

УДК 551.594:004.021:004.045:004.67:004.622

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

А.Ю. Гришенцев, А.Г. Коробейников

Разработана модель решения обратной задачи вертикального зондирования ионосферы применительно к данным, полученным на ионосферных станциях типа «АИС-М». На основе разработанной модели реализовано программное приложение для автоматизированной обработки и анализа спектрограмм высотного зондирования ионосферы. Апробация программного продукта позволила выявить достаточно высокую эффективность предложенного метода, что позволяет позиционировать разработанную модель как эффективный способ решения обратной задачи высотного зондирования ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное зондирование, спектрограмма, обратная задача, высотное распределение электронной плотности.

Введение

Исследование ионосферы является актуальной задачей для многих областей человеческой деятельности. Особенный интерес у исследователей вызывает изучение распространения электромагнитных волн в замагниченной плазме ионосферы [1] – как с точки зрения самих исследований процесса, так и с точки зрения применения в практической радиосвязи. Сущность обратной задачи радиочастотного зондирования состоит в нахождении ряда физических характеристик среды путем исследования влияния слоистой ионосферы на радиосигналы. Одной из ключевых характеристик ионосферы является высотное распределение электронной плотности. Наличие станций ионосферного зондирования по всему миру и их плотное сотрудничество через мировые центры данных позволяют получать информацию о глобальном распределении электронной плотности в ионосфере Земли. Наряду с методами радиочастотного зондирования в современных исследованиях активно применяется метод радиопросвечивания ионосферы [2]. Особенно актуальным (с точки зрения глобальных, регулярных наблюдений) метод радиопросвечивания стал после вывода на орбиты высокоорбитальных спутников GPS и ГЛОНАСС, а также низкоорбитальных GRACE, COSMIC, LEO и ряда других, с помощью которых на сегодня осуществляется более 5600 сеансов затменных измерений каждые сутки в более чем 2000 районах. Совокупность всех исследований позволяет получить практически в режиме реального времени данные о глобальном состоянии ионосферы Земли. Одной из проблем современных исследований при прогнозировании состояния ионосферы является недостаточность статистических наблюдений, что обусловлено относительной молодостью рассматриваемых методов. Таким образом, актуальной является задача рассмотрения архивных данных ионосферных исследований и их дополнительный анализ, позволяющий увеличить объемы статистической информации. В данной работе рассмотрена проблема моделирования высотного распределения электронной плотности на основании данных радиозондирования ионосферной станцией «АИС-М».

В рамках работы необходимо выполнить анализ спектрограмм вертикального зондирования ионосферы (СВЗИ), моделирование высотного распределения электронной плотности на основании данных радиозондирования ионосферной станцией «АИС-М». Задачами работы являются:

- разработка методов анализа СВЗИ;
- разработка обобщенной математической модели для решения обратной задачи с учетом особенностей СВЗИ;
- реализация разработанной математической модели в виде программы.

Анализ особенностей спектрограмм, полученных методом вертикального радиозондирования

Спектрограммы вертикального радиозондирования получаются в результате приема отраженного от ионосферы сигнала в диапазоне 1–20 МГц с минимальным шагом по частоте 1 кГц. Диапазон зондируемых высот составляет 50–1500 км, частота повторения импульсов 40 Гц. Мощность передатчика не менее 2,5 кВт. Полученные данные оцифровываются и сохраняются в сжатом виде.

Одна из сложностей, с которыми приходится сталкиваться при анализе ионограмм – зашумленность, вызванная локальными неоднородностями ионосферы, а в последнее время – лавинообразным ростом антропогенного заполнения радиочастотных диапазонов. Особенно заметным стало влияние радиозумов на СВЗИ с распространением цифровых каналов передачи информации, использующих сложные виды модуляции с большим числом низших гармоник. Таким образом, первой задачей для анализа СВЗИ является выделение высотных следов отражения. Решение данной задачи выполнялось с применением комплексных статистических методов обработки информации. Для предварительной локализации об-

