

基于最优小波分组的联合信源信道编码图像传输系统

陈俊宏, 张钦宇

(哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘 要: 提出了一种适用于图像传输的, 且在率失真意义上最优的小波分组分解的图像编码算法, 不同于一般的小波分组图像编码, 所提出的图像编码器将信道信息及信道编码情况考虑到信源编码中来, 从而实现联合信源信道编码。小波分组子带编码采用位平面编码的方式, 从而可以很好地结合不等差错保护(UEP)传输。提出了结合重量递增校验矩阵的 LDPC 码(WICP-LDPC)进行图像传输的方案。在 BSC 信道上的仿真实验表明, 所提出的方法要优于使用均等差错保护的传输方案, 并且所提出的传输系统在性能上也优于近几年来新提出的几种图像联合编码传输系统。

关键词: 联合信源信道编码; 最优小波分组; 不等差错保护; 图像传输

中图分类号: TN911

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)10-0149-07

Joint source-channel coding for image transmission based on best wavelet packet

CHEN Jun-hong, ZHANG Qin-yu

(Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: A novel joint source/channel image coding algorithm was proposed based on the best wavelet packet in a rate-distortion sense. Different from other wavelet packet image coding, the channel and the channel code information were introduced to the source coding, so the proposed algorithm was a joint source-channel coding. The coding of wavelet packet sub-band was bit plane, accordingly, the bit streams could be good match to UEP. And a WICP-LDPC code was using as a channel code. The simulation results in BSC channel show that, the proposed algorithm is better than the EEP image transmission system. And the proposed algorithm is also better than several other image transmission algorithms, which proposed recently.

Key words: joint source channel coding; best wavelet packet; UEP; image transmission

1 引言

随着无线通信技术的发展, 多媒体通信得到日益广泛的应用, 其技术的发展也越来越受重视。而作为多媒体通信技术中最重要和最基础的图像传输技术近几年来已成为一个研究热点。对于传统的基于香农分离定理的分离图像传输系统, 其对编解

码器的复杂性和存储能力的要求很高, 在实际应用中代价太高难以满足, 从而激发了对更为有效的联合信源信道编码(JSCC)方法的探索和研究。目前很多具体的基于 JSCC 的图像通信系统被提出^[1-6]。这其中有一类重要的 JSCC 系统是把信源信息按照重要性程度分成不同等级, 在信道编码时对不同等级实行不等错误保护(UEP)。由于在信道传输过程中,

收稿日期: 2011-06-15; 修回日期: 2011-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61032003); 国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03004-003-02)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61032003); The National Important Science & Technology Special Program of China (2010ZX03004-003-02)

各类数据对于误比特率的敏感性是完全不同的，因此，较之 UEP，对于在所有信息都采取相同程度差错控制编码的等差错保护(EEP)方法而言，在非重要信息的保护上是一种带宽的浪费，而对重要信息的保护又显得不足。因而，近年来的很多研究都集中在 UEP 上，像 IRA 码^[7]、RCPC 码^[8]、RC-LDPC 码^[9]以及 WICP-LDPC 码^[10]等大量的信道编码被应用到 UEP 传输系统中。

基于小波变换的图像压缩编码是一类非常优秀的图像信源编码，无论是在压缩效率上，还是在顽健性上，都有很好的性能，近年来的大量研究使其获得了极大的成功。例如新一代的图像标准 JPEG 2000 的核心算法——优化截取的嵌入式编码算法(EBCOT)^[11,12]，其性能要优于以 DCT 变换为核心的上一代 JPEG 标准。基于 SPIHT 小波变换的信源编码^[13]，以及基于小波分组分解的图像压缩算法^[14,15]等大量的基于小波变换的图像压缩编码被提出，并且均取得了很好的效果。

对基于小波分组分解的图像信源编码而言，小波分组的最优剪枝是该类算法的核心技术之一，如文献[14]中提出的在率失真意义下是最优剪枝算法。然而当图像需要经过噪声信道进行传输时，文献[14]中提出的算法由于信道噪声的影响将不再是最优剪枝算法。本文提出了一种新的基于小波分组分解的图像信源编码算法，其小波分组的剪枝算法引入了信道噪声强度和信道编码码率等参数，从而在图像有噪信道传输时仍具有全局率失真意义上的最优性。在量化编码方式上，采用可将信息按其重要性程度分成不同等级的位平面编码，从而可以很好地适用于 UEP 系统。将所提出的信源编码系统结合 WICP-LDPC 信道编码系统，构成一个基于 JSCC 的图像 UEP 传输系统。

2 基于率失真的最优小波分组编码算法

小波分组的基本思想是通过非倍频带的分解，从而对某个给定的信号自适应地选择最好的基。对于最优基的选择，一般的方法就是定义一个代价函数，然后在这个完全树中查找一个子树，使得其全局的代价函数最小。如图 1 所示，在完全树的每一个分支，父亲子带的代价 $J(P)$ 与其 4 个孩子子带的代价之和 $\sum J(C_i)$ 进行比较，如果前者更大，则这 4 个子节点被保留（对应这个父节点被分解），并且将父节点的代价更新为其孩子代价之

和；否则这 4 个分支被剪去。当这个自底向上的树剪枝过程到达根节点时，使全局代价最小的最优子树就找到了。

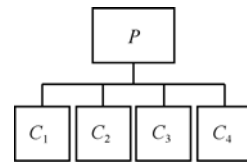


图 1 完全树的一个分支

Ramchandran 和 Vetterli^[14]提出一个基于编码率和失真的代价函数，根据这个代价函数，小波分组分解以及每个小波分组子带的量化编码在率失真意义下是最优的，该准则通过定义以下一个 Lagrange 代价函数

$$J(\lambda) = D + \lambda R \tag{1}$$

其中， $\lambda > 0$ ，为权重因子，用于控制编码率 R 与相应失真 D 之间的平衡，且 D 是用 MSE 来度量。对于任意给定的一个小波分组分解，分解树的叶节点对应最终的分组子带。假设这些子带由 $\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$ 来表示，由于率和失真的可加性，全局代价可由式(2)表示

$$J(\lambda) = \sum_{i=1}^m (D_i(R_i) + \lambda R_i) \tag{2}$$

其中， R_i 和 D_i 分别表示子带 B_i 的总编码率和相应的总失真。

此时对小波分组的最优剪枝算法为：在完全树的每一个分支，如果式(3)满足，则父亲子带被保留；否则它被分解为 4 个孩子子带。当树剪枝算法到达根节点时，对于给定的 λ ，可同时得到最优的小波分组分解和每个分组子带的最优化量化编码方式。

$$D_0 + \lambda R_0 \leq \sum_{i=1}^4 D_i + \lambda R_i \tag{3}$$

以上是针对图像压缩时对小波基的选取，没有考虑到信道噪声以及信道编码的情况。在图像传输系统中，由于信道噪声的存在，需要对信源压缩后的码流进行信道编码，这样就增加了信道编码的码率，以及由信道噪声引入的失真。

假设信道编码造成的码率增加比率，既码率的倒数为 σ ，此时全局代价函数可写成

$$J(\lambda) = \sum_{i=1}^m (D_i(R_i) + \lambda R_i + D(\sigma)) \tag{4}$$

其中， $D(\sigma)$ 是由信道噪声引入的失真。设 e 为译码

所得码字 y 与原码字 x 之间的误差, 既 $e=|x-y|$, 则, e 的期望值为

$$E(e) = (2^{\sigma R_i} - 1)P \quad (5)$$

并且

$$E(D(\sigma)) = \frac{\sum [(2^{\sigma R_i} - 1)P]^2}{n} = [(2^{\sigma R_i} - 1)P]^2 \quad (6)$$

其中, σR_i 为子带经过信道编码后的码率, $1/\sigma$ 即为信道编码码率; P 为经过信道编码后噪声信道的误比特率, 与信道噪声以及信道编码码率及编码方式相关, 对于 BSC 信道, 信道误比特率 p 即为式(6)中的 P 。而对于其他噪声信道, 在给定信源信道条件下, 信道编码码率与信道噪声之间具体的约束关系可由具体的编解码方法所确定的。因此可先计算出差错控制编码在各个信道信噪比和各信道编码码率下的误比特率, 并存储起来, 在实际的编码传输中, 编码器根据当前的信道条件和传输要求, 从存储表格中查找对应的信道编码码率后代入式(6)。

因而, 小波分组剪枝判决式变为

$$D_0 + \lambda R_0 + [(2^{\sigma R_0} - 1)P]^2 \leq \sum_{i=1}^4 D_i + \lambda R_i + [(2^{\sigma R_i} - 1)P]^2 \quad (7)$$

值得注意的是, 从式(7)可以看出, 当信道情况较好, 即信噪比很大时, P 的值趋于 0。此时式(7)退化为式(3), 得到的最优小波基即为 Ramchandran 和 Vetterli 在文献[14]中提出的基于编码率和失真的最优小波基。

