

УДК 550.388.2

ОБРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ БАЗОВОГО ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

¹А.М. Веснин, ¹К.Г. Ратовский, ²М.В. Клименко, ²В.В. Клименко

PROCESSING OF VERTICAL SOUNDING DIGITAL IONOGRAMS BY MODIFYING INITIAL ELECTRON DENSITY PROFILE

¹A.M. Vesnin, ¹K.G. Ratovsky, ²M.V. Klimenko, ²V.V. Klimenko

Задача обработки ионограмм традиционно решается в два этапа: 1) выделение на ионограмме следов отражения обыкновенной и необыкновенной составляющих; 2) поиск профиля, который описывает следы отражения наилучшим образом. В данной работе рассматривается методика обработки экспериментальных ионограмм, где представлена попытка обойти проблему выделения треков. Такой подход основан на изменении базового профиля электронной концентрации, которым может быть, например, прогноз модели IRI или профиль, полученный в предыдущий сеанс зондирования ионосферы. Представлены результаты практического применения методики.

The problem of ionogram processing is commonly solved in two stages: 1) O and X echoes trace points are extracted from an ionogram; 2) the electron density profile is calculated from the extracted traces. This paper presents a technique for processing of experimental ionograms that is an effort to avoid the trace extraction problem. Our approach is based on modifying initial electron density profile, which may be, for example, IRI model prediction or profile obtained in the previous sounding of ionosphere. The results of practical application of the technique are presented.

Введение

Задаче обработки ионограмм вертикального зондирования было посвящено множество работ [Wright et al., 1972; Reinisch, Huang, 1983; Scotto, 2009]. Системы обработки ионограмм вертикального зондирования, как правило, решают две задачи: 1) выделение на ионограмме треков отражения обыкновенной и необыкновенной составляющих; 2) восстановление профиля электронной концентрации из выделенных треков [Reinisch, Huang, 1983]. Из-за сильной зашумленности ионограмм, возникающей по причине неоднородности ионосферы, антропогенных факторов и др., бывает очень трудно решить задачу выделения трека. В данной работе представлена методика обработки экспериментальных ионограмм, где рассматривается попытка обойти проблему выделения треков. Путем подбора следует найти такой профиль, который бы наилучшим образом соответствовал ионограмме.

Описание методики

Методика основана на изменении базового или начального профиля электронной концентрации или, что эквивалентно, плазменной частоты. В зависимости от решаемой задачи выбираются различные базовые профили. При моделировании коротковолнового возмущения можно использовать профиль, полученный в предыдущий сеанс зондирования ионосферы, когда ее состояние еще можно было считать спокойным. Для ежедневной обработки ионограмм, не содержащих аномалий, можно взять профиль, полученный из прогноза модели IRI. Также можно использовать профиль, полученный при автоматической обработке на таких инструментах, как ионозонд DPS-4. Изменение базового профиля сводится к циклическому перебору некоторых параметров, которые могут быть параметрами базового профиля (критическая частота, высота максимума и др.) либо параметрами возмущения, накладываемого на базовый профиль.

Далее необходимо ввести критерий соответствия профиля ионограмме. Для этого мы вычисляем высот-

но-частотную характеристику (ВЧХ), определяющую зависимость кажущейся высоты отражения сигнала h' от частоты зондирования f . В данной методике ВЧХ рассчитывается по формуле [Альперт, 1972]:

$$h'(f) = \int_0^{z_0(f)} \mu'(z, f) dz = \int_0^{z_0(f)} \frac{\partial(\mu(z, f)f)}{\partial f} dz, \quad (1)$$

где $z_0(f)$ – высота отражения, $\mu'(z, f)$ – групповой коэффициент преломления, $\mu(z, f)$ – коэффициент преломления, соответствующий обыкновенной или необыкновенной компоненте либо изотропному приближению [Альперт, 1972]. Коэффициент преломления $\mu(z, f)$, а точнее его квадрат $\mu^2(z, f)$, может быть однозначно найден для профиля при заданной частоте. При приближении к точке отражения $\mu'(z, f)$ стремится к бесконечности, и интеграл (1) расходится. Здесь применяется аппроксимация В-сплайнами второй степени [Завьялов и др., 1980], которая, во-первых, снимает вышеуказанную проблему, а во-вторых, позволяет достаточно точно вычислять интеграл (1).

