

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОЛНОГО ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

¹Д.В. Иванов, ¹В.А. Иванов, ¹Н.В. Рябова, ²М.И. Рябова, ¹А.А. Кислицын

¹Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия
²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия
KislitsinAA@volgatech.net

COMPLEX APPROACH TO DETERMINING THE ELECTRONIC CONCENTRATION TOTAL PROFILE

¹D.V. Ivanov, ¹V.A. Ivanov, ¹N.V. Ryabova, ²M.I. Ryabova, ¹A.A. Kislitsyn

¹Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia
²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Аннотация. Представлен метод построения профиля электронной концентрации ионосферы на основе совместного подхода по данным наклонного и трансionoсферного зондирования. Метод определения профиля электронной концентрации до высоты глобального максимума основан на реконструкции ионограмм наклонного зондирования. Выше максимума применяется модель экспоненциального слоя, исходными параметрами которой являются данные трансionoсферного зондирования. Совместное использование обоих методов при определенных предположениях на функциональную зависимость профиля выше глобального максимума ионосферы позволяет получать дифференциальную характеристику — полный профиль электронной концентрации.

Ключевые слова: наклонное зондирование, трансionoсферное зондирование, профиль электронной концентрации, полное электронное содержание, приведенная высота.

Abstract. We present the method for plotting the electron concentration profile of the ionosphere on the basis of a joint approach using oblique and transionospheric sounding data. The method of determining the profile up to the global maximum height is based on the reconstruction of oblique sounding ionograms. Above the maximum, an exponential layer model is used the initial parameters of which are transionospheric sounding data. The joint use of both methods under certain assumptions on the functional dependence of the profile above the global maximum of the ionosphere makes it possible to obtain a differential characteristic — the total profile of the electron concentration.

Key words: oblique sounding, transionospheric sounding, electronic concentration profile, total electron content, effective height.

Введение

Известно, что ионосфера, как среда распространения, существенным образом влияет на работу различных систем навигации, локации и связи. В связи с изменчивостью ионосферы в ее исследованиях главную роль начинают играть методы дистанционного радиозондирования, позволяющие получать информацию о ее состоянии в реальном времени. Однако для их дальнейшего развития в настоящее время в основном требуется совершенствование методик измерений путем развития алгоритмов обработки экспериментальных данных, объединяющих в себе новые знания о протекающих процессах, математическое моделирование и цифровые методы вторичной обработки. Наличие современных средств наклонного и трансionoсферного зондирования с высокой степенью автоматизации регистрации и обработки данных, оригинальных алгоритмов расчета позволяет проводить комплексную диагностику ионосферы для решения задач определения параметров ионосферной плазмы в различных геофизических условиях.

Цель работы — разработка комплексного подхода для мониторинга ионосферы Земли на основе натуральных экспериментов наклонного и трансionoсферного зондирования.

Гибридный метод мониторинга ионосферы

В настоящее время развитие гибридного метода мониторинга ионосферы является актуальным

направлением исследования, поскольку данный метод позволяет сочетать достоинства трансionoсферного и наземного зондирования, проводя при этом верификацию данных о профиле электронной концентрации и полном электронном содержании (ПЭС).

Суть метода (рис. 1) заключается в том, что одновременно производится наклонное и трансionoсферное зондирование и определяются параметры ионосферы в контрольной точке зондирования (КТЗ). Реализация метода производится с использованием двух программно-аппаратных комплексов, разработанных в ПГТУ.

Первый программно-аппаратный комплекс позволяет производить наклонное зондирование исследуемой радиолнии с использованием устройства, реализованного на основе SDR-технологии (рис. 2).

