

УДК 621.371

## КОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО РАДИОКАНАЛА

Е.М. Вдовин, В.А. Голыгин, М.К. Ивельская, В.И. Сажин, О.А. Ситникова

## PARAMETER CORRECTION OF TRANSIONOSPHERIC RADIO CHANNEL MODEL

Е.М. Vdovin, V.A. Golygin, M.K. Ivetskaja, V.I. Sazhin, O.A. Sitnikova

Трансионосферное распространение электромагнитных волн привлекает в последнее время большое внимание исследователей. В работе рассматривается модель трансионосферного радиоканала, объединяющая блоки задания среды распространения и расчета характеристик сигнала. Особенностью рассматриваемой модели радиоканала является возможность адаптации к текущим условиям.

In recent years, researchers have been paying a great deal of attention to transionospheric propagation of electromagnetic waves. This work deals with the transionospheric model combining blocks of propagation medium and calculation of signal characteristics. Feature of the said radio channel model is the ability to adapt to current conditions.

Понятие «трансионосферный радиоканал» в нашем рассмотрении означает радиофизическую модель канала распространения электромагнитных волн, включающую модель, описывающую вариации основных параметров ионосферы и алгоритмы расчета характеристик распространения радиоволн в данной среде. Первая часть модели радиоканала дает набор входных параметров модели канала, вторая часть содержит набор выходных параметров модели. Коррекция модели радиоканала заключается в том, что посредством изменения значений входных параметров подбирается лучшее совпадение значений выходных параметров с измеряемыми в конкретный момент времени на определенной радиолинии.

При разработке части модели, отвечающей за описание вариаций параметров ионосферы, учитывались следующие соображения. В настоящее время можно считать достаточным достигнутый уровень описания средних за временной период порядка месяца вариаций регулярной ионосферы в спокойных геомагнитных условиях. Разработан ряд соответствующих среднемесячных моделей. В своей работе мы сосредоточились на учете отличий регулярной формы модельного профиля в спокойных геомагнитных условиях от средней за месяц.

Естественно, что наиболее важными для распространения электромагнитных волн являются отличия формы профиля в области максимума ионосферы. Их можно характеризовать через отличия основных параметров: критической частоты, высоты максимума и эффективной полутолщины слоя F2. Таким образом, при уточнении формы профиля электронной концентрации в текущих условиях целесообразнее всего корректировать значения параметров максимума ионосферы.

При выборе среднемесячной модели ионосферы, которая должна быть взята за основу, было рассмотрено две модели. Международным радиосоюзом рекомендуется в качестве стандартной известная модель IRI (International Reference Ionosphere) [1], являющаяся по типу построения профиля моделью, аппроксимирующей эмпирические данные. Привлекает внимание также полуэмпирическая модель (ПЭМИ) ИГУ [2], разработанная под руководством В.М. Полякова. Она разрабатывалась, прежде всего,

как среднеширотная модель, хотя имеет развитие и на экваториальную область. Для оценки точности описания среднемесячных вариаций  $f_0F2$  моделями было выполнено сравнение их расчетных данных с измеряемыми на нескольких станциях вертикального зондирования (ВЗ), данные по которым размещаются в Internet.

Объем выполненного сравнения включал пять среднеширотных станций, различные уровни солнечной активности (минимум, средний уровень и максимум), четыре сезона года (средние месяцы сезонов), четыре суточных периода (по средним часам периода), охватывал интервал с 1991 по 2004 гг. и содержал суточные ходы по четырем периодам, пространственный ход по четырем часам суточных периодов. Всего было использовано около пятисот значений  $f_0F2$  для спокойных геомагнитных условий, каждое из которых получено усреднением за месячный период. Проверилось, как эмпирические части модели, построенные по данным за предыдущие солнечные циклы, отражают вариации в новых циклах. Получено, что описание этих вариаций для обеих моделей хорошее. Среднее значение абсолютной ошибки по модулю между моделями и данными станции ВЗ составляет для суточного хода по ПЭМИ 0.62 МГц, а по IRI 0.64 МГц. Для пространственного хода такая же ошибка по ПЭМИ составляет 0.59 МГц, а по IRI – 0.54 МГц. Средние значения коэффициента корреляции между модельными и реальными значениями в пространстве получены на уровне примерно 0.95 для ПЭМИ и для IRI. Среднеквадратичное отклонение (СКО) для обеих моделей составило около 1.1 МГц.

