosti "Radiotekhnika"* [Radio engineering circuits and signals: Textbook for high schools by specialty "Radio engineering"]. Moscow, Vyssh. shkola, 2005. 462 p.
2. Kuz'min I. V., Kedrus V. A. *Osnovy teorii informacii i kodirovanija* [Fundamentals of information theory and coding]. Kiev, Vyssh. shkola, 1986. 238 p.

Поступила (received) 31.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Фільтрація радіосигналу за рахунок перестановок між собою його частин на інші тимчасові інтервали / О. В. Брезгунов, С. О. Брезгунов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 3 – 6. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2078-9998.

Фильтрация радиосигнала за счёт перестановок между собой его частей на другие временные интервалы / А. В. Брезгунов, С. А. Брезгунов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – № 47 (1268). – С. 3 – 6. – Библиогр.: 2 назв. – ISSN 2078-9998.

Filtering radio signal due to permutations between themselves its parts to other time slots / O. V. Brezgunov, S. O. Brezgunov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 47 (1268). – P. 3 – 6. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Брезгунов Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри радіоелектроніки; тел.: (066) 097-32-85; e-mail: brezgunovu@gmail.com.

Брезгунов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры радиоэлектроники; тел.: (066) 097-32-85; e-mail: brezgunovu@gmail.com.

Brezgunov Oleksandr Vladivirovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Radioelectronics; tel.: (066) 097-32-85; e-mail: brezgunovu@gmail.com.

Брезгунов Сергій Олександрович – спеціаліст, м. Київ, ЧП інженер; тел.: (066) 659-43-23; e-mail: bigsun0407@gmail.com.

Брезгунов Сергей Александрович – специалист, г. Киев, ЧП инженер; тел.: (066) 659-43-23; e-mail: bigsun0407@gmail.com.

Brezgunov Sergey Oleksandrovych – specialist, c. Kiev, engineer; tel.: (066) 659-43-23; e-mail: bigsun0407@gmail.com.

УДК 621.391

А. В. БРЕЗГУНОВ, С. А. БРЕЗГУНОВ

ФИЛЬТРАЦИЯ РАДИОСИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ВСЕХ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

Розглянуто ідею фільтрації радіосигналів при організації прийому сигналу по декількох каналах з коливальними контурами, настроєними на різні резонансні частоти, що не збігаються з частотою корисного сигналу. На виходах каналів можна отримати корисні сигнали, зсунуті між собою по фазі і завади з різними центральними частотами, що дозволяє зменшити потужність завади.

Ключові слова: сигнал, шум, кореляція, фільтрація, амплітуда, потужність, коливальний контур, фаза сигналу.

Рассмотрена идея фильтрации радиосигналов при организации приёма сигнала по нескольким каналам с колебательными контурами, настроенными на разные резонансные частоты, не совпадающие с несущей частотой полезного сигнала. На выходах каналов можно получить полезные сигналы, сдвинутые между собой по фазе и помехи с разными центральными частотами, что позволяет уменьшить мощность помехи.

Ключевые слова: сигнал, шум, корреляция, фильтрация, амплитуда, мощность, колебательный контур, фаза сигнала.

We consider the idea of filtering radio signals in the organization of the reception on several channels with a signal oscillating circuit tuned to different resonant frequencies that do not coincide with the carrier frequency of the desired signal. At the outputs of the channels can receive desired signals shifted in phase with each other and interference with different central frequencies, thereby reducing interference power.

Keywords: signal, noise, correlation, filtration, amplitude, power, oscillatory circuit, signal phase.

Введение. Если переданный сигнал $S(t)$ подвергся внешней модуляции (из-за эффекта Доплера, многолучевого распространения и др.), то о сигнале после внешней модуляции $S'(t)$ может быть известен лишь интервал частот $\Delta\omega_S$ изменения его центральной частоты ω' . Для восстановления сигнала $S'(t)$ в условиях, когда мощность P_S принятого сигнала $S'(t)$ мала по сравнению с мощностью принятой помехи P_N , необходимо повысить соотношение P_S/P_N . Для уменьшения влияния помех каналов связи $n(t)$ на решение о переданном сигнале $S(t)$ в системах связи, локации и др. широко используют параллельный колебательный контур, резонансная частота которого равна центральной частоте ω принимаемого сигнала $S^*(t)=S(t)+n(t)$ [1 – 3]. В таких условиях, для повышения соотношения P_S/P_N , если сигнал $S'(t)$ периодический или квазипериодический, можно организовать его корреляционный приём [1]. Также, можно многократно передавать сигнал $S(t)$, и если параметры сигнала $S'(t)$ не изменяются при его повторении, то использовать отличие помех в принятых реализациях $n_i(t) \neq n_j(t)$ [1]. В случаях, когда сигнал $S(t)$ не может быть передан несколько раз, для повышения соотношения P_S/P_N , можно организовать приём сигнала $S'(t)$ по нескольким каналам, в которых сигнал $S'(t)$ остаётся без изменений, а помехи, сформировавшиеся после частотной фильтрации флюктуационного гауссового шума в каналах с колебательными контурами, настроенными на разные центральные частоты ω_j , отличаются $n_1(t) \neq n_2(t) \neq n_k(t)$.

Цель статьи – разработать предложения по повышению соотношения P_S/P_N принятого сигнала, используя его многоканальную обработку, в результате которой в каналах помехи модифицируются после частотной фильтрации флюктуационного гауссового шума взаиморасстроенными колебательными контурами, т.е. настроенными на разные центральные частоты ω_j , и в значительной степени взаимно компенсируются при обработке принимаемого сигнала.

Основная часть. Пусть в линию связи с флюктуационным гауссовым шумом, на несущей частоте ω с начальной фазой φ_0 и амплитудой $A(t)$ в полосе частот Π передаётся узкополосный сигнал $S(t)=A(t)\cdot\cos(\omega t+\varphi_0)$ длительностью t_1

$$S(t)=A(t)\cdot\cos(\omega t + \varphi_0). \quad (1)$$

После внешней модуляции получаем сигнал $S'(t)$ длительностью t_2

$$S'(t)=A'(t)\cdot\cos(\omega't + \varphi'_0), \quad (2)$$

а с учётом воздействия флюктуационного гауссового шума $n(t)$ получаем сигнал

$$S^*(t)=A'(t)\cdot\cos(\omega't+\varphi'_0) + n(t). \quad (3)$$

Известно, что резонансная частота контура ω определяет отклик контура на воздействие флюктуационного гауссового шума – суммы помеховых импульсов различной длительности, амплитуды и формы, т.е. форму и среднее значение частоты ω помехи $n(t)$ после частотной фильтрации [2]. После частотной фильтрации помехи $n(t)$ в тракте приёма получаем флюктуационный гауссов шум $n_0(t)$ с центральной частотой ω изменяется по частоте на величину $\Delta\omega(t)$ в пределах полосы частот Π' , пропускаемых контуром, относительно ω и имеет амплитуду $B(t)$ [2] ($\Delta\omega/\omega \ll 1$):

$$n_0(t)=B(t)\cdot\cos[(\omega t+\Delta\omega(t))]. \quad (4)$$

Выражение (4) описывает сигнал с совместной амплитудной и частотной модуляцией [1 – 3].

В параллельном колебательном контуре происходит сдвиг фазы входного сигнала $\varphi_{вх}$ относительно фазы выходного сигнала $\varphi_{вых}$ на

© А. В. Брезгунов, С. А. Брезгунов, 2017

величину $\Delta\varphi_{\text{КК}} = \varphi_{\text{ВХ}} - \varphi_{\text{ВЫХ}}$ в пределах от $+90^\circ$ до -90° (см. рис. 1) [3].

$$\Delta\varphi_{\text{КК}} = \arctg 2Q\Delta\omega_{\text{КК}} / \omega, \quad (5)$$

где Q – добротность контура, $\Delta\omega_{\text{КК}}$ – сдвиг частоты относительно резонансной частоты контура ω .

При узкополосных сигналах $\Delta\omega_{\text{КК}} \ll \omega$ [3]:

$$\Delta\varphi_{\text{КК}} \approx 2Q\Delta\omega_{\text{КК}} / \omega. \quad (6)$$

Рассмотрим фильтрацию сигналов $S'(t)$ с помощью двух взаимно-расстроенных колебательных контуров (рис. 1) с коэффициентами передачи $K(\omega)$, первый из которых осуществляет сдвиг фазы несущей частоты ω' сигнала $S'(t)$ на $+\Delta\varphi_1$ (рис. 1, а), а второй осуществляет сдвиг фазы несущей частоты ω' сигнала $S'(t)$ на $-\Delta\varphi_2$ (рис. 1, б).

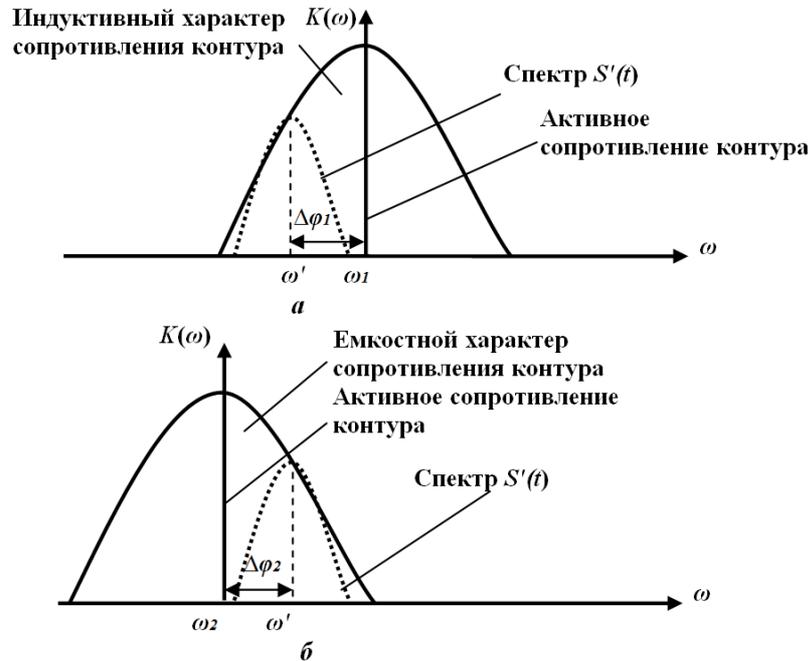


Рис. 1 – Амплитудно-частотная характеристика параллельных колебательных контуров и спектры сигналов $S'(t)$, смещённых относительно резонансной частоты контура ω : а – спектр входного сигнала $S'(t)$ смещён относительно резонансной частоты ω влево $90^\circ > \Delta\varphi_1 > 0^\circ$; б – спектр входного сигнала $S'(t)$ смещён относительно резонансной частоты ω вправо $90^\circ < \Delta\varphi_2 < 0^\circ$.

Таким образом, на выходах каскадов с взаимно-расстроенными колебательных контурами, можно получить сигналы $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$, сдвинутые между собой на $\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2$ и две помехи с разными центральными частотами ω_1 и ω_2 относительно которых они флюктуируют.

Видно (рис. 1), что ширина полосы пропускания каждого контура в M раз больше полосы частот входного сигнала $S'(t)$, в результате чего мощностью принятой помехи P_N будет в $\sim M$ раз больше чем в случае, когда полоса пропускания контура и полоса частот входного сигнала равны [1, 2]. Так же, расположение центральной частоты ω' сигналов $S'(t)$ в областях наклона АЧХ параллельных колебательных контуров приведёт к амплитудно-частотным искажениям сигналов $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ и уменьшению их усиления по сравнению с помехами $n_1(t)$ и $n_2(t)$ около центральных частот ω_1 и ω_2 . Но последующей частотной фильтрацией сигналов с помощью контуров с центральной частотой ω' при ширине полосы частот Π' , пропускаемых контуром, равной полосе Π частот сигнала $S'(t)$, коррекцией характеристик сигналов эти недостатки можно устранить.

Обеспечить синфазность сигналов $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ можно используя фазосдвигающие цепи, например,

RC -цепочка (фильтр низкой частоты) обеспечивает сдвиг фаз между входным и выходным сигналом [2]:

$$\Delta\varphi = -\arctg(\omega RC). \quad (7)$$

Оценим, какой набег фазы помехи $n_1(t)$ относительно $n_2(t)$ может произойти за время t , предположив, что их частоты постоянны и равны $\omega_1 = 2\pi f_1$ и $\omega_2 = 2\pi f_2$.

Так как значение частоты сигнала f определяется числом его периодов за секунду, тогда, если известно число периодов l сигнала за время t частота $f = l/t$. Часть периода Φ определяет фазу $\varphi = 2\pi\Phi$, которую имеет сигнал относительно его начальной фазы φ_0 (целые значения периодов не учитываем, полагая, что на коротком интервале времени Δt их не появится). Тогда, набег фазы помехи $n_1(t)$ относительно $n_2(t)$ за время t :

$$\varphi_{1,2} = 2\pi\Phi_{1,2} = t(l_1 - l_2)/t = t(f_1 - f_2) = t\Delta f_{1,2}. \quad (8)$$

Время t за которое набег фазы $\varphi_{1,2} = \pi$, т.е. когда помехи $n_1(t)$ и $n_2(t)$ на коротком интервале времени Δt можно считать практически одинаковыми по частоте и инвертированными ($n_1(t) \approx -n_2(t) |_{\Delta t}$) согласно (8):

$$\begin{aligned} t=1 \text{ с} - \Delta f_{1,2} &= 0,5 \text{ Гц}; \\ t=10^{-2} \text{ с} - \Delta f_{1,2} &= 50 \text{ Гц}; \\ t=10^{-4} \text{ с} - \Delta f_{1,2} &= 5 \text{ кГц}; \\ t=10^{-6} \text{ с} - \Delta f_{1,2} &= 500 \text{ кГц}. \end{aligned}$$

Это показывает, что сдвига фазы $\varphi_{1,2}$ за время $t < (0,005 - 0,1)/\Delta f_{1,2}$ между помехами $n_1(t)$ и $n_2(t)$, начиная с которого их можно взаимно компенсировать путём сложения в противофазе практически не происходит. Реально, фаза помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$ постоянно изменяется под воздействием импульсов гауссового шума. Можно предположить, что хотя значения ω_1 и ω_2 могут значительно отличаться, но отличие фаз помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$ будет небольшим и изменяющимся незначительно на длительности сигналов $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ (из-за близости параметров контуров, их импульсных характеристик).

Рассмотрим возможные варианты обработки сигналов $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$, которые могут позволить повысить соотношение P_S/P_N , используя отличие их фаз и различие помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$.

Вариант 1. Используя колебательные контура с шириной полосы Π' частот, пропускаемых контуром, значительно большей полосы частот Π принимаемого узкополосного сигнала $S^{*}(t)$ можно обеспечить сдвиг фаз между $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ $\Delta\varphi \approx \pi$ (ω' у левого края АЧХ контура с ω_1 , ω' у правого края АЧХ контура с ω_2). При вычитании из $S'_1(t)+n_1(t)$ смеси $S'_2(t)+n_2(t)$ амплитуды $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ складываются, а амплитуды $n_1(t)$ и $n_2(t)$ в основном вычитаются. Произойдёт взаимная компенсация амплитудно-частотных искажений сигналов $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$. Чем ближе значения частот ω_1 и ω_2 и остальные параметры контуров, тем больше будет взаимная компенсация помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$. Затем, с помощью контуров с резонансной частотой ω' с шириной полосы Π' частот, пропускаемых контуром, равной полосе Π частот сигнала $S'(t)$, осуществляется последующая частотная фильтрация сигналов.

Так как суммарная амплитуда сигналов $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ вдвое больше амплитуды $S'_1(t)$, то мощность P_S принятого сигнала $S'(t)$ возрастёт в четыре раза. Средняя амплитуда результата вычитания помехи $n_1(t)$ из $n_2(t)$ после частотной фильтрации в полосе частот равной Π , по весьма ориентировочным оценкам может быть равна $(0,1 \dots 0,05) \cdot n_1(t)$, т.е. мощность принятой помехи P_N может быть уменьшена в $\sim 100 \dots 400$ раз. Тогда, можно предположить, что рассмотренный подход может позволить повысить соотношение P_S/P_N по сравнению с обычной полосовой фильтрацией сигналов [1, 2] до нескольких сотен раз и даже до тысячи раз. Чем уже полоса частот Π принимаемого узкополосного сигнала, тем ближе могут быть центральные частоты контуров ω_1 и ω_2 , а значит помехи могут быть более эффективно взаимно компенсированы.

Сдвиг фаз $\Delta\varphi \approx \pi$ между сигналами $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ может быть обеспечен и другими способами.

Например, если взять $\Delta\varphi_1 = \pi/2$, а $\Delta\varphi_2 = -\pi/2$ (см. рис. 1) и сигналы подать на второй параллельный колебательный контур в каждом канале, то происходит дополнительный сдвиг фазы входного

сигнала относительно фазы выходного сигнала каждого канала согласно выражению (5). Суммарный сдвиг фаз между сигналами $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ в каналах будет $\Delta\varphi_{\text{ФКК}} \approx \pi$. Отличие значений частот ω_1 и ω_2 уменьшится, а взаимная компенсация помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$ повысится.

Близкий результат так же можно получить, настраивая один контур с полосой пропускания Π на несущую частоту ω' ($\omega' = \omega_1$, $\Delta\varphi_1 = 0$) сигнала $S'(t)$ (рис. 1 а), а второй контур (рис. 1 б) настроить на частоту ω_2 в полосу пропускания Π которого поступает только помеха $n_2(t)$. При небольших отличиях значений частот $\omega' = \omega_1$ и ω_2 , после суммирования смеси $S'_1(t)+n_1(t)$ и инверсии значения помехи $n_2(t)$ произойдёт значительная взаимная компенсация помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$. Можно осуществлять измерения средних значений амплитуд после фильтрации за короткие интервалы времени. Если при вычитании из смеси $S'_1(t)+n_1(t)$ помехи $n_2(t)$ результат уменьшится на значение близкое к значению помехи $n_2(t)$, то помехи $n_1(t)$ и $n_2(t)$ имеют небольшой сдвиг фаз $\varphi_{1,2}$ ($\varphi_{1,2} \ll \pi/2$). Если этот результат вычитания уменьшится незначительно или увеличится, то помехи $n_1(t)$ и $n_2(t)$ имеют большой сдвиг фаз $\varphi_{1,2}$ и здесь необходимо с помощью перестраиваемой фазосдвигающей цепи изменять сдвиг фаз $\varphi_{1,2}$ до тех пор, пока результат вычитания не уменьшится на величину близкую к значению помехи $n_2(t)$. Данный подход представляется наиболее эффективным по взаимной компенсации помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$.

Рассмотренные подходы могут быть использованы в качестве первой “ступени очистки” полученного сигнала от помех, причём без изменения его формы.

Вариант 2. Используя N колебательных контуров с шириной полосы частот Π' , пропускаемых контуром, значительно большей полосы частот Π принимаемого узкополосного сигнала $S^{*}(t)$ можно организовать приём сигнала $S'(t)$ по N каналам, в которых сигнал $S'(t)$ остаётся без изменений а помехи, сформировавшиеся после частотной фильтрации флюктуационного гауссового шума в каналах с колебательными контурами, настроенными на разные центральные частоты ω_j отличаются – $n_1(t) \neq n_2(t) \neq n_k(t)$. Для обеспечения соотношения заданного P_S/P_N использовать метод когерентного накопления [1].

Обеспечим сдвиг фаз N контурами с разными резонансными частотами ω_j : между $S'_1(t)$ и $S'_2(t) - \Delta\varphi'_1$, между $S'_3(t)$ и $S'_4(t) - \Delta\varphi'_2, \dots$, между $S'_{N-1}(t)$ и $S'_M(t) - \Delta\varphi'_2$.

Из рисунка 1 и выражения (4) можно заметить, что если сигналы $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$, выделенные контурами с разными резонансными частотами ω_1 и ω_2 подать на каскады с контурами с центральной частотой ω' с шириной полосы частот Π' , пропускаемых контуром, равной полосе Π частот сигнала $S'(t)$, то от помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$, представляющих сигналы с амплитудно-частотной модуляцией после фильтрации останутся нижняя (для $n_1(t)$) или верхняя (для $n_2(t)$) полосы амплитудно-модулированного сигнала. Используя фазосдвигающие цепи, обеспечивающие сдвиг фаз

между входным и выходным сигналом в соответствии с выражением (7), получим, что сигналы $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ синфазны, а остатки помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$ имеют ещё дополнительный сдвиг фаз. Будем полагать, что остатки помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$ после таких преобразований будут мало коррелированы.

Осуществив такие же преобразования со всеми парами $S'_3(t), S'_4(t)$ и $n_3(t), n_4(t), \dots, S'_{N-1}(t), S'_N(t)$ и $n_{N-1}(t), n_N(t)$ можно получить N синфазных сигналов $S'(t)$ и N слабо коррелированных помех. Тогда, с помощью метода когерентного накопления можно получить выигрыш в увеличении соотношения P_S/P_N близких к N [1].

Так как при увеличении числа каналов N , будет увеличиваться корреляция помех, то значение N ограничено и для реализации можно рекомендовать $N = 8 \dots 12$, что может позволить повысить соотношение P_S/P_N по сравнению с обычной полосовой фильтрацией сигналов [1, 2] до ~ 10 раз.

Данный подход так же может быть использован в качестве “первой ступени очистки” полученного сигнала от помех, без изменения его формы.

Вариант 3. На выходе схемы корреляционного приёма, так же можно повысить соотношение P_S/P_N относительно входа за счёт того, что результат интегрирования произведения полезного сигнала и помехи уменьшает её мощность, т.к. полезный сигнал и помеха не синфазны. [1, 2].

Используя узкополосные колебательные контура с полосой пропускания контура Π' приблизительно равные удвоенной полосе частот Π принимаемого узкополосного сигнала $S'(t)$ можно обеспечить сдвиг фаз между $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ $\Delta\varphi = \pi/2$ ($\Delta\varphi_2 = +\pi/4$ а $\varphi_1 = -\pi/4$). Используя фазосдвигающие цепи, обеспечивающие сдвиг фаз между входным и выходным сигналом в соответствии с выражением (7), получим, что сигналы $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ синфазны, а помехи $n_1(t)$ и $n_2(t)$ имеют сдвиг фаз близкий к $\varphi_1 = \pi/2$. Затем с помощью контуров с центральной частотой ω' с шириной полосы частот Π' , пропускаемых контуром, равной полосе Π частот сигнала $S'(t)$, осуществляется последующая частотная фильтрацией сигналов. Подав эти сигналы $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ с модифицированными помехами $n_1(t)$ и $n_2(t)$ после фильтрации, т.е. $n_1(t)_{\Phi}$ и $n_2(t)_{\Phi}$ на коррелятор получим его отклик (для простоты полагая, что амплитуды сигналов $S'_1(t), S'_2(t)$ и $S'(t)$ равны единице):

$$Y = \int_0^T \{ S'^2_1(t) + S'_1(t)[n_1(t)_{\Phi} + n_2(t)_{\Phi}] + n_1(t)_{\Phi} n_2(t)_{\Phi} \} dt. \quad (9)$$

В (9) можно полагать, что $n_1(t)_{\Phi}$ и $n_2(t)_{\Phi}$ при временном сдвиге между ними $\tau = 0$ слабо коррелированы. Поэтому, выражение (9) с учётом того, что после сложения двух некоррелированных сигналов с одинаковым средним значением амплитуд среднее значение суммарной амплитуды увеличится в $\sim 1,41$ раз, а результат интегрирования их произведения равен нулю [1], можно записать:

$$Y \approx \int_0^T [S'^2_1(t) + 1,41 \cdot S'_1(t) \cdot n_1(t)_{\Phi}] dt. \quad (10)$$

Если обеспечить мощности P_{N1} и P_{N2} помех $n_1(t)_{\Phi}$ и $n_2(t)_{\Phi}$, полученных из флюктуационного гауссова шума $n_0(t)$ равными мощности P_{N0} помехи $n_0(t)$ (системы частотной фильтрации во всех случаях обеспечивают одинаковое понижение мощности помех, т.е. $P_{N1} = P_{N2} = P_{N0}$), то в сравнении с корреляционным приёмом [1, 2], когда необходимо точное значение начальной фазы φ'_0 сигнала $S'(t)$, мощность помехи P_{NK} (второй член суммы в выражении (10)) за время T относительно помехи $n_0(t)$ увеличится в 1,41 раза.

Если на коррелятор подать два сигнала после обработки по варианту 1, то получим “вторую ступень очистки”. Причём, на первый вход коррелятора нужно подать сигнал, полученный при помехах с разными центральными частотами ω_1 и ω_2 , а на второй вход коррелятора подать сигнал, полученный при помехах с разными центральными частотами ω_3 и ω_4 (например, взять контура, отличающиеся добротностью контуров с резонансными частотами ω_1 и ω_2). Однако, необходимо при этом разнести частоты ω_3 и ω_1 , а также ω_4 и ω_2 на столько, чтобы помехи на первом и втором входах коррелятора можно было считать некоррелированными, а полезные сигналы были синфазны. Тогда, с учётом выражений (9) и (10), полученных для других помех, и того, что вариант 1 понижает P_N ориентировочно в 200...1000 раз, можно отметить, что мощность помехи при такой обработке, ориентировочно уменьшится относительно помехи $n_0(t)$ в $(200 \dots 1000)/1,41$ раза.

Корреляционная обработка обеспечит дальнейшее повышение соотношения P_S/P_N дополнительно к “чистому” варианту 1 за счёт отличия фазы полезного сигнала и помехи.

Выводы. 1. Фильтрация радиосигналов в условиях неопределённости всех его параметров возможна при организации приёма сигнала $S'(t)$ по нескольким каналам с колебательными контурами, настроенными на разные резонансные частоты ω_j , не совпадающие с несущей частотой ω' полезного сигнала $S'(t)$. На выходах каналов с взаиморасстроенными колебательных контурами, можно получить полезные сигналы, сдвинутые между собой по фазе и помехи с разными центральными частотами относительно которых они флюктуируют. Использование фазосдвигающих цепей позволяет реализовать несколько вариантов обработки сигналов.

2. Наибольшее понижение мощности помех (до $\sim 100 \dots 1000$ раз и больше) может быть обеспечено реализацией варианта 1, когда помехи $n_1(t)$ и $n_2(t)$ имеют небольшой сдвиг фаз $\varphi_{1,2}$ ($\varphi_{1,2} \ll \pi/2$) между собой и взаимно компенсируются (параметры контуров близки). Все способы варианта 1 незначительно отличаются сложностью реализации и требуют дальнейших исследований. На первый взгляд, наибольший практический интерес представляет способ с настройкой одного контура на несущую

частоту узкополосного сигнала $S'(t)$, а второго контура на частоту в полосе пропускания которого не попадает спектр сигнала $S'(t)$, а поступает только помеха $n_2(t)$ по частоте близкой к помехе $n_1(t)$.

3. Метод когерентного накопления с декорреляцией помех с помощью фазосдвигающих цепей и полосовой фильтрации (вариант 2) может быть использован для понижения мощности помех и представляет интерес для среднеполосных радиосигналов.

4. Корреляционная обработка (вариант 3) может быть использована как дополнительный способ к варианту 1, обеспечивающая дополнительное понижение мощности помех за счёт отличия фазы полезного сигнала и помехи.

Список литературы

1. Кузьмин И. В. Основы теории информации и кодирования / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. – К.: Вища школа, 1986. – 238 с.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Фільтрація радіосигналів в умовах невизначеності всіх його параметрів / О. В. Брезгунов, С. О. Брезгунов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 7 – 11. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2078-9998.

Фильтрация радиосигналов в условиях неопределённости всех его параметров / А. В. Брезгунов, С. А. Брезгунов // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – № 47 (1268). – С. 7 – 11. – Библиогр.: 3 назв. – ISSN 2078-9998.

Filtering radio signals in the conditions of uncertainty of its parameters / O. V. Brezgunov, S. O. Brezgunov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 47 (1268). – P. 7 – 11. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Брезгунов Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри радіоелектроніки; тел.: (066) 097-32-85; e-mail: brezgunovu@gmail.com.

Брезгунов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры радиоэлектроники; тел.: (066) 097-32-85; e-mail: brezgunovu@gmail.com.

Brezgunov Oleksandr Vladivirovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Radioelectronics; tel.: (066) 097-32-85; e-mail: brezgunovu@gmail.com.

Брезгунов Сергій Олександрович – спеціаліст, м. Київ, ЧП інженер; тел.: (066) 659-43-23; e-mail: bigsun0407@gmail.com.

Брезгунов Сергей Александрович – специалист, г. Киев, ЧП инженер; тел.: (066) 659-43-23; e-mail: bigsun0407@gmail.com.

Brezgunov Sergey Oleksandrovych – specialist, с. Kiev, engineer; tel.: (066) 659-43-23; e-mail: bigsun0407@gmail.com.

References (transliterated)

1. Kuz'min I. V., Kedrus V. A. *Osnovy teorii informacii i kodirovanija* [Fundamentals of information theory and coding]. Kiev, Vyssh. shkola, 1986. 238 p.
2. Baskakov S. I. *Radiotekhnicheskie cepi i signaly: Uchebnik dlja vuzov po special'nosti "Radiotekhnika"* [Radio engineering circuits and signals: Textbook for high schools by specialty "Radio engineering"]. Moscow, Vyssh. shkola, 2005. 462 p.
3. Krivickij B. H., Dulin V. N. *Spravochnik po teoreticheskim osnovam radioelektroniki* [Guide to the theoretical foundations of electronics]. Vol. 2. Moscow: Jenergija, 1977. – 472 p.

Поступила (received) 31.05.2017

УДК 628.396

В. О. ПУЛЯЄВ, Є. В. РОГОЖКІН**БАГАТОКАНАЛЬНИЙ КОРЕЛЯЦІЙНИЙ ПРИСТРІЙ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ**

Розглянуто приклад модернізації корелятора радару некогерентного розсіяння, працюючого в реальному часі, в структуру якого вводяться додаткові кореляційні канали та елементи зв'язку між ними. Це дозволяє отримувати висотний розподіл автокореляційних функцій сигналу розсіяння у вигляді основних і дзеркальних складових. Як результат – вздовж напрямку зондування на кожній ділянці без погіршення висотного розрізнення підвищується статистична точність розрахунку характеристик цього сигналу. Також додатково враховуються особливості висотного профілю сигналу розсіяння.

Ключові слова: сигнал розсіяння, автокореляційна функція, багатоканальний корелятор.

Рассмотрен пример модернизации коррелятора радару некогерентного рассеяния, работающего в реальном времени, в структуру которого вводятся дополнительные корреляционные каналы и элементы связи между ними. Это позволяет получать высотное распределение автокорреляционных функций сигнала рассеяния в виде основных и зеркальных составляющих. Как результат – вдоль направления зондирования на каждом участке без ухудшения высотного разрешения повышается статистическая точность расчета характеристик этого сигнала. Также дополнительно учитываются особенности высотного профиля сигнала рассеяния.

Ключевые слова: сигнал рассеяния, автокорреляционная функция, многоканальный коррелятор.

An example of the modernization of a correlator for an incoherent scatter radar operating in real time, into the structure of which additional correlation channels and coupling elements between them are introduced, is considered. This makes it possible to obtain a height distribution of the autocorrelation functions of the scattering signal in the form of the principal and mirror components. As a result, along the direction of sounding in each section, without degradation of the vertical resolution, the statistical accuracy of calculating the characteristics of this signal increases. The features of the altitude profile of the scattering signal are additionally taken into account.

Keywords: signal scattering, autocorrelation function, multi-correlator.

Вступ. Як відомо, автокореляційна функція (АКФ) сигналу некогерентного розсіяння (НР) є базовою в розрахунках [1] низки параметрів іоносфери (кінетичних температур іонів і електронів, іонного складу, тощо). АКФ обчислюють на кожній ділянці дальності (або висотній ділянці – для випадку вертикального випромінювання), протяжність якої уздовж напрямку зондування характеризує довжину імпульсного об'єму розсіяння в зоні діаграми спрямованості антени.

Мета роботи – зменшення статистичної похибки обчислення ординат АКФ вздовж шкали висот, не використовуючи методи, що погіршують висотне або часове розрізнення. Це стає можливим за рахунок удосконалення структури кореляційного пристрою радару НР, призначеного для отримання параметрів сигналу при його роботі в реальному часі.

Аналіз стану питання. Для вимірювання АКФ, як правило, використовують пристрої, які отримали назву кореляторів [2, 3]. Якщо вони здійснюють одночасний (паралельний) кореляційний аналіз, то мають назву багатоканальних пристроїв реального часу. В кожному із їхніх n каналів (за номерами $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$) розраховуються миттєві значення ординат автокореляційної функції $R(k\tau)$ кожна для своїх фіксованих затримок $k\tau = 0, \tau, 2\tau, \dots, (n-1)\tau$, де τ – крок за затримкою (елементарний часовий зсув), який вибирається з оглядом на фізичні особливості іоносферної плазми.

Такий розрахунок відбувається послідовно для всіх поточних ділянок, що мають центри на висотах (дальностях) $h = ct/2$ (де t – часова затримка сигналу на радіолокаційній розгортці відносно моменту випромінювання радіоімпульсу, а c – швидкість світла). Кількість ординат (каналів) n залежить від тривалості T радіоімпульсу зондування (який на

практиці має прямокутну обвідну), а також кроку τ , який вибирається з оглядом на фізичні особливості іоносферної плазми.

Наприклад, пристрій радіолокатора Інституту іоносфери (вертикальний промінь) розраховує до $n = 20$ ординат АКФ [4], при цьому для радіозондування плазми у метровому діапазоні радіохвиль (частота $f_0 = 158$ МГц) елементарний зсув прийнято за величину $\tau = 30$ мкс. В результаті цього тривалість радіоімпульсу зондування, що задається із співвідношення $T \geq n\tau$, вибрана у 660 мкс. Це значення дає можливість перекрити досліджуваний інтервал кореляції флуктуацій електронної концентрації для даного (100–1000 км) діапазону висот і частоти f_0 , тобто дозволяє отримати лінію АКФ достатньої довжини. Тривалість радіоімпульсу зондування при цьому задає висотне розрізнення $\Delta H = cT/2 = 100$ км.

А от радіолокатор обсерваторії Хайстек (США) для зондування використовує дециметровий діапазон ($f_0 = 440$ МГц). При цьому залучено значення $\tau = 12$ мкс, а значить – є можливість користуватися коротшим радіоімпульсом, тривалість якого за тієї ж кількості ординат АКФ відповідає висотному розрізненню до $\Delta H = 36$ км.

Розрахунок ординат АКФ у кореляторі у кожному з його k каналів відбувається відповідно до виразу

$$R(k\tau, h) = \int_{\Delta T} U(t) \cdot U(t - k\tau) dt, \quad (1)$$

де $U(t)$ і $U(t - k\tau)$ – основний і затриманий сигнали розсіяння, що поступають в корелятор від ділянок з центрами на висотах h . Результати для кожної ділянки

© В. О. Пуляєв, Є. В. Рогожкін, 2017

статистично накопичуються від розгортки до розгортки на протязі часу ΔT .

Недолік такого режиму обробки в тому, що хоч пристрій і дає можливість отримати максимально можливе висотне розрізнення ΔH , проте не забезпечує задовільну статистичну точність результату. Справа в тому, що сигнал розсіяння, будучи сам випадковим процесом, приймається на фоні космічних та апаратних шумів, і відношення сигнал/шум часто (а для висот вище 500 км практично завжди) значно менше за одиницю. І хоч радарі НР використовують антени з поверхнями у тисячі квадратних метрів, потужні (мегавати) передавачі, надчутливі приймачі, проте без шляхів покращення статистичного підходу надійність даних все ж залишається низькою.

Ще один з варіантів обробки полягає в наступному [5]. Він також використовує ряд паралельно працюючих кореляційних каналів, кожний з яких складається з лінії затримки та перемножувача, і при цьому реалізує одночасне обчислення всіх ординат АКФ у реальному часі.

Однак у цьому способі з метою покращення статистичної точності також погоджуються на погіршення часового розрізнення, накопичуючи n ординат АКФ в пам'яті (ОЗП) протягом m розгортки (утворюючи сеанси тривалістю від декількох до десятків хвилин) для кожної ділянки на висоті $h = ct/2$ згідно з виразом

$$\begin{aligned} R^{(i)}(kt, h) &= U^{(i)}(t) \cdot U^{(i)}(t - kt); \\ k &= 0, 1, \dots, (n-1); \\ i &= 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (2)$$

Додатково статистичну точність підвищують й за рахунок вторинної обробки. Після накопичення в ОЗП починається аналіз інформації та сортування ординат вздовж висоти та складання їх по висотним групам.

Недоліком цього методу є те, що підвищення статистичної точності фактично досягається за рахунок погіршення висотного розрізнення, а це в методі НР не бажано, особливо при дослідженні процесів в тонких іоносферних шарах D, E, F1. Ще й видача кінцевого результату відсувається на деякий термін, тобто корелятор перестає працювати в режимі реального часу. Унеможливується оперативний аналіз стану іоносфери, коли рішення треба приймати миттєво під час реєстрації швидкоплинних процесів в іоносферній плазмі (для фіксації ефектів від вибухів, землетрусів, запусків ракет, від дії сонячного термінатору, магнітних збурень та ін.).

Постановка задачі. В основу функціонування нової структури корелятора поставлено задачу по видачі результатів не тільки в реальному часі, але й при підвищеній статистичній точності обчислень, яка не визиває потреби в подальшому об'єднанні результатів від декількох висотних ділянок. Суть роботи такого корелятора є наступною [6].

Якщо розглядати особливості поведінки елементів випадкового ряду, який відображує стаціонарний процес, то відомо, що його АКФ є парна (дзеркальна). Для отримання автокореляційної функції

у цьому випадку не має значення, як відбувається перемноження відліків сигналу, тобто по відношенню до поточного елемента ряду $U(t)$ все одно, де знаходиться його пара – зліва, тобто $U(t - k\tau)$, чи справа, тобто $U(t + k\tau)$, результат накопичення цих множень у часі буде статистично однаковий. Що ж до некогерентно розсіяного іоносферою сигналу, то його відліки на протязі висотних ділянок відображують поведінку вже нестационарного процесу, який зв'язаний зі зміною з висотою параметрів іоносфери, тобто у цьому випадку АКФ буде непарною. А отже, розрахувавши основну і дзеркальну АКФ, ми гарантуємо, що вони будуть відноситися до однієї і тієї ж висотної ділянки протяжністю ΔH . Але при цьому вони статистично доповнять одна одну, і так як охоплюють різні частини цієї ділянки, то додатково відбувається ще й врахування форми профілю сигналу НР.

