

УДК 004.93+519.688

АЛГОРИТМ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ СВИСТЯЩИХ АТМОСФЕРИКОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Е.А. Малыш

Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, 683032,
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4
E-mail: malysh_e_a@mail.ru

Описывается алгоритм автоматического распознавания свистящих атмосфериков, основанный на нелинейном преобразовании спектрограммы ОНЧ-сигнала. В преобразованной спектрограмме графическим образом вистлера является прямая, распознавание которой является алгоритмически несложной задачей. Тестирование программной реализации алгоритма показало, что распознавание может вестись в режиме реального времени.

Ключевые слова: свистящие атмосферика (вистлеры), грозовые разряды, распознавание образов, автоматическое детектирование вистлеров

© Малыш Е.А., 2015

MSC 68T10+86A25

THE ALGORITHM FOR THE AUTOMATIC DETECTION OF THE WHISTLERS IN THE REAL-TIME MODE

E.A. Malysh

Kamchatka State University by Vitus Bering, 683032, Petropavlovsk-Kamchatskiy,
Pogranichnaya st., 4, Russia
E-mail: malysh_e_a@mail.ru

This is the description of the whistlers automatic detection algorithm, based on the non-linear transformation of the spectrogram VLF signal. In the converted spectrogram the whistler graphic is presented by a straight line, detection of which is algorithmically simple task. The testing of the program implementation of the algorithm showed that a detection can be managed in the real-time mode.

Key words: whistlers, lightning discharge, pattern recognition, automatic detection of whistlers.

© Malysh E.A., 2015

Введение

Свистящие атмосферерики (вистлеры) – особые радиосигналы диапазона очень низких частот (ОНЧ), возникающие в результате распространения электромагнитного импульса грозового разряда в плазмосфере Земли вдоль силовой трубки магнитного поля.

Волна, образованная импульсным излучением, уходит в магнитосферу Земли и возвращается обратно в магнитно-сопряженную точку, где она и может быть зарегистрирована. Траектории движения таких волн показаны на рисунке 1.

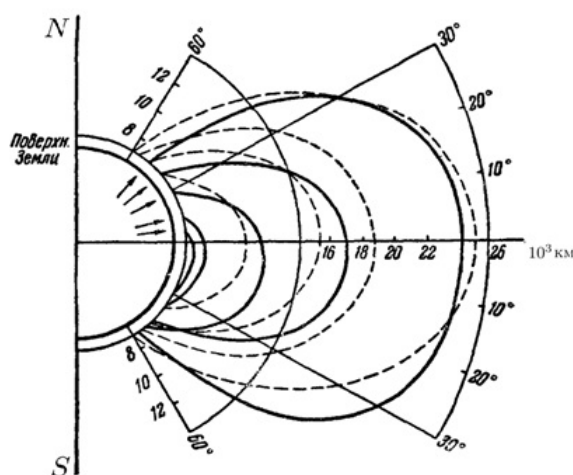


Рис. 1. Траектории движения свистящего атмосферерика (сплошные линии) и силовые трубки магнитного поля Земли (пунктирные линии).

Во время движения вистлер претерпевает частотную дисперсию: сначала приходят высокочастотные составляющие сигнала, затем, с нарастающим запаздыванием, более низкие частоты. Вид дисперсионных кривых при этом существенно зависит от состояния плазмосферы, в частности от электронной концентрации, что делает вистлер естественным индикатором состояния плазмосферы Земли. В связи с этим исследование вистлеров является актуальной задачей для изучения космической погоды [5].

Графические образы вистлеров в спектрограммах ОНЧ-сигналов

Свистящий атмосферерик ясно различим только на динамическом спектре сигнала. Непосредственным образом вистлера в динамическом спектре является кривая линия саблеобразной формы, распознавание которой затруднительно в связи с ее сложной геометрической формой (рис. 2). Акустическим образом такого сигнала является свист, от которого и пошло название «свистящий атмосферерик».

На Камчатке на станциях ИКИР ДВО РАН проводятся работы по регистрации вистлеров при помощи ОНЧ-пеленгатора, разработанного сотрудниками института. Сигнал, полученный с оборудования, проходит предобработку и сохраняется в виде wav файла, длительностью 15 минут.

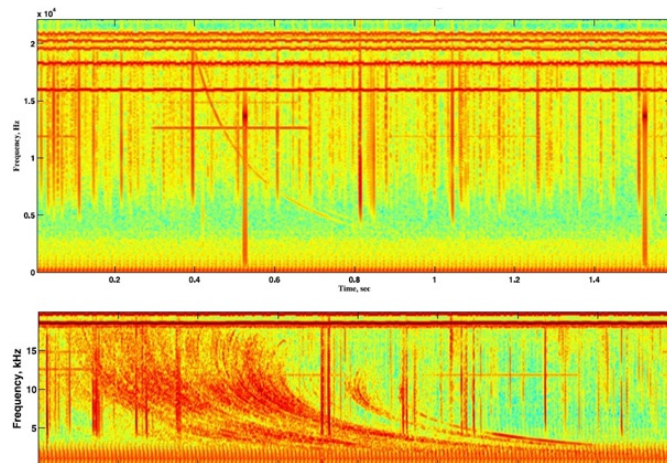


Рис. 2. Характерный вид вистлеров в спектрально временной диаграмме. Одиночный вистлер наверху, группа вистлеров внизу.

При этом для обработки потоков вистлеров в режиме реального времени необходима надежная автоматизированная система распознавания вистлера в спектрально временной диаграмме сигнала [2].

В настоящий момент в ИКИРе существует система распознавания, основанная на нейронных сетях и сопоставлении с сигналом эталоном [4]. Однако время распознавания в этой системе не позволяет вести работу в режиме реального времени. Поэтому потребовалась разработка нового алгоритма распознавания вистлера в сигнале ОНЧ диапазона.

Описание алгоритма

Идея алгоритма заключается в нелинейном преобразовании координатных осей, цель которого – выпрямление кривой вистлера в новых координатах. Формулы этого преобразования рассчитываются на основе теории распространения вистлеров в магнитосфере [1]. Распознавание "выпрямленного" вистлера является алгоритмически более простой задачей и оно более устойчиво в вычислительном отношении. После распознавания, параметры вистлера пересчитываются назад в исходные координаты.

В общем виде алгоритм состоит из следующих этапов (рис. 3):

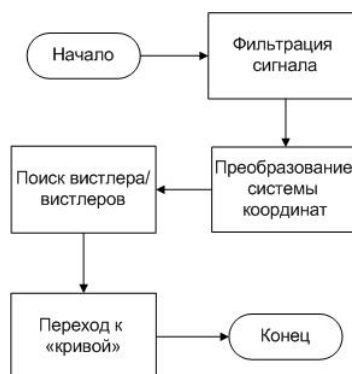


Рис. 3. Блок-схема алгоритма распознавания вистлера в сигнале ОНЧ диапазона.

1. «Фильтрация сигнала».

На вход алгоритма поступают 3 массива: массив частоты $F(f_j), j = 1, \dots, n$, массив времени $T(t_i), i = 1, \dots, k$, и массив амплитуды $A(t_i, f_j)$. Фильтрация состоит из 2 основных этапов:

Этап 1. Все точки массива амплитуд, частота которых ниже 1 кГц и выше 7 кГц обнуляются.

Этап 2. Пробегая по всем значениям массива амплитуд $A(t_i, f_j)$, выбираем максимум. Далее находим некоторый процент от этого максимума и оставляем только те точки, которые его превышают ($A(t_i, f_j) = 1$). Все остальные точки обнуляются. Таким образом, у нас появляется отфильтрованный массив, который содержит значения «0» и «1», где «0» это выброшенные точки, а «1» это точки, оставшиеся после фильтрации. Процент определяется эмпирически. Таким образом, из графика будут выброшены точки, соответствующие фоновому шуму (рис. 4).

