

一种多参数优化的联合信源信道编码方法*

张丹^a, 李晓峰^a, 简冲^a, 赵二虎^b, 熊蓉^a

(电子科技大学 a 通信与信息工程学院; b. 光互联网与移动信息网络研究中心, 成都 611731)

摘要: 针对 JPEG2000 码流的渐进传输特性, 提出了一种多参数优化的联合信源信道编码方法, 即 MPO-JSCC。在码率分配的基础上, 动态地选择 Turbo 码交织长度、迭代译码次数, 通过优化编码器多个参数更好地执行不等差错保护策略, 同时加入 JPEG2000 容错工具, 在接收端利用错误掩藏机制以提高图像解码成功率。将该方法应用于噪声信道的图像传输系统中, 仿真结果表明, MPO-JSCC 既能在不增加系统复杂度及延迟时间的同时提高重建图像的质量, 又能节省系统发射功率, 具有一定的现实指导意义。

关键词: JPEG2000; Turbo 码; 不等差错保护; 联合信源信道编码; 多参数优化

中图分类号: TN919.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2010)04-1530-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.04.092

Multi-parameter optimized joint source channel coding method

ZHANG Dan^a, LI Xiao-feng^a, JIAN Chong^a, ZHAO Er-hu^b, XIONG Rong^a

(a. School of Communication & Information Engineering, b. Research Centre for Optical Internet & Mobile Information Networks, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The paper presented a multi-parameter optimized joint source channel coding method (MPO-JSCC), combined with JPEG2000 and Turbo codes for image transmission. On the basis of conventional layered-rate allocation mechanism, also chose the interleave length and iterative decoding times dynamically, according to the importance of that quality scalable bitstream for image recovery. Introduced the error resilient tools JPEG2000 provided to improve the image reconstruction ratio at the receiving end. Compared to the approaches reported in the literature, the MPO-JSCC method gives better compression efficiency while having higher coding gain, and reduces the transmission power budget.

Key words: JPEG2000; Turbo codes; unequal error protection; joint source channel coding; multi-parameter optimized

0 引言

在无线信道上进行图像数据传输, 需要解决的两个主要问题是数据量大和信道衰落显著。传统的图像传输模型是基于香农分离理论^[1]建立的, 采用信源编码器和信道编码器串行级联结构。这种分离的编码模型虽然实现简单, 但没有充分利用信源信道之间的相关性, 使译码性能受到了限制。近年来, 联合信源信道编码技术^[2, 3] (joint source channel coding, JSCC) 得到了越来越多的关注。它的主要思想是信道编码器利用信源压缩编码产生的边信息加以控制, 挖掘两者之间的相关性, 以提高编码的总体效率。经典的联合信源信道编码方法^[2-6] 主要有: 不等差错保护 (unequal error protection, UEP)、信源信道码率分配 (rate allocation)、容错信源编码 (error resilient source coding) 以及联合信源信道译码等。其中不等差错保护通过对不同级别的数据进行分级纠错控制, 实现简单且有效, 因而备受关注。

就静止图像而言, 压缩性能最好的 JPEG2000 标准能够提供按质量分层的码流结构、支持图像渐进传输^[4], 非常适用于不等差错保护的联合信源信道编码。文献 [5, 6] 分别研究了采用 RS 码、RCPC 码 (rate compatible punctured convolutional

code) 对 JPEG2000 码流进行不等差错保护的性能。但是 RS 码、RCPC 码的纠错能力有限, 尤其在低信噪比下误比特率极高, 基本上不能成功解码恢复 JPEG2000 图像。另一方面, Turbo 码由于采用了迭代译码的思想, 纠错性能接近香农限, 具有良好的发展前景。Banister 等人^[7] 首次提出了用 Turbo 码对 JPEG2000 图像进行传输的方法, 将整个编码码流分成固定长度的数据包, 讨论了数据包的码率分配问题。相比于其他信道编码方案, 基于 Turbo 码的 JSCC 图像传输系统在相同误比特率要求下, 编码增益明显要高得多。文献 [8] 在文献 [7] 的基础上以 JPEG2000 编码通道为单位, 采用动态规划机制寻求最佳码率分配方案, 提出了一种基于 Turbo 码的联合信源信道编码方法。但它们在实现不等保护时都只考虑了 Turbo 码码率这一因素, 单纯从加大编码速率来对重要数据进行保护, 这就势必降低了编码效率, 而且没有充分挖掘 JPEG2000 和 Turbo 码其他有利于 JSCC 实现的优点; 另外码率分配方案大都比较复杂, 计算量大, 不利于工程实现。

基于以上考虑, 本文提出了一种多参数优化的联合信源信道编码方法, 即 MPO-JSCC。该方法分别采用 JPEG2000 和 Turbo 码进行信源信道编码, 通过联合调整多个编译码参数完成 JSCC 以提高系统整体性能。首先采用 JPEG2000 标准中

收稿日期: 2009-07-13; 修回日期: 2009-09-03 基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2004AA823120); 国家自然科学基金资助项目 (10376005)

作者简介: 张丹 (1984-), 女, 湖南汝城人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像编码理论与技术 (dan.zhang@uestc.edu.cn); 李晓峰 (1963-), 男, 四川成都人, 教授, 主要研究方向为多媒体图像编码技术、无线通信系统等; 简冲 (1984-), 男, 湖北恩施人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理; 赵二虎 (1985-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信与网络; 熊蓉 (1985-), 女, 江西高安人, 硕士研究生, 主要研究方向为多媒体传输码率控制。

有的容错工具,使信源编码承担一部分纠错任务;然后利用输出码流的质量渐进信息,根据输入比特流重要性的不同调整 Turbo 编码参数(码率、交织长度)执行不等保护 UEP 策略;最后在接收端信道译码时,根据编码端传递过来的比特流重要性信息对各个质量层迭代不同次数。通过计算机仿真,将本文的 MPO-JSCC 方案与传统的均等差错保护(equal error protection, EEP)编码、单个参数的不等保护方案相比较,仿真结果表明:在给定编码效率的前提下,MPO-JSCC 加强了对重建图像贡献大的质量层的保护,减小了后面质量层的系统开销,并且没有增加处理延时以及实现复杂度,大大提高了接收端恢复出来的图像质量。

1 多参数优化的联合信源信道编码

图1是基于 JPEG2000 和 Turbo 码的 JSCC 图像传输系统结构框图。首先将原始图像送入 JPEG2000 编码器,信源编码器同时向信道编码器传递信源边信息,进行不等差错保护的 Turbo 编码^[9],BPSK 调制后通过信道传输出去;在接收端,信号经相干解调后送入 Turbo 译码器,译码器根据信道信息以及前面编码模块传递的码流重要性信息分层译码,再经信源译码后输出重建图像。

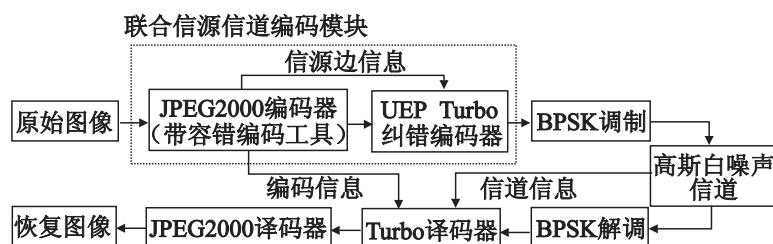


图1 JSCC图像传输系统结构框图

传统的 JSCC 图像编码通常仅考虑信源信道间的码率分配,忽略了其他编码参数对系统性能的影响。它通过对码流的各个质量层赋予一个合适的信道速率来实现不等差错保护。随着多媒体数据业务量的增大,无线信道带宽有限,必须对数据进一步压缩以提高传输效率,这就对编码比特流的抗差错能力提出了更高的要求。在基于 JPEG2000 和 Turbo 码的编码系统中,编码方法本身就具有很多适合 JSCC 实现的优点,本文就是在码率分配的基础上利用 JPEG2000 的容错机制,配合其他编码参数的优化调整,在不增加处理延时的前提下增强接收端重建图像的质量。

1.1 JPEG2000 容错编码工具

JPEG2000 提供了一个质量可分级的码流结构^[10]支持图像的渐进传输。虽然其采用的熵编码器压缩性能优异,但输出的码流对信道噪声十分敏感,一个比特错误就有可能造成接收端数据包的不同步,导致整个译码失败。因此,对于图像在无线信道中的传输,JPEG2000 提供了一些限制错误传播的方法,分别作用于熵编码层和数据包层。表1总结了该标准中提到的容错工具^[4]。

表1 表1 JPEG2000 中的容错工具

工具类型	方法
熵编码层	1. 编码子块独立编码
	2. 比特平面扫描中算术编码器的中断与重置
	3. 选择性算术编码器旁路
数据包层	4. 分段符号
	5. 短包格式
	6. 重新同步标记

这些工具是信源编码时在压缩码流中引入的,使得码字对信道差错具有一定的检测和纠正能力。从这个意义上看,JPEG2000 是一种特殊的容错信源编码,由它构成的图像传输

系统更容易引入 JSCC 策略。但这种容错机制主要应用在信道差错较少的场合,在强衰落环境下必须加入信道编码进行差错控制,因此笔者考虑将它与不等差错保护结合起来,通过信道估计设定噪声阈值进一步提高系统的可靠性。

1.2 Turbo 码的编码参数

Turbo 编码器的性能与编码码率、交织器长度、分量编码器的内部结构、译码算法、迭代次数等因素均有关系^[11]。为了达到特定的误码率要求,往往需要寻找一组适合的参数矢量,在系统性能与处理延时之间取得平衡。不同参数的选取对 Turbo 编码性能的影响如图2所示。

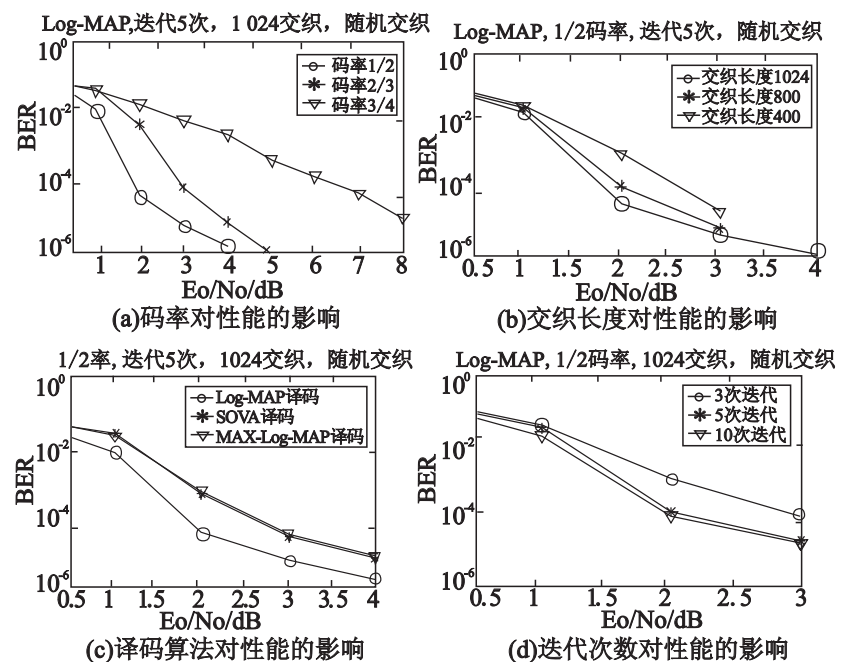


图2 Turbo编码参数的选取对系统性能的影响

1) 编码码率 典型的由两个分量编码器组成的 Turbo 编码系统码率为 1/3,输入 1 位输出 3 位,其中包含两个校验位。理论上通过改变删除矩阵可以得到任意码率的 Turbo 码。码率越低,纠错能力越强,但编码效率也越低,如图 2(a)。

2) 分量编码器结构 分组码、卷积码都可以作为 Turbo 码的成员码。当选用分组码或非递归卷积码时,误比特率与交织长度无关,不可能为系统提供交织器增益,为了提高编码性能可采用递归系统卷积码(recursive systematic coding, RSC)。

3) 交织长度 交织器的长度决定了信息位帧的大小,也决定了系统的时延。一般来说,交织器的长度比较大时,译码效果好,但同时编译码时间也相应较长。为了保证传输时延,对交织器的大小也就有了一定的限制,如图 2(b)。

4) 译码算法 Turbo 码的译码算法很多,有 MAP、Log-MAP、MAX-Log-MAP 和 SOVA 等。资料表明,MAP 算法和 Log-MAP 效果最好,并且 Log-MAP 是 MAP 的一种转换形式,两者误码率相当,但 Log-MAP 的运算量要比 MAP 小很多,工程中易实现,如图 2(c)。

5) 迭代次数 在小信噪比时,迭代次数越多,性能越好;而在大信噪比时迭代次数对系统性能影响不大,出现所谓的错误平台。因此,本文的 Turbo 译码次数需从延时及性能两方面综合考虑,如图 2(d)。

2 MPO-JSCC 的实现

如前文所述,JPEG2000 码流质量分层的特点为 UEP 的实现提供了现成的比特排列;另一方面,Turbo 码的性能受多方面的影响:一般来讲交织越长,编码器约束长度越大,迭代译码次数越多,纠错性能就越好,但其结构也越复杂。为了满足图像的实时传输,需要在两者之间作出权衡,针对不同质量层适当地调整系统编码参数,实现 MPO-JSCC。该方法的工作流程如

图 3 所示,主要包括四个步骤。

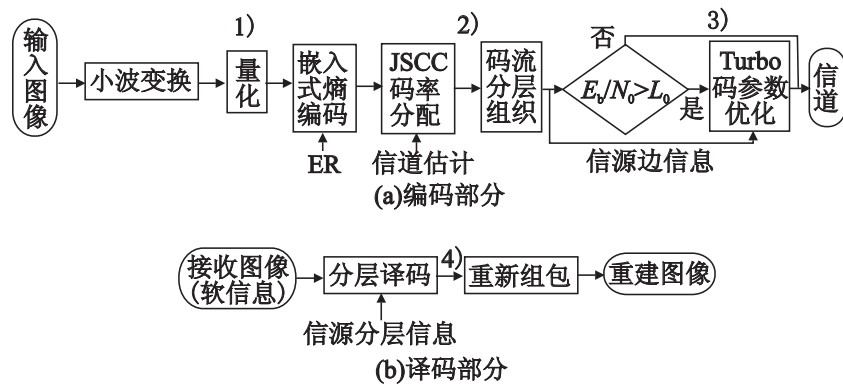


图3 MPO-JSCC工作流程

1) JPEG2000 信源编码 首先依据应用场景确定小波分解类型、编码子块尺寸、分层数目等编码参量、执行信源编码。同时选择编码模式为: 比特平面扫描中算术编码器的中断与重置, 在码流组包时加入重同步标记。

2) JSCC 码率分配 首先信道估计, 确定传输的总体码率, 再结合率失真优化理论分配各质量层的具体码率^[5], 并初始化一个信道信噪比阈值 L_0 ; 然后分层组织数据, 形成质量渐进的二进制比特流。

3) 假设信道信噪比为 E_b/N_0 , 阈值为 L_0 。若 $E_b/N_0 < L_0$, 则信道条件良好, 可以绕过信道编码步骤直接传输; 否则进行多参数优化的 Turbo 编码。具体分两步: a) 以 1/2 速率的 RSC 分量编码器为母码, 通过凿孔周期性地去除某些校验位信息, 构造出一个码率可变的 RCPT 编码器 (rate compatible punctured turbo codec); 然后以质量层为单位, 分配一组单调递增的编码速率^[5]。b) 调整 RCPT 编码器内部的交织器长度, 对恢复图像贡献高的质量层构造长码交织器, 实现随机编码; 反之采用短码交织器, 以短帧为单位进行编解码以平衡传输时延。

4) 分层译码 将 MAP 算法中的乘法运算转换为加法运算, 进行 Log-MAP 译码, 同时将译码器的输入/输出相应地修正为对数似然比的形式; 根据编码部分传递过来的分层信息动态地选择迭代译码次数, 随着码流重要性的递减依次减少迭代次数; 最后合并码流, 在信源解码端采用错误掩藏方式重建原图像。

