

ВЫДЕЛЕНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ИОНОГРАММАХ СРЕДСТВАМИ ПОРОГОВОЙ ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИИ

Р.Р. Гайбадуллина, В.В. Бочкарев, А.Д. Акчурин

ISOLATION OF MANIFESTATIONS OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES ON IONOGRAMS BY THRESHOLD WAVELET FILTERING

R.R. Gaybadullina, V.V. Bochkarev, A.D. Akchurin

В работе исследуются данные наблюдений, полученные в Казанском университете с помощью цифрового ионозонда вертикального зондирования «Циклон». Особенностью анализируемого цикла измерений является высокое временное разрешение (1 мин). Оно позволяет исследовать процессы, связанные с перемещающимися ионосферными возмущениями, обусловленными внутренними гравитационными волнами и другими процессами. Типичные периоды внутренних гравитационных волн на ионосферных высотах составляют от пяти до нескольких десятков минут. Для полученных серий ионограмм выполняется 3-мерное вейвлет-преобразование (в координатах частота – задержка – время зондирования). После этого с помощью пороговых алгоритмов фильтрации подавляются шумы и другие незначимые детали и выделяются квазипериодические вариации. Результаты обработки экспериментальных данных показывают, что использование 3-мерного вейвлет-преобразования дает более широкие возможности анализа ионограмм.

This paper investigates the observational data obtained in Kazan University by digital ionosonde of vertical sounding «Cyclone». The peculiarity of the analyzed measurement cycle is the high time resolution (1 min). It allows us to investigate processes associated with traveling ionospheric disturbances caused by internal gravity waves and other processes. Typical periods of internal gravity waves at ionospheric heights range from five up to several tens of minutes. To produce a series of ionograms the 3-dimensional wavelet transform is carried out (in coordinates frequency – delay – time sensing). Then, with the help of the threshold filtering algorithm a noise and other insignificant details are suppressed and quasi-periodic variations are separated. The results of the experimental data show that the use of 3-dimensional wavelet transform gives better possibilities for analyzing ionograms.

В Казанском университете с 1983 г. ведется разработка семейства цифровых ионозондов «Циклон». Последний вариант «Циклон-GPS» (далее – просто «Циклон») включает в себя IBM-совместимый компьютер, приемное устройство P-399А («Катран»), импульсный передатчик, GPS-систему привязки шкалы времени и блок сопряжения [Зыков, 2013]. Особенностью измеряемого цикла ионозонда является его высокое временное разрешение, равное 1 мин. Это позволяет исследовать процессы, имеющие короткую длительность, такие как перемещающиеся ионосферные возмущения.

Ионосферные станции (ионозонды) являются стандартными установками для измерения высотно-частотных характеристик – ионограмм. Ионограмма служит самым распространенным источником информации об ионосфере и представляет собой зависимость действующей высоты от частоты. Наряду с полезным сигналом ионограммы содержат различного рода помехи: ярко выраженные помехи в КВ-диапазоне от передающей радиостанции и фоновый шум. Очистка ионограмм от воздействия таких помех – необходимый этап, позволяющий повысить контрастность представления.

На сегодняшний день существует множество эффективных алгоритмов фильтрации.

Метод на основе анализа порядковых статистик, описанный в работе [Акчурин, 2011], хорошо подходит для фильтрации помех от радиостанций. Идея метода заключается в следующем. Для исключения сосредоточенных помех на изображении сначала определяется медианный уровень мощности для каждой частоты. Затем полученные значения сопоставляются с медианным уровнем мощности, полученным по всем частотам. Частоты, для которых медианный уровень мощности выше порога, исключаются на данном этапе из обработки. На рис. 1 приве-

дена типичная ионограмма ионозонда «Циклон» и ионограмма, прошедшая первый этап фильтрации.

На следующем шаге необходимо избавиться от фоновых шумов. Для этого применяется алгоритм пороговой вейвлет-фильтрации. Модель сигнала можно представить следующим образом:

$$s(t) = f(t) + \sigma \epsilon(t),$$

где $f(t)$ – полезный сигнал, $\epsilon(t)$ – шум, распределенный по нормальному закону, $s(t)$ – исследуемый сигнал. При вейвлет-анализе сигнал раскладывается на аппроксимирующие коэффициенты, которые представляют собой сглаженный сигнал, и детализирующие коэффициенты, описывающие колебания. Таким образом, шумовая компонента больше отражается в детализирующих коэффициентах. Далее предполагаем, что шумовая компонента представляет собой сигнал, меньший по модулю, чем основной. Поэтому простейший способ удаления шума состоит в том, чтобы сделать нулевыми значения коэффициентов, меньших некоторого порогового значения – предполагаемого уровня шума [Малла, 2005].