Таким образом, в среднеширотном российском регионе обе модели довольно точно и примерно одинаково описывают временные и пространственные среднемесячные вариации критических частот ионосферы. В дальнейшем при выборе модели учитывалось, что коррекция формы профиля к текущим условиям может быть выполнена более удобно в ПЭМИ, поскольку в ней естественным образом заложена коррекция решения теоретической части модели в опорных точках профиля по вводимым экспериментальным данным. Кроме того, ранее было показано [3], что ПЭМИ по сравнению с IRI дает несколько лучшее описание вертикальных градиентов  $N_e$  в нижней части области F2, что приводит к

более точным результатам вычисления такой характеристики, как угол прихода в вертикальной плоскости сигнала, отражающейся от ионосферы при наклонном падении на нее.

Во второй основной части модели радиоканала для расчета параметров сигнала использован метод характеристик, дающий строгое численное решение в рамках исходного приближения геометрической оптики. Сопряжение с моделью ионосферы выполнено на основе кубической сплайн-интерполяции.

Коррекция модели в разрабатываемой методике выполняется в два этапа. На первом этапе уточняется для текущих условий значение критической частоты ионосферы. Оно может быть определено из данных ВЗ или на основе наблюдения за сигналами реперных радиостанций по разработанной нами методике [4]. На втором этапе проводится уточнение формы профиля электронной концентрации на участке выше максимума. Для этого необходимо, чтобы среднемесячная модель достаточно адекватно отражала изменения электронной концентрации на данных высотах.

Ранее в ПЭМИ нами использовалась аппроксимация верхнего участка экспоненциальной кривой, сопряженной в области выше максимума ионосферы с параболической зависимостью, описывающей непосредственно область максимума. Но у нее был недостаток – не отражались достаточно сильные изменения  $N_e$  на участке высот, где концентрация ионов  $H^+$  начинает существенно преобладать над концентрацией  $O^+$ . На профиле  $N_e(h)$  он может иногда выражаться в виде довольно резкого перегиба профиля. Поэтому сейчас выполняется развитие ПЭМИ в рассматриваемой области. Введено сопряжение двух кривых: первая имеет вид функции Чепмена (1), где  $N_{max}$  – высота максимума электронной концентрации ионосферы,  $h$  – высота,  $h_0$  – высота  $N_{max}$ ,  $H$  – высота однородной атмосферы.

$$N(h) = N_{max} \exp(1 - z - e^{-z}), \quad (1)$$

$$z = \frac{h - h_0}{H}, \quad (2)$$

$$H = \frac{kT}{Mg}, \quad (3)$$

$$N(h) = N_{max} \exp(-z). \quad (4)$$

Вторая кривая представляет собой экспоненциальную зависимость (4).

Первая описывает форму  $N_e(h)$  от точки  $h_1$ , расположенной чуть выше максимума  $N_e$ , до высоты уровня замены доминирующего влияния ионов кислорода на ионы водорода  $h_2$ , вторая – от этой высоты до высоты окончания ионосферы  $h_3$ . (Профиль изображен на рис. 1; сплошная линия – профиль, полученный с помощью данной аппроксимации, пунктир – профиль, полученный с помощью ПЭМИ). Известный параметр функции Чепмена – шкала высот однородной ионосферы (3) – не остается при аппроксимации постоянным, а меняется с высотой. В формуле (3):  $k$  – постоянная

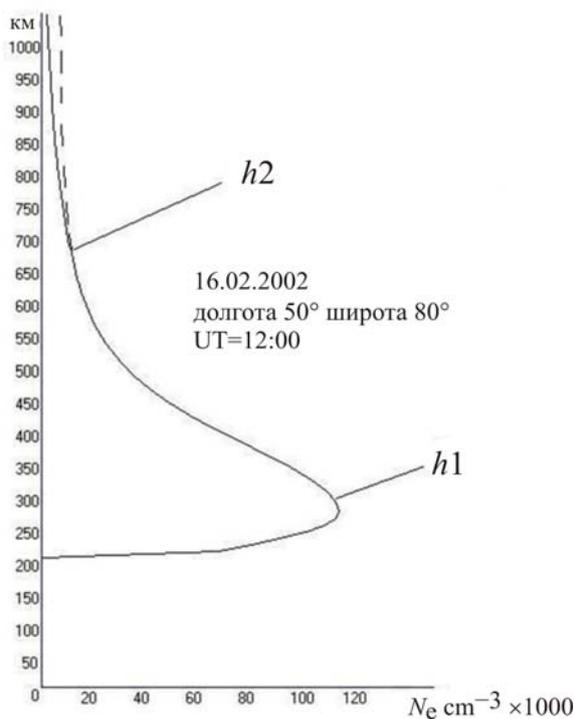


Рис. 1. Сравнение полученного нами профиля  $N_e(h)$  с профилем, полученным с помощью ПЭМИ.