为了模拟图像的整个传输流程, 本文将经信道编码后的数据先通过 BPSK 调制, 然后进入噪声信道。当信道中引入太多误码时, 接收端可能无法正确进行 JPEG2000 解码, 因此 MPO-JSCC 将解码成功率作为系统评价标准之一。下面给出解码成功率的定义:

$$I = n_s/n \times 100\%, \quad (1)$$

其中: n_s 为 n 次实验中成功解码的次数。对于成功解码的图像, 将其与原图像进行比较和评价。常用的评价参数有均方误差和峰值信噪比等, 本文选择峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 作为评价指标。PSNR 的定义如下: 给定一幅 $M \times N$ 的数字图像 $I(x, y)$, 其参考图像为 $I_x(x, y)$, 那么图像 $I(x, y)$ 的峰值信噪比为

$$\text{PSNR} = 10 \log \frac{L_{\max}^2}{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} |I(x, y) - I_x(x, y)|^2} \quad (2)$$

其中: L_{\max} 为图像的最大灰度值。本文采用的测试图像有 256 个灰度值, 所以 $L_{\max} = 255$ 。

3 仿真结果及分析

3.1 仿真平台

3.1.1 信源编码端

选择 JPEG2000 标准参考软件 Kakadu v2. 2. 3^[12] 作为图像

信源编解码平台。测试图像为标准的 512 × 512 8 bit 灰度图 Lena。编码时小波分解级数设为 3, 码率取值为 0. 250、0. 125 0、0. 062 5 bit/pixel, 这样编码输出的码流就被组织成重要性依次递减的三个质量层。为了运用 JPEG2000 信源容错工具, 编码时选取 ERTERM 和 RESTART 模式^[8], 并在每个 packet 前加入 SOP 标志, 最后 JPEG2000 编码器输出的图像为 lena. j2c, 数据约为 8 KB。

3.1.2 信道编码端

本文所采用的不等级差错控制码率分配方案, 综合考虑了各质量层在整幅图像中所占的比例大小以及系统对信道编码效率的具体要求。信源编码压缩出来的 8 KB 数据被分割为三个质量层, 第一层为前面的 4096 Byte, 第二层为接着的 2048 Byte, 剩余的为第三层。本文分别比较了以下六种信道保护方式下 JPEG2000 码流的传输性能:

a) 无信道编码保护, 直接将 JPEG2000 码流 (有/无容错编码工具) BPSK 调制后进行传输。

b) 采用不同速率的 RS 码对 JPEG2000 码流进行不等差错保护^[5, 13], 即 UEP RS。

c) 采用不同速率的 RCPC 码对 JPEG2000 码流进行不等差错保护^[6, 14], 即 UEP RCPC, 译码时用 Viterbi 译码算法。

d) 采用 Turbo 码对整个 JPEG2000 码流都进行同样强度的编码保护, 即 EEP Turbo。交织器为随机交织矩阵, 交织长度取 1 024, 译码迭代次数为 5 次。

e) 采用 Turbo 码对 JPEG2000 码流进行不等差错保护^[15], 仅调整编码速率, 即传统的 UEP Turbo。

f) MPO-JSCC 编码, JPEG2000 编码时采用容错模式。仿真中码字的各质量层参数设置如表 2 所示。

表2 实验中各种信道编码参数

信道编码方案	UEP RS	UEP RCPC	EEP Turbo	UEP Turbo	MPO-JSCC		
					码率	交织	迭代
layer 1	(255,191)	(2, 1, 7)		1/2	1/2	1 024	10
layer 2	(255,223)	(3, 2, 7)	2/3	2/3	2/3	800	5
layer 3	(255,239)	(4, 3, 7)		3/4	3/4	400	3

RS 码采用 GF(8) 域上的一组码字 RS(255, 191), RS(255, 223), RS(255, 239)。RCPC 码采用 (2, 1, 7) 卷积码为母码, 通过穿孔调整码率为 2/3、3/4, 生成多项式为八进制 (171, 133)。EEP Turbo、UEP Turbo 和 MPO-JSCC 方案具有相同的分量编码器结构。其中 RSC 生成多项式为 (7, 5), 约束长度为 2, Log-MAP 译码。

3.2 仿真结果及分析

3.2.1 无信道编码保护时的仿真结果

当图像在噪声信道中传输时, 如果不采用信道编码^[16], 则接收端恢复图像的质量严重下降。具体的误比特率曲线如图 4 所示。另外, 原始图像若在 JPEG2000 压缩时不采用容错编码机制, 在信噪比低于 6 dB 时, 由于编码参数错误会导致接收端完全不能解码图像。若选择 ERTERM + RESTART 编码模式^[17], 在信噪比为 5 dB 时接收端通过错误掩藏技术可以重建 JPEG2000 图像。从表 3 可以看出, 采用容错编码模式进行 JPEG2000 编码的系统与一般无容错机制的系统相比, 解码成功率有所提高。

