

Г. К. Ч и с т о в а, В. И. В о л ч и х и н

## **МЕТОДЫ И ПРОЦЕДУРЫ ПОСТРОЕНИЯ ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ НАРУШИТЕЛЯ**

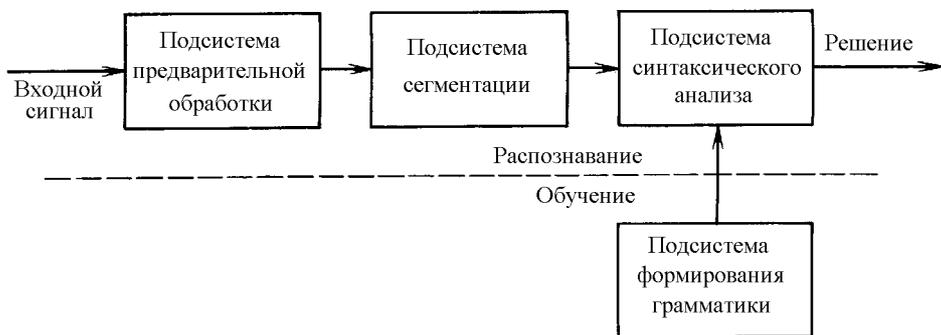
*Рассмотрены методы и процедуры построения лингвистической системы обнаружения и распознавания нарушителя по сейсмическому сигналу, приведены практические результаты.*

При разработке математических принципов распознавания объектов по сейсмическому сигналу используют дискриминантный подход. Он основан на описании объектов множеством признаков и разбиении пространства признаков на соответствующие области [1, 2]. Признаки выбирают для характеристики внутренней структуры сигналов: вероятностно-статистической, энергетической, спектральной и др. В рамках дискриминантного подхода возможно описание формы сигнала. Например, в работе [3] авторами предложена группа признаков для характеристики изрезанности огибающей, скорости возрастания максимальной амплитуды импульса воздействия человека на грунт, ритмического рисунка.

Рассмотрим возможность использования структурно-лингвистического подхода в задаче распознавания сейсмических образов объектов. Данная задача актуальна при проектировании технических систем и комплексов охраны [4].

Известно [5, 6], что структурный анализ позволяет не только описать форму сигналов, но и установить взаимосвязь между отдельными характерными элементами и, таким образом, получить дополнительную информацию об объектах. Данный подход основан на представлении экспериментальных кривых в виде иерархической структуры небольшого числа простых подобразов (непроизводных элементов) с использованием аппарата математической лингвистики.

Система лингвистического анализа включает следующие подсистемы [7] (рис. 1): предварительной обработки, сегментации, формирования грамматики, синтаксического анализа. Схема, представленная на рис. 1, определяет содержание структурного подхода и последовательность реализации лингвистического анализа, причем все процедуры анализа должны осуществляться в автоматическом режиме (исходя из требований к системам распознавания). Отметим, что функции некоторых подсистем незначительно различаются при обучении и распознавании.



**Рис. 1. Структурная схема системы лингвистического анализа**

Предварительную обработку осуществляют с целью исключения шумов и восстановления формы огибающей сигнала. Процедура предварительной обработки включает следующие операции: фильтрацию, удаление постоянной составляющей, выпрямление, масштабирование, кодирование, сжатие данных.

Сегментация заключается в представлении сигналов в виде набора производных элементов — исходных структурных единиц. Сегментация представляет собой процедуру сжатия данных, после ее выполнения последовательность мгновенных значений огибающей сигнала преобразуется в последовательность производных элементов.

Возможны два подхода к сегментации. При первом подходе предполагается, что экспериментальные данные содержат отдельные информативные участки (сегменты), а точки стыка сегментов интерпретируются как моменты смены состояний процесса. Задачей сегментации является задача выделения точек, соответствующих этим моментам. Результатом сегментации является последовательность участков, примыкающих друг к другу и характеризующихся единством формы внутри каждого участка. Полученная последовательность полностью описывает реализацию экспериментальной кривой.

При втором подходе выдвигается гипотеза о том, что состояние процесса практически не изменяется за исключением лишь некоторых моментов времени. В этом случае при сегментации должны выделяться только участки возмущений.

Формирование грамматики при обучении системы предполагает выбор алфавита для описания производных элементов, объединение отдельных структурных единиц в комплексы (слова), формирование эталонного описания класса (словаря слов или набора предложений), разработку правил и критериев грамматического разбора и распознавания. Совокупность алфавита, словаря и правил грамматического разбора образует язык системы.

В процессе распознавания подсистема формирования грамматики производит описание контрольной реализации экспериментальной кривой на разработанном языке.

Подсистема синтаксического анализа выполняет две функции: вначале по определенным правилам сравнивает контрольное описание с эталонным образом каждого класса, а затем на основании полученной информации классифицирует сигнал.

С помощью системы лингвистического анализа можно решать как задачу обнаружения, так и задачу распознавания (классификации). В любом случае необходимо предусмотреть эталонное описание шума. Тогда при отсутствии полезного сигнала система должна выдать отказ от распознавания. Задача обнаружения решается автоматически, для этого достаточно установить сходство контрольного описания с одним из классов.

Исходя из назначения системы лингвистического анализа, предлагается для оценки ее эффективности применять показатели, используемые в задачах обнаружения и распознавания (классификации): вероятность правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги и вероятность правильной классификации.

Область применения структурно-лингвистического анализа достаточно широкая. Форма представления исходных данных, характерные особенности сигналов во многом определяют выбор методов предварительной обработки и процедур лингвистического анализа. Поэтому проектирование системы рассмотрим на примере конкретной задачи — задачи распознавания нарушителя по сейсмическому сигналу. Под нарушителем обычно понимается один человек или группа людей (три человека и более). Следовательно, имеется два класса сигналов: “Один человек”, “Группа людей”, и класс “Фон”. Отметим, что на всех этапах обработки при лингвистическом подходе используется метод кратковременного анализа [8].

**Предварительная обработка.** Целью предварительной обработки является получение огибающей сейсмического сигнала. Априорные данные о классах содержатся в записях сейсмических сигналов — реализациях достаточной продолжительности, полученных в условиях, приближенных к условиям функционирования системы. Они характеризуются наличием высокочастотной компоненты и постоянной составляющей, обусловленной смещением рабочей точки магнитографа. Обе компоненты являются неинформативными и подлежат исключению из сигнала.

Процедуре выделения огибающей предшествует выпрямление и кодирование сигнала. В результате получают последовательность  $u = (u_1, \dots, u_n)$  мгновенных значений.

Для выделения огибающей осуществляют фильтрацию в инфранизкочастотном диапазоне (до 10 Гц). Цифровой аналог данной операции можно представить в виде выражения [9]

$$u_i = \frac{u_{i-1} + 2u_i + u_{i+1}}{4}. \quad (1)$$

При применении линейного сглаживающего фильтра вида (1) появляются значительные искажения в точках излома формы огибающей, поэтому он используется, как правило, в сочетании с нелинейным фильтром, например, реализующим метод медианного сглаживания [9].

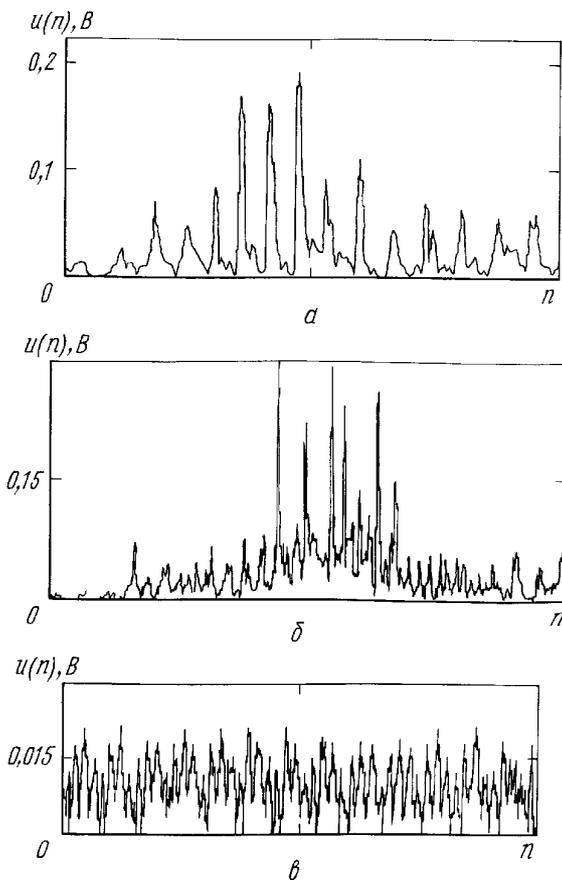
Динамика процесса в сейсмических системах изменяется достаточно быстро: нарушитель может двигаться со скоростью от 0,5 до 4 м/с (согласно техническим условиям). Удару стопы соответствует импульс колоколообразной формы на огибающей сигнала, причем амплитуда импульса уменьшается при увеличении расстояния источник–приемник. Решение задачи распознавания не должно зависеть от уровня сигнала. Поэтому на этапе предварительной обработки производят масштабирование. Результатом первого этапа обработки является огибающая сигнала — экспериментальная кривая.

**Сегментация огибающей.** Выбор способа и методов сегментации определяется формой экспериментальной кривой.

Проанализируем характерные особенности огибающих сигнала. Движению (шагам или бегу) одного человека соответствует достаточно регулярное чередование импульсов различной амплитуды и пауз (рис. 2, а). Группа людей при той же скорости генерирует сигнал более сложной формы (рис. 2, б): паузы практически отсутствуют, происходит наложение отдельных импульсов при совпадении ударов. Форма огибающей сейсмического шума (микросейсма) соответствует процессу, близкому к стационарному (рис. 2, в).

Поскольку информация о нарушителе содержится в количестве импульсов и длине горизонтальных участков (на интервале оценки), то целесообразно проводить полное структурное описание, т.е. выделить на огибающей точки смены состояний процесса и представить экспериментальную кривую последовательностью участков, характеризующихся единством формы.

При описании пауз и импульсов выберем следующие производные элементы: горизонтальный участок, передний фронт, вершину и задний фронт импульса. Горизонтальный участок характеризуется постоянством амплитуды в пределах некоторого сегмента, а вершина, передний и задний фронты импульса — кривизной и наклоном огибающей. Для нахождения точек смены состояния процесса и последующей



**Рис. 2. Огибающие сигналов:**

*a* — движения человека (скорость 3 м/с), *б* — движения группы людей (скорость 3 м/с), *в* — микросейсма (шума)

сегментации вычисляют первую и вторую производные, используя цифровой фильтр вида [9]

$$v_i = \frac{2u_{i+2} - 2u_{i-2} + u_{i+1} - u_{i-1}}{10}. \quad (2)$$

Результатом использования фильтра вида (2) является список отсчетов (точек), каждый из которых характеризуется величиной и знаком амплитуды, наклона и кривизны огибающей. Количественные значения амплитуды, наклона и кривизны огибающей приведены к одной шкале со следующими уровнями: очень малый (VSM), малый (SM), умеренный (MODER), большой (GR) и очень большой (VGR) — 0, 4, 16, 64 и 256 единиц соответственно.

Сегментацию экспериментальной кривой начинают с нахождения горизонтальных участков: начала и конца сегмента длиной не более пяти отсчетов с небольшим (VSM) локальным наклоном в каждой точке.

Затем определяют положение вершины импульса по двум правилам: 1) находят последовательность отсчетов с отрицательным знаком локальной кривизны и значением не менее, чем MODER; 2) внутри полученного отрезка выбирают точку максимума кривизны.

Поиск сегментов “передний фронт” и “задний фронт” осуществляют от вершины импульса до точек излома. Сегмент “передний фронт” формируют из отсчетов, имеющих положительный наклон и величину, не превышающую уровень SM. Точка излома на переднем фронте должна удовлетворять двум условиям: 1) длина переднего фронта должна быть не меньше двух отсчетов; 2) локальная кривизна в точке излома должна быть положительной и по величине быть не меньше локального наклона.

Задний фронт импульса удовлетворяет следующим условиям: 1) знак наклона кривой отрицательный; 2) величина наклона менее, чем SM; 3) длина заднего фронта составляет не менее трех отсчетов. Точка излома на заднем фронте характеризуется положительным знаком кривизны и локальным наклоном, величина которого должна быть не меньше кривизны.

**Формирование грамматики.** Для конечного набора непроецируемых элементов выберем алфавит: горизонтальный участок, вершину, передний и задний фронты импульса обозначим символами  $h, t, f, b$  соответственно. Фрагмент экспериментальной кривой и символьное обозначение его элементов показаны на рис. 3.

Формирование грамматики — сложный и трудоемкий процесс. В результате применения алгоритма сегментации огибающая сигнала представляется в виде упорядоченной последовательности символов конечного алфавита (цепочки символов). Для реализации сигнала достаточной продолжительности имеется совокупность цепочек, кото-

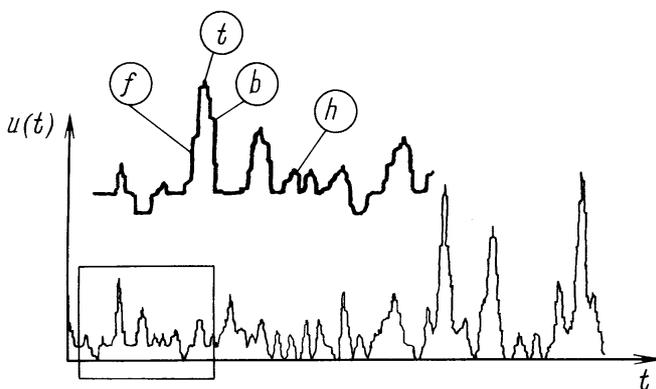


Рис. 3. Фрагмент огибающей сигнала нарушителя

рую можно рассматривать как некоторый текст на неизвестном языке, приспособленном для описания обрабатываемых кривых, а каждую цепочку — как некоторую фразу (или несколько фраз) на этом языке.

В общем виде задача формирования грамматики формулируется следующим образом.

Задано некоторое количество текстов в виде множества упорядоченных последовательностей символов. Требуется, во-первых, сформировать алфавит более крупных лингвистических единиц, чем отдельные символы, т.е. словарь слов (структурных комплексов), каждое из которых является устойчивой цепочкой символов, и, во-вторых, представить каждый из заданных текстов в виде одного или нескольких слов этого словаря.

Предположим, что имеется один достаточно длинный текст  $T = \langle c_1 \dots c_N \rangle$ , где  $c_1 \dots c_N$  — упорядоченная последовательность его символов. Всякое разбиение  $D$  текста  $T$  на непересекающиеся отрезки задает некоторый словарь  $M$ . Формирование словаря можно понимать как выделение набора “основных макрособытий” в развитии исследуемого процесса. Эти макрособытия отражены в символическом представлении кривых в виде стабильных цепочек символов.

Пусть сформирован словарь  $M$ . Обозначим через  $L$  множество всех конечных цепочек символов из алфавита  $A$ . Рассмотрим подмножество  $\hat{L}(M) \subset L$  всех таких цепочек, каждая из которых представляет собой последовательность слов из словаря  $M$ . Подмножество цепочек  $\hat{L}(M)$  является языком, полностью определяемым словарем  $M$ . Цепочка  $T$  принадлежит языку  $\hat{L}(M)$  (является его правильной цепочкой) тогда и только тогда, когда существует такое ее разбиение  $D$ , что образ каждого отрезка из  $D$  есть в точности слово из  $M$ . При этом всякое слово также является правильной цепочкой языка  $\hat{L}(M)$ .

Язык, в котором любая последовательность слов из словаря  $M$  является правильной цепочкой, назовем языком с морфологической грамматикой. Для того чтобы морфологическую грамматику можно было использовать для анализа текстов (экспериментальных кривых), необходимо иметь процедуру преобразования символьного текста в упорядоченный набор слов, т.е. процедуру распознавания правильности этого текста в языке  $\hat{L}(M)$ .

Поскольку сейсмический сигнал носит случайный характер и смена состояний процесса не имеет логической закономерности, то нельзя дать точного описания экспериментальным кривым. Морфологическую грамматику следует рассматривать лишь как модель, более или менее точно аппроксимирующую тексты, порождаемые экспериментальной кривой. Чтобы ее использовать, необходимо дополнить меха-

низм порождения правильных текстов некоторым искажающим механизмом, позволяющим породить цепочки, “не сильно” отличающиеся от правильных.

Для этого зададим некоторую меру сходства двух произвольных цепочек символов алфавита  $A$ . Мера сходства должна отражать степень искажения при переходе от одной из цепочек к другой. Роль искажающего механизма выполняет трансформационная грамматика [10], содержащая некоторое множество элементарных трансформаций (единичных искажений). Тогда в качестве меры сходства между двумя цепочками естественно принять минимальное число элементарных трансформаций, необходимых для перехода от одной цепочки к другой.