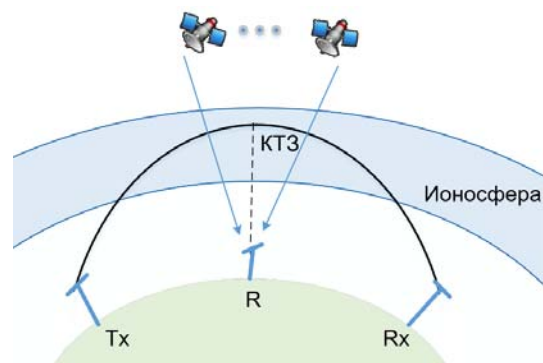


Рис. 1. Гибридный метод мониторинга ионосферы



Рис. 2. Приемный терминал комплекса наклонного зондирования

В результате определяется профиль электронной концентрации до высоты глобального максимума над КТЗ. Разработанная методика включает в себя следующие действия: 1) получение и очистку от шумовых составляющих экспериментальной ионограммы наклонного зондирования; 2) построение дисперсионной характеристики (ДХ) многомерного радиоканала по методике, описанной в работе [Рябова, 2011]; 3) получение модели профиля электронной концентрации $N_e(h)$; 4) определение полного электронного содержания (ПЭС) в контрольной точке зондирования (КТЗ) и верификация его значения со значением ПЭС, полученным по результатам трансionoсферного зондирования.

В качестве начальных значений параметров профиля электронной концентрации берутся значения, вычисленные с помощью международной справочной модели ионосферы IRI для времени и места КТЗ. По ней с применением описанной выше методики вычисляется ионограмма, которая сравнивается с натурной. В случае, когда ионограммы не согласуются, варьируется внешний параметр модели — солнечная активность и процедура повторяется. Процесс прекращается, когда выполняется критерий согласования. Критерий строится на основе метода наименьших квадратов для величины ошибки

$$|\tau_g(f) - \bar{\tau}_g(f)| = T_0.$$

Полученный итерационным путем до высоты глобального максимума ионосферы профиль интегрируется. В результате чего до высоты максимума получаем интегральную оценку профиля $I(h < h_m)$.

Одновременно с работой комплекса наклонного зондирования в КТЗ производится прием и обработка сигналов программно-аппаратного комплекса трансionoсферного зондирования, основанный на применении глобальной группировки навигационных спутников систем GPS и ГЛОНАСС. Упрощенная блок-схема комплекса представлена на рис. 3.

Трансионoсферное зондирование позволяет получить полное электронное содержание TEC над выбранной точкой на земной поверхности. Поскольку на нижнюю часть ионосферы (до максимума) приходится $I(h < h_1)$ часть электронного содержания, то на часть, расположенную выше максимума будет приходиться доля, равная $[TEC - I(h < h_1)]$.

Известно [Иванов В.А. и др., 2015], что выше максимума ионосферы профиль электронной концентрации имеет вид экспоненциального слоя:

$$N_e(h) = N_e(h_1) \exp\left[-\frac{h-h_1}{H}\right]. \quad (1)$$

где H — приведенная высота экспоненциального слоя.

Учитывая, что в вариации ПЭС основной вклад вносит область высот в окрестности главного максимума диаметром 100–150 км, а в окрестности максимума моделью профиля является парабола, высота h_1 выбиралась из условия [Иванов и др., 2015]:

$$N_e(h_1) = 0.9 N_e(h_m).$$

В нашей методике на участке от высоты максимума до h_1 используется квазипараболическая модель профиля, а на высотах выше этого уровня модель экспоненциального слоя:

$$N_e(h) = 0.9 N_e(h_m) \exp\left[-\frac{h-h_1}{H}\right]. \quad (2)$$

Условием нахождения приведенной высоты является соблюдение равенства:

$$[TEC - I(h < h_1)] = \int_{h_1}^{\infty} N_e(h) dh = 0.9 N_e(h_m) H. \quad (3)$$

Откуда:

$$H = \frac{[TEC - I(h < h_1)]}{0.9 N_e(h_m)}.$$

Апробация разработанной методики в ходе натурального эксперимента

Эксперименты по гибриднему зондированию были проведены на радиотрассе о. Кипр — г. Йошкар-Ола (2600 км) 21 марта 2015 г. в промежутке времени с 10.00 до 17.00 ч. КТЗ данной радиолинии находится в районе г. Ростов-на-Дону. На рис. 4 представлены экспериментальные ионограммы для начального (а) и конечного (б) времени зондирования.

Совместимые профили электронной концентрации для различного времени наклонного и трансionoсферного зондирования представлены на рис. 5.

