

УДК 621.371

В.П. Деденок¹, А.А. Ткаченко², С.Н. Власик²¹ Харьковський центр Інститута космічних досліджень НАНУ-НКАУ, Харків² Харьковський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО НАЗЕМНОГО ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ПРИНЯТОЙ МОДЕЛЬЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОСФЕРЫ

Проведен анализ влияния модели, принятой для описания распределения электронной концентрации в ионосфере, на оценку дальности до наземного источника радиоизлучения. Показано, что рефракция радиоволн в нижних слоях ионосферы существенно влияет на траекторию распространения (отражения) радиоволн и учет этой рефракции позволяет повысить точность оценки дальности до источника радиоизлучения. Предложен подход к оценке текущего значения показателя солнечной активности, необходимой для практической реализации модели описания ионосферы IRI.

Ключевые слова: ионосфера, электронная концентрация, рефракция радиоволн.

Постановка проблемы

Явление отражения радиоволн коротковолнового диапазона от ионосферы дает возможность решать задачу оценки дальности до наземного радиостанции при его значительном удалении от приемника, в частности, при пеленгации в режиме SSL. Решение такой задачи основано на восстановлении траекторий распространения радиоволн при их отражении от ионосферы. Одними из причин погрешностей оценки дальности являются как инструмен-

тальные погрешности аппаратуры приема, так и погрешности описания ионосферы. Далее рассматриваются только погрешности, связанные с особенностями моделей описания ионосферы.

Строго говоря, ионосфера является изменчивой как во времени, так и в пространстве, при этом траектории радиоволн образуют сложные кривые, изменяющиеся во времени. Это связано с зависимостью электронной концентрации ионосферы N от высоты h , широты f , долготы λ , времени суток t , солнеч-

ной активности (которая может быть задана одним показателем солнечной активности – числом Вольфа q). Сложный вид зависимости обуславливает многообразие путей распространения (отражения) радиоволн, поэтому точность восстановления траекторий радиоволн зависит от точности модели, описывающей текущее состояние ионосферы. В настоящее время наиболее полной и точной моделью, описывающей пространственно-временное распределение электронной концентрации в ионосфере Земли, можно считать модель IRI, которая является общепризнанной моделью ионосферы, в которой при построении профилей $N(h)$ используются модели распределения N отдельных слоев ионосферы (D , E , F_1 , F_2), которые стыкуются между собой с использованием экспериментальных данных для промежуточных диапазонов высот между слоями и в верхней ионосфере

$$N_{iri}(h) = N_{iri}(f, \lambda, h, t, q).$$

При практическом решении задач восстановления траекторий радиоволн считается [1, 3], что достаточно представления функции $N(h)$ с одним главным максимумом и описанием нижней ионосферы (в которой происходит отражение радиоволн) параболической моделью

$$N(h) = N_m \left[1 - \left(\frac{h - h_m}{u} \right)^2 \right],$$

где h_m – высота главного максимума ионосферы; N_m – электронная концентрация в главном максимуме; u – толщина нижней ионосферы.

Значения N_m , h_m , u определяются из модели IRI. При таком подходе при восстановлении траекторий радиоволн фактически игнорируется рефракция радиоволн в нижних слоях ионосферы, что в ряде случаев может существенно влиять на оценку дальности.

Цель работы – анализ влияния на погрешность оценки дальности до наземного источника радиоизлучения модели, принятой для описания распределения электронной концентрации в ионосфере, по результатам обработки экспериментальных данных.

Результаты исследований

Для проведения анализа был проведен расчет траекторий распространения радиоволн при описании ионосферы моделью IRI и параболической моделью. Исходными данными для расчета были экспериментальные значения азимута, угла места радиоволны и ее частоты. Дальность до источника радиоизлучения D определялась путем интегрирования уравнения для элемента горизонтального расстояния [2]:

$$\partial D = (R_0 \operatorname{tg}(\varphi) / (R_0 + h)) \partial h,$$

где R_0 – расстояние от пеленгатора до центра Земли; h – высота; φ – зенитный угол, определяемый по закону Снелля через коэффициент преломления n , связанный с N зависимостью [1]:

$$n = 1 - 40,4 \frac{N}{f^2}.$$

Учет рефракции радиоволны в нижних слоях ионосферы может значительно изменить картину прохождения радиоволны. Так, в случаях, когда радиоволна проходит сквозь нижний слой, отмечается «загиб» траектории радиоволны (рис. 1). На рис. 1, а представлено высотное распределение электронной концентрации вдоль траектории распространения радиоволны в случае использования модели IRI и параболической модели до высоты отражения радиоволны. Соответствующая траектория радиоволны представлена на рис. 1, б. Треугольником отмечено истинное значение дальности $D_{и}$.