Процедура пороговой вейвлет-фильтрации включает следующие этапы:

- 1) разложение сигнала по вейвлет-базису;
- 2) оценка порогового значения уровня шума для каждого уровня разложения;
- 3) пороговая фильтрация коэффициентов детализации;
- 4) восстановление сигнала.

Для фильтрации к полученной серии ионограмм применяется 3-мерное вейвлет-преобразование (в координатах частота – задержка – время зондирования) на основе симлетов. Разложение по третьей координате дает большие возможности учета влияния шума. Определение предполагаемого уровня шума λ для каждого уровня разложения производится

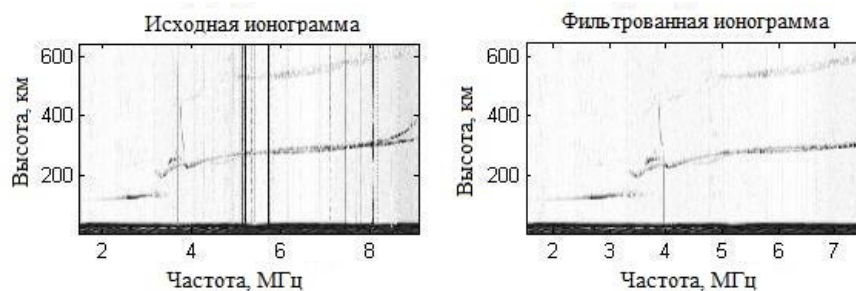


Рис. 1. Ионограмма, полученная ионозондом «Циклон» 13.03.2013 в 12:24 (слева); ионограмма – после первого этапа фильтрации (справа).

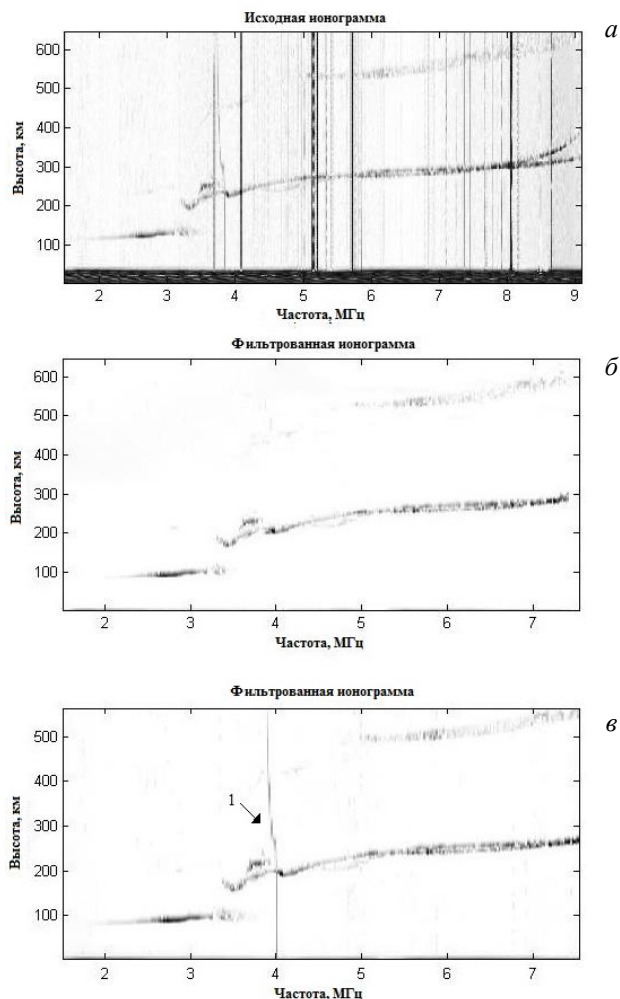


Рис. 2. Ионограмма, полученная ионозондом «Циклон» в 12:24 13.03.2013 (а); ионограмма, прошедшая алгоритм фильтрации, основанный на 3-мерном вейвлет-разложении сигнала ионозонда (б); ионограмма, прошедшая алгоритм фильтрации, основанный на двумерном вейвлет-разложении сигнала ионозонда (в).

