

**Научно-исследовательский радиопизический институт
Министерство образования РФ**

Препринт № 474

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ
ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПО ДАННЫМ
НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ**

**Понятов А.А.
Урядов В.П.**

Нижний Новгород - 2002

Понятов А.А., Урядов В.П.

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ
ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПО ДАННЫМ
НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ //**
Препринт № 474 – Нижний Новгород: НИРФИ, 2002, 13с.

УДК 550.388.2

В работе изложен метод и алгоритм восстановления высотного профиля электронной концентрации по данным наклонного зондирования ионосферы. Сделаны оценки точности расчета высотного профиля f_oF_2 . Работоспособность метода продемонстрирована по данным наклонного ЛЧМ зондирования на трассе Кипр – Н.Новгород. Рассматривается возможность использования данных зондирования на российской и мировой сети ЛЧМ ионозондов для коррекции ионосферной модели с целью повышения точности прогнозирования параметров ионосферного КВ канала.

1. Введение

Разработке методов и алгоритмов восстановления высотного распределения электронной концентрации по данным наклонного зондирования (НЗ) ионосферы уделяется большое внимание. Этот интерес обусловлен возможностью определения основных параметров ионосферы в удаленной от передатчика и приемника области, где по каким-либо причинам нельзя осуществлять мониторинг ионосферы с помощью средств вертикального зондирования (ВЗ). При наличии разветвленной сети станций НЗ появляется возможность оперативного определения текущих параметров ионосферного КВ канала в обширной области ионосферы. Эти данные могут быть использованы для коррекции ионосферной модели и повышения точности прогнозирования КВ радиосвязи.

Если за рубежом существует разветвленная сеть станций ВЗ на основе digisonde sounders [1], то в России складывается сложная ситуация с геоионосферным мониторингом. Причин тут несколько. Это физический и моральный износ техники, создание которой относится к 50-70 годам XX века, ликвидация многих ионосферных станций. В результате снизилась точность прогнозов связи в КВ диапазоне. По этой причине многие системы КВ радиосвязи не эксплуатируются.

В то же время в России есть положительный опыт эксплуатации современных систем наклонного зондирования ионосферы. В середине 80-х годов усилиями МарГТУ, НИРФИ и ИСЗФ СО РАН создан отечественный ионозонд с непрерывным излучением линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала. При создании ЛЧМ ионозонда использованы современные достижения в микроэлектронике и компьютерной технике. По своим параметрам отечественный ЛЧМ ионозонд не уступает мировым стандартам аналогичной аппаратуры, созданной в США фирмой "Barry Research Corp".

С 1988г. по настоящее время функционирует сеть ЛЧМ ионозондов покрывающая обширные стратегически важные регионы Северо-Востока, Дальнего Востока, Восточной Сибири и Европейской части России: передатчики расположены в Магадане, Хабаровске, Иркутске, Йошкар-Оле; приемники – в Иркутске, Йошкар-Оле, Нижнем Новгороде, Москве и Ростове-на-Дону. Сеть создавалась научными учреждениями Минобразования РФ и Академии наук РФ для решения

научных и прикладных задач в области распространения радиоволн на современном техническом уровне. Как показал многолетний опыт эксплуатации, российская сеть ЛЧМ ионозондов является эффективным инструментом для проведения исследований на различных этапах выполнения как фундаментальных, так и прикладных НИОКР: от стадии разработки и проверки отдельных узлов оборудования до полевых испытаний всей системы КВ радиосвязи в контролируемых ионосферных условиях. Кроме того, как показывают результаты исследований [2], на основе данных ионосферного мониторинга можно корректировать ионосферные модели для повышения точности прогнозирования оптимальных рабочих частот для систем КВ связи.

В связи с отсутствием в России разветвленной сети ионозондов вертикального зондирования, актуальной является задача восстановления высотного профиля электронной концентрации в средней точке трассы наклонного зондирования, в частности, на основе данных российской и мировой сети ЛЧМ ионозондов для обеспечения отечественных потребителей информацией о текущем состоянии ионосферы и повышения точности прогноза условий распространения радиоволн. Эта проблема имеет и важный научный аспект с точки зрения решения обратной задачи дистанционного зондирования ионосферы для определения параметров среды распространения.