Назовем язык  $\hat{L}(M)$  ядром нечеткого языка  $\mathfrak{J}$ , определяемого парой  $\langle \hat{L}(M), Q \rangle$ , где  $Q$  — некоторая трансформационная грамматика. Пусть  $Q$  определяет меру отличия  $r(\hat{T}, T)$  произвольной цепочки  $T \in L$  от ядерной цепочки  $\hat{T} \in \hat{L}(M)$ . Под степенью несоответствия данной цепочки  $T$  нечеткому языку  $\mathfrak{J}$  будем понимать величину

$$\rho(T, \mathfrak{J}) = \min_{\hat{T} \in \hat{L}(M)} r(\hat{T}, T).$$

Рассмотрим метод ее вычисления. Пусть имеется пара цепочек символов  $\langle T_1, T_2 \rangle$ . Поставим ей в соответствие сеть  $G(T_1, T_2)$ , которая строится следующим образом. Составим прямоугольную решетку, столбцы которой соответствуют символам первой цепочки  $T_1$ , а строки — символам второй цепочки  $T_2$ . Каждая клетка этой решетки — квадрат со стороной единичной длины. Клеткам сопоставлены упорядоченные пары индексов:  $(i, j)$ -й клетке соответствует  $i$ -й символ в  $T_1$  и  $j$ -й символ в  $T_2$ . Выделим клетки, для каждой из которых символ, соответствующий ее строке, совпадает с символом, соответствующим ее столбцу. В каждой такой клетке проведем диагональ, связывающую ее левый верхний узел с правым нижним. Все вертикальные стороны и диагонали, связывающие соседние узлы, ориентируем стрелкой вниз, а горизонтальные стороны — стрелкой слева направо.

Множество  $X$  всех узлов такой решетки есть множество узлов графа искомой сети  $G(T_1, T_2)$ , число их равно

$$q = (l_1 + 1)(l_2 + 1), \quad (3)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  — число символов в  $T_1$  и  $T_2$  соответственно, а множество  $Y$  всех сторон и диагоналей есть множество дуг этого графа. Истоком  $x_1$  сети служит самый левый верхний узел, а стоком  $x_2$  — самый правый нижний узел.

На рис. 4 представлена сеть  $G(T_1, T_2)$  трансформации цепочки  $T_1 \langle hthh \rangle$  в цепочку  $T_2 = \langle hhth \rangle$ . Каждый путь  $S$ , ведущий из истока

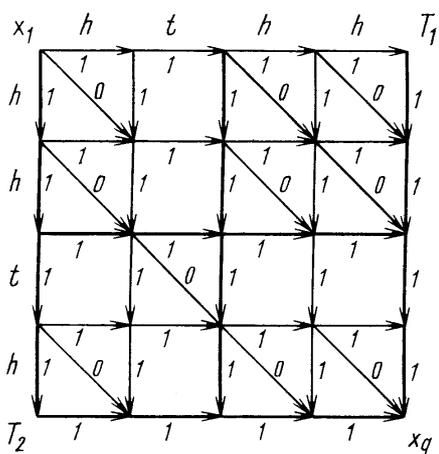


Рис. 4. Сеть, соответствующая паре цепочек  $T_1 = \langle hthh \rangle$  и  $T_2 = \langle htht \rangle$

месте. Движение по горизонтали означает, что символ, стоящий в  $T_1$  на  $i$ -м месте, остается в выстраиваемой цепочке без изменения.

Зададим на множестве дуг сети  $G(T_1, T_2)$  систему весов: каждой вертикальной и горизонтальной дуге припишем вес 1, а каждой диагональной дуге припишем вес 0. Длину пути  $l(S)$  определим как сумму весов всех дуг, лежащих на этом пути. В качестве меры сходства цепочек  $T_1$  и  $T_2$  примем минимальную из длин всех путей, принадлежащих множеству  $W(T_1, T_2)$ :

$$r(T_1, T_2) = \min l(S), \quad S \in W(T_1, T_2). \quad (4)$$

Для нахождения кратчайшего пути из вершины  $x_1$  в вершину  $x_q$  можно использовать любой известный алгоритм [11].

При составлении словаря исходной информацией является набор цепочек символов, полученных в результате сегментации множества экспериментальных кривых. Для выделения наиболее часто повторяющихся структурных комплексов необходимо осуществить последовательные трансформации одной цепочки в другую. Для этого строят разбор  $R$ , который представляет собой прямоугольную таблицу из  $n$  строк (цепочек символов) и  $k$  столбцов. Каждая клетка столбца либо пуста, либо содержит один символ, причем символы в клетках одного столбца — это повторения одного символа. Текущая строка является последней в разборе. Трансформации осуществляют согласно критерию (4). При этом возможны некоторые вариации. Например, для массива из трех цепочек  $\{\langle fbt \rangle, \langle ftb \rangle, \langle hftb \rangle\}$  могут быть записаны два разбора (рис. 5).

Цепочка  $T(R)$ , образованная символами столбцов, называется объединяющей. Оценкой вероятности появления символа в столбце разбора является частота  $p_i(R)$ , которая вычисляется следующим образом:

в сток сети  $G(T_1, T_2)$ , порождает цепочку элементарных трансформаций, переводящую  $T_1$  в  $T_2$ . При этом движение по левой вертикальной стороне клетки  $(i, j)$  означает, что между последним символом уже трансформированной части цепочки  $T_1$  и первым символом еще не трансформированной ее части (символом, стоящим в  $T_1$  на  $i$ -м месте) вставляется символ, стоящий в  $T_2$  на  $j$ -м месте. Движение по верхней горизонтальной стороне этой клетки означает, что в  $T_1$  требуется удалить символ, стоящий на  $i$ -м месте.