Таким образом, совместное использование обоих методов позволяет получать дифференциальную характеристику — полный профиль электронной концентрации.

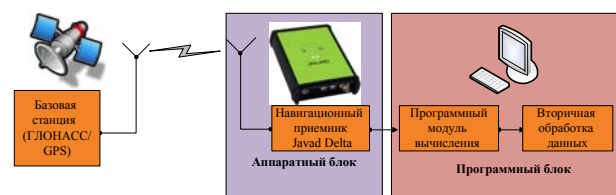


Рис. 3. Приемный терминал комплекса трансionoсферного зондирования

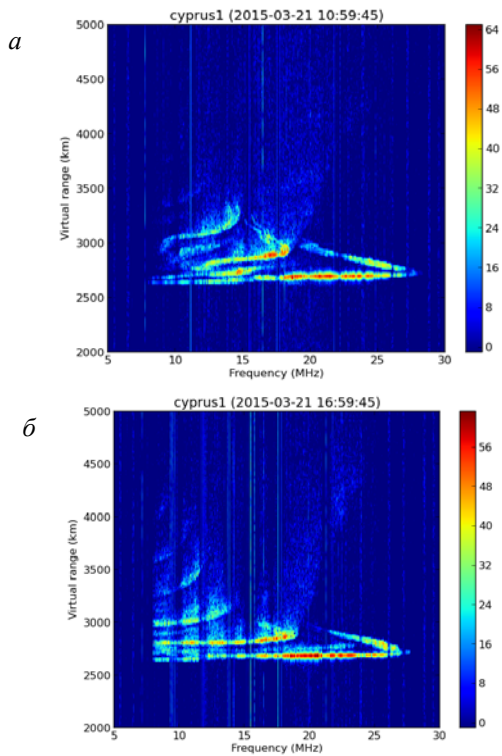


Рис. 4. Ионограммы радиотрассы Кипр—Йошкар-Ола

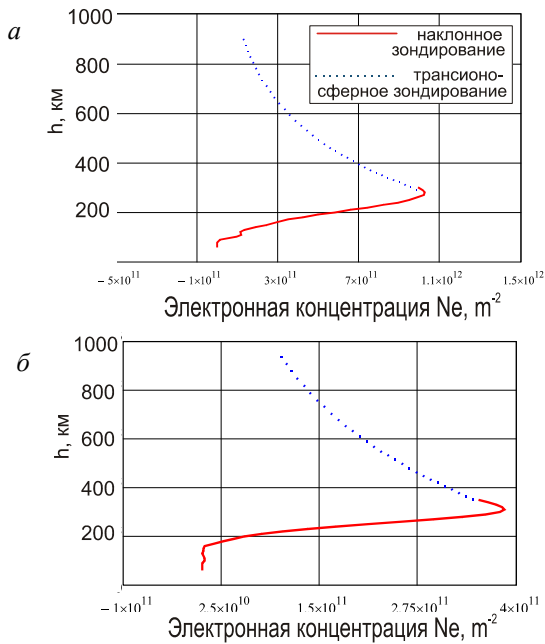


Рис. 5. Профиль электронной концентрации на основе натурального эксперимента: а — состояние профиля в 10.00; б — состояние профиля в 17.00

Заключение

Предложен новый метод определения полного профиля электронной концентрации по данным наклонного и трансionoносферного зондирования. Можно отметить, что полученные профили отражают сопряженность результатов наклонного и трансionoносферного зондирования на высотах, электронная концентрация которых составляет $0.9 N_e(h_m)$

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 15-19-10053.

Список литературы

- Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В. и др. Исследование характеристик перемещающихся ионосферных возмущений методом наклонного зондирования верхней атмосферы Земли // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18, № 2–3. С. 92–97.
- Кислицын А.А. Оценка параметров в трансionoносферных радиоканалах в условиях частотной дисперсии // Труды Поволжского государственного технологического университета. Сер. Технологическая. 2016. № 4. С. 65–71.
- Рябова М.И. Синтез и исследование дисперсионных характеристик высокочастотных радиоканалов для случая квазизенитного распространения радиоволн // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2011. № 3. С. 36–45.