с помощью локальной медианной оценки с временным окном, равным 60 мин. Сама процедура пороговой обработки выполняется по алгоритму жесткого трешолдинга [Хардле, 2002], при котором неизменными сохраняются все коэффициенты детализации, большие или равные по абсолютной величине порога $\tau = \alpha\lambda$, $\alpha = 3$. В результате фильтрация по алгоритмам, описанным выше, позволяет очистить ионограмму от основной массы шумов.

Было проведено также сравнение алгоритма второго этапа фильтрации с алгоритмом фильтрации ионограмм на основе двумерного стационарного вейвлет-преобразования [Акчури, 2011]. На

рис. 2, а представлена исходная ионограмма ионозонда «Циклон», снятая 13 марта 2013 г. в 12:24. На рис. 2, в представлена ионограмма, очищенная по методу двумерной фильтрации, на рис. 2, б – ионограмма, фильтрованная по алгоритму, описанному выше. Можно заметить, что при двумерной фильтрации на частоте 4 МГц сохранилась помеха (на рис. 2, в отмечена цифрой 1), которая исчезла при использовании описанного в работе метода. Применение метода фильтрации ионограмм с 3-мерным вейвлет-разложением сигнала позволяет сохранить значащие элементы на ионограмме и очистить ее от шумов.

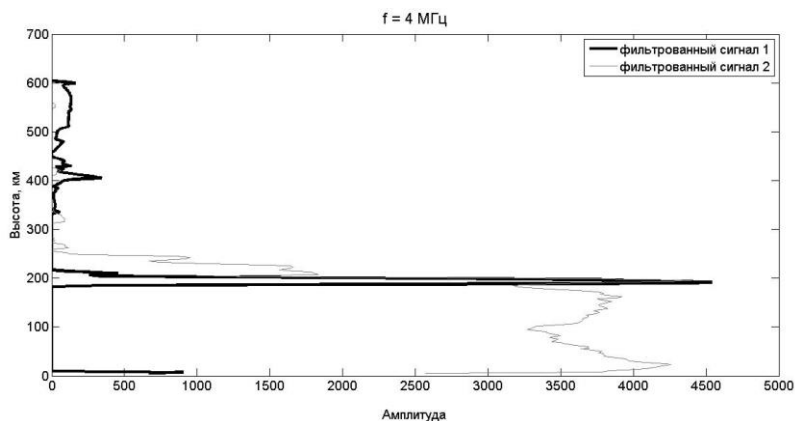


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала ионозонда от высоты на частоте 4 МГц. Черной линией изображен сигнал после 3-мерной вейвлет-фильтрации, серой линией – после двумерной фильтрации.

На рис. 3 представлена зависимость амплитуды сигнала ионозонда от высоты на частоте 4 МГц. Видна сохранившаяся помеха на высотах до 250 км.

Таким образом, использование 3-мерного вейвлет-преобразования сигналов ионозонда, где третья координата – время зондирования), позволяет реализовать эффективный алгоритм фильтрации ионограмм. Обработка реальных экспериментальных данных показывает, что такой подход позволяет заметно повысить контрастность представления ионограмм по сравнению с двумерной фильтрацией. Это полезно для выявления перемещающихся ионосферных возмущений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 13-05-00967а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акчурин А.Д., Бочкарев В.В., Масленникова Ю.С. Вейвлет-фильтрация ионограмм // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. XII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Тезисы докладов. Иркутск. 2011. С. 56–57.

Зыков Е.Ю., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Исследовательский ионозонд «Циклон» Казанского университета и программное обеспечение автоматической обработки ионограмм // Гелиогеофиз. иссл.. 2013. Вып. 4. С. 39–46.

Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. М.: Мир, 2005. С. 671.

Хардле В., Крекьячарян Ж., Пикар Д., Цыбаков А. Вейвлеты, аппроксимация и статистические приложения [Электронный ресурс] // <http://matlab.exponenta.ru/wavelet/book6/11.php> (дата обращения 28.08.13).

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия