

УДК 550.388

РЕГИОНАЛЬНАЯ АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ IRI С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ВОЗВРАТНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

К.А. Тетерин

Ввиду использования эмпирических моделей при КВ радиосвязи на дальние расстояния и в задачах обнаружения целей необходима адаптация этих моделей к текущему состоянию ионосферы для использования в оперативной работе. Предложена адаптация модели IRI по данным возвратно-наклонного зондирования путем оптимизации значений глобального ионосферного индекса и числа солнечных пятен, используемых в модели при расчете концентрации электронов в ионосфере. Рассмотрено влияние предложенного метода адаптации на погрешность определения дальности цели при использовании эмпирической модели IRI.

Ключевые слова: Адаптация, возвратно-наклонное зондирование, дистанционно-частотная характеристика, эмпирическая модель, ионосфера

ВВЕДЕНИЕ

При загоризонтной радиолокации возникает необходимость пересчёта радиолокационных координат (время прихода сигнала от цели и его азимут) в географические для определения местоположения цели. Такой пересчёт можно осуществлять с помощью эмпирических моделей ионосферы и программ, моделирующих распространение радиоволн. Широко используется модель ионосферы IRI [1]. В ней для расчета вертикальных профилей концентрации электронов используются глобальный ионосферный индекс (IG) и число солнечных пятен (RZ). По данным ITU-R (отчет H.3.2.1) точность определения концентрации электронов в ионосфере моделью IRI 2007 на широтах, меньших 60° , на высотах от 200 до 1000 км составляет 15-25%, что часто недостаточно, и требуется адаптация модели к текущему состоянию ионосферы. Известен метод адаптации по данным вертикального зондирования ионосферы [2], но эти данные характеризуют состояние ионосферы в небольшой окрестности станции ВЗ, что недостаточно при загоризонтной радиолокации, поэтому исследуется возможность адаптации по данным возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ), характеризующим ионосферу в обширном регионе. При ВНЗ в широком азимутальном секторе получается дистанционно-частотная характеристика (ДЧХ) [3], что характеризует состояние ионосферы в обширном регионе, и с помощью этих данных можно провести адаптацию модели IRI к текущему состоянию ионосферы в этом регионе путем решения обратной задачи ВНЗ [4]. Однако решение обратной задачи ВНЗ, т. е. восстановление пространственного профиля электронной концентрации в ионосфере на основе данных ВНЗ – некорректная задача, дающая множество решений, поэтому необходимы методы регуляризации. В [4] использовалась аналитическая экспоненциально-параболическая аппроксимация распределения электронной концентрации в ионосфере, параметры которой подлежали определению. Такая модель лишь частично регуляризовала обратную задачу, поэтому в данной работе предлагается регуляризация, состоящая в ограничении класса решений обратной задачи ВНЗ профилями распределения концентрации электронов, формируемыми моделью IRI. С помощью модели распространения декаметровых радиоволн в ионосфере и модели IRI при заданных значениях параметров IG и RZ рассчитывается модельная ДЧХ. Эти параметры оптимизируются так, чтобы модельная ДЧХ была как можно ближе к экспериментальной в смысле критерия адаптации, предложенного в [5]. В ней так же рассматривалась корректность такого подхода в случае соответствия истинной ионосферы модельной при значениях параметров IG и RZ, взятых из прогноза, как в отсутствие ошибок измерения экспериментальных ДЧХ, так и с их учётом, моделировавшимся с помощью генератора случайных чисел RandG на C++. Так же были оценены ошибки определения оптимальных значений IG и RZ. В данной же работе используются экспериментальные данные, полученные на станции ВНЗ.

