

УДК 621.371; 551.510

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОЙ КОМПОНЕНТЫ КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ
ОСНОВНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ СЛОЕВ ПО ДАННЫМ ОДНОПОЗИЦИОННОГО
ВЕРТИКАЛЬНОГО ЛЧМ-ИОНОЗОНДА**

В.А. Иванов, А.А. Елсуков, М.И. Рябова, А.В. Мальцев, Н.В. Рябова

**PREDICTION OF REGULAR COMPONENT OF CUTOFF FREQUENCIES OF BASIC IONOSPHERIC
LAYERS ACCORDING TO SINGLE-STATION VERTICAL CHIRP SOUNDER**

V.A. Ivanov, A.A. Elsukov, M.I. Ryabova, A.V. Maltsev, N.V. Ryabova

В МарГТУ разрабатывается однопозиционный вертикальный ЛЧМ-ионозонд, который предполагается использовать для исследования явлений космической погоды, решения ряда задач диагностики ионосферных радиоканалов. Одной из задач при этом является развитие методик прогнозирования критических частот ионосферных слоев. В работе предложена методика автоматического прогноза регулярной компоненты суточного хода критических частот. Регулярная компонента выделяется методом фильтрации суточного хода. Методика апробирована на результатах физического моделирования. Работа выполняется при поддержке РФФИ (№05-07-93113; 06-02-16089; 07-05-12047).

In MarSTU it is developed one-item vertical chirp sounder which is supposed to be used for research of the phenomena of space weather, decisions of some diagnostics problems ionospheric radio channels. One of problems thus is development of techniques of prediction of critical frequencies ionospheric layers. In work the technique of the automatic prediction regular components of a daily motion of the critical frequencies. Regular a component it is allocated with a method of a filtration of a daily motion. The technique is approved on results of physical modeling at which data. Works is executed at support of the RFBR (№05-07-93113; 06-02-16089, 07-05-12047, 06-02-08059).

Введение

Прогнозирование состояния ионосферы является важнейшей составляющей в работе гидрометеорологических служб, систем декаметрового радиосвязи, позволяет вести непрерывную передачу информации с высокой надежностью, меняя рабочую частоту системы связи в тех случаях, когда она оказывается неадекватной. В последнее время в Российской Федерации и за рубежом для научных исследований ионосферы и распространения радиоволн декаметрового диапазона стали активно использоваться наклонные ионозонды с непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом. В настоящее время в МарГТУ (г. Йошкар-Ола) разрабатывается вертикальный однопозиционный ЛЧМ-ионозонд. Он станет, наряду с уже существующим ЛЧМ-ионозондом наклонного зондирования, инструментом для получения информации о текущем состоянии ионосферы и дополнит уже существующую сеть наклонных ЛЧМ-ионозондов, расширив возможности для научных исследований ионосферы.

Цель работы: разработка и апробация методики автоматического прогноза регулярной компоненты суточного хода критических частот для ее применения в системе проектируемого вертикального однопозиционного ЛЧМ-ионозонда. Радиозондирование ионосферных линий предполагает определение предикторных функций на некоторое время вперед (время упреждения). Качество информации, получаемой в результате зондирования ионосферы, напрямую зависит от отношения сигнал/шум на выходе радиоприемного устройства (РПУ) ионозонда, которое равно произведению отношения сигнал/шум на входе РПУ, умноженному на базу сигнала B . База элемента ЛЧМ-сигнала, используемого при зондировании, составляет $B=10^5-10^6$. Это позволяет применять при вертикальном зондировании мощность излучения около 10 Вт. При вертикальном зондировании ионосферы на выходе системы строится высотно-частотная характеристика (ВЧХ)

или ионограмма. Структура ионограммы вертикального зондирования представлена на рис. 1. Слой F2 можно наблюдать как при наклонном, так и при вертикальном зондировании. Одним из параметров, за которым ведутся радиофизические наблюдения, является критическая частота слоя F2.

ЛЧМ-ионозонд позволяет для заданной радиолинии (наклонной или вертикальной) определять значения предикторных функций через равноотстоящие моменты времени, задаваемые повторяемостью сеансов зондирования [1]. Таким образом, в результате зондирования задаются числовые последовательности значений предикторной функции

$$V(t)=V_i,$$

где t – целочисленная переменная ($t \in N, N$ – множество натуральных чисел), V_i – уровни временного ряда.

В задачах автоматического прогнозирования предикторную функцию в основном рассматривают состоящей из двух основных компонентов: регулярной и случайной [2]. При этом оптимальное прогнозирование и управление ведется относительно регу-

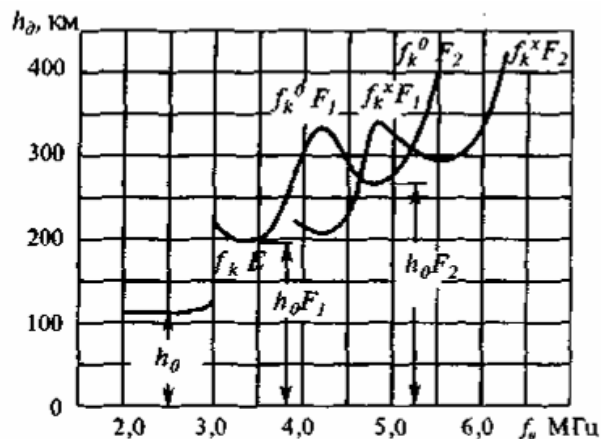


Рис. 1. Структура ионограммы вертикального зондирования.

