

УДК 550.388.2

ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИЯ ИОНОГРАММ

А.Д. Акчурин, В.В. Бочкарев, Ю.С. Масленникова

WAVELET FILTERING OF IONOGRAMS

A.D. Akchurin, V.V. Bochkarev, Yu.S. Maslennikova

В работе представлен алгоритм фильтрации, который позволяет повысить контрастность ионограмм. Для исключения сосредоточенных помех используется фильтрация на основе анализа порядковых статистик. Далее применяется пороговая вейвлет-фильтрация с использованием двумерного стационарного вейвлет-преобразования. При этом порог для шумоподавления выбирается отдельно для каждого уровня разложения с использованием универсального алгоритма Донохо–Джонстона. Ионограммы, использованные в работе, были получены на зондирующем комплексе «Циклон» Казанского университета. Предложенный алгоритм позволяет улучшить качество ионограмм, что может быть полезно для дальнейшего экспертного анализа или работы автоматических систем анализа.

Ionograms are generally corrupted by noise which causes large difficulties in further analysis, especially by automatic systems. In this research we propose a filtering algorithm to contrast ionograms. At the beginning we use the order statistics analysis to exclude concentrated frequency artifacts. Then ionograms are being filtering using two dimensional stationary wavelet transform. The ionograms used in the experiments were collected at ionosphere complex “Cyclone” of the Kazan University. The proposed algorithm raises the quality of ionograms which is useful for further expertise or automatic system analysis.

В течение последних 30 лет в Казанском университете ведется разработка семейства цифровых ионозондов «Циклон». За это время было разработано несколько вариантов ионозондов соответственно развитию вычислительной техники. Последний вариант «Циклон-GPS» (далее просто «Циклон») включает IBM-совместимый компьютер, приемное устройство P-399А («Катран»), импульсный передатчик, GPS-систему привязки шкалы времени и блок сопряжения [Акчурин, 2005]. Ионозонд фиксирует время задержки между передачей и приемом импульса. По разности частотных колебаний определяется время задержки разных частот. Результаты зондирования представляются в виде ионограммы. Ионозонд «Циклон» работает в минутном режиме и за день получает 1440 ионограмм. Минутный режим работы позволяет наблюдать, например, мелкокомасштабные изменения в ионосфере в форме ПИВ. Типовой период существования ПИВ на ионограммах ~10 мин, а обычная периодичность получения ионограмм сетевыми ионозондами 15 мин, поэтому для наблюдения и изучения ПИВ одномоментный режим работы – насущная необходимость. Для того чтобы обработать такой большой поток данных в виде ионограмм, следующих с минутным шагом, необходимо создание систем автоматической обработки ионограмм и экспертного анализа. Важным компонентом обработки является предварительная фильтрация ионограмм.

Ионограммы зачастую подвержены значительному влиянию помех в КВ-диапазоне, которые отображаются в виде вертикальных полос на ионограммах. Эти полосы обусловлены работой радиопередатчиков на фиксированной частоте. В результате на ионограмме можно выделить три основных типа объектов: полезный сигнал, фоновый шум (основной фон) и сосредоточенные помехи (вертикальные линии) [Theera-Umporn, 2007]. Задача фильтрации ионограмм состоит в том, чтобы устранить или снизить интенсивность этих помех при сохранении максимума полезной информации.

Предлагаемый в работе алгоритм фильтрации ионограмм включает следующие этапы:

1) исключение сосредоточенных помех на основе анализа порядковых статистик;

2) пороговая вейвлет-фильтрация.

На рис. 1 вверху представлена типичная ионограмма, полученная на ионозонде «Циклон». Для исключения сосредоточенных помех на изображении сначала определяется медианный уровень мощности для каждой частоты $P_m^{(i)}$. Затем полученные значения сопоставляются с медианным уровнем мощности, полученным по всем частотам $\bar{P}_{\text{мр}}$. Частоты, для которых медианный уровень мощности $P_m^{(i)}$ выше порога, исключаются на данном этапе из обработки.