2. Метод расчета. Моделирование и эксперимент

Ввиду сложности условий ионосферного распространения радиоволн и профиля электронной концентрации, восстановление точного профиля электронной концентрации по ионограмме наклонного зондирования в общем случае практически невозможно. Речь может идти лишь о нахождении эффективного профиля при некоторых упрощающих условиях. Это – приближение сферически слоистой ионосферы и пренебрежение влиянием геомагнитного поля на траекторию луча. Кроме того, будем полагать профиль концентрации монотонным.

При этих приближениях восстановление эффективного профиля электронной концентрации по ионограмме наклонного зондирования целесообразно проводить путем разбиения профиля на несколько высотных интервалов, в каждом из которых профиль

аппроксимируется известной функцией (см. рис.1). Тогда задача сводится к решению системы нелинейных уравнений для параметров каждого интервала.

В данной работе используется метод расчета эффективного профиля электронной концентрации при использовании кусочно-гиперболической аппроксимации профиля, который был предложен в [3] и развит в работах [4,5]. Этот подход позволяет добиться

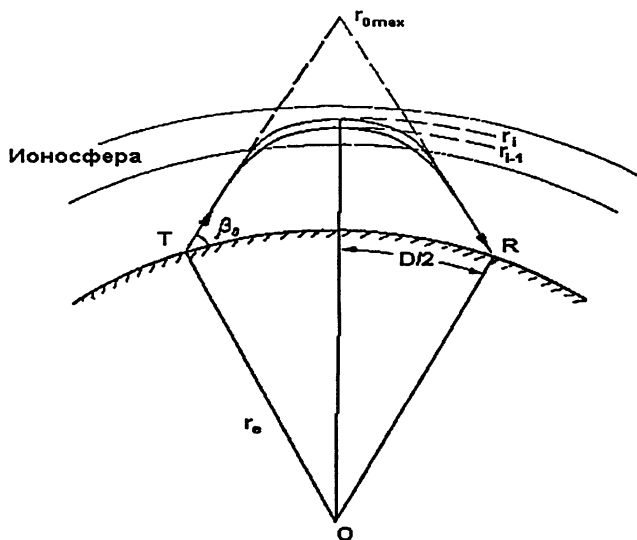


Рис.1.

достаточно высокой точности аппроксимации профиля вблизи максимума слоя. При этом зависимость плазменной частоты от модуля радиус-вектора r в i -м интервале задается выражением

$$f_{Ni}^2(r) = \alpha_i - \frac{\beta_i}{r}, \quad (1)$$

где α_i и β_i – параметры интервала. Предполагается, что $f_N = 0$ на некоторой высоте r_0 – начале ионосферы.

Запишем систему уравнений для восстановления профиля электронной концентрации. Предполагая, что параметры нижележащих интервалов от 1-го до $i-1$ уже определены, будем считать неизвестными параметры i -го интервала: коэффициенты α_i , β_i , верхнюю границу r_i и соответствующий угол выхода луча β_0 .

Исходными данными для данной задачи являются длина трассы D (дальность) и точки ионограммы НЗ, т.е. дискретные значения частоты и соответствующего группового пути радиоволны (f_i, P_i'). Поэтому в качестве границ интервалов удобно брать высоты отражений r_i соответствующих частот f_i .

Для сферически слоистой ионосферы в приближении геометрической оптики групповой путь и длина трассы определяются формулами

$$P' = 2 \int_{r_e}^{r_{refl}} \frac{r dr}{\sqrt{r^2 \mu^2 - r_e^2 \cos^2 \beta_0}}, \quad (2)$$

$$D = 2r_e^2 \cos \beta_0 \int_{r_e}^{r_{refl}} \frac{dr}{\sqrt{r^2 \mu^2 - r_e^2 \cos^2 \beta_0}}, \quad (3)$$

где β_0 – угол выхода луча, отсчитываемый от горизонта, r_e – радиус Земли, r_{refl} – точка отражения, μ – показатель преломления:

$$\mu^2(r) = 1 - \frac{f_N^2(r)}{f^2}, \quad (4)$$

где f – частота зондирования.