综上所述, 在图像传输时, 最优小波基的选择概括如下。

- 1) 完全分解输入图像至一个给定的分深度 N , 从而得到完全分解树。
- 2) 给定一个 λ , 并根据信道情况选取 P 值, 根据信道编码的码率选择 σ 值, 再从完全分解树的叶节点开始根据各节点的代价函数(7)进行自底向上的剪枝算法, 在树的每一个节点, 判断是否要保持其 4 个子分支。当剪枝工作完成后, 就对给定的 λ 得到了其在噪声信道情况下最优的小波分组分解和每个分组子带的最优化编码方式。
- 3) 二分法调整 λ , 重复上述步骤 2), 以满足给定的目标比特率 R 。

图像进行最优小波分组分解后, 需要对其每个小波分组子带进行块分割编码。对于一个小波分组

子带 Ω , 设它的一个像素点 p 的坐标是 (i, j) , 该点的系数值由 c_{ij} 来表示。设 B 是子带 Ω 的一个子块, 如果下式满足, 则称块 B 相对于阈值 n 是重要的, 否则称其为不重要的。

$$\max_{(i,j) \in B} \{ |c_{ij}| \} \geq 2^n \quad (8)$$

块编码算法采用位平面编码的方式, 其主要目的是定位每个位平面的重要系数, 同时将一组不重要系数仅用一个符号来编码。为了达到这个目标, 算法总是先检测一个系数块的重要性状态。如果这个块在当前位平面 n 是重要的, 则被分割为 4 个相等的子块以定位其中的重要系数, 如图 2 所示; 否则, 这个块保留至下一位平面再进行重要性检测。因此可以依据位平面的重要程度对各码块进行不等差错保护信道编码。

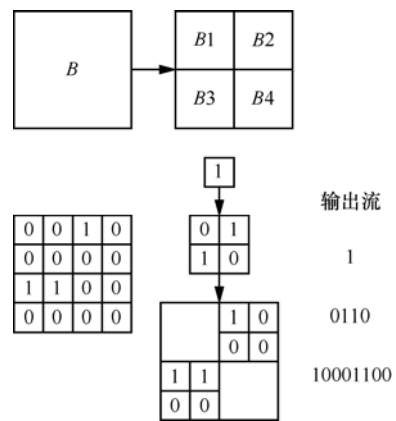


图 2 对于某一阈值重要块的分割及其输出码流

3 基于 WICP-LDPC 码的 UEP 信道编码

马丕明等人在文献[10]中构建的重量递增校验矩阵的 LDPC 码(WICP-LDPC)具有很好的 UEP 性能。对于非规则 LDPC 编码, 由于高度数的比特节点能够从邻近的校验节点得到更多的信息, 因而度数高的比特节点的错误比低度的比特节点优先得到纠正, 即随着比特节点度数的增加, 该点的错误保护的能力变的更强。而 WICP-LDPC 可以成功地实现重要信息到非规则 LDPC 高度比特点的映射, 从而达到 UEP 的目的。

对于第 2 节中的最优小波分组编码, 假设其阈值的最大值为 N , 显然阈值为 N 的位平面具有最高的重要级别, 随着阈值的减小后面几层的重要性依次降低。在 WICP-LDPC 的信息节点选取 N 个不同度数, 假设每个度数的信息节点数分别为 S_1, S_2, \dots ,

S_N , 其中, S_N 这些信息节点对应的度数最大, S_1 这些信息节点对应的度数最小, 则编码分以下 2 步。

1) 按图 3 所示, 重新排列图像码流, 组成新的信息矢量 V 。首先从阈值为 N 的位平面码流中由前往后取 S_N bit, 然后从第 $N-1$ 层平面由前往后取 S_{N-1} bit..., 从第 1 层平面由前往后取 S_1 bit 按照如下的顺序组成一个信息矢量。即第 1 层的码流比特放在最后面, 最后一层的码流比特放在最前面。循环以上的过程, 当某一位平面的数据比特取完后, 继续按照重要的信息比特放在信息矢量后面的原则在相邻平面取数据, 直到把所有的码流比特都按照上述的结构组成信息矢量。