ластей, в которых наиболее вероятно присутствие первых отражений (по простой траектории отражения в соответствии с [3] слои D, E, F_1) рассчитывалась высотная плотность распределения отраженных сигналов

$$p_j(h) = \frac{\sum_{i=0}^{i_{\max}-1} A_{i,j}}{S}, \quad (1)$$

где $A_{i,j}$ – амплитуда отраженного сигнала из матрицы СВЗИ \mathbf{A} с координатами i, j ; i – координата по горизонтали (соответствует частоте), j – координата по вертикали (соответствует высоте), S – число ненулевых элементов по горизонтали (т.е. из множества $A_{i,j}$, где $j = \text{const}, i = 0 \dots i_{\max} - 1$), причем для исключения деления на ноль полагаем, что $\text{if}(S = 0) S = 1$. Здесь необходимо отметить, что весь предварительный анализ производился в действующих высотах, это связано с тем, что расчет реальной высоты становится возможным только после определения высотного распределения электронной плотности в ионосфере. Выражение (1) хорошо локализует области с горизонтальным или близким к горизонтальному расположением отраженного следа, т.е. области, где величина $\frac{dh}{df}$ мала (f – частота, h – высота следа). Локализация областей с достаточно высокими значениями $\frac{dh}{df}$, обычно соответствующими критическим частотам слоя, где групповая скорость волны $t_{\text{ГР}} \rightarrow \infty$, по оценке величины $p_j(h)$ затруднительна. Введение величины горизонтальной плотности распределения позволяет решить задачу локализации следа отражений только на СВЗИ с относительно малым уровнем шума, что не представляет особенного интереса. Дальнейшая локализация отраженных следов в СВЗИ производилась с учетом значений $p_j(h)$ следующим образом (алгоритм 1):

- (а) осуществлялся проход по вертикальной координате матрицы \mathbf{A} ;
- (б) при встрече ненулевого линейного элемента $A_{i,jstart \dots jstop} \neq 0$ ($jstart \dots jstop$) определялось наличие ненулевых значений в матрице \mathbf{A} в элементах с координатами $A_{i \pm \Delta i, j \pm \Delta j}$, где $\Delta i, \Delta j$ – допуски по горизонтали и вертикали соответственно, значение Δi задается в виде константы, а Δj рассчитывается как функция $f(jstart, jstop)$;
- (с) если условие (б) выполнялось заданное число ns раз для элемента $A_{i,j} \neq 0$, то линейный элемент $A_{i,jstart \dots jstop} \neq 0$ считался следом отражения в СВЗИ.

В результате анализа СВЗИ по алгоритму 1 получается матрица \mathbf{M} , в которой ненулевые значения соответствуют различным компонентам отражений электромагнитной волны от ионосферы (рис. 1). Часть (б) указанного алгоритма была реализована в виде рекуррентной функции, что позволило учитывать особенности смещения следа отражения по высоте при движении по частоте, т.е. производить предварительную аппроксимацию паттерна следа отражения. Аппроксимация позволяет сделать частичное, предварительное выделение различных следов отражения. В общем виде решить задачу разделения на составляющие o - (обыкновенной), x - (необыкновенной) и z -компоненты (магнитоионной компоненты) на этом этапе анализа не представляется возможным.

В наиболее зашумленных СВЗИ перед выполнением указанного алгоритма производилась предварительная фильтрация путем выделения областей с высокими значениями энтропии. Оценку энтропии можно произвести следующим образом (алгоритм 2):

- матрица СВЗИ \mathbf{A} разбивается на несколько равных друг другу прямоугольных областей $B_{s,t}$ (для выравнивания ряд вертикальных векторов матрицы \mathbf{A} , соответствующих самым высоким частотам, и несколько горизонтальных векторов, соответствующих наибольшим значениям высоты, можно не рассматривать);
- каждая прямоугольная область $B_{s,t}$ разбивается на равные прямоугольники $X_{n,k}$, для которых рассчитывается суммарная амплитуда $X_{n,k} = \sum_i \sum_j (A_{i,j} : A_{i,j} \in X_{n,k})$, далее рассчитываются векторы плотности распределения для всех областей $B_{s,t}$, причем каждый элемент отдельного вектора плотности распределения для области $B_{s,t}$ рассчитывается для $X_{n,k} \in B_{s,t}$;
- для каждой области $B_{s,t}$ рассчитывается значение энтропии:

$$H = - \sum_l p B_l \log p B_l, \quad (2)$$

где pV_l – вектор плотности распределения амплитуд для области $B_{s,t}$.