При использовании аппроксимации (1) интегралы (2) и (3) могут быть проинтегрированы аналитически. Полагая, что радиоволна с рабочей частотой f_i отражается на высоте r_i (т.е. в i -м интервале), разобьем весь интервал интегрирования внутри ионосферы ($r \geq r_0$) на отрезки $[r_{j-1}, r_j]$, $j=1, 2, \dots, i$, в каждом из которых профиль электронной концентрации определяется соотношением (1). Тогда, интегрируя (2) и (3), получим выражения

$$P' = 2 \left[r_0 \sqrt{1 - \frac{r_e^2}{r_0^2} \cos^2 \beta_0 - r_e \sin \beta_0} \right] + \\ + 2 \sum_{j=1}^i \left[\frac{\sqrt{a_j r^2 + b_j r + c}}{a_j} - \frac{b_j}{2|a_j|^{3/2}} \arcsin \frac{2a_j r + b_j}{\sqrt{b_j^2 - 4a_j c}} \right]_{r_{j-1}}^{r_j}, \quad (5)$$

$$D = 2r_e \left[\frac{\pi}{2} - \beta_0 - \arcsin\left(\frac{r_e}{r_0} \cos \beta_0\right) \right] + 2r_e \sum_{j=1}^i \left[\arcsin \frac{b_j r + 2c}{r \sqrt{b_j^2 - 4a_j c}} \right]_{r_{j-1}}^{r_j}, \quad (6)$$

где $a_j = 1 - \frac{\alpha_j}{f_i^2}$, $b_j = \frac{\beta_j}{f_i^2}$, $c = -r_e^2 \cos^2 \beta_0$.

Разделим дальность (6) на две части, связанные соответственно с распространением от поверхности Земли до i -го интервала (D_u) и с распространением в i -м интервале до высоты отражения (D_i):

$$D_u = 2r_e \left[\frac{\pi}{2} - \beta_0 - \arcsin\left(\frac{r_e}{r_0} \cos \beta_0\right) \right] + 2r_e \sum_{j=1}^{i-1} \left[\arcsin \frac{b_j r + 2c}{r \sqrt{b_j^2 - 4a_j c}} \right]_{r_{j-1}}^{r_j}, \quad (7)$$

$$D_i = 2r_e \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{b_i r_{i-1} + 2c}{r_{i-1} \sqrt{b_i^2 - 4a_i c}} \right]. \quad (8)$$

В формуле (8) учтено, что в точке отражения

$$\arcsin \frac{b_i r_i + 2c}{r_i \sqrt{b_i^2 - 4a_i c}} = \frac{\pi}{2}. \quad (9)$$

Из этого соотношения можно также выразить высоту отражения r_i :

$$r_i = \frac{2c}{\sqrt{b_i^2 - 4a_i c} - b_i}. \quad (10)$$

Уравнение (8) может быть переписано в виде

$$\beta_i = 2f_i^2 r_e \cos \beta_0 \left[\frac{r_e}{r_{i-1}} \cos \beta_0 + \sqrt{\mu_{i-1}^2 - \frac{r_e^2}{r_{i-1}^2} \cos^2 \beta_0} \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{D_i}{2r_e} \right) \right] \quad (11)$$

Параметр α_i может быть найден из условия непрерывности профиля на высоте r_{i-1} :

$$\alpha_{i-1} - \frac{\beta_{i-1}}{r_{i-1}} = \alpha_i - \frac{\beta_i}{r_{i-1}},$$

откуда следует

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + \frac{\beta_i - \beta_{i-1}}{r_{i-1}}. \quad (12)$$

Выражения (5), (10)–(12) – представляют собой искомую систему.