	<i>f</i>	<i>b</i>	<i>t</i>	
	<i>f</i>		<i>t</i>	<i>b</i>
<i>h</i>	<i>f</i>		<i>t</i>	<i>b</i>

			<i>f</i>	<i>b</i>	<i>t</i>
	<i>f</i>	<i>t</i>		<i>b</i>	
<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>		<i>b</i>	

Рис. 5. Разбор для цепочек  $T_1 = \langle hthh \rangle$  и  $T_2 = \langle hthh \rangle$

$p_i(R) = n_i(R)/n$ . Символы цепочки  $T(R)$  с частотой  $p_i(R) \geq 0,5$  образуют собственную (ядерную) цепочку  $\tilde{T}(R)$  разбора  $R$ . Совокупность собственных цепочек представляет собой эталонное описание класса. Объединяющие и собственные цепочки для примеров разбора, приведенных на рис. 5, имеют вид

$$T(R_1) = \langle hfbtb \rangle, \quad T(R_2) = \langle hftfbt \rangle,$$

$$\tilde{T}(R_1) = \langle ftb \rangle, \quad \tilde{T}(R_2) = \langle ftb \rangle.$$

Качество разбора оценивается по величине неплотности разбора:

$$J(R) = \sum_{i=1}^k \min\{p_i(R); 1 - p_i(R)\}. \quad (5)$$

При формировании эталонного описания классов необходимо учитывать многообразие условий генерации сейсмических сигналов, обусловленных различием скорости движения, гео- и метеоусловий, физиологическими особенностями. Например, при изменении скорости движения человека от 0,5 до 4 м/с амплитуда сигнала возрастает на один-два порядка, изменяется отношение сигнал/шум, а следовательно, и структурное описание огибающей: горизонтальные участки становятся более выраженными, крутизна импульсов увеличивается и т.д. В классе "Группа людей" многообразие форм обусловлено также различием в характере движения нескольких человек: в ногу или произвольно. Поэтому каждый класс должен быть представлен несколькими эталонными цепочками.

Формирование грамматики с учетом рассмотренного математического аппарата и особенностей сейсмических сигналов нарушителя можно представить следующей последовательностью действий: 1) каждая достаточно протяженная запись сигнала нарушителя разбивается на реализации конечной длины, и они описываются на языке символов; 2) из полученных цепочек строится разбор и находится объединяющая цепочка; 3) для множества записей сигналов одного типа

(по скорости и трассе движения, составу группы и т.д.) из объединяющих цепочек строится собственная цепочка; 4) формируется эталонное описание класса из собственных цепочек.

**Синтаксический анализ.** Каждый класс представлен конечным числом эталонных цепочек. Классификация заключается в определении наибольшего сходства между контрольным и эталонным описаниями класса. За критерии сходства принято минимальное расстояние между двумя цепочками символов, которое вычисляется по выражению (4). В задачу синтаксического анализа входит вычисление расстояния между контрольной и каждой из эталонных цепочек и определение номера цепочки, расстояние до которой минимально.

Оценку пригодности лингвистической модели для решения задачи классификации проводят путем статистического эксперимента на достаточном объеме данных. С этой целью формируется обучающее и тестовое (контрольное) множество записей сейсмических сигналов. По обучающему множеству формируется эталонное описание классов, по тестовому оценивается эффективность системы. За показатели эффективности в задаче классификации принята вероятность правильной классификации при допустимой ошибке первого рода [1].

Основные действия при формировании грамматики и синтаксическом анализе можно представить в виде следующих процедур.

*Процедура построения разбора.* Построение разбора из  $N$  исходных цепочек символов  $\langle T_1, \dots, T_N \rangle$  равноценно приписыванию к уже существующей объединяющей цепочке новой цепочки символов путем нахождения по выражению (4) кратчайшего расстояния в графе (см. рис. 4) из вершины  $x_1$  в вершину  $x_q$ . Первоначально за объединяющую цепочку принимается первая строка символов из исходной таблицы. Она имеет частоты, равные единице. В графе объединяющая цепочка располагается по горизонтали, а текущая — по вертикали. Горизонтальным и вертикальным дугам сети приписываются единичные, а диагональным — нулевые веса.

Для присоединения новой строки к уже существующему разбору строят сеть  $G'(T(R_n), T_{n+1})$ , отличающуюся от  $G(T(R_n), T_{n+1})$  только системой весов на дугах того же графа, где  $n$  — номер строки на предыдущем шаге, а  $n + 1$  — на текущем шаге. При этом всем вертикальным, горизонтальным и диагональным дугам приписывают веса, вычисленные по выражениям

$$\frac{1}{n+1}, \quad \min\left(\frac{np_i^n}{n+1}, \frac{n+1-np_i^n}{n+1}\right), \quad \min\left(\frac{np_i^n+1}{n+1}, \frac{n-np_i^n}{n+1}\right)$$

соответственно.

Длина пути из левого верхнего в правый нижний узел новой сети равна приращению неплотности разбора (см. выражение (5)) для соответствующего способа приписывания строки. Частоты символов объединяющей цепочки  $T(R_{n+1})$  нового разбора вычисляют следующим образом:

— для элементов, соответствующих столбцам предыдущего разбора  $R_n$ , полагаем

$$p_i^{n+1} = \frac{np_i^n + 1}{n + 1},$$

если в этом столбце есть символ цепочки  $T_{n+1}$  (диагональная дуга графа), и

$$p_i^{n+1} = \frac{np_i^n}{n + 1},$$

если в столбце нет символа из  $T_{n+1}$  (горизонтальная дуга графа);

— для элементов, соответствующих вновь образованным столбцам (вертикальная дуга графа), полагаем

$$p_i^{n+1} = \frac{1}{n + 1}.$$

В процедуре построения разбора порядок предъявления цепочек символов случайный.

*Процедура объединения.* Эталонная цепочка формируется из объединяющих следующим образом.

