

УДК 004.93

РАСПОЗНАВАНИЕ СВИСТЯЩИХ АТМОСФЕРИКОВ В ОНЧ-СПЕКТРОГРАММАХ

Е. А. Малыш², Г. М. Водинчар^{1,2}, Н. В. Чернева¹

¹ Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, п. Паратунка, ул. Мирная, 7

² Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4

E-mail: roswell-47@mail.ru

Описаны алгоритм распознавания образов свистящих атмосфериков в спектрограммах ОНЧ-излучения и алгоритм фильтрации импульсных сигналов в спектрограммах.

Ключевые слова: свистящие атмосферерики, распознавание образов, ОНЧ-излучение.

© Малыш Е. А., Водинчар Г. М., Чернева Н. В., 2016

MSC 68T10

DETECTION OF THE WHISTLERS IN THE VLF-SPECTROGRAMS

E. A. Malysh², G. M. Vodinchar^{1,2}, N. V. Cherneva¹

¹ Institute of Cosmophysics Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034, Paratunka, Kamchatka region, Mirnaya st., 7

² Vitus Bering Kamchatka State University, 683031, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya st., 4

E-mail: roswell-47@mail.ru

The whistlers pattern recognition algorithm in the spectrogram of VLF-radiation and algorithm of the filtering of pulse signals in the spectrograms are proposed.

Key words: whistlers, pattern recognition, VLF-emission.

© Malysh E. A., Vodinchar G. M., Cherneva N. V. , 2016

Введение

На долю свистящих атмосфериков (вистлеров) приходится значительная часть естественного электромагнитного излучения. Они формируются в результате частотной дисперсии импульса грозового разряда, при распространении этого импульса в магнитосферной плазме. В сигналах ОНЧ-диапазона вистлеры проявляются в виде структур, имеющих характерную саблеобразную форму на спектрограмме [1]. Форма дисперсионного искажения импульса определяется параметрами плазмы, поэтому вистлеры являются естественными маркерами состояния плазмосферы Земли [2], и их мониторинг является перспективным направлением исследований космической погоды.

Мониторинг вистлеров в планетарном масштабе осуществляется станциями сети AWDANet, работа которой координируется в рамках международного проекта "Plasmon"[3]. Один из регистраторов этой сети работает в обсерваторском пункте Института космических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН «Карымшина».

Также мониторинг вистлеров в ИКИР ведется с помощью радиокомплекса собственной разработки, в котором реализована система автоматического распознавания вистлеров [4, 5]. Однако, данная система не позволяет вести детектирование вистлеров в реальном времени, что требует разработки новой системы распознавания.

В настоящей работе мы описываем один алгоритм распознавания образа вистлеров в спектрограмме. Исходными данными для задачи распознавания вистлеров в системе мониторинга ИКИР являются 15-минутные wav-файлы сигнала ОНЧ-излучения. Рассматриваемый алгоритм обрабатывает 4-секундный отрезок этого файла. Основная идея алгоритма основана на распознавании "выпрямленного" образа и была изложена ранее в работе [6].

Медианная фильтрация спектрограммы

Рассмотрим спектрограмму такого фрагмента как двумерный массив $\mathbf{A} = \{A_{ij}\}$, $i = 0, \dots, N-1$, $j = 0, \dots, M-1$, где $N = 513$ и $M = 172$. По вертикали индекс i нумерует отсчеты частоты f_i , а по горизонтали индекс j – отсчеты времени t_j . Пример такой спектрограммы, содержащей один вистлер, приведен на рис. 1 слева.

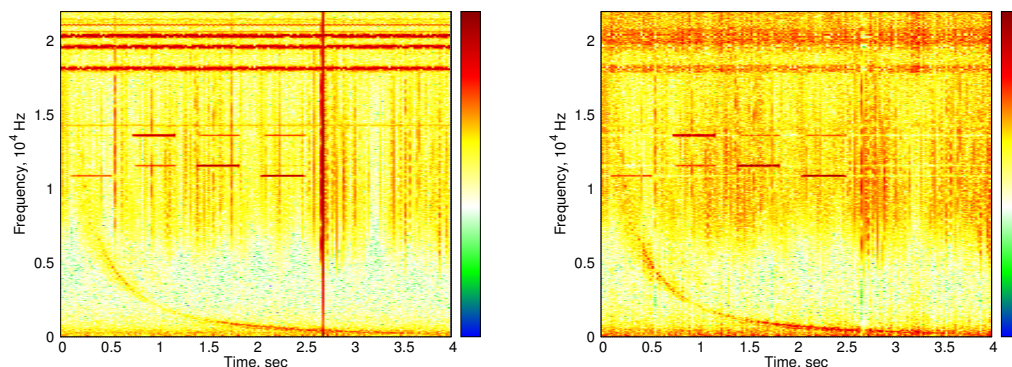


Рис. 1. Спектрограмма фрагмента ОНЧ-сигнала, содержащего вистлер: исходная (слева) и после медианной фильтрации (справа).

Задача распознавания вистлеров может рассматриваться как задача распознавания графического образа в двумерном изображении. Искомым образом является саблеобразная кривая, форма которой в плоскости (t, f) описывается соотношением $t - t_0 \sim f^{-1/2}$ [1].

Из рис. 1 хорошо видно, что в анализируемом сигнале кроме вистлера присутствуют δ -образные компоненты (импульсы грозовых разрядов, так называемые атмосферерики) и узкополосные составляющие. И те, и другие являются помехами для задачи распознавания и проявляются в спектрограмме в виде протяженных прямолинейных структур, вертикальных и горизонтальных, соответственно.

Возникает необходимость, прежде всего, подавить такие помехи, и отобрать статистически значимые отсчеты гистограммы.

Хорошо известно, что эффективным инструментом подавления протяженных импульсных помех в изображениях является медианная фильтрация [7].

Она относится к классу нелинейных фильтров и хорошо сохраняет резкость изображения, поскольку основана на порядковой статистике, которая устойчива к сильным выбросам в данных. В работе [8] был предложен модифицированный алгоритм медианной фильтрации, позволяющий подавлять протяженные вертикальные помехи в спутниковых снимках. Этот алгоритм был адаптирован нами для решения задачи подавления протяженных вертикальных и горизонтальных помех в спектрограммах.

Сначала составляются два одномерных массива \mathbf{X} и \mathbf{Y} , элементы которых являются средними значениями элементов исходного массива спектрограммы по строкам и столбцами соответственно, т.е.

$$X_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} A_{ik}, \quad Y_j = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{N-1} A_{kj}. \quad (1)$$

В результате каждая вертикальная помеха оказывается сконцентрированной в нескольких соседних отсчетах массива \mathbf{X} , а горизонтальная – в нескольких соседних отсчетах массива \mathbf{Y} . Фильтруемым помехам будут тогда соответствовать сильные выбросы в этих массивах.

Далее, каждый из этих массивов подвергается одномерной медианной фильтрации:

$$\begin{aligned} \hat{X}_i &= \text{median}\{X_{i+k} \mid k = -L_X, \dots, L_X\}, \quad i = L_X, \dots, N - L_X - 1, \\ \hat{X}_i &= \hat{X}_{L_X}, \quad i = 0, \dots, L_X - 1, \\ \hat{X}_i &= \hat{X}_{N-L_X-1}, \quad i = N - L_X, \dots, N - 1, \\ \hat{Y}_j &= \text{median}\{Y_{j+k} \mid k = -L_Y, \dots, L_Y\}, \quad j = L_Y, \dots, M - L_Y - 1, \\ \hat{Y}_j &= \hat{Y}_{L_Y}, \quad j = 0, \dots, L_Y - 1, \\ \hat{Y}_j &= \hat{Y}_{M-L_Y-1}, \quad j = M - L_Y, \dots, M - 1, \end{aligned} \quad (2)$$

где $2L_X + 1$ и $2L_Y + 1$ являются длинами масок фильтров. Затем вычисляются массивы шумов $\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}$ и $\Delta\mathbf{Y} = \mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}$.

Фильтрованную спектрограмму $\hat{\mathbf{A}}$ определим далее по правилу $\hat{A}_{ij} = A_{ij} - (\Delta X_i + \Delta Y_j)/2$. Она изображена на рис. 1 справа. Видно, что предложенный алгоритм медианной фильтрации действительно эффективно подавляет образы атмосфериков и

узкополосных шумов, а образ вистлера не размывается. Сохраняются и короткие ~ 0.5 сек. сигналы радиостанций.

Отбор значимых точек спектрограммы

На следующем этапе распознавания происходит отбор значимых отсчетов для каждого столбца фильтрованной спектрограммы. Мы рассматриваем квадраты элементов столбца как периодограмму Шустера соответствующего фрагмента ОНЧ-сигнала и выполняем проверку на уровне значимости α гипотезы о том, что этот фрагмент сигнала является белым шумом [9].

Для этого вычисляем по каждому j -му столбцу спектрограммы $\hat{\mathbf{A}}$ дисперсию σ_j^2 через ее спектральное представление

$$\sigma_j^2 = 2 \sum_{i=0}^{N-1} \hat{A}_{ij}^2. \quad (3)$$

Далее, если $\hat{A}_{ij}^2 < -\sigma_j^2 (\ln \alpha) / N$, то отсчет \hat{A}_{ij} считается шумовым (незначимым), в противном случае – значимым.

Из пар индексов (i, j) значимых элементов составляется динамический одномерный массив \mathbf{P} с элементами $P_m = (i_m, j_m)$, размерность которого равна количеству значимых элементов спектрограммы. Это делается для ускорения обработки, поскольку в дальнейшем в работе алгоритма распознавания используются не отсчеты спектрограммы, а массивы $\mathbf{P} = \{P_m\}$, $\mathbf{t} = \{t_j\}$ и $\mathbf{f} = \{f_i\}$. При этом элементу P_m соответствует точка $\hat{A}_{i_m j_m}$ на фильтрованной спектрограмме. Далее будем отождествлять P_m и $\hat{A}_{i_m j_m}$.

Переходом к этим массивам обеспечивается существенное снижение объема обрабатываемых далее данных. Анализ типичных спектрограмм показал, что размерность массива \mathbf{P} оказывается примерно на порядок меньше размерности исходной спектрограммы.

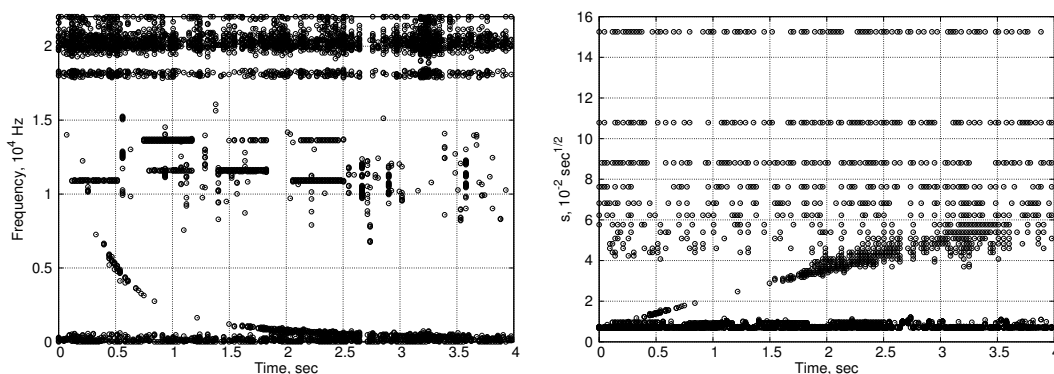


Рис. 2. Значимые точки спектрограммы в плоскости (t, f) (слева) и в плоскости (t, s) (справа).

На рис. 2 слева точками изображены элементы, отобранные для спектрограммы $\hat{\mathbf{A}}$. Видно, что образ вистлера хорошо просматривается после отбора.

Схема распознавания

Из теории распространения ОНЧ-волн в магнитосферной плазме известно [1], что форма вистлера, пришедшего в момент τ , хорошо описывается уравнением

$$t - \tau = D/\sqrt{f}, \quad (4)$$

где коэффициент $D > 0$ называют дисперсией. Из (4) видно, что если ввести преобразование $s = f^{-1/2}$, то в плоскости координат (t, s) образ вистлера выпрямляется, и уравнению (4) будет соответствовать в этой плоскости уравнение $t - Ds - \tau = 0$, т.е. уравнение наклонной прямой, образующей ненулевой острый угол с положительным направлением оси времени. Соответствующие элементам $P_m = (i_m, j_m)$ точки $Q_m = (t_{j_m}, s_{i_m})$ изображены на рис. 2 справа.

Поскольку распознавание прямой линии представляется алгоритмически более простой задачей, чем распознавание кривой, удобнее детектировать вистлера в плоскости (t, s) . Признаком наличия вистлера (вистлеров) тогда является группировка точек вблизи прямой (прямых) в этой плоскости. Причем речь идет только о наклонных прямых, поскольку остатки узкополосных шумов и сигналов радиостанций после медианной фильтрации и отбора значимых элементов продолжают проявляться в виде горизонтальных прямолинейных структур.

Из многих вариантов записи уравнений таких прямых, для наших целей лучше всего подходит

$$t \sin \varphi - s \cos \varphi - d = 0, \quad (5)$$

где φ – угол, образуемый прямой с осью времени, а d – обобщенное расстояние от прямой до начала координат, принимаемое положительным, если прямая пересекает ось s в положительной точке, и отрицательным в противном случае.

Обработка большого числа спектрограмм показала, что реальные значения $\varphi \in [1^0; 10^0]$. Ясно также, что $d \geq d_{\min} = -\max\{t_{j_m}\}$ и $d \leq d_{\max} = \max\{s_{i_m}\}$.

Пучёк прямых, проходящих через точку Q_m , задается уравнением

$$t_{j_m} \sin \varphi - s_{i_m} \cos \varphi = d, \quad (6)$$

определяющим линию в области $1^0 < \varphi < 10^0$, $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$ плоскости (φ, d) . Тогда прямой (образу вистлера), проходящей через несколько точек Q_m , будет соответствовать точка пересечения таких линий. Поэтому признаком близости точек к прямой в плоскости (t, s) будет существование точки в плоскости (φ, d) , через малую окрестность которой проходят линии. При этом, чем меньше окрестность, тем ближе к прямой лежат точки в (t, s) , и наоборот.

Введем равномерные сетки $\{\varphi_k\}$ и $\{d_l\}$ на возможных значениях углов и расстояний. Для каждой точки Q_m и каждого угла φ_k из уравнения (6) определяем расстояние d и округляем его до ближайшего d_l .

В результате получим двумерную гистограмму распределения пар (φ, d) для точек Q_m . Если для пары (φ_k, d_l) значение гистограммы велико, то много точек Q_m лежит вблизи соответствующей прямой. Таким образом, каждому значимому максимуму гистограммы можно поставить в соответствие вистлер.

Отбор значимых максимумов также можно проводить как и было описано выше на основе теоремы Шустера.

Заключение

В настоящей работе описан алгоритм распознавания образов свистящих атмосфериков в спектрограммах ОНЧ-излучения, состоящий из четырех этапов: медианной фильтрации; отбора значимых точек; преобразования координат с целью выпрямления образа вистлера; распознавание "выпрямленного" вистлера. Тестирование описанного алгоритма распознавания показало, что обработка 225 спектрограмм одного 15-минутного wav-файла требует менее 4 минут, что обеспечивает значительный резерв времени обработки. Для обнаружения значимых максимумов в гистограмме распределения пар в автоматическом режиме в настоящее время разрабатывается нейронная сеть.

Список литературы

- [1] Гершман Б. Н., Угаров В. А., "Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней атмосфере", *Успехи физических наук*, **72:2** (1960), 235–271; англ. пер.: Gershman B. N., Ugarov V. A., "Propagation and generation of low-frequency electromagnetic waves in the upper atmosphere", *Sov. Phys. Usp.*, **3** (1961), A07222.
- [2] Lichtenberger J., "A new whistler inversion method", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **114** (2009), A07222.
- [3] <http://plasmon.elte.hu/>.
- [4] Cherneva N. V., Sivokon' V. P., Agrinat I. V., "Spectral characteristics of whistlers", *Problems of Geocosmos, Proc. of the 9th Int. Conf. (St. Petersburg, 2012)*, St. Petersburg State Univ., St. Petersburg, 2012, 212–217.
- [5] Водинчар Г. М., Сивоконь В. П., Шевцов Б. М., Чернева Н. В., Малыш Е. А., "Возможное проявление активности мировых грозных центров в потоке вистлеров на Камчатке", *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, **9:2** (2014); англ. пер.: Vodinchar G. M., Sivokon' V. P., Shevtsov B. M., Cherneva N. V., Malyshev E. A., "Manifestation of the world's centers of lightning activity in the whistler in Kamchatka", *Bulletin KRASEC. Phys. and Math. Sci.*, **9:2** (2014), 39–47.
- [6] Малыш Е. А., "Алгоритм для автоматического распознавания свистящих атмосфериков в режиме реального времени", *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, **11:2** (2015), 82–87, [Malyshev E. A. "Algorithm dlya avtomaticheskogo raspoznaniya svistyashchikh atmosferikov v rezhime real'nogo vremeni", *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, **11:2**, (2015), 82–87 (in Russian)].
- [7] Gonzales R. C., Woods R. E., *Digital Image Processing*, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, 2002, рус. пер.: Гонсалес Р., Вудс Р., Цифровая обработка изображений, М., Техносфера, 2005.
- [8] Гектин Ю. М., Зайцев А. А., "Разработка и применение модифицированного алгоритма медианной фильтрации при бортовой коррекции изображений дистанционного зондирования", *Труды МФТИ*, **6:4** (2014), 103–106, [Gektin Yu. M., Zaytsev A. A., "Razrabotka i primenenie modifitsirovannogo algoritma mediannoy fil'tratsii pri bortovoy korrektsii izobrazheniy distantsionnogo zondirovaniya", *Trudy MFIT*, **6:4** (2014), 103–106 (in Russian)].
- [9] Marpl-jr S. L., *Digital Spectral Analysis: With Applications*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1987, рус. пер.: Марпл-мл С. Л., Цифровой спектральный анализ и его приложения, М., Мир, 1990.

Для цитирования: Малыш Е. А., Водинчар Г. М., Чернева Н. В. Распознавание свистящих атмосфериков в ОНЧ-спектрограммах // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2016. № 4(15). С. 43-48. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-15-4-43-48

For citation: Malyshev E. A., Vodinchar G. M., Cherneva N. V. Detection of the whistlers in the vlf-spectrograms, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2016, **15**: 4, 43-48. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-15-4-43-48