Решение производится следующим образом. Считаем, что параметры всех нижележащих интервалов (слоев) известны. Задаем некоторое начальное значение угла выхода β_0 . По формуле (7) определяем путь волны в предыдущих слоях D_u . Затем по формуле

$$D_i = D - D_u$$

– путь волны в i -м слое. Затем последовательно по формулам (11), (12) и (10) находятся параметры β_i , α_i и r_i . После этого по формуле (5) вычисляется групповой путь и сравнивается с экспериментальным значением. Если различие велико, задается новое значение β_0 и процедура расчетов повторяется. В результате итерационной процедуры находится нужное значение угла выхода с заданной точностью. В качестве начального условия задается отсутствие ионосферы (т.е. $f_N = 0$, $\alpha_0 = 0$, $\beta_0 = 0$) при r_0 .

Для осуществления итерационной процедуры нужно оценить начальное (минимальное) значение угла выхода. Для самого первого слоя это можно сделать из условия зеркального отражения от нижней границы ионосферы (r_0):

$$\beta_{0\min} = \arctg\left(\frac{1}{\operatorname{tg}\varphi_0} - \frac{r_e}{r_0 \sin\varphi_0}\right), \quad (13)$$

где $\varphi_0 = \frac{D}{2r_e}$. Для последующих слоев минимальным будет значение угла выхода, найденное для предыдущего слоя. Максимально возможное значение β_0 можно оценить по известному групповому пути:

$$\beta_{0\max} = \arccos\left(\frac{2r_{i-1} \sin\varphi_0}{P_i'}\right). \quad (14)$$

Для решения поставленной задачи надо корректно вычислять высоту начала ионосферы h_0 , хотя, как показывают расчеты, вычисление профиля вблизи максимума слоя слабо зависит от величины h_0 . Для этого можно использовать две первые точки ионограммы. В этом случае предполагается, что параметры первых двух слоев одинаковы (достаточно близки). Тогда по первой точке и начальному значению h_0 определяют параметры слоя, как это делалось выше. Затем производится проверка на совпадение дальности или группового пути для второй частоты, рассчитанной по этим данным, с экспериментальными данными. Проводя итерационную процедуру по h_0 , получают уточненное значение. В качестве начального значения для итерационной процедуры можно взять верхнюю границу значений h_0 , полученную как точку, при зеркальном отражении от которой достигается групповое запаздывание, равное экспериментальному значению.

В соответствии с предложенным алгоритмом была разработана программа его реализации.

Для проверки производились тестовые расчеты по восстановлению как модельных, так и реальных профилей электронной концентрации. На рис.2а представлен результат восстановления (точки) модельного параболического профиля (критическая частота 9 МГц, высота слоя 300 км, полуширина 100 км) по ионограмме НЗ (рис.2б), рассчитанной по программе [6] для данного профиля для расстояния между пунктами 1350 км.

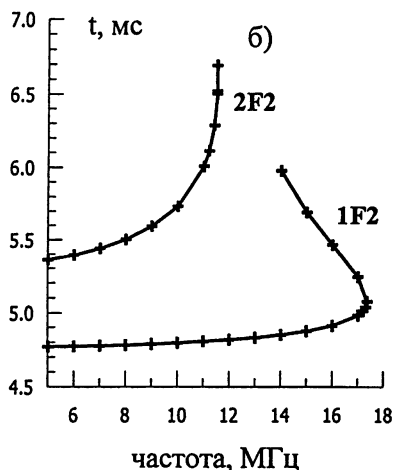
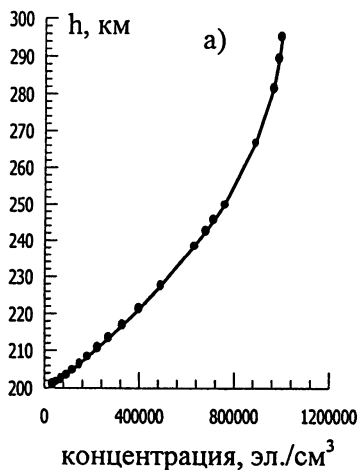