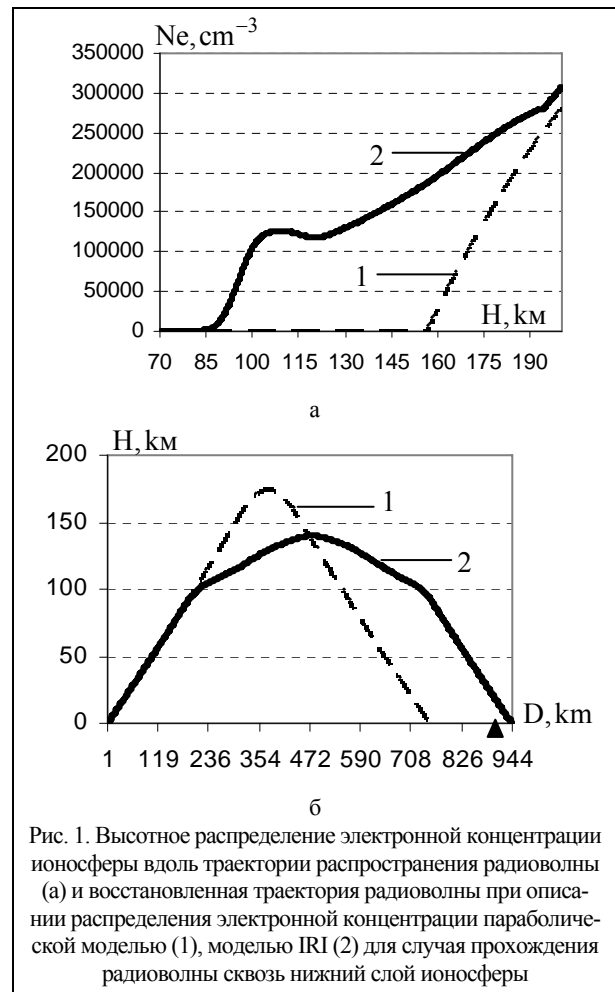


Рис. 1. Высотное распределение электронной концентрации ионосферы вдоль траектории распространения радиоволны (а) и восстановленная траектория радиоволны при описании распределения электронной концентрации параболической моделью (1), моделью IRI (2) для случая прохождения радиоволны сквозь нижний слой ионосферы

Наибольшая разность в оценках дальности наблюдается в случаях, когда радиоволна отражается от нижнего слоя. На рис. 2 (аналогично рис. 1) представлены высотное распределение электронной концентрации вдоль траектории распространения радиоволны (рис. 2, а) и восстановленная траектория радиоволны (рис. 2, б).

Рассмотренные примеры показывают, что учет рефракции радиоволн в нижних слоях ионосферы позволяет более точно восстановить траекторию распространения радиоволны. В среднем по 19 экспериментальным реализациям относительная погрешность определения дальности до наземного источника радио-

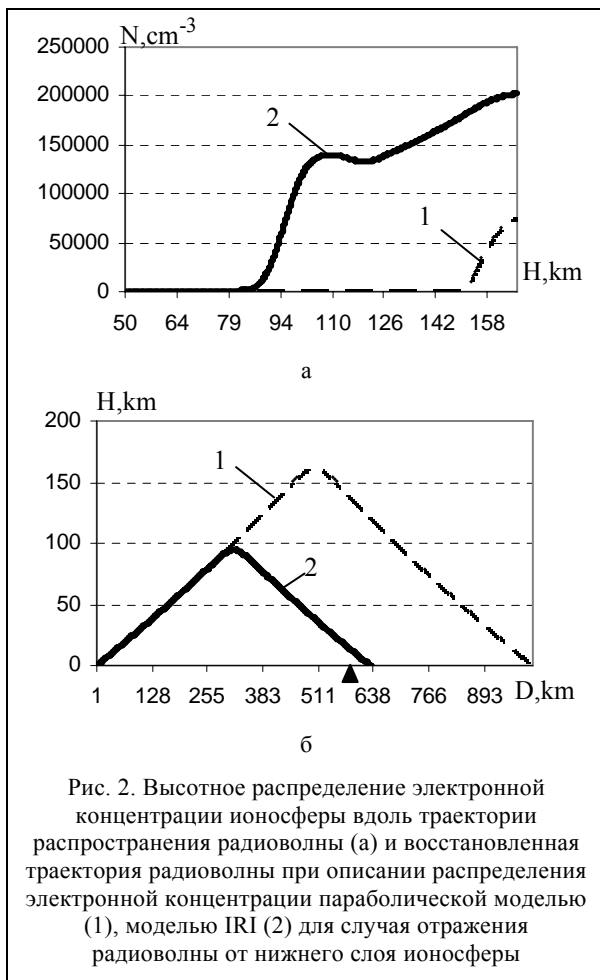


Рис. 2. Высотное распределение электронной концентрации ионосферы вдоль траектории распространения радиоволны (а) и восстановленная траектория радиоволны при описании распределения электронной концентрации параболической моделью (1), моделью IRI (2) для случая отражения радиоволны от нижнего слоя ионосферы