Цю особливість розрахунків наглядно демонструє наведено на рис. 1. графічне зображення процесу імпульсного зондування. На цьому рисунку ілюструється, як просувається радіоімпульс зондування тривалістю T в іоносфері на фоні профілю сигналу НР (у даному випадку – по вертикалі). Прийняті в моменти часу $(t \pm k\tau)$ відліки сигналу U прив'язані кожний до свого конкретного висотного положення радіоімпульсу. Ці положення вздовж висоти для наочності додатково поділені ще й на елементи h_i , зв'язані з періодом тактування АЦП серією $U(t)$. Їх кількість (в даному випадку $n = 4$) визначає кількість ординат АКФ, які у даному випадку можна отримати.

При такому підході можна спостерігати, що кожне миттєве значення прийнятої напруги $U(t \pm k\tau)$ є суперпозицією елементарних сигналів, некогерентно розсіяних плазмою від ряду цих висотних елементів на своєму інтервалі (ділянці) ΔH (розташовані вздовж вертикалі забарвлені прямокутники).

Для прикладу розглянемо момент, коли положення радіоімпульсу зондування збігається з висотами від h_4 до h_7 (штрихове забарвлення).

Для цього моменту часу корелятор згідно з формулою (2) може миттєво видати значення ординат АКФ сигналу розсіяння, які пов'язані з елементами, що відносяться тільки, в основному, до нижньої частини ділянки протяжністю $h_4 \dots h_6$. Це тому, що відповідно до теорії розсіяння корелюють тільки розташовані на одній висоті складові, які входять до відліків від $U(t - 3\tau)$ до $U(t)$. Треба відмітити, що сигнали у вигляді складових від нижніх елементів ($h_1 \dots h_3$) із-за того, що відстань до них більше дебаєвського радіусу екранування (тобто більше десятка сантиметрів), після перемноження з сигналом $U(t)$ від центрального імпульсу обов'язково дадуть тільки некорельований шум.

Пропозиція, як було сказано вище, зводиться до того, щоб одночасно використовувати ще й інші результати множення. Їх можна отримати, якщо додатково перемножувати $U(t)$ з відліками від $U(t + \tau)$

до $U(t + 3\tau)$ згідно з виразом

$$R_1(k\tau, h) = U(t) \cdot U(t + k\tau). \quad (3)$$

При цьому буде отримана корисна інформація від задіяної верхньої частини все тієї ж ділянки (висотні

елементи $h_5 \dots h_7$), і при цьому свій некорельований шум від висотних елементів ($h_8 \dots h_{10}$).

Корелятор, який за рахунок введення додаткових кореляційних каналів і схем складання результатів може виконувати такі дії, зображено на рис. 2.

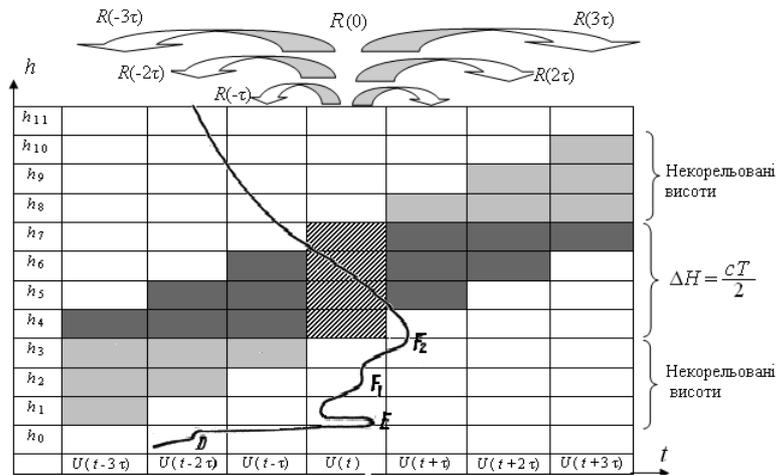


Рис. 1 – Процедура отримання основних та додаткових значень ординат АКФ

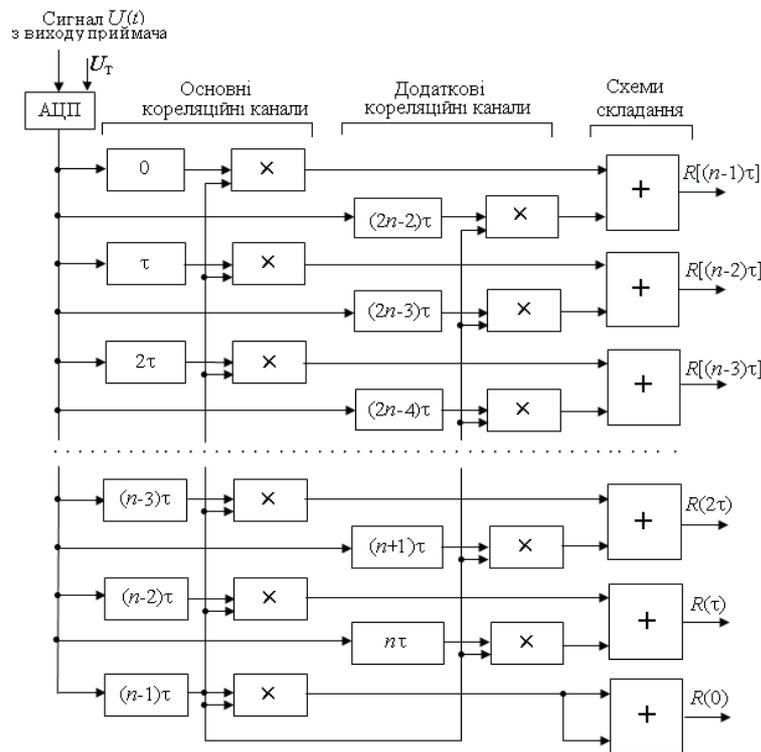


Рис. 2 – Цифровий корелятор з додатковими кореляційними каналами

Таким чином, щоб реалізувати удосконалений спосіб обчислення автокореляційної функції сигналу НР за допомогою пристрою, що здійснює паралельний кореляційний аналіз у реальному часі, необхідно проводити зондування іоносфери радіоімпульсом з прямокутною обвідною і довжиною $T \geq n\tau$. При цьому на виході всіх n паралельних каналів пристрою відносно поточної висотної ділянки протяжністю $\Delta H = cT/2$, що має центр на дальності

(висоті) $h = ct/2$, будуть одночасно присутні значення ненормованих ординат автокореляційної функції, які пристрій розраховує згідно з виразом

$$R_1(k\tau, h) = U(t) \cdot U(t - k\tau); \quad k = 0, 1, 2, \dots, n - 1, \quad (4)$$

де $U(t)$ – квантовані (цифрові) значення сигналу розсіяння, що надходять з АЦП з кроком τ , який задає тактова серія U_T .

В той же час новий багатоканальний пристрій для тієї ж ділянки з центром на h має змогу

розраховувати ще й допоміжні значення ординат АКФ згідно з виразом

$$R_2(k\tau, h) = U(t) \cdot U(t + k\tau) \quad (5)$$

за рахунок вводу в нього n додаткових кореляційних каналів. Значення ж отриманих однойменних ординат поступають на схеми складання, тобто вихідний результат в новій структурі корелятора буде мати значення $R(k\tau, h) = R_1(k\tau, h) + R_2(k\tau, h)$.

Висновки. В статті приведено опис структурної схеми корелятора, використання якого дає можливість врахувати форму висотного профілю сигналу НР. При цьому за рахунок того, що результати двох вищеприведених перемножень не є дзеркальними, складання однойменних ординат АКФ призведе ще й до поліпшення до $\sqrt{2}$ раз статистичної точності обчислень.

Список літератури

1. Рогожкін Е. В. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР: монография / Е. В. Рогожкін, В. А. Пуляев, В. Н. Лысенко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 256 с.
2. Жовинский В. Н. Корреляционные устройства / В. Н. Жовинский, В. Ф. Арховский. – М.: Энергия, 1974. – 248 с.
3. Farley D. T. Incoherent scatter correlation function measurements / D. T. Farley. – Radio Science, 1969, V. 4, № 10 – P. 935-953.
4. Лысенко В. Н. Корреляционная обработка сигнала некогерентного рассеяния / В. Н. Лысенко, А. Ф. Кононенко,

- Ю. В. Черняк // Вестн. национ. техн. ун-та «ХПИ», – Х.: НТУ «ХПИ», 2006.– № 31. – С. 77–83.
5. Пуляев В. О. Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі: монографія / В. О. Пуляев, С. В. Рогожкін, О. В. Богомаз – Х.: НТУ «ХПИ», – 2014. – 272 с.
6. Рогожкін Е. В. Спосіб обчислення АКФ сигналу НР / С. В. Рогожкін, В. О. Пуляев, Л. Я. Ємельянов // Тези доповідей XXV міжн. наук.-практ. конф. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – Ч. III. – С. 309.

References (transliterated)

1. Rohozhkin E. V. Zondyruyushchye syhnyaly dlya yssledovanyya yonosfery metodom NR: monohrafiya / E. V. Rohozhkin, V. A. Pulyaev, V. N. Lysenko. – Kh.: NTU «KhPI», 2008. – 256 s.
2. Zhovynskyy V. N. Korrelyatsyonnye ustroystva / V. N. Zhovynskyy, V. F. Arkhovskyy. – M.: Enerhiya, 1974. – 248 s.
3. Farley D. T. Incoherent scatter correlation function measurements / D. T. Farley. – Radio Science, 1969, V. 4, N. 10, – P. 935-953.
4. Lysenko V. N. Korrelyatsyonnaya obrabotka syhnala nekoherentnoho rasseyannya / V. N. Lysenko, A. F. Kononenko, Yu. V. Chernyak // Vestn. natsyon. tekhn. un-ta «KhPI», – Kh.: NTU «KhPI», 2006, – # 31. – S. 77–83.
5. Pulyaev V. O. Obchyslyval'ni protsedury pry analizi nekoherentnoho rozsiyannya v ionosferniy plazmi: monohrafiya / V. O. Pulyaev, Ye. V. Rohozhkin, O. V. Bohomaz – Kh.: NTU «KhPI», – 2014. – 272 s.
6. Rohozhkin E. V. Sposib obchyslennya AKF syhnalu NR / Ye. V. Rohozhkin, V. O. Pulyaev, L. Ya. Yemel'yanov // Tezy dopovidey XXV mizhn. nauk.-prakt. konf. – Kh.: NTU «KhPI», 2017. – Ch. III. – S. 309.

Надійшла (received) 05.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Багатоканальний кореляційний пристрій радару НР / В.О. Пуляев, С.В. Рогожкін // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – № 47 (1268). – С. 12 – 15. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Многоканальное корреляционное устройство радару НР / В.А. Пуляев, Е.В. Рогожкін // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – № 47 (1268). – С. 12 – 15. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Multi-channel correlation device of the IS radar / V.A. Pulyaev, E.V. Rogozhkin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysic and ionosphere. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No 47 (1268). – P. 12 – 15. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пуляев Валерій Олександрович – доктор технічних наук, професор, заступник директора Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: pulyaev@kpi.kharkov.ua.

Пуляев Валерий Александрович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: pulyaev@kpi.kharkov.ua.

Pulyaev Valeriy Olexandrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director of the Institute of ionosphere NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (057) 707-62-21; e-mail: pulyaev@kpi.kharkov.ua.

Рогожкін Євген Васильович – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри радіоелектроніки НТУ «ХПИ», м. Харків; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: rogojkiner@ukr.net.

Рогожкін Евгений Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники НТУ «ХПИ», г. Харьков; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: rogojkiner@ukr.net.

Rogozhkin Evgen Vasilovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department of Radio Electronics of NTU “KhPI”, Kharkiv; phone: (057) 707-62-21; e-mail: pulrogojkiner@ukr.net.

УДК 53.088.6:550.388, 621.396

А. В. БОГОМАЗ, Д. А. ИСКРА, А. Ф. КОНОНЕНКО**СИНХРОНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ В РЕЖИМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДНЕЙ ИОНОСФЕРЫ**

У процесі створення нового програмно-апаратного комплексу обробки даних радару некогерентного розсіяння (НР), що працює в режимі дослідження середньої іоносфери, проаналізовано часові характеристики сигналів синхронізації з передавальною і приймальною системами радару. На базі результатів аналізу розроблено пристрій формування таких сигналів для налагодження програмного забезпечення сучасного модуля аналого-цифрового перетворення.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, обробка сигналу, синхронізація, середня іоносфера.

В процессе создания нового программно-апаратного комплекса обработки данных радару некогерентного рассеяния (НР), работающего в режиме исследования средней ионосферы, проанализированы временные характеристики сигналов синхронизации с передающей и приёмной системами радару. На основе результатов анализа создано устройство формирования таких сигналов для отладки программного обеспечения современного модуля аналого-цифрового преобразования.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, обработка сигнала, синхронизация, средняя ионосфера.

In the process of creating a new software-hardware data processing system for the incoherent scatter (IS) radar operating in the mode of sounding the middle ionosphere, the time characteristics of the synchronization signals with the transmitting and receiving systems of the radar are analyzed. Based on the results of the analysis, a device for generating such signals for debugging the software of a modern analog-to-digital conversion module has been created.

Keywords: incoherent scatter radar, signal processing, synchronization, middle ionosphere.

Введение. Актуальность изучения средней ионосферы (120–400 км) обусловлена тем, что среда в указанном диапазоне высот наиболее существенно влияет как на распространение радиоволн, так и на возникновение и распространение волновых процессов, вызываемых природными и антропогенными факторами (например, геокосмических бурями и стартами ракет) [1].

Главным инструментом Института ионосферы для исследования средней и верхней ионосферы является радар некогерентного рассеяния (НР) [2]. Применяемые в основном режиме его работы простые зондирующие импульсы большой длительности (около 650 мкс) позволяют получить с высокой точностью оценки параметров ионосферы в районе максимума ионизации и выше. Для исследования ионосферы ниже максимума области F_2 используются импульсы длительностью 135 мкс, что позволяет улучшить высотное разрешение (до 20 км) [3]. Активные измерения в этом режиме проводились в период с 1999 по 2004 г. [4]

Аппаратное и программное обеспечение системы обработки данных харьковского радару НР, которая используется во время его работы в режиме зондирования короткими импульсами, были разработаны ещё в середине 1990-х годов [5]. Небольшая вычислительная мощность этой компьютерной системы привела к необходимости её горизонтального масштабирования и искусственного занижения точности вычислений для улучшения временных показателей (система должна работать в режиме реального времени). Поэтому предполагается разработка и внедрение нового програмно-апаратного комплексу, который будет построен на базе модуля аналого-цифрового преобразования E20-10, обеспечивающего непрерывный сбор 14-битных данных с частотой до 10 МГц и передачу их по интерфейсу USB 2.0 [6]. Первоочередной

задачей реализации новой компьютерной системы является обеспечение её синхронизации с передающей и приёмной системами радару.

Целью данной работы является рассмотрение временных диаграмм синхронизирующих сигналов системы обработки данных харьковского радару НР в режиме зондирования ионосферы короткими импульсами, а также аппаратных и программных особенностей синхронизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) E20-10 в этом режиме.

Формирователь импульсов синхронизации харьковского радару НР. Данное устройство построено на базе постоянного-запоминающего устройства (ROM), в котором записаны значения выходных сигналов управления (рис. 1). Каждый адресуемый двоичным счётчиком СТ байт соответствует одному отсчёту времени, каждый бит этого байта – одному из управляющих сигналов. Частота следования отсчётов определяется частотой тактового генератора G.

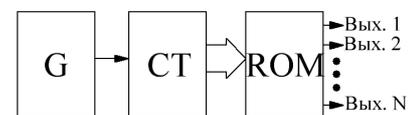


Рис. 1 – Структурная схема формирователя синхронизирующих сигналов системы обработки данных харьковского радару НР

Два основных сигнала, которые используются для синхронизации системы обработки данных харьковского радару НР в режиме зондирования ионосферы короткими импульсами: ИЗП – импульс запуска передатчика и R_0 – признак радиолокационной развёртки, во время которой излучается одиночный короткий импульс (рис. 2). Для последующего, т.е. во время обработки данных, формирования VII–XII

© А. В. Богомаз, Д. А. Искра, А. Ф. Кононенко, 2017

точки автокорреляционной функции (АКФ) принятого сигнала в ионосферу излучается два зондирующих импульса (согласно двум ИЗП).

Период повторения развёрток $T_n \approx 41$ мс (что соответствует частоте следования импульсов 24,4 Гц и

максимальной дальности около 6150 км), задержка $\Delta\tau = 40$ мкс, длительность импульсов запуска передатчика T_n – единицы микросекунд.

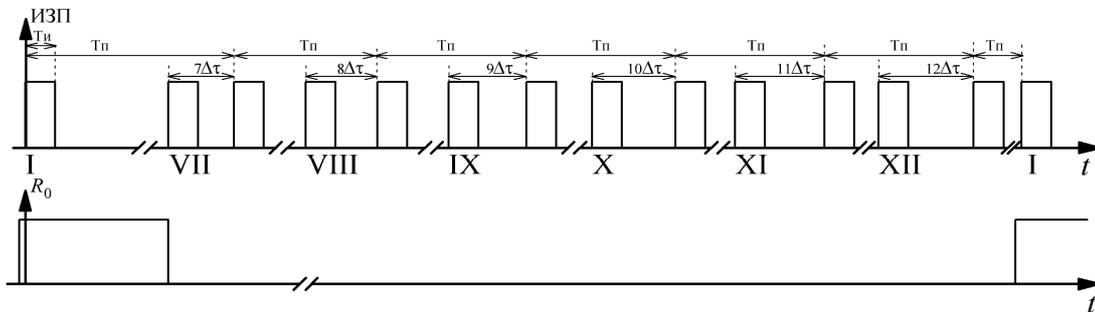


Рис. 2 – Схематическое расположение сигналов ИЗП и R_0

Временные диаграммы сигналов синхронизации. Для получения временных диаграмм сигналов ИЗП и R_0 на выход устройства синхронизации был подключён модуль E20-10.

Разработанное программное обеспечение позволило записать эти два сигнала с интервалом дискретизации 0,1 мкс. Временные диаграммы сигнала ИЗП показаны на рис. 3; время выражено в микросекундах.

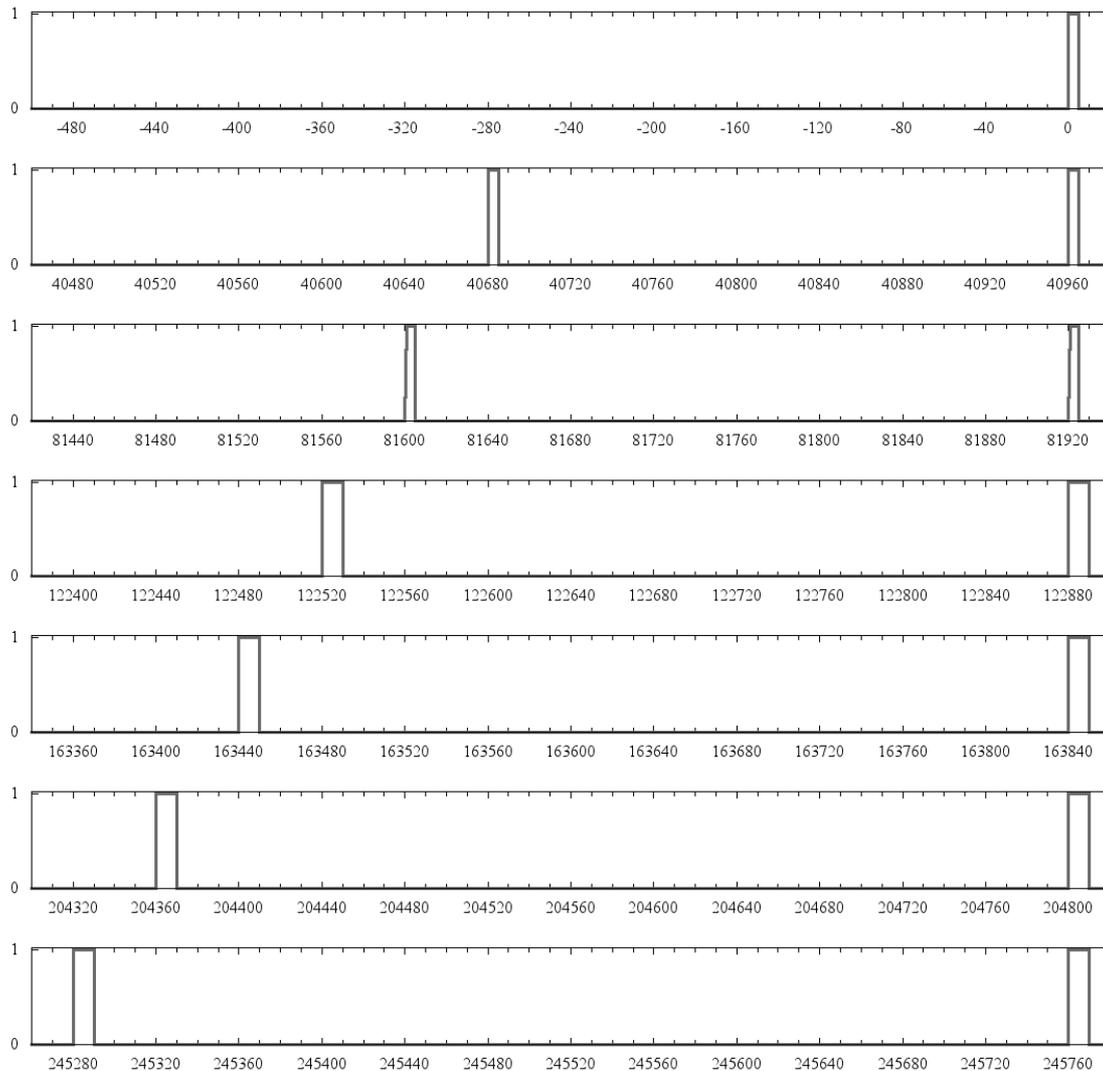


Рис. 3 – Временные диаграммы сигнала ИЗП

На рис. 4 показаны временные диаграммы сигналов R_0 и ИЗП для радиолокационной развёртки, в которой излучается один зондирующий импульс (а), и для развёртки, в которой излучается два зондирующих

импульсы, расстояние между которыми $7\Delta t$ (б), т.е. в последующем по данным этой развёртки будет сформирована VII точка АКФ принятого сигнала.

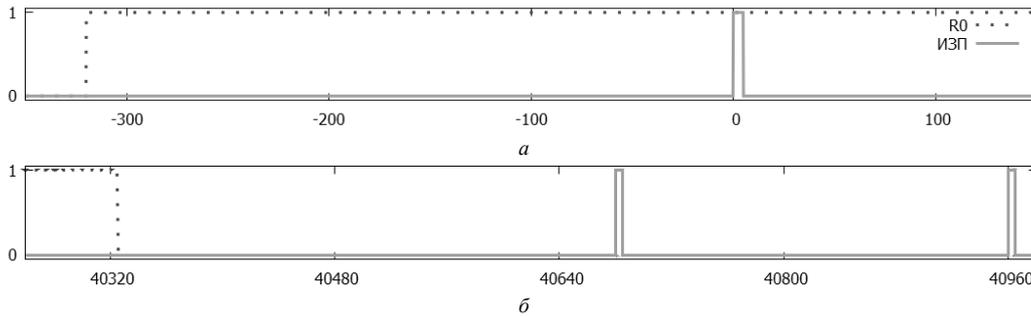


Рис. 4 – Временные диаграммы сигналов R_0 и ИЗП: а – для развёртки с одним зондирующим импульсом; б – для развёртки с двумя зондирующими импульсами для формирования VII точки АКФ принятого сигнала

Синхронизация модуля E20-10. Непосредственно подавать на АЦП синхронизирующие сигналы, которые используются для синхронизации действующей системы обработки данных (показаны на рис. 3–4), нельзя. Так, во-первых, будет происходить синхронизация по каждому ИЗП. Если же подавать сигнал ИЗП на вход формирователя импульсов длительностью $T > 7\Delta t$, а с его выхода – на синхронизирующий вход АЦП, такой проблемы можно избежать, однако каждая радиолокационная развёртка будет иметь свою ось высот, что приведёт к необходимости дополнительной высотной коррекции данных во время их анализа. Во-вторых, сигнал R_0 , указывающий на первую радиолокационную развёртку (которая используется для расчёта мощности принятого сигнала) не задействован, так как модуль не имеет больше цифровых входов.

Таким образом, среди выходов формирователя импульсов синхронизации харьковского радара НР (рис. 1) был выбран выход, отвечающий за формирование ИЗП в моменты времени кратные $T_n = 40960$ мкс. Сигнал R_0 через резистивный делитель подаётся на один из двух недействующих аналоговых входов АЦП (рис. 5).

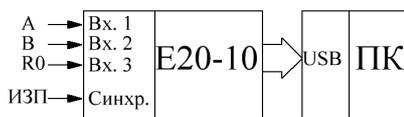


Рис. 5 – Упрощённая структура системы обработки данных на базе модуля АЦП E20-10. А и В – квадратурные составляющие принятого сигнала с выходов синхронных детекторов радиоприёмного устройства радара

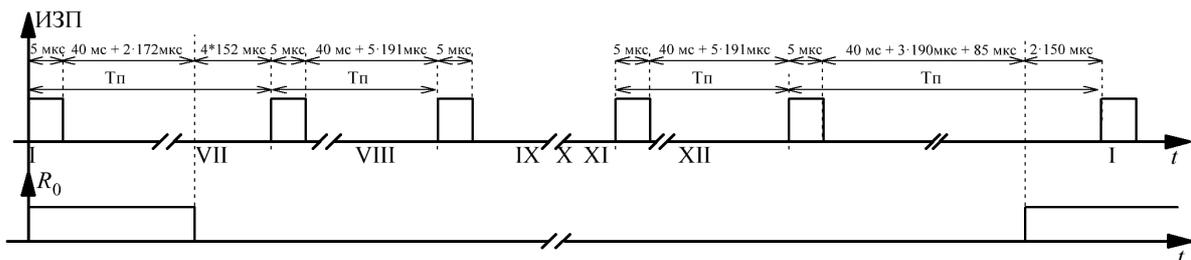


Рис. 6 – Схематическое расположение сигналов ИЗП и R_0 , сформированных с помощью разработанного устройства синхронизации модуля АЦП E20-10

Для отладки программного обеспечения, работающего с модулем E20-10, было разработано устройство, формирующее сигналы ИЗП и R_0 согласно таймингам, полученным из временных диаграмм (рис. 3, 4); в каждой радиолокационной развёртке формируется один ИЗП (через промежуток времени $T_n = 40960$ мкс).

Устройство построено на базе микроконтроллера Attiny2313 фирмы Atmel. Тактовая частота микроконтроллера задаётся внешним кварцевым резонатором с частотой $f_c = 4$ МГц; внутренний делитель частоты на 8 отключён.

Программа для микроконтроллера написана на языке С. Вывод сигналов ИЗП и R_0 производится в порт В (биты 0 и 1 соответственно).

Так как вид сигналов достаточно простой, необходимые временные интервалы задаются не с помощью таймера, а с помощью описанных в заголовочном файле util/delay.h функций `_delay_ms` и `_delay_us` (для задержек миллисекундной и микросекундной точности соответственно), принцип работы которых основан на выполнении определённого количества итераций циклов.

Максимально возможная задержка для функции `_delay_ms` равна $(262,14 \text{ [мс]} / f_c \text{ [МГц]})$, т.е. при выбранной частоте – около 65 мс. Этого достаточно для формирования задержки 40 мс, которая определяет основную часть радиолокационной развёртки. Максимально возможная задержка для функции `_delay_us` равна $(768 \text{ [мкс]} / f_c \text{ [МГц]})$, т.е. при выбранной частоте – 192 мкс. В большинстве случаев такой задержки недостаточно, поэтому функция вызывается несколько раз (рис. 6).

Выводы. Таким образом, полученные временные диаграммы сигналов, синхронизирующих работу системы обработки данных с радиопередающим и радиоприёмным устройствами радара, позволили разработать устройство для отладки программ, необходимых для создания программно-аппаратного комплекса обработки данных радара НР в режиме исследования средней ионосферы.

Список литературы

1. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука. – 1988. – 521 с.
2. Dominin, I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Dominin, Ya. M. Cherpurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.] // Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2014. – No 47 (1089). – P. 28–42.
3. Головин В. И. Наблюдения ионосферы с помощью метода некогерентного рассеяния. Сообщение 2. Аппаратурные и методические особенности / В. И. Головин, Е. В. Рогожкин, В. И. Таран, С. В. Черняев // Вестник Харьковского политехнического института. – 1979. – №155. – С. 12–22.
4. Сюсюк М. Н. Особенности исследования средней ионосферы методом некогерентного рассеяния / М. Н. Сюсюк // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – 2013. – №33 (1066) – С. 62–65.
5. Цуркан А. В. Двухимпульсный режим радара некогерентного рассеяния / А. В. Цуркан // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков. – 1999. – Вып. 31. – С. 120–123.
6. Искра Д. А. Повышение точности определения автокорреляционных функций сигнала некогерентного рассеяния / Д. А. Искра // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – №33 (1066) – 2013. – С. 34–37.

References (transliterated)

1. Bryunelli B. E., Namgaladze A. A. *Fizika ionosfery* [Physics of ionosphere]. Moscow, Nauka. 1988. 521 p.
2. Dominin I. F., Cherpurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya. et al. Kharkiv Incoherent Scatter Facility. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2014, no. 47 (1089), pp. 28–42.
3. Golovin V. I., Rogozhkin E. V., Taran V. I., Chernyaev S. V. Nablyudeniya ionosfery s pomoshch'yu metoda nekogerentnogo rasseyaniya. Soobshchenie 2. Apparaturnye i metodicheskie osobennosti [Observations of the ionosphere using the method of incoherent scattering. Post 2. Instrumental and methodological features]. *Vestnik Khar'kovskogo politekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the Kharkiv polytechnic institute]. Kharkiv, 1979, no. 155, pp. 12–22.
4. Syusyuk M. N. Osobennosti issledovaniya sredney ionosfery metodom nekogerentnogo rasseyaniya [Features of the study of the middle ionosphere by the method of incoherent scattering]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskiy politekhnicheskii institut»* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, 2013, no. 33 (1066), pp. 62–65.
5. Tsurkan A. V. Dvukhimpul'snyy rezhim radara nekogerentnogo rasseyaniya [Two-pulse mode of the incoherent scatter radar]. *Vestnik Khar'kovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kharkiv state polytechnic institute]. Kharkiv, 1999, no. 31, pp. 120–123.
6. Iskra D. A. Povyshenie tochnosti opredeleniya avtokorrelyatsionnykh funktsiy signala nekogerentnogo rasseyaniya [Increase in the accuracy of determination of the autocorrelation functions of the incoherent scattering signal]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskiy politekhnicheskii institut»* Bulletin of the National Technical University "KhPI". Kharkiv, 2013, no. 33 (1066), pp. 34–37.

Поступила (received) 14.08.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Синхронізація системи обробки даних радара некогерентного розсіяння в режимі дослідження середньої іоносфери / О. В. Богомаз, Д. О. Искра, А. Ф. Кононенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47. – С. 16 – 19. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Синхронизация системы обработки данных радара некогерентного рассеяния в режиме исследования средней ионосферы / А. В. Богомаз, Д. А. Искра, А. Ф. Кононенко // Вестник НТУ «ХПІ». Серія: Радиофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47. – С. 16 – 19. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Synchronization of the incoherent scattering radar data processing system in the mode for sounding the middle ionosphere / O. V. Bogomaz, D. O. Iskra, A. F. Kononenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 47. – P. 16 – 19. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богомаз Олександр Вікторович – кандидат технічних наук, Інститут іоносфери, старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: 706-22-87; e-mail: o.v.bogomaz1985@gmail.com.

Богомаз Александр Викторович – кандидат технических наук, Институт ионосферы, старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: o.v.bogomaz1985@gmail.com.

Bogomaz Oleksandr Viktorovych – Candidate of Technical Sciences, Institute of Ionosphere, Senior research scientist, Kharkiv; tel.: 706-22-87; e-mail: o.v.bogomaz1985@gmail.com.

Искра Дмитро Олександрович – Інститут іоносфери, молодший науковий співробітник, м. Харків; тел.: 706-22-87; e-mail: iskradmitriy@gmail.com.

Искра Дмитрий Александрович – Институт ионосферы, младший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: iskradmitriy@gmail.com.

Iskra Dmytro Oleksandrovych – Institute of Ionosphere, Junior research scientist, Kharkiv; tel.: 706-22-87; e-mail: iskradmitriy@gmail.com.

Кононенко Анатолій Федорович – Інститут іоносфери, інженер-електронік I кат., м. Харків; тел.: 706-22-87.

Кононенко Анатолий Фёдорович – Институт ионосферы, инженер-электроник I кат., г. Харьков; тел.: 706-22-87.

Kononenko Anatolii Fedorovych – Institute of Ionosphere, engineer, Kharkiv; tel.: 706-22-87.

УДК 621.314.26

І. Ф. ДОМНІН, О. О. ЛЕВОН**СИНТЕЗ FUZZY-РЕГУЛЯТОРА ДРУГОГО ПОРЯДКУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИМ ПРИСТРОЄМ**

В даній статті розглянуті етапи синтезу нечіткого регулятора другого порядку за бажаною статичною характеристикою: формування лінгвістичних змінних вхідних і вихідних сигналів; синтез системи продукційних правил. Для синтезу нечіткого регулятора за бажаною характеристикою будується таблиця опорних значень, на підставі якої відбувається синтез бази продукційних правил. Застосування продукційних правил з подвійним консеквентом дозволяє синтезувати нечіткий регулятор з необхідною точністю.

Ключові слова: нечіткий логічний регулятор, система керування, багатоканальний логічний регулятор, нечітке моделювання.

В данной статье рассмотрены этапы синтеза нечеткого регулятора второго порядка по желаемой статической характеристике: формирование лингвистических переменных входных и выходных сигналов; синтез системы продукционных правил. Для синтеза нечеткого регулятора по желаемой характеристике строится таблица опорных значений, на основании которой происходит синтез базы продукционных правил. Применение продукционных правил с двойным консеквентом позволяет синтезировать нечеткий регулятор с требуемой точностью.

Ключевые слова: нечеткий логический регулятор, система управления, многоканальный логический регулятор, нечеткое моделирование.

This paper deals with the stages of the fuzzy controller synthesis by the desired static characteristic: the formation of input and output signals linguistic variables; production rules system synthesis. For the fuzzy controller synthesis by the desired characteristics a reference values table is created on which basis the synthesis of the production rules base takes place. Using production rules with a double consequent allows synthesizing fuzzy controller with the required accuracy.

Keywords: fuzzy logic controller, control system, multistage fuzzy logic controller, fuzzy modeling.

Вступ. Метод проектування нечіткого регулятора у складі системи керування пристроєм компенсації неактивних складових повної потужності на основі пакету нечіткої логіки системи MATLAB досить докладно викладено в роботах [1-3].

В описаній структурі автоматизованої системи керування фільтрокомпенсуючим пристроєм (ФКП) введений додатковий контур регулювання з fuzzy-регулятором, який реалізує процедуру нечіткого виведення і дає можливість отримати необхідні значення регульованих і контрольованих параметрів об'єкта, а саме здійснює керування рівнем амплітуди обраної гармоніки струму мережі живлення k_i або коефіцієнта гармонік в цілому і приведення даних параметрів до встановленого рівня, що в свою чергу відбувається при зміні напруги на конденсаторі інвертора U_c за рахунок керуючих сигналів U_{cref} на виході додаткового контуру регулювання.

У запропонованій системі керування на базі нечіткої логіки вхідні сигнали fuzzy-регулятора та керуючі на виході розглядаються як лінгвістичні змінні, що якісно характеризуються терм-множинами. Кожен терм розглядається як нечітка множина і формалізується за допомогою функції приналежності. Формування керуючого впливу здійснюється на підставі лінгвістичних правил керування, що встановлюють засобами природної мови зв'язок між станом динамічної системи і керуючим впливом в системі керування ФКП.

У даній роботі пропонується застосовувати нечіткий регулятор другого порядку для моделювання подібних систем з необхідною точністю, а так само представлений алгоритм синтезу нечіткого регулятора другого порядку, який дозволить підвищити точність нечіткого регулятора при незначному ускладненні структури регулятора.

Нечіткий регулятор являє собою статичну ланку, тобто сигнал на виході нечіткого регулятора однозначно визначається вхідними сигналами. Таким чином, для синтезу нечіткого регулятора необхідно визначити бажану статичну характеристику нечіткого регулятора і налаштувати його таким чином, щоб його статична характеристика збігалася з бажаною. Нечіткий регулятор другого порядку має в своєму складі нечіткий регулятор першого порядку і спирається на базу продукційних правил з подвійним консеквентом [4].

Постановка питання. На рис. 1 представлена MATLAB-модель напівпровідникового компенсатора, підключеного до мережі живлення паралельно нелінійному навантаженні, створена і апробована в пакеті MATLAB 7.0.1. з додатковим контуром нечіткого регулювання по рівню вищих гармонік струму мережі живлення і доповнена контуром нечіткого регулювання рівня комутаційних перенапруг [1]. На вхід fuzzy-регулятора надходять такі сигнали: коефіцієнт i -ї гармоніки струму мережі живлення k_i , тобто рівень амплітуди обраної гармоніки, віднесений до амплітуди першої гармоніки струму мережі живлення – k_{im} , рівень напруги на накопичувальному конденсаторі силового активного фільтру (САФ) U_c , рівень комутаційних перенапруг U_p з виходу блоку фіксатора перенапруг. Вихідний сигнал fuzzy-регулятора U_{cref} керує напругою на накопичувальному конденсаторі силового активного фільтру.

Зміна напруги на конденсаторі накопичувача забезпечує регулювання рівня комутаційних перенапруг, що виникають при роботі вентиляційної групи на повністю керованих тиристорах, а так само рівнем амплітуди обраної гармоніки струму мережі живлення.