Рис. 2

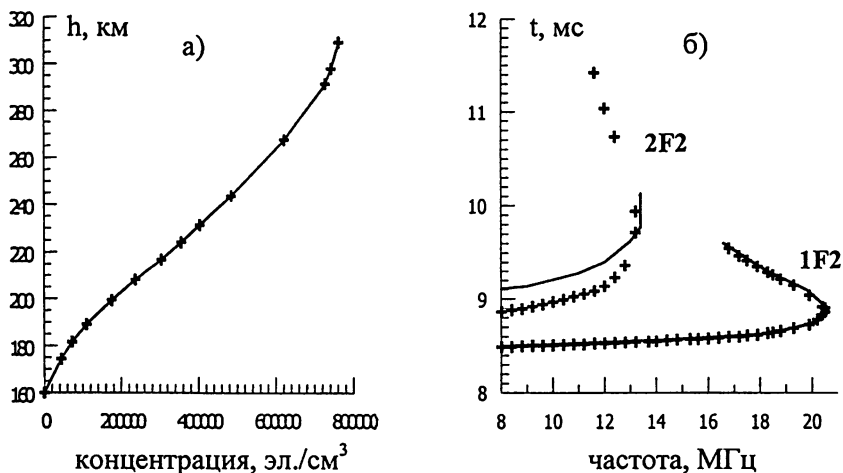


Рис. 3

Как видно из рис.2а, наблюдается очень хорошее совпадение модельного профиля (сплошная линия) и восстановленного (точки). При достаточно высокой точности счета ошибка не превышает 0.1-0.5%.

На рис. 3а и рис.4а представлены результаты восстановления профиля электронной концентрации по реальным ионограммам НЗ, полученным на трассе Кипр ($35^{\circ}\text{N}, 34^{\circ}\text{E}$) – Нижний Новгород ($56^{\circ}\text{N}, 44^{\circ}\text{E}$) 26.03.2002 соответственно для 22.50 и 23.50 LT. Расстояние между пунктами 2460 км. Экспериментальные ионограммы показаны на рис.3б и рис.4б сплошными линиями. Для восстановления высотного распределения электронной концентрации в средней точке трассы Кипр – Нижний Новгород использовалась мода 1F2.

Для проверки правильности работы алгоритма производился расчет ионограммы НЗ с использованием восстановленного профиля. Результаты этого расчета представлены на рис.3б и рис.4б крестиками. Наблюдается хорошее совпадение для моды 1F2, что и следовало ожидать, и удовлетворительное совпадение для моды 2F2.

Расхождение связано с тем, что для правильной работы алгоритма необходимо выполнение ряда условий, накладываемых на профиль электронной концентрации: 1) отсутствие горизонтальных градиентов,

