

МЕТОД РЕГИОНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ IRI С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СО СТАНЦИЙ ВОЗВРАТНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В.А. Егоров, К.А. Тетерин (ОАО "НПК "НИИДАР")

Аннотация. 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.

Введение

В советское время в 60 и 70-х годах на северных территориях СССР для исследования высокоширотной ионосферы было развернуто множество станции вертикального зондирования (ВЗ), регулярно снимавших ионограммы, был получен большой массив данных. По этим данным в Полярном геофизическом институте была создана модель высокоширотной ионосферы "Модель-ПГИ" [1]. Но необходимость в исследованиях пропала, и дальнейшие исследования высокоширотной ионосферы были остановлены. Полярная ионосфера остается малоизученной, и поскольку станций ВЗ в области высоких широт немного, то распространенные эмпирические модели ионосферы, например IRI 2001 и IRI 2012, плохо описывают ионосферу в этом регионе, имеющую ряд особенностей: электронная концентрация в D-области значительно выше, чем в средних широтах; электронная концентрация в возмущенной D-области больше, чем в невозмущенной на порядок и более; нижняя граница ионизации опускается до 50–60 км в время ПШШ и т. д. Созданная в ПГИ модель является завершением первого этапа создания модели высокоширотной ионосферы, и возможности ее использования при расчете высокоширотных трасс распространения радиоволн ограничены, так как в нее не входят ни форма, ни спектр масштабов неоднородностей. Поэтому целесообразно продолжить развитие модели полярной ионосферы, для чего целесообразно возрождать свернутую ранее сеть станций ВЗ, действующую в высокоширотном регионе нашей страны.

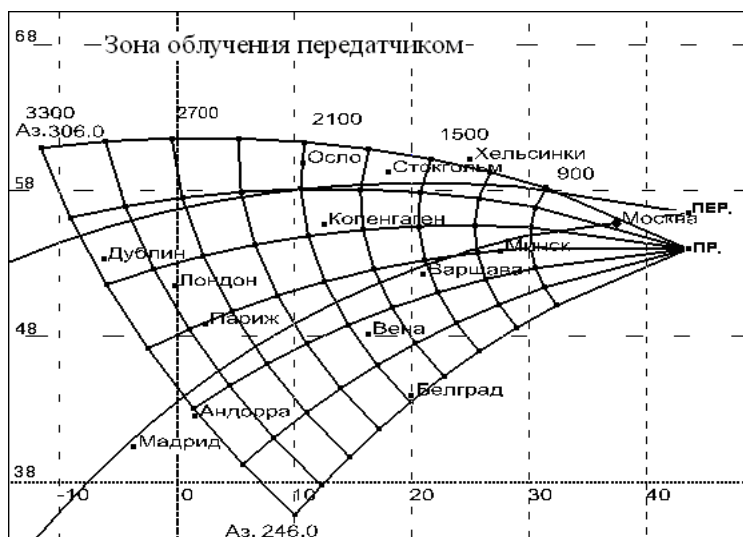


Рисунок 1. Схема возвратно-наклонного зондирования. Пер. – передатчик, пр. – приемник. Вертикальные пунктирные линии – отсчеты долготы, горизонтальные – отсчеты широты (в градусах). На приеме стоит цифровое формирование диаграммы направленности по азимуту (ЦФДН), разделяющее сигналы с направлений, расположенных посередине между черными линиями, идущими от приемника

При загоризонтной радиолокации возникает необходимость пересчета радиолокационных координат (время прихода сигнала от цели и его азимут) в географические для определения местоположения цели. Такой пересчет можно осуществлять с помощью эмпирических моделей ионосферы и программ, моделирующих распространение радиоволн. Широко используется модель ионосферы IRI [2]. 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 [3], 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) [4], 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 [5]. 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 [6] 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 [6]. 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 учетом, 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 ВЗ.

Результаты эксперимента

Эксперимент по получению ДЧХ и обнаружению летающих целей проходил 18.04.2013 г. в вечернее время суток [7]. На рис. 2а и б 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.