© І. Ф. Домнін, О. О. Левон, 2017

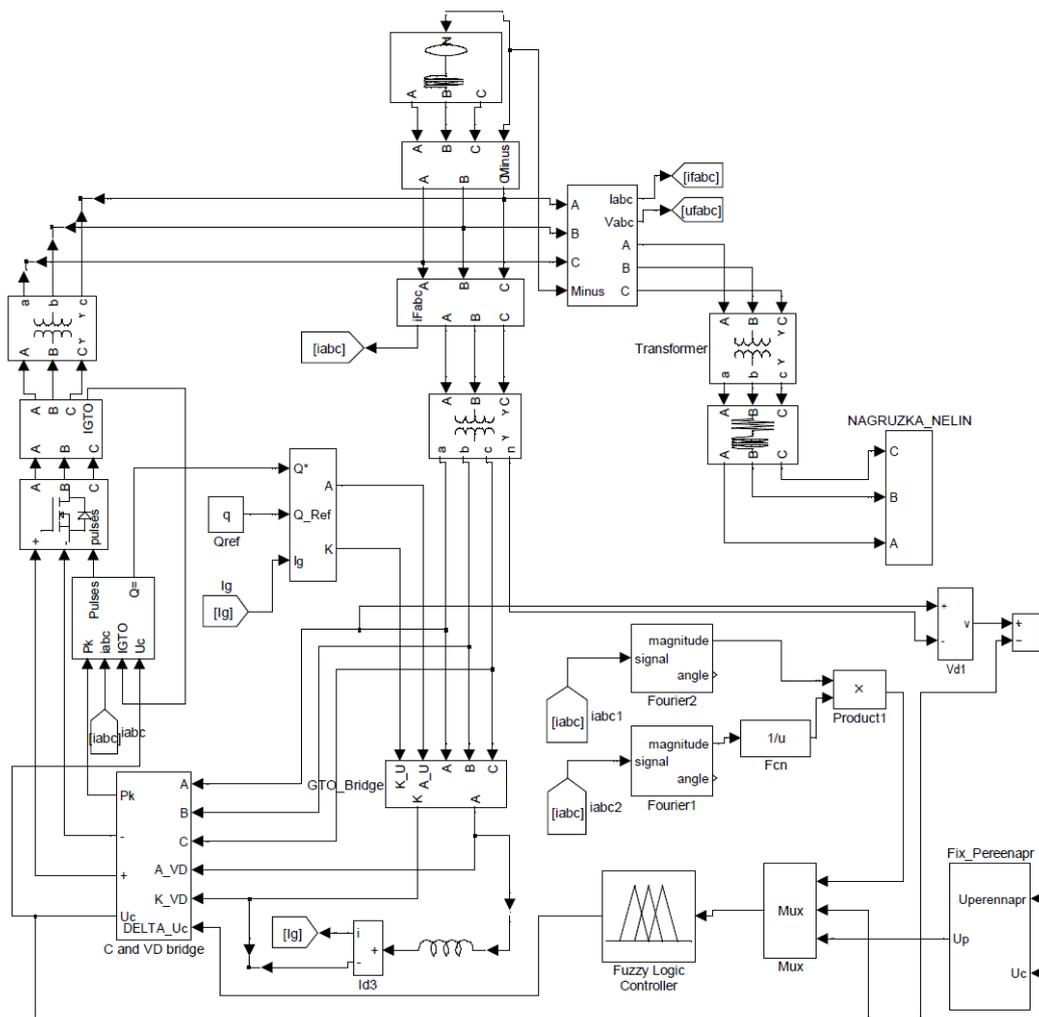


Рис. 1 – MATLAB-модель компенсатора з контуром нечіткого регулювання вищих гармонік струму і комутаційних перенапруг

За допомогою наведеної моделі досліджувалася залежність рівня комутаційних перенапруг, а також рівня амплітуди окремо взятої гармоніки струму мережі живлення від відносної напруги на конденсаторі накопичувача, яка визначається як відношення величини напруги на конденсаторі до амплітуди лінійної напруги на вторинній обмотці трансформатора живлення випрямного блоку [5].

Отримані за допомогою моделювання графічні залежності, а так само їх аналіз, підтверджують зроблені теоретичні висновки у [5] про наявність діапазону, при якому не доцільно подальше підвищення значення напруги на конденсаторі накопичувача U_c , з метою зменшення величин окремих гармонік струму мережі живлення, через перевищення встановленої межі комутаційних перенапруг $U_{p_{max}}$, що необхідно враховувати при налаштуванні параметрів нечіткого регулятора.

Синтез нечіткого регулятора другого порядку.

Синтез нечіткого регулятора із заданою статичною характеристикою включає в себе етапи формування лінгвістичних змінних вхідних і вихідних сигналів,

вибору алгоритмів дефазифікації, агрегування, активізації та акумулювання, а також етап синтезу системи продукційних правил.

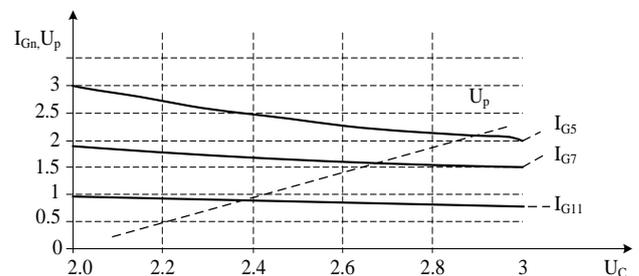


Рис. 2 – Залежність амплітуд вищих гармонік струму мережі і рівня комутаційних перенапруг від напруги на конденсаторі накопичувача

Етапи формування лінгвістичних змінних, вибір алгоритмів агрегування, акумулювання та

дефазифікації описано в [1 – 3].

Вихідними даними для синтезу нечіткого регулятора другого порядку є експериментальні дані (рис. 2), представлені у вигляді таблиці опорних точок (таблиця 1). Таблиця опорних точок має n рядків і m стовпців. Кожному рядку і стовпцю при формуванні вхідних лінгвістичних змінних буде відповідати терм трикутної форми з вершиною, що визначає значення вхідного параметру відповідного рядка і стовпця.

Таким чином, лінгвістичні змінні, що описують нечіткий регулятор другого порядку, будуть мати такий вигляд:

- вхід $k(k_i)$: $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$;
- вхід $u(U_c)$: $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$;
- вхід $p(U_p)$: $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$;
- вихід $r(U_{ref})$: $R = \{R_1, R_2, \dots, R_q\}$.

Таблиця 1 – Таблиця опорних точок

u, p, k	u_{U1}, p_{P1}	u_{U2}, p_{P2}	...	u_{Uj}, p_{Pj}	...	u_{Um}, p_{Pm}
k_{K1}	r_{11}	r_{12}	...	r_{1j}	...	r_{1m}
k_{K2}	r_{21}	r_{22}	...	r_{2j}	...	r_{2m}
...
k_{Ki}	r_{i1}	r_{i2}	...	r_{ij}	...	r_{im}
...
k_{Kn}	r_{n1}	r_{n2}	...	r_{nj}	...	r_{nm}

Кількість продукційних правил N , які необхідно описати, дорівнюватиме:

$$N = mn. \tag{1}$$

Нехай для термів $K_1 \dots K_i$ були розроблені продукційні правила. Розглянемо синтез продукційних правил для терма K_{i+1} . Якщо змінювати терми вхідних і вихідних лінгвістичних змінних, то розроблені раніше продукційні правила будуть давати інший результат. Таким чином, при синтезі продукційних правил необхідно вважати терми всіх лінгвістичних змінних незмінними [4]. Це істотно полегшить завдання синтезу нечіткого регулятора, скоротивши кількість варіантів продукційних правил. Однак етап формування лінгвістичних змінних стає більш відповідальним.

При подачі на вхід нечіткого регулятора значень максимумів термів вхідних лінгвістичних змінних спрацює тільки одне продукційне правило [4]. Таким чином, нечіткий регулятор в даній точці можна розглядати як нечіткий регулятор з одним правилом, отже, консеквент правила виду $r = R_w$ повністю визначає вихідне значення регулятора.

У загальному випадку, при значеннях $w = 1, 2 \dots q$ значення виходу не братиме необхідного бажаного значення з таблиці опорних точок.

Позначимо центри тяжіння всіх термів вихідної лінгвістичної змінної C_{Rj} . Нехай бажане значення r_{ij} лежить між центрами тяжіння термів R_g і R_{g+1} .

При консеквенті продукційного правила $r = R_g$ результат буде менше бажаного, а при $r = R_{g+1}$ – більше бажаного. Створімо продукційне правило з

подвійним консеквентом – якщо $k = K_i, u = U_j$ та $p = P_j$, тоді $r = RC1_g$ та $r = RC2_{g+1}$.

Базовим консеквент називають консеквент зі ступенем істинності 1. Консеквент зі ступенем істинності менше 1 називається додатковим [4]. Введемо позначення C – ступінь істинності додаткового консеквента. Визначення ступеня істинності C проводиться за графіком (рис. 3). Для ідентифікації додаткового консеквента необхідно розрахувати значення виходу нечіткого регулятора r_Σ при $C = 1$. Базовий консеквент $r = R_b$. Якщо значення r_Σ більше бажаного, то $b = g$, якщо менше – $b = g + 1$.

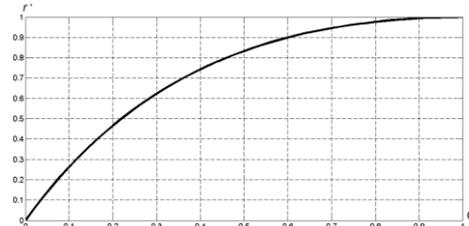


Рис. 3. Залежність ступеня істинності правила від відносного значення вихідної величини

Величина відносного значення вихідної величини r^* розраховується за такою формулою:

$$r^* = 1 - (r_{ij} - r_\Sigma) / (C r_b - r_\Sigma). \tag{2}$$

Таким чином, якщо бажане значення збігається з одним з центрів тяжіння термів, то в консеквенті продукційного правила для даного виходу вказується даний терм. Якщо бажане значення не збігається ні з одним з центрів тяжіння термів, то в консеквенті продукційного правила для даного виходу вказується два терми з необхідними ступенями приналежності.

Так як алгоритм синтезу нечіткого регулятора не залежить від кількості входів і послідовності розробки продукційних правил, то статична характеристика за всіма напрямками матиме однакові властивості [4]. Виходи в нечіткому регуляторі незалежні, тому даний алгоритм можна застосовувати незалежно від кількості виходів.

Висновки. Здійснено синтез нечіткого регулятора другого порядку для системи керування фільтрокомпенсуючим пристроєм, що дозволить домогтися необхідної точності регулювання контрольованих параметрів об'єкту.

Список літератури

1. Домнин И. Ф. Многоконтурная система управления фильтрокомпенсирующим устройством / И. Ф. Домнин, Е. А. Кайда // Технічна електродинаміка. – 2010. – Ч. 2. – С. 44 – 47.
2. Кайда Е. А. Нечеткое регулирование устройством компенсации неактивных составляющих полной мощности / Е. А. Кайда // Технічна електродинаміка. – 2011. – Ч. 1. – С. 184 – 188.
3. Левон Е. А. Оптимизация параметров цифрового нечеткого регулятора / Е. А. Левон, И. Ф. Домнин, В. П. Северин // Технічна електродинаміка. – 2012. – Ч. 2. – С. 91 – 94.
4. Соловьёв К. А. Эталонная модель для системы управления технологическим процессом на базе нечеткого регулятора второго порядка / К. А. Соловьёв, Е. А. Муравьёва // Сборник

- матеріалів II междунар. науч.-практ. конф. "Современные проблемы науки и образования в техн. вузе". – Стерлитамак, 2015. – С. 61 – 66.
5. Левон О. О. Напівпровідниковий двоканальний регульований компенсатор неактивних складових повної потужності: дис... канд. техн. наук: 05.09.12 / Левон Олена Олександрівна. – Х., 2015. – 200 с.
 3. Domnin, I. F., Levon, E. A., Severin V.P. (2012) Optimizaciya parametrov cifrovogo nechetkogo regulyatora. Tehnichna electrodynamika. Kharkiv: NTU«KHPI». P.2, Tematchnui vup. Pp.91-94.
 4. Solov'jov K. A., Murav'jova E. A. Jetalonnaja model' dlja sistemy upravlenija tehnologicheskim processom na baze nechetkogo reguljatora vtorogo porjadka [The reference model for a process control system based on a fuzzy controller of the second order]. Sbornik materialov II mezhdunar. nach.-prakt. konf. "Sovremennye problemy nauki i obrazovanija v tehn. vuze". – Sterlitamak, 2015. – S. 61 – 66.
 5. Levon O. O. (2015) Napivprovodnikovuy dvokanalny reguljovanuy kompensator neaktivnuh skladovuh povnoi potugnosti: diss... Ph.D.: 05.09.12. Levon Olena Oleksandrovna. Kharkiv. 200 Pp.

References (transliterated)

1. Domnin, I. F., Kaida, E. A. (2010) Mnogokoturnaya Sistema upravleniya philtrokompensiruyushim ustroystvom. Tehnichna electrodynamika. Kiev. IEDNANU. P. 2. Tematchnui vup. Pp.44-47.
2. Kaida, E. A. (2011) Nechetkoe regulirovanie ustroystvom kompensacii neaktivnuh sostavlyaushih polnoi moshnosti. Tehnichna electrodynamika. Kiev. IEDNANU. P. 1. Tematchnui vup. Pp.184-188.

Надійшла (received) 05.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Синтез fuzzy-регулятора второго порядка для системы керування фільтрокомпенсуючим пристроєм / I. Ф. Домнін, О. О. Левон // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 20 – 23. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-9998.

Синтез fuzzy-регулятора второго порядка для системы управления фильтрокомпенсирующим устройством / И. Ф. Домнин, Е. А. Левон // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 20 – 23. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2078-9998.

Synthesis of the second order fuzzy-regulator for the control system of the filter-compensating device / I. F. Domnin, O. O. Levon // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 47 (1268). – P. 20 – 23. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Левон Олена Олександрівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри радіоелектроніки; тел.: (068) 890-04-38; e-mail: elena_levon@ukr.net.

Левон Елена Александровна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры радиоэлектроники; тел.: (068) 890-04-38; e-mail: elena_levon@ukr.net.

Levon Olena Oleksandrivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of radioelectronics; tel.: (068) 890-04-38; e-mail: elena_levon@ukr.net.

Домнін Ігор Феліксович – доктор технічних наук, професор, директор Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-25-99; e-mail: domninpro@ukr.net

Домнин Игорь Феликсович – доктор технических наук, профессор, директор Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-25-99; e-mail: domninpro@ukr.net

Domnin Igor Felicsovich – doctor of technical sciences, professor, director of the Institute of ionosphere NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; tel.: (057) 706-25-99; e-mail: domninpro@ukr.net

УДК 550.388.2

М. В. ЛЯШЕНКО, И. Р. ШНИЦАР**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ В МИНИМУМЕ И МАКСИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

Представлено результати експериментальних досліджень варіацій концентрації електронів в іоносфері за даними харківського радара некогерентного розсіяння, отриманих на фазах мінімуму (2006 – 2007 рр.) і максимуму (2012 – 2013 рр.) циклу сонячної активності. Виконано аналіз і фізична інтерпретація просторово-часових залежностей концентрації електронів. Представлено результати моделювання добових варіацій концентрації електронів в діапазоні висот 190 – 790 км в рамках розвитку регіональної моделі іоносфери CERIM ION.

Ключові слова: концентрація електронів, регіональна модель іоносфери, фази циклу сонячної активності

Представлены результаты экспериментальных исследований вариаций концентрации электронов в ионосфере по данным харьковского радара некогерентного рассеяния, полученных на фазах минимума (2006 – 2007 гг.) и максимума (2012 – 2013 гг.) цикла солнечной активности. Выполнен анализ и физическая интерпретация пространственно-временных зависимостей концентрации электронов. Представлены результаты моделирования суточных вариаций концентрации электронов в диапазоне высот 190 – 790 км в рамках развития региональной модели ионосферы CERIM ION.

Ключевые слова: концентрация электронов, региональная модель ионосферы, фазы цикла солнечной активности

Results of experimental investigations of variation of electron concentration in ionosphere on Kharkiv incoherent scatter radar data obtained during the phases of the minimum (2006 – 2007) and the maximum (2012 – 2013) of the solar activity cycle are presented. Analysis and physical interpretation of spatial-temporal dependencies of the electron concentration variations were carried out. Modeling results of the diurnal variations of the electron concentration in the altitude range 190 – 790 km in the frame of CERIM ION regional model of ionosphere development are presented.

Keywords: electron concentration, regional model of ionosphere, phases of solar activity cycle

Введение. Исследование вариаций основных параметров околоземного космоса является одной из важных фундаментальных задач современной геофизики.

В настоящее время исследованиям, анализу и моделированию параметров ионосферной плазмы в различных гелиогеофизических условиях посвящено довольно большое количество публикаций [см., например, 1 – 10, и ссылки в них]. Следует отметить, что особое внимание уделяется исследованию эффектов редких и уникальных событий в геокосмосе – сильнейших геокосмических бурь, затмений Солнца и др. [см., например, 11 – 14]. Однако изучение и физическая интерпретация поведения параметров геокосмической плазмы в магнитоспокойных условиях также не менее актуально, поскольку все возмущения разворачиваются на этом фоне. Полученные результаты также находят своё практическое применение, например, в развитии современных моделей ионосферы и построении новых эмпирических и полуэмпирических моделей геокосмоса.

Целью работы является анализ и физическая интерпретация пространственно-временных вариаций концентрации электронов в ионосфере на фазах минимума и максимума цикла солнечной активности в спокойных геомагнитных условиях, а также моделирование суточных вариаций концентрации электронов по данным харьковского радара некогерентного рассеяния (НР) в рамках развития региональной модели ионосферы CERIM ION.

Средства и методы. Радар некогерентного рассеяния. Радар НР Института ионосферы расположен вблизи г. Харькова (49.6° с.ш., 36.3° в.д.) и предназначен для исследования ионосферы в диапазоне высот 100 – 1500 км. Рабочая частота –

158 МГц. В качестве приемно-передающей антенны используется одна из наиболее крупных в мире двухзеркальная параболическая антенна зенитного излучения диаметром 100 м, выполненная по схеме Кассегрена. Эффективная площадь антенны – около 3700 м². Поляризация излучаемого и принимаемого сигнала – круговая. Импульсная мощность передатчика до 3,6 МВт. Работа радара НР проводилась в режиме составного двухчастотного зондирующего сигнала с коротким (130 мкс) и длинным (около 660 мкс) радиоимпульсами, обеспечивающими высотное разрешение 20 и 100 км в диапазонах высот 100 – 550 км и 200 – 1000 км соответственно. Частота повторения 24,4 Гц. Параметры ионосферы определяются одновременно для ряда высот ионосферы по квадратурным составляющим комплексной корреляционной функции НР сигнала.

Цифровой ионозонд. Совместно с радаром НР использовался цифровой ионозонд, расположенный в Радиофизической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина. Его основные параметры: диапазон частот 1 – 16 МГц, импульсная мощность до 1,5 кВт, длительность зондирующих радиоимпульсов 100 мкс, частота следования 125 Гц.

Погрешности определения параметров ионосферы: критической частоты f_oF2 – 0,05 МГц, концентрации электронов N и температур ионов T_i и электронов T_e – 1 – 10 %, скорости движения плазмы V_z – 1 – 30 м/с в диапазоне высот 200 – 600 км в зависимости от высоты, времени суток и фазы цикла солнечной активности.

Минимум солнечной активности. На рис. 1. представлены суточные вариации концентрации электронов N , в периоды, близкие к весеннему

© М. В. Ляшенко, И. Р. Шницар, 2017

равноденствию в 2006 – 2007 гг.

Для весеннего равноденствия 2006 г. (см. рис. 1, *a*) концентрация электронов испытывала значительные суточные вариации. На высотах $z \leq 240$ км в суточном ходе концентрации электронов наблюдалась протяженная область с наибольшими значениями N около 11 – 12 ЕЕТ. С увеличением высоты в суточном ходе N имела место тенденция к появлению вечернего максимума N около 20 – 21 ЕЕТ. Следует отметить, что на высотах $z \geq 290$ км величина вечернего максимума сравнима с величиной дневного максимума.

Около полудня на высотах $z = 210 - 240$ км абсолютные значения $N = 0,5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В ночные часы в этом диапазоне высот концентрация N принимала значение $(0,05 - 0,1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. На высоте 490 км $N = 0,1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ днем, в ночные часы $N = 0,04 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

На рис. 1, *б* представлены суточные вариации концентрации электронов в период весеннего равноденствия 2007 г. Как видно из рисунка, концентрация электронов испытывала значительные изменения в течение суток. На высотах 190 – 210 км в суточном ходе N имел место один хорошо выраженный максимум с максимальными значениями N близко полудня.

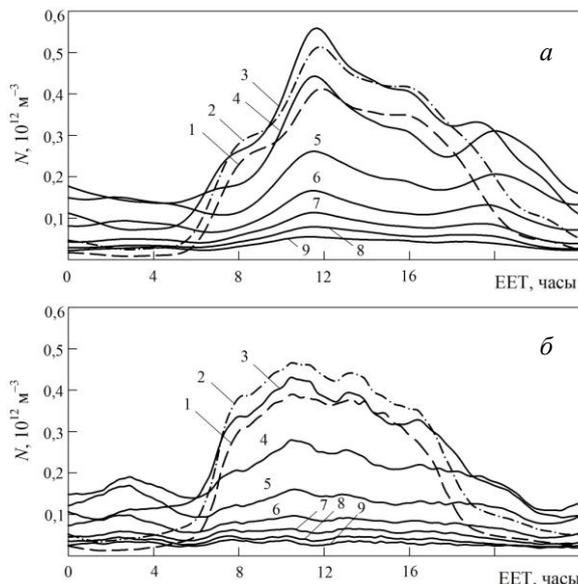


Рис. 1 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период весеннего равноденствия: *a* – 2006 г.; *б* – 2007 г. Здесь и далее на графиках цифрами обозначены высоты: 1 – 190 км; 2 – 210 км; 3 – 240 км; 4 – 290 км; 5 – 340 км; 6 – 410 км; 7 – 490 км; 8 – 580 км; 9 – 680 км

На больших высотах, где процессы переноса частиц и энергии преобладают над процессами фотохимии, в вариациях N имели место два максимума – околополуденный (11 – 12 ЕЕТ) и вечерний (19 – 20 ЕЕТ). Следует отметить, что на высотах $z > 410$ км амплитуда этих максимумов становится примерно одинаковой.

На высотах 290, 340 и 490 км в дневное время концентрация электронов $N = 3,1 \cdot 10^{11}$, $1,8 \cdot 10^{11}$ и $0,8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ соответственно. В ночных условиях для $z = 290$ км $N = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, для $z = 340$ км – $1,2 \cdot 10^{11}$ и $0,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ на высоте 490 км.

На рис. 2 представлены высотно-суточные вариации концентрации электронов в период летнего солнцестояния в 2006 – 2007 гг.

На рис. 2, *a* представлены вариации концентрации электронов в период летнего солнцестояния 2006 г.

Хорошо известно, что поведение концентрации электронов на высотах ниже максимума области F2 ионосферы определяется, в основном, величиной зенитного угла Солнца. В этом случае в суточном ходе N наблюдается один хорошо выраженный максимум в околополуденные часы. На высотах вблизи максимума ионизации в дневное время величина N достигала значений $0,6 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в околополуденные часы $N \approx (0,2 - 0,3) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Следует отметить, что суточных вариациях N на высотах $z > 240$ км имели место два явно выраженных максимума в полуденные и вечерние (21 – 22 ЕЕСТ) часы. Также в суточных вариациях N наблюдалось локальное увеличение концентрации электронов в околополуденные и послеполуденные часы. Данный эффект, по-видимому, связан с поступлением плазмы из плазмосферы и действием нейтральных ветров в ночные часы [1, 3].

Суточные вариации концентрации электронов в период летнего солнцестояния 2007 г. имели достаточно сложный характер (см. рис. 2, *б*). На высотах $z < 210$ км вариации N определялись, в основном, величиной зенитного угла Солнца. В этом случае, в суточном ходе N имел место максимум в околополуденные часы с дальнейшим уменьшением концентрации электронов в вечерние и ночные часы.

С ростом высоты в суточном ходе N имели место два максимума – в околополуденные часы и в вечернее время (около 22 ЕЕСТ). Следует отметить, что по амплитуде вечерний максимум превышает дневной.

В дневные часы на высотах $z = 290, 340$ и 490 км концентрация N достигала величин $2,3 \cdot 10^{11}$, $1,7 \cdot 10^{11}$ и $0,8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ соответственно. Ночью на этих же высотах $N \approx 2,4 \cdot 10^{11}$, $1,7 \cdot 10^{11}$ и $0,4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

На рис. 3 представлены высотно-суточные вариации концентрации электронов в период осеннего равноденствия в 2006 – 2007 гг.

В период осеннего равноденствия 2006 г. концентрация электронов также испытывала значительные вариации в течение суток (рис. 3, *a*). Как и для весеннего равноденствия и летнего солнцестояния 2006 г. на высотах 210 – 240 км поведение N контролируется зенитным углом Солнца. Выше максимума ионизации основную роль в формировании области F ионосферы играют процессы переноса частиц и энергии.

На высотах максимума области F2 ионосферы в дневные часы N достигала значений $(0,45 - 0,55) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, ночью (около 00 EEST) $N = (0,05 - 0,1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

На рис. 3, б приведены суточные вариации концентрации электронов в период осеннего равноденствия 2007 г. Данный период (24 – 27 сентября 2007 г.) характеризовался низкой солнечной и геомагнитной активностью. Индекс солнечной активности $F_{10,7}$ не превышал 66 – 67 единиц. Индекс геомагнитной активности варьировался в диапазоне 3 – 15 единиц.

Суточные вариации концентрации электронов в рассматриваемый период имели достаточно сложный вид. Как и для других сезонов, на высотах ниже 210 км вариации N в рассматриваемый период определялись вариациями зенитного угла Солнца. Максимальные значения N приходились на 12 – 13 EEST. С ростом высоты в вариациях N наряду с околополуденным максимумом имеет место вечерний максимум (20 – 21 EEST). Также в ночное время наблюдалось локальное увеличение концентрации электронов, связанное с потоками плазмы с плазмосферы в ионосферу.

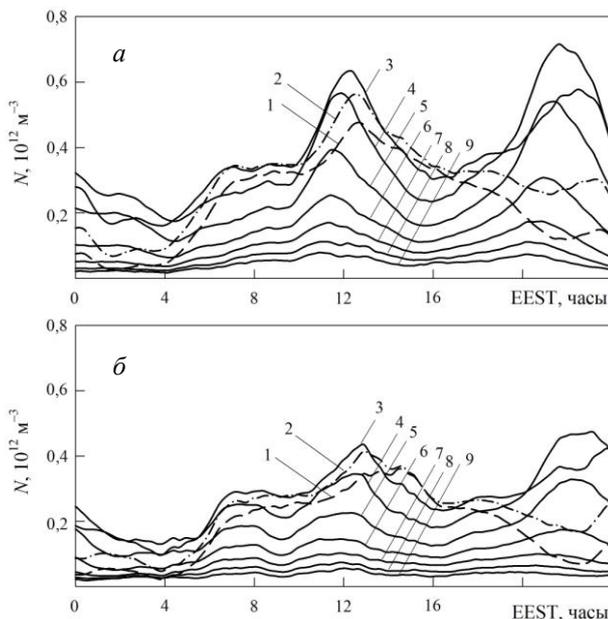


Рис. 2 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период летнего солнцестояния: а – 2006 г.; б – 2007 г.

Хорошо известным фактом в периоды равноденствия является переход от летнего типа суточных вариаций N к зимнему и наоборот. Как правило, такая перестройка продолжается около двух недель.

Как видно из рисунка, для осеннего равноденствия 2007 г., такой переход к зимнему типу суточных вариаций N еще не произошел. На этот факт указывает появление второго максимума в вечерние часы, что характерно для летних условий.

В околополуденные часы на высотах $z = 290, 340$ и 490 км концентрация $N = 3,4 \cdot 10^{11}, 2,1 \cdot 10^{11}$ и $0,8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ соответственно. В ночных условиях на рассматриваемых высотах $N = 2,5 \cdot 10^{11}, 1,9 \cdot 10^{11}$ и $0,6 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ соответственно.

На рис. 4, а представлены временные вариации концентрации электронов в период зимнего солнцестояния 2006 г.

На высотах 210 и 240 км концентрация N в околополуденные часы достигала значений $(0,5 - 0,6) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночное время $N \approx (0,15 - 0,4) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. На высоте $z = 490$ км $N \approx 0,15 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ вблизи полудня, ночью концентрация электронов уменьшалась до значений $0,06 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Днём на высотах 210 и 240 км концентрация электронов достигала значений примерно $(0,4 - 0,45) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в околополуденные часы $N \approx (0,05 - 0,1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ и $(0,1 - 0,2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ для высот 210 и 240 км соответственно. На высоте $z = 490$ км N не превышала значений $0,07 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ вблизи полудня и $0,03 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ в ночное время.

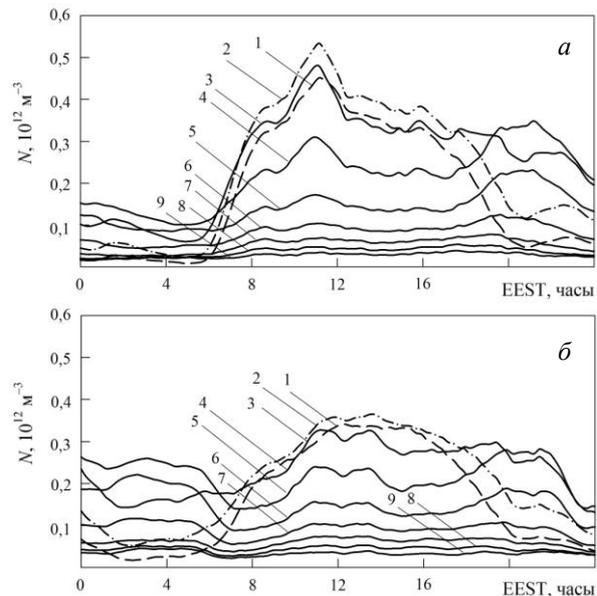


Рис. 3 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период осеннего равноденствия: а – 2006 г.; б – 2007 г.

Для 21 декабря 2006 г. на высотах 210 – 240 км в околополуденные часы N составляла примерно $0,5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночные часы значения N на этих же высотах были на порядок меньше и не превышали $0,05 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. На высоте 490 км $N \approx 0,07 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ в дневные часы, ночью N не превышала $0,05 - 0,06 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Следует отметить, что для 20 декабря на высотах 210 – 240 км значения N были примерно на 15 – 20 % больше значений 21 декабря в околополуденные часы.

На рис. 4, б представлены суточные вариации концентрации электронов на фиксированных высотах в период, близкий к зимнему солнцестоянию 2007 г.

Поведение концентрации электронов в рассматриваемый период является типичным для зимнего сезона. Так, на всех высотах около полудня часа имел место один, хорошо выраженный максимум со значениями $N = 4,5 \cdot 10^{11}$ и $3,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ на высотах 210 и 240 км соответственно, в ночные часы на этих же высотах $N = 0,8 \cdot 10^{11}$ и $1,3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. На высоте $z = 490$ км днем $N = 0,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, ночью – $0,4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

Следует также отметить появление локальных максимумов в суточных вариациях N после полуночи на высотах в области F2 ионосферы. Значение N в этих случаях могут превышать величину концентрации электронов в дневные часы.

Максимум солнечной активности. Рассмотрим высотно-суточные вариации концентрации электронов в ионосфере, которые наблюдались с помощью радара НР в Харькове в периоды, близкие к весеннему и осеннему равноденствиям, летнему и зимнему солнцестояниям в 2012 – 2013 гг. Рассматриваемый временной период соответствует фазе максимума 24-го цикла солнечной активности.

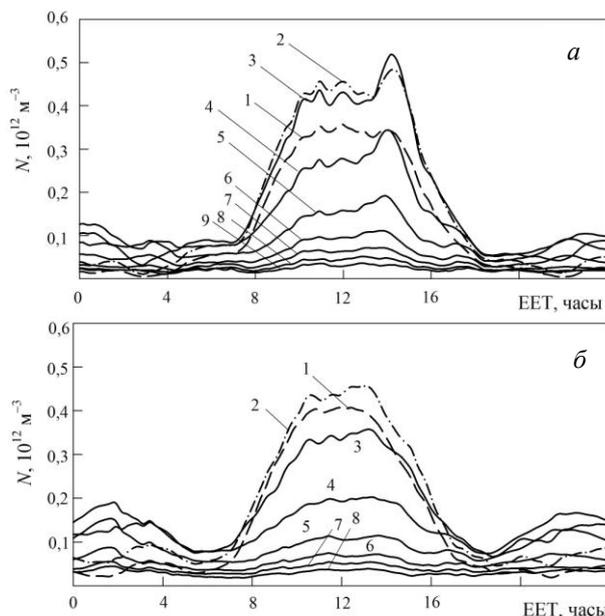


Рис. 4 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период зимнего солнцестояния: а – 2006 г.; б – 2007 г.

На рис. 5, а представлены суточные вариации концентрации электронов для 28 марта 2012 г. в диапазоне высот 190 – 680 км. Как видно из рисунка, в диапазоне высот 190 – 210 км в суточных зависимостях N имел место один максимум в 14 EET. С ростом высоты вариации N приобретали сложный характер. Так, в суточном ходе концентрации электронов появлялся второй максимум в окрестности 19 – 20 EET, а также имело место увеличение концентрации электронов после полуночи, связанное с потоками частиц, поступающих в ионосферу в месте наблюдения из магнитосопряженной области.

Около полудня на высотах 210 и 410 км

абсолютные значения концентрации электронов составляли $0,46 \cdot 10^{12}$ и $0,26 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ соответственно. В ночные часы на высоте $z = 210$ км концентрация N принимала значения примерно $0,096 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, а на высоте $z = 410$ км $N = 0,085 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

На рис. 5, б приведены временные вариации N для 20 марта 2013 г. Форма суточных зависимостей N для данного периода подобная для весеннего равноденствия 2012 г. На высотах 190 и 210 км имел место довольно пологий максимум около полудня. Далее, с ростом высоты в суточных вариациях появлялись четко выраженные максимумы в вечерние часы (19 – 20 EET).

В околополуденные часы на высотах $z = 210$ и 240 км концентрация N достигает значений $0,63 \cdot 10^{12}$ и $0,31 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ соответственно. В околополуночные часы $N \approx 0,093 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ на высоте 210 км, а на $z = 410$ км концентрация электронов $N \approx 0,15 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

На рис. 6 представлены суточные вариации параметров ионосферы для периодов, близких к периоду летнего солнцестояния в 2012 – 2013 гг.

Для периода летнего солнцестояния 2012 г. (см. рис. 6, а) вариации концентрации электронов всем рассматриваемом высотном диапазоне имели довольно сложный характер. На высотах 190 – 210 км, в суточных вариациях N два хорошо выраженных максимума – утренний (08 EEST) и послеполуденный (15 – 16 EEST). С ростом высоты амплитуда данных максимумов увеличивается и в суточном ходе концентрации электронов появляется еще один максимум около 20 – 21 EEST. Причем следует отметить, что амплитуда этого максимума более амплитуды утреннего и вечернего максимумов.

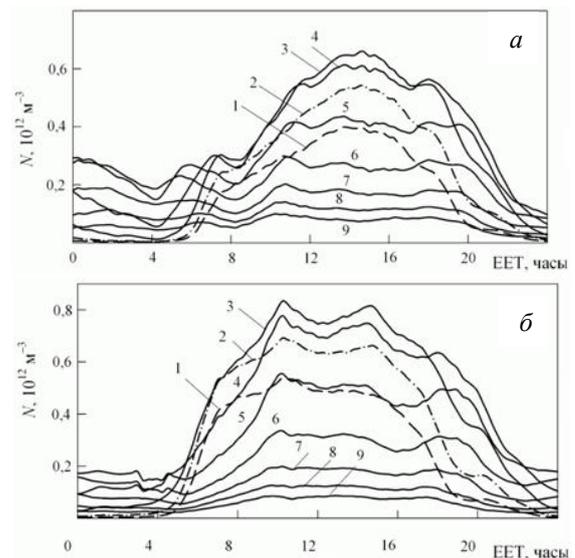


Рис. 5 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период весеннего равноденствия: а – 2012 г.; б – 2013 г.

На высоте 210 км в околополуденные часы $N = 0,38 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, ночью на рассматриваемой высоте $N = 0,078 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. На высоте $z = 410$ км $N = 0,03 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ в 12 EEST, в ночных условиях значение концентрации

електронов на данній висоті не перевищали $0,31 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

На рис. 6, б представлені суточні варіації концентрації електронів в період летнього сонцестояння в 2013 г.

Варіації N в період летнього сонцестояння 2013 г. подібні варіації концентрації електронів в 2012 г. Також, суточні залежності N мали достатньо складний характер. В діапазоні висот 190 – 210 км в суточному ході концентрації електронів мали місце утренній (08 – 09 EEST) і післяполуденний (15 – 16 EEST) максимуми. С ростом висоти форма суточних варіацій концентрації електронів ускладнювалась. Також як і для летнього періода 2012 г., спостерігався вечірній максимум приблизно в 21 – 22 EEST.

В денні години на висотах $z = 210$ і 410 км концентрація електронів досягала значень $0,32 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Около полудня на $z = 210$ км $N = 0,05 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ і $N = 0,38 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ на висоті 410 км.

На рис. 7 приведені суточні варіації параметрів іоносфери періода, близького к осінньому рівноденствію в 2012 – 2013 гг.

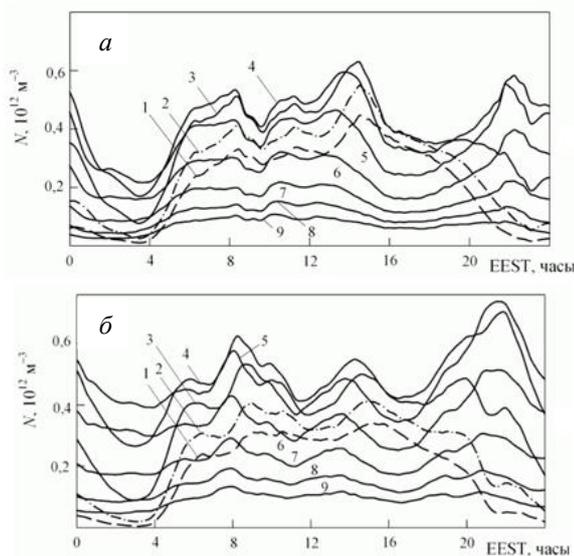


Рис. 6 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период летнего солнцестояния: а – 2012 г.; б – 2013 г.

На рис. 7, а представлены суточные вариации концентрации электронов в период, близкий к осінньому рівноденствію 2012 г. На висотах 190 – 210 км форма суточних варіацій N подібна. Как видно из рисунка, на указанных высотах в суточном ходе N имел место один максимум около полудня (11 – 12 EEST). С ростом высоты наблюдается искажение существующей формы суточного хода и небольшой рост концентрации электронов примерно в 17 – 16 EEST, а также появление вечернего максимума на больших высотах (около 20 – 21 EEST).

На высотах 240 и 410 км в денні години $N = 0,93 \cdot 10^{12}$ и $0,53 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ соответственно.

В околополуденные часы на рассматриваемых высотах концентрация электронов достигала значений $0,013 \cdot 10^{12}$ и $0,25 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Варіації концентрації електронів в період осіннього рівноденствія 2013 г. представлені на рис. 7, б.

Как видно из рисунка, в суточном ходе концентрации электронов имел место один максимум около полудня на высотах 190 и 210 км. На больших высотах наблюдалось смещение этого максимума на более поздние часы (15 – 16 EEST). Также следует отметить локальное увеличение концентрации электронов на высотах 240 – 340 км в ночные часы (около 02 EEST). По сравнению с 2012 г. концентрация электронов в 2013 г. уменьшилась, что связано с уменьшением интенсивности ионизирующего излучения Солнца и переходом в фазу спада солнечной активности. Так, на высоте 210 км в денні години N уменьшилась примерно на 30 и 47% на высоте 210 и 410 км соответственно по сравнению с периодом осіннього рівноденствія в 2012 г.

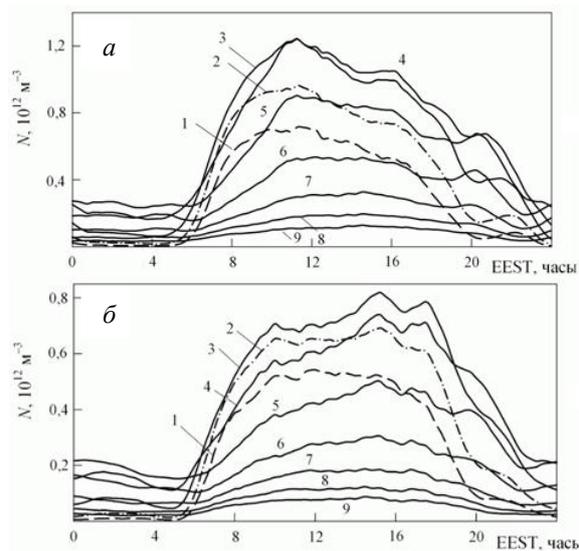


Рис. 7 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период осеннего равноденствия: а – 2012 г.; б – 2013 г.

На высотах $z = 210$ и 410 км в околополуденные часы концентрация электронов в ионосфере достигала значений $0,65 \cdot 10^{12}$ и $0,28 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ соответственно. В околополуденные часы $N = 0,04 \cdot 10^{12}$ и $0,13 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ соответственно на высоте 210 и 410 км.

На рис. 8 приведены временные вариации параметров ионосфери в период, близкий к зимнему солнцестоянию в 2012 – 2013 гг.

На рис. 8, а представлены высотно-суточные зависимости концентрации электронов для 19 декабря 2012 г. Как видно из рисунка, в суточном ходе N практически во всем рассматриваемом диапазоне высот наблюдался один максимум около полудня, с последующим уменьшением концентрации

электронов в вечерние часы и локальным увеличением N около 14 – 15 ЕЕТ.

Также в суточных зависимостях N после полночи имело место локальное повышение концентрации электронов, связанное с потоками частиц, поступающих из плазмосферы в ионосферу.

Днем на высоте $z = 210$ км концентрация электронов не превышала значений $0,61 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночные часы $N = 0,036 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Как видно из рис. 8, *a* в дневные часы на высоте $z = 410$ км $N = 0,13 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В ночное время концентрация электронов на данной высоте достигала значений примерно $0,1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

На рис. 8, *б* представлены суточные вариации концентрации электронов в период зимнего солнцестояния в 2013 г. Как и для периода зимнего солнцестояния 2012 г., в суточных вариациях N в декабре 2013 г. имел место один максимум примерно в 11 – 12 ЕЕТ. Далее концентрация электронов уменьшалась до фоновых ночных значений. Также как и в декабре 2012 г., после полуночи наблюдалось локальное увеличение N .

В дневные часы на высоте 210 км $N = 0,91 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночных условиях N не превышала значений $0,02 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ на рассматриваемой высоте. На высоте 410 км в дневные часы концентрация достигала значений $N = 0,27 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, после полуночи $N = 0,07 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

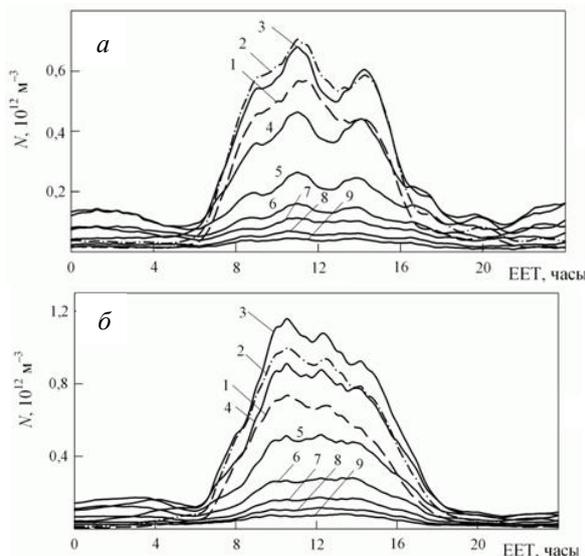


Рис. 8 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период зимнего солнцестояния: *a* – 2012 г.; *б* – 2013 г.

Построение модельных высотно-суточных зависимостей концентрации электронов. Для получения модельных зависимостей концентрации электронов использованы экспериментальные данные, полученные на радаре НР в Харькове в период с 2006 по 2013 гг. Суточные хода концентрации электронов в диапазоне высот 190 – 790 км группировались по сезонам и уровню солнечной активности и далее усреднялись. Усредненные суточные зависимости N

на соответствующих высотах пересчитывались в отн. ед. с помощью следующего выражения:

$$K(t) = [N(t) - N(0)] / [N(12) - N(0)], \quad (1)$$

где $K(t)$ – коэффициент пересчета; $N(t)$ – концентрация электронов в конкретное время суток; $N(0)$ – концентрация электронов в полночь; $N(12)$ – концентрация электронов в полдень.

Из полученных высотно-суточных зависимостей $K(t)$ получали модельные высотные профили концентрации электронов для 00 и 12 часов в отн. ед. На рис. 9 представлен пример высотных профилей N в полдень и полночь для весеннего равноденствия в максимуме СА.

В результате для расчета высотно-суточных зависимостей концентрации электронов формируются два входных массива: 1) высотные профили N в отн. ед. для 00 и 12 часов для максимума и минимума солнечной активности и характерных геофизических периодов (равноденствий и солнцестояний); 2) суточные хода N в отн. ед. в диапазоне высот 190 – 790 км.

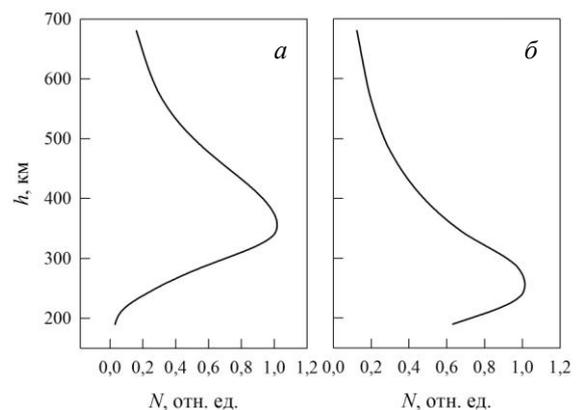


Рис. 9 – Высотные профили концентрации электронов в отн. ед. в период весеннего равноденствия в максимуме солнечной активности для: *a* – полуночи; *б* – полдня

Результаты моделирования пространственно-временных вариаций концентрации электронов. Региональная модель ионосферы CERIM ПОН позволяет рассчитывать значения концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы $NmF2$ для разных сезонов и конкретного значения индекса солнечной активности $F_{10,7}$ для 00 и 12 часов [15 – 17]. Для восстановления высотных профилей концентрации электронов, полученных выше, использовались значения $NmF2$, рассчитанные по модели CERIM ПОН. Для рассмотренных сезонов и фаз цикла солнечной активности получены соответствующие высотные зависимости N в абс. ед.

Далее, используя полученные высотные профили и массив модельных суточных зависимостей концентрации электронов в отн. ед., проводился пересчет уже суточных вариаций N в диапазоне высот 190 – 790 км в абс. ед. Пересчет концентрации из отн.

ед. в абс. ед. осуществлялся с использованием следующего выражения:

$$N(t) = N(0) + [N(12) - N(0)] \cdot K(t),$$

где $N(0)$ и $N(12)$ – концентрация электронов в 00 и 12 часов на соответствующей высоте, полученная из модельного высотного профиля N ; $K(t)$ – коэффициент пересчета в отн. ед. из (1) на соответствующей высоте.

На рис. 10 приведен пример восстановленного высотного профиля концентрации электронов в абсолютных единицах в период, близкий к весеннему равноденствию в максимуме солнечной активности для 09 и 15 часов.

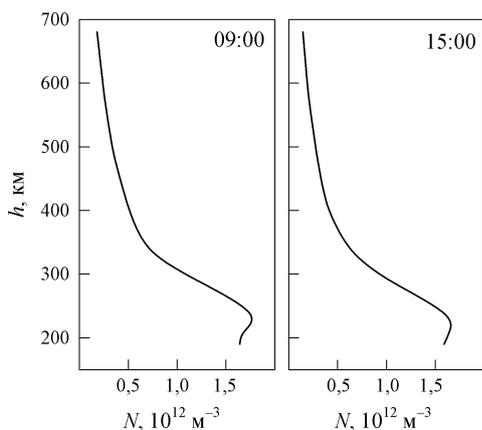


Рис. 10 – Высотные профили концентрации электронов в период весеннего равноденствия в максимуме солнечной активности, рассчитанные по модели CERIM ИОН

На рис. 11 приведен пример расчета суточного хода концентрации электронов на высотах 210 и 490 км для характерных геофизических периодов в максимуме и минимуме солнечной активности.

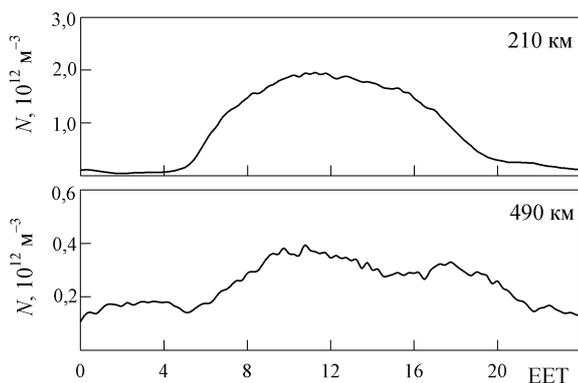


Рис. 11 – Модельные суточные зависимости концентрации электронов для периода весеннего равноденствия в максимуме CA, рассчитанные по модели CERIM ИОН

Выводы. В работе проанализированы вариации концентрации электронов в максимуме и минимуме

солнечной активности для характерных геофизических периодов. В ходе анализа выявлены основные закономерности в поведении концентрации заряженных частиц в области F2 ионосферы на экстремальных фазах цикла солнечной активности. Рассмотренные экспериментальные суточные зависимости концентрации электронов в диапазоне высот 190 – 790 км можно использовать для получения усредненных суточных ходов для дальнейшего развития региональной модели ионосферы CERIM ИОН. Подход, который применяется для моделирования суточных ходов концентрации электронов, себя полностью оправдывает и полученные результаты модельных расчетов свидетельствуют о том, что региональная модель ионосферы CERIM ИОН достаточно адекватно восстанавливает пространственно-временную структуру концентрации частиц в ионосфере в широком диапазоне высот. Модельные зависимости имеют типичные формы суточных вариаций концентрации электронов на соответствующих высотах. Модельные вариации концентрации частиц также отражают сезонные особенности и зависимость от уровня солнечной активности. Однако, несмотря на достаточно оптимистичные результаты, необходимо дальнейшее накопление экспериментального материала, который будет использован для развития и улучшения региональной модели ионосферы CERIM ИОН.

Список литературы

1. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
2. Champion K. S. W. Dynamics and structure of the quiet thermosphere / K. S. W. Champion // J. Atmos. Terr. Phys. – 1975. – vol. 37, no. 6/7. – P. 915–926.
3. Schunk R. W. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry / R. W. Schunk, A. F. Nagy.–Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p.
4. Chernogor L. F. Observation results of the ionospheric processes over Ukraine in 2012–2014 / L. F. Chernogor, I. F. Dominin, L. Ya. Emelyanov, S. V. Katsko, D. V. Kotov, M. V. Lyashenko, S. V. Panasenko // Space research in Ukraine. 2012–2014 / Ed. O. Fedorov. – K.: Akadempriodyka, 2014. – P. 20 – 27.
5. Chernogor L. Results of observations of ionospheric processes over Ukraine in 2014 – 2016 / L. Chernogor, I. Dominin, L. Emelyanov, S. Katsko, D. Kotov, M. Lyashenko, S. Panasenko // Space research in Ukraine. 2014 – 2016 / Ed. O. Fedorov. – K.: Akadempriodyka, 2016. – 136 p.
6. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer / H. Rishbeth // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 1998. – vol. 60. – P. 1385–1402.
7. Rishbeth H. Why is there more ionosphere in January than in July? The annual asymmetry in the F2-layer / H. Rishbeth, I. C. F. Müller-Wodarg // Ann. Geophysicae. – 2006. – vol. 24. – P. 3293–3311.
8. Burmaka V. Regular and irregular processes in the Ionosphere over Ukraine / V. Burmaka, L. Chernogor, I. Dominin, E. Grigorenko, M. Lyashenko // Space Research in Ukraine 2008 – 2010 / The Report to the COSPAR. Kyiv, 2011. – P. 22 – 30.
9. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 / D. Bilitza // Radio Science. – 2001. – vol. 36, no. 2. – P. 261–275.
10. Virtual Ionosphere, Thermosphere, Mesosphere Observatory (VITMO). International Reference Ionosphere – IRI-2012. Режим доступа: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html. Дата обращения: 10.10.2017.

11. *Immel T. J.* The August 2011 URSI World Day campaign: Initial results / *T. J. Immel, G. Liu, S. L. England, L. P. Goncharenko, P. J. Erickson, M. V. Lyashenko, M. Milla, J. Chau, H. U. Frey, S. B. Mende, Q. Zhou, A. Stromme, L. J. Paxton* // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2015. – vol. 134. – P. 47–55. – doi: 10.1016/j.jastp.2015.09.005.
12. *Chernogor L. F.* Effects in the geospace during partial solar eclipses over Kharkiv / *L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, M. V. Lyashenko* // *International Journal of Remote Sensing.* – 2011. – vol. 32, № 11. – P. 3219–3229.
13. *Domnin I. F.* Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations / *I. F. Domnin, L. Ya. Yemelyanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor* // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2013. – vol. 53, No. 1. – P. 113–123. – doi: 10.1134/S0016793213010076.
14. *Domnin I. F.* Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: observation and simulation results / *I. F. Domnin, L. Ya. Emelyanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor* // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2014. – vol. 54, № 5. – P. 583 – 592. – doi: 10.1134/S0016793214040112.
15. *Chernogor L. F.* Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) Based On The Kharkov Incoherent Scatter Radar Database / *L. F. Chernogor, L. Ya. Emel'yanov, M. V. Lyashenko* // 36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods.– Kyiv (17 – 22 August, 2009). – P. 38.
16. *Chernogor L.* Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) for Space Weather Forecasting / *L. Chernogor, I. Domnin, M. Lyashenko* // EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 02–07 May 2010). Geophysical Research Abstract.–Vol. 12, EGU2010-316-2, 2010.
17. *Дзюбанов Д. А.* Моделирование полуденных значений электронной концентрации в максимуме области F2 ионосферы по данным Харьковского радара некогерентного рассеяния / *Д. А. Дзюбанов, И. Г. Захаров, М. В. Ляшенко* // *Космічна наука і технологія.* – 2004. – Т. 10, № 2/3. – С. 28–35.
7. *Rishbeth H., Müller-Wodarg I. C. F.* Why is there more ionosphere in January than in July? The annual asymmetry in the F2-layer. *Ann. Geophysicae.* 2006, vol. 24, pp. 3293–3311.
8. *Burmaka V., Chernogor L., Domnin I., Grigorenko E., Lyashenko M.* Regular and irregular processes in the Ionosphere over Ukraine // *Space Research in Ukraine 2008 – 2010 / The Report to the COSPAR.* Kyiv, 2011, pp. 22 – 30.
9. *Bilitza D.* International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science.* 2001, vol. 36, no. 2, pp. 261–275.
10. *Virtual Ionosphere, Thermosphere, Mesosphere Observatory (VITMO).* International Reference Ionosphere – IRI-2012. Available at: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html. (accessed 10.10.2017).
11. *Immel T. J., Liu G., England S. L., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Lyashenko M. V., Milla M., Chau J., Frey H. U., Mende S. B., Zhou Q., Stromme A., Paxton L. J.* The August 2011 URSI World Day campaign: Initial results. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015, vol. 134, pp. 47–55, doi: 10.1016/j.jastp.2015.09.005.
12. *Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lyashenko M. V.* Effects in the geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *International Journal of Remote Sensing.* 2011, vol. 32, no. 11, pp. 3219–3229.
13. *Domnin I. F., Yemelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F.* Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, no. 1, pp. 113–123, doi: 10.1134/S0016793213010076.
14. *Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F.* Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: observation and simulation results. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014, vol. 54, no. 5, pp. 583–592, doi: 10.1134/S0016793214040112.
15. *Chernogor L. F., Emel'yanov L. Ya., Lyashenko M. V.* Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) Based On The Kharkov Incoherent Scatter Radar Database // 36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods.– Kyiv (17 – 22 August, 2009). – P. 38.
16. *Chernogor L., Domnin I., Lyashenko M.* Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) for Space Weather Forecasting // EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 02–07 May 2010). Geophysical Research Abstract.–Vol. 12, EGU2010-316-2, 2010.
17. *Dzjubanov D. A., Zaharov I. G., Lyashenko M. V.* Modelirovanie poludennykh znachenij jelektronnoj koncentracii v maksimume oblasti F2 ionosfery po dannym Har'kovskogo radara nekogerentnogo rassejaniya [Modeling midday values of the electron density at the maximum of the F2 region of the ionosphere according to the Kharkov incoherent scatter radar]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space science and technology]. 2004, vol. 10, no. 2/3, pp. 28–35.

References (transliterated)

1. *Brjunelli B. E., Namgaladze A. A.* *Fizika ionosfery* [Physics of ionosphere]. M.: Nauka, 1988, 528 p.
2. *Champion K. S. W.* Dynamics and structure of the quiet thermosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1975. – vol. 37, No. 6/7. – P. 915–926.
3. *Schunk R. W., Nagy A. F.* *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry.* Cambridge atmospheric and space science series, 2000, 555 p.
4. *Chernogor L. F., Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Katsko S. V., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Panasenko S. V.* Observation results of the ionospheric processes over Ukraine in 2012–2014 // *Space research in Ukraine. 2012–2014* / Ed. O. Fedorov. K.: Akadempriodyka, 2014, pp. 20 – 27.
5. *Chernogor L., Domnin I., Emelyanov L., Katsko S., Kotov D., Lyashenko M., Panasenko S.* Results of observations of ionospheric processes over Ukraine in 2014 – 2016 // *Space research in Ukraine. 2014 – 2016* / Ed. O. Fedorov. K.: Akadempriodyka, 2016, 136 p.
6. *Rishbeth H.* How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer / *H. Rishbeth.* *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1998, vol. 60, pp. 1385–1402.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Просторово-часові варіації концентрації електронів в іоносфері в мінімумі та максимумі сонячної активності / М. В. Ляшенко, І. Р. Шніцар // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 24 – 32. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2078-9998.

Пространственно-временные вариации концентрации электронов в ионосфере в минимуме и максимуме солнечной активности / М. В. Ляшенко, И. Р. Шницар // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 24 – 32. – Библиогр.: 17 назв. – ISSN 2078-9998.

The spatial-temporal variations of the electron concentration in ionosphere in minimum and maximum of solar activity / M. V. Lyashenko, I. R. Shnitsar // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 47 (1268). – P. 24 – 32. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2078-9998.

Поступила (received) 15.09.2017

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ляшенко Михайло Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, учений секретар Інституту іоносфери НАН та МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ua.ru.

Ляшенко Михаил Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, учений секретарь Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ua.ru.

Lyashenko Mykhaylo Volodymyrovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, scientific secretary of Institute of ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ua.ru.

Шницар Ігор Романович – інженер-електронік 1 категорії Інституту іоносфери НАН та МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: ishnicar1@gmail.com.

Шницар Игорь Романович – инженер-электроник 1 категории Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: ishnicar1@gmail.com.

Shnitsar Igor Romanovych – engineer-electronic of the 1st category of Institute of ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (057) 706-22-87; e-mail: ishnicar1@gmail.com.

УДК 550.388.2

С. В. ГРИНЧЕНКО

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ КВАЗИРАВНОВЕСНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА ПРИ ТЕОРЕТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ F2-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Представлено результати теоретичного моделювання висотного профілю електронної концентрації області F2 середньширокої магнітоспокоїної іоносфери у полуденний і опівнічний час. Розв'язок лінійного диференціального рівняння неперервності іонів атомарного кисню шукається у вигляді добутку двох функцій. Скориговано швидкості іонно-молекулярних реакцій. Обґрунтовано наближення дивергенції вектора потоку іоносферної плазми у вигляді частинної похідної по висоті. Дано оцінку вкладу радіальної складової електричного дрейфу до сумарної величини швидкості руху плазми.

Ключові слова: теоретичне моделювання іоносфери, рівняння неперервності, амбіполярна дифузія, нейтральний вітер, електричний дрейф.

Представлены результаты теоретического моделирования высотного профиля электронной концентрации области F2 среднеширотной магнитоспокойной ионосферы в полуденное и полночное время. Решение линейного дифференциального уравнения непрерывности ионов атомарного кислорода ищется в виде произведения двух функций. Скорректированы скорости ионно-молекулярных реакций. Обосновано приближение дивергенции вектора потока ионосферной плазмы в виде частной производной по высоте. Дана оценка вклада радиальной составляющей электрического дрейфа в суммарную величину скорости движения плазмы.

Ключевые слова: теоретическое моделирование ионосферы, уравнение непрерывности, амбиополярная диффузия, нейтральный ветер, электрический дрейф.

The results of theoretical simulation of the electron density altitude profile of the mid-latitude magnetically quiet F2 region at midday and midnight are presented. The solution of the linear differential equation of atomic oxygen ions continuity is searched in the form of product of two functions. The rates of ion-molecular reactions are corrected. The approximation of divergence of the ionospheric plasma flux in the form of a partial derivative with respect to altitude is substantiated. The contribution of the radial component of the electric drift to the total velocity of the plasma motion is estimated.

Keywords: theoretical simulation of ionosphere, continuity equation, ambipolar diffusion, neutral wind, electric drift.

Введение. Теоретическое моделирование предполагает расчёт физических параметров ионосферы (концентрации электронов, скорости движения плазмы, температур ионов и электронов, ионного состава) на основе решения соответствующих уравнений ионосферной теории. Только с появлением эмпирических моделей состава, температуры и ветров нейтральной атмосферы, данных о константах реакций, ионизационных свойствах молекул атмосферы стало возможным с 70-х годов расчёты на вычислительных средствах параметров ионосферы.

Новизна работы. Несмотря на множество печатных работ, посвящённых теоретическому моделированию параметров F2-области (например, [1 – 13, 16 – 17]), в них опускаются математические и численные методы решения ионосферных уравнений. Новизна предлагаемой работы как раз и заключается в описании процедуры решения уравнения непрерывности ионосферной плазмы на основе известных методов теории дифференциальных уравнений и численных методов.

Пороговые значения энергии ионизации нейтральных компонент области F2. Днём основным источником ионообразования служит солнечное экстремальное ультрафиолетовое излучение (extreme ultraviolet, EUV, XUV) [4]. Длина волны излучения в диапазоне EUV изменяется от 121 до 10 нм. Энергия фотона $\varepsilon = h\nu = \frac{h}{T} = \frac{hc}{\lambda}$. Здесь

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; $c = 3,00 \cdot 10^8$ м/с. Если значение длины волны λ подставлять в формулу в нанометрах, то формула для расчёта энергии фотона ε в электрон-

вольтах имеет вид: $\varepsilon = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,00 \cdot 10^8}{\lambda \cdot 10^{-8} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19}} = \frac{1243}{\lambda}$.

Диапазон значений энергии фотонов в диапазоне EUV составляет 10,3–124 эВ.

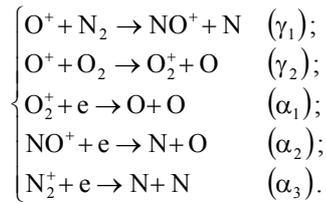
Ионизация происходит по схеме: $X + h\nu \rightarrow X^+ + e$. Основными нейтральными компонентами в интервале высот F2-области являются O, O₂, N₂ [4, 5, 6]. Наименьшую энергию ионизации имеет молекулярный кислород: $\varepsilon(O_2) = 12,08$ эВ. Это значение энергии кванта определяет верхнюю границу длины волны ионизирующего излучения, равную $\lambda(O_2) = 102,7$ нм. Энергия ионизации атомарного кислорода $\varepsilon(O) = 13,6$ эВ, а соответствующее значение ионизирующего излучения $\lambda(O) = 91,1$ нм. Для молекулярного азота – $\varepsilon(N_2) = 15,6$ эВ, $\lambda(N_2) = 79,6$ нм.

Процессы ионизации и рекомбинации в области F2. Ионно-молекулярные реакции. Уравнения баланса реакций. При ионизации нейтральных составляющих O, O₂, N₂ образуются первичные ионы O⁺, O₂⁺, N₂⁺:

$$\begin{cases} O + h\nu \rightarrow O^+ + e; \\ O_2 + h\nu \rightarrow O_2^+ + e; \\ N_2 + h\nu \rightarrow N_2^+ + e. \end{cases}$$

Эти ионы вступают в ионно-молекулярные реакции с нейтральными составляющими, а также в реакции прямой рекомбинации. Основными реакциями считаются следующие [5, 6, 7]:

© С. В. Гринченко, 2017



В приведенных реакциях участвуют ионы O^+ , O_2^+ , N_2^+ и NO^+ . Для ионов O_2^+ , N_2^+ , NO^+ , восстанавливающихся прямой рекомбинацией, считается выполненным условие фотохимического равновесия, когда скорость ионообразования под действием EUV уравновешена скоростью рекомбинации, имеющей химическую природу:

$$\begin{cases} q(O_2^+) = L(O_2^+); \\ q(N_2^+) = L(N_2^+); \\ q(NO^+) = L(NO^+). \end{cases}$$

Скорости ионообразования и рекомбинации измеряются в $\frac{1}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$. Для ионов O^+ , восстанавливающихся через превращение в другие ионы, $q(O^+) \neq L(O^+)$. Из баланса приведенных реакций получаем:

$$\begin{cases} L(O_2^+) = \alpha_1[e][O_2^+] - \gamma_2[O^+][O_2] = q(O_2^+); \\ L(N_2^+) = \alpha_3[e][N_2^+] = q(N_2^+); \\ L(NO^+) = \alpha_2[e][NO^+] - \gamma_1[O^+][N_2] = q(NO^+) = 0. \end{cases}$$

Из условия квазинейтральности ионосферной плазмы имеем: $[e] = [O^+] + [O_2^+] + [N_2^+] + [NO^+]$.

Имеем четыре уравнения с пятью неизвестными $[e]$, $[O^+]$, $[O_2^+]$, $[N_2^+]$, $[NO^+]$. Выразим $[e]$ через $[O^+]$.

Из уравнений баланса ионов $[O_2^+]$, $[N_2^+]$, $[NO^+]$ следует, что:

$$[O_2^+] = \frac{q(O_2^+) + \gamma_2[O^+][O_2]}{\alpha_1[e]},$$

$$[N_2^+] = \frac{q(N_2^+)}{\alpha_3[e]},$$

$$[NO^+] = \frac{\gamma_1[O^+][N_2]}{\alpha_2[e]}.$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } [e] &= [O^+] + [O_2^+] + [N_2^+] + [NO^+] = \\ &= [O^+] + \frac{q(O_2^+) + \gamma_2[O^+][O_2]}{\alpha_1[e]} + \frac{q(N_2^+)}{\alpha_3[e]} + \frac{\gamma_1[O^+][N_2]}{\alpha_2[e]}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [e]^2 - [O^+][e] - \frac{q(O_2^+) + \gamma_2[O^+][O_2]}{\alpha_1} - \frac{q(N_2^+)}{\alpha_3} - \\ - \frac{\gamma_1[O^+][N_2]}{\alpha_2} = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [e]^2 - [O^+][e] - \frac{1}{\alpha_1}(q(O_2^+) + \gamma_2[O^+][O_2]) - \\ - \frac{1}{\alpha_3}\left(q(N_2^+) + \frac{\alpha_3}{\alpha_2}\gamma_1[O^+][N_2]\right) = 0. \end{aligned}$$

Решение полученного квадратного уравнения относительно $[e]$ выражается формулой:

$$\begin{aligned} [e] = \frac{[O^+]}{2} + \left(\frac{[O^+]^2}{4} + \frac{1}{\alpha_1}(q(O_2^+) + \gamma_2[O^+][O_2]) + \right. \\ \left. + \frac{1}{\alpha_3}(q(N_2^+) + \gamma_2[O^+][O_2]) \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

Скорость рекомбинации ионов O^+ выражается формулой:

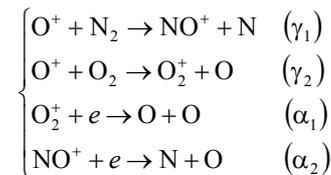
$$\begin{aligned} L(O^+) &= \gamma_1[O^+][N_2] + \gamma_2[O^+][O_2] = \\ &= (\gamma_1[N_2] + \gamma_2[O_2])[O^+] = \beta[O^+], \end{aligned}$$

где $\beta = \gamma_1[N_2] + \gamma_2[O_2]$ – линейный коэффициент рекомбинации ионов O^+ .

В максимуме слоя F2, где $[e] \cong [O^+]$, скорость рекомбинации $L(O^+) \cong \beta[e]$. Размерность $[\beta] = \frac{1}{\text{с}}$.

Уравнения баланса реакций области F2 в полуночное время. В полуночное время процессов прямой ионизации нейтральных составляющих O , O_2 , N_2 с образованием соответствующих первичных ионов O^+ , O_2^+ , N_2^+ нет. Однако в силу наличия потока ионов O^+ из внешней ионосферы последний присутствует.

Ион O^+ вступает в ионно-молекулярные реакции с нейтральными составляющими, а образовавшиеся ионы восстанавливаются в реакциях прямой рекомбинации:



В приведенных реакциях участвуют ионы O^+ , O_2^+ и NO^+ . Для ионов O_2^+ , NO^+ , восстанавливающихся прямой рекомбинацией, условие фотохимического равновесия в полуночное время сводится к уравнениям:

$$\begin{cases} L(O_2^+) = q(O_2^+) = 0; \\ L(NO^+) = q(NO^+) = 0. \end{cases}$$

Для ионов O^+ $q(O^+) \neq L(O^+)$.

Из баланса приведенных реакций получаем:

$$\begin{cases} L(O_2^+) = \alpha_1[e][O_2^+] - \gamma_2[O^+][O_2] = 0; \\ L(NO^+) = \alpha_2[e][NO^+] - \gamma_1[O^+][N_2] = 0. \end{cases}$$

Условие квазинейтральности плазмы для полуночной ионосферы: $[e] = [O^+] + [O_2^+] + [NO^+]$.

Таким образом, получено три уравнения с четырьмя неизвестными $[e]$, $[O^+]$, $[O_2^+]$, $[NO^+]$. Снова выразим $[e]$ через $[O^+]$. Из уравнений баланса ионов $[O_2^+]$, $[NO^+]$ получаем:

$$[O_2^+] = \frac{\gamma_2 [O^+] [O_2]}{\alpha_1 [e]},$$

$$[NO^+] = \frac{\gamma_1 [O^+] [N_2]}{\alpha_2 [e]}.$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } [e] &= [O^+] + [O_2^+] + [NO^+] = \\ &= [O^+] + \frac{\gamma_2 [O^+] [O_2]}{\alpha_1 [e]} + \frac{\gamma_1 [O^+] [N_2]}{\alpha_2 [e]}, \end{aligned}$$

$$[e]^2 - [O^+] [e] - \frac{1}{\alpha_1} \gamma_2 [O^+] [O_2] - \frac{1}{\alpha_2} \gamma_1 [O^+] [N_2] = 0.$$

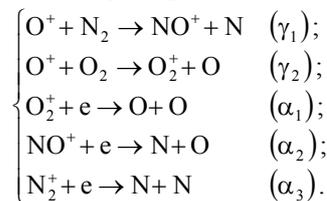
Отсюда

$$[e] = \frac{[O^+]}{2} + \sqrt{\frac{[O^+]^2}{4} + \frac{1}{\alpha_1} \gamma_2 [O^+] [O_2] + \frac{1}{\alpha_2} \gamma_1 [O^+] [N_2]}.$$

В полуночное время скорость рекомбинации ионов O^+ также выражается формулой:

$$\begin{aligned} L(O^+) &= \gamma_1 [O^+] [N_2] + \gamma_2 [O^+] [O_2] = \\ &= (\gamma_1 [N_2] + \gamma_2 [O_2]) [O^+] = \beta [O^+]. \end{aligned}$$

Скорости ионно-молекулярных реакций и реакций рекомбинации. Реакции с участием ионов области F2 характеризуются следующим набором:



Скорости реакций γ_1 , γ_2 , α_1 , α_2 , α_3 имеют размерность $\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$.

Согласно работе [8], скорости реакций

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \begin{cases} (1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{(1,0 \pm 0,4)} & (T_r < 750 \text{ К}); \\ (8,0 \pm 2,0) \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{T_r}{300}\right)^{(2,0 \pm 0,2)} & (T_r \geq 750 \text{ К}); \end{cases} \\ \gamma_2 &= \begin{cases} (2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-11} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{(0,4 \pm 0,14)} & (T_r < 1800 \text{ К}); \\ (1,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{T_r}{300}\right)^{(1,2 \pm 0,13)} & (T_r \geq 1800 \text{ К}). \end{cases} \end{aligned}$$

В детерминированном случае формулы принимают вид:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \begin{cases} 1,2 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{1,0} & (T_r < 750 \text{ К}); \\ 8,0 \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{T_r}{300}\right)^{2,0} & (T_r \geq 750 \text{ К}); \end{cases} \\ \gamma_2 &= \begin{cases} 2,0 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0,4} & (T_r < 1800 \text{ К}); \\ 1,3 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{T_r}{300}\right)^{1,2} & (T_r \geq 1800 \text{ К}). \end{cases} \end{aligned}$$

Аналитические выражения, определяющие значения соответствующей скорости реакции на заданных полуинтервалах значений температуры, в точке соединения этих полуинтервалов должны принимать одинаковые значения. Из уравнения

$$1,2 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{1,0} = 8,0 \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{T_r}{300}\right)^{2,0} \quad \text{получаем}$$

значение температуры, разделяющий интервал значений аргумента при вычислении значения

$$\text{скорости } \gamma_1: \quad T_r = 300 \cdot \left(\frac{120}{8}\right)^{\frac{1}{3}} \cong 739,86 \text{ К.} \quad \text{Из}$$

$$\text{уравнения} \quad 2,0 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0,4} = 1,3 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{T_r}{300}\right)^{1,2}$$

получаем соответствующее значение температуры для

$$\text{скорости } \gamma_2: \quad T_r = 300 \cdot \left(\frac{20}{1,3}\right)^{\frac{1}{1,6}} \cong 1655,96 \text{ К.} \quad \text{С учётом}$$

выявленных необходимых изменений получаем скорректированные формулы скоростей γ_1 , γ_2 для компьютерных вычислений:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \begin{cases} 1,2 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{1,0} & (T_r < 739,86 \text{ К}); \\ 8,0 \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{T_r}{300}\right)^{2,0} & (T_r \geq 739,86 \text{ К}); \end{cases} \\ \gamma_2 &= \begin{cases} 2,0 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0,4} & (T_r < 1655,96 \text{ К}); \\ 1,3 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{T_r}{300}\right)^{1,2} & (T_r \geq 1655,96 \text{ К}). \end{cases} \end{aligned}$$

Согласно работе [9], скорости реакций

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 2,2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,65}; & \alpha_2 &= 6,3 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{300}{T_e}\right)^{1,0}; \\ \alpha_3 &= 2,9 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,33}. \end{aligned}$$

На рис. 1 изображена зависимости скоростей γ_1 , γ_2 от приведенной температуры T_r ионов и нейтралов. Рис. 2 иллюстрирует зависимость скоростей α_1 , α_2 , α_3 от температуры электронов T_e .

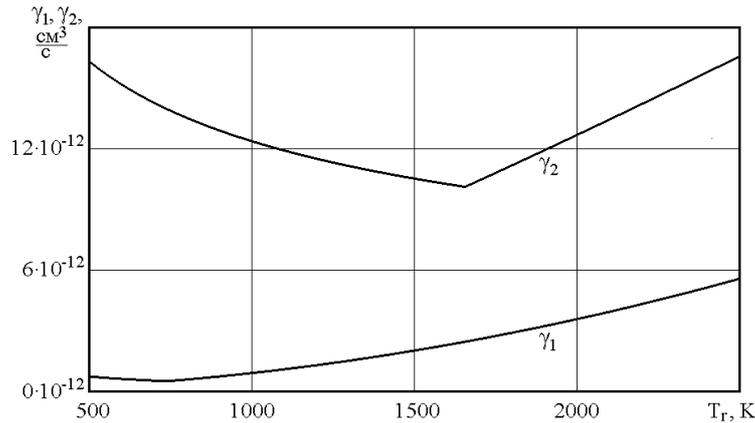


Рис. 1 – Зависимости скоростей γ_1, γ_2 от приведенной температуры T_r ионов и нейтралов

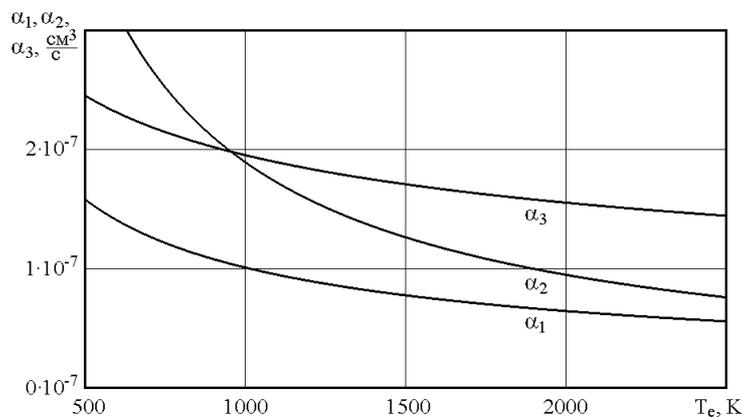


Рис. 2 – Зависимости скоростей $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ от температуры электронов T_e

Приведенная температура ион - нейтральных химических реакций.