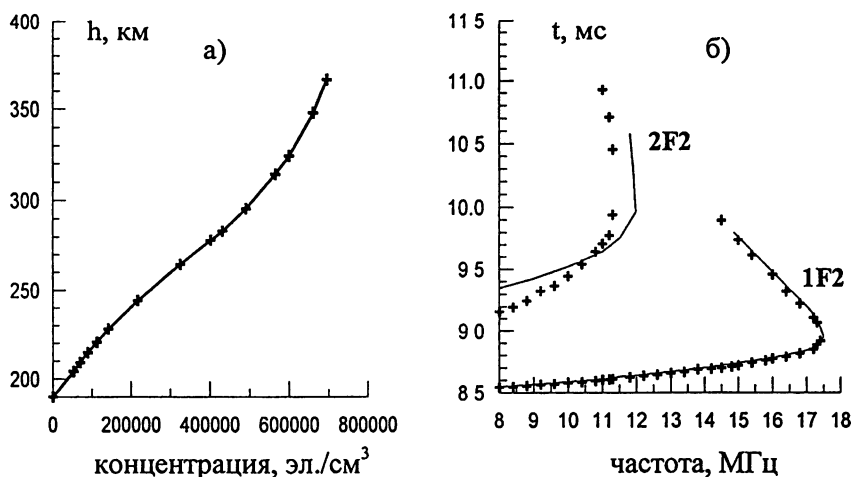


Рис. 4

2) монотонность профиля. Кроме того, для правильного определения профиля необходимы данные для низких частот, которые используются для восстановления высотного профиля. В данном случае, из-за специфики работы передатчика на Кипре, ионограммы измерялись только, начиная с 8 МГц, что привело к потере информации о нижней ионосфере. Кроме того, реальная ионосфера на сравнительно протяженной трассе Кипр – Нижний Новгород может иметь горизонтальный градиент, что в большей мере может сказываться на характеристиках мод более высокого порядка (2F2, 3F2 и т.д.). Следует отметить, что при наличии дополнительной информации об углах прихода может быть решена обратная задача реконструкции распределения электронной концентрации $N(x,z)$ в присутствии градиентов концентрации вдоль горизонтальной координаты x [7].

3. Заключение

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Разработан метод и алгоритм восстановления профиля электронной концентрации по данным наклонного зондирования ионосферы. Сделаны оценки точности восстановления профиля. В приближении сферически симметричной ионосферы для монотонного профиля ошибка расчета составляет не более 0.1-0.5%.
2. Проведена проверка работоспособности метода по реальным ионограммам наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы на трассе Кипр – Нижний Новгород, протяженностью 2460 км. Расчетным путем получены высотные профили Ne в средней точке трассы. Показано, что ионограммы, рассчитанные на основе восстановленного профиля электронной концентрации, хорошо согласуются с экспериментальными ионограммами. Для моды 1F2 отличие составляет не более 1%.
3. Разработанный алгоритм восстановления высотного профиля электронной концентрации по данным наклонного зондирования ионосферы может быть использован для оперативной коррекции ионосферной модели и может найти приложение при решении широкого круга научных и прикладных задач в области физики ионосферы, космической погоды и прогнозирования ионосферного распространения радиоволн.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 02-05-64383.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khmyrov G., Bullett T., Reinisch B. et al. An active database for digital ionosonde networks. // Proc. of XXVIIth GA URSI, Maastricht, The Netherlands. 17-24 August 2002.
2. Белоусов Е.Л., Брянцев В.Ф., Валов В.А., Иванов В.А., Урядов В.П. Технология испытаний работы средств и фрагментов систем связи в контролируемых ионосферных условиях.// Труды VIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, апрель 2002.
3. Smith M.S. The calculation of ionospheric profiles from data given on oblique incidence ionograms.// J.Atm.Terr.Phys. 1970, v.32, no.6, p.1047.

4. Rao N.N. A note on the analysis of oblique ionograms.// J.Atm.Terr.Phys. 1973, v.35, no.6, p.1561.
5. Крашенинников И.В., Лобачевский Л.А., Лянной Б.Е. и др. Оценка высотного распределения электронной концентрации по ионограмме наклонного зондирования ионосферы.// Геомагнетизм и аэрономия. 1983, т.23, № 5, с.727.
6. Понятов А.А., Урядов В.П. Компьютерное моделирование ионосферного распространения коротких радиоволн.// Препринт № 428 – Н. Новгород: НИРФИ, 1996, 20с.
7. Салтыков Е.Г. Восстановление электронных концентраций с малыми горизонтальными градиентами по результатам наклонного зондирования ионосферы.// Численные методы решения обратных задач математической физики. Сборник трудов МГУ под ред. А.Н.Тихонова и А.А.Самарского. МГУ. 1988, с. 147.

Подписано в печать 3.10.02г. Формат 60×84/16
Бумага писчая. Объем 0,81 усл.п.л.
Тираж 100. Заказ 5522

Отпечатано в НИРФИ
603950 Н.Новгород, ул.Б.Печерская, 25