

Г. И. СИДОРОВ, канд. техн. наук, О. Е. СИДОРОВА, В. И. СИДЬКО

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СПЕКТРОВ ЭХО-СИГНАЛОВ  
ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ**

---

Решение ряда задач прикладного и научного характера связано с необходимостью изучения спектров компонент скорости ветра и турбулентных пульсаций в пограничном слое атмосферы. Известны такие задачи, как оценка энерго- и массообмена подстилающей поверхности и атмосферы, оценка динамических ветровых нагрузок на летательные аппараты, распространение примесей в атмосфере и некоторые другие. Знание спектров метеорологических полей при конвекции позволяет уточнить представление о структуре неустойчиво-стратифицированного пограничного слоя. Следует отметить необходимость исследования наименее изученной низкочастотной части спектра, захватывающей область максимума [1].

Для изучения пограничного слоя широко применяется радиоакустическое и акустическое зондирование атмосферы. Атмосфера как случайно-неоднородная среда влияет на искажения частотного спектра эхо-сигналов. Турбулентность, дрейфующая через луч, вызывает фазовую модуляцию проходящего акустического сигнала, которая преобразуется в эффективную частотную модуляцию, растягивающую спектр [2]. Именно искажения спектров эхо-сигналов служат источником информации о турбулентных процессах в нижних слоях атмосферы.

Как показано в работе [1], при неустойчивой стратификации в пограничном слое атмосферы имеют место мезомасштабные неоднородности с характерными временами порядка  $10^3$  с. Определить спектральные плотности турбулентных пульсаций в области низких частот сложно из-за ограниченности времени, в течение которого изучаемый процесс можно считать стационарным. Для получения статистически обеспеченных значений спектральной плотности процессов, обусловленных неоднородностями с временными масштабами порядка  $10^3$  с,

длительность измерений должна быть не менее 30 ч [1]. Непрерывная серия измерений, относящаяся к приближению стационарным конвективным условиям, не может иметь столь большую продолжительность. Поэтому необходимо формировать ансамбль, состоящий из отдельных коротких серий с близкими условиями стратификации. Признаком однородности при дистанционном зондировании атмосферы может служить идентичность спектров эхо-сигналов по спектральным плотностям и ширине спектров. Доплеровское смещение частоты, связанное с продольным ветром, не оказывает влияния на форму спектра и поэтому может быть исключено из рассмотрения.

Эффективный путь повышения качества исследований — автоматизация измерений, в частности автоматизация формирования статистически однородных ансамблей из отдельных серий измерений, представленных их спектрами. Эта задача связана с разбиением объектов множества  $m$  на  $p$  подмножеств (таксонов) в соответствии с некоторым критерием  $R$  [3]. Существует большое количество различных алгоритмов автоматической классификации, позволяющих решать указанную задачу («Спектр-Объединение», «Краб», «Форэль» и др.) [4]. При высоком качестве классификации они имеют общий недостаток — для реализации их на ЭВМ затрачивается большой объем памяти и машинного времени процессора.

В целях существенной экономии памяти, числа выполняемых операций и, следовательно, машинного времени нами предложен более простой алгоритм автоматической классификации, обеспечивающий достаточно высокие качественные показатели.

Алгоритм основан на вычислении расстояния  $R_{jl}$  между спектрами, рассматриваемыми как различные состояния объекта, по формуле  $R_{jl} = 1 - k_{jl}$ , где  $k_{jl}$  — коэффициент корреляции между совокупностями координат  $j$ -го и  $l$ -го спектров.

Если  $R_{jl}$  меньше задаваемого порога  $R$ , изучаемые спектры относятся к одному классу. Спектры эхо-сигналов, подлежащие классификации, задаются выборками одинаковой длины  $S_i^{(j)}$ , где  $j$  — номер выборки,  $j = 1, \dots, m$ ,  $i$  — номер элемента в выборке  $i = 1, \dots, n$ , соответствующей числу нормированных частот.

Процессу автоматической классификации на ЭВМ в соответствии с предложенным алгоритмом предшествует ряд вспомогательных операций, выполняемых для улучшения качества классификации.