Пусть в результате выполнения первой процедуры получено: два разбора  $R^1$  и  $R^2$ , состоящие из  $n^1$  и  $n^2$  строк; объединяющие цепочки  $T(R^1)$  и  $T(R^2)$  с соответствующими частотами  $P^1$  и  $P^2$ . Для получения наилучшего объединения этих разборов  $R^{12}$  и объединяющей цепочки  $T(R^{12})$  необходимо изменить правило расчета весов сети  $G'(T(R^1), T(R^2))$ .

Новые веса на диагональной дуге в клетке  $(i, j)$ , горизонтальной дуге в  $i$ -м столбце и вертикальной дуге в  $j$ -й строке вычисляют по выражениям

$$\begin{aligned} & \min \left( \frac{n^1 p_i^1 + n^2 p_j^2}{n^1 + n^2}, \frac{n^1 + n^2 - n^1 p_i^1 - n^2 p_j^2}{n^1 + n^2} \right), \\ & \min \left( \frac{n^1 p_i^1}{n^1 + n^2}, \frac{n^1 + n^2 - n^1 p_i^1}{n^1 + n^2} \right), \\ & \min \left( \frac{n^2 p_j^2}{n^1 + n^2}, \frac{n^1 + n^2 - n^2 p_j^2}{n^1 + n^2} \right) \end{aligned}$$

соответственно.

Частоты символов объединяющей цепочки  $T(R^{12})$  нового разбора вычисляют:

— для элементов, соответствующих  $i$ -му и  $j$ -му столбцам разборов  $R^1$  и  $R^2$ :

$$p = \frac{n^1 p_i^1 + n^2 p_j^2}{n^1 + n^2};$$

— для  $i$ -го столбца разбора  $R^1$ , которому не соответствует никакой столбец разбора  $R^2$ ;

— для  $j$ -го столбца разбора  $R^2$ , которому не соответствует никакой столбец разбора  $R^1$ :

$$p = \frac{n^2 p_j^2}{n^1 + n^2}.$$

В эталонное описание включаются собственные цепочки  $\tilde{T}$ .

*Процедура синтаксического анализа.* Процедура синтаксического анализа заключается в вычислении расстояния между контрольной цепочкой символов  $T^*$  и каждой эталонной цепочкой  $\tilde{T}_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , в классе и нахождении по минимуму расстояния индекса класса  $k$ .

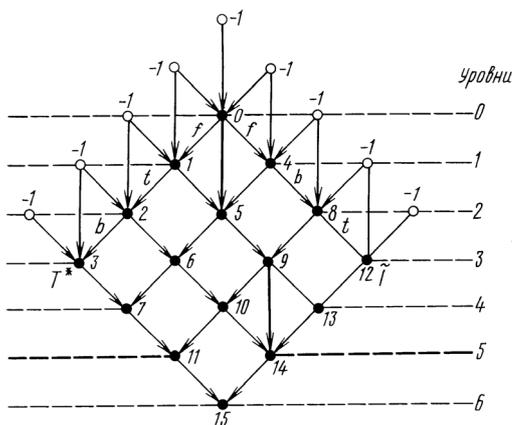
Для этого строится граф  $G(\tilde{T}_i, T^*)$ . Эталонная цепочка помещается по горизонтали, а контрольная — по вертикали, количество узлов вычисляется по формуле (3). Горизонтальным и вертикальным дугам приписываются единичные веса, диагональным — нулевые. Путь из истока в конечную вершину находится следующим образом [12]:

- граф поворачивается на  $45^\circ$  вправо (рис. 6);
- узлы графа нумеруются от 0 до  $q - 1$  слева направо и сверху вниз;
- граф дополняется мнимыми узлами с номером  $-1$  и дугами, имеющими максимальный вес, например, равный 99,9;

- узлы графа распределяются по уровням, число которых определяется как  $L = l_1 + l_2 + 1$ , где  $l_1$  и  $l_2$  — количество символов цепочек  $T^*$  и  $\tilde{T}_i$ ;

- составляется список предыдущих узлов и весов предыдущих дуг;

- кратчайший путь находится за два прохода. В прямом направлении просматриваются узлы всех уровней от 0 до  $L - 1$ , и для каждого текущего узла находится преды-



**Рис. 6.** Граф для цепочек  $T_i = \langle fbt \rangle$  и  $T^* = \langle ftb \rangle$

душий, длина пути из которого в текущий минимальна (с учетом пути из начального узла). Данный узел включается в список узлов пути минимальной длины. При обратном проходе составляется список узлов кратчайшего пути, начиная с номера  $N - 1$  и заканчивая нулевым узлом. Определяется сумма всех весов по выражению (4).

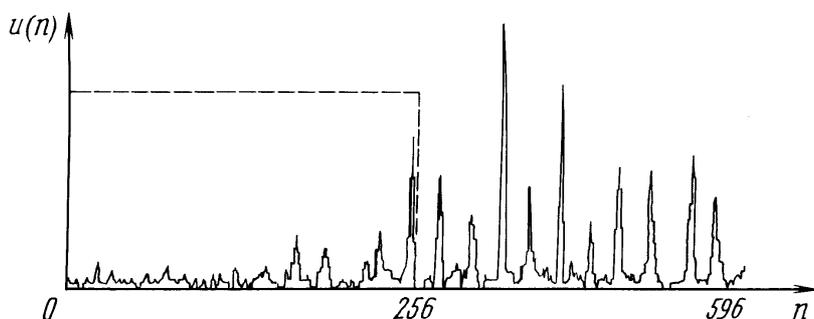
Необходимо отметить, что все процедуры выполняются в автоматическом режиме, а синтаксический анализ проводится в масштабе реального времени. Последнее обстоятельство важно, так как зона чувствительности сейсмоприемника ограничена (до 20 м), а события в реальных условиях развиваются достаточно быстро.

