

基于系统 Raptor 码不等差错保护的图像压缩传输

刘国^① 于文慧*^② 吴家骥^② 白宝明^①

^①(西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071)

^②(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

摘要: 该文提出一种在无线信道上进行图像传输的方案。喷泉码具有码率无关性, 无需反馈信道, 降低了系统复杂度。然而, 传统喷泉码存在译码效率低、信息恢复质量对噪声敏感的问题。该方案基于系统 Raptor 码, 在信道条件理想的情况下无需译码, 提高了译码效率; 引入不等差错保护(UEP)特性, 根据信息重要性进行码率优化, 使系统在不同信道环境中具有更好的稳定性。实验结果表明, 在二进制删除信道(BEC)下, 与传统纠错码和 LT 码及采用等差错保护(EEP)的 Raptor 码相比, 该方案可显著提高传输的可靠性, 获得更好的图像恢复效果。

关键词: 图像传输; 喷泉码; 系统 Raptor; 不等差错保护(UEP); 码率优化; 二进制删除信道(BEC)

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)11-2554-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01362

Compressed Image Transmission Based on Systematic Raptor Codes with Unequal Error Protection

Liu Guo^① Yu Wen-hui^② Wu Jia-ji^② Bai Bao-ming^①

^①(School of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A scheme for image transmission over wireless channel is proposed. Being rateless, fountain codes could reduce system complexity and no feedback channel is needed. Traditional fountain code has a low decoding efficiency, and the quality of the recovered information is sensitive to noise. Based on systematic Raptor, this method can improve the decoding efficiency because decoding is not even needed in the ideal channel. With the introduction of Unequal Error Protection (UEP) characteristics, this scheme makes the bitrate optimized according to the importance of information, so that a better stability can be achieved at different channel conditions. The experiment results show that, compared with traditional error-correcting codes and Raptor with Equal Error Protection (EEP), this scheme can greatly improve the transmission reliability and achieve better reconstructed image quality over Binary Erasure Channel (BEC).

Key words: Image transmission; Fountain codes; Systematic Raptor; Unequal Error Protection (UEP); Bitrate optimization; Binary Erasure Channel (BEC)

1 引言

由于无线信道开放且易受干扰, 无线通信的可靠性下降, 为获得更高的传输质量人们提出了多种纠错码^[1]。Hamming 码^[2]被认为是最早的纠错码, 在纠正单个错误时是最佳的。随着有限域算法的发展, Reed-Solomon(RS)码^[3]产生, 它可以纠正很多突发错误, 被广泛应用到数字化存储和通信系统中。另一种 LDPC^[4]码在 1962 年由 Gallager 首次提出, 在 1981 年 Tanner 使用 Tanner 图^[5]时将 Gallager 的概率译码算法扩展到了更一般的情况之后, LDPC

码被证明非常接近香农限, 被认为是最好的纠错码。

上述编码方案是传统的纠错码, 它们的码率是固定的。若信息符号不能被成功译码, 需重新发送编码符号。实际中的信道带宽有限, 信息重传会降低通信系统的效率。喷泉码^[6]具有码率无关性, 可以在线产生足够多的编码符号来恢复原始数据, 不需要信息重传, 故无需反馈信道从而降低了系统复杂度。其性能在删除信道上接近香农限^[6]。2002 年 LT 码^[7]由 Luby 首次提出, 这是喷泉码的第 1 次实现。它具有简单的编译码方法以及较小的译码开销和编译码复杂度。2006 年, Shokrollahi 在 LT 码的基础上提出了性能更佳的 Raptor 码^[8], 其平均字符度数为一个常数, 同时具有线性复杂度 $O(k \log(1/\epsilon))$ ^[7]。

2012-10-23 收到, 2013-05-23 改回

国家自然科学基金(61077009, 61377011)资助课题

*通信作者: 于文慧 hanxiaomingzhu2007@163.com

同时，由于预编码的增加，Raptor 码获得了比 LT 码更加优越的性能。普通 Raptor 码属于非系统码。所谓非系统码，即其信息位与校验位相互交叉，信息符号并不直接在输出编码符号中，而系统码的信息位和校验位是分开的。在实际的应用中，我们往往需要选择系统码，它能够简化译码过程，更加直观地得到信源信息。于是，Shokrollahi 在此基础上，又提出了系统 Raptor 码。当信道丢失率低时，接收的符号中包含了全部的信源符号，此时接收端不需要再进行译码^[9]操作。