Приведенная температура $T_r = \frac{m_n T_i + m_i T_n}{m_i + m_n} = \frac{m_i m_n}{m_i + m_n} \left(\frac{T_i}{m_i} + \frac{T_n}{m_n} \right) = m_{in} \left(\frac{T_i}{m_i} + \frac{T_n}{m_n} \right)$,

где $m_n = m_{O_2}$ – приведенная ион - нейтральная масса (приведенная масса ионов и нейтралов).

Найдём выражения для приведенной температуры для конкретных реакций.

Рассмотрим реакцию $O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$. Масса иона $m_i = m_{O^+} = 16$ а.е.м., масса нейтрала $m_n = m_{N_2} = 28$ а.е.м. Приведенная температура

$T_r = \frac{m_n T_i + m_i T_n}{m_i + m_n} = \frac{28 \cdot T_i + 16 \cdot T_n}{44}$.

Рассмотрим реакцию $O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$. Масса нейтрала $m_n = m_{O_2} = 32$ а.е.м. Приведенная температура

$T_r = \frac{m_n T_i + m_i T_n}{m_i + m_n} = \frac{32 \cdot T_i + 16 \cdot T_n}{48}$.

Уравнение непрерывности. При теоретическом моделировании параметров ионосферы используют уравнения непрерывности (уравнения баланса), члены которого описывают влияние каждого из процессов, изменяющих ионосферные параметры. Уравнения

непрерывности можно записать для любого иона, концентрация которого подвержена изменениям в результате процессов ионизации, рекомбинации, переноса.

Уравнение непрерывности (уравнения баланса) имеет вид [10, 11]: $\frac{dn_j}{dt} = q_j - L_j - n_j \operatorname{div} \vec{v}$, где q_j – скорость ионообразования; L_j – скорость рекомбинации; \vec{v} – скорость переноса.

Величины n_j, q_j, L_j, \vec{v} зависят от времени и координат пространства. В геофизике в качестве координат пространства принято использовать переменные x, y, z , отсчитываемые на осях, направленных от точки наблюдения соответственно к географическому полюсу, на географический восток и к центру Земли.

В ионосферной науке обычно используют высоту h над поверхностью Земли или расстояние r от центра Земли.

Точку наблюдения (начало отсчёта координаты z) можно задать значением H высоты над поверхностью Земли. В этом случае величины z и r связаны соотношением: $z = R_3 + H - r$. В центре Земли $r = 0$, $z = R_3 + H$, $h = -R_3$. На поверхности Земли $r = R_3$,

$z = H$, $h = 0$. В точке наблюдения $r = R_3 + H$, $z = 0$, $h = H$.

Для описания пространственного распределения ионосферных физических величин будем использовать координаты y , x , h , составляющие правую тройку векторов.

Слагаемые уравнения баланса могут иметь разный порядок величины в зависимости от вида ионов, высоты, времени суток, солнечной и магнитной активности. Если при некоторых условиях ионизация и рекомбинация пренебрежимо мала, то уравнение непрерывности принимает вид: $\frac{dn_j}{dt} = -n_j \operatorname{div} \vec{v}$, т.е.

$\frac{1}{n_j} \frac{dn_j}{dt} = -\operatorname{div} \vec{v}$, $\frac{d \ln n_j}{dt} = -\operatorname{div} \vec{v}$. При $\operatorname{div} \vec{v} > 0$ из объёма $dV = dydx dh$ частицы вытекают. В этом случае концентрация n_j уменьшается. При $\operatorname{div} \vec{v} < 0$ частицы втекают в объём dV – концентрация n_j увеличивается.

$$\begin{aligned} \text{Так как } \frac{dn_j}{dt} &= \frac{d}{dt} n_j(\vec{r}, t) = \frac{1}{dt} \left(\frac{\partial n_j}{\partial \vec{r}} d\vec{r} + \frac{\partial n_j}{\partial t} dt \right) = \\ &= \frac{1}{dt} \left(\overrightarrow{\operatorname{grad}} n_j \cdot d\vec{r} + \frac{\partial n_j}{\partial t} dt \right) = \\ &= \operatorname{grad} n_j \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} + \frac{\partial n_j}{\partial t} = \operatorname{grad} n_j \cdot \vec{v} + \frac{\partial n_j}{\partial t}, \end{aligned}$$

то уравнение непрерывности принимает вид:

$$\operatorname{grad} n_j \cdot \vec{v} + \frac{\partial n_j}{\partial t} = q_j - L_j - n_j \operatorname{div} \vec{v},$$

$$\operatorname{grad} n_j \cdot \vec{v} + n_j \operatorname{div} \vec{v} + \frac{\partial n_j}{\partial t} = q_j - L_j,$$

$$\operatorname{div}(n_j \vec{v}) + \frac{\partial n_j}{\partial t} = q_j - L_j,$$

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = q_j - L_j - \operatorname{div}(n_j \vec{v}).$$

Составляющая $\frac{\partial n_j}{\partial t}$ характеризует скорость

изменения концентрации иона сорта j в исследуемом элементарном объёме пространства. Величина q_j описывает увеличение концентрации за счёт процессов ионообразования. Величина L_j характеризует уменьшение ионов при их рекомбинации. Составляющая $\operatorname{div}(n_j \vec{v})$ характеризует скорость пространственного изменения потока ионов сорта j . Исходя из структуры уравнения, можно сказать, что величина $\operatorname{div}(n_j \vec{v})$ равна количеству ионов, покидающих единичный объём за единичное время за счёт переноса.

Дивергенция

$$\operatorname{div}(n_j \vec{v}) = \frac{\partial(n_j v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(n_j v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(n_j v_h)}{\partial h}.$$

Физика ионосферы такова, что скорости высотных изменений ионосферных параметров намного больше скорости их изменений в горизонтальных направлениях. Отчасти это связано с соотношением линейных расстояний. Так, длина окружности вокруг земного шара, проходящей на ионосферных широтах, намного больше радиальной толщины самой ионосферы.

Таким образом, скорость изменения ионосферных параметров вдоль широтных и долготных направлений намного меньше скорости изменения вдоль высоты. Учитывая, что $\frac{\partial(n_j v_h)}{\partial h} \gg \frac{\partial(n_j v_y)}{\partial y}$, $\frac{\partial(n_j v_h)}{\partial h} \gg \frac{\partial(n_j v_x)}{\partial x}$, получаем следующее выражение для дивергенции потока: $\operatorname{div}(n_j \vec{v}) \cong \frac{\partial(n_j v_h)}{\partial h}$.

Уравнение непрерывности переходит к виду:

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = q_j - L_j - \frac{\partial}{\partial h}(n_j v_h).$$

Величина v_h – это радиальная проекция вектора скорости движения плазмы, поэтому будем её обозначать как v_r . Тогда

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = q_j - L_j - \frac{\partial}{\partial h}(n_j v_r),$$

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = q_j - L_j - \left(n_j \frac{\partial v_r}{\partial h} + \frac{\partial n_j}{\partial h} v_r \right),$$

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = q_j - L_j - n_j \frac{\partial v_r}{\partial h} - \frac{\partial n_j}{\partial h} v_r.$$

Если $\Phi_j = n_j v_r$ – поток ионов сорта j , то

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = q_j - L_j - \frac{\partial}{\partial h} \Phi_j,$$

$$\int_h^{+\infty} \frac{\partial n_j}{\partial t} dh = \int_h^{+\infty} q_j dh - \int_h^{+\infty} L_j dh - \int_h^{+\infty} \frac{\partial}{\partial h} \Phi_j dh,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_h^{+\infty} n_j dh = \int_h^{+\infty} q_j dh - \int_h^{+\infty} L_j dh - \Phi_j \Big|_h^{+\infty},$$

$$\frac{\partial}{\partial t} N_j = \int_h^{+\infty} q_j dh - \int_h^{+\infty} L_j dh + \Phi_j,$$

где $N_j = \int_h^{+\infty} n_j dh$ – количество ионов j -компоненты в столбце выше уровня h .

В околополуденные и околополуночные часы можно считать член $\frac{\partial n_j}{\partial t}$ пренебрежительно малым по сравнению с остаточными членами уравнения. В этом случае уравнение непрерывности принимает вид: $q_j - L_j - \operatorname{div}(n_j \vec{v}) = 0$ – уравнение непрерывности квазиравновесного распределения.

Диффузия ионов O^+ в области F2. Для ионов O^+ , доминирующих в F2-области, уравнение диффузии имеет вид [11]:

$$v_{\text{диф}r} = -D_a \cdot \sin^2 I \cdot \left(\frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dh} + \frac{1}{T_i+T_e} \frac{d(T_i+T_e)}{dh} + \frac{m_i g}{k(T_i+T_e)} \right),$$

где $v_{\text{диф}r}$ – радиальная составляющая скорости амбиполярной диффузии; I – наклонение магнитного поля); $D_a = \frac{\kappa(T_i+T_e)}{m_i v_i}$ – коэффициент амбиполярной диффузии;

$$v_i = v_{O^+} = v(O^+, O) + v(O^+, O_2) + v(O^+, N_2).$$

Если $\frac{dn_i}{dh} < 0$ настолько, что

$$\frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dh} + \frac{1}{T_i+T_e} \frac{d(T_i+T_e)}{dh} + \frac{m_i g}{k(T_i+T_e)} < 0, \text{ то } v_{\text{диф}r} > 0.$$

Выражения для частот ион - нейтральных соударений $v(O^+, O)$, $v(O^+, O_2)$, $v(O^+, N_2)$ возьмём из работ [12, 13]:

$$v(O^+, O) = 1.86 \cdot 10^{-9} \left(\frac{T_r}{1000} \right)^{0.37} \cdot n(O);$$

$$v(O^+, O_2) = 1.00 \cdot 10^{-9} \cdot n(O_2);$$

$$v(O^+, N_2) = 1.08 \cdot 10^{-9} \cdot n(N_2).$$

Концентрация нейтральных газов в данных формулах подставляется в см^{-3} , частоты соударений вычисляются в с^{-1} .

Здесь $T_r = \frac{m_n T_i + m_i T_n}{m_i + m_n}$ – приведенная

температура; m_i – масса иона (в данном случае $m_i = m_{O^+}$); m_n – масса иона (в данном случае $m_n = m_O$). Пренебрегая различием масс иона и нейтрала атомарного кислорода, получаем формулу для $v(O^+, O)$:

$$v(O^+, O) = 1.86 \cdot 10^{-9} \left(\frac{T_i + T_n}{2000} \right)^{0.37} \cdot n(O).$$

Уравнение непрерывности ионов O^+ для F2-области ионосферы. Уравнение непрерывности ионов O^+ имеет вид: $\frac{\partial n}{\partial t} = q - L - \text{div}(n\vec{v})$, где n – концентрация ионов O^+ ; q – скорость ионообразования; L – скорость рекомбинации; \vec{v} – скорость переноса ионов O^+ .

Скорость изменения ионосферных параметров вдоль широтных и долготных направлений намного меньше скорости изменения вдоль высоты, поэтому

дивергенция $\text{div}(n\vec{v}) \cong \frac{\partial(nv_r)}{\partial h}$ и уравнение непрерывности переходит к виду:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = q - L - \frac{\partial}{\partial h}(nv_r).$$

Скорость движения ионов $\vec{v} = \vec{v}_{\text{диф}} + \vec{\omega} + \vec{v}_E$, где $\vec{v}_{\text{диф}}$ – скорость амбиполярной диффузии ионов O^+ ; $\vec{\omega}$ – скорость движения ионов (в частности, ионов O^+) вдоль линий магнитного поля Земли, обусловленного ветром нейтральной среды; \vec{v}_E – вектор скорости электрического дрейфа (т. е. дрейфа ларморовской траектории заряженных частиц в магнитном и электрическом полях).

Радиальная составляющая скорости движения ионов $v_r = v_{\text{диф}r} + \omega_r + v_{Er}$, где $v_{\text{диф}r}$, ω_r , v_{Er} – вертикальные составляющие соответствующих векторов. Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= q - L - \frac{\partial}{\partial h}(nv_r) = \\ &= q - L - \frac{\partial}{\partial h}(n(v_{\text{диф}r} + \omega_r + v_{Er})) = \\ &= q - L - \frac{\partial}{\partial h}(nv_{\text{диф}r}) - \frac{\partial}{\partial h}(n\omega_r) - \frac{\partial}{\partial h}(nv_{Er}). \end{aligned}$$

Радиальная проекция вектора скорости движения ионов вдоль магнитной силовой линии, индуцированного нейтральными ветрами,

$$\omega_r = -(v_{\text{нф}} \cos D + v_{\text{нл}} \sin D) \cdot \cos I \cdot \sin I.$$

Радиальная составляющая скорости электрического дрейфа

$$v_{Er} = \frac{1}{B} (-E_x \cos I \cdot \sin D + E_y \cos I \cdot \cos D).$$

Подставим выражения для радиальных составляющих скорости движения в уравнение непрерывности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= q - L - \frac{\partial}{\partial h} \left(n \left(-D_a \cdot \sin^2 I \cdot \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} + \frac{1}{T_i+T_e} \frac{d(T_i+T_e)}{dh} + \frac{m_i g}{k(T_i+T_e)} \right) \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial}{\partial h} (n(-(v_{\text{нф}} \cos D + v_{\text{нл}} \sin D) \cdot \cos I \cdot \sin I)) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial}{\partial h} \left(n \left(\frac{1}{B} (-E_x \cos I \cdot \sin D + E_y \cos I \cdot \cos D) \right) \right) \right), \\ \frac{\partial n}{\partial t} &= q - L + \frac{\partial}{\partial h} \left(D_a \cdot \sin^2 I \cdot \left(\frac{dn}{dh} + n \left(\frac{1}{T_i+T_e} \frac{d(T_i+T_e)}{dh} + \frac{m_i g}{k(T_i+T_e)} \right) \right) \right) + \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial h} (n(v_{\text{нф}} \cos D \cdot \cos I \cdot \sin I + v_{\text{нл}} \sin D \cdot \cos I \cdot \sin I)) + \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial h} \left(n \left(\frac{E_x}{B} \cos I \cdot \sin D - \frac{E_y}{B} \cos I \cdot \cos D \right) \right). \end{aligned}$$

$$\text{Обозначим } A_1 = \frac{1}{T_i+T_e} \frac{d(T_i+T_e)}{dr} + \frac{m_i g}{k(T_i+T_e)};$$

$$A_2 = v_{\text{нф}} \cos D \cdot \cos I \cdot \sin I + v_{\text{нл}} \sin D \cdot \cos I \cdot \sin I;$$

$$A_3 = \frac{E_x}{B} \cos I \cdot \sin D - \frac{E_y}{B} \cos I \cdot \cos D.$$

$$\text{Тогда } \frac{\partial n}{\partial t} = q - L +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial h} \left(D_a \cdot \sin^2 I \cdot \left(\frac{dn}{dh} + A_1 n \right) \right) + \frac{\partial}{\partial h} (A_2 n) + \frac{\partial}{\partial h} (A_3 n),$$

$$q - L + \frac{\partial}{\partial h} \left(D_a \cdot \sin^2 I \cdot \left(\frac{dn}{dh} + A_1 n \right) \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial h} (A_2 n) + \frac{\partial}{\partial h} (A_3 n) - \frac{\partial n}{\partial t} = 0.$$

В околополуденное время можно считать член $\frac{\partial n}{\partial t}$ пренебрежительно малым. Тогда уравнение непрерывности существенно упрощается: из дифференциального уравнения в частных производных по двум переменным h и t с неизвестной функцией $n(h, t)$ оно превращается в обыкновенное дифференциальное уравнение с неизвестной функцией $n(h)$:

$$q - L + \frac{d}{dh} \left(D_a \cdot \sin^2 I \cdot \left(\frac{dn}{dh} + A_1 n \right) \right) +$$

$$+ \frac{d}{dh} (A_2 n) + \frac{d}{dh} (A_3 n) = 0,$$

$$q - L + \frac{d}{dh} \left(D_a \cdot \sin^2 I \cdot \left(\frac{dn}{dh} + A_1 n \right) + A_2 n + A_3 n \right) = 0.$$

$$\text{Обозначим } D_1 = D_a \cdot \sin^2 I.$$

$$\text{Тогда } q - L + \frac{d}{dh} \left(D_1 \cdot \left(\frac{dn}{dh} + A_1 n \right) + A_2 n + A_3 n \right) = 0.$$

Для нахождения решения $n(h)$ полученного дифференциального уравнения второго порядка нужно задаться двумя граничными условиями. Учитывая, что в модели области F2 (210–500 км) используются описания, характерные только для данной области, зададим на высоте $h_{\text{нижн}} = 120$ км граничное условие $n(h_{\text{нижн}}) = 0$. Для высоты 600 км зададим вертикальную плотность потока ионов. Для околополуденного времени принято считать, что значение вертикальной плотности потока $\Phi_r(h) = n(h)v_r(h)$ на высоте $h_{\text{верх}} = 600$ км равно $\Phi_{\text{гверх}} = 10^8 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$. В полуночное

время поток равен $-10^8 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$.

Запишем аналитическое выражение $\Phi_r = nv_r = n(v_{\text{оуфр}} + \omega_r + v_{Er})$ для вертикальной плотности потока с помощью введённых выше обозначений.

Радиальные составляющие скорости движения ионов:

$$v_{\text{оуфр}} = -D_1 \cdot \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} + \frac{1}{T_i + T_e} \frac{d(T_i + T_e)}{dh} + \frac{m_i g}{k(T_i + T_e)} \right) =$$

$$= -D_1 \cdot \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} + A_1 \right);$$

$$\omega_r = -(v_{\text{нф}} \cos D + v_{\text{нл}} \sin D) \cdot \cos I \cdot \sin I = -A_2;$$

$$v_{Er} = \frac{1}{B} (-E_x \cos I \cdot \sin D + E_y \cos I \cdot \cos D) = -A_3.$$

Вертикальная плотность потока

$$\Phi_r = nv_r = n(v_{\text{оуфр}} + \omega_r + v_{Er}) =$$

$$= n \left(-D_1 \cdot \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} + A_1 \right) - A_2 - A_3 \right) =$$

$$= -D_1 \cdot \left(\frac{dn}{dh} + A_1 n \right) - A_2 n - A_3 n.$$

Упрощение дифференциального уравнения непрерывности путём замены неизвестной переменной. Полученное уравнение непрерывности ионов O^+ имеет вид:

$$\frac{d}{dh} \left[D_1 \left(\frac{dn}{dh} + A_1 n \right) + A_2 n + A_3 n \right] - \beta n + q = 0,$$

где $n = n(h)$ – концентрация ионов O^+ ; $q = q(h)$;

$$\beta = \beta(h); D_1 = D_a \cdot \sin^2 I = D_1(h);$$

$$A_1 = \frac{1}{T_i + T_e} \frac{d(T_i + T_e)}{dr} + \frac{m_i g}{k(T_i + T_e)} = A_1(h);$$

$$A_2 = v_{\text{нф}} \cos D \cdot \cos I \cdot \sin I + v_{\text{нл}} \sin D \cdot \cos I \cdot \sin I = A_2(h);$$

$$A_3 = \frac{E_x}{B} \cos I \cdot \sin D - \frac{E_y}{B} \cos I \cdot \cos D = A_3(h).$$

Уравнение непрерывности ионов O^+ представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка с общим видом: $n'' + P(h)n' + Q(h)n = R(h)$. Стандартный подход к нахождению решения таких уравнений заключается в том, что искомое решение представляется в виде произведения двух некоторых функций: $n(h) = w(h) \cdot u(h)$. В качестве функции $w(h)$ берут частное решение некоторого дифференциального уравнения с тем расчётом, чтобы получаемое дифференциальное уравнение для нахождения общего решения $u(h)$ имело бы упрощённый вид по сравнению с исходным дифференциальным уравнением.

$$\text{Подставим выражения } n = wu, \frac{dn}{dh} = \frac{dw}{dh}u + w \frac{du}{dh}$$

в дифференциальное уравнение непрерывности:

$$\frac{d}{dh} \left[D_1 \left(\frac{dw}{dh}u + w \frac{du}{dh} + A_1 wu \right) + A_2 wu + A_3 wu \right] -$$

$$- \beta wu + q = 0,$$

$$\frac{d}{dh} \left[D_1 \left(\frac{dw}{dh}u + A_1 wu + \frac{A_2 wu}{D_1} + \frac{A_3 wu}{D_1} \right) + D_1 w \frac{du}{dh} \right] -$$

$$- \beta wu + q = 0,$$

$$\frac{d}{dh} \left[D_1 \left(\frac{dw}{dh} + \left(A_1 + \frac{A_2 + A_3}{D_1} \right) w \right) u + D_1 w \frac{du}{dh} \right] - \beta w u + q = 0.$$

Решим уравнение $\frac{dw}{dh} + \left(A_1 + \frac{A_2 + A_3}{D_1} \right) w = 0$. Это

обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными:

$$\frac{dw}{w} = - \left(A_1 + \frac{A_2 + A_3}{D_1} \right) w,$$

$$\int \frac{dw}{w} = - \int \left(A_1 + \frac{A_2 + A_3}{D_1} \right) dh,$$

$$\ln|w| = - \int \left(A_1 + \frac{A_2 + A_3}{D_1} \right) dh + \ln|C|.$$

Общее решение $w = C \exp \left[- \int \left(A_1 + \frac{A_2 + A_3}{D_1} \right) dh \right]$.

В качестве частного решения, удовлетворяющего дифференциальному уравнению

$$\frac{dw}{dh} + \left(A_1 + \frac{A_2 + A_3}{D_1} \right) w = 0, \quad \text{возьмём функцию}$$

$$w(h) = \exp \left[- \int_{h_{\text{нижн}}}^h \left(A_1 + \frac{A_2 + A_3}{D_1} \right) dh \right].$$

Тогда для нахождения общего вида функции $u(h)$ получаем уравнение:

$$\frac{d}{dh} \left[D_1 w(h) \frac{du}{dh} \right] - \beta w(h) u + q = 0.$$

Это уравнение имеет более простую структуру, чем исходное уравнение

$$\frac{d}{dh} \left[D_1 \left(\frac{dn}{dh} + A_1 n \right) + A_2 n + A_3 n \right] - \beta n + q = 0.$$

Для нового уравнения найдём граничные условия.

Граничное условие $n(h_{\text{нижн}}) = 0$ трансформируется в условие $w(h_{\text{нижн}}) u(h_{\text{нижн}}) = 0$. Учитывая, что $w(h_{\text{нижн}}) = 1$, получаем нижнее граничное условие $u(h_{\text{нижн}}) = 0$.

Вертикальная плотность потока

$$\Phi_r = -D_1 \left(\frac{dn}{dh} + A_1 n \right) - A_2 n - A_3 n =$$

$$= -D_1 \left(\frac{d(wu)}{dh} + A_1 wu \right) - A_2 wu - A_3 wu =$$

$$= -D_1 \left(\frac{dw}{dh} u + w \frac{du}{dh} + A_1 wu \right) - A_2 wu - A_3 wu =$$

$$= -D_1 \left(\frac{dw}{dh} u + A_1 wu + \frac{A_2 wu}{D_1} + \frac{A_3 wu}{D_1} \right) - D_1 w \frac{du}{dh} =$$

$$= -D_1 \left(\frac{dw}{dh} + \left(A_1 + \frac{A_2 + A_3}{D_1} \right) w \right) u - D_1 w \frac{du}{dh} =$$

$$= -D_1 w \frac{du}{dh}.$$

Граничное условие $\Phi_r(h_{\text{верхн}}) = \Phi_{\text{Г верх}}$

трансформируется в условие $-D_1 w \frac{du}{dh} \Big|_{h=h_{\text{верх}}} = \Phi_{\text{Г верх}}$,

$$\text{т. е. } D_1 w(h) \frac{du}{dh} \Big|_{h=h_{\text{верх}}} = -\Phi_{\text{Г верх}}$$

Численное решение уравнения непрерывности методом прогонки. Для неизвестной переменной $u(h)$ уравнение и граничные условия имеют вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dh} \left(D_1 w \frac{du}{dh} \right) - \beta w u + q &= 0; \\ u(h_{\text{нижн}}) &= 0; \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} D_1 w \frac{du}{dh} \Big|_{h=h_{\text{верх}}} &= -\Phi_{\text{Г верх}}. \end{aligned} \right.$$

Обозначим $D_1 w = \lambda$. Величину $\Phi_{\text{Г верх}}$ переобозначим буквой Φ . Теперь уравнение и граничные условия выглядят следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dh} \left(\lambda \frac{du}{dh} \right) - \beta w u + q &= 0; \\ u(h_{\text{нижн}}) &= 0; \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda \frac{du}{dh} \Big|_{h=h_{\text{верх}}} &= -\Phi. \end{aligned} \right.$$

Заметим, что граничные условия заданы в разных точках переменной h . Поэтому поставленная задача решения дифференциального уравнения с дополнительными условиями является краевой.

Численное решение краевой задачи предполагает переход к системе линейных алгебраических уравнений (разностных уравнений).

Разобьём отрезок $[h_{\text{нижн}}, h_{\text{верх}}]$ на $(n-1)$ равных частей длины Δh . Узлы разбиения обозначим как $h_1 = h_{\text{нижн}}, h_2, \dots, h_{n-1}, h_n = h_{\text{верх}}$. Множество точек h_i ($i = \overline{1, n}$) образует так называемую сетку. Значения функции $u(h)$ в узлах разбиения определяют сеточную функцию $u(h_i) = u_i$.

Представляя производные в виде конечных разностей, получаем:

$$\frac{d}{dh} \left(\lambda \frac{du}{dh} \right) \Big|_{h \in [h_i, h_{i+1}]} \cong \frac{1}{\Delta h} \left(\bar{\lambda}_{i+1} \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta h} - \bar{\lambda}_i \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta h} \right) \quad i = \overline{2, n-1},$$

$$\text{где } \bar{\lambda}_i = \frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{2}, \quad \bar{\lambda}_{i+1} = \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2}.$$

Разностные уравнения принимают вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta h} \left(\bar{\lambda}_{i+1} \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta h} - \bar{\lambda}_i \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta h} \right) - \beta_i w_i u_i + q_i &= 0, \\ \frac{\bar{\lambda}_{i+1} u_{i+1}}{(\Delta h)^2} - \frac{\bar{\lambda}_{i+1} u_i}{(\Delta h)^2} - \frac{\bar{\lambda}_i u_i}{(\Delta h)^2} + \frac{\bar{\lambda}_i u_{i-1}}{(\Delta h)^2} - \beta_i w_i u_i + q_i &= 0, \\ \frac{\bar{\lambda}_i u_{i-1}}{(\Delta h)^2} + \left(-\frac{\bar{\lambda}_{i+1} u_i}{(\Delta h)^2} - \frac{\bar{\lambda}_i u_i}{(\Delta h)^2} - \beta_i w_i u_i \right) + \frac{\bar{\lambda}_{i+1} u_{i+1}}{(\Delta h)^2} + q_i &= 0, \\ \frac{\bar{\lambda}_i}{(\Delta h)^2} u_{i-1} - \left(\frac{\bar{\lambda}_{i+1}}{(\Delta h)^2} + \frac{\bar{\lambda}_i}{(\Delta h)^2} + \beta_i w_i \right) u_i + \frac{\bar{\lambda}_{i+1}}{(\Delta h)^2} u_{i+1} + q_i &= 0, \end{aligned}$$

где $\beta_i = \beta(h_i)$, $w_i = w(h_i)$, $u_i = u(h_i)$.

Обозначим: $A_i = \frac{\bar{\lambda}_i}{(\Delta h)^2}$; $B_i = \frac{\bar{\lambda}_{i+1}}{(\Delta h)^2} + \frac{\bar{\lambda}_i}{(\Delta h)^2} + \beta_i w_i$;

$$C_i = \frac{\bar{\lambda}_{i+1}}{(\Delta h)^2}.$$

Рассматриваемое численное уравнение принимает вид:

$$A_i u_{i-1} - B_i u_i + C_i u_{i+1} + F_i = 0, \quad i = \overline{2, n-1}.$$

Запишем граничные условия для полученного численного уравнения. Граничное условие $u(h_{\text{нижн}}) = 0$ непрерывной функции $u(h)$ переходит в равенство $u_1 = 0$. Граничное условие $\lambda \left. \frac{du}{dh} \right|_{h=h_{\text{верх}}} = -\Phi$

переходит в равенство:

$$\frac{\lambda_{n-1} + \lambda_n}{2} \cdot \frac{u_n - u_{n-1}}{\Delta h} = -\Phi,$$

т.е. $u_n - u_{n-1} = \frac{-2\Delta h \cdot \Phi}{\lambda_{n-1} + \lambda_n}$, $u_n = u_{n-1} - \frac{2\Delta h \cdot \Phi}{\lambda_{n-1} + \lambda_n}$.

Таким образом, поставленная краевая задача в конечно-разностном виде записывается в виде системы линейных алгебраических уравнений:

$$A_i u_{i-1} - B_i u_i + C_i u_{i+1} + F_i = 0 \quad (i = \overline{2, n-1})$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} u_1 = 0; \\ u_n = u_{n-1} - \frac{2\Delta h \cdot \Phi}{\lambda_{n-1} + \lambda_n}. \end{cases}$$

Одним из наиболее употребительных способов решения разностных уравнений является метод прогонки. Алгоритм решения разностного уравнения:

$$A_i u_{i-1} - C_i u_i + B_i u_{i+1} + F_i = 0 \quad (i = \overline{2, n-1})$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} u_1 = p_1 u_2 + q_1; \\ u_n = p_2 u_{n-1} + q_2 \end{cases}$$

методом правой прогонки состоит из рекуррентных формул вычисления коэффициентов a_i, b_i и значений u_i искомой функции $u(h)$ в узлах h_i разбиения отрезка изменения аргумента [14, 15]:

$$\begin{cases} a_2 = p_1; \\ b_2 = q_1; \\ a_{i+1} = \frac{B_i}{C_i - A_i a_i} \quad (i = \overline{2, n-1}); \\ b_{i+1} = \frac{A_i b_i + F_i}{C_i - A_i a_i} \quad (i = \overline{2, n-1}); \\ u_n = \frac{p_2 b_n + q_2}{1 - p_2 a_n}; \\ u_i = a_{i+1} u_{i+1} + b_{i+1} \quad (i = \overline{n-1, 1}). \end{cases}$$

Первая система равенств предназначена для вычисления $a_2, b_2, a_3, b_3, \dots, a_n, b_n$. Вторая система равенств, используя предварительно вычисленные коэффициенты a_i, b_i , позволяет вычислить решение u_n, u_{n-1}, \dots, u_1 .

Для рассматриваемой задачи коэффициенты граничных условий $p_1 = 0, q_1 = 0, p_2 = 0,$

$$q_2 = -\frac{2\Delta h \cdot \Phi}{\lambda_{n-1} + \lambda_n}.$$

Поэтому алгоритм решения разностного уравнения непрерывности представляет совокупность следующих действий:

$$\begin{cases} a_2 = 0; \\ b_2 = 0; \\ a_{i+1} = \frac{B_i}{C_i - A_i a_i} \quad (i = \overline{2, n-1}); \\ b_{i+1} = \frac{A_i b_i + F_i}{C_i - A_i a_i} \quad (i = \overline{2, n-1}); \\ u_n = \frac{b_n - \frac{2\Delta h \cdot \Phi}{\lambda_{n-1} + \lambda_n} q_2}{1 - a_n} = \frac{b_n (\lambda_{n-1} + \lambda_n) - 2\Delta h \cdot \Phi}{(\lambda_{n-1} + \lambda_n)(1 - a_n)}; \\ u_i = a_{i+1} u_{i+1} + b_{i+1} \quad (i = \overline{n-1, 1}). \end{cases}$$

Оценка вклада радиальной составляющей электрического дрейфа в суммарную величину скорости движения плазмы. Для вычисления составляющих вектора напряжённости электрического поля ионосферы воспользуемся моделью HMR-1990 (Heppner-Maynard-Rich Electric Field Model 1990) электрического поля ионосферы [16, 17]. Согласно модели HMR-1990 величина электрического поля зависит от геомагнитной широты подсолнечной точки, геомагнитной широты и геомагнитного местного времени точки наблюдения, уровня солнечной активности, определяемого индексом $F_{10.7}$, и уровня возмущения магнитного поля, определяемого индексом K_p .

Произведём оценку величины электрического дрейфа на геомагнитной широте $\theta = 50^\circ$ в околополуденное время равноденствия на высоте 300 км, индексе $F_{10.7} = 100$ при различных значениях индекса K_p .

При $K_p = 1$ величина E_x меридиональной составляющей и величина E_y зональной

меридиональної составляючої напруженості електричного поля змінюються в межах від $-0,3$ до $+0,3$ мВ/м. При $K_p = 3$ величини E_x і E_y змінюються в межах від $-1,0$ до $+1,0$ мВ/м. При $K_p = 5$ величини E_x і E_y змінюються в межах від $-2,0$ до $+2,0$ мВ/м.

Планетарний індекс K_p має діапазон значень від 0 до 9. Індекс K_p визначається з точністю до $1/3$. Індeksi K_p і A_p зв'язані таблицею значень. Так значенню $K_p = 0$ відповідає $A_p = 0$. Для $K_p = 1 - A_p = 4$; для $K_p = 9 - A_p > 400$.

Если K -індекс – это квазилогарифмический индекс (увеличивается приблизительно на единицу при увеличении возмущенности приблизительно в два раза), то индекс A_p является линейным индексом (увеличение возмущения в несколько раз дает такое же увеличение индекса).

Магнітне поле Землі вважається спокійним при $K_p < 2$ или $A_p < 6$.

В околорізденне время при $K_p = 1$ составляющие вектора напряженности электрического поля $E_x = -0,1$ мВ/м и $E_y = -0,025$ мВ/м. Вычисляемая для этого случая

радіальна составляюча скорости електричного дрейфа равна около $-0,1$ м/с.

Таким образом, при теоретическом моделировании спокойной среднеширотной ионосферы вклад электрического дрейфа в движение ионосферной плазмы на высотах области F2 пренебрежительно мал. При возмущённых же условиях вклад электрического дрейфа будет значимым. Поэтому при теоретическом расчёте высотного профиля электронной концентрации магнитоспокойной среднеширотной ионосферы влиянием ионосферного электрического поля можно пренебречь.

Результаты теоретического моделирования высотного профиля электронной концентрации в полночное и околорізденне время. На рис. 3 представлены результаты теоретического расчёта высотного профиля электронной концентрации в дни зимнего и летнего солнцестояний в географической точке Радара некогерентного рассеяния Института ионосферы. Магнітна активність характеризується індексом $A_p = 2$. Сонячна активність описується індексом $F_{10.7} = 100$.

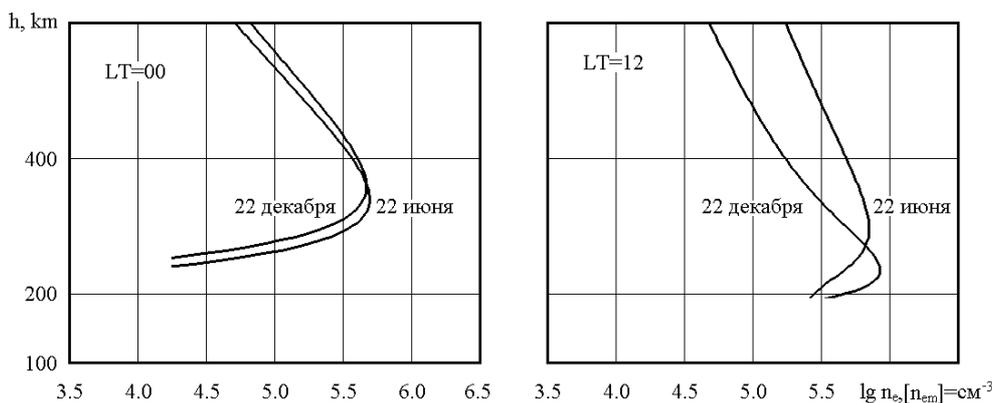


Рис. 3 – Теоретически вычисленные высотные профили электронной концентрации в полночное и полуденное время

Теоретические расчёты согласуются с эффектом сезонной аномалии F2-слоя, который заключается в превышении зимних дневных значений электронной концентрации $n_{e,max}F2$ в максимуме слоя над летними. Известно, что явление сезонной аномалии наблюдается только в северном полушарии на средних широтах. При других условиях наблюдается превышение летних значений электронной концентрации и высоты слоя F2 над зимними. Исключением могут быть некоторые экваториальные области.

В полночное время зимние значения электронной концентрации меньше летних значений.

В полуденное время расчётные значения высоты слоя F2 летом больше, чем зимой. В полночное время летние значения высоты меньше зимних значений.

Выводы. Выполненные теоретические расчёты дают результаты, совпадающие с общепринятыми взглядами на суточные вариации высоты и электронной концентрации слоя F2 в

магнитоспокойных условиях. Это свидетельствует как о правильности формул, описывающих алгоритм решения уравнения непрерывности, так и о корректности работы компьютерной программы.

Список литературы

1. Kohl H. Some effects of neutral air winds on the ionospheric F-layer / H. Kohl, J.W. King, D. Eccles // J. of Atm. and Ter. Physics. – 1968. – Vol. 30 – P. 1733–1744.
2. Schunk R. W. A mathematical Model of the Middle and High Latitude Ionosphere / R. W. Schunk // Pure Appl. Geophys. – 1988. – Vol. 127, Issue 2–3. – P. 255–303.
3. Mikhailov A. Self-consistent modeling of the daytime electron density profile in the ionospheric F region / A. Mikhailov, K. Schlegel // Ann. Geophysicae. – 1997. – Vol. 15, Issue 3. – P. 314–326.
4. Huffman R. E. Atmospheric Ultraviolet Remote Sensing / R. E. Huffman – San Diego: Academic Press, Inc, 1992. – 317 p.
5. Hargreaves J. K. The Solar-Terrestrial Environment / J. K. Hargreaves – Cambridge: Cambridge University Press, 1992. – 420 p.
6. Иванов-Холодный Г. С. Прогнозирование состояния ионосферы (детерминированный подход) / Г. С. Иванов-Холодный, А. В. Михайлов – Ленинград: Гидрометеоздат, 1980. – 192 с.