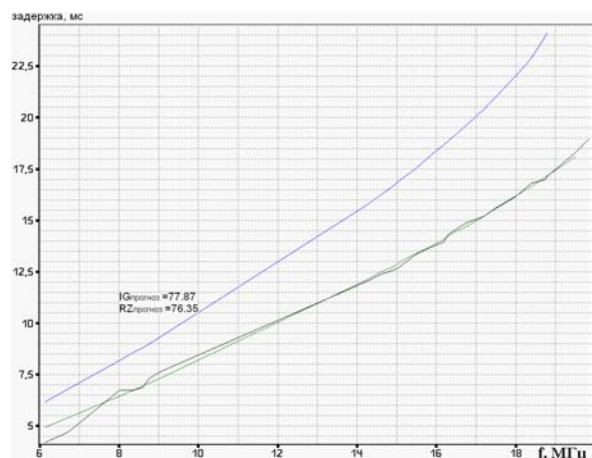


Рисунок 2а. Модельные (до и после адаптации) и экспериментальная ДЧХ

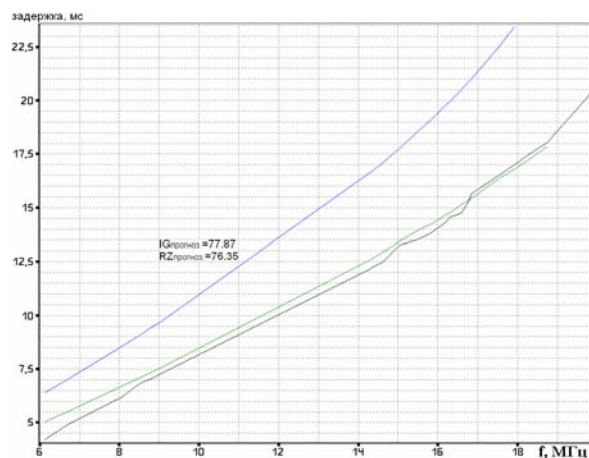


Рисунок 2б. Модельные (до и после адаптации) и экспериментальная ДЧХ

По полученным адаптированным моделям ионосферы производился пересчет измеренных задержек сигналов летающих целей в дальности по земле от приемника до цели. Результаты представлены на рис. 3 – 5. Каждому рисунку соответствует своя цель со своей траекторией полета. По оси абсцисс отложено время в UT, по оси ординат – дальность от цели до приемника в км. Красные линии соответствуют истинным траекториям движения целей [8]. Синие линии получены при пересчете с использованием прогнозных значений параметров IG и RZ, а зеленые – используя оптимизированные в процессе адаптации модели. В обоих случаях при пересчете в качестве азимута цели относительно приемника брался померенный на приемнике азимут. Групповые пути точек траектории так же брались из [8]. На рис. 3 показан элемент траектории цели с 19:15:55 по 19:18:19 UT, азимут лежал в интервале: $[284.36^{\circ}, 285.15^{\circ}]$. Этому случаю соответствует экспериментальная ДЧХ ВНЗ на рис. 2а. На рис. 4 и 5 - с 19:27:00 по 19:30:55 UT и с 19:27:00 по 19:28:11 UT соответственно, азимуты - в интервалах: $[288.28^{\circ}, 289.84^{\circ}]$ и $[288.62^{\circ}, 288.79^{\circ}]$ соответственно. Соответствующая им экспериментальная ДЧХ ВНЗ показана на рис. 2б.

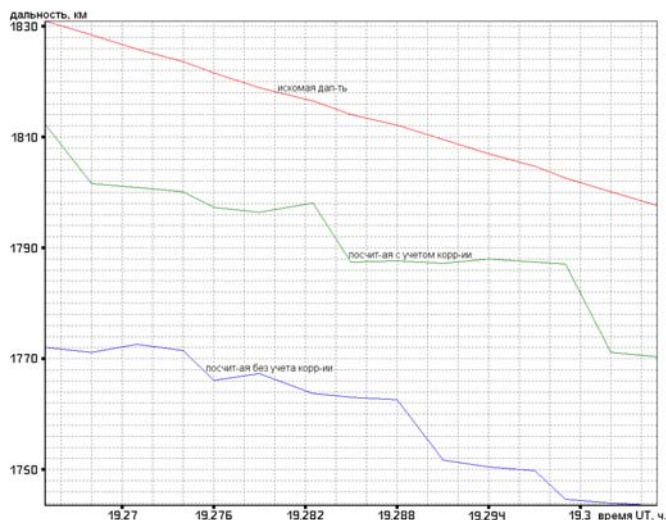


Рисунок 3. Экспериментальная и пересчитанные зависимости дальности от времени для первой цели