在信源编码采用位平面编码的系统中，不同的码流信息对于恢复原始信源信息的重要性往往是不同的。重要性高的码流需要更加安全地传输，因此需要加大保护级别，对于不是很重要的码流信息，可以采取低级别的保护，而不等差错保护(UEP)的核心，正是在于对不同重要性码流信息提供了不同的纠错能力。

针对以上问题，本文提出了一种具有 UEP 特性的系统 Raptor 编码方案，该方案提高了系统在不同信道条件下的信息恢复质量以及信息译码效率。

2 具有 UEP 特性的系统 Raptor 编码方案

2.1 基于喷泉码的系统框架

该方案的编译码系统的方框图如图 1 所示，采用的信道模型是二进制删除信道(BEC)。它包括通常的图像压缩和传输过程。在图像编码阶段，对原始图像进行小波变换^[10]，将其分成不同频率的子带，并分别对每个子带内的系数进行图 2 所示的交织，得到具有容错能力的变换图像系数，提高了纠错能力^[11]。接着，按照从低频到高频的顺序，对每个子带逐一进行位平面编码，并将编码后的码流打包，每个数据包对应由几个子带组成的一组数据。将系统 Raptor 码应用于来自每个数据包的数据流，得到具有纠错码的待发送码流。

图像译码阶段为图像编码的逆操作。在信道传输完成后，根据接收到的符号构建一个译码矩阵。喷泉码的译码使用到了高斯消去法。对数据包信息进行位平面解码，并对该系数进行解交织。对解交织后的图像变换系数进行小波逆变换，得到经译码恢复后的图像。

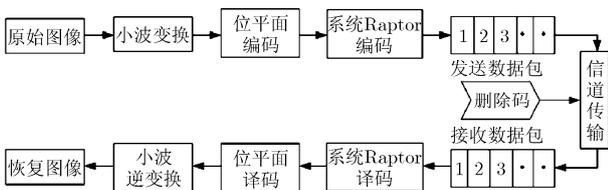


图 1 编译码系统的方框图

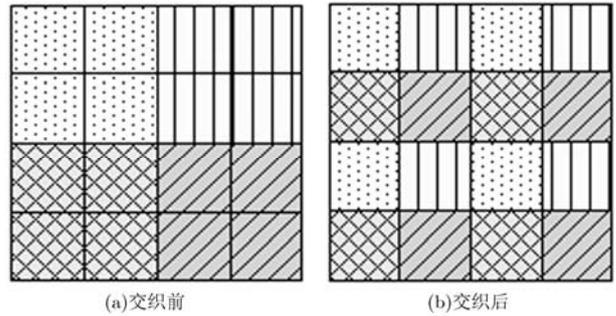


图 2 子带系数交织图

本文的信道编码采用系统 Raptor 码。Raptor 码是 LT 码的延伸，为第 2 类喷泉码。通过预编码技术，它可以保证在满足无损译码性能的条件下，进一步降低 LT 码的度函数概率分布复杂度，提高译码效率。普通 Raptor 码由内码和外码组成，内码是一个弱化了 LT 码，外码是传统的纠错码。通过预编码，在输入信源符号之后添加冗余符号，生成中间符号，然后将其作为 LT 码的输入符号进行编码以产生最终的输出符号^[12]。普通 Raptor 码的编码原理如图 3 所示。在译码端，并不需要将中间符号全部译码出来，只需译码出一定比例的中间符号，再结合外码的性质就可以恢复原始的输入信源符号。

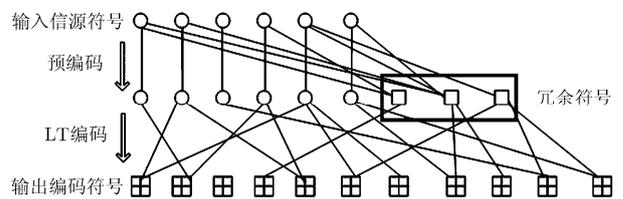


图 3 普通 Raptor 码编码原理

2.2 系统 Raptor 码

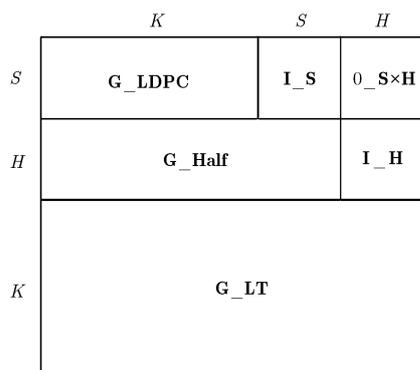
2.2.1 编码 本文中系统 Raptor 的预编码是由 LDPC 编码和 Half 编码组成，其编码过程如下。其中，部分参数的计算可以参考 RFC5053 中的方法^[13]。

(1) 根据信源符号长度 K ，计算出 LDPC 编码符号个数 S ，Half 编码符号个数 H 以及中间符号 C 的长度 L 。

(2) 根据预编码关系，计算生成矩阵 A ，其构成如图 4 所示。其中， G_{LDPC} 、 G_{Half} 和 G_{LT} 矩阵分别表示 LDPC、Half 和 LT 的编码矩阵。

(3) 计算逆矩阵 A^{-1} ，求出中间符号序列 $C[0], C[1], \dots, C[L-1]$ 。

(4) 对中间符号进行 LT 编码，得到输出符号。

图 4 编码矩阵 \mathbf{A} 的结构图

通过前面的一次逆编码，再进行 LT 编码后得到的前 K 个编码符号是信源符号，由此构造出系统码。

2.2.2 译码 每个数据包中的码流通过系统 Raptor 编码后，具有了纠错码信息，将它发送到 BEC 信道进行传输。每个编码符号的 ESI 在也同时被加入到信道中，其中，ESI 代表了该符号在整个编码符号中的位置。由于 BEC 信道的传输特性，信息要么被正确接收，要么丢失，所以系统 Raptor 码的译码就是用接收到的正确的编码符号来恢复原始的信源符号。接收端接收到信道编码符号后，首先通过 ESI 检测是否有信息丢失。当信道丢失率比较低，信息无错误地传送到接收端时，则无需译码即可获得信源信息，这就是系统码的优点所在。反之，如若有信息的丢失，则按如下过程进行系统 Raptor 码的译码过程。

(1) 构造译码矩阵 \mathbf{B} 。

设经过信道传输后，在接收端接收到 $N(N \geq K)$ 个编码符号，重新构造一个译码矩阵 \mathbf{B} ，与生成矩阵 \mathbf{A} 不同，译码矩阵 \mathbf{B} 的 $\mathbf{G_LT}$ 有 N 行，代表了 N 个接收到的编码符号。 \mathbf{B} 中的其他部分和生成矩阵 \mathbf{A} 中的完全一致。

(2) 构造译码方程，求中间符号 \mathbf{C} 。

(3) 进行 LT 编码，完成系统 Raptor 的译码。

将在编码时产生的 LT 编码矩阵 $\mathbf{G_LT}$ 与中间符号向量 \mathbf{C} 进行矩阵相乘，即可译码得到信源信息。

2.3 不等差错保护

2.3.1 不等差错保护方案的设计 图 5 所示为小波 5 级分解示意图。原始图像经过 5 级小波变换之后，产生了 16 个子带。由于每个子带的频率不一样，可以根据其对图像恢复的贡献，将这 16 个子带从低频到高频划分为图 5 所示的 5 级，其重要性等级关系为：第 1 级 > 第 2 级 > 第 3 级 > 第 4 级 > 第 5 级。设 R_i 表示每一级的信道编码码率，即信源符号占编码符

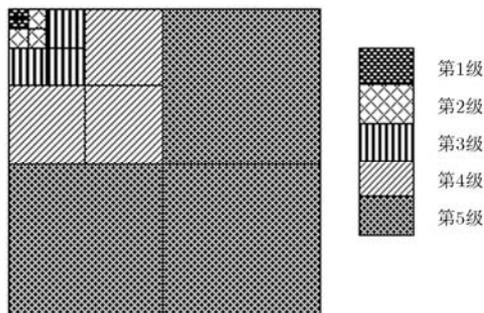


图 5 小波五级分解示意图

号的比重，为了保护重要性等级高的码流信息，需要加大冗余符号的比例，即保护级别高的信息编码码率低，即 $R_1 < R_2 < R_3 < R_4 < R_5$ 。

设要传输的信息比特长度为 K 。如果不进行等级划分而采用等差错保护 (EEP) 传输时，编码后输出 N 个编码符号，所采用的码率为 $R = K/N$ 。现将长度为 K 的信息序列按照重要性等级依次递减的顺序分为 m 级，每一级的信息序列长度为 k ，输出编码符号个数为 n ，则有

$$k_1 < k_2 < \dots < k_m \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m k_i = K, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

对于这 m 个信息序列，第 i 个信息序列的码率为 $R_i = k_i/n_i$ ，因为 R_i 的不同，进行系统 Raptor 编码后就可以得到一系列不同码率的码字。对于重要性等级高的信息序列，采用低码率码字，增加冗余符号个数，提高传输可靠性，反之，对于重要性等级低的信息序列，可以减小冗余符号个数，提高传输效率。为保持信道的总码率 R_{tot} 不变，应该满足式(3)。

$$\sum_{i=1}^m k_i / \left(\sum_{i=1}^m k_i / R_i \right) = R_{\text{tot}}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

这样，可以在总码率不变的情况下，对信息的码率作出不均等分配，实现了不等差错保护。

2.3.2 码率优化 对要传输的信息来说，通过降低信道码率的方法虽然可以加大对信息的保护，却同时带来了添加冗余多、传输效率低的缺点。同时，由于系统 Raptor 码自身的特性，当信道总码率 R_{tot} 降到一定值时，其传输可靠性已经稳定，并不会随着 R_{tot} 的降低而变化，相反，由于信源码率的影响，系统的性能还会下降^[4]。由此，我们可以找到系统达到稳定时的码率 R_s ，在设置系统的信道码率时，其信道总码率 R_{tot} 和不同重要性等级信息的信道码率 R_i 均无需超过 R_s 。

令信道丢失率为 10^{-3} ，信源码率分别取 0.25 bpp 和 0.5 bpp，相同情况下，对分辨率为 512×512 的自然图像 Lena, Barbara, Munar 和 Goldhill 各进行测试 100 次，取平均值，采用峰值信噪比 PSNR 作为性能对比的指标。在不同的信道总码率 R_{tot} 下计算其 PSNR 值，结果如图 6 所示。从图 6 可以看出，在不同信源码率下， R_{tot} 取 $[0.78, 0.82]$ 区间的值时，各图像的 PSNR 值最大。

同理，令信道丢失率为 10^{-3} ，信源码率分别取 0.25 bpp 和 0.5 bpp，相同情况下，对分辨率为 1024×1024 的遥感图像各进行测试 100 次，取平均值。这里从 CCSDS 库中选取 2.2.10, 2.2.13, 2.2.14 和 2.2.23 四幅图像，在不同的信道总码率 R_{tot} 下计算其 PSNR 值，结果如图 7 所示。从图 7 可以看出，在不同信源码率下， R_{tot} 取 $[0.85, 0.87]$ 区间的值时，各图像的 PSNR 值最大。

令 BEC 信道丢失率分别为 10^{-3} ， 10^{-4} ， 10^{-5} ， 10^{-6} ， 10^{-7} ，再分别对 512×512 和 1024×1024 的标准图进行测试 100 次，取平均值，观察 R_s 随着信道丢失率的变化，结果如图 8 所示。为便于观测，横坐标取信道丢失率 x 的对数 $\lg(x)$ 。从图 8 中可以看出，随着信道条件的改善，信道达到稳定时的码率 R_s 的值变大。这表明，信道条件越好，系统 Raptor 码达到稳定时所需的码率越大，需要添加的冗余越少，传输效率越高。

由此，在使用系统 Raptor 码时，对于不同分辨率的图像，我们应尽可能从各自的最优区间中选取信道总码率 R_{tot} 值。

3 实验结果

分别采用标准的分辨率为 512×512 和 1024×1024 的图像对系统的性能进行测试。在编码端，先对图像进行 Antonini(9,7)双正交小波 5 级分解，得到具有多分辨率的变换系数，然后对每个子带进行 SPECK 信源编码。经过 SPECK 编码后，按设定的

信息分组对每个子带产生的码流打包，进行系统 Raptor 编码，产生具有纠错能力的数据包，添加到传输信道中。

在系统 Raptor 编码中，以分辨率为 512×512 的 Lena 图为例，当信道设定的总码率 R_{tot} 大于 R_s 时，对信息比特进行不等差错保护。假设 $R_{tot} = 0.83$ ，按式(3)，将 5 级小波变换后产生的 16 个子带分成 3 组，各组的信息符号长度和编码符号长度如表 1 所示，每个符号的大小是 3 个字节。对于子带 0-5，其信源符号长度 K 为 40，编码符号长度 N 为 50，每个符号的长度是 3 个字节，由此计算出 LDPC 码符号个数 $S = 11$ ，Half 码符号个数 $H = 8$ ，中间符号 C 长度 $L = 59$ 。同理类推至其余两组的子带。由于加入了预编码，在一定的丢失率下，译码成功率可以维持在一个较高的水平。

表 1 信道总码率 $R_{tot} = 0.83$ 时，不同子带编码码率表

子带	信源符号长度 K	编码符号长度 N
0-5	40	50
5-12	40	48
12-15	40	47

在解码端，如果检测到没有信源符号的丢失，则不需要进行译码，可以直接获得信源符号。如果检测到有信息丢失，则需要对系统 Raptor 码进行译码。在一个子带对应的数据包中，如果发现未能正确译码的符号，则将数据包中此符号之后的数据丢弃，SPECK 只使用正确的数据来恢复原始图像信息。

本文方法是基于系统 Raptor 码的不等差错保护方法，仿真信道是二进制删除信道(BEC)，采用峰值信噪比 PSNR 作为性能对比的指标。

令 BEC 信道丢失率分别为 10^{-2} ， 10^{-3} ， 10^{-4} ，

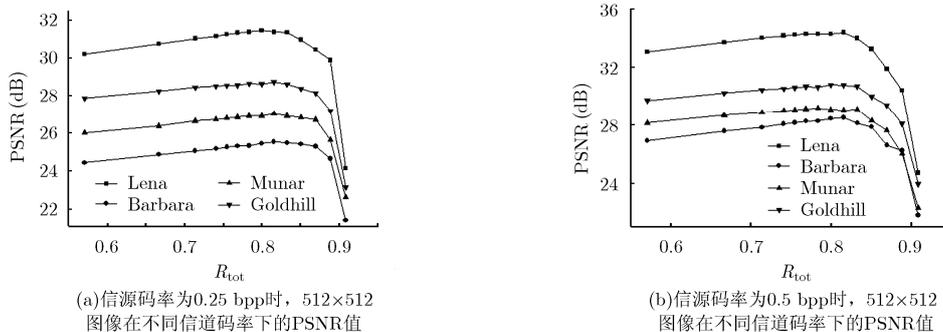


图 6 512×512 图像在不同信道码率下的 PSNR 值

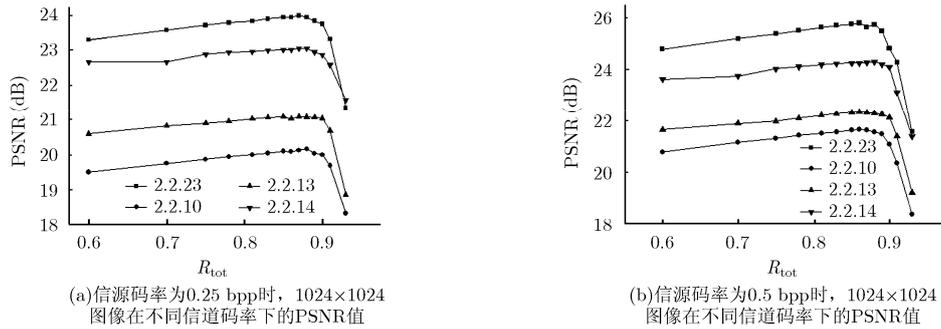


图 7 1024×1024 图像在不同信道码率下的 PSNR 值

10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} , 以分辨率为 512×512 的 Lena 图为例。相同情况下, 信源码率 bpp 分别为 0.125, 0.250, 0.500, 1.000, 结果如图 9 所示。为便于观测, 横坐标取信道丢失率 x 的对数 $\lg(x)$ 。从图中可以看出, 本方法具有良好的抗干扰性, 可以有效控制误码所带来的错误累积, 增强集合嵌入块编码算法的容错性能。同时, 随着信道条件的进一步恶劣, Lena 图恢复质量也会随之下降, 因此在发送端需要发送更多的编码符号。相比于传统的信道编码, 系统 Raptor 码保持了喷泉码的良好特性, 无需将编码符号重传, 只需继续接收一定数量的编码符号, 无需反馈信道, 降低了系统的复杂度。