**Пример реализации.** Этапы предварительной обработки, сегментации, построения разбора, нахождения объединяющей и собственной цепочек, а также эталонного описания показаны на примере записи сигнала, которая зарегистрирована при беге одного человека со скоростью примерно 3,5 м/с. Длина фрагмента обработки равна 256 отсчетов.

В табл. 1 приведены результаты сегментации первых 25 отсчетов фрагмента огибающей сигнала, изображенного на рис. 7. Символами  $A_s, S_s, C_s$  обозначены соответственно огибающая сигнала, первая (крутизна) и вторая (кривизна) производные, а через  $A_v, S_v, C_v$  — их значения по шкале уровней: VSM, SM, MODER, GR, VGR. В столбцах 9–11 табл. 1 даны количественные значения амплитуды: огибающей сигнала, первой и второй производных, в столбце 8 дано структурное описание непрямых элементов экспериментальной кривой.

Результаты обработки пяти реализаций одной записи представлены в табл. 2.

Из представленных в табл. 2 цепочек построен разбор (табл. 3) и найдены объединяющая и собственная цепочки (порядок их представления случайный). Собственная цепочка  $\langle ftbftbhftb \rangle$  включает три структурных комплекса:  $\langle ftb \rangle$ ,  $\langle ftbh \rangle$  и  $\langle ftb \rangle$ .



**Рис. 7.** Огибающая сейсмического сигнала нарушителя после предварительной обработки

## Результаты сегментации экспериментальной кривой

Но- мер от- счета	$A_s$	$A_v$	$S_s$	$S_v$	$C_s$	$C_v$	Струк- турное опи- сание	Ампли- туда сигнала	Производная	
									Пер- вая	Вто- рая
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	+	MODER	+	VSM	+	VSM		56	0	0
1	+	MODER	+	VSM	+	VSM		24	0	0
2	+	MODER	-	MODER	-	SM		24	-20	-8
3	+	MODER	-	SM	-	VSM		24	-10	-3
4	+	MODER	-	SM	+	SM		16	-12	8
5	+	SM	-	SM	+	SM		8	-10	9
6	+	SM	-	SM	+	SM		8	-4	14
7	+	SM	+	SM	+	SM	$f$	8	4	12
8	+	SM	+	SM	+	VSM		8	10	3
9	+	MODER	+	SM	-	SM		16	8	-10
10	+	MODER	+	VSM	-	MODER	$t$	24	0	-16
11	+	MODER	-	SM	-	SM		16	-12	-7
12	+	SM	-	SM	+	SM		8	-12	7
13	+	VSM	+	VSM	+	MODER		0	0	16
14	+	SM	+	SM	+	SM		8	8	10
15	+	MODER	+	SM	-	VSM		16	10	-1
16	+	MODER	+	SM	-	SM		16	4	-8
17	+	MODER	+	VSM	-	SM		16	0	-8
18	+	MODER	-	SM	+	VSM		16	-4	1
19	+	MODER	-	VSM	+	SM		16	-2	14
20	+	SM	+	SM	+	MODER	$f$	8	8	24
21	+	MODER	+	MODER	+	MODER		16	22	16
22	+	MODER	+	MODER	-	SM		32	32	-6
23	+	MODER	+	MODER	-	MODER		48	18	-26
24	+	MODER	-	VSM	-	MODER	$t$	56	-2	-33

**Цепочки символов после сегментации  
экспериментальной кривой**

№	Текст
1	<i>tbfttftbftbhftft</i>
2	<i>ftbhftbhftftb</i>
3	<i>hftbftbhftb</i>
4	<i>tbhftbftbhfhftb</i>
5	<i>tbfttbftb</i>
6	<i>tbftthftb</i>
7	<i>ftbhtftbhftbhh</i>

Таблица 3

**Результаты построения разбора**

Разбор																																		
									<i>t</i>	<i>b</i>		<i>f</i>	<i>t</i>	<i>h</i>			<i>h</i>					<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>										
									<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>			<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>			<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>									
									<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>			<i>b</i>	<i>h</i>					<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>h</i>							
<i>t</i>	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>t</i>					<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>			<i>b</i>	<i>h</i>					<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>						<i>f</i>	<i>t</i>		
										<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>			<i>b</i>	<i>h</i>					<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>								
Объединяющая цепочка																																		
<i>t</i>	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>t</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>						
Собственная цепочка																																		
									<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>		<i>f</i>	<i>t</i>			<i>b</i>	<i>h</i>						<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>								

В результате обработки двух записей сигнала бега человека получено два разбора и две объединяющие цепочки (табл. 4). С использованием процедуры объединения из них получены новый разбор, объединяющая и собственная цепочки (табл. 5). Собственная цепочка не изменилась и также содержит три структурных комплекса. Данная цепочка включена в эталонное описание класса “Один человек”.

В эталонное описание классов “Один человек” и “Группа людей” включены четыре эталонных цепочки (табл. 6), класс “Фон” представлен одной цепочкой. Результаты получены после обработки обучающего множества записей сигналов человека и группы людей при двух скоростях движения: 0,5 м/с (ходьба) и 3,5 м/с (бег).

Сформирована контрольная цепочка  $T^* = \langle hftbftbft \rangle$  для класса “Один человек” (скорость 3,5 м/с) и найдено расстояние от нее до каждого эталона (табл. 6). Минимальное расстояние получено с третьей цепочкой класса “Один человек”.