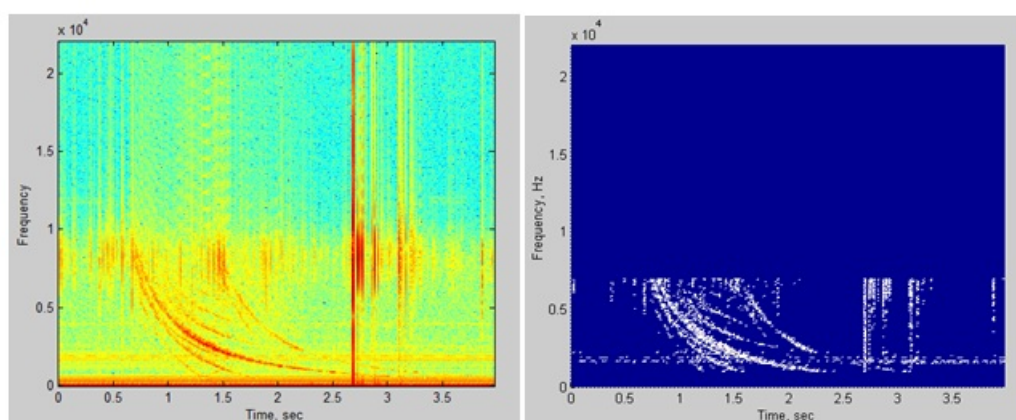


Рис. 4. Слева – исходный сигнал, справа – сигнал после фильтрации, белым цветом показаны оставшиеся точки.

2. «Преобразование системы координат».

Известна следующая зависимость принимаемой в данный момент частоты от времени [1]:

$$t - t_0 = \frac{D}{\sqrt{f}} \quad (1)$$

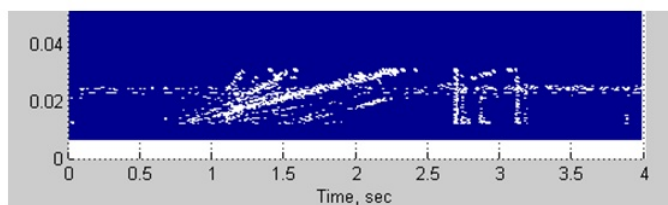


Рис. 5. Образ вистлера системе координат $(t, \frac{1}{\sqrt{f}})$.

Здесь t_0 - момент появления сигнала. Тогда в системе координат $(t, \frac{1}{\sqrt{f}})$ вистлерам должны соответствовать прямые линии, наличие которых и нужно далее распознать

(рис. 5). На этом этапе преобразуем массив $F(f_j)$ в новый массив $F_{new} = \frac{1}{\sqrt{f}}$. Далее создаем массив размерностью P для хранения координат отфильтрованных точек. Таким образом, остаются только отдельно стоящие точки, количество которых намного меньше, чем в исходном массиве.

3. «Поиск вистлера/вистлеров».

В новой системе координат будем перебирать все оставшиеся точки $(t_i, \frac{1}{\sqrt{f_i}})$, где $i = 1 \dots P$. Для каждой точки будем рассчитывать расстояние D от начала координат до прямой, проведенной через эту точку и лежащей под определенным углом $\varphi \in [0; 90]$ (рис. 6, а).

$$D = \sin \varphi t_i - \frac{\cos \varphi}{\sqrt{f_i}} \quad (2)$$

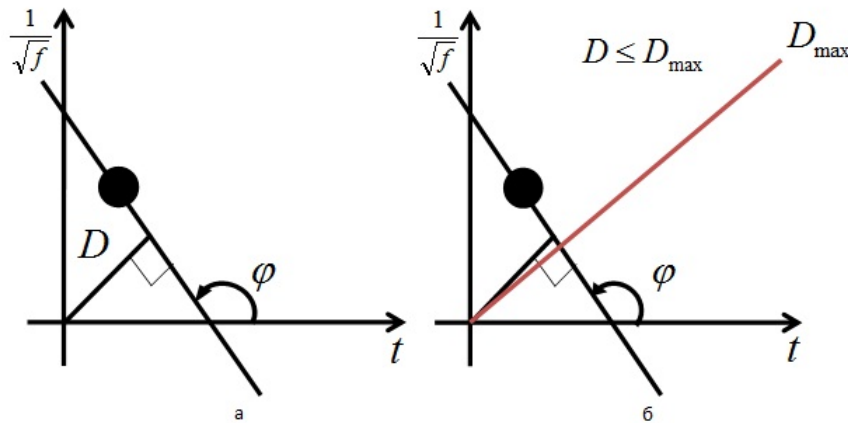


Рис. 6. Распознавание прямых, соответствующих вистлерам.