Способ сравнения рассчитанной ВЧХ и ионограммы представляет особый интерес. Ионограмма является матрицей амплитуд $A(f_i, h_k)$, представляющей зависимость амплитуды отраженного сигнала A от частоты зондирования f_i и времени t_k , пересчитанного в кажущуюся высоту отражения $h_k = ct_k/2$, где c – скорость света. На том же самом наборе частот зондирования $f_i, i=1, \dots, I$, можно рассчитать ВЧХ $h'_i = h'(f_i)$. Предполагается, что профиль соответствует ионограмме наилучшим образом, если рассчитанная ВЧХ h'_i проходит в области максимальных амплитуд ионограммы $A(f_i, h_k)$. Математическое выражение для суммы амплитуд в окрестности ВЧХ (рис. 1) может быть записано следующим образом:

$$A_s = \sum_{i=1}^I \bar{A}_i, \quad \bar{A}_i = \sum_{k=1}^2 A_{ik+n} \cdot W_{ik},$$

$$W_{ik} = 1 - |(h'_i - h_{k+n}) / 2\Delta h|, \quad n = [h'_i / \Delta h]. \quad (2)$$

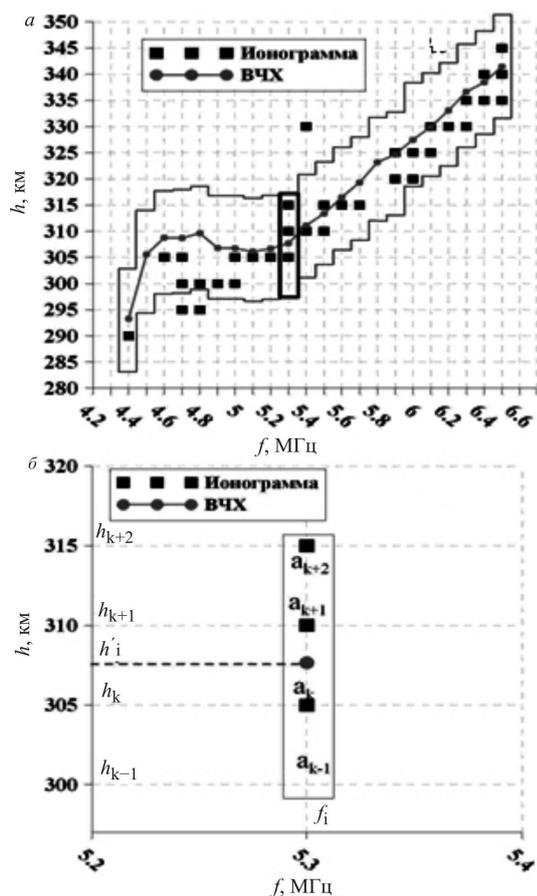


Рис. 1. Иллюстрация расчета суммы амплитуд вдоль ВЧХ: часть ионограммы и наложенная в нее ВЧХ, серая замкнутая линия показывает полную окрестность вдоль ВЧХ (а); более узкая область, выделенная на панели а черным прямоугольником (б).

Профиль, соответствующий ВЧХ, для которой A_s максимальна, выбирается в качестве лучшего решения.

Таким образом, нахождение профиля, соответствующего ионограмме наилучшим образом, сводится к следующему алгоритму.

1. Определение базового профиля электронной концентрации (плазменной частоты).
2. Циклический перебор параметров, задающих изменение базового профиля.
3. Расчет ВЧХ по получившемуся профилю.
4. Расчет суммарной амплитуды A_s в окрестностях рассчитанной ВЧХ.
5. Нахождение наибольшей A_s в циклическом переборе параметров, задающих изменение базового профиля, и фиксация значений параметров, соответствующих наибольшей A_s .

Практическое применение методики

С помощью методики были обработаны ночные ионограммы, полученные на станции «Иркутск». Ночью отсутствует F1-слой, и F-область может быть описана простой аналитической формой. Обработка строилась на использовании модельного параболического профиля. При этом автоматически перебирались параметры профиля: критическая частота, высота максимума и полуширина профиля. Количество различных профилей было равно $\sim 10^5$. Для об-

работки одной ионограммы требовалось время около 1 мин, а получены хорошие результаты (рис. 2, а). Специально были выбраны ночные ионограммы с эффектом F-рассеяния (рис. 2, б), методика показала хорошую устойчивость при обработке этих ионограмм.

