

差错恢复技术在 ECG 信号压缩中的应用

王付艳

(昆明学院 信息技术学院, 云南 昆明 650214)

摘要:为探讨差错恢复技术在 ECG 信号压缩中的应用,通过在 ECG 信号压缩过程中结合使用片段标记和不等差错保护技术实现信号在无线信道中传输差错的恢复,以降低信道传输差错对重建信号的影响. 对 MIT-BIH 数据库中的一组 ECG 信号实验分析结果表明,综合使用上述两种差错恢复技术在 ECG 信号压缩比特流中只增加较少冗余的情况下,显著提高了信号的抗差错能力.

关键词:MIT-BIH 数据库;差错恢复;同步标记;片段标记;不等差错保护;BCH 码

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-5639(2017)06-0072-05

DOI:10.14091/j.cnki.kmxyxb.2017.06.016

Application of Error Resilient Techniques in ECG Signals Compression

WANG Fuyan

(College of Information Technology, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214)

Abstract: The application of error resilience in ECG signals compression was studied by combining segment marker and unequal error Protection techniques to recover ECG data transmission errors introduced in the wireless channel and release the influence of channel errors for the reconstructed signals during the course of ECG signals compression. Experiments on one group of ECG signals based on MIT-BIH arrhythmia database showed that the error resistance of ECG signals' bit stream attaching few redundant data was obviously increased by combining two types of error resilient techniques.

Key words: MIT-BIH database; error resilience; resynchronized marker; segment marker; unequal error protection; BCH code

心脏病是严重威胁人类健康和生命的主要疾病之一. 近年来,随着通信领域中无线业务迅猛发展,人们开始利用无线技术对心脏病患者实施远程监护,在此过程中需要存储和传输的 ECG 数据容量较大,因此必须对其进行高效的数据压缩和可靠的数据传输.

自从 1987 年 Witten 等提出利用算术编码^[1]进行数据压缩的技术后,人们开始选用算术编码对 ECG 信号进行高效的数据压缩. 算术编码不是专门针对块进行的熵编码,而是针对整个输入序列进行的编码,而且每个符号的平均码长也不一定为整数. 虽然算术编码比定长码(Fixed Length Code, FLC)有更高的压缩效率,但编码后的压缩数据对抗差错的能力十分脆弱,同时由于无线传输信道存在带宽窄、

误比特率高的特点,信号在这种易错信道中传输极易受到干扰而出现传输差错,导致重建的 ECG 信号质量严重受损,甚至完全无法重建信号. 如何保证压缩 ECG 信号的重建质量已成为 ECG 信号处理研究的一个重要方向^[2],因此在信号压缩过程中采用适当的差错恢复(Error Resilience)技术就成为易错信道 ECG 信号传输的重要内容之一.

在本研究中,主要结合图像、视频领域的两种差错恢复技术并将其应用到一维的 ECG 信号压缩中,实现 ECG 信号在无线信道中传输差错的恢复. 其中,一种技术是在对数据帧进行算术编码过程中添加片段标记(Segment Marker, SM),该片段标记能够在一个片段中定位差错的位置和识别比特流中正确解码的部分,同时无需重新初始化算术编码器,使得

收稿日期:2017-10-10

基金项目:云南省教育厅科学研究基金资助项目(2016ZDX098).

作者简介:王付艳(1978—),女,云南昆明人,讲师,硕士,主要从事信息传输理论研究.

在增加少许冗余信息的情况下就能够使比特流具有恢复传输差错的能力. 另一种技术是根据比特流中不同部分在重建信号时重要程度的不同,对 ECG 信号算术编码后的比特流进行不等差错保护 (Unequal Error Protection, UEP), 这样在对信号进行有重点保护的同时,又不会在传输过程中增加过多的冗余.

1 ECG 信号压缩中差错恢复的方法与原理

本研究的 ECG 信号压缩主要包含两个部分: 1) 先将 ECG 信号进行信息分帧, 每个数据帧长度为 1 024 点, 对每个数据帧进行 5 层的离散小波分解, 分解的系数进行均匀量化之后得到待编码的量化系数. 2) 对量化系数进行算术编码过程中加入片段标记, 然后对编码输出的比特流添加不等差错保护. 下面主要对片段标记和不等差错保护中的差错恢复原理与方法进行讨论.

1.1 算术编码差错恢复的片段标记技术

差错恢复信号编码通常使用信息分帧. 通过将 ECG 信号比特流划分为彼此互不相关的数据帧实现信息分帧. 每一个数据帧有自己的头信息, 后面紧接着一个或多个编码的 ECG 数据块. 下图 1 给出数据帧的基本结构. 在每个数据帧开头即头信息之前需添加同步标记 (Resynchronized Marker, RS), 当发生传输差错时解码器可以在下一数据帧的开头重新获得同步. 为了去除数据帧之间的相关性, 算术编码器在每一个数据帧的开头需要进行初始化, 使该数据帧可以进行独立的算术编码. 因为重新初始化会降低编码器的压缩效率, 所以为了减少编码效率的损失, 通常数据帧都比较长. 由于算术编码自身无法在一个数据帧中定位发生差错的确切位置, 因此当检测到数据帧里存在一个差错时, 必须丢弃整个数据帧, 这样会导致 ECG 重建信号的质量大大下降.

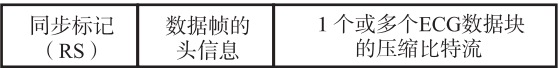


图1 用于差错恢复的数据帧结构

为保证重建信号的质量、改善差错恢复性能, 需要在数据帧中定位差错的位置. 一种简单的方法就是在一个数据帧中通过添加片段标记^[3]将数据帧划分为多个片段 (Segment), 使得一个数据帧中差错的定位缩小到一个片段中, 解码器就能够对遭到差错破坏的片段之前的所有片段进行正确解码, 从差错中尽可能多地恢复出原信号. 由于片段标记需要

添加到比特流的特定位置, 而且也同样使用算术码对标记本身进行编码, 因此添加片段标记不会很大程度地增加整个比特流的长度. 同时, 每一个片段开头算术编码器不需要重新进行初始化, 这样就可以保持较高的编码效率. 图 2 给出了比特流数据帧中的片段标记.

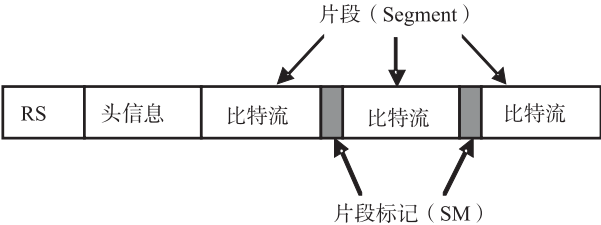


图2 含片段标记的数据帧结构

在本研究中, 首先设定目标片段大小 (Target_segment_length), 在对一个数据帧中的量化系数做算术编码过程中, 每编完一个片段的数据也就是当编码的片段大小 (Segment_length) 不小于目标片段大小时, 添加一个片段标记. 目标片段大小的设定应该适中, 一个数据帧中片段数目越多, 差错恢复性能越好, 但比特流中增加的冗余信息也就越多, 信号编码的效率也会随之降低. 片段大小应该满足下式^[3]:

$$\text{Segment_length} = 2^L, L \leq 10.$$

在 1 024 点的数据帧中设定目标片段大小为 2^L 点 (L 是离散小波分解的层数). ECG 信号经过 5 层离散小波分解, 因此设定目标片段大小为 32 (2^5) 点, 则一个数据帧被分为 32 个片段. 片段标记本身属于输入符号, 使用算术码进行编码. 用作片段标记的符号要不同于数据集合中任何可能出现的符号, 或者也可以从一个已存在的符号集合里选取极少出现的符号作为片段标记. 此时片段标记我们采用 “ZTR” 符号进行算术编码.

解码时, 先根据同步标记 (RS) 获取同步信息, 开始解码一个数据帧, 每解码出 32 个量化系数后, 紧接着如果能正确解码出一个片段标记, 则说明比特流中的这个片段是没有差错的. 反之, 如果无法在指定位置正确解码片段标记则说明前面已解码的一个片段中出现差错, 这一片段已遭到差错破坏, 此时需将最后一个正确解码的片段标记之后的所有片段丢弃, 而前面没有差错的片段则可以保留下来 (如图 3 所示), 直到获取下一个数据帧的同步信息后继续解码. 这样可以尽可能多的保留没有被破坏的数据, 有利于解码器更好地恢复 ECG 信号.

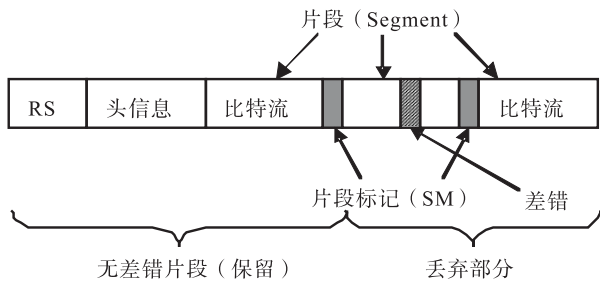


图3 出现传输差错时的数据帧

1.2 不等差错保护技术

信道编码是一种常用的抗差错方法,通过在数据比特流序列中插入一定的校验位,则能够检测并纠正信道中出现的传输差错.该方法可以大大降低误比特率,提高数据传输可靠性.然而比特流中的数据对信号重建结果的影响是不一样的,对所有的数据进行同样程度的保护是没有必要,而且对所有数据进行信道编码将大大增加传输数据所需的带宽,不利于无线信道传输.因此可以按照各部分数据的重要程度,进行不同等级的保护,对重要数据部分使用更多的校验位,对次要数据部分使用较少的校验位,通过采用不等差错保护,既可以对比特流进行有侧重点的保护,又可以大大减少传输过程中所附加的冗余.

本文结合使用不等差错保护^[4]技术以增强编码比特流的抗差错能力. ECG 信号压缩是采用小波变换、均匀量化和算术编码,我们根据比特流中不同部分对重建信号质量的贡献大小,使用具有不同纠错能力的信道编码方法加以保护. 首先比特流中的开头部分包含了整个解码过程中所需要的大部分控制信息,属于最重要的部分,如果比特流开头部分出现任一差错都可能导致解码失败. 其次在编码过程中低频、中频部分的系数包含 ECG 信号的大部分能量,在重建信号中起着重要作用,而高频部分的系数包含 ECG 信号的细节信息,在重建信号中的贡献则较小.

按比特流在重建信号中重要程度的不同将比特流分为两组,比特流开头与低频及中频部分系数比特流分为第 1 组,编码后的这一组数据对重建信号至关重要,如果它们在传输过程中没有出现错误,对其正确解码就可获得信号的基本信息. 反之,如果这部分数据出现差错,则解码过程可能失败或解码成功但信号已完全被破坏. 因此必须根据信道中可能出现的最大比特错误率 (Bit Error Rate, BER) 选用具有足够纠错能力的信道编码方法对其进行保护. 常用信道编码中的二进制 BCH 码纠错性能较好,并

且被广泛用于短波信道、移动信道等传输条件较差的信道当中,而且其编、解码的过程相对都比较简单,可以用代数方式来解决^[5-7],因此对第 1 组比特流采用二进制 BCH 码作为前向纠错的信道编码. 实验中,使用 BCH (255, 231, 3) 码对该组比特流进行差错保护,优先确保比特流开头和中、低频部分的系数在传输过程中的完全无误性. 剩余高频部分系数的比特流作为第 2 组,由于其对重建信号质量的贡献较小,因此不进行信道编码保护 (如图 4 所示). 然后将两个分组进行不等差错保护后得到的数据进行合并,并模拟在二进制对称信道 (Binary Symmetric Channel, BSC) 中传输,使用 BSC 信道不同比特错误率的差错模型来模拟无线信道引入比特差错. 在信道另一端将接收到的传输数据按原分组方式重新分组,利用相应的信道解码方法完成解码,合并信道解码后的两组数据,再利用算术解码器对合并结果进行解码,得到重建后的 ECG 信号.

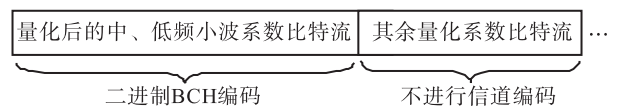


图4 不等差错保护的比特流

2 实验结果与讨论

评价 ECG 信号压缩算法和差错恢复性能的主要指标有压缩比 (Compression Ratio, CR) 和均方误差比 (Percent Root-mean-square Difference, PRD). 压缩比 CR 定义为:

$$CR = \frac{\text{原始数据比特数}}{\text{压缩数据比特数}}$$

均方误差比 PRD 定义为:

$$PRD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [f(i) - \hat{f}(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [f(i) - 1024]^2}} \times 100,$$

其中: $f(i)$ 为原始信号; $\hat{f}(i)$ 为重建信号.

本文从标准的 MIT-BIH 心律数据库中抽取一组 ECG 信号作为测试样本. 该组信号集合包含 100, 107, 109, 117, 119 共 5 个信号, 信号采样频率均为 360 Hz, 数字化精度为 11 bit. 将该组信号中每一信号取出 5 min 数据进行编码, 并模拟在不同比特错误率的 BSC 信道进行传输, 根据实际压缩文件大小求得压缩比 CR 值, 再从解码这些压缩文件后得到均方误差比 PRD 值. 下图 5 给出在比特错误率 BER

为 10^{-3} 的信道中该组 ECG 信号对应不同压缩比时的 PRD 值. 下表 1 给出该组信号集合在不同比特错误率信道中测试得到的平均 PRD 值.

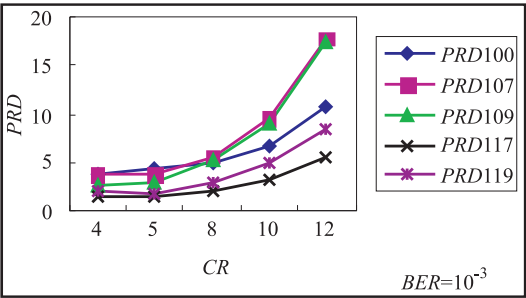


图5 信道 BER 为 10^{-3} 时5个ECG信号的 PRD 值

由表 1 可知, 当信道的 BER 增大时, 原信号与重建信号间的误差随之增大. 当压缩比 CR 值逐渐增大时, 编码器的 PRD 性能同样也会逐渐下降. 图 6 给出 117 信号第 1 个数据帧(1 024 点)在信道 BER 为 10^{-3} 时, 采用不同压缩比时得到的重建图. 从图 6 可以看出, 在压缩比为 12:1 的情况下, ECG 信号中重要的诊断信息(QRS 波)仍能有效地恢复出来. 下表 2 是 117 信号通过不同 BER 信道时的 PRD 值.

由于目前对 ECG 信号进行差错恢复方面的研究尚不多, 难以从横向和其他文献进行全面对比. 仅将 Zhitao Lu^[8] 的 SPIHT 算法与本文的方法分别对 117 信号进行编码比较. 在信道 BER 为零即信道传输无差错时, 使用文献[8]提出的分层树的集划分(Set Partitioning In Hierarchical Trees, SPIHT)算法, CR 为 8:1 时得到的 PRD 值为 1.18%. 而使用本文方法进行编码时, 在 PRD 为 1.180 338 时, CR 只有 5.27:1, 由于本文方法向比特流中附加了近 $(32/1\,024) + (24/231) \times (256/1\,024) = 5.7\%$ 的冗余信息, 使得 CR 值有所下降, 故压缩比不如前者. 但是当在信道中引入比特错误率 BER 为 10^{-5} 的传输差错时, SPIHT 算法从出错点之后的所有数据将完全错误, 解码器与编码器失去同步, 无法重建信号, 大量数据信息丢失, PRD 值陡增至完全不可以接受. 而采用本文中的差错恢复技术进行 ECG 信号

压缩编码后, 当比特流受到传输差错影响出现比特差错时, 接收端几乎能够完全无差错地恢复出原信号. 虽然由于各文献所用压缩方法不完全相同, 很难进行全面比较, 但由实验结果可以看出, 没有进行差错恢复的压缩算法即使压缩比再高, 一旦信道中出现误码就会使得信号完全无法恢复, 因此缺乏实用性. 而本文的片段标记技术和不等差错保护技术在 ECG 信号的差错恢复中起到了很好的效果, 只在比特流中附加极少冗余信息的情况下, 大幅提高了信号的抗差错能力.

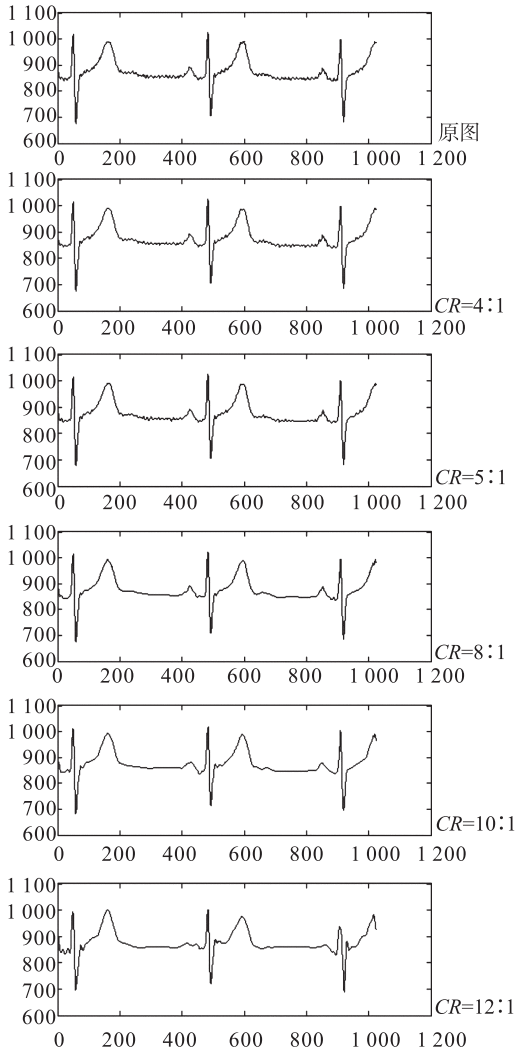


图6 117信号采用不同压缩比压缩, 通过 $BER=10^{-3}$ 信道传输后的重建图

表 1 5 个 ECG 信号在不同 BER 信道中传输的平均 PRD 值

CR	4:1	5:1	8:1	10:1	12:1
$PRD(BER = 10^{-5})$	1.277 361	1.717 738	3.954 048	6.468 352	11.983 270
$PRD(BER = 10^{-4})$	1.443 047	1.797 362	3.965 024	6.468 810	11.986 000
$PRD(BER = 10^{-3})$	2.715 328	2.861 779	4.166 901	6.576 473	12.003 280

表 2 117 信号在不同 BER 信道中传输的 PRD 值

CR	4:1	5:1	8:1	10:1	12:1
$PRD(BER = 10^{-5})$	0.816 252	1.088 711	2.017 506	2.969 028	5.491 320
$PRD(BER = 10^{-4})$	0.841 185	1.093 788	2.017 815	2.969 028	5.491 320
$PRD(BER = 10^{-3})$	1.367 176	1.564 129	2.104 018	3.014 107	5.493 532

3 结论

本文将片段标记技术和不等差错保护技术结合,应用到 ECG 信号的压缩编码中,测试其差错恢复性能.在不同比特错误率 BER 的 BSC 信道中的模拟结果表明,该方法向比特流中增加了极少的冗余信息,就使比特流具有较强的抗差错能力,极大地改善了易错信道比特差错对 ECG 信号传输的影响,保证了原信号和重建信号间较低的误差.

[参考文献]

- [1] WITTEN I H, NEAL R, CLEARY J G. Arithmetic coding for data compression[J]. Communications of the ACM, 1987, 30(4): 520–540.
- [2] MIAOU S G, LIN C L. A quality-on-demand algorithm for wavelet-based compression of electrocardiogram signals[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2002, 49(3): 233–239.
- [3] SODAGAR I, CHAI B B, WUS J. A new error-resilience technique for image compression using arithmetic coding[J]. Acoustics, Speech, & Signal Processing, 2000, 4(3): 2127–2130.
- [4] CHU T, LIU Z, XIONG Z, et al. Joint UEP and layered source coding with application to transmission of JPEG-2000 coded images[J]. IEEE Global Telecommunications Conference, 2001, 3(3): 2036–2039.
- [5] 李光彩. 数据传输链路中几种纠错编译码的算法和性能[J]. 电讯技术, 1998(4): 40–43.
- [6] SUBBARAO M W, HUGHES B L. Optimal transmission range and code rates for frequency-hop packet radio networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(4): 670–678.
- [7] 邓矣兵, 申敏. 现代移动通信中的差错控制[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 1999(1): 20–22.
- [8] LU Z, KIM D Y, PEARLMAN W A. Wavelet compression of ECG signals by the set partitioning in hierarchical trees (SPIHT) algorithm[J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 2000, 47(7): 849–856.