表3 容错信源编码的图像解码成功率比较/%

E_b/N_0	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB
容错信源编码	0	0	0	12	78	100
无容错信源编码	0	0	15	56	91	100

3.2.2 不同码字的 EEP 信道编码保护仿真结果

为了便于比较,实验仿真了各种码字经过高斯白噪声信道的误比特率性能。从图4可以看出,在相同码率下 Turbo 码优于其他两种信道编码,并且随着编码速率的降低,在低信噪比下这种优势越加明显,这也证明了 Turbo 码的优良纠错性能。此外 RCPC 码又优于相应的 RS 码。

3.2.3 UEP 编码保护的仿真结果

图5给出了实验中五种编码传输方案(除无信道编码保护)的误比特率随信噪比变化的性能曲线。其中 UEP RS、UEP RCPC 和传统 UEP Turbo 都只是简单地对 JPEG2000 码流三个质量层进行码率分配,没有调整其他编码参数。从图中可看出,本文提出的 MPO-JSCC 图像传输方案性能最好,在 $BER = 1e-6$ 时编码增益比传统的 UEP Turbo 方法高 0.5 dB,比均等 Turbo 码保护(2/3 码率)高出 1.1 dB,而比 UEP RCPC 高 2.5 dB,比 UEP RS 高 3.7 dB 左右。另外由于 MPO-JSCC 基于 UEP 实现,仿真时间并没有明显增加。

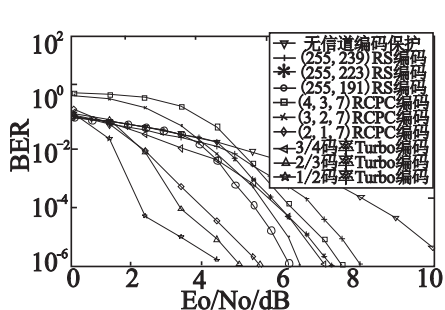


图4 不同码字在AWGN信道下的误比特率性能比较

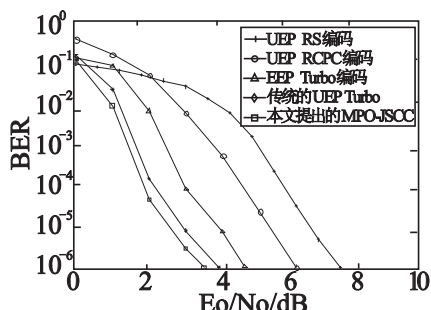


图5 不同UEP编码方案的误比特率性能比较

表4是在 AWGN 信道下分别传送 100 次图像时统计得出的解码成功率。从表中可看出,应用 Turbo 码来保护 JPEG2000 码流,在 $E_b/N_0 = 2$ dB 以上图像基本都能解码成功。由于编码时采用了容错模式, MPO-JSCC 的解码成功率最高,在 1.5 dB 左右就能成功解码重建图像。

表4 AWGN 信道下不同编码方案的解码成功率/%

E_b/N_0 /dB	1	1.5	2	2.5	3	4	5
UEP RS	0	0	0	2	14	70	97
UEP RCPC	0	0	20	52	74	100	100
EEP Turbo	0	42	89	100	100	100	100
传统 UEP Turbo	0	67	99	100	100	100	100
MPO JSCC	11	89	100	100	100	100	100

图6比较了五种编码传输方案的重建图像在不同信噪比下的 PSNR。因为 MPO-JSCC 对 JPEG2000 码流不同质量层进行了不同强度的保护,而且调整了 Turbo 编码器内部结构(如采用长短不一致的交织器、动态选择迭代译码次数等),使那些重要码流(如编码参数)发生错误的概率大大减少;并且接收端的错误掩藏技术限制了误码的扩散,大大提高了重建图像的质量,所以 MPO-JSCC 的 PSNR 性能要优于传统的 UEP Turbo 和 EEP Turbo 编码方案。另一方面,由于 Turbo 码性能接近香农限,基于 Turbo 码的图像传输系统性能又要优于基于 RCPC 和 RS 码的不等差错保护方案。作为一个特例,图7给出了在信噪比为 3 dB 时各种编码方案重建图像的主观视觉效果。可以清楚地看到, MPO-JSCC 编码方案具有最佳的重建图像质量。