Больцмана,  $T$  – температура взаимодействующих частиц,  $M$  – масса взаимодействующих частиц,  $g$  – ускорение свободного падения. Для выбора его значений использованы данные расчетов по модели IRI.

Чтобы уменьшить число параметров аппроксимации, проведено для различных гелиофизических условий моделирование зависимостей  $H(h)$  на участках выше максимума. Получено, что эту зависимость можно довольно точно описывать прямой линией. На рис. 2 показаны в различных условиях зависимости  $H(h)$  (кривые линии), рассчитанные с помощью данных IRI. Там же показаны прямые линии, представляющие линейную аппроксимацию этих зависимостей, полученную по методу наименьших квадратов. На рис. 3 приведено сравнение форм профиля  $N_e(h)$  на участке выше максимума, даваемых IRI и полученных с помощью нашей аналитической аппроксимации. Можно видеть, что отличия незначительны, так как кривые практически сливаются. Таким образом, для ПЭМИ на верхнем участке может быть использована рассматриваемая аналитическая аппроксимация. Для этого в ПЭМИ включение аппроксимации функцией Чепмена реализуется с уров-

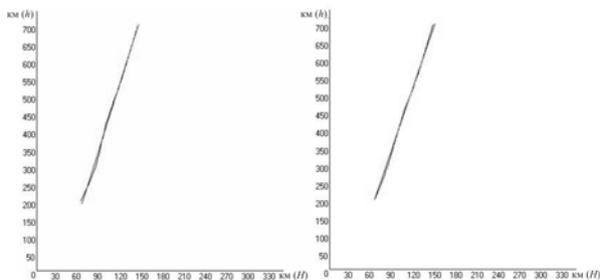


Рис. 2. Зависимости  $H(h)$ , рассчитанные с помощью данных IRI.

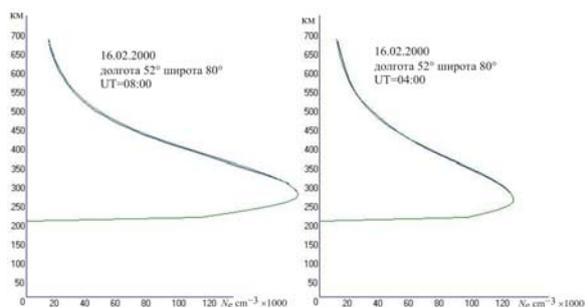


Рис. 3. Сравнение профиля IRI на участке выше максимума с полученной нами зависимостью  $N_e(h)$ .

ня, расположенного выше  $h_m$  на четверть полутолщины параболы, аппроксимирующей область максимума ионосферы. Окончание аппроксимации берется на высоте  $h_2$ , определяемой из IRI.

В качестве корректируемого параметра рассматривается возможность использования высоты уровня перегиба профиля  $h_2$ . Будут определены вариации этого значения по IRI и рассмотрено влияние этих вариаций на форму профиля. В качестве корректирующего параметра предполагается использование измеряемых значений ПЭС, размещаемых в Internet.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri.html>
2. Поляков В.М., Суходольская В.Е., Ивельская М.К. и др. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий. М.: МЦД-Б, 1986. 136 с.
3. Агарышев А.И., Дубовская Г.В., Ивельская М.К. и др. Оценка применимости некоторых моделей ионосферы для расчета углов прихода декаметровых радиоволн // Техника средств связи, серия «Системы связи». М.: Изд-во «Экос», 1982. Вып. 4. С. 3–10.
4. Голыгин В.А., Вдовин Е.М., Сажин В.И., Унучков В.Е. Адаптация среднемесячной модели ионосферы к текущим условиям по данным о максимально-применимых частотах двухскачковых реперных радиолоний // Геомагнетизм и аэронавигация. 2009. Т. 49, № 3. С. 387–392.

*Иркутский государственный университет, Иркутск*