

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.139-142

ВЫДЕЛЕНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВАРИАЦИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Д.Б. Рождественский¹, В.А. Телегин², В.И. Рождественская²

¹Институт проблем управления РАН, г. Москва, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук, г. Москва, г. Троицк, Россия

Аннотация. Методы спектрального анализа и демодуляции сложного сигнала используются для прогноза наблюдаемых значений слоя F2. Получен прогноз суточного хода и высокочастотной составляющей критической частоты, которую особенно важно учитывать в летние месяцы для среднеширотной ионосферы.

Введение

В настоящее время, когда имеются уверенные знания о многолетних значениях ионосферных параметрах, стало понятно, что влияние на ионосферу магнитных бурь, нарушения радиосвязи и предвестники землетрясений надо искать в высокочастотных вариациях ионосферных составляющих. Для устойчивой радиосвязи необходимо синхронизировать приемо-передающие устройства с изменением критической частоты, так как время пропадания сигнала зависит от вариаций критической частоты, причем настраивать приемник необходимо по тому же закону, по которому меняется критическая частота, т.е. необходимо знать закон изменения $foF2$ во время функционирования канала связи или прогноз критической частоты $foF2$ на этот период времени. Эффективная полоса пропускания приемника задает пределы точности требуемого прогноза для поддержания устойчивой радиосвязи.

Пришло время исследования высокочастотных вариаций ионосферных процессов. Механизм обработки данных наблюдений для оценки высокочастотных и средних значений $foF2$ одинаков, различие заключается только в частоте дискретизации при измерениях, т.е. в интервале измерений. В работах [1-3] были изложены основные методы обработки и прогнозирования критической частоты $foF2$, построенные на основе демодуляции сложного сигнала. Представление сложного процесса (вариаций критической частоты) в виде отдельных составляющих с последующим прогнозированием каждой позволяет повысить точность прогноза, так как узкополосный сигнал прогнозируется точнее. Естественно, что отдельные составляющие описывают конкретные процессы, им свойственные.

Методы прогноза

Известные многочисленные прогностические модели ионосферных параметров относятся в основном к среднегодовым, среднемесячным и среднесуточным значениям. Высокочастотные составляющие могут быть известны только из конкретных данных. Поэтому прогноз быстромменяющихся или высокочастотных во временной области составляющих является актуальной задачей для устойчивой радиосвязи.

Методы прогнозирования строятся на основе аппроксимации данных наблюдений и экстраполяции их в будущие моменты времени. Метод прогнозирования использует аппроксимацию разрывных функций и демодуляцию сложного сигнала. Предварительно данные наблюдений подвергаются фильтрации с выделением отдельных составляющих, например детерминированной и стохастической или шумовой. Детерминированная составляющая прогнозируется, а математическое ожидание шумовой составляющей приравнивается к нулю. Для первичной обработки данных выбраны фильтры исправленного непрерывного осреднения [3] и фильтры Чебышева второго рода, которые используются в радиотехнических устройствах с частотно-избирательными свойствами и в вычислительной практике как симметричные цифровые фильтры, осуществляющие взвешенное осреднение равноотстоящих отсчетов. Частотные характеристики фильтров Чебышева позволяют получать высокую степень подавления в полосе среза. Для расчета математического ожидания используют операцию скользящего среднего или медианы, которые вносят в исходный ряд искажения в виде постоянной составляющей. Чтобы избежать этого в настоящей работе используются фильтры Чебышева. Для анализа экспериментальных данных критической частоты $foF2$, полученных на станции ИЗМИРАН был разработан комплекс программ, включающих алгоритмы цифровой фильтрации и спектрального анализа. Для анализа данных использованы методы спектрального анализа, позволяющие по

единой методике проводить выделение отдельных составляющих из данных критической частоты $foF2$. Разбиение процесса на отдельные частотные диапазоны позволяет упростить исследования отдельных процессов, протекающих в ионосфере и определить правила дальнейшей цифровой обработки с помощью численных методов. $f_{изм} = f_{сут} + f_{вс}$, где $f_{изм}$ - измеренное значение критической частоты, $f_{сут}$ - выделенное из измеренного значение суточного хода критической частоты, $f_{вс}$ - высокочастотная составляющая критической частоты. Максимальная частота диапазона определяет интервал дискретизации в данном диапазоне: $\Delta t = 1/2[f_{max}]$. Изменение интервала дискретизации осуществляется сжатием информации, которое возможно после низкочастотной фильтрации и введения коэффициента сжатия. На рис.1 представлено разделение суточной и высокочастотной составляющей для годовых данных 2014 г., состоящих из 35040 значений.