излучения $\Delta = (D - D_{\text{и}}) / D_{\text{и}}$ составила для параболической модели $\approx 25\%$, для модели IRI $\approx 10\%$.

«Платой» за повышение точности расчета дальности при использовании модели IRI является значительное увеличение вычислительных затрат (что, однако, не является существенным препятствием на современном уровне развития средств вычислительной техники), а также проблема оценки текущего состояния солнечной активности, определяемого числом Вольфа q . Для оценки числа Вольфа q предлагается использовать методы (представленные, например, в [4]), основанные на решении обратной задачи радиопросвечивания ионосферы и использования принципов томографии. Реализация таких методов основана на приеме многочастотных сигналов спутниковых радионавигационных систем и извлечением информации о параметрах, характеризующих пространственно-

временное распределение электронного содержания ионосферы в заданном регионе. Существенно повышает прикладную значимость таких методов возможность получения распределения дифференциальной электронной концентрации по высоте (в отличие от методов, в которых доступными анализу являются лишь значения интегрального (вдоль трассы распространения) содержания электронов [5]). Преимуществами применения такого подхода для ионосферного мониторинга являются большой радиус охвата зондируемого пространства ионосферы, высокая оперативность получения данных, пассивный принцип локации состояния ионосферы.

Выводы

Таким образом, показано, что при решении задачи определения дальности до наземного источника радионизлучения одним из направлений повышения точности оценок (наряду со снижением инструментальных погрешностей определения направления прихода радиоволны) является использование моделей распределения электронной концентрации в ионосфере, наиболее полно и точно описывающих ее сложную структуру, например модели IRI. При прочих равных условиях по сравнению с параболической моделью ионосферы использование модели IRI позволяет на $\approx 15\%$ снизить относительную погрешность оценки дальности. Предложен подход к оценке параметров солнечной активности для обеспечения практического использования модели IRI.

Список литературы

1. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. – М.: Связь, 1969. – 155 с.
2. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – М.: Наука, 1972. – 563 с.
3. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.
4. Деденок В.П., Флерко С.Н., Резников Ю.В. Комплекс оперативного трехмерного мониторинга ионосферы с использованием сигналов GNSS // Материалы первого украинско-китайского форума «Наука – производство». – Х.: ХНУРЭ, 2007. – С. 132.
5. Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами // Радиотехника и электроника. – 2001. – № 1. – С. 47-52.

Поступила в редколлегию 1.08.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ДО НАЗЕМНОГО ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ПРИЙНЯТОЮ МОДЕЛЛЮ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОННОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНОСФЕРИ

В.П. Деденок, А.О. Ткаченко, С.М. Власік

Проведений аналіз впливу моделі, прийнятої для описання розподілу електронної концентрації іоносфери, на оцінку дальності до наземного джерела радіовипромінювання в діапазоні коротких хвиль. Показано, що рефракція радіохвиль в нижніх шарах іоносфери істотно впливає на траєкторію розповсюдження радіохвилі та врахування цієї рефракції дозволяє підвищити точність оцінки дальності до джерела радіовипромінювання. Запропонований підхід до оцінки поточного значення показника сонячної активності, необхідної для практичної реалізації моделі опису іоносфери IRI.

Ключові слова: іоносфера, електронна концентрація, рефракція радіохвиль.

**ANALYSIS OF DISTANCE TO THE GROUND RADIOTRANSMITTER DETERMINATION ERRORS,
RELATED TO THE ACCEPTED MODEL OF THE IONOSPHERE**

V.P. Dedenok, A.A. Tkachenko, S.N. Vlasik

The analysis of the accepted ionosphere electronic density description model influencing on the estimation of distance from the ground radio transmitter is conducted. It is shown that the account of radio wave refraction in the low layers of ionosphere considerably influences on the radio wave trajectory and allows to promote exactnesses of the distance estimation. Approach to the estimation of current value of sun activity index, which is necessary for practical application of ionosphere description model IRI is offered.

Keywords: *ionosphere, electronic density, radiowaves refraction.*

