

# 一种数字波形的链表示方法 及其在波形识别中的应用

边肇祺  
(清华大学)

## 摘 要

本文叙述了在保持原始数字波形过零点位置信息的条件下,用几个具有不同斜率的直线段逼近原始波形的算法。根据波形的复杂度和所要求的精度可以方便地调整基元数目。一般说来用三个基元组成的链保存了原有波形的大部分信息并可用于对波形的句法识别。在某些地震信号上进行的试验说明了这种链表示的有效性。

## 一、引 言

波形的描述和识别是模式识别应用中的一个有兴趣的课题。C. H. Chen 对数字波形的统计识别方法中的特征提取进行了系统的综述<sup>[1]</sup>,而 K. S. Fu 总结了基元选择在句法识别方面的重要性及在波形分析中的一些实际应用<sup>[2]</sup>,一般说来所涉及的算法都比较复杂。由于对某些波形识别问题来说,过零点的相对位置和波形的统计变化规律具有重要的意义,本文提出了一种保留过零点位置,只用很少几个基元的、类似增量编码的数字波形的链表示方法。在这样一种表示的基础上,可以方便地用有限状态随机文法对地震剖面图中的几种典型地震相进行识别。试验结果表明了方法的有效性。下面分别就算法和应用中的一些问题进行讨论。

## 二、一种数字波形增量的链表示方法

数字波形增量的链表示和原有波形有一一对应关系,希望在保持原有信号中大部分信息条件下,能用几个基元组成的链来表示数字信号,从而大大减少数据存储量,并有利于分析它们中的结构关系。对于一个平稳随机过程  $z(t)$ ,下列变换

$$x(t) = \begin{cases} 1 & \text{若 } z(t) \geq 0, \\ 0 & \text{若 } z(t) < 0, \end{cases} \quad (1)$$

给出的二值序列是最简单的一种链表示,它的基元只有0和1两种。Kedem<sup>[3]</sup>指出,对于一个平稳随机过程,用上述变换得到的二值序列仍是一个平稳过程,并可用  $\nu$  阶马尔可夫链来近似。这种变换虽然保持了原来波形中的很多重要信息,但是由于它反映不出幅值

和峰值位置信息,所以对于一些识别问题是不适用的。为了尽可能使原有波形的幅值和峰值位置的信息在链表示中有所反映,可以根据波形的复杂程度用多于两个的基元对它进行描述。下面所讨论的算法对于基元数量不同的各种情况都是适用的;基元种类愈多,用该算法得到的链表示所恢复的信号更加接近原始信号。在不少情况下,用三个基元组成的链可以得到足够满意的效果。该算法由下列几个步骤组成。

(a) 确定原始数字信号的过零位置

用变换(1)把原始信号变换为二值(0,1)序列。在这个序列中,定义任何一个左邻或右邻为0的1元素都是一个过零点。例如,在二值序列

$$0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0$$

中,第3、5、9、11、16等点都是过零点。

(b) 计算原始离散信号的向后差分

原始离散信号的向后差分按下式计算:

$$\Delta(t) = z(t) - z(t-1).$$

(c) 用  $c$ -平均聚类算法(4)把所有的向后差分按其绝对值分成  $c$  类

这里  $c$  是预先确定的。若用三个基元对波形进行描述,  $c$  等于2;一般情况下,  $c$  等于(基元数 + 1)/2。根据下面将要讨论的原因,其中一个聚类中心规定为0。凡是属于这个聚类的所有  $\Delta(t)$ ,不论其为正负,都用同一基元表示。属于其他类的  $\Delta(t)$ ,根据其数值是正还是负,分别用两个基元表示。因此当  $c=2$  时,就有三个基元组成的链表示原始的向后差分序列。在给定原始信号  $z(0)$  的数值后,可以从这个表示中计算相应的波形值:

$$\begin{aligned} z(1) &= z(0) + g(1) \\ &\dots\dots\dots \\ z(t) &= z(t-1) + g(t) \end{aligned} \tag{2}$$