Методика также применялась для интерпретации специфического возмущения, которое на ионограммах проявлялось в виде кажущегося слоя F1. Данный эффект наблюдается на ионограммах в качестве дополнительного перегиба следа отражения. По своему виду явление схоже с проявлением регулярного F1-слоя, однако значение критической частоты кажущегося слоя F1 было совершенно нетипичным для F1-слоя для данного времени суток, сезона и уровня солнечной активности. Иногда кажущийся слой F1 наблюдается одновременно с регулярным F1-слоем.

Описанное выше явление наблюдалось как на среднеширотной станции «Иркутск» в спокойных геомагнитных условиях, так и на экваториальной станции Джикамарка во время магнитной бури 11 сентября 2005 г. (в обоих случаях явления наблюдались с помощью ионозонда DPS-4). На рис. 3 показано проявление кажущегося слоя F1 на ионограммах.

Интерпретация кажущегося слоя F1 в Иркутске подробно описана в работе [Веснин, Ратовский, 2010]. Явление наблюдалось в течение ~ 25 мин (ионограммы регистрировались в трехминутном режиме) и сопровождалось монотонным уменьшением как критической частоты, так и действующей высоты кажущегося слоя F1. Явление было проинтерпретировано на основе перемещающегося сверху

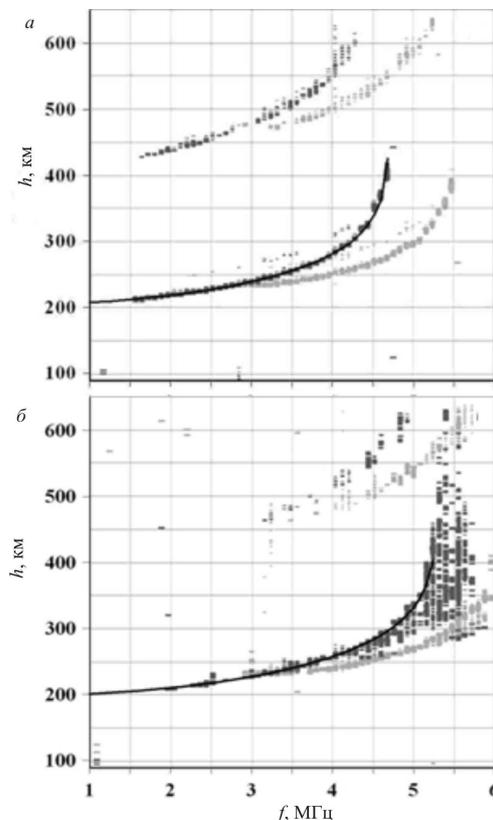


Рис. 2. Результат обработки ионограмм. Черная линия – ВЧХ, соответствующая лучшему профилю; темно-серые и светло-серые точки – обыкновенная и необыкновенная составляющие отражения.

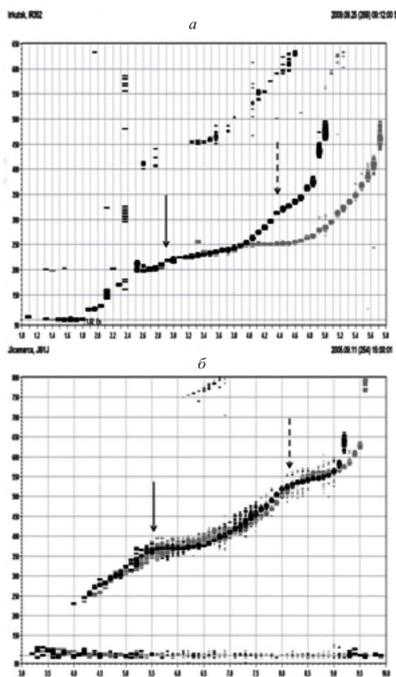


Рис. 3. Явление кажущегося слоя F1: Иркутск, 25.09.09, 09:12 UT (а), Джи́камарка 11.09.05, 15:00 UT (б). Черными точками показана обыкновенная составляющая отражение, серыми – необыкновенная. Штриховой стрелкой отмечен кажущийся слой F1, сплошной – регулярный слой F1.