лярной компоненты. Отметим, что остаточная компонента – это, как правило, высокочастотный, по сравнению с регулярной компонентой, процесс. Поэтому регулярная компонента выделяется с помощью экстраполирующего фильтра нижних частот или сглаживания суммарного процесса с использованием многочленов [1].

Регулярная составляющая предикторной функции $V(t)$ испытывает изменения с течением времени, и краткосрочный прогноз должен это учитывать. Поэтому текущий прогноз должен использовать адаптивные модели прогнозирования. Инструментом прогноза в предлагаемом алгоритме являются математические модели ионосферы и распространения радиоволн с единственным фактором – время. Этот фактор входит в корректируемую модель ионосферы через величину солнечной активности, т. е. через функцию $W(t)$. При этом фактически признается, что информационная ценность данных измерений тем выше, чем они ближе к моделируемому уровню. В этом смысле задача прогнозирования близка к задаче управления моделью через регулирование во времени ее параметра $W(t)$ [2].

Для апробирования алгоритма было выбрано физическое моделирование. В качестве исходных данных были выбраны временные ряды максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) на радиолинии Кипр (34.37 N, 32.56 E) – Йошкар-Ола (56.63 N, 47.87 E). При этом данные наклонного зондирования непрерывным ЛЧМ-сигналом пересчитывались на данные вертикального зондирования. Для пересчета использовалась программа ICEPAC с коэффициентами URSI. Исходные данные были предварительно отфильтрованы с частотой среза $10F_1$, где $F_1=1/24 \text{ ч}^{-1}$ – фундаментальная частота [2]. Суточные вариации МНЧ, полученные по экспериментальным данным, представлены на рис. 2.

Внешними параметрами корректируемой модели ионосферы являются W – уровень солнечной активности (сглаженное число солнечных пятен) и K_p – уровень магнитной активности. Магнитная активность функционально связана с индексом солнечной активности, так что основным внешним параметром для модели можно считать W . Для расчета характеристик радиолинии используется модель распространения радиоволн, заложенная в программу ICEPAC. Подстраивая вариацию W , автоматически настраиваем модель к сглаженному ходу максимально

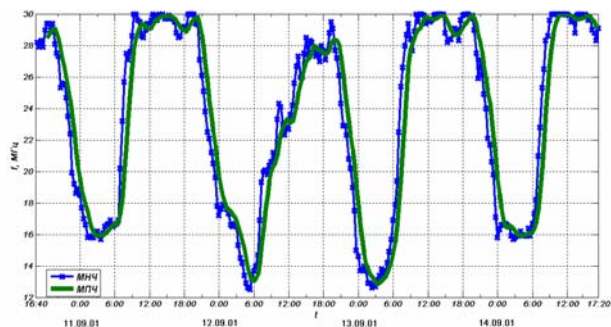


Рис. 2. Суточные вариации экспериментальных значений МНЧ (тонкая линия) и рассчитанные по адаптивной модели ионосферы значения МПЧ (сплошная толстая линия).

применимой частоты (МПЧ), получаемой на выходе модели, варьируя W так, чтобы разность между экспериментальными значениями МНЧ и рассчитываемыми МПЧ не превышала некоторой наперед заданной погрешности 0.1 МГц. При достижении этого условия будем считать, что модель ионосферы с выбранным W адекватно описывает распределение электронной концентрации в контрольных точках радиолинии и для адекватной модели можно рассчитать критическую частоту f_k .

Разработанный алгоритм адаптивного прогнозирования (рис. 3) содержит следующие основные шаги. По уровням временного ряда для МНЧ-радиолинии, полученным от ЛЧМ-ионозонда, производится настройка модели. Далее по этой модели прогнозируется уровень для регулярной составляющей с заданным периодом упреждения T . Отклонение рассчитанного значения от полученного с измерительной системы фактического уровня временного ряда МНЧ расценивается как ошибка прогнозирования. Далее оценивается ошибка прогнозирования регулярной составляющей ряда, которая учитывается в соответствии с разработанным алгоритмом при корректировке параметров модели. Затем по модели со скорректированными параметрами определяется прогнозная оценка на следующий период упреждения и т. д. Таким образом, модель постоянно обновляется и к концу периода обучения отображает наиболее существенные изменения МПЧ – рис. 2 (толстая сплошная линия). Суточный график хода критической частоты слоя F2, рассчитанный по данным адаптивной модели, представлен на рис. 4.

