

**МОТТЛЬ В. В., МУЧНИК И. Б.,
ИВАНОВА Т. О., БЛИНОВ А. Б.**

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ
ЛОКАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛЕЙ ДАННЫХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКРЫТЫХ
МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ**

Рассматривается вероятностная постановка задачи автоматической классификации элементов одномерных и двумерных массивов упорядоченных данных по конечному множеству классов при наличии априорных представлений о предпочтительных комбинациях классов соседних элементов. Массив данных анализируется как реализация наблюдаемой компоненты двухкомпонентного случайного поля (случайного процесса в одномерном случае), скрытая конечнозначная компонента которого, обладающая определенными марковскими свойствами, определяет некоторое априорное распределение вероятностей на множестве всех возможных классификаций элементов массива. Процесс классификации, построенный как обобщение известного ЕМ-алгоритма разделения смеси распределений, сводится к оцениванию значений параметров локальной вероятностной модели наблюдаемого поля для каждой гипотезы о классе соответствующей точки (локальном значении скрытого поля), быть может, вместе с оцениванием априорных вероятностных свойств скрытого поля, с последующим вычислением апостериорных вероятностей классов в каждой точке массива данных. Совокупность найденных апостериорных вероятностей рассматривается как размытая классификация элементов анализируемого массива. Рассматриваются пути и результаты практического применения алгоритма для сегментации вертикальных сейсмических разрезов земной толщи (упорядоченных массивов синхронно зарегистрированных сейсмограмм) на совокупность следов отдельных пластов породы. Сейсмический разрез анализируется как текстурное изображение с различным характером текстуры в разных областях раstra.

§ 1. Введение

Традиционной и весьма распространенной формой представления экспериментальных результатов в технических и естественно-научных исследованиях являются большие массивы данных, упорядоченных вдоль осей одного или нескольких аргументов. В случае одного аргумента говорят об экспериментальных кривых, примерами которых могут служить, например, сейсмограммы, осциллограммы шумов и вибраций машин, сигналы речи, электроэнцефалограммы, электрокардиограммы и т. п. При двух аргументах массив представляет собой двумерное поле данных. Типичными примерами двумерных массивов являются изображения, в частности, аэро- и космические фотоснимки земной поверхно-

сти, фотографии срезов тех или иных материалов. На рис. 1 приведен пример так называемого текстурного изображения, на котором отдельные объекты различимы как области со специфическим характером колебаний яркости.