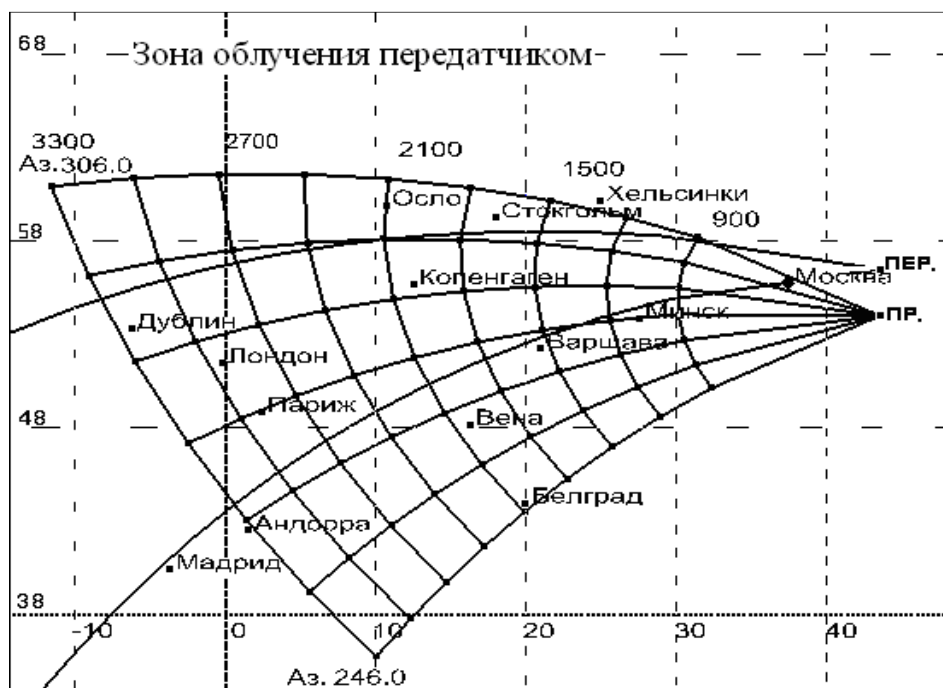


Рис. 1. Схема возвратно-наклонного зондирования. Пер. – передатчик, пр. – приёмник. Вертикальные пунктирные линии – отсчёты долготы, горизонтальные – отсчёты широты (в градусах). На приёме стоит цифровое формирование диаграммы направленности по азимуту (ЦФДН), разделяющее сигналы с направлений, расположенных посередине между чёрными линиями, идущими от приёмника.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент по получению ДЧХ и обнаружению летающих целей проходил 18.04.2013 г. в вечернее время суток [6]. На рисунках 2а и 2б показаны полученные ДЧХ по результатам ВНЗ для 22:23:23 и 22:10:13 по зимнему московскому времени соответственно, для азимутов 289° и 285° соответственно (черная линия), модельная ДЧХ с параметрами IG и RZ, взятыми из прогноза (синяя линия), и модельная ДЧХ с оптимизированными параметрами. По оси абсцисс отложена частота в МГц, по оси ординат – задержка переднего фронта сигнала в мс.

Из рисунков видно, что модельная ДЧХ после оптимизации IG и RZ значительно ближе к истинной, чем с использованием прогнозных значений. На рис. 3а и 3б, 4а и 4б показан результат адаптации модели IRI по экспериментальным данным из рисунков 2а, 2б соответственно. Время и азимут так же соответствуют времени и азимуту полученных экспериментальных данных. По оси абсцисс – глобальный ионосферный индекс, разные кривые соответствуют разным числам солнечных пятен RZ. По оси ординат – значение функции правдоподобия $P(x|A)$ [5]. Параметр RZ от одной кривой к другой растёт слева направо: -12.5, -5, 2.5, ..., 137.5 для обеих пар рисунков.

Как видно из рисунков, имеется единственный максимум функции правдоподобия, хотя и не ярко выраженный. Ему соответствуют оптимизированные значения IG и RZ, равные 115.25 и -5, соответственно.

На рисунках 4а и 4б максимуму функции правдоподобия соответствуют оптимизированные значения IG и RZ, равные 113.9 и -12.5 соответственно. Помимо главного максимума есть побочный. Связано это, возможно, с учётом разнесения трассы ВНЗ, т. е. приёмник и передатчик удалены друг от друга приблизительно на 300 км. Применяемый метод вычисления модельной ДЧХ с учётом разнесения даёт большие случайные ошибки, чем без его учёта, чему подтверждение – рисунок 5. На нем показано то же, что и на рисунках 3а и 3б, только в предположении, что передатчик находился там же, где и приёмник. Параметр RZ от одной кривой к другой так же растёт слева направо: -12.5, -5, 2.5, ..., 115.

