

游程 DSGM-SC 同步波形压缩¹

罗智勇 傅志中 李在铭

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

摘 要 该文研究了一维局域急变, 广域缓变信号的游程 DSGM-SC 同步高效压缩。该压缩技术采用游程差分样条梯度均值检测, 标记信号的高频分量, 再通过优化插值进行谱压缩, 提高数据序列的整体相关性, 同步压缩相关变换后的高低频数据文件, 获得高压缩效率。记录高低频数据分段定位信息, 实现无损时间解压缩。对 NEC 的 BSM8300 多功能床旁监护仪 ECG 记录的压缩实验表明, 在医疗特征保真度很高的情况下, 压缩比可达 32.4。此项研究适用于一维数据分析, 记录, 传输和综合应用。

关键词 游程编码, 差分样条梯度均值, 谱压缩 (SC), 同步编码

中图分类号 TN911.73

1 引 言

大量科学实验表明, 一维随机马尔科夫信号广泛存在于现实世界中。一类较特殊的高阶马尔科夫信号表现为: 广域相关性强, 对应窄频谱; 局域相关性弱, 宽频谱。对应时域存在信号脉冲微分差大, 脉宽小和触发随机等特点。如: 心电信号, 地震波, 宇宙连续辐射, 简单场景图像的连续扫描的同步采集序列等。这类信号数据量大, 且一般需要长时间连续存储。

对这类信号采集后的数据序列存储, 常规的压缩算法有: (1) 无失真信源编码^[1]。如 Huffman, 游程, 算术编码等, 压缩效率不高, 常结合其它压缩技术应用。(2) 熵压缩信源编码。如一维变换算法^[2,3]: FFT, DFT, DCT 等, 对弱相关区域序列, 存在效率不高, 频带浪费等缺点; 预测编码, 存在预测效果差的相关性小的区域。(3) 小波, 子带等新方法^[4]。运算量大, 失真较显著。(4) 二维转换处理。缺点是对应于简单背景的稀疏图像点, 频带利用率极低, 并且增加了运算复杂度。

利用信号局域多脉冲特性, 采用差分样条梯度均值 (DSGM) 对高频分量进行标记, 进行优化插值次数的同步编码, 提高数据序列的整体相关性, 利用一维快速变换域编码算法, 解决了频带利用率和压缩运算时间的矛盾。结合游程编码和 Huffman 编码, 进一步提高了数据算法的压缩率。

2 游程 DSGM-SC 原理

广域缓变, 局域急变高阶马尔科夫随机数字信号可表示为

$$x(n, s) = x_l(n, s) + x_h(n, s) \xrightarrow{FT} X_L(\omega, s) + X_H(\omega, s) \quad (1)$$

式中 s 代表随机采样空间, $x_l(n, s)$ 是低频缓变信号, $x_h(n, s)$ 对应高频急变信号。有效标记 $x_h(n, s)$, 对之平滑插值, 可以提高变换域算法的谱压缩效率。

对于复杂的规律性不强的 $x(n, s)$, 准确的高频标记是复杂的。在极值点间的纯升降区域, 即一阶差分 $\Delta_i < 0$ 或 $\Delta_i > 0$, $i \in N$, N 表示区域点标, 纯坡度检测丢失幅度小的高频分量, 使恢复数据的失真度增加。差分平均检测考虑了区域的整体频率特性, 但容易掩盖局部高

¹ 2000-01-12 收到, 2000-05-11 定稿

频效果。差分梯度检测能反映数据区域的局部频率特性, 但易受噪声干扰。结合上述考虑, 采用 DSGM 参数检测局部频率特性, 并滤除噪声干扰。定义如 (2) 式:

$$\text{DSGM} = \frac{\sum_n \Delta_{i+n}}{2N+1}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N \quad (2)$$

式中 N 为样条半径; $\Delta_i = f(x_i) - f(x_{i-1})$, x_i 代表第 i 个采样点, $f(x_i)$ 代表采样点幅度。游程 DSGM 检测每一极值点和转折点 (对应 (3) 式中 “=” 号), 检测准则如下式:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta_{i-k+1} \cdot \Delta_{i+k} \leq 0 \\ |f(x_i)| > F \end{array} \right\} \quad (3)$$

式中 $k = 0, 1, \dots$, k 的合理选择可以增加判别精度; F 是幅值标称比较幅度, 选择 F 滤除游程基准扰动。

选择在均方误差准则下, 对最佳变换域编码 KLT 性能最佳近似^[5]并方便实现的 DCT 作为研究对象。假定 $x(n) \xrightarrow{\text{DCT}} z(k); k \in [0, N-1]$, 由 DCT 定义, 有

$$z(k) = \frac{2\xi_k}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos \frac{(2n+1)k\pi}{2N}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (4)$$

其中 $\xi_k = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & k = 0 \\ 1, & k = 1, 2, \dots, N \end{cases}$

设 N 为偶数, 可将输入序列 $x(n)$ 记为 $\tilde{x} = [\tilde{x}_p \quad \tilde{x}_r]'$

$$\left. \begin{array}{l} \tilde{x}_p = \tilde{x}(n) = x(2n), \\ \tilde{x}_r = \tilde{x}(N-1-n) = x(2n+1), \end{array} \right\} \quad n = 0, 1, \dots, N/2-1 \quad (5)$$

定义 $\hat{z}$ 的比特逆序排列 $\hat{z} = [\hat{z}_e \quad \hat{z}_0]'$, DCT 可表示为 (6) 式:

$$\hat{z}(k) = \frac{2\xi_k}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n) \cos\left[\frac{\pi(4n+1)k}{2N}\right], \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

式中 $\hat{z}(k)$ 是向量 $\hat{z}$ 的分量。由 (6) 式, 可得

$$\text{DCT}[x(n)] = c_1(k)\text{Re}[\text{DFT}(\tilde{x}(n))] + c_2(k)\text{Im}[\text{DFT}(\tilde{x}(n))] \quad (7)$$

式中 $c_1(k) = (2\xi_k/N) \cos[\pi k/(2N)] \in [0, 1]$, $c_2(k) = -(2\xi_k/N) \sin[\pi k/(2N)] \in [-1, 0]$ 。由 DFT 时频比例关系:

$$x(at) \xrightarrow{\text{DFT}} \frac{1}{|a|} X\left(\frac{\omega}{a}\right) \quad (8)$$

扩展时域 DCT 获得更集中的频谱分布, 结合 0 游程编码获得高压缩比。在相等的 DCT 变换长度 L_{DCT} , $L_{\text{DCT}} \in N$ 下 $x_h(n, s)$ 的带宽:

$$SB_{\text{DCT}} \propto \frac{1}{\sum_i \Delta_i} \propto \frac{1}{n_{\text{inp}}} \quad (9)$$

式中 $i \in [0, L_{\text{DCT}}]$; n_{inp} 代表插值次数, 且 $n_{\text{inp}} \propto S_{\text{operation}}$, $S_{\text{operation}}$ 表示 DCT 运算量. 考虑优化的 n_{inp} , 使

$$\text{opt}(n_{\text{inp}}) \rightarrow \text{opt}(\text{SB}_{\text{DCT}}, S_{\text{operation}}) \quad (10)$$

一种最佳的 n_{inp} 可在获得 DSGM 判据后求得,

$$\text{opt}(n_{\text{inp}}) \approx \frac{\max(\text{DSGM}_{\text{pluse}})}{V_{\text{DSGM}}} \quad (11)$$

式中 V_{DSGM} 表示 DSGM 的判别门限值.

3 算法结构与性能分析

3.1 压缩

(1) 差分游程编码. 若 $\Delta_i < V_{\text{RLC}}$, $RL > 4$, 进行 RLC , 标记游程区域 $[i_1, i_2]$, $L_1 = i_1 - i_2$, 选择游程编码的有效差分门限 V_{RLC} , 滤除零均值噪声的干扰. 游程结构保存在 FILE_1 . (图 1).

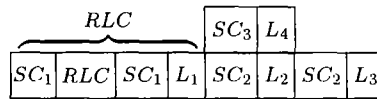


图 1 FILE_1 文件结构 (定位文件)

(2) DSGM 检测: (a) 由 (2) 式从 i_2 起, 寻找极值点或转折点 j ; (b) DSGM 检测, 选定 DSGM 判别门限进行高频判别. 若 $\text{DSGM} > V_{\text{DSGM}}$, FILE_1 保存高频 $L_2 = j - i_2$, 并根据 (11) 式决定插值次数 L_3 , 若否, 低频脉冲长度 L_4 写入 FILE_1 .

(3) $L_2 \times L_3$ 插值, 插值数据写入 FIFO_1 , 低频数据写入 FIFO_2 , 迭代 (2) 直至 FIFO_i 写满. FIFO_i 长度满足: $L_{\text{FIFO}_i} = L_{\text{DCT}}, i = 1, 2$.

(4) DCT 变换游程压缩: 能量接近 0 的数据游程归零, 游程长度 $RL > 2$ 则有增益, 得零游程总长度 L_5 . 对能量集中的窄低频区域保持能量数据, 分别保存高低频数据压缩结果到临时 FILE_2 , FILE_3 . 并累计 FILE_2 , FILE_3 文件长度 L_6 和 L_7 , 迭代 (3).

(5) 从 j 起迭代 (1) 至结束.

(6) 合并 FILE_1 , FILE_2 , FILE_3 到编码文件 RFILE , 如图 2. 撤消 FILE_1 , FILE_2 , FILE_3 .

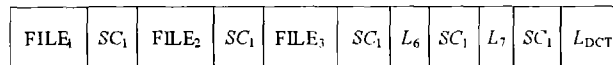


图 2 编码文件结构

(7) 对 RFILE 选择进行 Huffman 编码.

上述编码文件结构中 $SC_i, i = 1, 2, 3$ 是特殊分隔字符, i_1, i_2, j 随迭代过程而增加.

3.2 解压缩

(1) Huffman 解码恢复 RFILE

(2) 撤消 RFILE, 恢复 FILE₁, FILE₂, FILE₃, 建立 FIFO₁ 和 FIFO₂, $L_{\text{FIFO}_i} = L_{\text{DCT}}$

(3) 由解码控制文件 FILE₁: (a) 对 SC₁, 游程解码, 添加到解码文件 DFILE; (b) 对 SC₂, 若对定位文件 FILE₁, 第 $i, i = 1, 2, \dots$ 个插值结构, 有 $\sum_i L_{2i} \times L_{3i} - L_{\text{FILE}_4} > L_{\text{DCT}}$, 对 FILE₂ 进行游程解码, 获得 nL_{DCT} 数据, $n = (\text{int}) \left[(\sum_{i=1}^k L_{2i} \times L_{3i} - L_{\text{FILE}_4}) / L_{\text{DCT}} \right] + 1$, 逐次写入 FIFO₁, 进行 IDCT, 添加到临时文件 FILE₄. 对第 i 个插值结果结构的 $\sum_{i=1}^{k+1} L_{2i} \times L_{3i}$ 个数据去插值, 添加到 DFILE. 从 FILE₄ 移出第 i 个插值结果结构的数据, FILE₄ 保留 $L_{\text{FILE}_4} = nL_{\text{DCT}} - \sum_i L_{2i} \times L_{3i}$ 下一结构的编码数据. 若 $\sum_i L_{2i} \times L_{3i} - L_{\text{FILE}_4} < L_{\text{DCT}}$, 继续迭代 (3); (c) 对 SC₃, 同 (b), 对第 $n, n = 0, 1, \dots$ 次长度为 L_{4n} 的低频压缩结果, 逐次取 L_{DCT} 长度的数据到临时文件 FILE₅, 游程恢复 DCT 变换结果, 写入 FIFO₂, 作 IDCT 并按 FILE₁ 的定位顺序添加到 DFILE. 迭代 (3) 至结束.

3.3 性能分析

压缩算法 DSGM 检测, 插值与 DCT 变换同步进行, 不需要重定位, 节省运算量. 采用图 2 的文件结构, 解码恢复 FILE₁, FILE₂, FILE₃ 后, 撤消 RFILE. FILE₁ 定位控制解码, 对 FILE₂, FILE₃ 可实施同步并行解码. 在时间资源占用上是合理的.

编解码算法的空间资源占用是合理的:

压缩空间 = FIFO(L_{DCT}) $\times$ 2 + FILE₁ + FILE₂ + FILE₃;

解压缩空间 = FIFO(L_{DCT}) $\times$ 2 + FILE₁ + FILE₂ + FILE₃ + FILE₄ ($< (n+1)L_{\text{DCT}}$) + FILE₅ ($= L_{\text{DCT}}$).

编解码误差包括: (1) DCT 操作引入极少的熵丢失, (2) 运算舍入误差. 由于上两项误差极小. 获得了在高保真度下的高压缩比:

$$CR \approx CR_{\text{RLC}} \times CR_{\text{SC}} \times CR_{\text{DCT\&RLC}} \times CR_{\text{Huffman}} \quad (12)$$

4 对 ECG 压缩的实验结果

心电信号是一种典型的局域畸变, 广域缓变的信号. 由国际 SCP-ECG 规定, ECG 的关键时域特征量集合 C_m 定义如下:

$$C_m = \{V_p(P, \text{QRS}, T), T(P-R, \text{QRS}, S-T, R-R, Q-T)\} \quad (13)$$

式中 $V_p(\cdot)$ 是峰峰值检测, $T(\cdot)$ 是各波形的时间间隔检测. 标注于图 3.

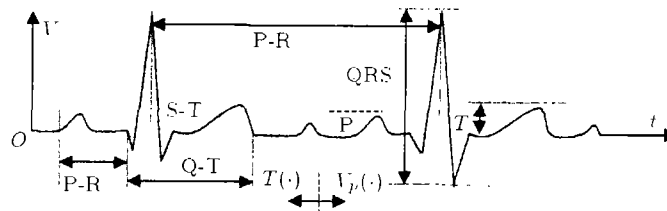


图 3 ECG 时域特征量

QRS 波群检测是 ECG 压缩的关键. 对 NEC 的 BSM8300 多功能床头监护仪 ECG 记录进行差分样条梯度均值检测, 统计表明有效标记 QRS 在 95.4% 以上. 进行优化次数的牛顿二阶前向插值实施 SC 压缩, 获得高保真度下的高压缩比. 图 4 是对 NEC 的 BSM8300 多功能床头监护

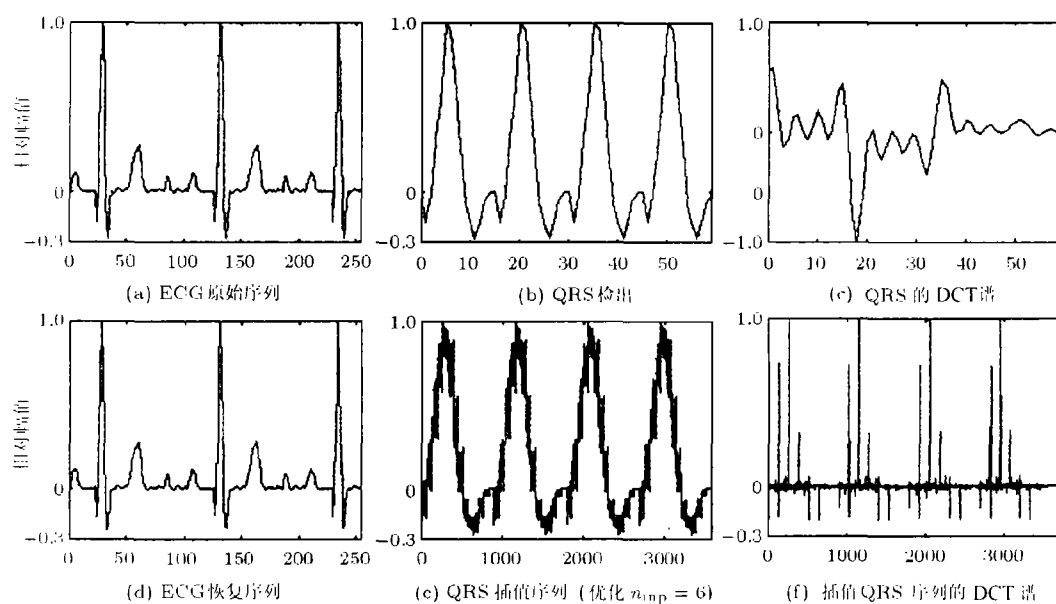


图4 I 导联数据的 SC 压缩结果

仪 I 导联心电图高频标记与 DCT 归一化结果。表 1 列出了 250HZ/12bit 采样, DSGM-SC, AZTEC^[7], TP^[8], CORTES^[9] 和 SAPA^[10] 按 SCP-ECG 规定的性能特性比较。

表 1 心电数据压缩算法性能比较

	AZTEC ^[7]	TP ^[8]	CORTES ^[9]	SAPA-2 ^[10]	DSGM-SC
CR	4.8	5.6	8.0	3.0	32.4
PRD	12%	5.8%	7.4%	4.0%	3.91%
性能评价	P, R 保真度差	采样率敏感	采样率敏感, P 保真度差	保真度高	保真度高

5 结 论

本文研究了适用于广域强相关, 局域弱相关随机信号的 DSGM-SC 压缩技术。该压缩技术综合应用了游程检测, 游程编码, DCT 和 Huffman 编码技术。并通过 DSGM 检测有效标记高频分量, 优化插值次数压缩随机信号变换谱, 变换同步压缩与并行解压缩提高了运算速度, 获得低失真度下的快速高效压缩。对 NECBSM8300 多功能床头监护仪的 ECG 记录数据进行压缩处理, 获得了优于其它算法的压缩性能。实验和应用表明, 算法具有实用价值和推广意义。

参 考 文 献

- [1] 吴乐南, 数据压缩的原理与应用, 北京, 电子工业出版社, 1996, 2, 43-108.
- [2] Lenan Wu, Comments on 'On the shift property of DCT's and DST's, IEEE Trans. on ASSP, 1990, 38(1), 186-188.
- [3] 吴乐南, 几种离散正弦变换的卷积乘积关系, 电子科学学报, 1989, 11(5), 536-541.
- [4] J. W. Woods, S. D. O'Neil, Subband coding of images, IEEE Trans. on ASSP, 1990, 34(5), 1278-1288.
- [5] N. Ahmed, T. Natarajan, K. R. Rao, Discrete Cosine Transform, IEEE Trans. on Computers, 1974, 23(1), 90-93.
- [6] H. S. Hou, A fast recursive algorithm for computing the discrete cosine transform, IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1987, 8(10), 1455-1461.

- [7] J. R. Cox, F.M. Nolle, H. A. Fozzard, G. C. Oliver, AZTEC, A preprocessing program for real-time ECG rhythm analysis, IEEE Trans. on Biomedicine Engineering, 1968, BME-15(4), 128-129.
- [8] W. C. Mueller, Arrhythmia Detection Program for an ambulatory ECG monitor, Biomedicine Science Instrument, 1978, (14), 81-85.
- [9] J. P. Abenstein, W. J. Tompkins, New data reduction algorithm for real-time ECG analysis, IEEE Trans. on Biomedicine Engineering, 1982, BME-29(1), 32-48.
- [10] R. C. Barr, S. M. Blanchard, D. A. Dipersio, SAPA-2 is the fan, IEEE trans. on Biomedicine Engineering, 1985, BME-32(5), 337.
- [11] 郝春朝, 刘鸿铨, 于振生, 一种心电信号压缩算法 - 代表波形法, 电子测量与仪器学报, 1998, 6(12), 21-25.

DSGM-SC GRAPH COMPRESSION

Luo Zhiyong Fu Zhizhong Li Zaiming

(Institute of Commun. and Info. Eng., UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract Synchronous run-length DSGM-SC compression technique is presented in this paper for one-dimensional random signal with local fast variation and expansive slow variation. First, run length DSGM detection is implemented to detect fast variation part, then the fast part's spectrum is compressed with interpolation as optimal times principle to improve integrative correlation, and transform coding is adopted to get high compression ratio. Data files, which include high and low spectrum information, are synchronously compressed. Position information is prerecorded to fulfill time recover without distortion. The compression ratio with the method can reach 32.4 to electrocardiogram data recorded by multi-functional bedside instrument of NEC, BSM8300 while the fidelity of medical treatment is high. The research has application in one-dimensional data analyzing, recording, transmitting and integrated service.

Key words Run-length coding (RLC), Difference sector gradient mean (DSGM), Spectrum compression (SC), Synchronous coding

罗智勇: 男, 1973 年生, 博士生, 主要研究多媒体信息处理, 识别, DSP 与多媒体信息实现技术.

傅志中: 男, 1970 年生, 博士生, 主要研究多媒体信息处理, 识别与通信技术.

李在铭: 男, 1939 年生, 博士生导师, 主要研究多媒体信息处理, 信号检测与估计, 通信综合服务技术等.