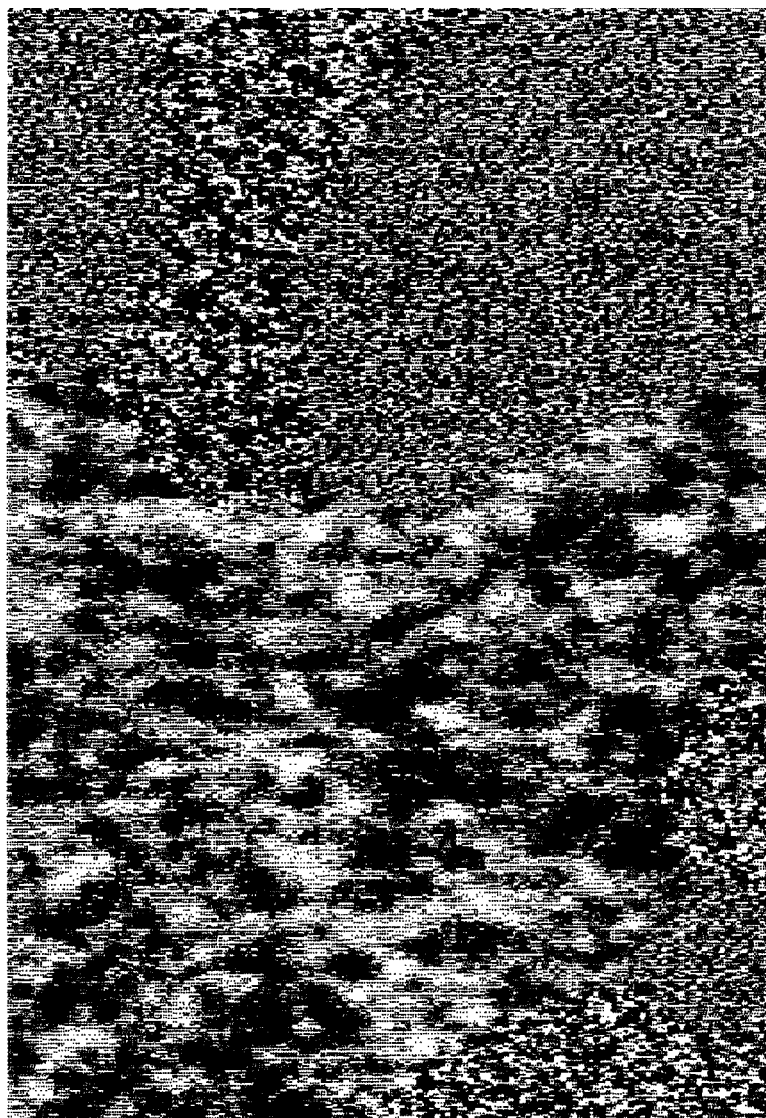


Рис. 1. Полутонное текстурное изображение

Как двумерные массивы данных естественно рассматривать также одномерные сигналы, состоящие из множества упорядоченных компонент, регистрируемых синхронно и анализируемых как единое целое. Именно этот вид экспериментальных данных находится в центре внимания в данной работе, поэтому рассмотрим более подробно один из типичных источников данных такого вида.

В ходе сейсмической разведки запасов нефти и газа анализируют так называемые сейсмические разрезы, представляющие собой синхронные записи отраженных сейсмических сигналов, зарегистрированные посредством совокупности большого числа сейсмоприемников, расположенных вдоль некоторой линии на поверхности земли (рис. 2). В качестве источника исходного сейсмического импульса обычно используется взрыв, произведенный на поверхности. Совокупность записей сейсмических волн подвергается весьма глубокой предварительной обработке, которая заключается во введении ряда поправок, учитывающих неодинаковость скорости распространения сейсмических волн на разных глубинах, демпфирующее действие среды как фильтра низких частот, дифракцию и интерференцию сейсмических волн [1], [2]. Целью предварительной обработки совокупности записей (сейсмических трасс) является получение как можно более детальной волновой картины (сейсмического временного разреза), отображающей геологическое строение среды. Хотя исходным аргументом сейсмических трасс является время, предварительная обработка позволяет отождествлять его с глубиной относительно земной поверхности в точке расположения сейсмического датчика. Дальнейший анализ полученного разреза направлен на построение геологической модели, представляющей собой сумму конечной совокупности слоев различной мощности, физических свойств и структурных соотношений.

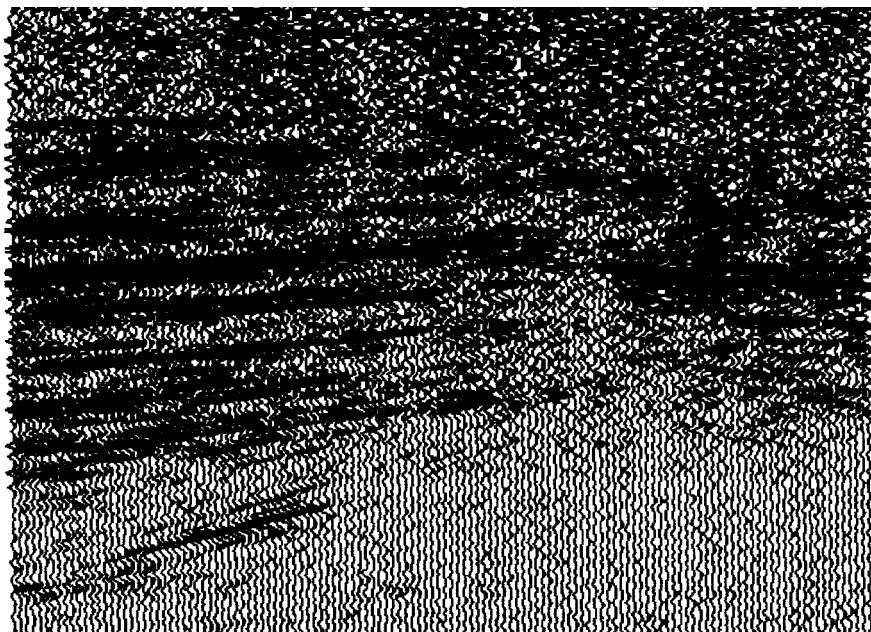


Рис. 2. Фрагмент сейсмического разреза

Массив эмпирических данных практически всегда избыточен, поэтому существенным моментом его обработки, как правило, является

сжатие (агрегирование) содержащейся в нем информации и представление ее в обозримом виде. В частности, задача анализа изображения, представленного на [рис. 1](#), может состоять в его разбиении (сегментации) на совокупность однородных областей с неизменным характером колебания яркости в пределах каждой из них или, как принято говорить в специальной литературе, с неизменной текстурой.

Нетрудно увидеть аналогию сейсмического разреза с упорядоченной по горизонтали $s = 1, \dots, S$ совокупностью вертикально ориентированных сейсмических сигналов x_{st} , $0 \leq t \leq T_{\max}$, с плоским изображением ([рис. 2](#)). Эта аналогия становится еще более очевидной, если условно интерпретировать каждое значение сигнала как яркость (либо наоборот, зачерненность) соответствующей точки плоскости. С некоторыми оговорками, вертикально ориентированную ось времени t можно интерпретировать как ось глубины залегания локальных особенностей подземной толщи, от которых отражается сейсмический сигнал. Различие «текстурных» свойств отдельных областей сейсмического разреза, рассматриваемого как плоское изображение, объясняется различием механических характеристик и, как следствие, отражающих свойств пластов породы, залегающих на тех или иных глубинах в соответствующих вертикальных сечениях. Поэтому сегментацию сейсмического разреза на совокупность областей, однородных в текстурном отношении, можно рассматривать как операцию, помогающую геофизику решить главную задачу сейсморазведки — задачу расчленения толщи пород на совокупность однородных пластов, быть может, с привлечением дополнительной априорной информации об исследуемом регионе. Именно задача сегментации сейсмического разреза послужила отправной точкой исследования, результаты которого излагаются в данной работе.

Проблеме сегментации изображений, в том числе текстурных, посвящена огромная литература, в частности, [3]–[6]. Один из наиболее распространенных подходов к проблеме сегментации основан на идее автоматической классификации точек по признаку близости тех или иных локальных свойств изображения в окрестности каждой из них. Основная проблема, связанная с таким подходом и не имеющая до сих пор исчерпывающего решения, заключается в том обстоятельстве, что, в отличие от классической постановки задачи классификации, объекты классификации априори упорядочены, в данном случае в виде прямоугольного массива. Согласно основной содержательной концепции соседние точки массива данных должны преимущественно относиться к одному и тому же классу. В данной работе задача сегментации текстурного изображения, в частности, сейсмического разреза, рассматривается именно как задача автоматической классификации точек его раstra по признаку близости локальных текстурных свойств при известном либо неизвестном числе классов. Построение рабочих алгоритмов структурного анализа упорядоченных массивов данных базируется на использовании комплексной

вероятностной модели процесса порождения анализируемого поля как внешнего проявления совокупности скрытых конечнозначных случайных процессов, определяющих искомую классификацию элементов массива и обладающих определенными марковскими свойствами. В силу последнего обстоятельства модели такого вида получили название скрытых марковских моделей [7], [8]. Предположение о марковском характере скрытых процессов является тем ключевым фактором, который позволяет строить алгоритмы структурного анализа массивов упорядоченных данных как корректные и в то же время вполне реализуемые вычислительные процедуры принятия статистических решений — фильтрации и интерполяции случайных процессов, оценивания параметров распределений, проверки статистических гипотез. Математический аппарат скрытых марковских моделей применялся ранее, в основном, для целей обработки и распознавания речевых сигналов, имеющих принципиально одномерный характер. Подробный обзор этих работ вместе с изложением основ теории скрытых марковских моделей представлен в статье Рабинера [7], а затем в монографии [8]. Попытка обобщения идеологии скрытых марковских моделей на случай двумерных полей данных приводит к существенным вычислительным трудностям и, в сущности, к потере большей части ее исходных преимуществ [9], [15]. Численная реализация «строгих» алгоритмов сегментации требует привлечения параллельных вычислительных средств.

В данной работе вместо обычной полной марковской модели скрытого конечнозначного поля, определяющего искомую классификацию элементов двумерного массива данных, использована компромиссная модель, описывающая лишь априорные представления о марковских свойствах горизонтальных и вертикальных одномерных сечений скрытого поля классификации. Частичные модели такого вида позволяют в максимальной степени использовать для сегментации двумерного массива данных готовые быстродействующие алгоритмы, разработанные ранее для выделения квазистационарных фрагментов одномерных сигналов [11].

В связи с фундаментальной ролью, которую играют в данной работе алгоритмы анализа одномерных данных, работа начинается с краткого описания математической модели случайного процесса с многократно изменяющимися вероятностными свойствами, управляемыми скрытой марковской цепью, и алгоритма сегментации реализации такого процесса на однородные фрагменты, основанного на одной из возможных формальных постановок задачи классификации как задачи разделения смеси распределений с зависимыми гипотезами и зависимыми наблюдениями.