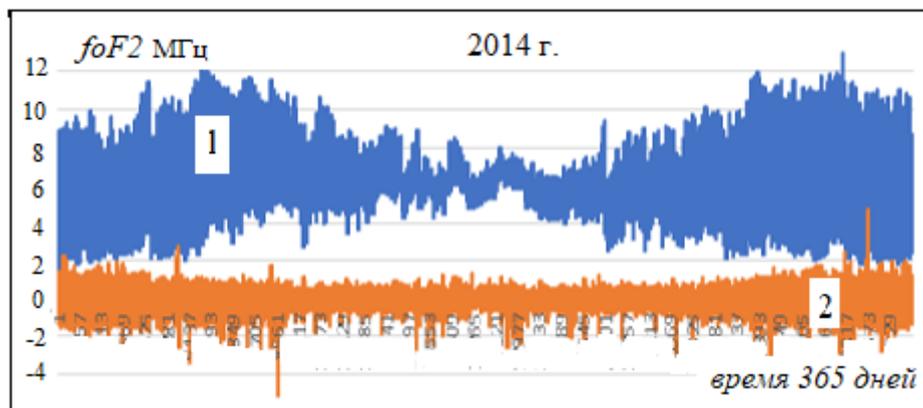


Рисунок 1. Разделение суточной и высокочастотной составляющей для годового хода вариаций критической частоты слоя F2 за 2014 г.: 1 – измеренные значения $foF2$, 2 - высокочастотная составляющая $f_{вс}$.

Видно, что амплитуда высокочастотной составляющей колеблется в пределах 2 МГц имеет неярко выраженный суточный ход. Учет высокочастотной составляющей при прогнозировании радиотрасс особенно важен в летние месяцы, когда вариации амплитуды высокочастотной составляющей превышают вариации суточного хода, что нетрудно видеть на рис. 1. Для реального процесса выделены области прогнозирования отдельных спектральных составляющих критических частот. В разностной составляющей $f_{вс}$ присутствуют составляющие с периодами от 30 мин (частота Найквиста) до 3-х часов. Составляющие суточного хода $f_{сут}$ имеют периоды от 3 до 24 часов. Интервал прогнозирования зависит от спектрального диапазона прогнозируемого процесса. Чем уже диапазон, тем больше интервал прогнозирования. Восстановление происходит на частотах не ниже частоты Найквиста f_n , т.е. не ниже $1/2\Delta t$. Если в процессе присутствуют частоты $f > 1/2\Delta t$, то при восстановлении такого процесса возникает мимикрия частот, которая приводит к искажениям процесса. Поэтому при проведении измерений интервал дискретизации должен быть как можно меньше. Прогнозирование радиотрасс в дециметровом диапазоне подразделяется на три категории – долгосрочное прогнозирование, краткосрочное и оперативное. Предлагаемый метод прогноза не требует привлечения стандартных ионосферных моделей исследуемого процесса. Напротив, он сам может стать основой эмпирической модели ионосферы для прогноза критической частоты в задачах КВ -радиосвязи на расстояниях до 3000 км. Преимуществом предлагаемого метода является использование в методе экстраполяции только экспериментальных данных. В работе [3] показано, что прогноз суточного хода на двое суток можно считать приемлемым. Метод экстраполяции предполагает дальнейшее совершенствование при краткосрочном прогнозировании. Для краткосрочного прогноза использование 15-ти минутных данных позволяют прогнозировать от 30-ти минут.

