

УДК 621.371.25;550.388.2

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИВ В ИОНОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРАЦИИ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ МНЧ РАДИОЛИНИЙ

Иванов В.А. Рябова М.И.

METHODS OF DETERMINATION OF MAIN FEATURES OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES ON THE BASE OF FILTERING DAILY VARIATIONS OF MOF RADIO LINES

M.I. Ryabova, V.A. Ivanov

В работе предложена радиофизическая методика измерения характеристик перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). На основе теоретического анализа установлены аналитические зависимости между параметрами ПИВ и характеристиками остаточной компоненты МНЧ зондируемой радиолинии. Для восходно-заходных эффектов на среднеширотных радиолиниях определены средние значения периодов и относительной амплитуды ПИВ. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 05-07-93113; 06-02-16089, 07-05-12047).

In work is offered radiophysical methods of the measurement of the features moving ionospheric of the indignations. Analytical dependencies are installed on base of the theoretical analysis between parameter moving ionospheric of the indignations and feature remaining components MUF probing radio lines. For rising and setting effects on medium-latitudinal radio lines are determined average importance period and relative amplitude moving ionospheric of the indignations. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. (№ 05-07-93113; 06-02-16089, 07-05-12047)

Введение

Исследования ионосферы Земли, проводившиеся на протяжении десятилетий с помощью наземных методов, ракет и искусственных спутников, убедительно показывают, что ее характерной особенностью, вплоть до высот 1000 км, является изменчивость и неоднородность [1]. Эта особенность ионосферы приводит к изменениям в суточных ходах МНЧ декаметровых линий связи. Изменчивость и неоднородность ионосферы обусловлена различными процессами, один из них связан с прохождением в ионосфере внутренних гравитационных волн, вызывающих эффект перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Последние приводят к вариациям МНЧ радиолиний. Отсутствие эффективных средств наклонного зондирования ионосферы долгое время сдерживало исследования данных эффектов. Ситуация резко изменилась с появлением наклонных ЛЧМ-иозондов. Однако существует проблема интерпретации экспериментальных данных наклонного зондирования, связанная с необходимостью решения обратных задач наклонного зондирования ионосферы.

Цель работы

1. Разработать методику моделирования ионограмм наклонного зондирования (НЗ) ионосферы и суточных ходов (СХ) МНЧ с учетом ПИВ.
2. Исследовать связь между характеристиками остаточной компоненты СХ МНЧ и параметрами ПИВ.
3. Интерпретировать данные натурных экспериментов по наклонному зондированию ионосферы с использованием результатов модельных экспериментов.

Задачи исследования

- Построить метод синтеза ионограмм наклонного зондирования (НЗ) ионосферы с учетом перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ);
- Проанализировать связь между модельными и натурными ионограммами для оценки эффективности метода моделирования;

- Установить связи между характеристиками остаточной компоненты СХ МНЧ и параметрами ПИВ.

Методика моделирования ионограмм наклонного зондирования (НЗ) ионосферы и суточных ходов МНЧ с учетом ПИВ

Суточный ход МНЧ представляет собой временной ряд, который путем фильтрации низких частот (ФНЧ) можно разделить на регулярную (низкочастотная – НЧ) и остаточную (высокочастотная – ВЧ) компоненты. Полученные ранее [2, 3] результаты фильтрации СХ МНЧ позволяют сформулировать условие разделения компонент: регулярной компоненте СХ МНЧ соответствуют частоты меньше $10F_{\Phi}$ (F_{Φ} – фундаментальная частота суточного хода МНЧ, $F_{\Phi}=1/24$ ч).