1. На каждую выборку накладывается так называемое «прямоугольное фильтрующее окно» [5], т. е. для уменьшения влияния случайных помех на форму спектра производится сглаживание спектров, представленных выборками  $S_i^{(j)}$ , по формуле

$$S_{i\text{cp}}^{(j)} = \frac{S_{i-1}^{(j)} + S_i^{(j)} + S_{i+1}^{(j)}}{3}.$$

2. Предварительно вычисляются значения  $G_i^{(j)} = (S_{i\text{cp}}^{(j)})^2$  по всем исходным выборкам, поскольку на последнем этапе классификации используются средние энергетические спектры в пределах каждого класса.

3. Для устранения влияния на результаты классификации доплеровского сдвига частоты вычисляют центры тяжести преобразованных спектров по формуле

$$X_{\text{ит}}^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^n i \cdot G_i^{(j)}}{\sum_{i=1}^n G_i^{(j)}}$$

и смещают все спектры вдоль оси частот до совмещения их центров тяжести с  $X_{\text{ит макс}}$  в соответствии с выражениями

$$k_j = X_{\text{ит макс}} - X_{\text{ит}}^{(j)}; \quad G_{i+k_j}^{(j)} = G_i^{(j)}.$$

Преобразованные описанным способом выборки предварительно разбиваются на заданное число вспомогательных классов в соответствии с предложенным алгоритмом, начиная с первой выборки, т. е.  $G^{(1)}, G^{(2)}, \dots, G^{(l)}, \dots, G^{(m)}$ . В пределах каждого класса отыскивается типичная точка (выборка), имеющая минимальное расстояние от всех точек класса.

На втором (окончательном) этапе классификации выбираются типичные точки из разных классов и ранжируются в соответствии с количеством выборок, попавших в классы. Следовательно, на первое место помещается типичная выборка из наиболее многочисленного класса и в соответствии с алгоритмом формируется новый первый класс спектров. Затем по этому правилу формируются другие классы из выборок, не попавших в более высокий по рангу класс. В каждом из полученных классов усредняются значения  $G_i$ .

Программа для реализации алгоритма написана на языке Фортран. Расчеты проведены на ЭВМ ЕС-1050.

Для исследования процесса классификации взяли 250 выборок по 30 значений в каждой. При  $R = 0,1$  было получено 9 классов.

На печать выводятся следующие значения: номер класса (таксона), количество выборок в классе, номера выборок, вошедших в данный класс, энергетический спектр таксона (среднее по каждой ординате для всех точек класса), типичная точка таксона, центр тяжести таксона.

Нами проведены исследования устойчивости предложенного алгоритма классификации. При изменении очередности формирования классов путем перестановки порядка ранжирования типичных выборок повторяемость попадания точек в одни и те же классы, характеризующая коэффициентом устойчивости, составила 77 %.

Коэффициент устойчивости оценивали по формуле

$$k_{\text{уст}} = \left\langle \frac{\sum N_p}{m} \right\rangle,$$

где  $\langle \cdot \rangle$  означает операцию математического ожидания,  $m$  — количество предъявленных для классификации выборок,  $N_p$  — количество

выборки, попадающих в  $p$ -й класс независимо от изменения очередности формирования классов.

**Список литературы:** 1. *Иванов В. Н., Орданович А. Е., Петрова Л. И.* Некоторые особенности спектров скорости ветра и температуры воздуха в низкочастотном диапазоне при конвекции // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана.— 1973.— 9, № 8.— С. 787—799. 2. *Рыженко А. И., Сидько В. И., Тарасенко О. А.* Исследование влияния неоднородностей нижних слоев атмосферы на спектры акустических эхо-сигналов: Тез. докл. науч.-техн. конф. «Обработка сигналов в локационных системах исследования неоднородных сред».— Свердловск.— 1985.— С. 85—88. 3. *Загоруйко Н. Г.* Методы обнаружения закономерностей.— М. : Знание, 1981.— 64 с. 4. *Дорофеюк А. А.* Алгоритмы автоматической классификации (обзор) // Автоматика и телемеханика.— 1971.— № 12.— С. 75—86. 5. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов ; Пер. с англ.— М. : Мир, 1978.— 255 с.

*Поступила в редколлегию 16.05.86*