式中  $g(t)$  是考虑正负号后  $t$  点基元所对应的聚类中心值。

(d) 对链表示中的某些基元进行调整以保持原始波形过零点位置不变

由于波形的过零点位置提供了重要信息,而只用几个带正负号的聚类中心值代替原来各不相同的  $\Delta(t)$ ,显然会改变原来的过零点位置。因此要适当调整表示  $\Delta(t)$  的原来的基元符号,以保持原有过零点位置不变。这就要使相继两个原始波形过零点间,对应同一聚类中心值但正负符号不同的基元数相等,可以用下述方法调整。

假定有五个基元  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  和  $h$ ,且  $g(a) = -g(b)$ ,  $g(c) = -g(d)$ ,  $g(h) = 0$ 。

设  $g(a) > g(c)$ 。若在相继两个原始波形过零点  $i_1$ 、 $i_2$  间,基元  $a$  的数量  $N_a$  大于基元  $b$  的数量  $N_b$ ,则对每个基元  $(t_i) = a$ ,  $i_1 < i < i_2$ , 计算

$$|\Delta(t_i) - g(c)|,$$

和对每个基元  $(t_j) = d$ ,  $i_1 < j < i_2$ , 计算

$$|\Delta(t_j) - g(b)|.$$

若

$$\text{Min}_i |\Delta(t_i) - g(c)| < \text{Min}_j |\Delta(t_j) - g(b)|,$$

则把有最小  $|\Delta(t_i) - g(c)|$  值的  $t_i$  的基元从  $a$  调整为  $c$ ;反之,则把有最小  $|\Delta(t_j) -$



$g(b)$  的  $t_j$  的基元从  $d$  调整到  $b$ 。经过这样调整后,  $N_a$  和  $N_b$  的差就减少了。重复上述过程, 直到  $i_1$  和  $i_2$  间  $a$  和  $b$  的基元数相等, 然后用类似方法处理基元  $c$  和基元  $d$ 。设此时  $c$  的基元数多于  $d$  的基元数。根据误差最小原则, 可以把某个  $t_i$  的基元从  $c$  调整为  $h$ , 或者把原来  $\Delta(t_i)$  为负的某个  $h$  基元调整为  $d$ 。重复这个过程, 直到  $c$  基元数和  $d$  基元数

相等。容易看到这样调整以后, 当用(2)式计算波形后, 其过零点位置和原来是一样的。这也就是为什么我们在聚类时把一个聚类中心值固定为 0, 且基元数总是奇数的原因。在对所有相继两个原始波形过零点间的基元进行调整后, 就得到保持过零点位置不变的链表示。此外由于这种调整不会发生在正负符号的基元间, 所以峰值位置最多只可能从一个点扩展到一个小范围。由于基元所对应的聚类中心值是原来  $\Delta(t)$  的某种程度的平均, 所以在期望的意义上, 峰点的数值误差是不大的。

图 1 给出了若干地震勘探信号的原始波形以及用三基元(图 2)和五基元(图 3)链表示所恢复的信号波形。从图可见, 结果是足够满意的。我们还可以用带有上标的链来表示波