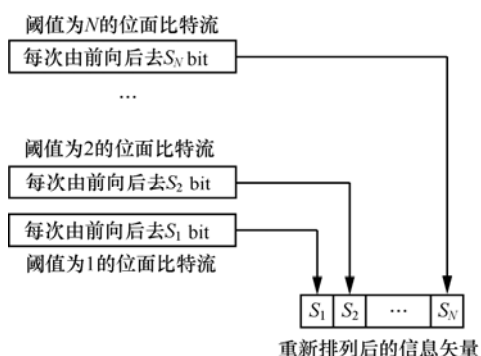


图 3 信息矢量的构成

2) 对排列后的信息矢量 V 进行系统编码。使用 WICP-LDPC 方法完成信息矢量 V 到编码码字 x 的编码。

4 联合编码方案

综上所述, 传输系统的联合编码方案如图 4 所示, 对于给定的信道及总的传输速率要求, 通过查表获得 P 值, 根据信道编码的码率获得 σ 值, 代入式 (7) 中, 并对信源图像进行小波分组分解后的剪枝。

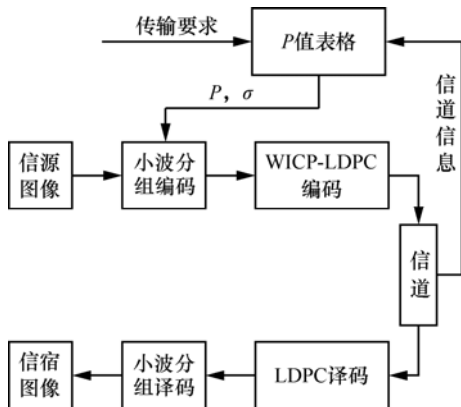


图 4 信源信道联合编码图像传输系统

对各小波子带系数进行位平面编码, 再将高位面的编码码流映射到 WICP-LDPC 的高度比特特点, 完成联合编码过程。

5 仿真实验和分析

实验采用标准 8bit 灰度图像 Lena、Goldhill 和 Barbara 在 BSC 信道上进行仿真。选取 3 组码率为 1/2 的非规则 LDPC 码, 分别对其生成矩阵进行初等变换, 将会得到 3 组列重递增校验矩阵的非规则 LDPC 码, 利用这 3 组 WICP-LDPC 码作为传输系统的信道编码进行对比实验。

选取的第 1 组信道编码码长为 8 192, 码率 1/2, 即(8 192, 4 096)非规则 LDPC 码, 其生成列多项式为

$$\lambda_1(x) = 0.132 2x + 0.124x^2 + 0.330 6x^{19} + 0.413 2x^{49} \quad (9)$$

行多项式为

$$\rho_1(x) = 0.867 8x^{14} + 0.132 2x^{15} \quad (10)$$

第 2 组非规则 LDPC 码为(10 000, 5 000), 其生成列多项式为

$$\lambda_2(x) = 0.220 033x + 0.222 611x^2 + 0.000 1x^3 + 0.000 919x^5 + 0.069 962x^6 + 0.201 925x^7 + 0.000 531x^{14} + 0.001 791x^{28} + 0.282 128x^{29} \quad (11)$$

行多项式为

$$\rho_2(x) = 0.254 08x^6 + 0.951 871x^7 + 0.047 177x^8 \quad (12)$$

第 3 组非规则 LDPC 码为(10 000, 5 000), 其生成列多项式为

$$\lambda_3(x) = 0.238 82x + 0.295 15x^2 + 0.032 61x^3 + 0.433 42x^{10} \quad (13)$$

行多项式为

$$\rho_3(x) = 0.430 11x^6 + 0.569 89x^7 \quad (14)$$

所选取的 3 组 WICP-LDPC 码的各项参数见表 1。

由于信道编码的码率为 0.5, 因而在信源编码时, 参数 $\sigma=2$ 再结合 BSC 信道的误比特率 p 完成信源编码, 其中小波分组分解使用了 Daubechies 9/7-tap 滤波器组, 分解深度为 5, 图 5 分别给出了 Lena 图在 BER 为 0.01, 0.05, 0.1 时, 用式(7)作为小波分组剪枝判决式, 剪枝后的小波分解框架, 同时作为对比, 图 5 中也给出了信道噪声为 0 时, 即剪枝判决式(7)退化为式(3)时 Lena 图的小波分解结

表 1 各组 WIPC-LDPC 参数

组次	码长	码率	最优度数	最优节点数	次优度数	次优节点数	最低度数	最低节点数
第 1 组	8 192	1/2	50	512	20	1 024	3	2 560
第 2 组	10 000	1/2	30	815	10	1 546	2	3 039
第 3 组	10 000	1/2	11	1 485	5	1 708	2	1 807