Прогнозирование высокочастотных составляющих

Высокочастотная составляющая критической частоты может быть отнесена к возмущенной части ионосферы, связанной с солнечным воздействием. Наиболее ярко возмущения проявляются в дневное время, начиная с восхода. Эти высокочастотные вариации имеют суточный и сезонный ход. Здесь и ниже отсчеты ведутся от нуля часов первого января 2014 года с шагом 15 мин. На рис. 2 представлен прогноз выделенной отдельно высокочастотной составляющей для 3-4 января 2014 г. В выбранном для прогнозирования ряде

просматривается суточная вариация высокочастотной составляющей, а в прогнозируемом ряде эта вариация практически неразличима. В предрассветные часы происходит резкое увеличение частоты $foF2$, которое в течение дня постепенно уменьшается к ночи в спокойных условиях среднеширотной ионосферы.

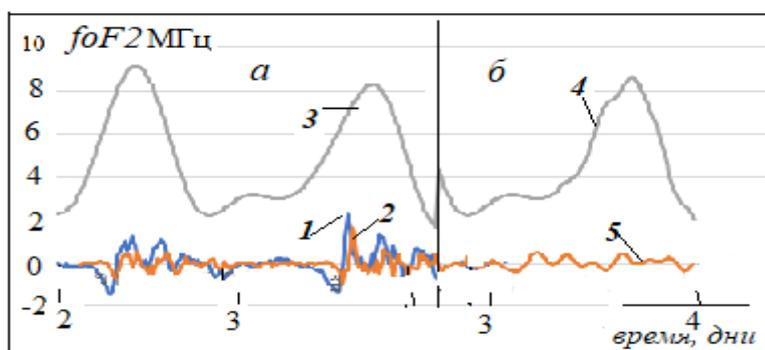


Рисунок 2. Прогноз суточного хода с учетом экстраполяции $f_{\text{вс}}$: кривая 1 – значения $f_{\text{вс}}$ - разности $f_{\text{изм}} - f_{\text{сут}}$, кривая 2 – сглаженные значения $f_{\text{вс}}$, подготовленные для экстраполяции, 3 – прогноз $f_{\text{сут}}$, 4 – прогнозируемые значения $foF2$ с учетом $f_{\text{вс}}$, 5 – прогноз высокочастотной составляющей $f_{\text{вс}}$.

Из рис. 2 видно, что учет $f_{\text{вс}}$ высокочастотной составляющей изменяет вид суточного хода. На рис. 3 приведены примеры экстраполяции суточного хода значений $foF2$ для разных дней и сезонов в 2014 г. с учетом высокочастотной составляющей. Горизонтальная прямая на оси абсцисс означает число отсчетов.