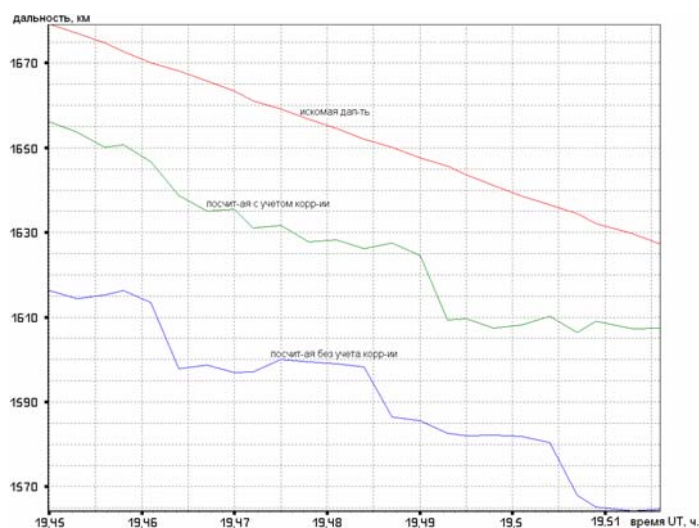


Рисунок 4. То же что и на рис. 3 для второй цели

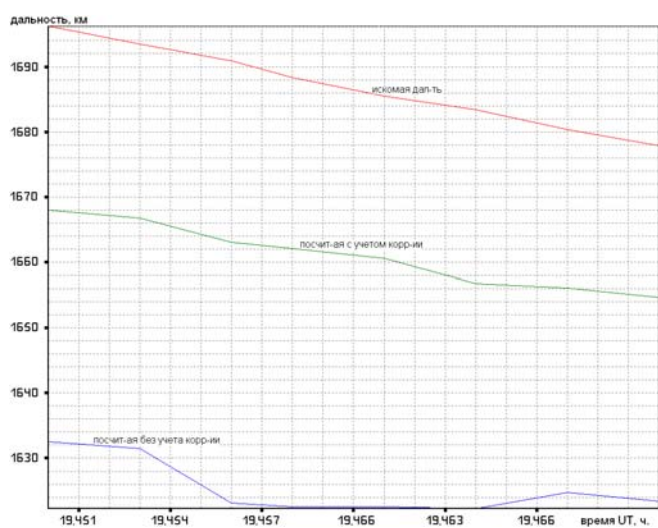


Рисунок 5. То же что и на рис. 3 для третьей цели

Средний модуль отклонения посчитанной с использованием прогнозных значений дальности от истинной для случая на рис. 3 составляет 54.6 км, после адаптации – 22.7 км. На рис. 4 для прогнозных значений – 61.5 км, после адаптации – 26.8 км, и на рис. 5 – 61 и 26 км соответственно.

Заключение

Средний модуль отклонения пересчитанной дальности от истинной составляет для первой цели:

54.6 км - с использованием прогноза, 22.7 км – после адаптации;

для второй цели:

61.5 км – с использованием прогноза, 26.8 км – после адаптации;

Пересчет задержки сигнала до цели с использованием адаптированной модели дает более точный результат, чем до адаптации.

Литература

1. Заключительный отчет по теме “Модель-ПГИ” плана работ ПГИ по созданию и внедрению новой техники “Совершенствование формульной модели пространственно-временного распределения электронной концентрации высокоширотной ионосферы, позволяющей моделировать на ЭВМ процессы распространения радиоволн”, инв № 03/1-15, 1980 г.
2. Bilitza D., Reinisch B. W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Adv. Space Res.* 2008.V. 42. I. 4. P. 599.
3. Крашенинников И.В., Егоров И.Б., Павлова Н.М. Эффективность прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе ионосферной модели IRI-2001 // *Геомагнетизм и аэрoномия.* 2008. Т. 48. №4. С. 526.
4. Чернов Ю.А. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. М. : СВЯЗЬ. 1971.
5. Ахмедшин Р.Л., Калинин Ю.К., Платонов Т.Д., Рождественская Л.Л. Обратная задача возвратно-наклонного зондирования для трехслойной ионосферы // *Геомагнетизм и аэрoномия.* 1991. Т. 31. №6. С. 1021.
6. Тетерин К.А. Локальная адаптация модели ионосферы IRI по данным возвратно-наклонного зондирования // *Геомагнетизм и аэрoномия.* 2013. Т. 53. №3. С. 337.
7. Протокол мониторинга воздушной обстановки проведенного на комплекте аппаратуры комплекса 29Б6 18-19 апреля 2013 г, инв. № 03/819-13, ОАО НПК НИИДАР.
8. Шукин А.Ю. Анализ результатов прогона 18.04-19.04.2013 (Лабораторный отчет), ОАО НПК НИИДАР.