Вариации МНЧ, возникающие под действием ПИВ, будут соответствовать остаточной компоненте. По этой причине основные исследования относятся именно к ней. Для исследования характеристик остаточной компоненты (ОК) нами была высказана гипотеза о том, что причина влияния ПИВ связана со стратификацией (расслоением) электронной концентрации в верхней ионосфере. Для проведения вычислительного эксперимента были выбраны две математические модели для регулярной составляющей профиля: в виде суммы чепменовских слоев, соответствующих областям E и F ионосферы [4]; в виде суммы параболических слоев, соответствующих областям E и F ионосферы, с постоянной долиной между этими областями, концентрация электронов в которой равна концентрации в максимуме E-области [5]. Модель ПИВ задавалась в следующем виде [4]:

$$N_H(h) = \frac{\Delta N}{N} \exp\left(-\frac{(h-h_c)^2}{z_m^2}\right) \cdot \sin(2\pi h/l), \quad (1)$$

где $\Delta N/N$ – вариация электронной концентрации, h_c – высота стратификации, z_m – диапазон стратификации, l – вертикальный масштаб ПИВ.

После выбора модели электронной концентрации

ионосферы с учетом нерегулярности $N(h)$ -профиля были построены дискретная модель и вычислительный алгоритм синтеза ионограмм НЗИ путем решения волнового уравнения для описания распространения КВ-радиоволн в ионосфере. Для этого была использована дискретная модель наклонного распространения КВ-радиоволн, основанная на теоремах эквивалентности. Достоинством данной дискретной модели распространения радиоволн являлась ее высокая точность вычисления группового запаздывания, позволившая исследовать тонкую структуру ДХ как вертикальных, так и наклонных (одно-скачковых) радиолиний.

Параметры ионосферы рассчитывались с помощью международной эмпирической модели IRI (International Reference Ionosphere). Вычислительный эксперимент проводился за период активности Солнца (11 лет) с 1994 г. по 2005 г. Основной задачей являлось нахождение характеристик остаточной компоненты СХ МНЧ в зависимости от времени суток и сезона (день, месяц, сезон, год), а также определение влияния геомагнитных возмущений и солнечной активности. Исследовались вариации числа солнечных пятен (R), уровня солнечной радиации ($F10.7$), K_p и D_{st} -индексов в 1994 – 2005 гг. (получены с помощью SPIDR – NGDC). Солнечная активность была высокой с 1999 до 2002 г., с 1994 по 1997 г. период низкой солнечной активности. Вероятность ионосферных возмущений была высокой в 1994, в 2003 г. и значительно ниже в 1996, 1997 г. Проведены экспериментальные исследования характеристик дальних радиолиний протяженностью порядка 3000 км: радиолинии г. Иркутск – г. Йошкар-Ола (3500 км) и радиолинии г. Инскип (Великобритания) – г. Йошкар-Ола (3100 км). Во всех экспериментах приемник был расположен в г. Йошкар-Ола. Для выделения случайной компоненты суточного хода МНЧ использовался цифровой метод, реализующий фильтр низких частот (ФНЧ) с прямоугольным окном, и метод взвешенной скользящей средней с гауссовым ядром [3]. Вариации остаточной компоненты СХ МНЧ являются одной из ее важных характеристик, которая несет информацию о неоднородностях ионосферы, в частности ПИВ, поэтому в работе анализировалось стандартное отклонение (y) остаточной компоненты СХ МНЧ для исследуемых радиолиний в разное время суток и для разных сезонов года.

Результаты исследований

В результате моделирования СХ МНЧ показано, что у МНЧ увеличивается в период восхода и захода Солнца («восходно-заходный» эффект [6]) и полудня по местному времени (LT). Кроме этого у остаточной компоненты СХ МНЧ летом, например, на радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола больше в период, когда уровень солнечной активности и вероятность появления ионосферных возмущений были достаточно высоки (с 1998 до 2005 г.). Таким образом, установлено, что существует связь между уровнем вариаций остаточной компоненты СХ МНЧ и геомагнитной активностью. Получено, что у остаточной компоненты СХ МНЧ увеличивается при

росте амплитуды ПИВ. Кроме того, связь между амплитудой ПИВ и y остаточной компоненты СХ МНЧ ярче выражена во время высокой солнечной активности (1999–2003 г.). При влиянии ПИВ y остаточной компоненты СХ МНЧ сильно меняется в период около полудня, восхода и захода Солнца по местному времени (LT).