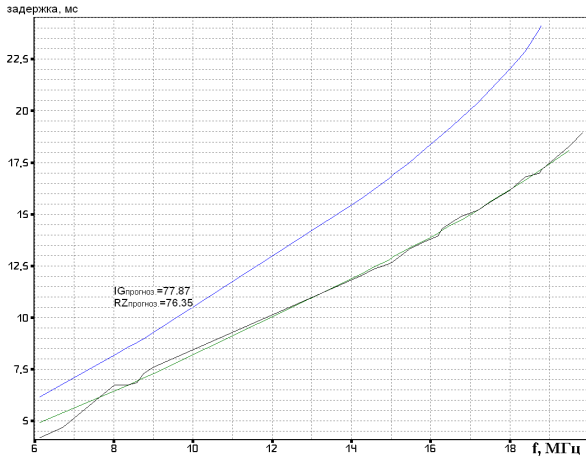


Рис. 2а

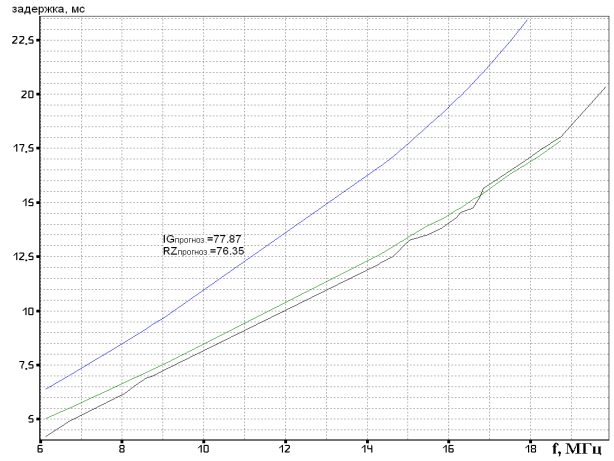


Рис. 2б

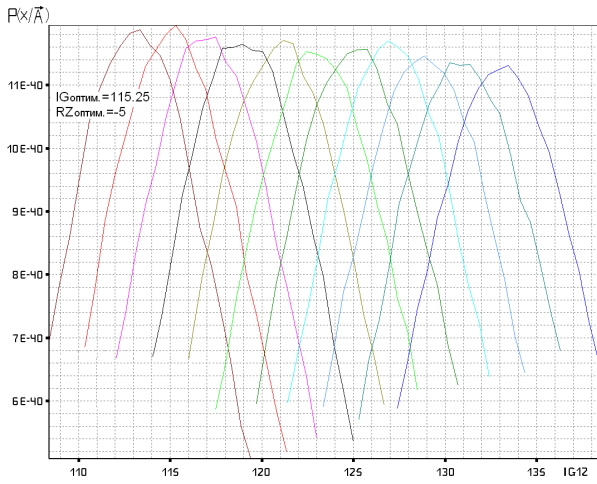


Рис. 3а

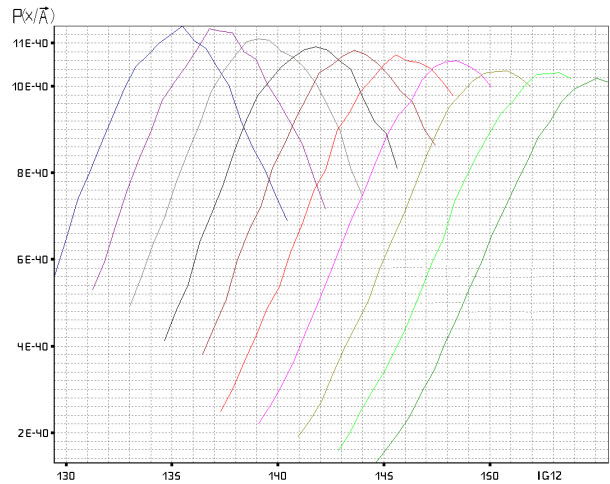


Рис. 3б

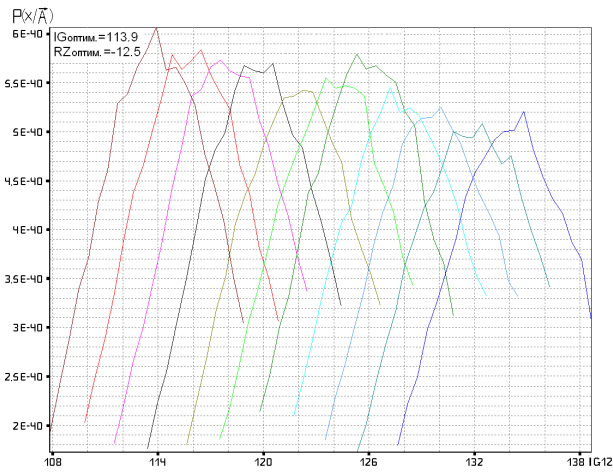


Рис. 4а

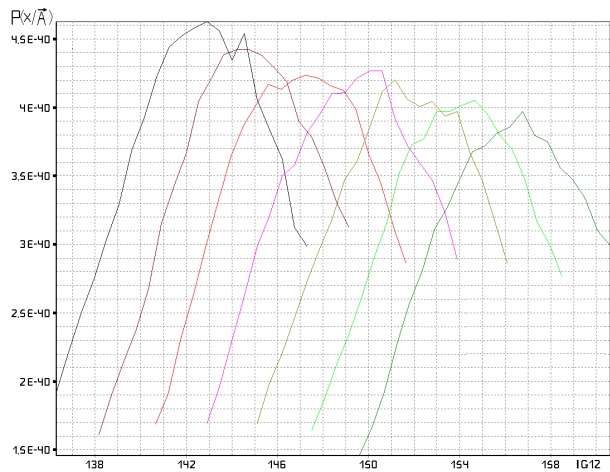


Рис. 4б

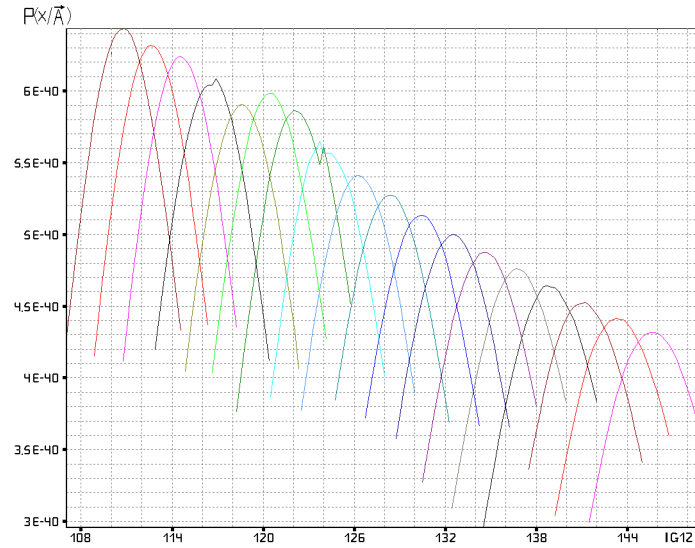


Рис. 5

В этом случае кривые более гладкие, побочный максимум едва заметен, главный максимум выражен чётко.

По полученным адаптированным моделям ионосферы производился пересчёт измеренных задержек сигналов летающих целей в дальности по земле от приёмника до цели. Результаты представлены на рисунках 6-8. Каждому рисунку соответствует своя цель со своей траекторией полёта. По оси абсцисс отложено время в UT, по оси ординат – дальность от цели до приёмника в км. Красные линии соответствуют истинным траекториям движения целей [7]. Синие линии получены при пересчёте с использованием прогнозных значений параметров IG и RZ, а зелёные – используя оптимизированные в процессе адаптации модели. В обоих случаях при пересчёте в качестве азимута цели относительно приёмника брался померенный на приёмнике азимут. Групповые пути точек траектории так же брались из [7]. На рисунке 6 показан элемент траектории цели с 19:15:55 по 19:18:19 UT, азимут лежал в интервале: [284.36°, 285.15°]. Этому случаю соответствует экспериментальная ДЧХ ВНЗ на рисунке 2а. На рисунке 7 и 8 – с 19:27:00 по 19:30:55 UT и с 19:27:00 по 19:28:11 UT соответственно, азимуты – в интервалах: [288.28°, 289.84°] и [288.62°, 288.79°] соответственно. Соответствующая им экспериментальная ДЧХ ВНЗ показана на рисунке 2б.

Средний модуль отклонения посчитанной с использованием прогнозных значений дальности от истинной для случая на рисунке 6 составляет 54.6 км, после адаптации – 22.7 км. На рисунке 7 для прогнозных значений – 61.5 км, после адаптации – 26.8 км, и на рисунке 8 – 61 и 26 км соответственно.