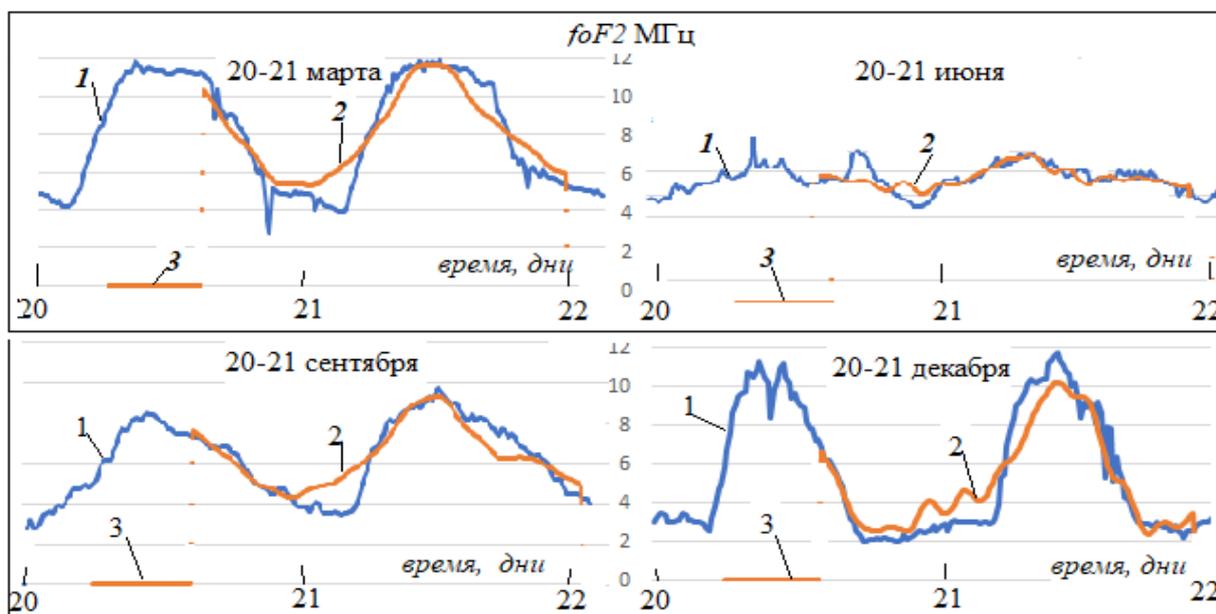


Рисунок 3. Примеры экстраполяции суточного хода значений $foF2$ для сезонов в 2014 г. с учетом высокочастотной составляющей. Как и в предыдущих рис. 1- коррективные значения $f_{\text{изм}}$, 2 - прогноз значений $foF2$, 3 – интервал отсчетов, выбранный для прогноза.

Из приведенных на рис. 3 кривых видно, что наибольшие отклонения прогнозируемых и измеренных данных наблюдаются в предрассветные часы, когда происходит резкое изменение критической частоты за короткое время, однако такие же резкие изменения значений в прогнозе прослеживаются в вечерние часы. В летнее время суточный ход высокочастотной составляющей практически отсутствует в отличие от зимнего, где он выражен ярко. Величина высокочастотной составляющей сравнима с величиной суточного хода и при прогнозе этой составляющей пренебрегать нельзя. Приведенные примеры свидетельствуют о

принципиальной возможности осуществления прогноза критической частоты с помощью метода спектрального анализа и демодуляции сложного сигнала. Вопрос точности экстраполяции требует дальнейшего исследования, однако можно предположить, что прогноз высокочастотной составляющей более точен для зимних сезонов.

Заключение

Разделение суточной и высокочастотной составляющей, получено с помощью комплекса программ, созданных на основе анализа сложного сигнала показало, что интервал прогнозирования зависит от спектрального диапазона прогнозируемого процесса - чем уже диапазон, тем больше интервал прогнозирования, и определяется периодом прогнозируемой составляющей. Амплитуда высокочастотной составляющей для среднеширотной ионосферы существенно меньше амплитуды критической частоты f_oF_2 , как правило не превышает 0.5 МГц. В высокочастотной составляющей присутствуют составляющие с периодами от 30 мин (частота Найквиста) до 3-х часов. Составляющие суточного хода имеют периоды от 3 до 24 часов. При прогнозировании высокочастотной составляющей выбираем интервал прогнозирования равный получасу. Расчеты показывают, что приемлемые значения прогноза высокочастотной составляющей критической частоты могут быть получены в интервале от 0,5 до 5 часов. Выбранный метод экстраполяции положен в основу эмпирической модели ионосферы для прогноза критической частоты в задачах КВ радиосвязи на расстояниях до 3000 км.

Литература

1. Рождественский Д.Б., Телегин В.А., Рождественская В.И. Методы цифровой фильтрации для обработки результатов ионосферных наблюдений // "Physics of Auroral Phenomena" Proc.XXXVIII Annual Seminar, Apatity, p. 149-152, 2015
2. Рождественский Д.Б., Телегин В.А. Метод прогнозирования дискретных наблюдений // "Physics of Auroral Phenomena" Proc.XXXVIII Annual Seminar, Apatity, p.153-156, 2015
3. Рождественский Д.Б., Телегин В.А., Рождественская В.И. Выделение долгопериодных вариаций среднеширотной ионосферы фильтрами Чебышева // "Physics of Auroral Phenomena" Proc.XL Annual Seminar, Apatity, p.128-130, 2017