В экспериментальных спектрах остаточной компоненты выделены «восходно-заходные» эффекты. Результаты анализа показывают, что спектр остаточной компоненты суточных вариаций МНЧ сильно меняется в период восхода Солнца (0:00 – 7:00) и захода Солнца (15:00 – 24:00) и имеет различные характеристики в разных областях частот по сравнению с фундаментальной частотой F_{ϕ} . Установлено, что в частотных диапазонах $10 \pm 16 F_{\phi}$ и $22 \pm 28 F_{\phi}$ наблюдаются синусоидальные составляющие с амплитудами $\sim 0.2 \pm 1$ МГц, которые обусловлены ПИВ с периодами $\sim 1-3$ ч.

Восходно-заходные эффекты показывают, что амплитуды гармоник спектра остаточной компоненты суточных вариаций МНЧ в период восхода (захода) Солнца выше, чем в дневное (ночное) время. Это означает, что в области терминатора возбуждаются ПИВ, которые оказывают существенное влияние на остаточную компоненту МНЧ. Выполнен анализ разности спектров в различное время суток и показано, что мощность разности спектра связана с влиянием ПИВ (см. рисунок).

Полученные экспериментальные данные приводят к следующим выводам: амплитуда ПИВ увеличивается в периоды восхода и захода Солнца; для восходного времени среднее значение относительной амплитуды ПИВ составляет

$$\langle \delta N \rangle \sim (1-5) \cdot 10^{-1},$$

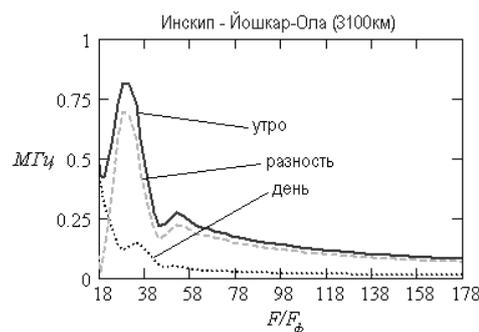
а для заходного –

$$\langle \delta N \rangle \sim (0.5-4.5) \cdot 10^{-1}.$$

Выводы

1. Разработана методика моделирования ионограмм наклонного зондирования (НЗ) ионосферы и суточных ходов МНЧ с учетом влияния перемещающихся ионосферных возмущений.

2. Проведены исследования за период 11-летнего цикла солнечной активности 1994–2005 гг. В результате моделирования показано, что у МНЧ увеличивается в период восхода и захода Солнца («восходно-заходный» эффект) и полудня по местному времени (LT).



Фильтрация ПИВ из остаточной компоненты суточных вариаций МНЧ.

3. СКО остаточной компоненты СХ МНЧ больше в период, когда уровень солнечной активности и вероятность появления ионосферных возмущений были достаточно высоки.

4. Получены экспериментальные функциональные зависимости между характеристиками остаточной компоненты СХ МНЧ и основными параметрами ПИВ. Установлено, что СКО остаточной компоненты СХ МНЧ увеличивается при росте амплитуды ПИВ, кроме этого, связь между амплитудой ПИВ и у остаточной компоненты СХ МНЧ ярче выражена во время высокой солнечной активности.

3. Рябова Н.В. Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых дециметровых радиоканалов. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 292 с.

4. Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М.: Наука, 1982.

5. Керблай Т.С., Ковалевская Е. М. О траектории коротких волн в ионосфере. М.: Наука, 1974. 160 с.

6. Иванов В.А., Рябова Н.В., Льюнг Вьет Лок, Насыров А.М. Восходный и заходный эффекты в остаточной компоненте суточного хода максимально наблюдаемых частот // 21-я Всеросс. научн. конф. «Распространение радиоволн». Йошкар-Ола, 2005. Т. 1. С. 123–126.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дробжев В.И., Дробжев В.И., Куделин Г.М., Нургожин В.И. и др. Волновые возмущения в ионосфере Алма-Ата: Наука, 1975. 178 с.

2. Иванов В.А., Рябова Н.В. Автоматизация прогноза МПЧ КВ-радиосвязи по данным ЛЧМ зонда // VII Международная конференция «Радиолокация, навигация, связь». RLNC'2001: Сб. ст. Т. 2 Воронеж, 2001. С. 915–924.

Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола, Республика Марий Эл