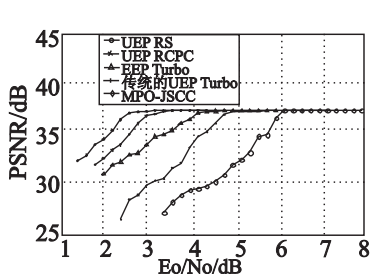


图6 不同编码方案恢复图像的 PSNR 性能比较



图7 各种图像传输方案重建图像主观质量比较

4 结束语

本文讨论了一种基于 JPEG2000 和 Turbo 码的联合信源信道编码方法,即 MPO-JSCC。传统的不等差错保护以码率分配为核心,在此基础上,本文的 MPO-JSCC 综合考虑了多个编码参数的优化对图像传输系统性能的影响;同时充分利用信源编码的容错机制以提高接收端的图像解码成功率,通过信道估计设定信噪比阈值以加强系统的灵活性,从而实现了 JPEG2000 码流的可靠渐进传输。

仿真结果验证了 MPO-JSCC 的优越性:既能在给定的编码效率下提高重建图像的整体质量,又不会增加编码延时,保证了图像的实时可靠传输;同时,在接收端利用错误掩藏机制提高图像解码成功率,节省了信道带宽和发射功率,具有一定的现实指导意义。

参考文献:

- [1] HANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423, 623-656.
- [2] van, DYCK R E, MILLER D J. Transport of wireless video using separate, concatenated, and joint source-channel coding [J]. Proceedings of the IEEE, 1999: 1734-1750.
- [3] KONDI L P, ISHTIAQ F, KATSAGGELOS A K. Joint source-channel coding formation-compensated DCT-based SNR scalable video [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2002, 11(9): 1043-1052.
- [4] ISO/IEC FDIS1544421, JPEG 2000 part I: final draft international standard: ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1855 [S]. 2000.
- [5] CHU Tian-li, LIU Zhong-min, XIONG Zi-xiang, et al. Joint UEP and layered source coding with application to transmission of JPEG2000 coded images [C] // Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2001: 2036-2039.
- [6] SANCHEZ V S, MANDAL M K. Robust transmission of JPEG2000 images over noisy channels [J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2002, 48(8): 451-456.
- [7] BANISTER B A, BELZER B, FISCHER T R. Robust image transmission using JPEG2000 and turbo-codes [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(4): 117-119.
- [8] WU Zhen-yu, BBILGIN A, MARCELLIN M W. Joint source channel coding for image transmission with JPEG2000 over memoryless channels [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2005, 14(8): 1020-1032.
- [9] THOMOS N, BOULGOURIS N V, STRINTZIS M G. Optimized transmission of JPEG2000 streams over wireless channels [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2006, 15(1): 54-67.
- [10] TAUBMAN D S, MARCELLIN M W. JPEG2000: image compression fundamentals, practice and standards [M]. Norwell: Kluwer Academic Publisher, 2002.
- [11] 刘建军. 基于 Turbo 码的联合信源信道编译码方法研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [12] Kakadu software implementation of the JPEG2000 standard [CP/OL]. <http://www.kakadusoftware.com>.
- [13] 罗常青, 安建平, 卜祥元. 用 RS 编码实现 JPEG2000 图像的稳健传输 [J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(5): 454-457.
- [14] HAGENAUER J. Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications [J]. IEEE Trans on Communication, 1988, 36(4): 389-400.
- [15] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near Shannon limit error correcting coding and decoding: Turbo codes [C] // Proc of IEEE International Conference on Communications. 1993: 1064-1070.
- [16] 刘锦杨, 戚飞虎. 一种基于 JPEG2000 的无线图像传输方法 [J]. 计算机工程, 2004, 30(13): 140-142.
- [17] BOULGOURIS N V, THOMOS N, STRINTZIS M G. Image transmission using error resilience wavelet coding and forward error correction [C] // Proc of International Conference on Image Processing. 2002: 549-552.