构。可以看到，在信噪比较大时小波分组分解框架的变动较小。

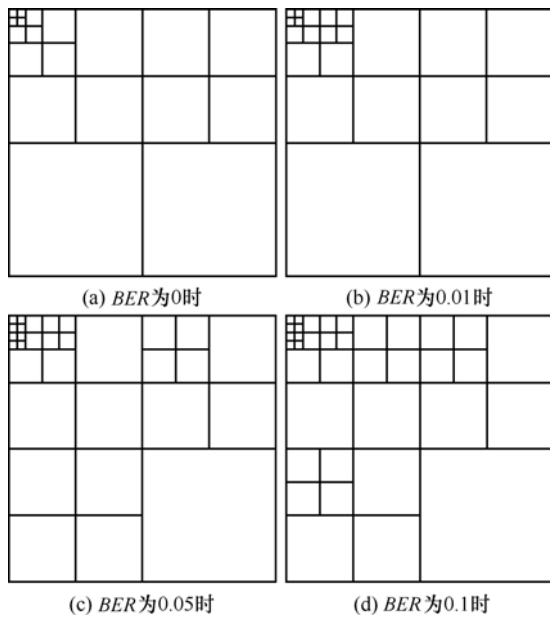


图 5 不同 BER 下 Lena 图的小波分解结构

信道编码时先按所述方法将图像码率排列成信息矢量，再进行系统编码。图 6、图 7 分别给出了实验中 3 幅图像在传输码率为 0.5bit/pixel 和 0.25bit/pixel 时重建图像的峰值信噪比 PSNR 与 BSC 信道误比特率 BER 之间的关系。

由表 1 可以看出，第 1 组 WIPC-LDPC 码的最高级别比特节点的度数最大，与其他级别节点间性能差异最明显，但其最优比特的数量却最少，只占有效比特的 12.5%，而第 2 组和第 3 组却占到了 16.3%和 29.7%，因而可以认为其 UEP 的特征更明显。从图 6 和图 7 中可以看出采用第 1 组的 WIPC-LDPC 编码的重构图像效果要好于第 2 组和第 3 组的。为了更进一步地对比，用式(9)和式(10)生成的 LDPC 码，即第 1 组 WIPC-LDPC 的生成 LDPC 码作为信道编码，做了 EEP 传输模式下的仿真实验，其结果如图 6 和图 7 所示。显然，UEP 方案要优于 EEP，并且这种优势在信道条件恶劣的情况下更加明显。此外，在使用 WIPC-LDPC 作为信

道编码的 UEP 传输时，WIPC-LDPC 码的 UEP 特征越明显，其传输效果越好。

由于篇幅所限，在这里仅给出了 Lena 在信道 BER 为 0.03 和 0.1 时，不同传输码率下的重建图像，如图 8 所示，其中，图 8(a)和图 8(b)传输码率为 0.25bit/pixel，图 8(c)和图 8(d)传输码率为 0.5bit/pixel。

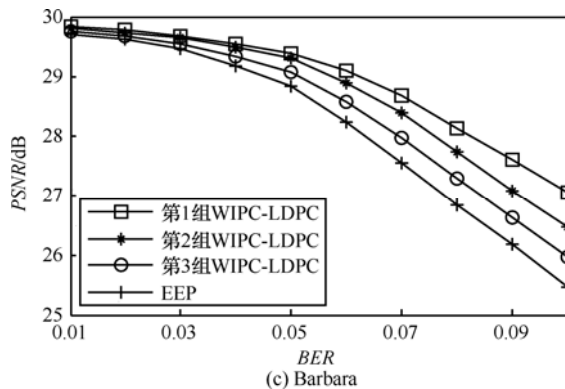
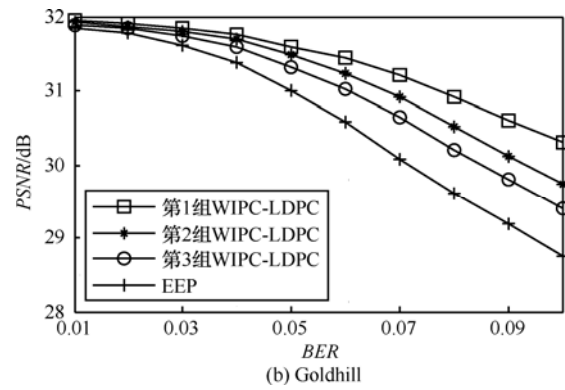
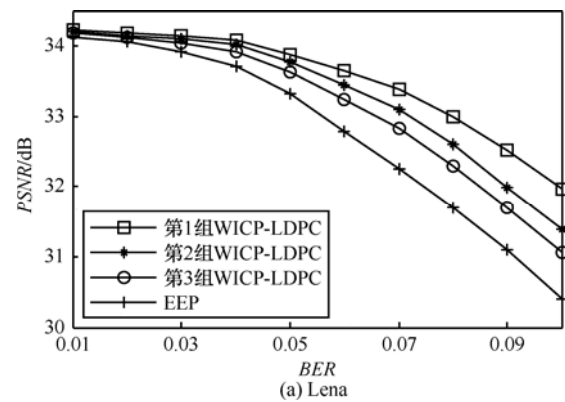


图 6 传输码率为 0.5bit/pixel 时重建图像的 PSNR

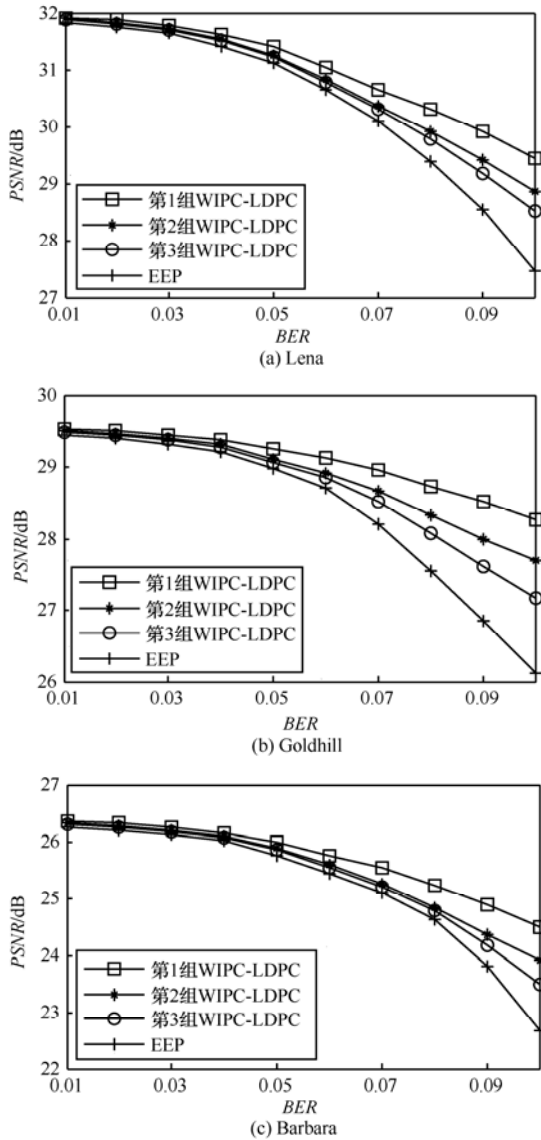


图 7 传输码率为 0.25bit/pixel 时重建图像的 PSNR



图 8 Lena 的重建图像

表 2 和表 3 给出了几种近几年提出的图像传输系统与本文所提出系统的比较, 其中, Fresia 等人在文献 [4] 中提出的系统使用 JPEG 2000 和 RC-Turbo 码作为传输系统的信源信道编码器, Lan 等人在文献 [7] 中的系统使用了 SPIHT 和 IRA, Sanchez 在文献 [8] 中提出的系统则使用了 JPEG 2000 和 RCPC 码。在传输码率为 0.25bit/pixel 时, 三幅重建图像的 PSNR 值如表 2 所示, 表 3 为传输码率在 0.5bit/pixel 时, 3 幅重建图像的 PSNR 值。

表 2 传输码率为 0.25bit/pixel 时, 重建图像的 PSNR 值

BER	算法	PSNR/dB		
		Lena	Barbara	Goldhill
0.1	文献[8]中算法	29.03	24.11	27.69
	文献[4]中算法	29.21	24.25	27.92
	文献[7]中算法	29.36	24.33	27.99
	本文算法	29.44	24.49	28.27
0.03	文献[8]中算法	31.30	25.22	29.16
	文献[4]中算法	31.32	25.99	29.21
	文献[7]中算法	31.73	26.18	29.27
	本文算法	31.77	26.25	29.41

表 3 传输码率为 0.5bit/pixel 时, 重建图像的 PSNR 值

BER	算法	PSNR/dB		
		Lena	Barbara	Goldhill
0.1	文献[8]中算法	31.10	26.19	28.60
	文献[4]中算法	31.76	26.77	29.89
	文献[7]中算法	31.92	26.91	28.92
	本文算法	31.97	27.03	30.31
0.03	文献[8]中算法	33.15	29.12	31.38
	文献[4]中算法	33.50	29.41	31.50
	文献[7]中算法	34.10	29.30	31.36
	本文算法	34.13	29.68	31.85

文献 [7] 所提出的传输系统使用 SPIHT 作为信源编码, 信道编码使用 IRA 码, 其中, IRA 码是一种具有接近香农限性能的码, 与本文所使用的信道编码类似, 其 UEP 特性主要也体现在不同度数的节点具有不同的抗误码能力上, 该系统在传输 Lena 图时具有很好的性能, 本文所提出方法与其相比只有微弱的优势 (平均 0.05dB 的增益), 特别是在高信噪比的传输条件下 (只有 0.03dB 的增益), 这是由于在信噪比较高的情况下 Lena 图像的最优小波分解结构基本上就是通常的金字塔分解, 因而在最优

小波分解结构与金字塔分解差异较大的 Barbara 和 Goldhill 图的实验中具有更高增益, Barbara 平均提高 0.19dB, Goldhill 平均提高 0.58dB。文献[4]和文献[8]所提出的系统均使用 JPEG 2000 作为信源编码器, 在信道编码时, 也均采用了率兼容的信道编码对信源图像进行分级保护, 其中文献[4]中使用的 RC-Turbo 码的性能更优, 然而这 2 种信道编码与本文所使用的 WIPC-LDPC 码及 IRA 码相较而言, 不具备线性时间编码和译码的特性。对于 Lena 图, 本文所提出方法比文献[4]所使用的方法平均提高 0.33dB, 对于 Barbara 和 Goldhill 图, 其平均 PSNR 的提高分别是 0.26dB 和 0.33dB。图 9 给出了 Lena 图在传输总码率为 0.25bit/pixel, 信道 BER 为 0.03 时重建图像的放大细节, 从中可以看出本文所提出的方法比文献[4,7,8]中的方法保持了更多的细节信息。

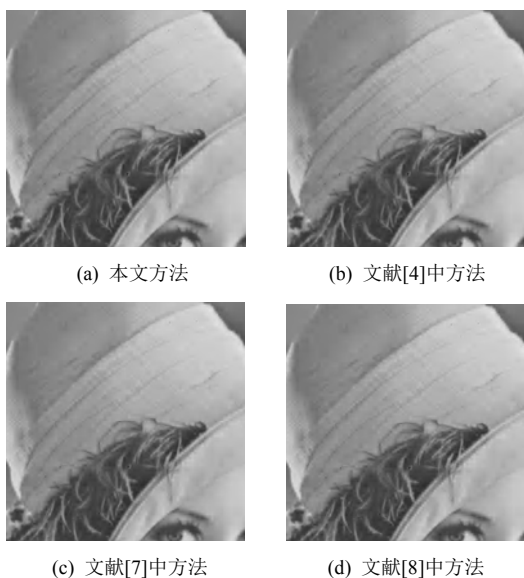


图 9 Lena 在传输码率为 0.25bit/pixel 信道, BER 为 0.03 时重建图像的放大细节

与使用固定子带分解的图像传输方法相比, 本文所提出的方法在信源编码时的计算复杂度相对较大, 这主要是因为算法需要对完全分解树进行多次剪枝以及查找最优小波分组分解, 但是这一部分计算均在发送端完成, 而在接收端的信道译码所耗时间却要低于文献[4, 7, 8]中使用的方法。

6 结束语

本文提出了一种在率失真意义上具有最优的基于小波分组分解的图像编码算法。所提出的图像编码器在信源编码过程中引入了信道误比特率 P 以

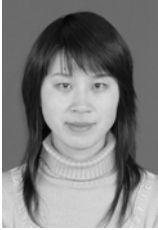
及信道编码的码率 σ 等参数, 将信道信息及信道编码情况考虑到信源编码中来, 采用联合信源信道编码的方式来实现图像在有噪信道中的可靠传输。构建了以 WIPC-LDPC 码作为信道编码的图像传输系统, 从 BSC 信道的仿真结果上来看, 所提出的方法具有很好的性能, 无论从主观质量上, 还是在客观度量上, 均要优于 Fresia、Lan 和 Sanchez 等人提出的方法。在进一步的工作中, 将对查找最优小波分组分解的快速算法进行研究。

参考文献:

- [1] SHERWOOD P G, ZEGER K. Progressive image coding for noisy channels[J]. IEEE Signal Processing Letter, 1997, 4(7): 189-191.
- [2] BABUSTER B, BELZER B, FISCHER T. Robust image transmission using JPEG 2000 and turbo-codes[J]. IEEE Signal Processing Letter, 2002, 9(4): 117-119.
- [3] PAN X, BANIHASHEMI A H, CUHADAR A. A fast trellis-based rate-allocation algorithm for robust transmission of progressively coded images over noisy channels[J]. Transactions on Communications, 2006, 54(1): 1-6.
- [4] FRESIA M, LAVAGETTO F. Determination of optimal distortion-based protection in progressive image transmission: a heuristic approach[J]. Transactions on Image Processing, 2008, 17(9): 1654-1662.
- [5] KIM H, ANNAVAJALA R, COSMAN P, *et al.* Source-channel rate optimization for progressive image transmission over block fading relay channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(6): 1631-1642.
- [6] SABIR M F, BOVIK A, HEATH R, *et al.* Unequal power allocation for JPEG transmission over MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(2): 410-421.
- [7] LAN C, XIONG Z, NARAYANAN K R. Source-optimized irregular repeat accumulate codes with inherent unequal error protection capabilities and their application to scalable image transmission[J]. Transactions on Image Processing, 2006, 15(7): 1740-1750.
- [8] SANCHEZ V, MANDAL M K. Efficient channel protection for JPEG2000 bitstream[J]. IEEE Transactions on Circuits Syst Video Technology, 2004, 14(4): 554-558.
- [9] PAN X, CUHADAR A, BANIHASHEMI A H. Combined source and channel coding with JPEG 2000 and rate-compatible low-density parity-check codes[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(3): 1160-1164.
- [10] 马丕明, 袁东风, 杨秀梅. 非规则 LDPC 码的不等错误保护性能研究[J]. 通信学报, 2005, 26(11): 132-136.
- [11] MA P M, YUAN D F, YANG X M. Research on unequal error protection of irregular LDPC codes[J]. Journal on Communications, 2005, 26(11): 132-136.
- [12] ATZORI L. Transmission of JPEG 2000 images over wireless channels with unequal power distribution[J]. IEEE Trans Consumer Electronics, 2003, 49(4): 883-888.

- [30] 石江涛, 王永纲, 戴雪龙等. 自相似网络业务流量的研究与实现[J]. 通信学报, 2005, 26(6): 112-117.
SHI J T, WANG Y G, DAI X L, *et al.* On study and implementation of self-similar network traffic[J]. Journal on Communications, 2005, 26(6): 112-117.
- [31] PARK K, WILLINGER W. Self Similar Network Traffic and Performance Evaluation[M]. New York: Wiley, 2000.
- [32] NORROS I. On the use of fractional brownian motion in the theory of connectionless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(6):953-962.
- [33] HOLLOT C V, MISRA V, TOWSLEY D. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows[A]. IEEE INFOCOM 2001[C]. Anchorage, Alaska, USA, 2001. 1726-1734.

作者简介:



别玉霞 (1981-), 女, 山东潍坊人, 南京理工大学博士生, 主要研究方向为导航制导与控制、卫星通信等。



潘成胜 (1962-), 男, 江苏宜兴人, 大连大学教授, 南京理工大学博士生导师, 主要研究方向为网络协议等。



刘海燕 (1963-), 女, 黑龙江萝北人, 大连大学教授, 主要研究方向为卫星网络、信号处理等。



王延春 (1977-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 南京理工大学博士生, 主要研究方向为网络管理、资源优化等。

(上接第 155 页)

- [12] MAHIN T, ATOUSA H. Unequal power allocation for transmission of JPEG2000 images over wireless channels[A]. 2009 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'09)[C]. Honolulu, 2009. 3279-3284.
- [13] 肖嵩, 张方, 吴成柯. 基于小波 SPIHT 的联合信源信道编码新方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(3): 281-286.
XIAO S, ZHANG F, WU K C. A new method of joint channel coding based on SPIHT[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(3): 281-286.
- [14] RAMCHANDRAN K, VETTERLI M. Best wavelet packet bases in a rate-distortion sense[J]. IEEE Trans Image Process, 1993, 2(4): 160-175.
- [15] YANG Y, XU C. A wavelet packet-based rate-distortion optimization algorithm for block partitioning image coding[J]. Sci China Ser F: Information Sciences, 2008, 51(8): 1036-1054.

作者简介:



陈俊宏 (1984-), 男, 湖南永州人, 哈尔滨工业大学深圳研究生院博士生, 主要研究方向为数字图像处理、信源信道联合编码、小波理论、人工智能神经网络等。



张钦宇 (1972-), 男, 江苏扬州人, 哈尔滨工业大学深圳研究生院电子与信息工程学院院长、教授, 主要研究方向为无线数据传输、移动通信、无线通信网、生物医学电子、人工智能神经网络等。