Модель адаптивного автоматического прогнозирования предикторных функций, которыми являются: для наклонного зонда – МНЧ, для проектируемого

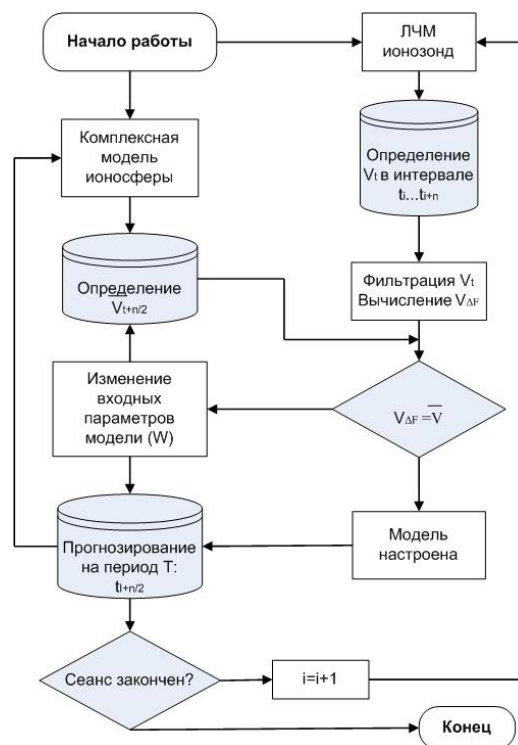


Рис. 3. Алгоритм адаптивного автоматического прогнозирования предикторных функций на основе ЛЧМ-зондирования.

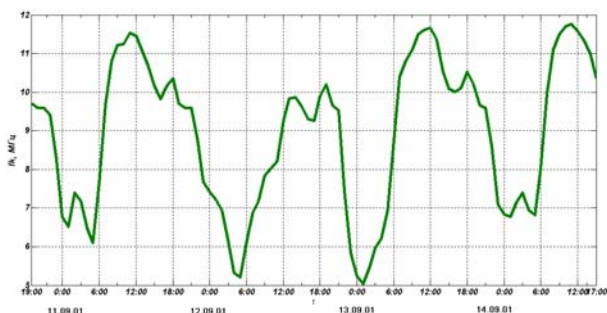


Рис. 4. Суточные вариации, определенные по адаптивной модели ионосферы значения f_k слоя F2.

вертикального – критическая частота f_k , состоит в следующем:

- 1) автоматическое измерение текущего значения $V(t)$, низкочастотная фильтрация предикторной функции;
- 2) численное оценивание параметра $W(t)$ модели;
- 3) определение адекватности модели на заданном шаге по критериям случайности остаточного ряда для V_i ;
- 4) оценка точности адекватной модели, получение точечного и интервального прогнозов;
- 5) анализ верификации прогноза.

Реализация данного подхода в автоматическом режиме требует решения задач анализа суточных вариаций V_i и \bar{V}_i , выбора алгоритма адаптации модели, учитывающего ошибки из-за сильных вариаций V_i .

Для реализации алгоритма необходимы географические координаты излучателя и приемника, а также массив экспериментальных данных V_i на заданной трассе.

По результатам проведенного физического моделирования состояния критической частоты выполнен расчет ошибок для краткосрочных прогнозов $T=1-4$ ч. Полученные результаты зависимости СКО от времени прогноза представлены на рис. 5. Как видно из полученных данных, относительная ошибка линейно возрастает от периода прогноза DT :

$$\frac{\Delta f}{f} = 0.05\Delta T + 0.02.$$

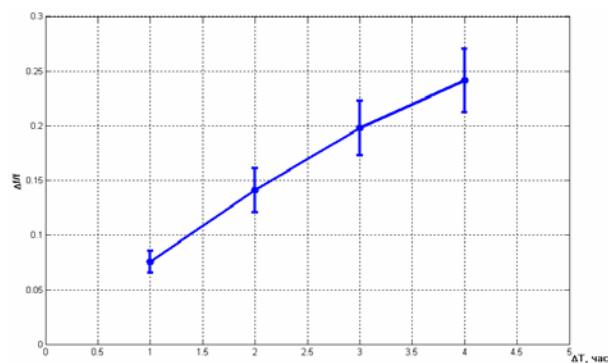


Рис. 5. Относительные ошибки временных прогнозов критической частоты в зависимости от периода прогноза.

Выводы

Разработана и апробирована методика автоматического прогноза регулярной компоненты суточного хода критических частот для данных, получаемых с помощью вертикального ионозонда. Для слоя F2 получены оценки ошибок прогнозирования регулярной компоненты критической частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационно-аналитическая система для исследования ионосферы и каналов декаметровый радиосвязи: Научное издание / А.Б. Егшин, В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. 323 с.
2. Рябова Н.В. Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых декаметровых радиоканалов: Научное издание. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 292 с.
3. Основы радиотехнических систем ДКМ-диапазона: Учебное пособие / Под общей ред. проф. В.А.Иванова. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. 204 с.

Марийский государственный технический университет,
Йошкар-Ола