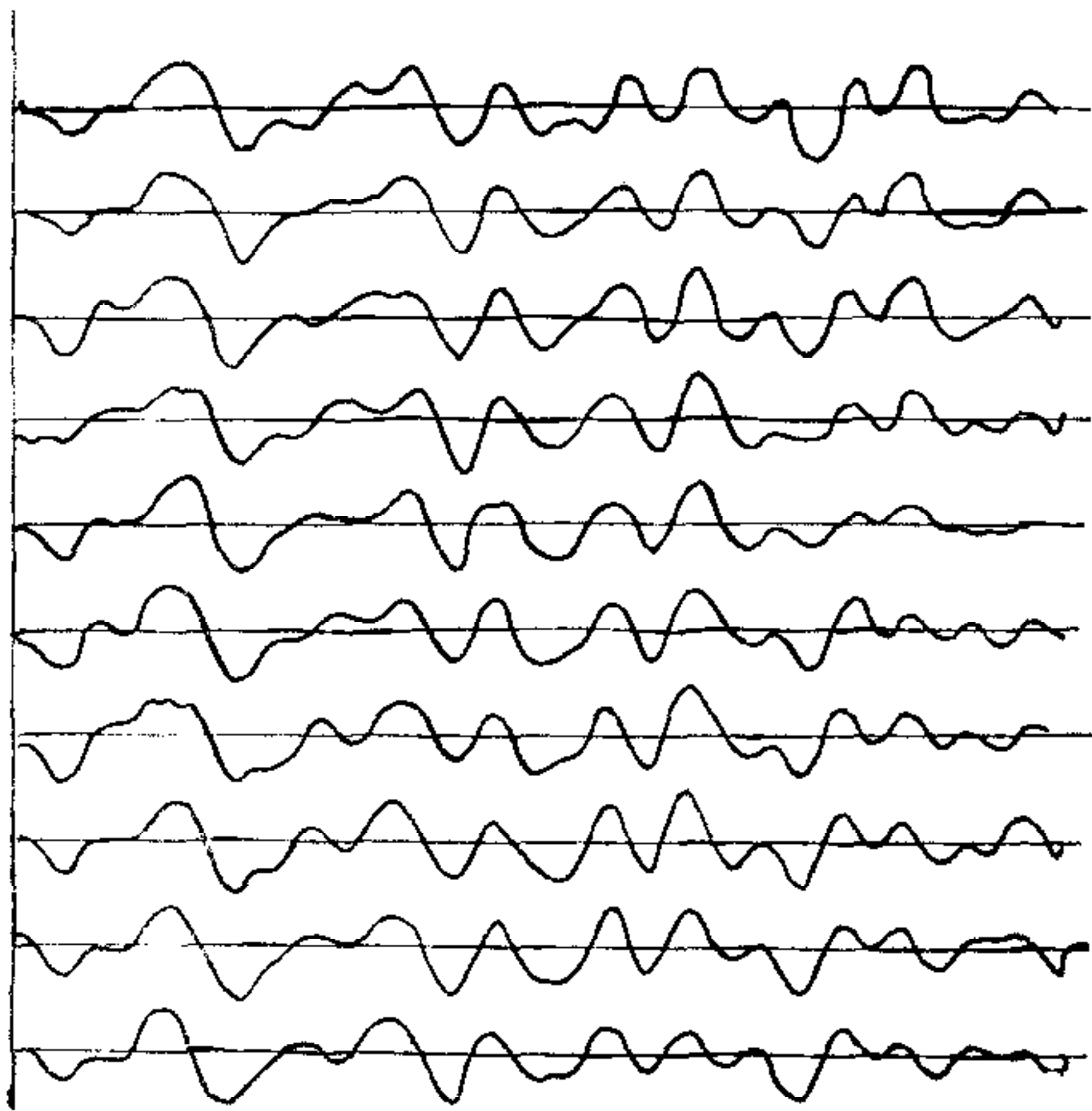


图 1 原始波形

恢复的信号波形。从图可见, 结果是足够满意的。我们还可以用带有上标的链来表示波

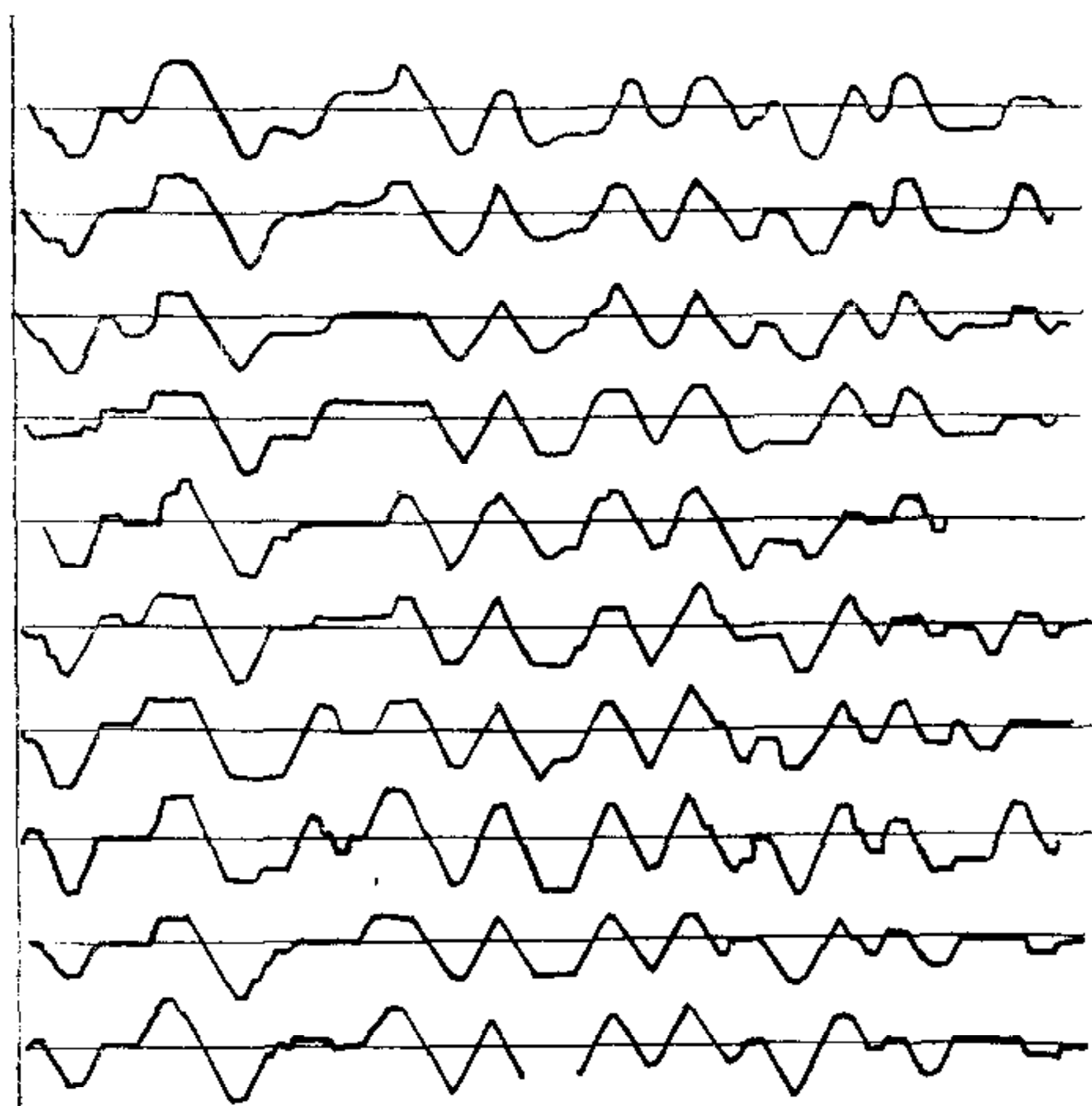


图 2 用三基元链表示恢复的波形

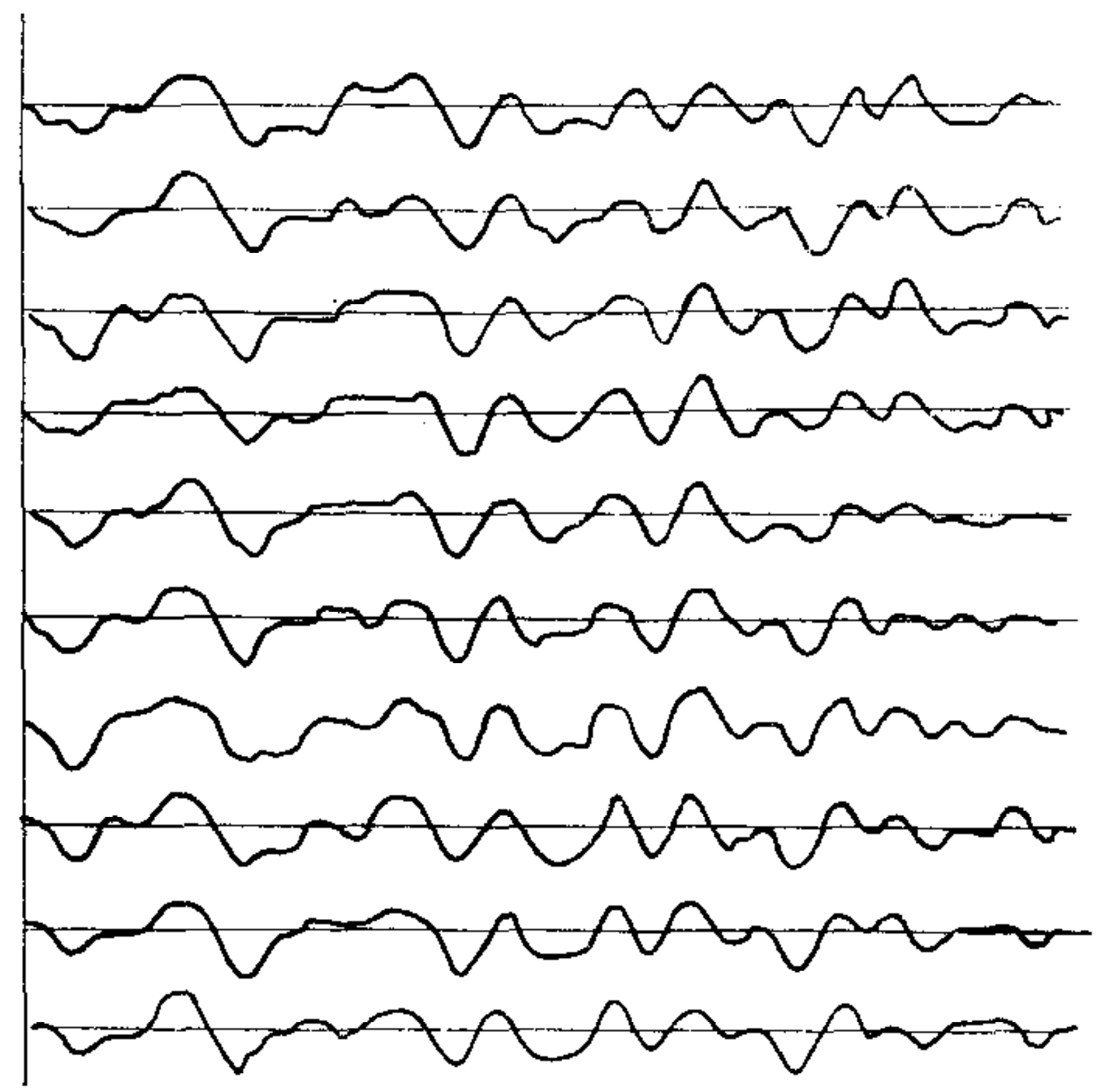


图 3 用五基元链表示恢复的波形

形, 例如图 2(a) 的链表示如下:

```

ahbbbbhhhhhaaaahhhhhhhhaaaaaahhhbbbbbbbbhhhaaa
ahahhahhhhhhhhbhhhhhhhaaaahhhbbbbbbbbhaaaaaa
ahbbbbhhhhhhhhhhhaaaaaahbbbbhhhaaaaaahbbbb
bhhhhaahhhbbbbhhhaaaaaaaahhhbbhhahhhhhbbhhhaa
aahhhhhhhhhhhhhhhhhhhhhahhhh

```

可以改写成如下带上标的形式：

$$\begin{aligned} & a^1 h^1 b^5 h^4 a^4 h^8 a^6 h^3 b^{12} h^3 a^5 h^1 a^1 h^2 a^1 h^8 b^1 h^8 \\ & a^5 h^3 b^{10} h^1 a^8 h^1 b^6 h^{12} a^7 h^1 b^6 h^3 a^7 h^1 b^6 h^4 a^2 h^3 \\ & b^6 h^2 a^9 h^2 b^4 h^3 a^1 h^4 b^4 h^3 a^4 h^{14} b^2 h^6 a^1 h^4 \end{aligned}$$

### 三、在链表示上进行的某些运算

在这种链表示上可以方便地进行某些特征的提取，例如求波形的最大平缓段，过零点位置，峰值位置，相关函数等。下面以三基元表示为例进行一些讨论。

#### (a) 最长平缓段的长度和位置

把链表示写成带有上标  $i_k$  的形式。在该表示中，找出基元  $h$  有最大上标的所在位置  $c$ ， $i_c$  即为具有最长平缓段的长度，其起始位置离开原点的距离是  $\sum_{k=1}^{c-1} i_k$ 。

#### (b) 过零点位置

对每一个链表示，给出一个指标表示。确定指标表示的方法如下。

从第一个链符号开始，遇到符号是  $a$  时，把上一个指标值加 1；遇到符号是  $b$  时，把上一个指标值减 1；遇到符号是  $h$  时，指标值不变。例如对图 2 的链表示，其指标表示是

$$1 \quad 1 \quad 0 \quad -1 \quad -2 \quad -3 \quad -4 \quad -4 \quad -4 \quad -4 \quad -3 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad \dots$$

凡是指标是 0，且其左邻或右邻不都为 0，则所对应的位置都是过零位置。上例的过零位置是第 3、第 14 等。

#### (c) 峰点位置和峰值

从上述指标表示上很容易求出峰点位置和相应的峰值。这时只要检查什么位置上具有正的最大指标值或负的最大值以及指标值大小，就能确定波形中的峰点位置及其数值。也可以与左邻和右邻的指标值进行比较，以求出局部的峰点位置和峰值。当几个邻近点都具有相同的指标值时，可取其中间位置作为峰点位置。

#### (d) 相关函数计算

设有两个链表示，相应地有两个指标表示。在计算  $\tau$  延迟的相关函数值时，使这两个指标表示相差  $\tau$  个位置。然后把两个指标表示的对应位置上的指标值相乘，再全部相加后，就得到两个链表示在该时延下的相关函数值（相差一个常数因子）。当两个指标表示属于同一链时，可以求出其自相关函数，并可用它估计其功率谱。

### 四、三基元链表示在波形分类中的应用

上述的三基元链表示基本上保持了原有波形的大部分频率和幅值信息，所以可以用它来实现波形的句法模式识别。一般情况下，可以从链表示中抽取各种子模式，以形成新的上一水平的基元集合，并在此基础上推断出与某个类别相对应的产生式。最简单的办法是直接利用三基元链表示建立各类的随机文法，用已知类别的学习样本推断文法规则的代换概率，而对被识别模式，用各类文法产生它的代换概率，并用最大似然规则进行分类。



我们用这个方法对地震剖面图中的几个典型地震相的识别进行了实验。所有这四类地震相有相同的表征文法,即  $G = (V_N, V_T, P_s, S)$ , 其中  $V_N = \{S, N_a, N_b, N_h\}$  和  $V_T = \{a, b, h\}$  分别是非终止符集和终止符集,  $S \in V_N$  是起始符,  $P_s$  是产生规则集。不同的类别只是产生规则的代换概率不同,可写成如下形式:

$$\begin{array}{lll}
 S \xrightarrow{q_{aa}} aN_a, & S \xrightarrow{q_{ab}} aN_b, & S \xrightarrow{q_{ah}} aN_h, \\
 S \xrightarrow{q_{ba}} bN_a, & S \xrightarrow{q_{bb}} bN_b, & S \xrightarrow{q_{bh}} bN_h, \\
 S \xrightarrow{q_{ha}} hN_a, & S \xrightarrow{q_{hb}} hN_b, & S \xrightarrow{q_{hh}} hN_h, \\
 N_a \xrightarrow{p_{aa}} aN_a, & N_a \xrightarrow{p_{ab}} aN_b, & N_a \xrightarrow{p_{ah}} aN_h, \\
 N_b \xrightarrow{p_{ba}} bN_a, & N_b \xrightarrow{p_{bb}} bN_b, & N_b \xrightarrow{p_{bh}} bN_h, \\
 N_h \xrightarrow{p_{ha}} hN_a, & N_h \xrightarrow{p_{hb}} hN_b, & N_h \xrightarrow{p_{hh}} hN_h, \\
 N_a \xrightarrow{p_a} a, & N_b \xrightarrow{p_b} b, & N_h \xrightarrow{p_h} h,
 \end{array}$$

式中,  $q_{ij}, p_{ij}, p_i$  ( $i, j = a, b, h$ ) 是相应产生式的代换概率, 且  $0 \leq q_{ij}, p_{ij}, p_i \leq 1$ 。显然,  $\sum_{i,j} q_{ij} = 1$ 。假使我们认为  $p_{ij}$  和  $p_i$  与链中基元所在位置有关, 则由该文法导出的链的长度是可以控制的。例如, 若

$$\sum_i p_i = \begin{cases} 0 & \text{当位置 } i < L, \\ 1 & \text{当位置 } i = L, \end{cases}$$

以及

$$\sum_i p_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当位置 } i < L, \\ 0 & \text{当位置 } i = L, \end{cases}$$

则所有由该文法导出的链的长度都等于  $L$ 。对于一个非平稳随机过程, 可以假定  $p_{ij}$  在一定位置范围内是常数 (在这范围内, 过程认为是平稳的)。为了简单起见, 在我们的实验中, 在给定的波形长度范围内,  $p_{ij}$  认为是常数。根据地质工作者所给的四个典型地震相的训练样本 (见图 4), 在相应的三基元链表示上用基元间的转移频数来估计各个代换概

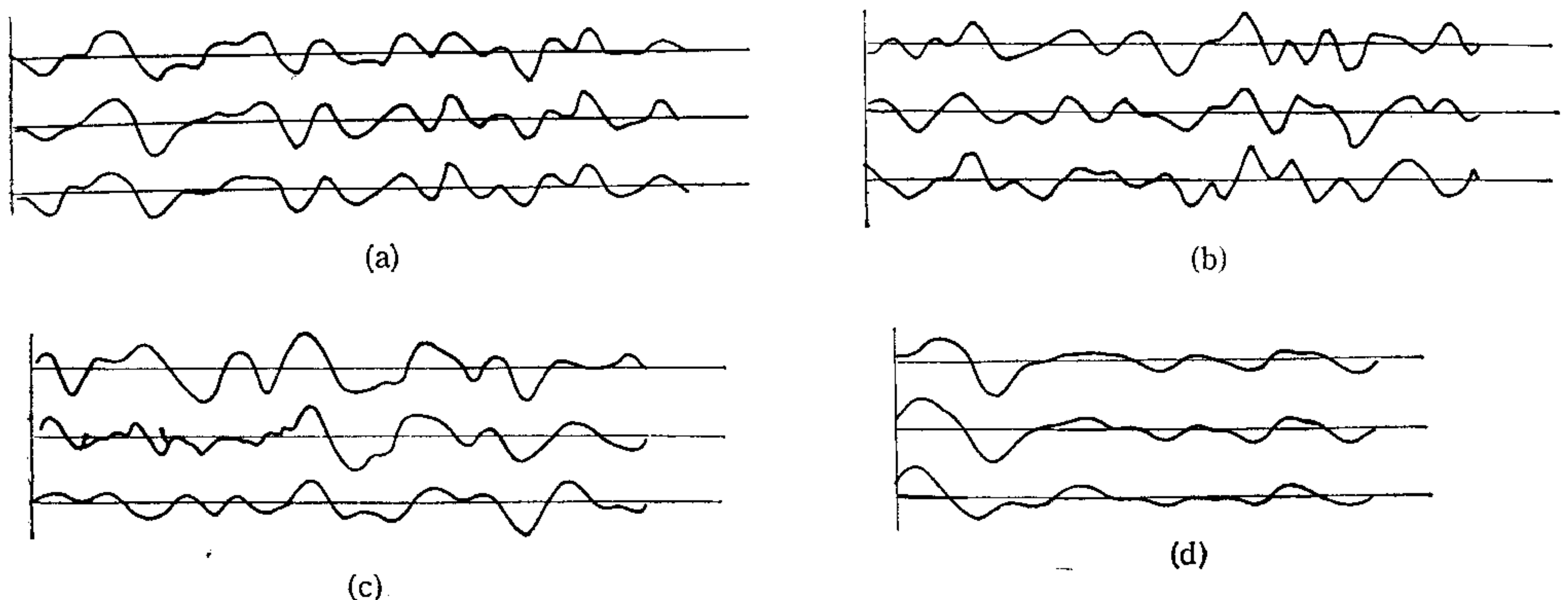


图 4 四类地震相波形的例子

率。对全部 40 个样本(每类 10 个样本)分别计算四个类别的导出概率,它等于导出链表示各个符号时所用该类产生式的代换概率的乘积。比较这四个导出概率值,选其中最大值所对应的类别作为该样本的类别。分类结果见下表 1。

表 1

原属类别 \ 分类结果	1	2	3	4
1	7	8	0	0
2	2	1	1	0
3	1	1	9	0
4	0	0	0	10

正确识别率约为 85%。分类误差的产生,一方面是由于不同类别的波形特性很接近,另一方面是由于代换概率是常数的假定不完全符合地震信号的非平稳性质。假使我们分段进行代换概率的估计,预期将会得到更好的效果。

## 五、结 论

用少数几个基元组成的链表示数字波形,大大降低了数据存储量,同时保留了原始波形的大部分信息,对于用句法方法对波形进行识别是非常方便的。这种表示方法和用于波形传输的 DPCM 编码的不同之处在于,它并不以波形的完全恢复为主要目的,而是在保持大部分频率信息以及局部峰点位置和峰值信息条件下,用尽可能少的基元组成的链对离散时间信号进行描述,从而在统计的意义上能够方便地估计导出某类链表示的产生规则的代换概率,以实现最大似然分类。上述的链表示算法在基元数一定和保持过零点位置不变的条件下,具有增量误差平方和最小的性质,而且算法的实现非常简单,计算量不大。在得到链表示以后,还可以用动态匹配算法对波形进行识别。它的缺点是不能反映过零点位置间的波形突变点。当这些突变点对识别具有重要意义时,我们除了要保持过零点位置不变外,还要把保持这些突变点的位置不变同时作为链表示的限制条件。在引入反映这种突变情况的基元同时,可以计算该突变点和邻近过零点之间的各个基元的组合配置,使这一范围内各点波形值在用相应的子链恢复时,平方误差和最小。我们将在另文中详细讨论这个算法。此外,即使在三基元链表示的情况下,还可以用具有高阶代换概率的产生式,例如

$$N_a \xrightarrow{p_{aaa}} aaN_a, \quad N_a \xrightarrow{p_{aba}} abN_a$$

等,来获得更好的识别效果。

## 参 考 文 献

- [1] Chen, C. H., Digital Waveform Processing and Recognition, CRC Press, Inc. (1982).
- [2] 付京孙, 模式识别及其应用, 科学出版社 (1983).
- [3] Benjamin Kedem, "Binary Time Series", Marcel Dekker (1980).
- [4] Duda, R. O., and Hart, P. E., Pattern Classification and Scene Analysis, Wiley, New York (1973).

# A KIND OF STRING REPRESENTATION FOR DIGITAL WAVEFORMS AND ITS APPLICATION IN WAVEFORM RECOGNITION

BIAN ZHAOQI

*(Tsinghua University)*

## ABSTRACT

Under the condition of preserving zero-crossing positions of the original waveform, a string description approach which approximates the original waveform with several kinds of line segments as primitives is presented. The number of primitives can easily be adjusted according to waveform complexity and the required accuracy. In general, a string representation consisted of only three kinds of primitives will contain a great deal of information of the original waveform and can be used in the syntactic approach for waveform recognition. The experiments on seismic signals demonstrate the effectiveness of this approach.