

Распознавание свистящих атмосфериков в ОНЧ-спектрограммах

МАЛЫШ Е. А.¹, ВОДИНЧАР Г. М.^{1,2}, ЧЕРНЕВА Н. В.²

¹ Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

² Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
с. Паратунка, Камчатский край, Россия
email: roswell-47@mail.ru gvodinchar@ikir.ru nina@ikir.ru

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 космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН «Карымшина».

Также мониторинг вистлеров в ИКИР ведется с помощью радиоконтекста собственной разработки, в котором реализована система автоматического распознавания вистлеров [4]. 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.

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.

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 отобразить статистически значимые отсчеты гистограммы.

Хорошо известно, что эффективным инструментом подавления протяженных импульсных помех в изображениях является медианная фильтрация [5]. 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 [6]

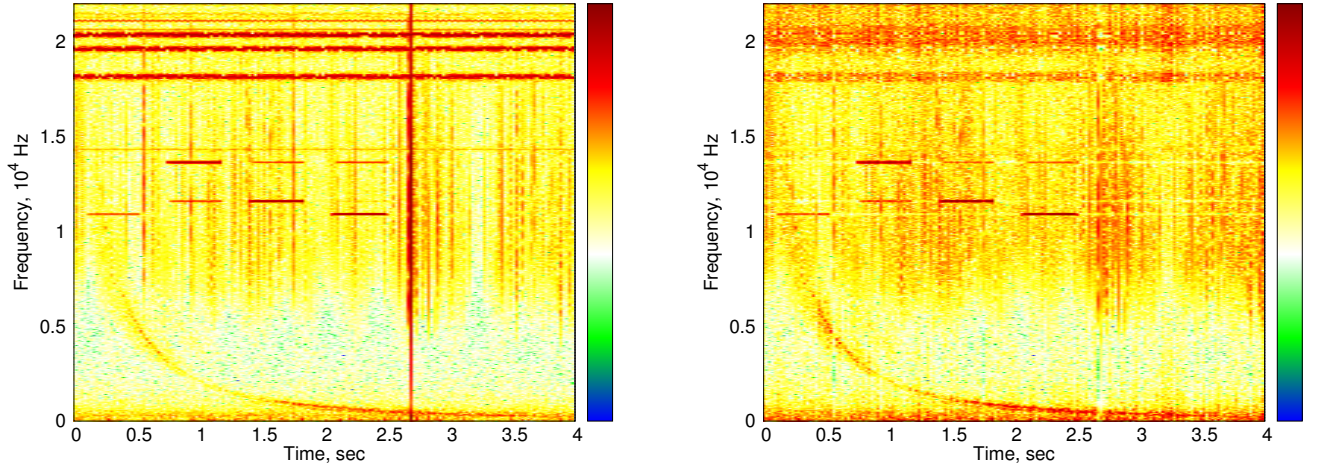


Рис. 1. Спектрограмма фрагмента ОНЧ-сигнала, содержащего вистлер: исходная (слева) и после медианной фильтрации (справа).

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

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:

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

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.

На следующем этапе распознавания происходит отбор значимых отсчетов для каждого столбца фильтрованной спектрограммы. Для этого мы рассматриваем квадраты элемен-

тов 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 [7]. Если отсчет периодограммы проходит проверку, он 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.

На рис. 2 слева точками изображены элементы, отобранные для спектрограммы $\hat{\mathbf{A}}$.

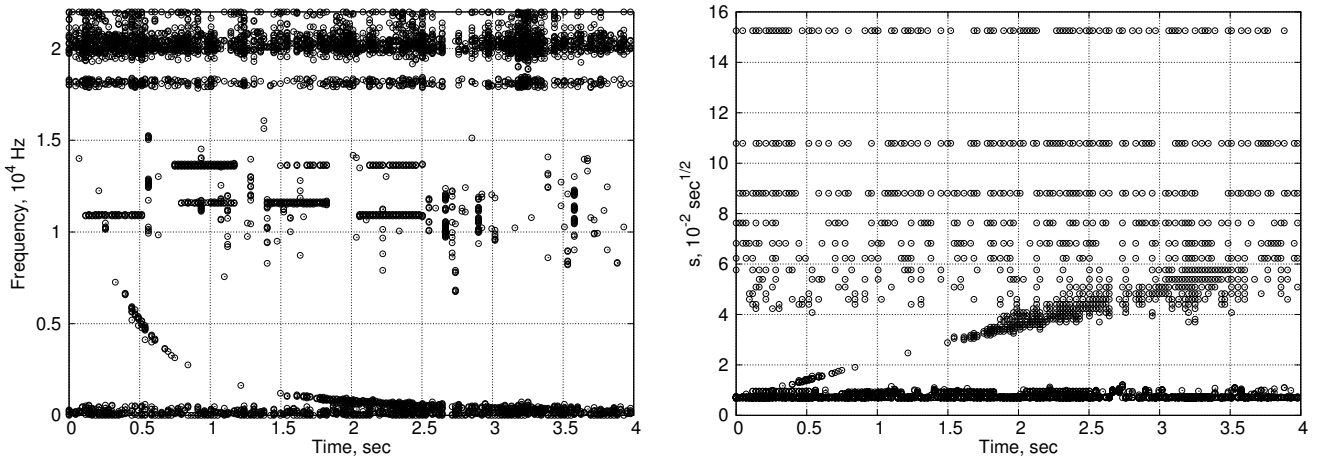


Рис. 2. Значимые точки спектрограммы в плоскости (t, f) (слева) и в плоскости (t, s) (справа).

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

$$t - \tau = D/\sqrt{f}, \quad (2)$$

где коэффициент $D > 0$ называют дисперсией. Из (2) видно, что если ввести преобразование $s = f^{-1/2}$, то в плоскости координат (t, s) образ вистлера выпрямляется, и уравнению (2) будет соответствовать в этой плоскости уравнение $t - Ds - \tau = 0$, т.е. наклонная прямая, образующая 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 вистлеры в плоскости (t, s) . Признаком наличия вистлера (вистлеров) тогда является группировка точек вблизи прямой (прямых) в этой плоскости.

Из многих вариантов записи уравнений таких прямых, для наших целей лучше всего подходит $t \sin \varphi - s \cos \varphi - d = 0$, 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 $d \leq d_{\max} = \max\{s_{i_m}\}$.

Пучек прямых, проходящих через точку Q_m , задается уравнением

$$t_{j_m} \sin \varphi - s_{i_m} \cos \varphi = d, \quad (3)$$

определяющим синусоиду 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 синусоид. Поэтому признаком близости точек к прямой в плоскости (t, s) будет существование точки в плоскости (φ, d) , через малую окрестность которой проходят синусоиды. 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 (3) 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.

Тестирование описанного алгоритма распознавания показало, что обработка 225 спектрограмм одного 15-минутного wav-файла требует менее 5 минут, что обеспечивает значительный резерв времени обработки. Для обнаружения значимых максимумов в гистограмме распределения пар в автоматическом режиме в настоящее время разрабатывается нейронная сеть.

References

- [1] Гершман Б.Н., Угаров В.А. Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней атмосфере // Успехи физических наук. – 1960. – Т. 72. – № 2. – С. 235-271.
- [2] Lichtenberger J. A new whistler inversion method // J. Geophys. Res. – 2009. – V. 114. – A07222.
- [3] <http://plasmon.elte.hu/>
- [4] Cherneva N.V., Sivokon' V.P., Agranat I.V. Spectral characteristics of whistlers // Problems of Geocosmos: Proc. of the 9th Int. Conf., St. Petersburg, October 8-12, 2012. SPb.: St. Petersburg State Univ., 2012. P. 212-217.
- [5] Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1104 с.
- [6] Гектин Ю. М., Зайцев А. А. Разработка и применение модифицированного алгоритма медианной фильтрации при бортовой коррекции изображений дистанционного зондирования // Труды МФТИ. – 2014. – Т. 6. – № 4. – С. 103-106.
- [7] Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: МИР, 1990. 584 с.