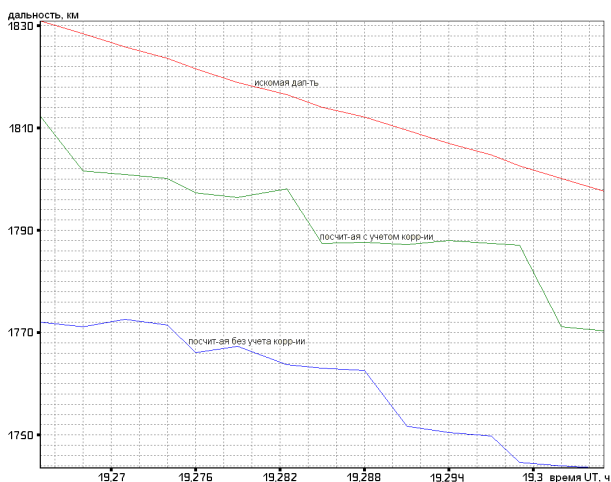


Рис. 6

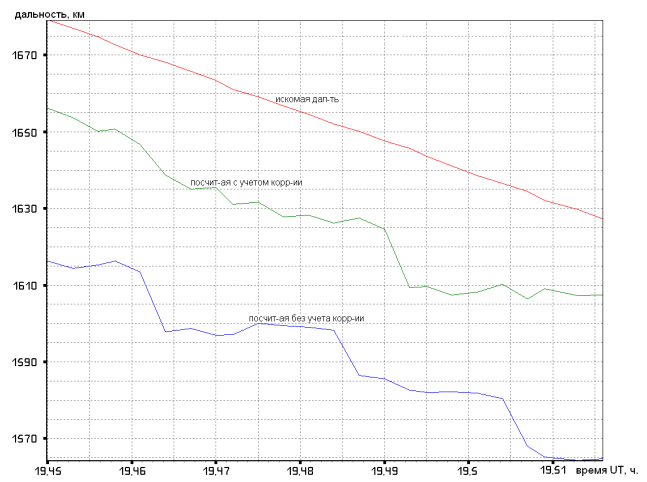


Рис. 7

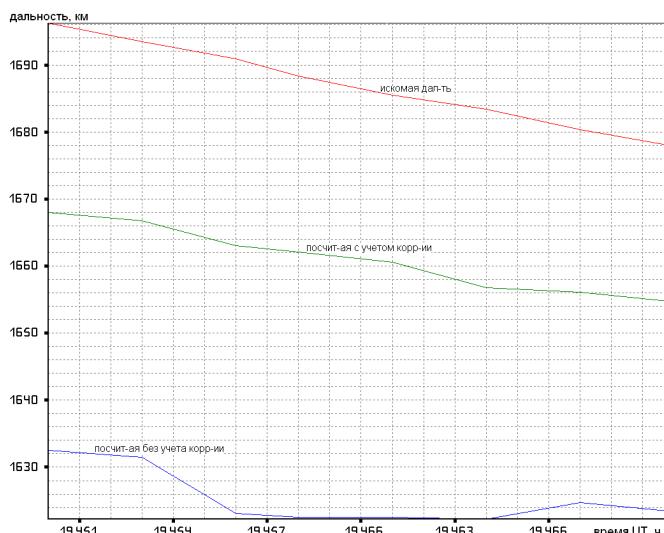


Рис. 8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Предложенный подход к адаптивированию корректен (имеет единственное решение), но метод учёта разнесения схемы ВНЗ желательно доработать.
- Пересчёт задержки сигнала до цели с использованием адаптированной модели даёт более точный результат, чем до адаптации. Приведено количественное сравнение результатов.

REGIONAL ADAPTATION OF IONOSPHERIC MODEL IRI WITH THE USE OF BACK-SCATTER SOUNDING DATA

K.A. Teterin

Because of usage of empirical models in HF long distance radio connection and in radiolocation it is necessary to adapt these models to the actual ionospheric circumstances; otherwise models cannot be used in current operation. New method of IRI model adaptation is suggested in this article by means of global ionospheric index and solar spot number improving with the use of back-scatter sounding data. These two parameters are used in calculation of electron concentration in IRI model. Influence of suggested adaptation method on range calculation mistake obtained using IRI model is considered in this article.

KEYWORDS: ADAPTATION, BACK-SCATTER SOUNDING, DISTANCE-FREQUENCY CURVE, EMPIRICAL MODEL, IONOSPHERE

ЛИТЕРАТУРА

1. Bilitza D., Reinisch B. W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // Adv. Space Res. 2008.V. 42. I. 4. P. 599.
2. Крашенинников И. В., Егоров И. Б., Павлова Н. М. Эффективность прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе ионосферной модели IRI-2001 // Геомагнетизм и аэронавигация. 2008. Т. 48. №4. С. 526.
3. Чернов Ю. А. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. М.: СВЯЗЬ. 1971.
4. Ахмедшин Р. Л., Калинин Ю. К., Платонов Т. Д., Рождественская Л. Л. Обратная задача возвратно-наклонного зондирования для трехслойной ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 1991. Т. 31. №6. С. 1021.
5. Тетерин К. А. Локальная адаптация модели ионосферы IRI по данным возвратно-наклонного зондирования // Геомагнетизм и аэронавигация. 2013. Т. 53. №3. С. 337.
6. Протокол мониторинга воздушной обстановки проведенного на комплекте аппаратуры комплекса 29Б6 18-19 апреля 2013 г, инв. № 03/819-13, ОАО НПК НИИДАР.
7. Шукин А.Ю. Анализ результатов прогона 18.04-19.04.2013 (Лабораторный отчет), ОАО НПК НИИДАР.