Как показано в работе [Боярский, 1972], асимптотическое распределение i -й порядковой статистики $\omega_x^{(i)}$ (в нашем случае медианы) приближается

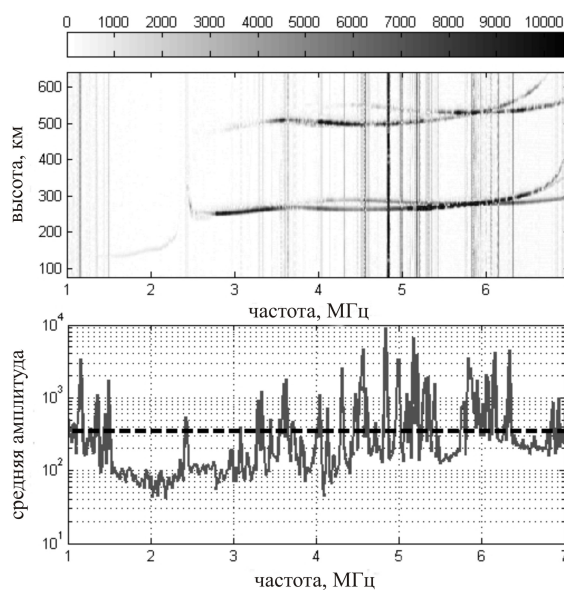


Рис. 1. Типичная ионограмма, полученная на зондирующем комплексе «Циклон» (02.12.2010 г., 09:33) (верхняя панель); медианный уровень мощности для различных частот в логарифмическом масштабе (сплошная серая кривая) и пороговый уровень, полученный по всем частотам (черная штриховая прямая) (нижняя панель).

к нормальному закону. Дисперсия для данного распределения может быть определена как

$$\sigma_{\text{Med}}^2 = \frac{1}{2N\omega_x^{(i)}}.$$

Также определим квантиль нормального распределения L для заданного уровня значимости. Таким образом, порог для медианного уровня мощности вычисляется как

$$P_{\text{Thr}} = \bar{P}_{\text{Med}} + L\sigma_{\text{Med}}^2,$$

где \bar{P}_{Med} – медианное значение мощности, найденное по всем частотам. На рис. 1 внизу в логарифмическом масштабе представлены медианные значения мощности для различных частот и вычисленный пороговый уровень. Частоты, медианные значения мощности для которых выше данного порога, считаются содержащими сосредоточенную помеху.

Далее к преобразованной ионограмме применяется процедура пороговой фильтрации. Подобные алгоритмы фильтрации изображений в последнее время получили широкое распространение, в них используется представление сигнала набором вейвлет-коэффициентов, относящихся к различным масштабам. Для данного эмпирического набора вейвлет-коэффициентов оценивается уровень шума, после чего проводится проверка гипотезы о значимом отличии вейвлет-коэффициентов от нуля путем сравнения их абсолютного значения с выбранным неким образом порогом. В универсальных алгоритмах вейвлет-фильтрации уровень шума, как правило, определяется исходя из разброса вейвлет-коэффициентов, соответствующих одному масштабу, но различным областям изображения.

Для фильтрации ионограмм было использовано двумерное стационарное вейвлет-преобразование на основе вейвлетов Хаара и симлетов. Процедура шумоподавления проводилась на основании парадигмы Донохо–Джонстона с пороговой обработкой по критерию логарифма энергии [Mallat, 1989]. В этом случае рассматривается стандартная модель сигнала с аддитивным гауссовским шумом

$$d_i = f_i + \sigma z_i,$$

где z_i – случайная величина, распределенная по нормальному закону с параметрами $N(0,1)$. В случае ортогонального вейвлет-преобразования $Wd = Wf + \sigma Wz$, компоненты вектора $\tilde{z} = Wz$ также являются нормально распределенными случайными переменными. Цель состоит в удалении шума в вейвлет-области, т. е. в нахождении оператора, переводящего компоненту Wz в нуль. Донохо и Джонстон показали, что этим оператором является

$$\mu_t(y) = \text{sgn}(y)(|y| - t)_+,$$

где $t = t_N = \sigma\sqrt{2\log N}$, N – длина ряда y . Следовательно, полученная оценка для искомого сигнала строится следующим образом: $f^* = W^{-1}\eta_{t_N}Wd$. С учетом структуры корреляционной зависимости вейвлет-коэффициентов порог шумоподавления на

L_w -уровне вейвлет-разложения может быть записан как

$$\sqrt{2(1 + \delta_{L_w}) \log((L_w + 1)N)},$$

где $\delta_{L_w} = \max \left| \text{corr}((Wz)_i, (Wz)_j) \right|$.

На рис. 2 представлены срезы по высоте (а, б) и частоте (в, г) исходной и отфильтрованной ионограммы, рассмотренной выше. Из рисунка видно, что использованный фильтр хорошо удаляет несущественные детали на ионограмме.