- Gombosi T. I. Physics of the Space Environment / T. I. Gombosi – Cambridge: Cambridge University Press, 1998. – 339 p.
- McFarland M. Flow-drift technique for ion mobility and ion-molecule reaction rate constant measurements. II. Positive ion reaction of N^+ , O^+ , and N_2^+ with O_2 and O^+ with N_2 from thermal to ~ 2 eV / M. McFarland, D. L. Albritton, F. C. Fehsenfeld, E. E. Ferguson, and A. L. Schmeltekopf // J. Chem. Phys. – 1973. – Vol. 59, N. 12. – P. 6620–6628.
- Pharo M. W. An experimental study of the ion chemistry and thermal balance in the E- and F-regions above Wallops Island / M. W. Pharo, L. R. Scott, H. G. Mayr, L. H. Brace, and H. A. Taylor // Planet. Space Sci. – 1971. – Vol. 19. – P. 15–15.
- Prolls G. W. Physics of the Earth's Space Environment. An Introduction / G. W. Prolls – Berlin: Springer, 2004. – 513 p.
- Kelley M. The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics. 2nd Edition / M. Kelley – San Diego: Academic Press, Inc, 2009. – 576 p.
- Stubbe P. Frictional forces and collision frequencies between moving ion and neutral gases. Technical Report / P. Stubbe – Greenbelt, Maryland: Goddard Space Flight Center, 1967. – 41 p.
- Stubbe P. Frictional forces and collision frequencies between moving ion and neutral gases / P. Stubbe // J. of Atm. and Ter. Physics. – 1968. – Vol. 30, N. 12. – P. 1965–1985.
- Godunov S. K. Difference Schemes. An Introduction to the Underlying Theory / S. K. Godunov, V. S. Ryabenkii – Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1987. – 488 p.
- Samarskii A. A. The Theory of Difference Schemes / A. A. Samarskii – New York: Marcel Dekker, Inc., 2001. – 786 p.
- Heppner J. P. Empirical High-Latitude Electric Field Model / J. P. Heppner, N. C. Maynard // J. of Geoph. Res. – 1987. – Vol. 92, N. A5. – P. 4467–4489.
- Rich F. J. Consequences of Using Simple Analytical Functions for the High-Latitude Convection Electric Field / F. J. Rich, N. C. Maynard // J. of Geoph. Res. – 1989. – Vol. 94, N. A4. – P. 3687–3701.
- Mikhailov A., Schlegel K. Self-consistent modeling of the daytime electron density profile in the ionospheric F region. Ann. Geophysicae. 1997. Vol. 15, Issue 3. P. 314–326. Print.
- Huffman R. E. Atmospheric Ultraviolet Remote Sensing. San Diego: Academic Press, Inc, 1992. 317 p. Print.
- Hargreaves J. K. The Solar-Terrestrial Environment. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 420 p. Print.
- Ivanov-Holodnyj G.S., Mihajlov A.V. Prognozirovanie sostojanija ionosfery (determinirovannyj podhod) [Forecasting the state of ionosphere (determined approach)]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980. 192 p.
- Gombosi T. I. Physics of the Space Environment. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 339 p. Print.
- McFarland M, Albritton D. L., Fehsenfeld F. C., Ferguson E. E., and Schmeltekopf A. L. Flow-drift technique for ion mobility and ion-molecule reaction rate constant measurements. II. Positive ion reaction of N^+ , O^+ , and N_2^+ with O_2 and O^+ with N_2 from thermal to ~ 2 eV. J. Chem. Phys. 1973. Vol. 59, N. 12. P. 6620–6628. Print.
- Pharo M. W., Scott L. R., Mayr H. G., Brace L. H., and Taylor H. A.. An experimental study of the ion chemistry and thermal balance in the E- and F-regions above Wallops Island. Planet. Space Sci. 1971. Vol. 19. P. 15–15. Print.
- Prolls G. W. Physics of the Earth's Space Environment. An Introduction. Berlin: Springer, 2004. 513 p. Print.
- Kelley M. The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics. 2nd Edition. San Diego: Academic Press, Inc, 2009. 576 p. Print.
- Stubbe P. Frictional forces and collision frequencies between moving ion and neutral gases. Technical Report. Greenbelt, Maryland: Goddard Space Flight Center, 1967. 41 p. Print.
- Stubbe P. Frictional forces and collision frequencies between moving ion and neutral gases. J. of Atm. and Ter. Physics. 1968. Vol. 30, N. 12. P. 1965–1985. Print.
- Godunov S. K., Ryabenkii V.S. Difference Schemes. An Introduction to the Underlying Theory. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1987. 488 p. Print.
- Samarskii A. A. The Theory of Difference Schemes. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001. 786 p. Print.
- Heppner J. P., Maynard N.C. Empirical High-Latitude Electric Field Model. J. of Geoph. Res. 1987. Vol. 92, N. A5. P. 4467–4489. Print.
- Rich F. J., Maynard N.C. Consequences of Using Simple Analytical Functions for the High-Latitude Convection Electric Field. J. of Geoph. Res. 1989. Vol. 94, N. A4. P. 3687–3701. Print.

References (transliterated)

- Kohl H, King J.W., Eccles D. Some effects of neutral air winds on the ionospheric F-layer. J. of Atm. and Ter. Physics. 1968. Vol. 30 P. 1733–1744. Print.
- Schunk R. W. A mathematical Model of the Middle and High Latitude Ionosphere. Pure Appl. Geophys. 1988. Vol. 127, Issue 2–3. P. 255–303. Print.

- Kohl H, King J.W., Eccles D. Some effects of neutral air winds on the ionospheric F-layer. J. of Atm. and Ter. Physics. 1968. Vol. 30 P. 1733–1744. Print.
- Schunk R. W. A mathematical Model of the Middle and High Latitude Ionosphere. Pure Appl. Geophys. 1988. Vol. 127, Issue 2–3. P. 255–303. Print.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розв'язок рівняння неперервності квазірівноважного розподілу іонів атомарного кисню при теоретичному моделюванні електронної концентрації F2-області іоносфери / С. В. Грінченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 33 – 43. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2078-9998.

Решение уравнения непрерывности квазиравновесного распределения ионов атомарного кислорода при теоретическом моделировании электронной концентрации F2-области ионосферы / С. В. Гринченко // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – № 47 (1268). – С. 33 – 43. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2078-9998.

The solution of the continuity equation of the quasi-equilibrium atomic oxygen ions distribution for the theoretical simulation of the F2 region electron density / S. V. Grinchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No. 47 (1268). – P. 33 – 43. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2078-9998.

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Грінченко Сергій Володимирович – Інститут іоносфери НАН та МОН України, м. Харків, науковий співробітник; тел.: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

Гринченко Сергей Владимирович – Інститут іоносфери НАН та МОН України, г. Харків, науковий співробітник; тел.: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

Grinchenko Sergii Volodymyrovych – Institute of ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Kharkiv, researcher; tel.: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

УДК 550.388.1:621.396

Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, Я. Н. ЧЕПУРНЫЙ**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕЖИМА ОДНОВРЕМЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ВЕРТИКАЛЬНОМ И НАКЛОННОМ НАПРАВЛЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ РАДАРОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ**

Розглянуто апаратно-методичні особливості режиму роботи радарів некогерентного розсіяння при одночасному зондуванні іоносфери в вертикальному та похилому напрямках. Наведено характеристики антен іоносферної обсерваторії Інституту іоносфери (Україна, Харків), структурну схему радарів в режимі зондування іоносфери двома антенами та експериментальні результати.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, параметри іоносфери, радіолокаційні антени, динамічні та хвильові процеси в іоносфері.

Рассмотрены аппаратно-методические особенности режима работы радаров некогерентного рассеяния при одновременном зондировании ионосферы в вертикальном и наклонном направлениях. Приведены характеристики антен ионосферной обсерватории Института ионосферы (Украина, Харьков), структурная схема радаров в режиме зондирования ионосферы двумя антеннами и экспериментальные результаты.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, параметры ионосферы, радиолокационные антенны, динамические и волновые процессы в ионосфере.

Instrumental and methodological features of the incoherent scatter radars operating mode of simultaneously sounding the ionosphere in vertical and oblique directions are considered. The characteristics of the antennas of Ionospheric Observatory of Institute of Ionosphere (Ukraine, Kharkiv), the radar block diagram for the mode of ionosphere sounding by two antennas and experimental results are presented.

Keywords: incoherent scatter radar, ionospheric parameters, radar antennas, dynamic and wave processes in the ionosphere.

Введение. Проведение экспериментов с одновременным зондированием в вертикальном и наклонном направлениях значительно повышает возможности исследования ионосферы и, в частности, динамических процессов в ионосфере методом некогерентного рассеяния (НР). Это, прежде всего, даёт возможность не только определять полный вектор скорости движения ионосферной плазмы, но и, регистрируя волновые возмущения, определять направление распространения волн или, зная координаты источника волновых возмущений (нагревного стэнда, места старта ракеты, землетрясения и т.п.), регистрировать возмущения, вызванные именно этим источником, а также определять скорость их распространения.

Целью данной работы является представление особенностей реализации и оценка возможности одновременного использования двух антенн для исследования временных и пространственных вариаций ионосферных параметров, динамических и волновых процессов в ионосфере.

Аппаратно-методическая реализация одновременных измерений параметров ионосферы при зондировании ионосферы в двух направлениях. В составе ионосферной обсерватории Института ионосферы имеются радары с зенитной и полноповоротной антеннами [1].

Зенитная антенна НДА-100 представляет собой двухзеркальную параболическую антенну с диаметром большого зеркала 100 м и в настоящее время является одной из наибольших антенн в мире. Рупор пирамидальной формы возбуждается двумя ортогонально расположенными штырями, благодаря чему обеспечивается возможность работы радара НР с сигналами с круговой поляризацией (для исключения искажений высотного профиля мощности НР сигнала в результате влияния эффекта Фарадея) или двумя

сигналами с линейной поляризацией (для измерения концентрации электронов с применением эффекта Фарадея [2–4]). Полноповоротная антенна ППА-25 является однозеркальной параболической антенной с диаметром зеркала 25 м. Рупорный излучатель также возбуждается двумя ортогонально расположенными штырями.

Основные параметры антенн представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры зенитной НДА-100 и полноповоротной ППА-25 антенн

	НДА-100	ППА-25
Эффективная площадь, м ²	3700	290
Коэффициент усиления, дБи	41.1	30.1
Ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности, град	1.2	5.1
Уровень 1-го бокового лепестка, дБ	-14.6	-19.6
Коэффициент использования поверхности апертуры (КИП)	0.45	0.6

Затенение центральной части раскрытия антенны НДА-100 малым зеркалом ведет к некоторому снижению КИП и повышению уровней боковых лепестков.

На рис. 1 приведены нормированные диаграммы направленности антенн, полученные в результате численного компьютерного моделирования.

Для реализации работы радаров с одновременным использованием зенитной и полноповоротной антенн необходимо было решить следующие задачи:

– обеспечить синхронную работу всех устройств радарной установки;

© Л. Я. Емельянов, Я. Н. Чепурный, 2017

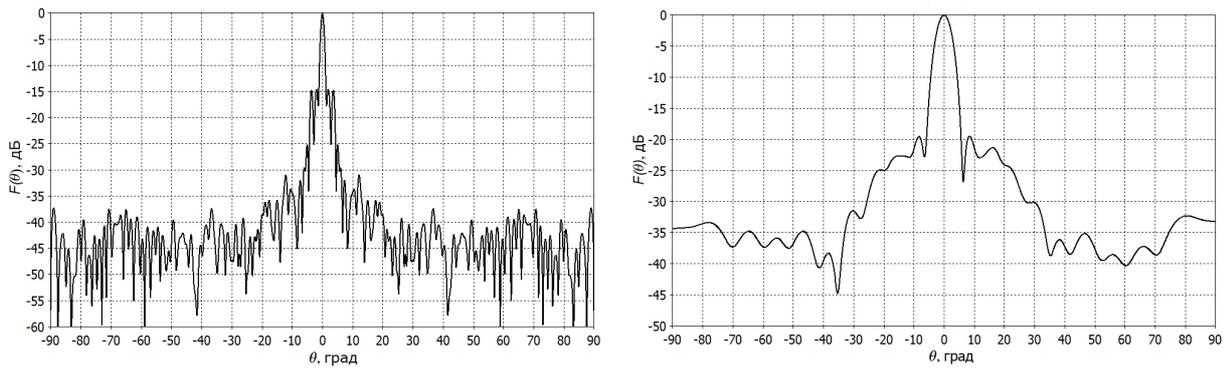


Рис. 1 – Нормированные диаграммы направленности зенитной (НДА-100) и полноворотной (ППА-25) антенн

– обеспечить электромагнитную совместимость при синхронной работе радаров;

– обеспечить измерение корреляционной функции сигнала НР на низкой частоте (обеспечить в каждом радаре перенос спектра НР сигнала на нулевую частоту с точностью до доплеровского сдвига, обусловленного движением плазмы вдоль луча радара, и выделение квадратурных сигналов для корреляционной обработки сигналов на низкой частоте с возможностью определения скорости движения плазмы).

Первая задача решена благодаря использованию общего для обоих радаров синхронизатора, формирующего следующие сигналы: сигналы запуска передатчиков; сигналы стробирования для выделения зондирующих импульсов; бланкирующие импульсы, предназначенные для запираания радиоприемных устройств (РПрУ) во время зондирования, и сигнал начала периода посылок (начала радиолокационной развёртки), подаваемый на цифровые устройства обработки.

Электромагнитная совместимость радаров с зенитной и полноворотной антеннами достигается

использованием сигналов с круговой поляризацией с противоположными направлениями вращения вектора электрического поля, применения буферных каскадов на выходах гетеродинов приемников и экранированием отдельных узлов аппаратуры.

Когерентность работы радаров обеспечивается синтезом зондирующих сигналов и сигналов гетеродинов РПрУ из сигналов задающей системы радара НР. Это, в частности, дает возможность измерять малые (по сравнению с шириной спектра НР сигнала) доплеровские сдвиги спектра, которые используются для определения радиальной скорости движения ионосферной плазмы.

Для обеспечения экспериментов, предоставляющих возможность определения параметров ионосферы одновременно в двух направлениях, радио- и вычислительное оборудование ионосферной обсерватории было модернизировано. Структурная схема радаров НР в режиме зондирования ионосферы одновременно двумя антеннами представлена на рис. 2.

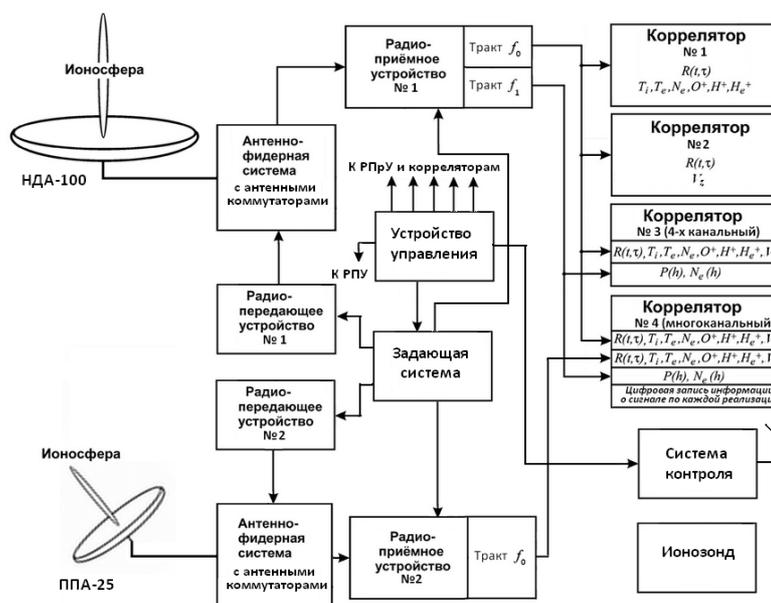


Рис. 2 – Структурная схема радаров НР в режиме зондирования ионосферы двумя антеннами

Сформированные задающей системой составные радиоимпульсные сигналы подаются на радиопередающие устройства (РПУ), усиливаются и поступают по фидерным трактам через антенные коммутаторы на антенны НДА-100 и ППА-25. Антеннами излучаются сигналы соответственно в вертикальном и выбранном наклонном направлениях. Каждый из них представляет собой составной радиоимпульсный двухчастотный сигнал, один из элементов которого имеет длительность 650 мкс и несущую частоту $f_0 = 158$ МГц, а второй – длительность 135 мкс и частоту $f_1 = f_0 + 0,1$ МГц.

Рассеянные ионосферой сигналы принимаются этими же антеннами и через антенные коммутаторы антенно-фидерного тракта подаются на входы соответствующих РПрУ. В РПрУ осуществляется усиление принятых сигналов, их селекция в трактах « f_0 » и « f_1 », фильтрация, перенос спектра в область низких частот и выделение квадратурных сигналов для каждого из элементов с помощью синхронного детектирования для дальнейшей корреляционной обработки.

В результате приёма и обработки рассеянного ионосферой сигнала от первого элемента определяются электронная концентрация N_e , температуры ионов T_i и электронов T_e , вертикальная скорость движения плазмы V_z и ионный состав для ряда высот вблизи и выше максимума ионизации с разрешением по высоте около 100 км. Отклик от второго элемента используется для определения мощности НР сигнала, рассеянного плазмой в диапазоне высот 100–550 км, с разрешением по высоте 20 км и коррекции высотного профиля концентрации электронов. Определяемые с помощью корреляторов параметры ионосферы приведены на рис. 2.

Устройство управления формирует управляющие импульсные сигналы на все системы радаров.

Система контроля формирует сигналы (белый шум, узкополосные радиоимпульсные шумовые сигналы с известными спектрами, соответствующими спектрам некогерентного рассеяния, гармонический сигнал). Эти сигналы подаются через контрольные антенны по эфиру на антенны НДА-100 и ППА-25 или непосредственно на вход РПрУ для контроля антенно-фидерных устройств и приемно-обрабатывающих систем. Также осуществляется контроль радиопередающих устройств.

Ионозонд «Базис» используется в составе радаров НР для калибровки измерений концентрации электронов путём привязки измеряемой критической частоты к максимуму относительного высотного профиля концентрации электронов, а также получения дополнительной информации об ионосфере из ионограмм.

В течение ряда лет был проведен большой комплекс ремонтно-профилактических работ с антенной ППА-25, а также работ по повышению стабильности и точности настройки приемно-передающих трактов радара.

Статистическая погрешность определения ионосферных параметров (в том числе параметров, характеризующих динамические процессы в ионосфере) тем меньше, чем больше отношение сигнал/шум. Если сравнить возможности радаров с антеннами НДА-100 и ППА-25, установленной в вертикальном направлении зондирования, мощности НР сигнала на входах РПрУ должны отличаться в 12,8 раз в соответствии с выражением (1) [2], что связано с отличием площадей их эффективных поверхностей при прочих равных условиях.

$$P_c(h) = \frac{0,76 P_n \eta c t_n A \sigma N_e(h)}{16\pi h^2}, \quad (1)$$

где $P_c(h)$ – мощность сигнала, некогерентно рассеянного на высотном участке с центром на высоте h , Вт;

P_n – импульсная мощность передатчика, Вт;

η – к.п.д. антенно-фидерного тракта;

c – скорость света;

A – эффективная площадь поверхности антенны, м²;

σ – эффективное сечение рассеяния электрона, м².

Полезный сигнал принимается на фоне космического и аппаратного шума, мощность которого, приведенная к входу РПрУ, равна

$$P_{ш} = k T_c \Delta F, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана;

T_c – температура системы;

ΔF – эффективная ширина полосы пропускания приемника.

Для повышения отношения сигнал/шум ($q = P_c/P_{ш}$) необходимо уменьшать ΔF , учитывая при этом характеристики НР сигнала, которые зависят от исследуемой высоты, времени суток, сезона, солнечной и геомагнитной активностей и др. [5]. В связи с этим в выходных трактах РПрУ (трактах выделения квадратурных сигналов) используются ФНЧ, наиболее приемлемые для условий экспериментов: в тракте « f_0 » РПрУ антенны НДА-100 – фильтры Кауэра 7-го порядка с формой АЧХ, близкой к прямоугольной, и шириной полосы пропускания по уровню половинной мощности, равной 9,5 кГц (для определения параметров ионосферы на высотах 200–1500 км); в тракте « f_1 » РПрУ антенны НДА-100 – фильтры Чебышева 3-го порядка с шириной полосы пропускания 6,0 кГц (для определения мощности НР сигнала на высотах в районе и ниже максимума ионизации); в РПрУ антенны ППА-25 – фильтры Кауэра 7-го порядка с формой АЧХ, близкой к прямоугольной, и шириной полосы пропускания по уровню половинной мощности, равной 5,5 кГц (для определения параметров ионосферы на высотах вблизи максимума и ниже, где присутствуют электроны и ионы атомарного кислорода).

Отличие в отношении сигнал/шум для радаров с антеннами, диаграммы направленности которых неодинаковы, имеет место даже при одном

направлении зондирования из-за различия мощности принимаемого космического шума. Это связано с различием шумовой температуры участка неба, попадающего в диаграмму направленности антенны (в выражении (2) температура системы T_c включает в себя температуру неба как составную часть).

Эксперимент с двумя антеннами показал, что при вертикальном направлении зондирования обеими антеннами, одинаковой импульсной мощности передаваемого сигнала (около 2 МВт) отношение сигнал/шум в тракте антенны НДА-100 в 11 раз больше, чем в тракте антенны ППА-25.

Для обеспечения режима работы с двумя антеннами и использования максимума возможностей радара НР задействован новый многоканальный коррелятор, выполненный на основе быстродействующего аналого-цифрового преобразователя E20-10 и персонального компьютера с высоким быстродействием [6]. Он используется для одновременной корреляционной обработки сигналов, выделенных радиоприёмной системой по трём парам квадратурных каналов: тракта зенитной антенны НДА-100 с несущей частотой f_0 , тракта антенны НДА-100 с несущей частотой f_1 и тракта полноповоротной антенны ППА-25 с несущей частотой f_0 .

Был проведен ряд экспериментов с одновременным зондированием ионосферы в вертикальном и наклонном направлениях.

Отмечено, что при изменении направления антенны ППА-25 изменяется мощность шума и, следовательно, отношение сигнал/шум, что связано с различием шумовой температуры участка неба, попадающего в диаграмму направленности антенны.

Кроме этого, выяснено, что наибольшее количество отражений от летательных объектов и космического мусора имеет место при вертикальном направлении зондирования антенной ППА-25. Оно значительно превышает количество помех в тракте с антенной НДА-100. Это объясняется тем, что вероятность попадания объектов в зону действия антенны ППА-25 больше, чем НДА-100 из-за более широкого главного лепестка диаграммы направленности, а также меньшим ослаблением помех при приеме боковыми лепестками. При наклоне антенны ППА-25 часть её боковых лепестков направлена в землю и не участвует в приеме помех. Анализ показал, что наибольшее количество помех попадает в диаграмму направленности с восточного и северо-восточного направлений в виде отражений от самолетов, находящихся на высотах около 10 км и дальностях от радара НР 100–400 км [7].

Принцип одновременного вертикального и наклонного зондирования ясен из диаграммы, приведенной на рис. 3.

Здесь R – радиус Земли, D – дальность до середины рассеивающего радиоволну объемного участка ионосферы, h – высота этого участка над поверхностью земли, Δh – величина, характеризующая разрешающую способность по высоте (при

вертикальном зондировании пропорциональна длительности зондирующего импульса, а при наклонном зондировании определяется длительностью импульса и шириной диаграммы направленности основного лепестка антенны в степени, зависящей от угла наклона).

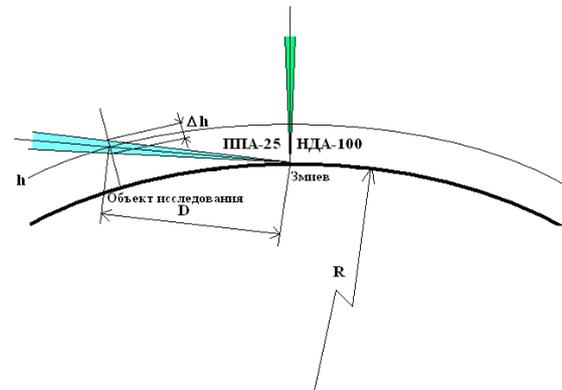


Рис. 3 – Диаграмма одновременного вертикального и наклонного зондирования

Разработана программа для расчета дальности D , высотного разрешения Δh и зенитного угла по известным радиусу Земли R , координатам объекта и харьковского радара НР и задаваемым высотам h центра рассеивающего объема плазмы над объектом. Пример такого расчета приведен на рис. 4.

Чернобыль
Введенные координаты объекта [в градусах]:
Широта=51.4039 Долгота=30.0694

Расстояние до объекта по поверхности Земли [км] = 721
Угол азимута [градусы] = -74.5

h [км]	D [км]	dh [км]	Зенит. угол [градусы]
80	730	65	87.0
90	732	65	86.2
100	733	65	85.5
110	735	66	84.7
120	737	66	83.9
130	740	66	83.2
140	742	67	82.4
150	745	67	81.7
160	747	68	80.9
170	750	68	80.2
180	753	69	79.5
190	756	69	78.7
200	759	70	78.0
210	762	70	77.3
220	766	71	76.6
230	769	72	75.9
240	773	72	75.2
250	776	73	74.5
260	780	74	73.8
270	784	75	73.2
280	788	75	72.5
290	792	76	71.8
300	796	77	71.2
310	801	78	70.5
320	805	79	69.9
330	810	79	69.3
340	814	80	68.6
350	819	81	68.0
360	824	82	67.4
370	829	83	66.8
380	834	84	66.2
390	839	85	65.6
400	844	86	65.0
410	849	87	64.5
420	855	89	63.9
430	860	90	63.3
440	866	91	62.8
450	871	92	62.2

Рис. 4 – Пример расчета ориентации антенны и параметров зондируемого объема ионосферной плазмы

Эксперименты по исследованию ионосферы при одновременном ее зондировании радарными с зенитной и полноповоротной антеннами проводились на радаре НР эпизодически, поскольку они требуют

значительного энергопотребления.

В качестве примера на рис. 5 приведены экспериментальные зависимости параметров НР сигнала и ионосферы от высоты (для НДА-100) и дальности (для ППА-25), полученные в полдень

22 декабря 2011 г. Полноповоротная антенна была направлена на запад под зенитным углом 39°. Длительность сеанса измерений 15 мин. Критическая частота слоя F2 ионосферы была равна 8,3 МГц.

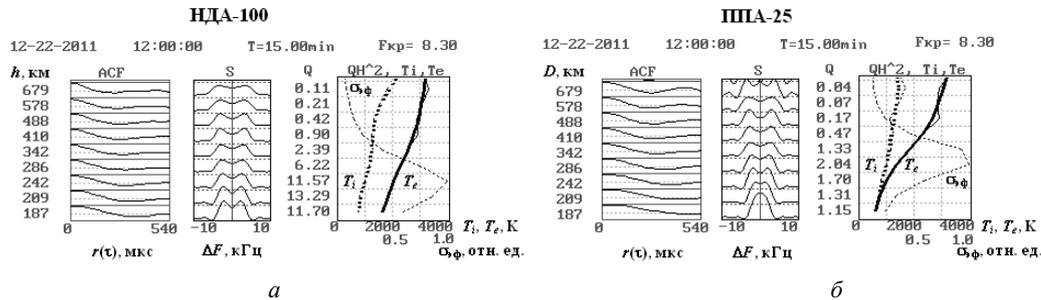


Рис. 5 – Зависимости корреляционных функций и спектров НР сигнала, отношений сигнал/шум q (числовые значения), нормированных значений эффективного сечения рассеяния $\sigma_{\text{эф. норм.}} = qh^2 / (qh^2)_{\text{max}}$, температур ионов T_i и электронов T_e от высоты, измеренные радаром НР с зенитной антенной (а), и от дальности, измеренные радаром с полноповоротной антенной, направленной на запад под зенитным углом 39° (б)

Видно, что в данном эксперименте отношение сигнал/шум в районе максимума профиля $\sigma_{\text{эф. норм.}}$ (близкого по высоте к максимуму слоя F2 ионосферы) в тракте с антенной НДА-100 приблизительно в 6 раз больше, чем в тракте с антенной ППА-25. В связи с наклоном антенны ППА-25, высота максимума профиля $\sigma_{\text{эф. норм.}}$ радара с НДА-100 меньше дальности максимума профиля $\sigma_{\text{эф. норм.}}$ радара с ППА-25. Все параметры, приведенные на рис. 5, б, соответствуют высотам, меньшим значений дальности D , показанных

слева от графика. Отличие профилей температур ионов и электронов (их сближение в диапазоне дальностей 187–340 км по результатам измерений с ППА-25) объясняется тем, что они фактически измерены с высот 145–280 км. Следует отметить, что с увеличением наклона антенны ППА-25 относительно зенита появляется возможность исследовать динамические и волновые процессы в ионосфере на высотах нижней ионосферы. При этом разрешающая способность по высоте улучшается.

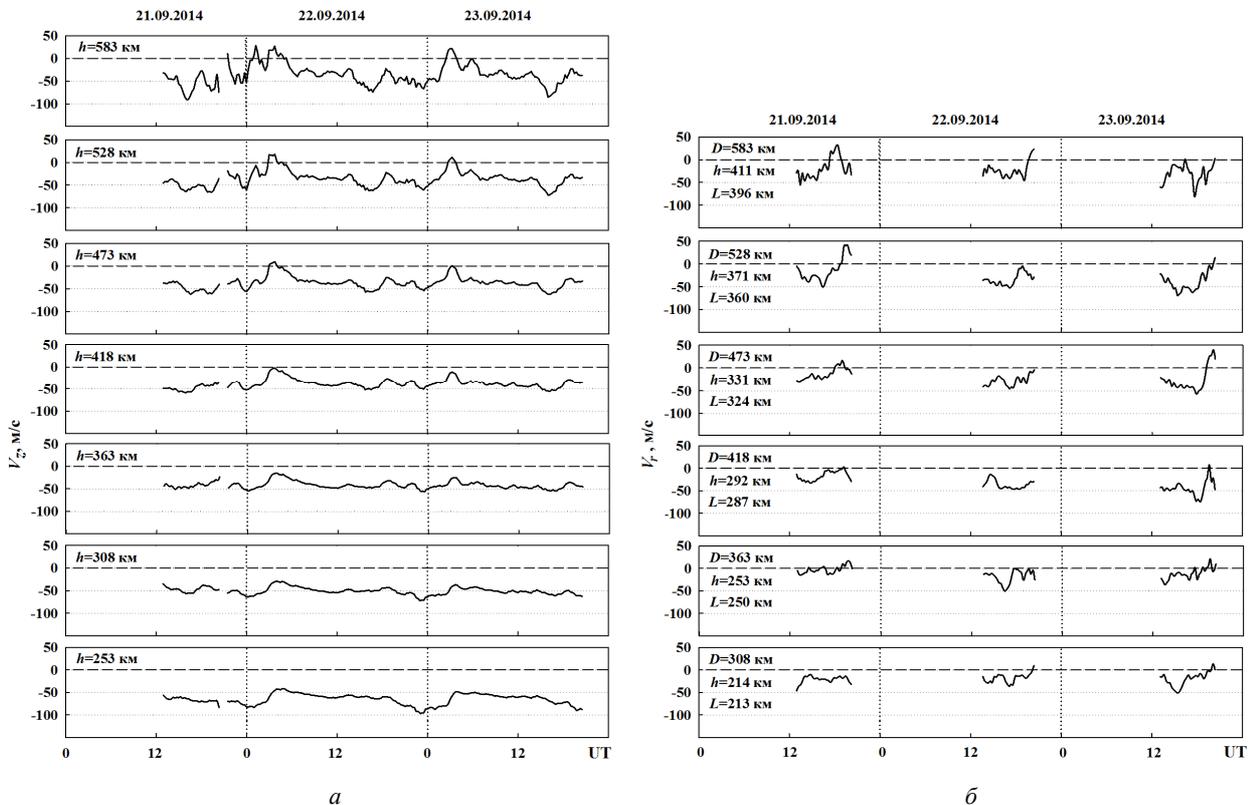


Рис. 6 – Временные вариации радиальной скорости движения ионосферной плазмы при одновременном зондировании антенной НДА-100 в зенит (а) и полноповоротной антенной ППА-25 (б) в направлении: азимут 50°, зенитный угол 47°

На рис. 6 приведені результати одночасних вимірювань вертикальної складової швидкості руху іоносферної плазми V_z і радіальної швидкості V_r двома радаром – з зенітної НДА-100 і повноповоротної ППА-25 антенами – в період 21–23 вересня 2014 г. при спокійній геомагнітній обстановці (A_p -індекси в ці дні були рівні 7, 9, 11 відповідно). Антена ППА-25 була нахилена (зенітний кут 47°) і направлена на схід (кут азимута 50°). Радар з ППА-25 працював частину часу. Вплив перешкобок від літаючих об'єктів, що падають періодично в діаграму напрямленості антени, було усунуто в процесі обробки інформації.

Здесь представлені дані сеансів вимірювань при часовому накопленні 15 хв і додатковому усередненні значень швидкості по 5 сеансам. На рис. 6, б існують наступні позначення: D – нахилена дальність, h – висота розсіюючого об'єкта плазми над поверхнею землі, L – відстань по поверхні землі до об'єкта, над яким знаходиться розсіюючий об'єм плазми.

Из рис. 6 видно удовлетворительное согласие между результатами, полученными при зондировании в разных направлениях. Наблюдаемые различия могут быть вызваны разным разрешением по дальности, горизонтальным градиентом поля скоростей на исследуемых высотах и разным направлением основных лепестков диаграмм направленности.

Выводы. Одночасное использование зенитной и повноповоротной антенн значительно повышает возможности исследования динамических процессов в ионосфере методом НР и позволяет определять пространственные вариации параметров ионосферы центрально-европейского региона.

Список литературы

1. *Domnin, I. F.* Kharkiv Incoherent Scatter Facility / *I. F. Domnin, Ya. M. Chepurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.]* // Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2014. – No 47 (1089). – P. 28–42.
2. *Эванс Дж. В.* Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / *Дж. В. Эванс* // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57, № 4. – С. 139–175.
3. *Farley D. T.* Faraday rotation measurements using incoherent scatter / *D. T. Farley* // Radio Sci. – 1969. – V. 4, No 2. – P. 143–152.
4. *Головин В. И.* Наблюдения ионосферы с помощью метода некогерентного рассеяния / *В. И. Головин, Е. В. Рогожкин, В. И. Таран, Черняев С. В.* // Вестн. Харьк. политехн. ин-та: Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. – 1979. – № 155. – Вып. 1. – С. 12–22.

5. *Емельянов Л. Я.* Квазиоптимальный прием сигналов некогерентного рассеяния / *Л. Я. Емельянов, А. В. Богомаз, И. М. Касымов* // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015, № 37 (1146). – С. 79–86.
6. *Искра Д. А.* Повышение точности определения автокорреляционных функций сигнала некогерентного рассеяния / *Д. А. Искра* // International School-Conference "Remote radio sounding of the ionosphere" (ION-2013) September, 30 – October, 4, 2013. – Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine. – Book of Abstracts. – 2013. – P 45.
7. *Chepurnyy Ya. M.* Estimation of clutters from aircrafts during ionospheric measurements using incoherent scatter radar with 100-meter two-mirror antenna / *Ya. M. Chepurnyy, L. Ya. Emelyanov, D. O. Iskra, M. O. Shulga* // XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). IEEE Conference Publications. – 2017. – P. 401–405. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972675.

References (transliterated)

1. *Domnin I. F., Chepurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya. et al.* Kharkiv Incoherent Scatter Facility. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere.* Kharkiv, NTU "KhPI", 2014, no. 47 (1089), pp. 28–42.
2. *Jevans, Dzh. V.* Teoreticheskie i prakticheskie voprosy issledovaniya ionosfery metodom nekogerentnogo rassejaniya radiovoln [Theory and practice of Thompson scatter]. *TIIEr* [Proc. IEEE]. vol. 57, no. 4. pp. 139–175.
3. *Farley D. T.* Faraday rotation measurements using incoherent scatter. *Radio Sci.*, 1969, vol. 4, no 2, pp. 143–152.
4. *Golovin V. I., Rogozhkin Ye. V., Taran V. I., Chernyayev C. V.* Nablyudeniya ionosfery s pomoshch'yu metoda nekogerentnogo rasseyaniya [Observations of the ionosphere with the help of the method of incoherent scattering]. *Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta: Issledovaniye ionosfery metodom nekogerentnogo rasseyaniya.* [Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute]. Kharkiv, 1979, no. 155 (1), pp. 12–22.
5. *Emelyanov L. Ya., Bogomaz A. V., Kasymov I. M.* Kvaziopital'nyy priem signalov nekogerentnogo rasseyaniya [Quasi-optimal reception of the incoherent scatter signals]. *Visn. Nats. tekhn. in-tu «Kharkiv's'kiy politekhnichniy institut». Zbirnyk naukovikh prats'. Seriya: Radiofizyka ta ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Radiophysics and Ionosphere]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 37 (1146), pp. 79–86.
6. *Iskra D. A.* Povysheniye tochnosti opredeleniya avtokorrelatsionnykh funktsiy signala nekogerentnogo rasseyaniya [Increase in accuracy of determination of the incoherent scatter signal autocorrelation functions]. International School-Conference "Remote radio sounding of the ionosphere" (ION-2013) September, 30–October, 4, 2013. Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine. *Book of Abstracts.* 2013, p. 45.
7. *Chepurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya., Iskra D. O., Shulga M. O.* Estimation of clutters from aircrafts during ionospheric measurements using incoherent scatter radar with 100-meter two-mirror antenna. XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). *IEEE Conference Publications.* 2017, pp. 401–405. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972675.

Поступила (received) 30.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Забезпечення режиму одночасного зондування іоносфери у вертикальному та похилому напрямках за допомогою радарів некогерентного розсіяння / Л. Я. Ємельянов, Я. М. Чепурний // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 44 – 50. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

Обеспечение режима одновременного зондирования ионосферы в вертикальном и наклонном направлениях с помощью радаров некогерентного рассеяния / Л. Я. Емельянов, Я. Н. Чепурный //

Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – № 47 (1268). – С. 44 – 50. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

Providing a simultaneous ionospheric sounding mode in vertical and inclined directions using incoherent scatter radars / L. Ya. Emelyanov, Ya. M. Chepurnyy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 47 (1268). – P. 44 – 50. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ємельянов Леонід Якович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери НАН і МОН України, завідувач відділу, м. Харків; тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Емельянов Леонид Яковлевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, заведующий отделом, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Emelyanov Leonid Yakovlevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Ionosphere NAS and MES of Ukraine, Head of Department, Kharkiv; tel.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Чепурний Яків Миколайович – Інститут іоносфери НАН і МОН України, головний інженер, м. Харків; тел.: (057) 707-67-69; e-mail: yakov955@gmail.com.

Чепурный Яков Николаевич – Институт ионосферы НАН и МОН Украины, главный инженер, г. Харьков; тел.: (057) 707-67-69; e-mail: yakov955@gmail.com.

Chepurnyy Yakiv Mykolayovych – Institute of Ionosphere NAS and MES of Ukraine, Chief Engineer, Kharkiv; tel.: (057) 707-67-69; e-mail: yakov955@gmail.com.

УДК 550.388.2

М. В. ЛЯШЕНКО, А. В. СИДОРЕНКО**РЕГИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРЫ CERIM ПОН: РАСЧЁТ ВЫСОТЫ МАКСИМУМА СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ**

Представлено результати моделювання висоти максимуму області F2 іоносфери у залежності від рівня сонячної активності. Побудовано регресійні залежності висоти шару F2 від індексу сонячної активності $F_{10.7}$. Виконано розрахунок сезонно-добових варіацій висоти максимуму області F2 іоносфери для фаз мінімуму та максимуму сонячної активності. Представлено результати порівняльного аналізу отриманих результатів з експериментальними даними та модельними розрахунками інших авторів.

Ключові слова: висота максимуму області F2 іоносфери, індекс сонячної активності, регресійні залежності, регіональна модель іоносфери

Представлены результаты моделирования высоты максимума области F2 ионосферы в зависимости от уровня солнечной активности. Построены регрессионные зависимости высоты слоя F2 от индекса солнечной активности $F_{10.7}$. Выполнен расчет сезонно-суточных вариаций высоты максимума области F2 ионосферы для фаз минимума и максимума солнечной активности. Представлены результаты сравнительного анализа полученных результатов с экспериментальными данными и модельными расчетами других авторов.

Ключевые слова: высота максимума области F2 ионосферы, индекс солнечной активности, регрессионные зависимости, региональная модель ионосферы

The results of the simulation of the height of the maximum of the ionosphere F2 region as a function of the level of solar activity are presented. The regression dependences of the height of the F2 layer on the solar activity index $F_{10.7}$ are constructed. The calculation of season-diurnal variations in the height of the maximum of the ionospheric F2 region for the phases of the minimum and maximum of solar activity has been performed. The results of a comparative analysis of the obtained results with experimental data and model calculations of other authors are presented.

Keywords: height of the maximum of the ionospheric F2 region, solar activity index, regression, regional model of ionosphere

Введение. Моделирование параметров среднеширотной ионосферы является одной из важных задач исследования околоземного космического пространства и проявлений космической погоды.

Как показывает практика, глобальные модели ионосферы и термосферы, такие как IRI (International Reference Ionosphere) [1], MSIS (Mass-Spectrometer-Incoherent-Scatter) [2], не всегда корректно отображают пространственно-временные вариации основных ионосферных параметров (концентрации электронов, температуры электронов и ионов, скорости переноса плазмы, ионный состав и др.) в конкретных гелиогеофизических условиях и конкретном регионе. Отчасти это связано с тем, что средства наблюдения за поведением параметров ионизированной среды неравномерно распределены по долготным секторам западного и восточного полушарий. Современные эмпирические модели верхней атмосферы построены на основе экспериментальных данных, полученных большей частью в западном полушарии. Существенные расхождения в распределении основных параметров среднеширотной ионосферы над Европой и Америкой вызваны несимметричностью ионосферы вследствие несовпадения положений географического и геомагнитного полюсов [3 – 6].

Радар некогерентного рассеяния (НР) в Харькове является на данный момент единственным в средних широтах Европы эталонным комплексным средством для получения сведений о параметрах и процессах, протекающих в ионосфере.

С учетом того, что физические свойства ионосферных параметров мало отличаются на расстоянии близко 1000 км (за исключением высокоширотной ионосферы), данные радара НР

могут быть использованы для создания региональной модели ионосферы. Данная модель будет справедлива в границах окружности с центром в Харькове и радиусом примерно 1000 км.

В настоящее время в Институте ионосферы НАН и МОН Украины создана региональная модель ионосферы CERIM ПОН по данным харьковского радара некогерентного рассеяния, полученных за период более трех десятков лет [7 – 9].

По региональной модели ионосферы можно рассчитать концентрацию электронов, температуру электронов и ионов, скорость переноса плазмы в широком диапазоне высот (200 – 750 км) в спокойных геомагнитных условиях. Модель также позволяет вычислить значения плотностей полного потока плазмы и потока заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии, скоростей нейтральных ветров в ионосфере, плотности потока тепла, переносимого электронами и величину энергии, подводимой к электронному газу. Также модель CERIM ПОН включает данные о величинах продольных составляющих тензоров амбиполярной диффузии и теплопроводности электронного газа, частот соударений заряженных и нейтральных частиц.

Целью данной работы является построение регрессионных зависимостей высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности в рамках развития региональной модели ионосферы CERIM ПОН.

Средства наблюдения и массив экспериментальных данных. Для построения регрессионных зависимостей высоты максимума области F2 ионосферы $hmF2$ от индекса солнечной активности $F_{10.7}$ использованы экспериментальные

© М. В. Ляшенко, А. В. Сидоренко, 2017

данные харьковского радара НР, полученные в период с 1980 по 2016 гг. в спокойных гелиогеофизических условиях. Указанный временной интервал охватывает более трех циклов солнечной активности.

Географические координаты радара: 49,6° с. ш., 36,3° в. д.; геомагнитные: $\Phi = 45,4^\circ$, $\Lambda = 117,7^\circ$; наклонение геомагнитного поля 66°, параметр Мак-Илвейна $L \approx 1,9$. Радар имеет крупнейшую в мире зенитную двухзеркальную параболическую антенну диаметром 100 м и предназначен для исследования ионосферы в интервале высот 100 – 1500 км. Рабочая частота радара – 158 МГц. Импульсная мощность радиопередающего устройства составляет 2 – 4 МВт, средняя мощность – 100 кВт. Коэффициент усиления антенны 12700, эффективная площадь антенны ~ 3700 м², ширина луча диаграммы направленности ~ 1°. Длительность импульса может меняться в пределах примерно от 70 до 800 мкс. Частота повторения импульсов 24,4 Гц. Шумовая температура системы около 1300 – 1800 К, двухканального приемника – 240 К.

Построение регрессионных зависимостей высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности. Наблюдение, детальный анализ и физическая интерпретация экспериментальных вариаций основных параметров ионосферной плазмы в различных гелиогеофизических условиях является необходимым для дальнейшего развития существующих ионосферных моделей. Использование большого объема экспериментального материала, полученного в предыдущие годы, и новых данных позволяют существенно уточнить существующие модельные пространственно-временные зависимости параметров ионосферы.

Для получения модельных эмпирических зависимостей высоты максимума слоя F2 ионосферы от индекса солнечной активности использованы данные, полученные на радаре некогерентного рассеяния в Харькове за период трех циклов солнечной активности. Возмущенные периоды (индекс $K_p \geq 4$) из рассмотрения исключались.

Для связи значений высоты $hmF2$ и индексов $F_{10,7}$ выбрана регрессия 1-го порядка. Такие зависимости имели следующий вид

$$hmF2 = a_0 + a_1 \cdot F_{10,7}.$$

Регрессионные зависимости $hmF2$ от индекса $F_{10,7}$ построены для каждого месяца года для 00 и 12 EE(S)T (см. рис. 1 – 8). Соответствующие коэффициенты регрессий a_0 и a_1 для каждого месяца представлены в табл. 1. Анализ полученных результатов показал, что самый низкий коэффициент корреляции получен для августа как для полдня, так и полуночи. Это связано с тем, что для августа имелось наименьшее количество экспериментальных данных в рассматриваемый период.

Полученные коэффициенты регрессии использовались в дальнейшем для обновления модельного блока региональной модели ионосферы CERIM ПОН, с помощью которого можно рассчитать значения высоты максимума области F2 ионосферы $hmF2$ для конкретного значения индекса солнечной активности $F_{10,7}$, сезона для 00 и 12 EE(S)T.

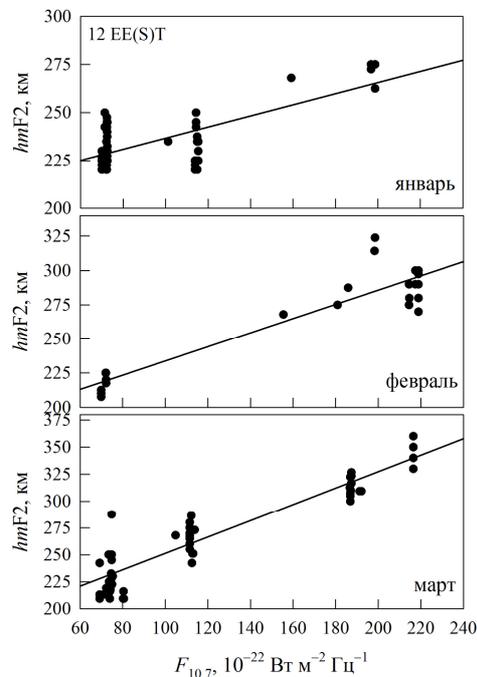


Рис. 1 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для января – марта для 12 EE(S)T

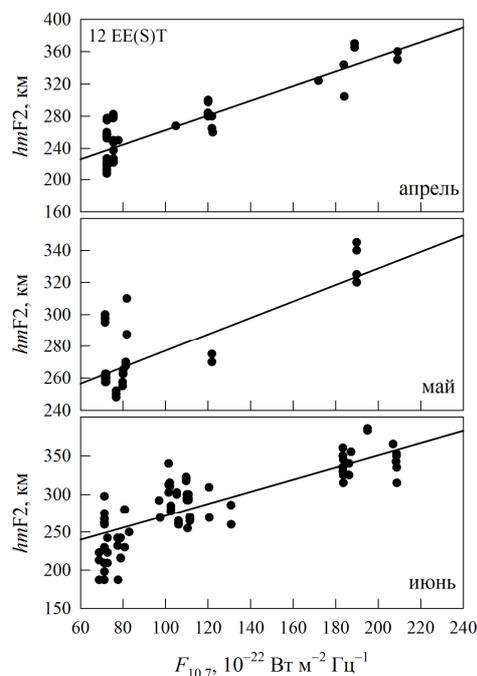


Рис. 2 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для апреля – июня для 12 EE(S)T

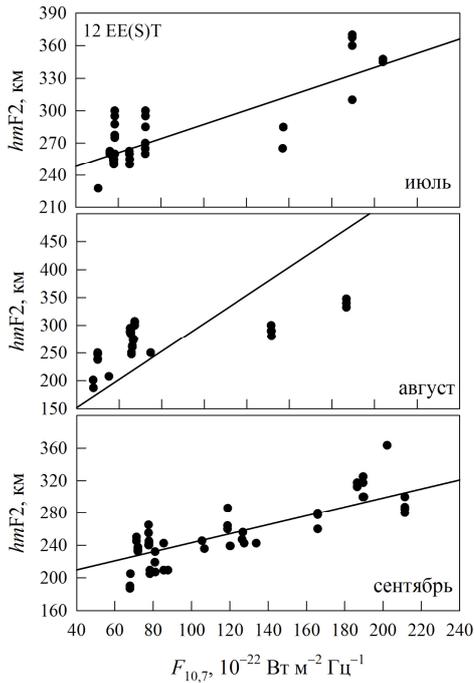


Рис. 3 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для октября – декабря для 12 EE(S)T

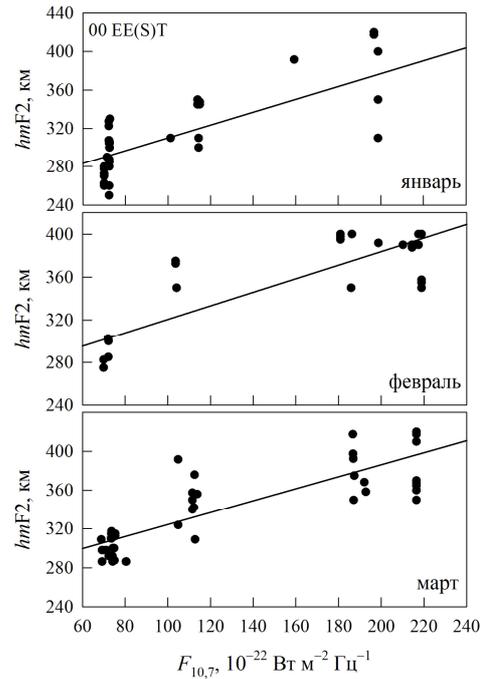


Рис. 5 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для января – марта для 00 EE(S)T

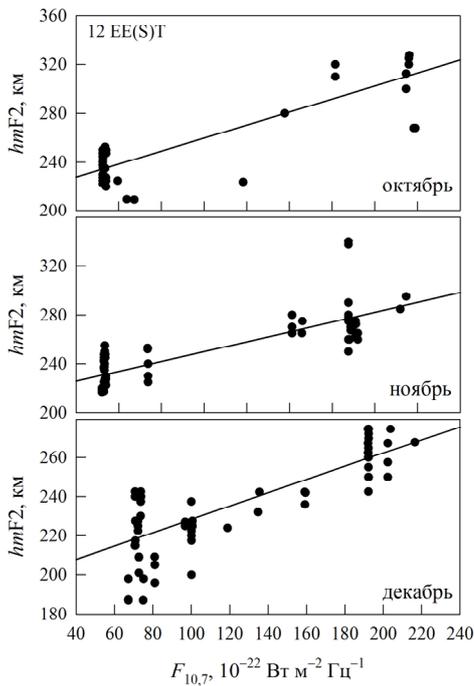


Рис. 4 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для октября – декабря для 12 EE(S)T

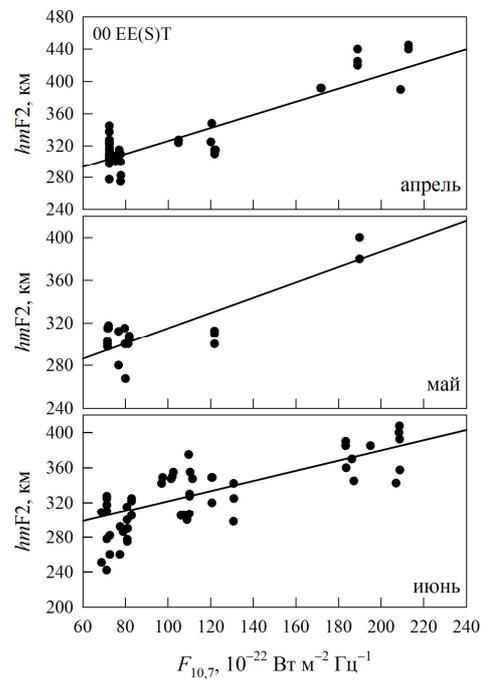


Рис. 6 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для апреля – июня для 00 EE(S)T

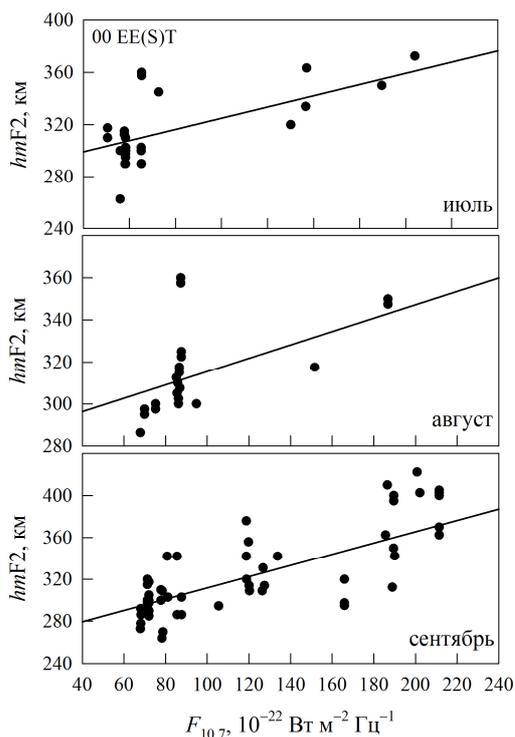


Рис. 7 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для июля – сентября для 00 EE(S)T

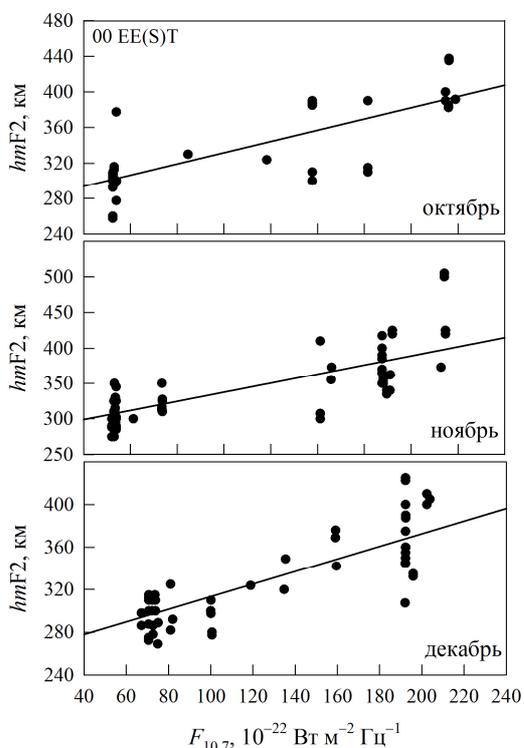


Рис. 8 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для октября – декабря для 00 EE(S)T

Таблица 1 – Коэффициенты регрессий и корреляции для соответствующих месяцев и 00 и 12 часов EE(S)T

месяц	12 EE(S)T			00 EE(S)T		
	a_0	a_1	r	a_0	a_1	r
январь	207,77	0,29	0,67	243,09	0,67	0,57
февраль	181,83	0,52	0,91	257,39	0,63	0,74
март	175,34	0,76	0,88	262,66	0,62	0,71
апрель	172,01	0,91	0,77	244,77	0,81	0,78
май	255,52	0,52	0,60	243,07	0,72	0,73
июнь	192,76	0,79	0,70	263,80	0,58	0,60
июль	208,68	0,66	0,71	273,30	0,43	0,54
август	196,57	0,73	0,49	283,56	0,32	0,29
сентябрь	187,51	0,56	0,69	258,02	0,54	0,55
октябрь	195,96	0,53	0,78	255,84	0,63	0,61
ноябрь	201,73	0,40	0,69	260,32	0,64	0,60
декабрь	194,40	0,34	0,66	254,22	0,59	0,66

Результаты сравнительного анализа. Ранее на основе измерений на радаре НР в Харькове были получены регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности [10]. В данном исследовании приведены регрессии для четырех сезонов – зима, лето, весеннее и осеннее равноденствия для полуденных и полуночных часов. Используя полученные ранее модельные зависимости [10] и результаты расчетов по модели CERIM ION (с учетом новых коэффициентов регрессий), выполнен сравнительный анализ модельных значений $hmF2$. Результаты модельных расчетов сравнивались с экспериментальными значениями высоты максимума области $hmF2$, полученными на радаре НР в Харькове в период минимума (2006 г.) и максимума (2012 г.) солнечной активности для характерных геофизических периодов – летнего и зимнего солнцестояний, осеннего и весеннего равноденствий. Для восстановления типичной формы суточных вариаций высоты максимума слоя F2 ионосферы использованы эмпирические зависимости, построенные на основе экспериментальных данных, полученных на сети среднеширотных станций ионосферного зондирования европейской части СССР [11].

На рис. 9 – 10 представлены модельные суточные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы и экспериментальные результаты в период минимума и максимума солнечной активности.

Как показал сравнительный анализ, увеличение длины ряда экспериментальных данных (выбран временной период, охватывающий более трех циклов солнечной активности) привело к существенному уточнению расчетов высоты максимума области F2 ионосферы. Для некоторых месяцев года (например, для августа) как для полуденных, так и полуночных значений имеет место недостаток экспериментальных данных и, как следствие этого, получены малые значения коэффициента корреляции r (см. табл. 1).

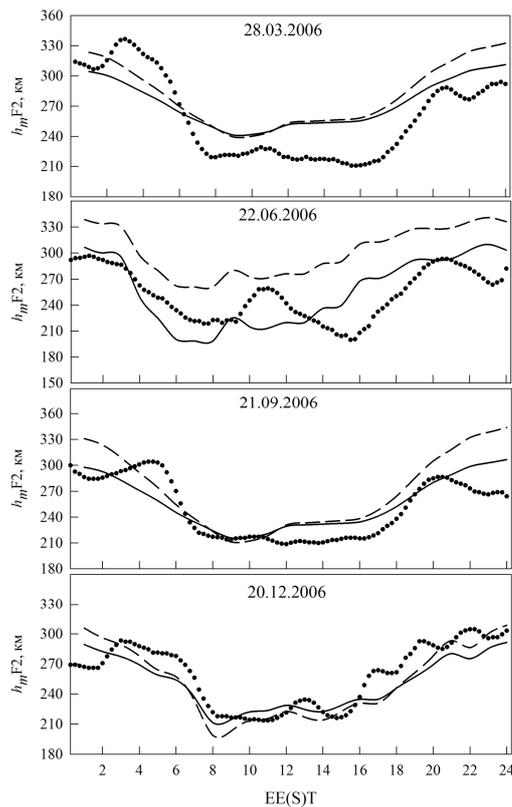


Рис. 9 – Сезонно-суточные вариации высоты минимума области F2 ионосферы в период минимума СА

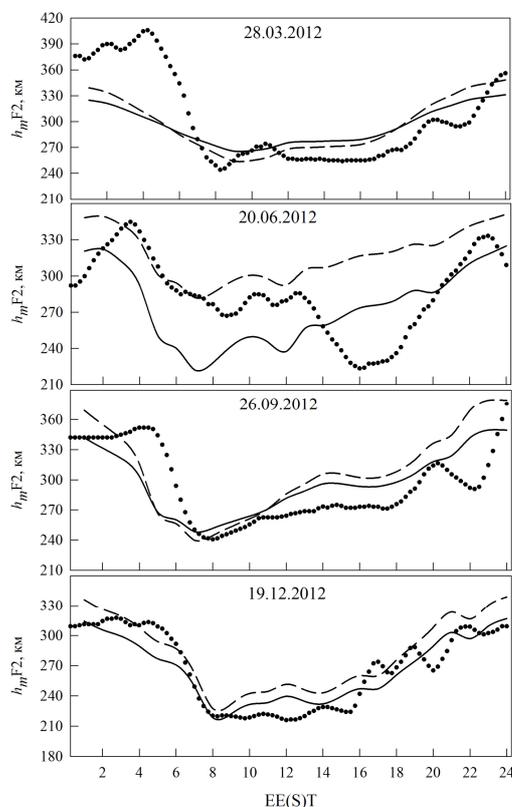


Рис. 10 – Сезонно-суточные вариации высоты максимума области F2 ионосферы в период максимума СА

Выводы. В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Выполнен статистический анализ экспериментальных данных высоты максимума области F2 ионосферы за период, охватывающий более трех циклов солнечной активности.

2. Построены регрессионные зависимости высоты слоя F2 $hmF2$ от индекса солнечной активности $F_{10,7}$ и получены соответствующие коэффициенты регрессий для каждого месяца года, 00 и 12 часов.

3. Полученные коэффициенты регрессий использованы для улучшения региональной модели ионосферы CERIM ION в рамках повышения точности расчета значений высоты слоя F2 в зависимости от уровня солнечной активности и сезона.

4. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов моделирования с ранее полученными модельными расчетами и экспериментальными данными.

Список литературы

1. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci.–2001.–Vol. 36, № 2.–P. 261–275.
2. Picone J. M. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues / J. M. Picone, Hedin A. E., D. P. Drob, A. C. Aikin // J. Geophys. Res. – 2002. – Vol. 107, № A12. – P. 1–16.
3. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
4. Schunk R. W. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry / R. W. Schunk, A. F. Nagy. – Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p.
5. Rishbeth H. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion / H. Rishbeth, K. J. F. Sedgemore-Schulthess, T. Ulich // Ann. Geophysicae. – 2000. – Vol. 18. – P. 945–956.
6. Sethi N. K. Diurnal and seasonal variations of h_mF2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001 / N. K. Sethi, R. S. Dabas, V. K. Vohra // Ann. Geophysicae. – 2004. – Vol. 22. – P. 453–458.
7. Chernogor L. F. Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) Based On The Kharkov Incoherent Scatter Radar Database / L. F. Chernogor, L. Ya. Emel'yanov, M. V. Lyashenko // 36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods.– Kyiv (17–22 August, 2009). – P. 38.
8. Chernogor L. Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) for Space Weather Forecasting / L. Chernogor, I. Dominin, M. Lyashenko // EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 02–07 May 2010). Geophysical Research Abstract.–Vol. 12, EGU2010-316-2, 2010.
9. Дзюбанов Д. А. Моделирование полуденных значений электронной концентрации в максимуме области F2 ионосферы по данным Харьковского радара некогерентного рассеяния / Д. А. Дзюбанов, И. Г. Захаров, М. В. Ляшенко // Космічна наука і технологія. – 2004. – Т. 10, № 2/3. – С. 28–35.
10. Дзюбанов Д. А. Анализ вариаций параметров F2-области в полувцикле солнечной активности / Д. А. Дзюбанов, И. В. Соколова, А. Ф. Кононенко // Вестник Харьковского политехнического института. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. – 1987. – Вып. 5, № 248. – С. 7–9.
11. Фаткуллин М. Н. Эмпирические модели среднениотной ионосферы / М. Н. Фаткуллин, Т. И. Зеленова, В. К. Козлов и др. – М.: Наука, 1981. – 256 с.

References (transliterated)

1. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*. 2001, vol. 36, no. 2, pp. 261–275.
2. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A12, pp. 1–16.
3. Brjunelli B. E., Namgaladze A. A. *Fizika ionosfery* [Physics of ionosphere]. M.: Nauka, 1988, 528 p.
4. Schunk R. W., Nagy A. F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge atmospheric and space science series, 2000, 555 p.
5. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K. J. F., Ulich T. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion. *Ann. Geophysicae.* – 2000, vol. 18, pp. 945–956.
6. Sethi N. K., Dabas R. S., Vohra V. K. Diurnal and seasonal variations of $h_m F_2$ deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001. *Ann. Geophysicae.* 2004, vol. 22, pp. 453–458.
7. Chernogor L. F., Emel'yanov L. Ya., Lyashenko M. V. Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) Based On The Kharkov Incoherent Scatter Radar Database // 36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods.– Kyiv (17–22 August, 2009). – P. 38.
8. Chernogor L., Domnin I., Lyashenko M. Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) for Space Weather Forecasting // EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 02–07 May 2010). Geophysical Research Abstract.–Vol. 12, EGU2010-316-2, 2010.
9. Dzubanov D. A., Zaharov I. G., Ljashenko M. V. Modelirovanie poludennyh znachenij jelektronnoj koncentracii v maksimume oblasti F2 ionosfery po dannym Har'kovskogo radara nekogerentnogo rassejanija [Modeling midday values of the electron density at the maximum of the F2 region of the ionosphere according to the Kharkov incoherent scatter radar]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space science and technology]. 2004, vol. 10, no. 2/3, pp. 28–35.
10. Dzubanov D. A., Sokolova I. V., Kononenko A. F. Analiz variacij parametrov F2-oblasti v polucikle solnechnoj aktivnosti [Analysis of the variations in the parameters of the F2 region in the half-cycle of solar activity] // *Vestnik Har'kovskogo politehnicheskogo instituta. Issledovanie ionosfery metodom nekogerentnogo rassejanija* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Investigation of the ionosphere by the method of incoherent scattering]. 1987, issue 5, no. 248, pp. 7–9.
11. Fatkullin M. N., Zelenova T. I., Kozlov V. K. *Jempiricheskie modeli sredneshirotnoj ionosfery* [Empirical models of the mid-latitude ionosphere]. M.: Nauka, 1981, 256 p.

Поступила (received) 15.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Регіональна модель іоносфери CERIM ION: розрахунок висоти максимуму шару F2 іоносфери / М. В. Ляшенко, О. В. Сидоренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 51–56. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

Региональная модель ионосферы CERIM ION: расчёт высоты максимума слоя F2 ионосферы / М. В. Ляшенко, А. В. Сидоренко // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – № 47 (1268). – С. 51–56. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

Regional model of ionosphere CERIM ION: calculation of the maximum height of the ionospheric F2 layer / M. V. Lyashenko, A. V. Sydorenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 47 (1268). – P. 51–56. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ляшенко Михайло Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, учений секретар Інституту іоносфери НАН та МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ua.ru.

Ляшенко Михаил Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, учений секретарь Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ua.ru.

Lyashenko Mykhaylo Volodymyrovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, scientific secretary of Institute of ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ua.ru.

Сидоренко Олександр Валентинович – інженер-електронік 1 категорії Інституту іоносфери НАН та МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: mr.sasha.s96@mail.ru.

Сидоренко Александр Валентинович – инженер-электроник 1 категории Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: mr.sasha.s96@mail.ru.

Sydorenko Oleksandr Valentynovych – engineer-electronic of the 1st category of Institute of ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (057) 706-22-87; e-mail: mr.sasha.s96@mail.ru.

УДК 621.396, 004.032, 004.031

А. Е. МИРОШНИКОВ**ФОРМАТ ДАННЫХ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЕ РАДАРА НР**

Розглядається формат запису іоносферних параметрів, отриманих за допомогою радіолокатора некогерентного розсіяння Інституту іоносфери на проміжній частоті.

Ключові слова: параметри іоносфери, база даних, процедури форматування масивів.

Рассматривается формат записи ионосферных данных, полученных с помощью радиолокатора некогерентного рассеяния Института ионосферы на промежуточной частоте.

Ключевые слова: параметры ионосферы, база данных, процедуры форматирования массивов.

Recording format of ionospheric data, obtained with the incoherent scatter radar the Institute of ionosphere at an intermediate frequency is considered.

Keywords: ionospheric parameters, database, array format procedures.

Введение. На радаре НР Института ионосферы в настоящее время используется корреляционная обработка сигнала, который был получен после блока синхронного детектирования с использованием квадратурных каналов. Решая обратную задачу некогерентного рассеяния по измеренным корреляционным функциям НР сигнала, определяют высотное-временное распределение электронной концентрации, температур ионов и электронов, ионный состав, а также вертикальную составляющую скорости движения ионосферной плазмы [1].

Данная схема работы обладает рядом недостатков, присущих для аналоговых систем с фиксированным алгоритмом обработки.

Система обработки сигналов на промежуточной частоте (ПЧ) [2] использует предварительную запись оцифрованных значений непосредственно на выходе оконечного усилителя ПЧ.

Применение такой схемы работы радара НР позволяет:

- перейти от аналоговой к цифровой фильтрации
- применить более гибкие методы записи и обработки сигнала, с помощью дополнительной модернизации программного обеспечения
- учитывать особенности ионосферной плазмы на разных высотах

Импульсы опроса формируются с использованием сигнала синхронного гетеродина.

Запись дискретных отсчетов сигнала осуществляется под управлением системы синхронизации радара. Аналого-цифровое преобразование осуществляется с помощью быстродействующего модуля АЦП L-card E20-10[3].

В таблице 1 представлена структура формата данных, записанных на промежуточной частоте. Данные записаны в бинарном виде и содержат следующую информацию: в первой строке таблицы представлено общее описание секции файла, во второй и третьей строке указаны размер, размерность и общее назначение.

Данные файлы предлагается импортировать в базу данных Института ионосферы.

База данных (БД) Института ионосферы представляет собой программную платформу, которая работает на удаленном сервере с использованием системы управления базами данных (СУБД) PostgreSQL и комплекса прикладных программ написанных на языке C++ (фреймворк Qt) и работает совместно с системой экспресс-обработки Института ионосферы [4,5]. Данный комплекс программ:

- позволяет хранить “сырые” данные получаемые с радара НР [6] и ионосферной станции Института ионосферы;
- работает с импортом и экспортом “сырых” данных;
- система экспресс-обработки, используя упрощенные алгоритмы, позволяет получать основные параметры космической погоды (оценку электронной концентрации, температуру ионов и электронов, радиальную составляющую скорости движения ионосферной плазмы), а также дополнительные параметры состояния работы режима радара НР, состояние геомагнитной обстановки (уровень шума, доверительный интервал и др.);
- выводит данные критических частот слоя F1, F2, спорадического слоя ES;

- предоставляет пользователю данные космической погоды в режиме реального времени[7] (уровень рентгеновского излучения Солнца, поток элементарных частиц, составляющие магнитного поля Земля, 3-х часовой планетарный индекс K и данные станций наклонного зондирования в Прухонице и Москве). Данные берутся из сторонних открытых источников, таких как сайты National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), международной сети дигизондов и др. источников.)

Для хранения данных, полученных на частоте ПЧ, предлагается создать таблицу в СУБД

PostgreSQL, которая повторяла бы структуру таких файлов. В таблице 1 в последнем столбце представлены названия полей такой таблицы, а на

рисунке 1 (левая панель) показана реализованная таблица *inter_file*. В правой панели показан пример запроса для формирования таблицы.

Таблица 1 – Структура данных, записанных на промежуточной частоте

Заголовок		word	день	date, id, session
		word	месяц	
		word	год	
		word	часы	
		word	минуты	
		word	секунды	
Метаданные		word	количество разверток	nr
		word	количество высот	nh
		word	количество каналов АЦП	nc
		single	задержки межвысотных интервалов	dt
		single	запись частоты	rt
Служебная информация	1..5	word	метки	-
Данные	1.. количество разверток/1..количество высот/1..количество каналов	word	данные АЦП	adc_arr

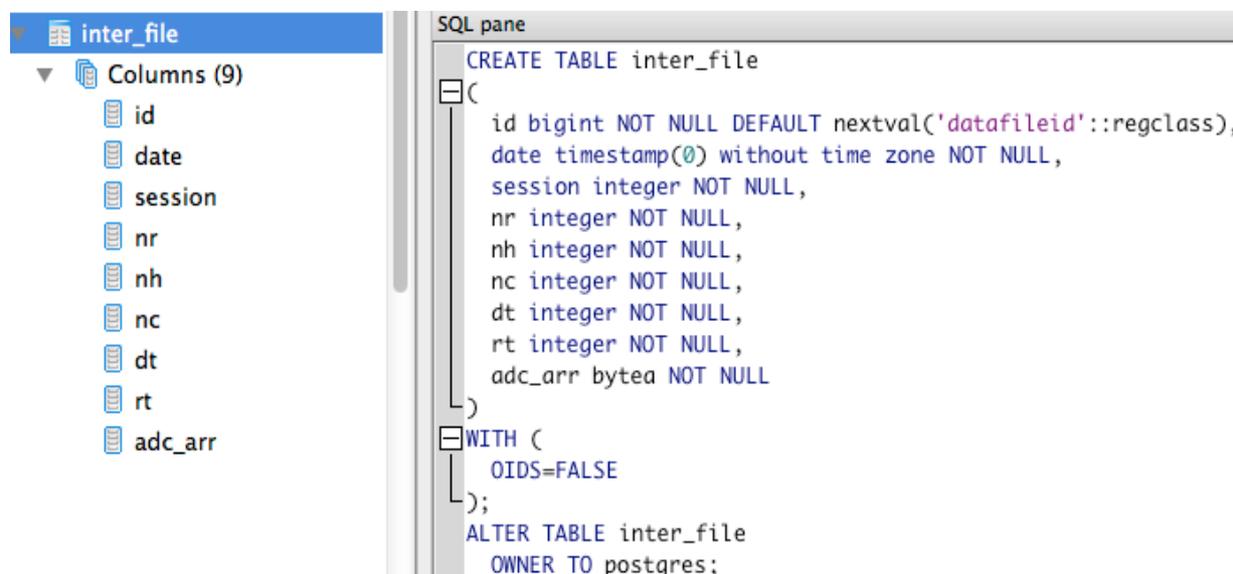


Рис. 1 – Структура таблицы в СУБД для хранения данных, записанных на ПЧ

Система экспресс-обработки Института ионосферы представляет собой CGI-приложение, которое работает совместно с веб-сервером Apache. Для обработки данных на промежуточной частоте системой предлагается реализовать следующие этапы работы:

- получение данных пользователя и формирование запроса (на языке SQL) к БД;
- запрос к БД и получение данных;
- автоматическая фильтрация когерентных помех;

- реализация алгоритмов цифровой фильтрации, децимации данных, цифровая обработка квадратурных составляющих;
 - расчет автокорреляционных функций (АКФ) шума и получение АКФ НР сигнала;

- решение обратной радиофизической задачи;
 - визуализация полученных расчетов и предоставления их пользователю.



The main task of the ISR data express processing program is to give to the user an information (text and graphics) about the data presented in the database: size, quality (noise situation and operating modes of receiving and transmitting equipment for the radar), geophysical conditions during measurement of ionospheric parameters, etc.

The system is based on the original software that works together with PostgreSQL database management system, Gnuplot data visualization program, Apache web-server and 7-Zip file archiver.

You can use express processing system from NTU "KhPI" LAN (<http://172.17.24.79/>) or obtain previously calculated parameters via Internet (<http://database.iion.org.ua/>).