Далее находим расстояние до самой удаленной точки D_{max} и любое из найденных расстояний D не будет превышать расстояния до D_{max} (рис. 6, б).

$$D_{max} = \sqrt{T(t_k)^2 + F_{new}(\frac{1}{\sqrt{f_n}})^2} \quad (3)$$

Поделим отрезок $[0; D_{max}]$ на s равных сегментов и будем определять, в какой сегмент попало расстояние D . Создадим двумерный массив $N(\varphi, s)$, первое значение которого – это текущий угол φ , второе – текущий сегмент (т.е. сегмент, в который попало расстояние D). Для конкретных значений угла и сегмента будем увеличивать счетчик попаданий ($N(\varphi, s)++$). Таким образом, в массиве $N(\varphi, s)$ будет храниться информация о количестве точек, прямые к которым проведены под конкретным углом φ и расстояния до этих прямых попали в конкретный сегмент s . Расчет основан на том, что точки, лежащие на одной прямой, имеют одинаковый угол наклона и одинаковое расстояние от начала координат до этой прямой.

Далее анализируем полученный массив: если в массиве есть явно выраженный максимум – делаем вывод о существовании вистлера; если максимумов несколько – в сигнале присутствует несколько вистлеров; если максимума нет, то можно сделать вывод, что вистлер в сигнале отсутствует (рис. 7).

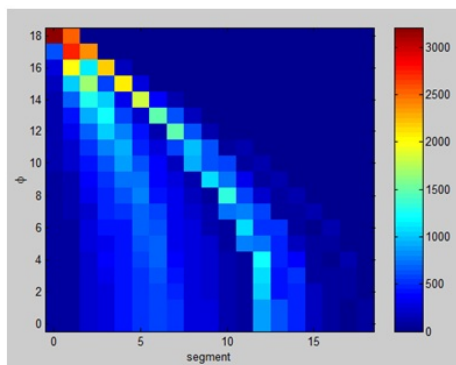


Рис. 7. Анализ полученного массива, присутствие максимума в точке (0,18).

Значение максимума является пороговым значением, которое определяется эмпирически.

4. «Переход к «кривой».

После сделанных выводов переходим в исходную систему координат.

Заключение

Такова, в общих чертах, идея алгоритма распознавания. Данный алгоритм реализован в виде программного комплекса. Сейчас ведутся работы по тестированию разработанной программы на реальных сигналах ОНЧ диапазона. Реализация данного алгоритма показала, что была достигнута поставленная задача: распознавание образов свистящих атмосфериков в режиме реального времени. Тестирование показало, что время обработки 15 минутного файла составляет 4.5 минуты. Далее предполагается оптимизация данного программного комплекса с целью уменьшения времени обработки сигналов.

Автор благодарит сотрудников ИКИР ДВО РАН к.ф.-м.н. Н.В. Черневу и Д.В. Санникова за любезно предоставленные данные ОНЧ-радиосигналов.

Библиографический список

1. Б.Н. Гершман, В.А. Угаров Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней атмосфере // Успехи физических наук, Т. LXXII, вып.2 1960. С. 235-270.
2. Чернева Н.В., Водинчар Г.М., Сивоконь В.П., Мельников А.Н., Санников Д.В., Агранат Е.В. Корреляционный анализ потоков свистящих атмосфериков и грозовых разрядов // Вестник КРАУНЦ. физико-математические науки. 2013. №2(7). С. 59-67.
3. Чернева Н. В., Агранат И.В., Сивоконь В.П., Водинчар Г.М., Lichtenberger J. Сопоставление свистящих атмосфериков с грозовой активностью //Солнечно-земные связи и физика предвестника землетрясений, сборник тезисов и докладов VI международной конференции. 2013. С. 217-221.
4. Агранат И.В. Автоматическое детектирование свистящих атмосфериков// Природная среда Камчатки: материалы XI региональной молодежной научной конференции 16 апреля 2012 г. С. 89-100.
5. J. Lichtenberger A new whistler inversion method // Journal of geophysical research, vol.114. 2009.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 09.11.2015