Пример фильтрации ионограмм, снятых в разное время, представлен на рис. 3. На рис. 3 слева показан

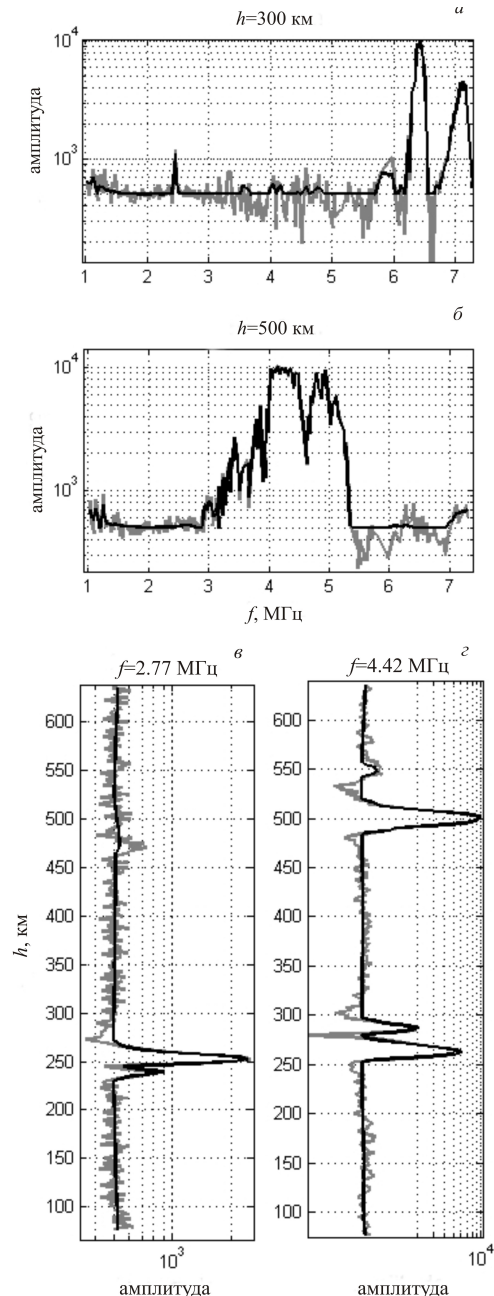


Рис. 2. Зависимость амплитуды от частоты на высотах 300 км (а) и 500 км (б); зависимость амплитуды от высоты на частотах 2.77 МГц (в) и 4.42 МГц (г). Серой сплошной линией показан сигнал с исходной ионограммы, черной сплошной линией – сигнал после пороговой вейвлет-фильтрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акчурин А.Д., Юсупов К.М. Система управления ионозонда «Циклон» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление». 2010. Вып. 5(108). С. 49–56.

Боярский Е.А. Порядковые статистики. М.: Статистика, 1972. 119 с.

Theera-Umpon N. Ionospheric F-layer critical frequency estimation from digital ionogram analysis // ICCSA. 2007. V. 3. P. 190–200.

Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation // IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell. 1989. V. 11. P. 674–693.

Казанский (Поволжский) федеральный университет, Казань

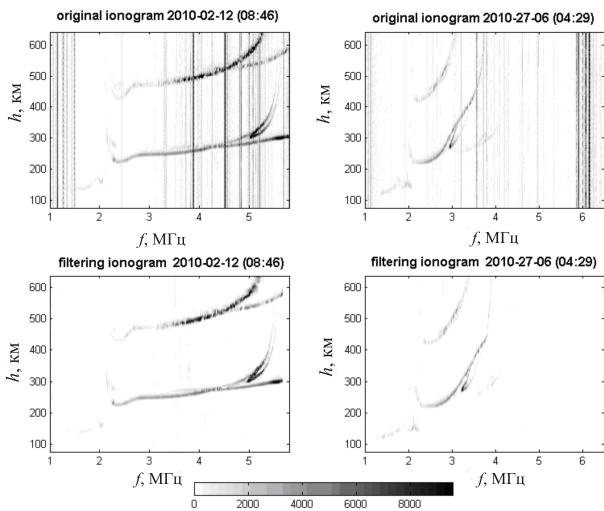


Рис. 3. Пример фильтрации ионограмм (вверху показаны исходные ионограммы, внизу – ионограммы, отфильтрованные представленным выше методом).

случай фильтрации ионограммы, содержащей ПИВ, а справа представлена ионограмма, полученная в утренние часы, когда еще не наблюдаются хорошо сформированные слои F1 и F2.

Тестирование представленного выше метода фильтрации на большом наборе ионограмм показало, что данный метод позволяет повысить качество ионограмм, что может быть полезно для последующего выделения следов ПИВ различной формы, отделившихся от следа основного ионосферного слоя, в недрах которого и родилось ПИВ.