Data obtained by Kharkiv ISR:
<p>Four-channel correlator data (2006 – 2017) (s_new)</p> <p>Dual-channel correlator data (1996 – 2017) (s_old)</p> <p>Dual-channel correlator data (1996 – 2017) (v_old)</p>
Data obtained from other sources:
<p>Automatic ionospheric station "Basis"</p> <p>Space weather (NOAA / NWS Space Weather Prediction Center)</p>
Ionosphere and atmosphere models:
<p>CERIM IION</p> <p>IRI-2012 (VITMO)</p> <p>IRI-2016 (VITMO)</p> <p>MSIS-E-90 (VITMO)</p>

Рис 2 – Главная страница доступа к БД Института ионосферы

Выводы. В статье приведено описание формата данных системы обработки сигналов на ПЧ. Приведено краткое описание системы обработки и БД Института ионосферы. Для хранения данных в БД и работы системы экспресс-обработки с данным форматом была создана таблица *inter_file*, которая повторяет структуру формата данных

Список литературы

1. Богомаз А. В. Этапы обработки данных радара некогерентного рассеяния. // Конференция молодых учёных "Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН-2012)" (Харьков, Украина, 18 – 20 апреля 2012 г.). – Сборник тезисов. – 2012. – С. 7.
2. Емельянов Л. Я. О системах обработки сигналов некогерентного рассеяния на видео- и промежуточной частотах / Емельянов Л. Я., Лялюк А. И., Рогожкин Е. В., Храмов Е. А. // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2013. – № 28 (1001). – С. 38-45.
3. Быстродействующий модуль АЦП / ЦАП E20-10 на шину USB [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.lcard.ru/products/external/e20-10> (дата обращения: 31.10.17)
4. Богомаз А. В. Экспресс-обработка данных радара некогерентного рассеяния на удалённом сервере / Богомаз А. В., Мирошников А. Е. // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2013. – № 28 (2001). – С. 63-68

5. *Мирошников А. Е.* Кросс-платформенное программное обеспечение для работы с базой данных Института ионосферы / *Мирошников А. Е. Богомаз А.В.* // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Радиофизика и ионосфера. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2013. – № 33 (1066). – С. 46-50.
6. *Лысенко В.Н.* Программируемый коррелятор для измерения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния // Вестник ХГПУ. – №31. – 1999. – С. 96–99.
7. *Мирошников А. Е.* Разработка базы данных автоматической ионосферной станции «Базис» Института ионосферы и системы мониторинга космической погоды, работающей в режиме реального времени. // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Радиофизика и ионосфера. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 37 (1146). – С. 87-93.
3. Byistrodeystvuyuschiy modul ATsP / TsAP E20-10 na shinu USB [Elektronnyy resurs]. – URL: <http://www.lcard.ru/products/external/e20-10> (data obrascheniya: 31.10.17)
4. *Bogomaz A.V.* Ekspres-obrabotka dannykh radara nekogerentnogo rasseyaniya na udalYonnom servere / *Bogomaz A.V., Miroshnikov A.E.* // Vestnik Nats. tehn. un-ta "HPI" : sb. nauch. tr. Temat. vyip. : Radiofizika i ionosfera. – Harkov : NTU "HPI". – 2013. – № 28 (2001). – S. 63-68
5. *Miroshnikov A. E.* Kross-platformennoe programmnoe obespechenie dlya raboty s bazoy dannykh Instituta ionosfery / *Miroshnikov A. E. Bogomaz A.V.* // Vestnik Nats. tehn. un-ta "HPI" : sb. nauch. tr. Temat. vyip. : Radiofizika i ionosfera. – Harkov : NTU "HPI". – 2013. – № 33 (1066). – S. 46-50.
6. *Lyisenko V.N.* Programmiruemyy korrelyator dlya izmereniya parametrov ionosfery metodom nekogerentnogo rasseyaniya // Vestnik HGPU. – № 31. – 1999. – S. 96–99.
7. *Miroshnikov A. E.* Razrabotka bazy dannykh avtomaticheskoy ionosfernoy stantsii «Bazis» Instituta ionosfery i sistemy monitoringa kosmicheskoy pogodyi, rabotayushey v rezhime realnogo vremeni. // Vestnik Nats. tehn. un-ta "HPI" : sb. nauch. tr. Temat. vyip. : Radiofizika i ionosfera. – Harkov : NTU "HPI". – 2015. – № 37 (1146). – S. 87-93.

References (transliterated)

1. *Bogomaz A.V.* Etapy obrabotki dannykh radara nekogerentnogo rasseyaniya. // Konferentsiya molodykh uchYonyih "Distsionnoe radiozondirovanie ionosfery (ION-2012)" (Harkov, Ukraina, 18 – 20 aprelya 2012 g.). – Sbornik tezisov.–2012.–S. 7.
2. *Emelyanov L. Ya.* O sistemah obrabotki signalov nekogerentnogo rasseyaniya na video- i promezhutochnoy chastotah / *Emelyanov L. Ya., Lyalyuk A. I., Rogozhkin E. V., Hramov E. A.* // Vestnik Nats. tehn. un-ta "HPI" : sb. nauch. tr. Temat. vyip. : Radiofizika i ionosfera. – Harkov: NTU "HPI". – 2013. – № 28 (1001). – S. 38-45.

Поступила (received) 02.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Формат данных системы обработки сигналов на промежуточной частоте радара НР / А. Е. Мирошников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 57 – 60. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

Формат даних системи обробки сигналів на проміжній частоті радара НР / А. Є. Мірошников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 57 – 60. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

Data format of the Signal Processing System of the ISR Radar at the Intermediate Frequency / A.E. Miroshnikov// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 47 (1268). – P. 57 – 60. – Bibliogr. 7. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мірошников Артем Євгенович – м.н.с. Інститут іоносфери НАН та МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; email: iion@kpi.kharkov.ua.

Мірошников Артем Євгеньевич - м.н.с. Институт ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-22-87; email: iion@kpi.kharkov.ua.

Miroshnikov Artem Yevgenyovych - junior researcher Institute of ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; tel.: (057) 706-22-87; email: iion@kpi.kharkov.ua.

УДК 550.388.2

Т. Г. ЖИВОЛУП, С. В. ПАНАСЕНКО**СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СРЕДНЕШИРОТНОЙ И АВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ИОНОЗОНДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Проаналізовано часові залежності критичної частоти F-області іоносфери та концентрації електронів у її максимумі за даними двох іонозондів, розташованих поблизу м. Тромсьо (Норвегія) і м. Харків (Україна), в періоди літнього сонцестояння та осіннього рівнодення. Виявлено хвильові процеси у середніх і високих широтах з періодами 80 – 160 хв, відносними амплітудами 0.03 – 0.05 і тривалістю в декілька періодів.

Ключові слова: іонозонд, критична частота, концентрація електронів, хвильові процеси, сезонні та широтні варіації.

Проанализированы временные зависимости критической частоты F-области ионосферы и концентрации электронов в ее максимуме по данным двух ионозондов, расположенных вблизи г. Тромсе (Норвегия) и г. Харьков (Украина), в периоды летнего солнцестояния и осеннего равноденствия. Обнаружены волновые процессы в средних и высоких широтах с периодами 80 – 160 мин, относительными амплитудами 0.03 – 0.05 и длительностями в несколько периодов.

Ключевые слова: ионозонд, критическая частота, концентрация электронов, волновые процессы, сезонные и широтные вариации.

The time dependences of the ionospheric F-region critical frequency and the electron density at its maximum are analyzed using the data of two ionosondes located near Tromsø (Norway) and Kharkiv (Ukraine), during the summer solstice and autumnal equinox periods. Wave processes in the middle and high latitudes with periods of 80 – 160 min, relative amplitudes of 0.03 – 0.05, and durations of several periods were detected.

Key words: ionosonde, critical frequency, electron density, wave processes, seasonal and latitudinal variations.

Введение. Волновые процессы в геокосмосе играют важную роль во взаимодействии различных атмосферных и ионосферных областей, являясь переносчиком энергии и импульса. С одной стороны, знания о параметрах волновых процессов позволяют существенно улучшить существующие глобальные и локальные динамические модели, поскольку эти процессы влияют на функционирование средств телекоммуникаций, радиолокации и радионавигации, изменяют траектории движения спутников и “космического мусора” и т.д. С другой стороны, волновые возмущения являются надежным индикатором высокоэнергичных явлений и процессов, воздействующих на атмосферу в целом и на ионосферу в частности. Причем, природа источников энергии может быть различной: естественные источники – выбросы корональной массы, геокосмические бури, солнечные терминаторы, землетрясения и др. и искусственные источники – старты и полеты космических аппаратов, мощные взрывы, работа нагревных стендов [1].

Несмотря на то что в мире наблюдения за волновыми процессами ведутся уже в течение нескольких десятилетий, все причинно-следственные связи еще до конца не выяснены. Дело в том, что такие наблюдения часто несут эпизодический характер, а точность используемых методов оставляет желать лучшего. Поэтому наибольшее значение имеют скоординированные совместные измерительные кампании, проводимые систематически в течение достаточно длительных интервалов времени.

Благодаря харьковскому радару некогерентного рассеяния, являющегося единственным таким радаром в Центральной Европе, можно получить большой объем ценной информации о волновых процессах в среднеширотной ионосфере, провести их сравнение с процессами в авроральной ионосфере, выявить особенности и общие черты для каждого региона. Использование дополнительного метода

вертикального радиозондирования позволяет уточнить параметры волновых возмущений в максимуме ионизации ионосферы, а также проанализировать вариации критической частоты слоя F2 ионосферы над г. Тромсе (Норвегия) и г. Харьков (Украина).

Целью данной работы является выявление и оценка параметров волновых процессов в среднеширотной и авроральной ионосфере во время летнего солнцестояния и осеннего равноденствия с помощью двух ионозондов, расположенных вблизи г. Тромсе и г. Харьков.

Сведения о средствах наблюдения. Для диагностики волновых процессов в среднеширотной и авроральной ионосфере использовались данные двух ионозондов: Dynasonde и модернизированного ионозонда «Базис».

Ионозонд «Базис» расположен в ионосферной обсерватории Института ионосферы (49° 36' с.ш., 36° 18' в.д.) вблизи г. Харьков. При вертикальном зондировании диапазон частот составляет 0.3 – 20 МГц, выходная мощность – 10 кВт, длительность излучаемых импульсов – 100 мкс, частота следования импульсов – 25 Гц. Ионограммы снимались с периодичностью 15 мин. Погрешность оценки критических частот $f_{o,x}F2$ составляет около 15 кГц (0.015 МГц) [2].

Ионозонд Dynasonde, расположенный вблизи г. Тромсе, является одним из шести цифровых ионозондов, спроектированных и созданных в Лаборатории космической среды (Боулдер, США) в течение 1975 – 1978 гг. Для стандартного зондирования он излучает радиоимпульсы гауссовской формы длительностью по половинной мощности около 128 мкс. Максимальная мощность составляет 10 кВт. Два приемника используются с мультиплексорами на входах таким образом, что можно подключать различные пары шести приемных

© Т. Г. Живолуп, С. В. Панасенко, 2017

антенн при приємє кожного імпульса. Ширина полоси пропускання приємника равна 30 кГц. Погрешность оценки критических частот $f_{o,x}F2$ составляет около 10 кГц (0.01 МГц) [3].

Сведения о геомагнитной обстановке. В табл. 1 приведены значения высокоширотных и планетарных индексов геомагнитной активности в периоды летнего солнцестояния (26.06.2014 г.) и осеннего равноденствия (22.09.2014 и 28.09.2014 г.). Видно, что индексы A и A_p равнялись 5 – 16, индекс K_p достигал 3, а высокоширотный индекс K в основном не превышал 4. Это свидетельствует о том, что в дни совместных измерений состояние магнитного поля Земли было как спокойным, так и имели место магнитные возмущения.

Таблица 1 – Сведения о геомагнитной обстановке

Дата	Высокоширотные индексы		Планетарные индексы	
	A	K	A_p	K_p
26.06.2014	6	0 0 0 3 4 1 0 0	5	1 1 1 2 2 1 1 1
22.09.2014	16	1 2 3 4 5 3 2 2	9	2 3 2 2 3 2 2 2
28.09.2014	13	2 1 2 4 4 4 1 1	8	2 2 2 3 3 2 2 1

Анализ f -графиков. Для определения параметров волновых процессов в среднеширотной и авроральной ионосфере анализировались временные вариации частоты f_oF2 над Харьковом и Тромсе.

Вариации критической частоты f_oF2 слоя F2 26 июня 2014 года в г. Харькове и г. Тромсе показаны на рис. 1.

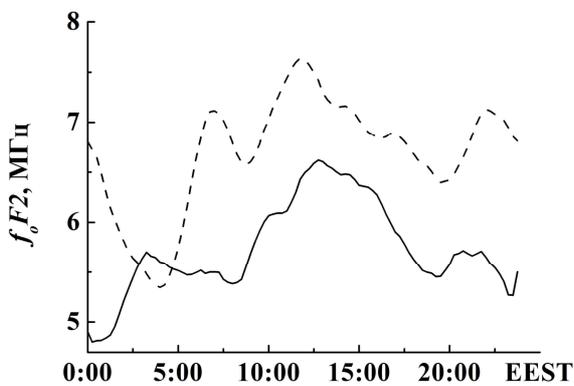


Рис. 1 – Сравнение временного хода f_oF2 по данным ионозондов в Тромсе (сплошная линия) и Харькове (штриховая линия) для 26.06.2014.

Из рис. 1 видно, что f_oF2 в Харькове больше f_oF2 в Тромсе на всем временном интервале совместных наблюдений с 00:00 до 24:00 EEST, за исключением предвосходного периода 02:45 – 04:30 EEST. В Харькове четко наблюдается предвосходный минимум f_oF2 в 04:30 EEST (восход Солнца в Харькове 26.06.2014 – в 04:33 EEST). После восхода Солнца в Харькове, начиная с 04:45 EEST, f_oF2 быстро возрастает до своего первого локального максимального значения 7.25 МГц в 07:00 EEST. После этого f_oF2 убывает до своего локального

минимума 6.475 МГц в 08:45 EEST, а с 09:00 возрастает до своего максимального значения 7.75 МГц в 12:00 EEST. После 12:00 EEST f_oF2 в Харькове постепенно убывает до своего предзаходного минимума 6.3 МГц в 20:15 EEST (заход Солнца в Харькове 26.06.2014 – в 20:33 EEST).

После захода Солнца в Харькове, начиная с 20:45 EEST, f_oF2 возрастает до локального максимального значения 7.125 МГц в 22:45 EEST и после этого постепенно убывает.

В Тромсе 26 июня Солнце не заходит на всех высотах и господствует полярный день. Поэтому вариации f_oF2 в Тромсе не связаны с восходом и заходом Солнца. В Тромсе, начиная с 00:45 EEST, f_oF2 возрастает до локального максимального значения 5.77 МГц в 02:45 EEST, потом постепенно убывает до локального минимального значения 5.35 МГц в 08:00 EEST и с 08:15 EEST возрастает до своего максимального значения 6.83 МГц в 12:30 EEST. После этого f_oF2 постепенно убывает до локального минимального значения 5.27 МГц в 18:45 EEST. Начиная с 19:00 EEST, f_oF2 возрастает до локального максимального значения 5.8 МГц в 22:30 EEST и после этого постепенно убывает.

Следует отметить подобный характер вариаций f_oF2 в Харькове и Тромсе в период времени 09:00 – 24:00 EEST.

Значение f_oF2 для Харькова превышает в 07:00 EEST значение f_oF2 для Тромсе на 1.63 МГц (в 1.29 раза), значение f_oF2 в 12:00 EEST – на 1.31 МГц (в 1.2 раза), значение f_oF2 в 20:15 EEST – на 0.71 МГц (в 1.13 раза), а в 22:45 EEST – на 1.465 МГц (в 1.26 раза). Значение f_oF2 в Тромсе превышает значение f_oF2 в Харькове с 02:45 до 04:30 EEST на 0.12 – 0.255 МГц.

Таким образом, в период летнего солнцестояния в Харькове четко наблюдаются предвосходный и предзаходный минимумы f_oF2 . В Харькове, как и в Тромсе, наблюдаются дневной и ночной максимумы f_oF2 .

Вариации критической частоты слоя F2 22 и 28 сентября 2014 г. по данным ионозондов в Тромсе и Харькове показаны на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 видно, что 22.09.2014 f_oF2 в Харькове больше f_oF2 в Тромсе на временном интервале совместных наблюдений с 06:15 до 24:00 EEST. С 00:00 до 06:00 EEST значения f_oF2 в Тромсе превышают значения f_oF2 в Харькове. В Харькове четко наблюдается предвосходный минимум f_oF2 в 05:15 EEST (восход Солнца в Харькове 22.09.2014 – в 06:23 EEST). После восхода Солнца в Харькове, начиная с 06:30 EEST, f_oF2 быстро возрастает до своего наибольшего значения 9.65 МГц в 11:15 EEST. После этого f_oF2 убывает до своего локального минимума 8.9 МГц в 12:15 EEST, потом возрастает до своего локального максимума 9.3 МГц в 13:30 EEST, убывает до локального минимума 8.025 МГц в 16:15 EEST и снова возрастает до своего предзаходного максимума 8.525 МГц в 17:45 EEST (заход Солнца в Харькове 22.09.2014 – в 18:32 EEST). Начиная с 18:00 EEST f_oF2 постепенно убывает до локального минимального значения 5.65 МГц в 23:15 EEST.

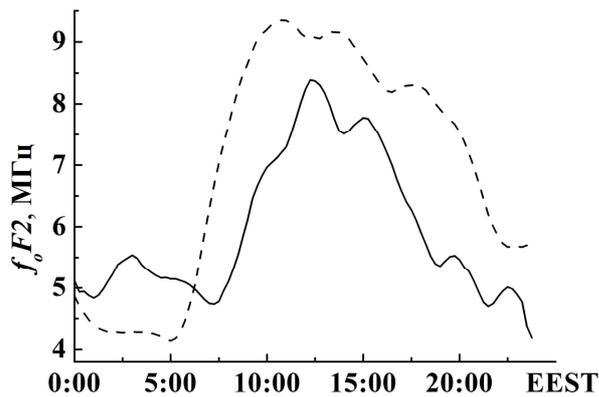


Рис. 2 – Сравнение временного хода f_oF2 по данным ионозондов в Тромсе (сплошная линия) и Харькове (штриховая линия) для 22.09.2014.

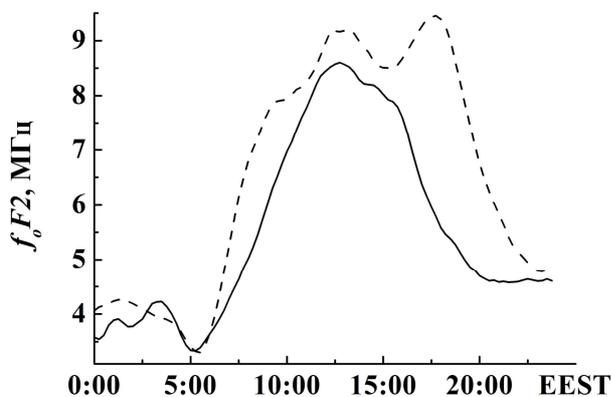


Рис. 3 – Сравнение временного хода f_oF2 по данным ионозондов в Тромсе (сплошная линия) и Харькове (штриховая линия) для 28.09.2014.

Как видно из рис. 2, в Тромсе так же, как и в Харькове, наблюдается предвосходный минимум f_oF2 в 07:15 EEST (восход Солнца в Тромсе 22.09.2014 – в 07:27 EEST). После восхода Солнца в Тромсе, начиная с 07:30 EEST, f_oF2 быстро возрастает до своего максимального значения 8.9 МГц в 12:15 EEST. После этого, f_oF2 убывает до своего локального минимума 7.45 МГц в 14:45 EEST, потом возрастает до своего локального максимума 7.93 МГц в 15:15 EEST, убывает до локального минимума 5.06 МГц в 19:00 EEST и снова возрастает до своего предзаходного максимума 5.84 МГц в 20:15 EEST (заход Солнца в Тромсе 22.09.2014 – в 19:44 EEST).

Из рис. 3 видно, что 28.09.2014 f_oF2 в Харькове больше f_oF2 в Тромсе на временных интервалах совместных наблюдений 00:00 – 02:45, 04:15 – 04:45, 06:15 – 24:00 EEST. Только с 03:00 до 04:00 и с 05:00 до 06:00 EEST значения f_oF2 в Тромсе превышают значения f_oF2 в Харькове. В Харькове четко наблюдается предвосходный минимум f_oF2 в 05:45 EEST (восход Солнца в Харькове 28.09.2014 – в 06:31 EEST). После восхода Солнца в Харькове, начиная с 06:45 EEST, f_oF2 быстро возрастает до своего околосолнечного максимального значения 9.4 МГц в 13:00 EEST. После этого f_oF2 убывает до своего

локального минимума 8.6 МГц в 13:45 EEST, потом возрастает до локального максимума 9.1 МГц в 14:15 EEST, убывает до локального минимума 8.35 МГц в 15:45 EEST и снова возрастает до своего предзаходного максимума 9.55 МГц в 17:45 EEST (заход Солнца в Харькове 28.09.2014 – в 18:19 EEST). Начиная с 18:00 EEST f_oF2 быстро убывает до локального минимального значения 4.775 МГц в 23:30 EEST.

В Тромсе так же, как и в Харькове, наблюдается предвосходный минимум f_oF2 в 05:45 EEST (восход Солнца в Тромсе 28.09.2014 – в 07:49 EEST). После восхода Солнца в Тромсе, начиная с 08:00 EEST, f_oF2 быстро возрастает до своего максимального значения 8.78 МГц в 12:30 EEST. После этого f_oF2 убывает до своего локального минимума 7.93 МГц в 14:45 EEST, потом возрастает до своего локального максимума 8.17 МГц в 15:00 EEST. Затем f_oF2 резко убывает до своих ночных значений (см. рис. 3).

Таким образом, в период осеннего равноденствия в Харькове и Тромсе четко наблюдаются предвосходные минимумы f_oF2 , а также предзаходные максимумы f_oF2 .

Методика оценки параметров волновых процессов в ионосфере. Для оценки параметров волновых процессов использовались временные зависимости относительных вариаций концентрации электронов δ_N , полученные в максимуме F-области ионосферы. Временные зависимости δ_N подвергались спектральному анализу с использованием адаптивного преобразования Фурье (АПФ) [4].

Волновые процессы в период летнего солнцестояния. Как видно из рис. 4, над Харьковом 26 июня имели место три ярко выраженных волновых процесса. Первое колебание наблюдалось в период времени 01:00 – 09:00 EEST, его относительная амплитуда достигала 0.03, а период T составил 80 – 120 мин. Второй процесс с относительной амплитудой 0.02 – 0.04 и $T = 120 – 160$ мин наблюдался в интервале времени 12:00 – 17:00 EEST. Наконец, в интервале времени 18:00 – 23:00 вновь имело место колебание с $T = 100 – 140$ мин, а его относительная амплитуда достигала 0.05. Как видно из энергограммы, наибольшую энергию имели колебания с $T = 80 – 120$ мин. Эпизодически возникали также короткопериодные колебания ($T = 30 – 50$ мин).

Над Тромсе в этот же день имели место колебания с близкими периодами, однако, с существенно меньшей продолжительностью (рис. 5).

Так, например, колебание с периодом $T = 80 – 120$ мин наблюдалось только в течение 3 часов (01:00 – 04:00 EEST). Его относительная амплитуда составила 0.02 – 0.04. Наибольшую длительность имел волновой процесс с относительной амплитудой 0.04 – 0.06 и $T = 100 – 140$ мин, наблюдавшийся в интервале времени 17:00 – 21:00 EEST. Энергограмма показывает, что наибольшую энергию имели колебания с периодом $T = 60 – 100$ мин, который несколько меньше, чем для колебаний над Харьковом. Также видно, что значительную энергию содержали кратковременные квазипериодические вариации с

периодом около 30 мин. Это можно объяснить тем, что авроральная ионосфера даже в магнитоспокойные дни подвержена существенным внешним воздействиям, приводящим к генерации таких колебаний. Хотя, наличие таких колебаний может быть вызвано и погрешностями обработки, которая для ионограмм Dynasonde производится в автоматическом режиме.

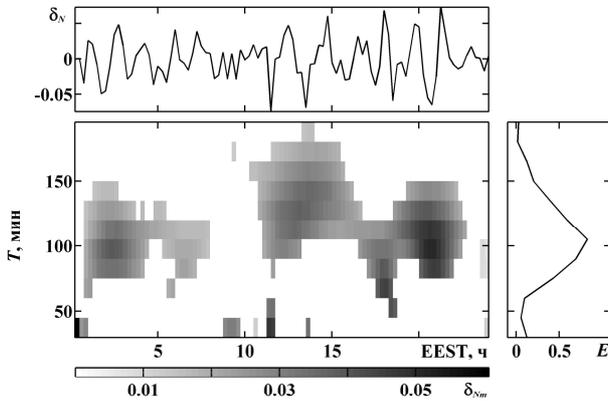


Рис. 4 – Результаты применения к относительным вариациям концентрации электронов (первая панель) над Харьковом АПФ (вторая панель) для 26 июня 2014 г. Здесь и далее справа приведены соответствующие энергограммы [4].

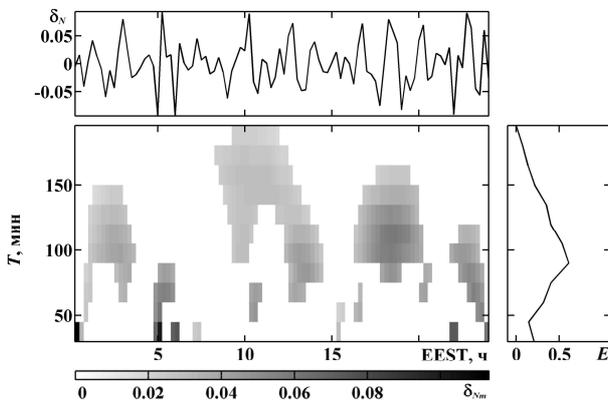


Рис. 5 – То же, что и на рис. 4, над Тромсе.

Таким образом, обнаруженные волновые процессы над Харьковом и Тромсе имеют похожие периоды и наблюдаются в близкие интервалы времени, что указывает на общность источников их генерации.

Волновые процессы в период осеннего равноденствия. Поскольку измерительная кампания была продолжительной (ее длительность составила около недели), были обработаны экспериментальные данные, полученные в течение двух суток.

Как видно из рис. 6, 22 сентября 2014 г. над Харьковом имело место одно продолжительное квазипериодическое колебание. Его относительная амплитуда составила 0.02 – 0.04, $T = 120 – 150$ мин, а длительность – около 6 часов (12:00 – 18:00 EEST). Это подтверждают и энергограмма, максимум на

которой приходится на указанный период колебания. Два других процесса вблизи 06:00 и 22:00 EEST были, скорее всего, аperiodическими, поскольку их спектр охватывал достаточно большой диапазон периодов (60 – 180 мин).

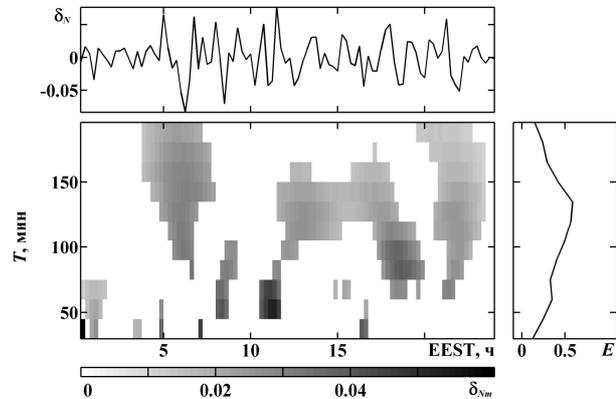


Рис. 6 – Результаты применения к относительным вариациям концентрации электронов (первая панель) над Харьковом АПФ (вторая панель) для 22 сентября 2014 г.

Интересно, что такой же волновой процесс наблюдался в этот же день над Тромсе (рис. 7). Его период $T = 100 – 130$ мин, относительная амплитуда равнялась 0.05– 0.07, а длительность была несколько больше, чем над Харьковом – около 8 часов (08:00 – 16:00 EEST).

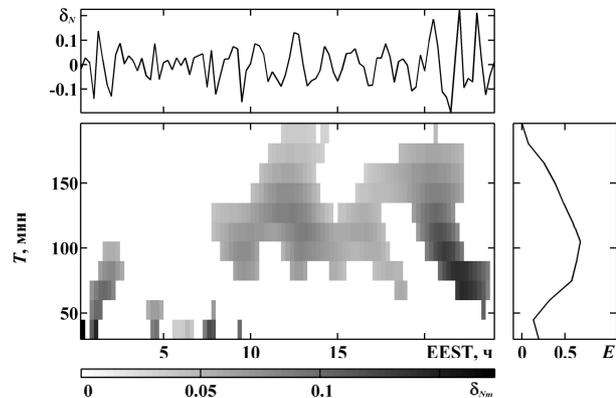


Рис. 7 – То же, что и на рис. 6, над Тромсе.

Учитывая близость характеристик волновых процессов, наблюдавшихся над Харьковом и над Тромсе, можно сказать о едином источнике этого процесса. Кроме того, поскольку над Тромсе он наблюдался на 2 часа раньше, его относительная амплитуда и длительность была больше, а период меньше, чем над Харьковом, скорее всего, имело место распространение перемещающегося ионосферного возмущения с высоких на средние широты. При этом кажущаяся горизонтальная скорость распространения составляет около 330 м/с (расстояние между обсерваториями вблизи Харькова и Тромсе составляет около 2400 км).

Опишем волновые процессы, имевшие место 28

сентября 2014 г. Над Харьковом снова преобладал волновой процесс с $T = 100 - 120$ мин, относительной амплитудой $0.04 - 0.07$ и длительностью около 15 часов (рис. 8). Над Тромсе наблюдались два волновых процесса (рис. 9). Первый имел место в интервале времени $01:00 - 08:00$ EEST. Его относительная амплитуда составляла $0.1 - 0.15$, а $T = 100 - 140$ мин. Второй процесс был менее энергичным, его относительная амплитуда была всего $0.03 - 0.06$, $T = 80 - 120$ мин, а длительность составила 9 часов ($13:00 - 22:00$ EEST).

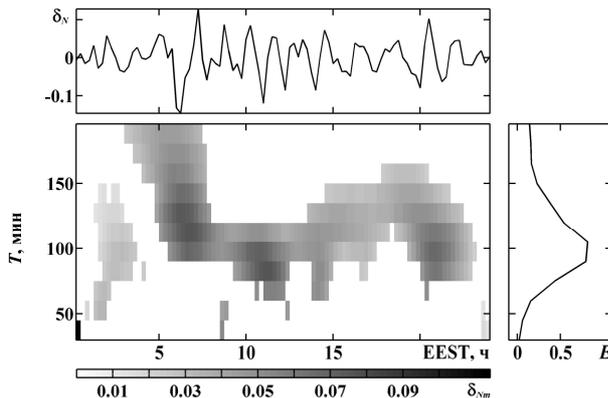


Рис. 8 – Результаты применения к относительным вариациям концентрации электронов (первая панель) над Харьковом АПФ (вторая панель) для 28 сентября 2014 г.

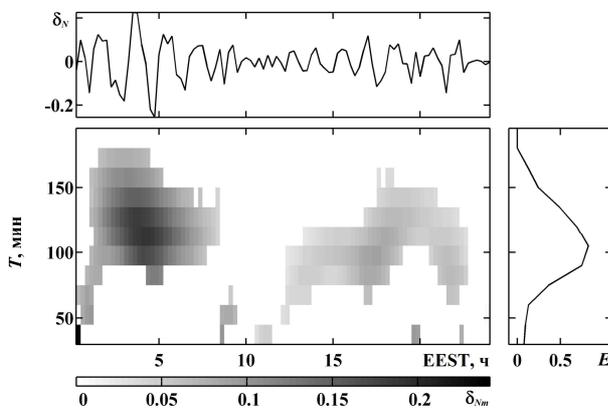


Рис. 9 – То же, что и на рис. 8, над Тромсе.

Выводы. Проведен анализ параметров волновых процессов, наблюдавшихся над Харьковом и Тромсе в периоды летнего солнцестояния и осеннего равноденствия.

Во время летнего солнцестояния обнаружены три волновых процесса в ионосфере над Харьковом с периодами $80 - 160$ мин, длительностями в несколько периодов и относительными амплитудами $0.03 - 0.05$.

Над Тромсе в это же время наблюдались квазигармонические колебания с близкими периодами, но длительность их была меньше.

Во время осеннего равноденствия как над Харьковом, так и над Тромсе наблюдались волновые процессы длительностью $6 - 8$ часов с периодами $100 - 120$ мин. Над Тромсе этот волновой процесс начался примерно на 2 часа раньше. В предположении, что волна распространялась из авроральной ионосферы в среднеширотную, ее кажущаяся горизонтальная скорость равнялась 330 м/с, что соответствует скорости распространения перемещающихся ионосферных возмущений [5, 6].

Список литературы

1. Бурмака В. П. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния / В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 4 – 35.
2. Барабаш В. В. Модернизация программного обеспечения автоматической станции вертикального зондирования «Базис» / В. В. Барабаш, А. И. Лялюк, Г. М. Тиняков // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2015. – № 37 (1146). – С. 50 – 53.
3. Rietveld M.T. The Tromsø Dynasonde / M.T. Rietveld, J.W. Wright, N. Zobotin, M.L.W. Pitteway // Polar Science – 2008. – V. 2, No 1. – P. 55 – 71.
4. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов / Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681 – 702.
5. Hocke K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982 – 1995 / K. Hocke, K. Schlegel // Ann. Geophys. – 1996. – V. 14, № 9. – Pp. 917 – 940.
6. Kozlovsky, A. Rapid-run ionosonde observations of traveling ionospheric disturbances in the auroral ionosphere / A. Kozlovsky, T. Turunen, T. Ulich // J. Geophys. Res. – 2013. – V. 118. – Pp. 5265 – 5276.

Bibliography (transliterated)

1. Burmaka V. P. Rezul'taty issledovaniya volnovykh vozmushhenij v ionosferey metodom nekogerentnogo rassejanija / V.P. Burmaka, V. I. Taran, L. F. Chernogor // Uspehi sovremennoy radioelektroniky. – 2005. – № 3. – С. 4 – 35.
2. Barabash V.V. Modernizatsiya programmnogo obespecheniya avtomaticheskoy stantsiy vertikal'nogo zondirovaniya "Bazis" / V.V. Barabash, A.I. Lyalyuk, G.M. Tinyakov // Vvestnik NTU «KhPI». Seriya: "Radiofizika i ionosfera". – 2015. – № 37 (1146). – С. 50 – 53.
3. Rietveld M.T. The Tromsø Dynasonde / M.T. Rietveld, J.W. Wright, N. Zobotin, M.L.W. Pitteway // Polar Science – 2008. – V. 2, No 1. – P. 55 – 71.
4. Chernogor L. F. Sovremenniye metody spectral'nogo analiza kvaziperiodicheskikh i volnovykh protsessov v ionosferey: osobennosti i rezul'taty eksperimentov / L. F. Chernogor // Geomagnetizm i aeronomija. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681– 702.
5. Hocke K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982 – 1995 / K. Hocke, K. Schlegel // Ann. Geophys. – 1996. – V. 14, № 9. – Pp. 917 – 940.
6. Kozlovsky, A. Rapid-run ionosonde observations of traveling ionospheric disturbances in the auroral ionosphere / A. Kozlovsky, T. Turunen, T. Ulich // J. Geophys. Res. – 2013. – V. 118. – Pp. 5265 – 5276

Поступила (received) 31.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Сезонные вариации параметров волновых процессов в среднеширотной и авроральной ионосфере по данным ионозондовых наблюдений / Т. Г. Живолуп, С. В. Панасенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 61 – 66. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Сезонні варіації параметрів хвильових процесів в середньо широтній та авроральній іоносфері за даними іонозондових спостережень / Т. Г. Живолуп, С. В. Панасенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 61 – 66. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Seasonal variations in the parameters of wave processes in the midlatitude and auroral ionosphere according to the data of ionosonde observations / T. G. Zhivolup, S. V. Panasenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No 47 (1268). – P. 61 – 66. – Bibliogr. 6. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Живолуп Тарас Григорович – кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Живолуп Тарас Григорьевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Zhivolup Taras Grygorovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research scientist of Institute of ionosphere, Kharkiv; phone: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Панасенко Сергій Валентинович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач відділу Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: sergii.v.panasenko@gmail.com.

Панасенко Сергей Валентинович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий отделом Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: sergii.v.panasenko@gmail.com.

Panasenko Sergii Valentynovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Institute of ionosphere, Kharkiv; phone: (057) 706-22-87; e-mail: sergii.v.panasenko@gmail.com.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Брезгунов А.В., Брезгунов С.А.</i> Фильтрация радиосигнала за счёт перестановки между собой его частей на другие временные интервалы	3
<i>Брезгунов А.В., Брезгунов С.А.</i> Фильтрация радиосигналов в условиях неопределённости всех его параметров ..	7
<i>Пуляев В.О., Рогожкін Є.В.</i> Багатоканальний кореляційний пристрій радару некогерентного розсіяння	12
<i>Богомаз А.В., Искра Д.А., Кононенко А.Ф.</i> Синхронизация системы обработки данных радару некогерентного рассеяния в режиме исследования средней ионосферы	16
<i>Домнін І.Ф., Левон О.О.</i> Синтез Fuzzy-регулятора другого порядка системы керування фільтрокомпенсуючим пристроєм	20
<i>Ляшенко М.В., Шницар І.Р.</i> Пространственно-временные вариации концентрации электронов в ионосфере в минимуме и максимуме солнечной активности	24
<i>Гринченко С.В.</i> Решение уравнения непрерывности квазиравновесного распределения ионов атомарного кислорода при теоретическом моделировании электронной концентрации F2-области ионосферы	33
<i>Емельянов Л.Я., Чепурный Я.Н.</i> Обеспечение режима одновременного зондирования ионосферы в вертикальном и наклонном направлениях с помощью радаров некогерентного рассеяния	44
<i>Ляшенко М.В., Сидоренко А.В.</i> Региональная модель ионосферы CERIM ION: расчёт высоты максимума слоя F2 ионосферы	51
<i>Мирошников А.Е.</i> Формат данных системы обработки сигналов на промежуточной частоте радару НР	57
<i>Живолуп Т.Г., Панасенко С.В.</i> Сезонные вариации параметров волновых процессов в среднеширотной и авроральной ионосфере по данным ионозондовых наблюдений	61

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:
Радіофізика та іоносфера

№ 47 (1268) 2017

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

Відповідальний та технічний редактор: к.ф.-м.н., с.н.с. Ляшенко М.В.

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Обухова І.Б.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61001, м. Харків, Д-МСП, вул. Кирпичова, 16
Інститут іоносфери НАН та МОН України
тел. +38 (057) 707-65-27; *e-mail*: iion@kpi.kharkov.ua

Обл.-вид. № 35-17.

Підписано до друку 28.12.2017 р. Формат 21×29,7 1/8.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 3,86. Наклад 300 прим. Зам. № 3018.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 21

Надруковано у ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРИНТ»
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Багалія, 16