вниз ионосферного возмущения, обусловленного внутренней гравитационной волной (ВГВ). При обработке был выбран базовый профиль, полученный до появления неоднородности. Сам кажущийся слой F1 воспроизводился наложением на базовый профиль синусоидального возмущения с гауссовой огибающей. Параметры возмущения перебирались в цикле.

Кажущийся слой F1 в Джи́камарке наблюдался в течение ~1.5 ч, при этом как его критическая частота, так и действующая высота монотонно увеличивались. Эти особенности поведения не позволили интерпретировать явление на основе перемещения ионосферного возмущения, обусловленного ВГВ. Интерпретация экваториального кажущегося слоя F1 основана на гипотезе возникновения дополнительного слоя в F-области [Balan, et al., 1998], который можно обозначить как слой F3. Его формирование происходит под действием неоднородного по высоте вертикального $\vec{E} \times \vec{B}$ дрейфа плазмы в окрестности геомагнитного экватора и подробно описано в [Klimenko et al., 2011].

Обработка ионограмм была осуществлена на основе модификации профилей, полученных после интерактивной обработки ионограмм (исходный алгоритм не дает возможности учета двойного слоя F1). Исходные и модифицированные профили и ВЧХ показаны на рис. 4.

Заключение

Описана методика обработки ионограмм вертикального зондирования. Входными данными служат ионограммы вертикального зондирования и базовые профили электронной концентрации. Практическое применение методики позволило осуществить интерпретацию явления кажущегося слоя F1. Методика реализована на использовании амплитудной информации

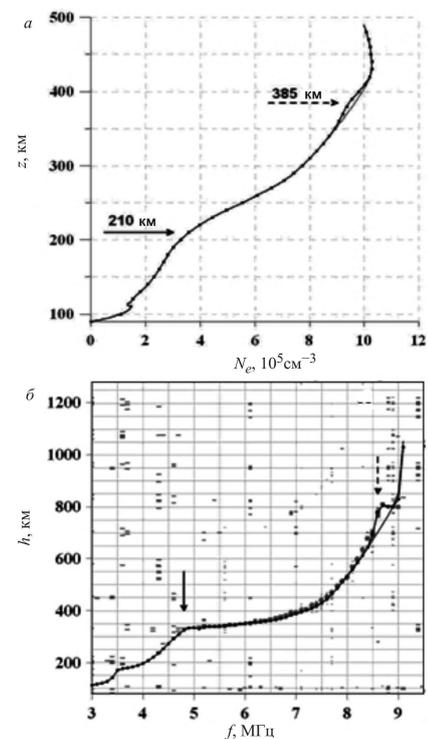


Рис. 4. Исходные (серые линии) и модифицированные (черные линии с точками) профили (а) и ВЧХ (б). Серые точки на панели б – ионограмма. Стрелки обозначают то же, что на рис. 3.

обыкновенной компоненты, в перспективе планируется использование необыкновенной составляющей, что повысит устойчивость алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 563 с.
- Веснин А.М., Ратовский К.Г. Моделирование явления «кажущегося слоя F1», наблюдавшегося в эксперименте «Радар-Прогресс», с помощью программного обеспечения автоматической обработки ионограмм вертикального зондирования // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 16. С. 136–142.
- Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980, 352 с.
- Balan N., Batista I.S., Abdu M.A., et al. Physical mechanism and statistics of occurrence of an additional layer in the equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, N A12. P. 29169–29182.
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., et al. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle and low-latitude F-region during geomagnetic storm sequence of September 9–14, 2005 // Radio Sci. 2011. V. 46. RS0D03. doi:10.1029/2010RS004590.
- Reinisch B.W., Huang X. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms 3. Processing of bottom-side ionograms // Radio Sci. 1983. V. 18, N 3. P. 477–492.
- Scotto C. Electron density profile calculation technique for Autoscala ionogram analysis // Advances in Space Research. 2009. V. 44, N 6. P. 756–766.
- Wright J.W., Laird A.R., Obitts D., et al. Automatic $N(h, f)$ profiles of the ionosphere with a digital ionosonde // Radio Sci. 1972. V. 7, N 1. P. 1033–1043.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

²Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград