

基于抗差错算术编码的不等差错保护图像传输方法

王 翊^{1,2}, 谢廷俊¹, 陆建华¹

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 中国传媒大学信息工程学院, 北京 100024)

摘要: JPEG2000 图像的分层特性要求采用不等差错保护方法以实现高效传输, 本文提出了一种新型的不等差错保护方法, 对不同位平面采用不同码率的抗差错算术码进行编码. 与基于信道编码的不等差错保护方法相比, 该方法保持了压缩码流的结构, 避免了复杂的信道成帧过程. 与已有的基于抗差错算术码的等差错保护方法相比, 该方法提高了传输图像的质量.

关键词: 联合信源信道编码; 不等差错保护; 抗差错算术编码; JPEG2000

中图分类号: TN911.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 04-0685-05

An Unequal Error Protection Scheme for Image Transmission Based on Error Resilient Arithmetic Codes

WANG Xuan^{1,2}, XIE Ting-jun¹, LU Jian-hua¹

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Information Engineering School, Communication University of China, Beijing 100024, China)

Abstract: The hierarchical structure of JPEG2000 stream calls for unequal error protection (UEP) schemes to achieve robustness efficiently. In this paper, a novel unequal error protection scheme is proposed for JPEG2000 image transmission, which encodes each bit-plane with ERAC of different code rate. Comparing with UEP schemes based on channel coding, the proposed scheme reserves the structure of JPEG2000 standard streams and avoids complicate channel framing process. Comparison with published equal error protection scheme proves the effectiveness of this method.

Key words: joint source channel coding; unequal error protection; error resilient arithmetic codes; JPEG2000

1 引言

JPEG2000^[1]作为新一代的图像编码标准,被广泛地应用于遥感、医学图像、网络和无线多媒体通信等领域. JPEG2000 的高压缩效率同时也造成了其对传输过程中的误码非常敏感, 单个的误码往往会导致大量的信息丢失. 在算术码编码过程中增加禁用符号, 产生了抗差错算术码 (Error Resilient Arithmetic Coding, ERAC)^[2]. ERAC 可以有效地抵御信道解码过程产生的残余误码, 大大提高了传输图像质量^[3~6]. ERAC 的应用使 JPEG2000 编码器同时担负压缩和差错保护两重任务, 是一种新型的联合信源信道编码技术.

ERAC 的纠错能力随着码率变化而改变^[7], 添加较高的冗余会产生较低码率的 ERAC, 相应的纠错能力较高. 另一方面, JPEG2000 编码的分层结构决定了码流中不同位置的信息对误码的敏感程度不同, 误码出现在不

同位置时造成的失真大小不同. 因此在 JPEG2000 编码器中设计基于 ERAC 的不等差错保护方案 (UEP), 对压缩码流中不同位置的算术码安排不同的冗余, 可以达到合理分配码率, 提高传输图像质量的目的.

文献[8, 9]中分别给出了两种 JPEG2000 信道编码不等差错保护传输方案, 不等差错保护能力主要来自于码率兼容的卷积编码 (RCPC) 和码率兼容的 LDPC 码 (RC-LDPC), 通过为不同的包 (packet) 安排不同码率的信息实现. 但是, 为了获得较好的性能, 上述基于信道编码的 UEP 一般需要改变信源编码输出的码流^[10], 进行复杂的信道成帧运算, 增加了系统的复杂度; 另外, 由于包中的信息重要性不尽相同, 以包为对象分配码率必然导致传输效率下降.

与传统的基于信道编码的 UEP 方案相比, 基于 ERAC 的 UEP 方法可以降低系统的复杂度, 提高系统的传输性能. 在 JPEG2000 编码中, 同一个子带的相同位平面

信息重要性是一致的,由于 ERAC 是信源压缩的一部分,使得码率分配可以很容易以各位平面为对象细致地进行调整,从而提高了码率分配的效率;另外,由于在信源压缩部分实现了 UEP,信道编码方案可以选择简单的等差错保护 (EEP),降低了系统的复杂度。

2 抗差错算术编码

ERAC 与普通的算术编码相比,增加了一定量的冗余信息(禁用符号),按照文献[2]中的方法,禁用符号是在每输出一个压缩比特时,添加一次。在解码端,如果存在误码,则解码器将以一定的概率解码得到禁用符号,从而检测到差错。利用树搜索算法可以使 ERAC 同时具有压缩和纠错能力^[3~7]。

2.1 树搜索算法

算术码可以用编码树表示,普通的算术码没有纠错能力,对应的码树是完全树,任何一个中间节点都有后续的节点,而 ERAC 对应的码树为不完全的码树,某些中间节点没有后续节点。

利用 ERAC 进行纠错解码是按照最大似然译码准则 (ML) 或者最大后验概率准则 (MAP) 对不完全码树进行搜索的过程,得到最大度量路径作为解码输出。由于算术码解码器的状态数一般都非常大,因此,无法利用维特比译码方法,而只能利用次优的搜索算法,如堆栈算法 (SA)^[6]、M 算法^[3~5]等。

2.2 纠错能力与码率关系

ERAC 的纠错能力主要取决于码率和解码算法的具体参数,这里的码率定义为添加冗余信息前后压缩序列长度之比。当添加禁用符号的比例为 r 时,ERAC 的码率为 $r = 1 + \log_2(1 - \epsilon)$ 。由于 ϵ 一般取较小的值, r 接近于 1。

以堆栈算法为例,如果堆栈大小 M 满足下面条件

$$M \geq \frac{1}{8(1-r)}$$

其中, $\epsilon = \log_2(1 - \epsilon) - \log_2(\epsilon)$ (ϵ 为二进制对称信道差错概率),单个比特翻转造成堆栈溢出的概率为^[7]

$$P_{\text{overflow}} < \frac{1}{4(r-1)} 2^{-\frac{\log_2}{4(r-1)}} \quad (1)$$

当 ϵ 较小且压缩序列较短时,可以忽略短时间内出现两个以上差错的情况,ERAC 错误解码的序列差错概率 P_S 可以近似为

$$P_S \approx P_{\text{overflow}} \cdot L_a \quad (2)$$

其中, L_a 为算术码序列长度。

3 不等差错保护方法

3.1 不同位置误差信号对重建图像的影响

JPEG2000 编码中包括了小波变换和位平面编码两

个主要步骤。小波变换的对象是变换块(tile),把变换后的各子带数据划分为编码块(coded block)再进行位平面编码。JPEG2000 的不同子带、相同子带的不同位平面对误码的敏感程度不同。我们分别考察小波变换和位平面编码对解码图像质量的影响。

通过小波变换,变换块被分解为不同子带(subband)。一级变换可以产生 4 个子带,“LL1”、“HL1”、“LH1”和“HH1”,其中“H”代表高通滤波,“L”代表低通滤波。三级变换后,产生 10 个子带,其中“LL3”是最低分辨率等级,其他 3 级分辨率等级各包括三个子带。

小波反变换过程对不同子带的信号增益不同。以 G_x 表示 L 级分辨率的某一子带信号的功率,以 G_y 表示该子带信号反变换后功率的大小, G_L 表示该子带功率增益,则^[11]

$$G_L = \frac{2^x}{x} = \frac{1}{2^{L-n}} [g_1(n) * g_2(n) * \dots * g_{L-1}(n) * g_L(n)]^2 \quad (3)$$

其中 $g_i(n) = \begin{cases} g_i\left(\frac{n}{2^{L-i}}\right) & n = 2^{L-2}k, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

$g_i(n)$ 为反变换过程中第 i 级重建滤波器冲激响应。表 1 给出了 JPEG200 标准中应用的两种小波变换不同子带功率增益。可见,较低分辨率等级子带增益是较高分辨率子带增益的 2 倍,同一分辨率等级中,HL 和 LH 子带增益是 HH 子带增益的近 2 倍。因此,出现在不同子带的误差信号,即使功率相同,反变换后的误差图像功率不同。

表 1 不同子带功率增益

| 小波类型 | LL3 | HL3/ LH3 | HH3 | HL2/ LH2 | HH2 | HL1/ LH1 | HH1 |
|------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| 9/7 | 8.4165 | 4.1832 | 2.0792 | 1.9968 | 0.9672 | 1.0113 | 0.5202 |
| 5/3 | 5.375 | 2.9196 | 1.5859 | 1.5922 | 0.9219 | 1.0384 | 0.7188 |

在解码过程中,各种解码器对于差错的处理方法不尽相同。常见的一类处理方法是遇到差错后丢弃后续的信息,直到下一个同步位置。丢弃第 bp 个位平面及后续位平面是指将这些位平面中的各比特设为 0,由此产生的误差,等于对编码块进行了标量量化后的量化误差,量化步长为 2^{-bp} 。虽然之前有文献给出量化误差功率的估计^[12],但这是在量化步长较小这一假设条件下的结果,不适用于本文的情况。

我们实际观察了几个测试图像的情况,表 2 给出了测试图像“woman”中丢弃不同位平面时误差功率变化情况,其中起始位平面是指丢弃的位平面中最高的位平面。表中给出的数据是丢弃部分位平面后产生的误差功率在整个分辨率等级中取平均。测试图像为灰度图像,大小为 2048 × 2560,编码前每像素 8 比特量化,经

过 3 级小波变换.

由表 2 可见, 丢弃较低的位平面时, 误差功率随起始位平面增高呈 4 倍增长, 但随着起始位平面的增高, 误差功率增长倍数越来越小. 类似的结果在其他测试图像中也可以观察到.

3.2 基于 ERAC 的 JPEG2000 不等差错保护方法

JPEG2000 图像传输系统端对端的失真可以表示为 $D = D_s + D_c$, 其中 D_s 是信源编码引入的误差功率, D_c 是信道误码造成的误差功率. 实际应用中, 传输速率 R 常常受一个目标速率 R_T 的限制, 即 $R \leq R_T$. 因此, 确定不等差错保护方案需要求解式 (4) 这个优化问题, 从而得到最佳的码率分配方案.

$$\min \bar{D}, \quad \text{s.t. } R \leq R_T \quad (4)$$

其中 \bar{D} 是端对端图像失真期望, $\bar{D} = D_s + \bar{D}_c$, \bar{D}_c 是 D_c 的期望. \bar{D}_c 的具体表示式是由系统检测出差错后的处理策略决定的.

JPEG2000 的位平面编码过程中, 每个位平面包含三个编码通道 (pass), 即有效性传播通道 (significance propagation pass)、幅度精细化通道 (magnitude refinement pass) 和清除通道 (cleanup pass)^[1]. 为了提高码流的抗差错性, 可以在每个位平面编码结束时编入一个分段标志 (segmentation marker) "0xA". 解码器通过检查该标志和 ERAC 检错来判断编码块内是否残存误码, 如果发现差错, 将丢弃差错位置以后的所有数据, 即把后续的位平面的值全设为零. 基于这样一个检错 - 丢弃的策略, D_c 的期望可以表示为

$$\bar{D}_c = \sum_{i, bp} D_{i, bp} P_{i, bp} \quad (5)$$

其中 $D_{i, bp}$, $i = 1, \dots, n$ 是第 i 编码块中位平面 bp 及后续位平面被丢弃引起的失真大小, $P_{i, bp}$ 是该位平面出现差错的概率.

系统总的传输速率可以表示为

$$R = \sum_{i, bp} R_{i, bp} / r_{i, bp} \quad (6)$$

其中, $R_{i, b}$ 是不加差错保护时各位平面压缩后的比特数, $r_{i, bp}$ 是各位平面分配的 ERAC 码率.

如果对不同的位平面安排不同码率的 ERAC, 使得码流中不同位置出现差错后得到的失真大小接近, 则在信道编码中没有必要应用 UEP 方案. 这样可以简化信道编码过程中信道帧的产生过程, 同时不需要传输额外信息来说明信道码率的变化. 把信道编解码过程同信道部分合并为一个广义信道 (我们这里假设为 BSC 信道), 基于 ERAC 的不等差错保护可以表达为下面的优化问题

$$\min \bar{D}, \quad \text{s.t. } R \leq R_T \quad (7)$$

其中 R_T 是设定的信源编码目标速率, 是由信源信道码

率分配方案确定的.

由于常用的抗差错算术码率很接近, 可以假设各位平面分配的 ERAC 码率都约等于一个平均值 \bar{r} , 则式 (7) 优化问题中的条件部分简化为:

$$\bar{r} \leq r_T \quad (8)$$

其中, r_T 是 ERAC 平均码率限, 由信源信道码率分配方

法确定, $r_T = \frac{R_{i, bp}}{R_{T1}}$

我们选择最小码率等于 r_T , 而最终的码率通过 JPEG2000 的压缩后率 - 失真优化算法 (PCRD-opt, Post compression rate distortion optimization) 设定^[12]. 这样式 (7) 的条件优化问题被简化为一个无条件优化问题. 由于 $D_{i, bp} > 0$, 所以式 (7) 的结果将使得常数

$$D_{i, bp} P_{i, bp} = \text{常数} \quad (9)$$

3.3 基于 ERAC 的 UEP 方案

我们以图像编码过程中小波变换级数为 3 级的情况为例, 讨论不等差错保护方案设计.

为了降低 ERAC 编解码器的运算复杂度, 我们限定加入禁用符号的过程只进行移位和减法运算, 另外, 考虑到解码时延和存储容量的要求, 实际分配方案中可选的码率包括

$$\{0.8074, 0.9069, 0.9542, 0.9773\}$$

分别对应禁用符号比例 $\{2^{-3}, 2^{-4}, 2^{-5}, 2^{-6}\}$. 根据式 (2), 压缩序列长度相同时, 上面的四个码率对应的序列差错概率大约成 2 倍递增.

JPEG2000 中 PCRD 方法应用的结果总是导致较低位平面被删除, 因此我们只在较高的位平面分配不同码率. 根据式 (9), 各子带的不同位平面被分为多个集合, 每个集合中的位平面丢弃后产生的相近的误差功率, 对集合中的位平面用相同码率的 ERAC 编码. 例如 LL3 子带中的第 1 位平面与 LH3/ HL3 子带中的第 2 位平面以及 HH3 子带中的第 3 位平面属于同一个集合. 综上所述, 我们得到不等差错保护方案如图 1 所示. 图中每个矩形表示一个位平面, 按照最高有效位 (MSB) 到最低有效位 (LSB) 自上而下排列, 每列矩形属于同一个子带. 每个位平面选择的禁用符号比例用数字标注在

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | LL3 | HL3 | HH3 | HL2 | HH2 | HL1 | HH1 |
| | | LH3 | | LH2 | | LH1 | |
| MSB | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 4 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| LSB | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |

图 1 不同位平面码率分配方案

矩形中, 数字 a 表示禁用符号比例为 2^{-a} .

表 2 “woman” 图像各编码块丢弃不同位平面产生的平均误差功率

| 起始位平面 | 编码块所属子带 | | | | | | |
|-------|---------|------------|---------|------------|--------|------------|-------|
| | LL3 | HL3 LH3 | HH3 | HL2 LH2 | HH2 | LH1 HH1 | HH1 |
| 1 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 |
| 2 | 3.49 | 2.93 | 3.20 | 3.07 | 3.20 | 2.91 | 2.77 |
| 3 | 17.60 | 10.28 | 12.86 | 11.05 | 12.78 | 9.13 | 7.84 |
| 4 | 77.90 | 31.68 | 39.65 | 32.08 | 36.64 | 23.04 | 17.30 |
| 5 | 356.87 | 86.49 | 117.84 | 88.23 | 97.37 | 53.80 | 31.91 |
| 6 | 1132.58 | 204.44 | 309.26 | 213.41 | 234.32 | 96.86 | 40.53 |
| 7 | 3750.70 | 327.50 | 705.83 | 367.73 | 418.84 | 116.89 | 41.49 |
| 8 | - | 344.86 | 1018.56 | 394.49 | 475.26 | 118.69 | 41.49 |
| 9 | - | - | 1021.35 | - | 475.26 | - | 41.49 |

4 仿真过程及结果

仿真过程中 JPEG2000 编码器中的算术码采用 ER-AC. 压缩后的图像经过 BSC 信道传输后, 进行信源解码. 测试的结果是进行 500 次图像传输得到的结果的平均值. 测试图像动态范围为 $0 \sim 2^8 - 1$, 经过 3 级二维小波变换, 编码块大小为 32×32 , 编码后的压缩率为 0.2bpp. 为了与其他码率分配方案比较, 我们把图 1 所示方案称为 UEP 方案一.

为了比较, 我们还对另外一种不等差错保护方案进行了实验. UEP 方案二中不考虑位平面的影响时, 对相同分辨率中的所有位平面选择相同的禁用符号比例, 如表 3 所示.

另外, 我们对等差错保护情况进行了实验, EEP 方案三、四中所有算术码选择禁用区间比例分别是 2^{-3} 和 2^{-6} , 实验结果记录在图 2 中.

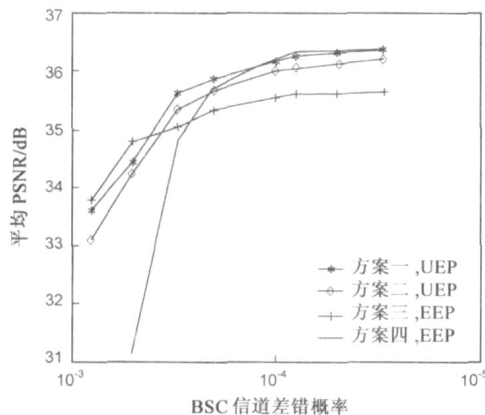


图 2 四种方案接收图像 PSNR 平均值

表 3 UEP 码率分配方案二

| 分辨率级别 | 0 | 1 | 2 | 3 |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 禁用符号比例 | 2^{-3} | 2^{-4} | 2^{-5} | 2^{-6} |

由图 2 结果可见, 不等差错保护传输得到的图像质量高于等差错保护, UEP 方案一的图像质量高于 UEP

方案二, 可见细致地为每一个位平面调整码率能够提高总的传输性能.

图 2 中 UEP 方案一的性能在较差的信道条件下性能低于 EEP 方案三, 而在较好条件下的性能接近于 EEP 方案四, 这主要是因为 UEP 方案一的最低码率选择没有根据信道条件设定. 考虑到实用系统中经过信道解码, 残存误码概率一般小于 10^{-3} , UEP 方案一的性能在常见的系统中是令人满意的.

文献[3]给出了一种抗差错算术码在 JPEG2000 中应用的方法, 这是一种等差错保护方法. 表 4 所示为本文 UEP 方案与文献[3]中方法测试结果的比较, 测试图像和信道条件与文献[3]中一致, 由表 5 可见, 本文的方法得到的图像质量好于文献[3]中的方法, 在较高的压缩率下有大于 2dB 的提高. 另外, 根据仿真结果可以推测, 随着压缩率的提高, 还有望观察到更高图像质量改善.

表 4 测试图像“Woman”, BSC 信道差错概率 10^{-4} , 不同压缩率下 UEP 方案一与文献[3]中 EEP 方案测试结果(平均 PSNR)比较

| 压缩率 | 方案一 | 文献[3]中的方法 |
|---------|---------|-----------|
| 1bpp | 36.67dB | 36.15dB |
| 0.75bpp | 34.78dB | 32.48dB |

完整的 JPEG2000 图像传输系统设计还包括了信道编码和信源编码的码率优化分配问题, 因此, 后续的研究方向将针对不同的信道编码方法设计码率分配方案.

5 结论

本文提出了一种基于抗差错算术码的 JPEG2000 图像不等差错保护方法. 由于可以细致地为每个编码块不同位平面分配保护度, 因此, 可以获得一个接近最优的方案, 提高了传输图像的质量, 另外, 该方法还具有保持信源码流结构, 简化信道编码方案的优点.

参考文献:

- [1] ISO/IEC 15444-1:2000. Information technology-JPEG2000 image coding system part 1: core coding system[S].
- [2] C Boyd, etc. Integrating error detection into arithmetic coding[J]. IEEE Transactions on Communication, 1997, 45(1): 1-3.
- [3] M Grangetto, etc. A syntax-preserving error resilience tool for JPEG2000 based on error correcting arithmetic coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(4): 807-818.
- [4] M Grangetto, etc. Joint source/channel coding and MAP decoding of arithmetic codes[J]. IEEE Transactions on Communication, 2005, 53(6): 1007-1016.
- [5] B D Pettijohn, etc. Joint source/channel coding using arithmetic codes[J]. IEEE Transactions on Communication, 2001, 49(5):

- 826 - 836.
- [6] 王翺,谢廷俊,陆建华. 一种二进制算术码的软解码算法[J]. 电子学报, 2007, 35(2) :283 - 286.
Wang Xuan, Xie Ting-jun, Lu Jian-hua. A soft decoding algorithm for binary arithmetic codes [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(2) :283 - 286. (in Chinese)
- [7] 王翺,谢廷俊,陆建华. 抗差错算术码纠错性能分析[J]. 清华大学学报自然科学版, 2007, 47(10) :1661 - 1664.
Wang Xuan, Xie Ting-jun, Lu Jian-hua. Error correction performance analysis of error resilient arithmetic code [J]. Journal Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(10) :1661 - 1664. (in Chinese)
- [8] Xiang Pan, et al. Combined source and channel coding with JPEG2000 and rate-compatible low-density parity-check codes [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(3) :1160 - 1164.
- [9] V Sanchez, et al. Efficient channel protection for JPEG2000 bit-stream[J]. IEEE Transactions on Circuits Syst. Video Technology, 2004, 14(4) :554 - 558.
- [10] N Thomos, et al. Optimized transmission of JPEG2000 streams over wireless channels [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(1) :54 - 67.

- [11] A Bilgin, et al. Scalable image coding using reversible integer wavelet transforms [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(11) :1972 - 1977.
- [12] D S Taubman, et al. JPEG2000 Image Compression Fundamentals, Standards and Practice [M]. Holand: Kluwer Academic Publishers, 2002.

作者简介:



王 翺 男, 1973 年生于山东淄博, 中国传媒大学信息工程学院副教授, 2007 年 1 月毕业于清华大学电子工程系, 获工学博士学位. 主要研究方向为无线多媒体通信、信源信道联合编码.
E-mail: wangxuan@cuc.edu.cn

谢廷俊 男, 1981 年 10 月出生于辽宁沈阳, 清华大学电子工程系硕士研究生. 主要研究方向为信源信道联合编码、差错控制编码等.

陆建华 男, 1963 年 7 月出生于江苏南通, 清华大学电子工程系教授, 博士生导师. 主要从事无线多媒体通信、深空通信等方面的教学研究工作.