**Объединяющие цепочки класса “Один человек”**

Исходные тексты	
<i>tbftthhftb</i>	<i>htftth</i>
<i>ftbhftbhftftb</i>	<i>ttftbftbftb</i>
<i>ftbhftbhftbh</i>	<i>hftthftbftbftb</i>
<i>tbfttftbftbhftft</i>	<i>hhhhftbhhftbhft</i>
<i>tbfttbftb</i>	<i>ftbhftbhftbh</i>
<i>hftbftbhftb</i>	<i>hhftbhftbhftb</i>
<i>tbbftbbftbhftb</i>	<i>hftthftbhftb</i>
Объединяющие цепочки	
<i>tbftttbhftbhftthtbfthhftbhft</i>	<i>hhhhthtftbhftbhftbhftbhftb</i>

Таблица 5

**Результаты объединения двух объединяющих цепочек**

Первая объединяющая цепочка																													
<i>t</i>	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>t</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>							<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>			<i>f</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>b</i>					
Продолжение							<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>h</i>			<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>		<i>b</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>								
Вторая объединяющая цепочка																													
							<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>		<i>h</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>			<i>b</i>	<i>h</i>	<i>h</i>		
Продолжение							<i>h</i>				<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>h</i>			<i>h</i>						
Общая объединяющая цепочка																													
<i>t</i>	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>t</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>h</i>		
Продолжение							<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>h</i>					
Собственная цепочка <i>f t b f t b h f t b</i>																													

Таблица 6

**Эталонное описание классов**

Скорость	Классы					
	“Один человек”		“Группа людей”		“Фон”	
	Эталоны	Расстояние	Эталоны	Расстояние	Эталоны	Расстояние
0,5 м/с	<i>ftft</i>	5	<i>ftbftftbt</i>	6	<i>ttbtbtb</i>	10
	<i>ftftftb</i>	4	<i>ftftftftb</i>	6		
3,5 м/с	<i>hftthftbf</i>	2	<i>ftbftbftft</i>	5		
	<i>ftbftbhftb</i>	5	<i>ftbftftbft</i>	7		

Оценка вероятности правильной классификации произведена на контрольном множестве, включающем 200 цепочек каждого класса. Результаты статистического эксперимента приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Результаты оценки эффективности модели**

Наименование класса	Результат распознавания			Оценка вероятности распознавания по классу
	“Один человек”	“Группа людей”	“Фон”	
“Один человек”	124	71	5	0,62
“Группа людей”	69	120	11	0,6

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Сейсмический сигнал человека содержит повторяющиеся структурные элементы и комплексы.

2. Оценка вероятности правильной классификации на тестовом множестве дала примерно одинаковые результаты по классам “Один человек” и “Группа людей”: 0,62 и 0,6 соответственно.

3. Лингвистическая модель сейсмического сигнала человека может быть использована для решения задачи распознавания сигналов классов “Один человек” и “Группа людей”. Ввиду недостаточно высоких результатов распознавания структурный подход может использоваться дополнительно для уточнения результатов, например, дискриминантного анализа данных.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Д у д а Р., Х а р т П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976. – 512 с.
2. Ф о р А. Восприятие и распознавание образов. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
3. В о л ч и х и н В. И., Ч и с т о в а Г. К. Теория и техника построения сейсмических информационных систем. – Пенза: Изд-во Пензенского гос. ун-та, 1998. – 136 с.
4. Ш е в ч е н к о В. П., К у р о ч к и н Ю. Н., И в а н о в В. Э. Периметровые вибрационные средства обнаружения // Современные технологии безопасности. – 2002. – № 1. – С. 7–11.
5. Ф у К. Структурные методы в распознавании образов / Под ред. М.А. Айзермана. – М.: Мир, 1977. – 320 с.
6. Р у с ы н Б. П. Структурно-лингвистические методы распознавания изображений в реальном времени. – Киев: Наукова думка, 1986. – 128 с.

7. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. – М.: Высшая школа, 1989. – 232 с.
8. Рабинер Л. Р., Шафер Р. В. Цифровая обработка речевых сигналов / Под ред. М.В. Назарова, Ю.Н. Прохорова. – М.: Радио и связь, 1981. – 496 с.
9. Голд Б., Рабинер Ч. Цифровая обработка сигналов. – М.: Сов. радио, 1973. – 368 с.
10. Мотль В. В., Мучник И. Б. Лингвистический анализ экспериментальных кривых // ТИИР. – 1979. – Т. 67. – № 5. – С. 12–38.
11. Алексеев О. Г. Комплексное применение методов дискретной оптимизации. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
12. Чистова Г. К., Чистова Ю. С. Алгоритм формирования грамматики в структурном подходе к распознаванию нарушителя // Проблемы объектовой охраны: Сб. науч. тр. – Вып. 2. – Пенза: Изд-во ИИЦ ПТУ, 2001. – С. 80–84.

Статья поступила в редакцию 30.07.2002

Галина Константиновна Чистова родилась в 1953 г., окончила в 1976 г. Пензенский политехнический институт. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” Пензенского государственного университета. Автор 75 научных работ, в основном, в области обработки сейсмических сигналов объектов и построения систем их обнаружения и распознавания.

G.K. Chistova (b. 1953) graduated from the Penza Polytechnic Institute in 1976. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Penza State University. Author of 75 publications, mainly, in the field of processing seismic signals of objects and building systems of their detection and recognition.



Владимир Иванович Волчихин родился в 1946 г., окончил в 1968 г. Пензенский политехнический институт. Чл.-корр. Российской академии ракетных и артиллерийских наук, д-р техн. наук, профессор, ректор Пензенского государственного университета, заведующий кафедрой “Автономные информационные и управляющие системы” Пензенского государственного университета. Автор более 200 научных работ в области обработки сигналов, в том числе в сейсмических системах.

V.I. Volchikhin (b. 1946) graduated from the Penza Polytechnic Institute in 1968. Corresponding member of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, D.S. (Eng.), professor rector of the Penza State University, head of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Penza State University. Author of more than 200 publications in the field of signal processing including that in seismic systems.