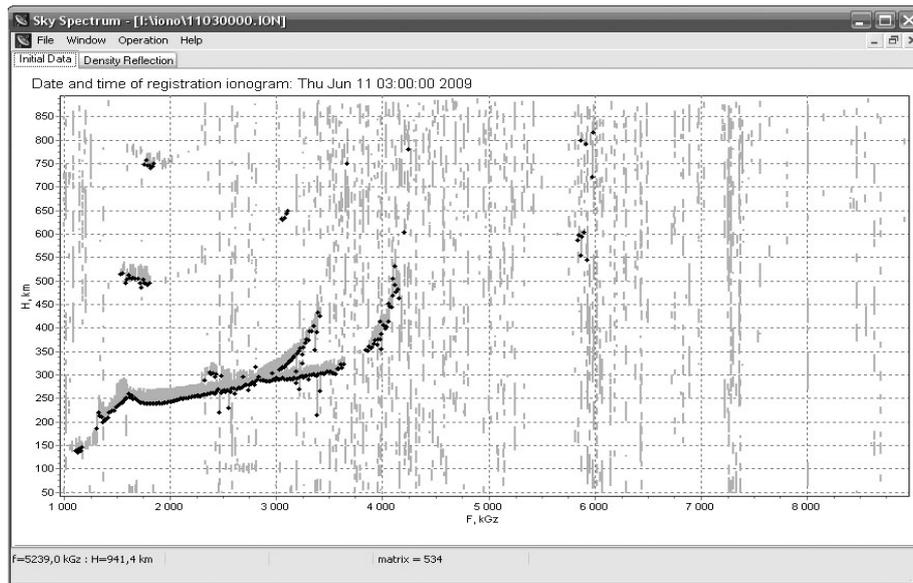


Рис. 1. Программная реализация фильтрации СВЗИ по алгоритму 1. Серым цветом обозначена исходная СВЗИ, черным – фильтрация (ненулевые элементы матрицы M)

На основании полученных значений энтропий для различных областей СВЗИ производится фильтрация путем отсеивания областей с наиболее высокими значениями энтропии. Рассмотренный метод фильтрации на основании оценки энтропии в связи с возможностью потери большого числа значимых данных применялся только в тех случаях, когда рассмотренные ранее методы локализации отраженных следов в СВЗИ не дают удовлетворительных результатов.

Использование фильтрации необходимо для начального определения локализации следов отражения в СВЗИ, конечное построение следов отражения наиболее целесообразно производить по исходной матрице СВЗИ A , по алгоритму 1, с учетом зашумленности СВЗИ путем корректирования значений коэффициентов $\Delta i, \Delta j, ns$.

Определение высотных характеристик ионосферы по данным предварительного анализа СВЗИ

Наиболее интересными областями СВЗИ являются те участки, в которых $\left| \frac{dh}{df} \right|_{\max}$, причем области, в которых

$$\left| \frac{dh}{df} \right|_{\max}, \frac{dh}{df} > 0, \quad (3)$$

будут соответствовать критическим частотам слоя для f_o – o-компоненты, f_x – x-компоненты и f_z – z-компоненты электромагнитной волны (рис. 2). С учетом локализации области отражения и построения матрицы M нахождение производной $\frac{dh}{df}$ не представляет сложностей. Кроме критических частот, по условию:

$$\left| \frac{dh}{df} \right|_{\max}, \frac{dh}{df} < 0 \quad (4)$$

можно определить f_B – гирочастоту слоя, которая, вообще говоря, может быть определена для конкретного географического места, исходя из значения B_0 в [Гц] у поверхности Земли [3]:

$$\begin{cases} f_B = 2,7993B(h), \\ B(h) = B_0 \left[1 - \frac{3h}{r_0} \right], \end{cases} \quad (5)$$

где h – высота над поверхностью Земли [км]; r_0 – радиус Земли в данном месте [км]; f_B – гирочастота [МГц]. Магнитную индукцию при ионосферных исследованиях принято выражать в [Гс], перевод в систему Си [Тл] может быть осуществлен с помощью следующего соотношения:

$$B[\text{Гс}] = 1 \times 10^{-4} B[\text{Тл}]. \quad (6)$$

Исходя из практического постоянства f_B для данного места (5), можно осуществить проверку полученных данных, применяя выражение, связывающее критические частоты обыкновенной и необыкновенной волны с гирочастотой [3]:

$$f_x^2 - f_x f_B = f_o^2. \quad (7)$$

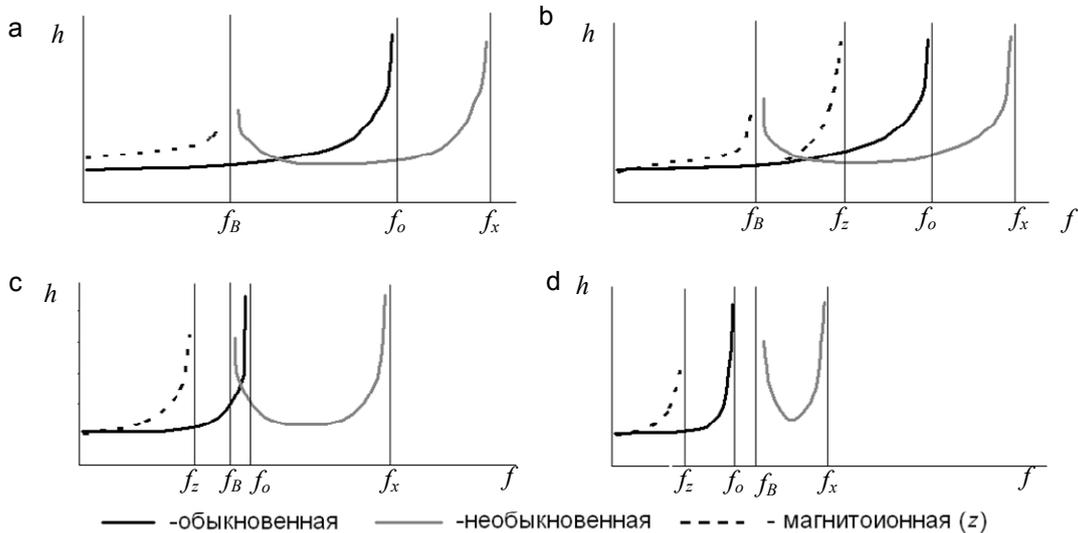


Рис. 2. Некоторые характерные виды СВЗИ при различных соотношениях частот:
 $b - f_o \gg f_B$; $c - f_o \approx f_B$; $d - f_o < f_B$

На основании полученных значений критических частот и следов отражения СВЗИ в виде матрицы \mathbf{M} вычисляется высотное распределение электронной плотности [м^{-3}]:

$$N_e(h) = 1,24 \times 10^{10} f_N, \quad (8)$$

где f_N – плазменная частота электронов [МГц]: для максимумов электронной плотности f_N будет соответствовать критической частоте f_o . По полученным точкам для высотного распределения электронной плотности с помощью стандартных методов аппроксимации можно получить гладкую кривую $N_e(h)$ [5].

Следующей задачей является расчет фактической высоты с учетом высотного распределения электронной плотности $N_e(h)$. Решить эту задачу можно по групповому времени распространения электромагнитной волны, с учетом прямого и обратного движения [4]:

$$t_{\text{ГР}} = \frac{2h_o}{c} + 2 \int_{h_o}^{h_{\text{и}}} \frac{dh}{\sqrt{1 - \frac{80,8 N_e(h)}{f^2}}}, \quad (9)$$

где h_o – высота расположения ионосферы над поверхностью Земли в данном месте (определяется по высоте отражения низших частот из матрицы \mathbf{M}); $h_{\text{и}}$ – высота ионосферы, для которой рассчитывается $t_{\text{ГР}}$; f – частота зондирующей электромагнитной волны; c – скорость света в вакууме.

Заключение

В ходе исследований произведен анализ СВЗИ с точки зрения особенностей шумовых составляющих, разработана математическая модель фильтрации СВЗИ. Полученные в результате фильтрации исходных СВЗИ данные позволяют производить расчет высотной характеристики $N_e(h)$.

Анализ данных ионосферной станции Воейково (Санкт-Петербург) за 2002–2003 г.г. показал, что разработанные методы фильтрации позволяют определить значение критической частоты $f_o \pm 0,16 f_o$ в 68% случаев, 23% СВЗИ были отсеяны на уровне фильтрации как неподдающиеся машинному анализу из-за высокого уровня шумов, в 9% СВЗИ критические частоты были определены с точностью менее 16%.

Решение проблем, возникающих при анализе СВЗИ ошибок и неопределенностей в силу высокого уровня шума, возможно с помощью взаимодействия мировой сети ионосферных станций, глобального радиозатменного мониторинга ионосферы и атмосферы Земли. Перспективным направлением зондирования ионосферы являются современные методы частотно-углового зондирования, позволяющие на стадии аппаратного анализа производить разложение отраженного сигнала на составляющие его компоненты, например, как это реализовано в Digisonde™ Portable Sounder (DPS) [6].

Литература

1. Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А. Волны в магнитоактивной плазме. – 2-е изд. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
2. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. – М.: Либроком, 2010. – 208 с.
3. Piggott W.R., K. Rawer. URSI handbook of Ionogram Interpretation and Reduction // INAG (Ionospheric Network Advisory Group) WORLD DATA CENTER A. National Academy of Sciences. – 2-d edition. – 1972. – 145 p.
4. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн. – М.: ЛЕНАНД, 2009. – 496 с.
5. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1970. – 664 с.
6. Background to Ionospheric Sounding [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ulcar.uml.edu/DPS.htm>, свободный. Яз. англ.

Гришенцев Алексей Юрьевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, tigerpost@ya.ru

Коробейников Анатолий Григорьевич

– Санкт-Петербургский филиал учреждения Российской академии наук «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН», доктор технических наук, профессор, зам. директора, Korobeynikov_A_G@mail.ru