令信道丢失率为 10^{-3} , 以分辨率为 512×512 的 Lena 图和 CCSDS 库中的 1024×1024 标准图 2.2.23 为例, 取信源码率为 0.25 bpp , 分别在 RS 码、采用 EEP 方法的 Raptor 码及本文所采用的具有 UEP 特性的系统 Raptor 码 3 种方法下进行测试, 每个实验数据测试 500 次, 取平均值, 结果分别如表 2 和表 3 所示。从表中可以看出, 同等条件下, 具有 UEP 特性的系统 Raptor 码译码后的 PSNR 值明显高于 EEP 方法下的 Raptor 码和 RS 码时的情况, 其中以 RS 码的图像恢复效果最差。

以 2.2.23 图为例, 从图 10 可以看出, 随着系统设置码率 R_{tot} 的增加, 采用 EEP 方法的 Raptor 码

表 2 Lena 图在不同方法下的 PSNR(dB)比较

R_{tot}	Raptor-UEP	Raptor-EEP	RS
0.80	31.44	31.46	29.95
0.82	31.43	31.38	30.02
0.83	31.46	31.37	30.11
0.85	31.10	30.77	30.11
0.87	30.44	30.35	30.24
0.89	30.10	29.89	30.33

表 3 2.2.23 图在不同方法下的 PSNR(dB)比较

R_{tot}	Raptor-UEP	Raptor-EEP	RS
0.85	23.95	23.95	23.23
0.86	23.99	23.94	23.24
0.87	23.99	23.97	23.26
0.88	23.96	23.94	23.28
0.89	23.93	23.89	23.30
0.90	23.80	23.77	23.32
0.91	23.57	23.37	23.34

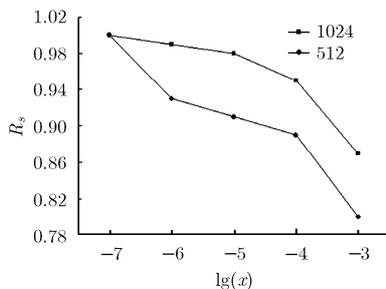


图 8 512×512 和 1024×1024 图像在不同信道丢失率下的 R_s 值

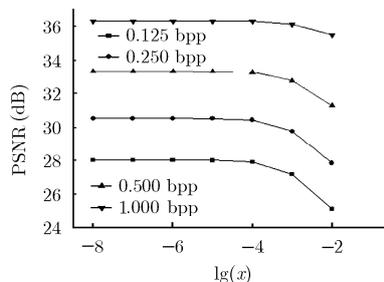


图 9 采用系统 Raptor 码时, 不同信源码率下的 PSNR 比较

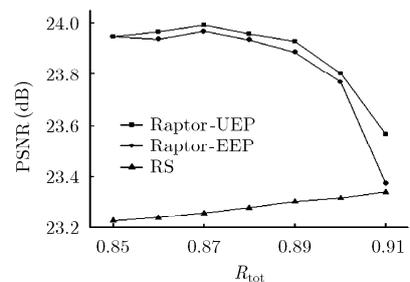


图 10 信源码率为 0.25 bpp 时, 2.2.23 图在 3 种方法下的 PSNR 比较

的性能急剧下降, 系统稳定性明显低于本文方法。这是由于喷泉码对加噪信道具有很好的鲁棒性和抗干扰性, 而不等差错保护方案中对于小波子带产生的码流数据采用了不同级别的保护, 对于重要的系数采用更高级别的保护, 从而获得了比等差错保护情况下更佳的性能。

4 结束语

文中针对图像传输提出了基于系统 Raptor 码不等差错保护的图像传输方法, 实验结果显示出了本文方法的优越性能。可以得出结论, 由于具有码率无关性, 系统 Raptor 码可以在删除信道上进行可靠的传输。即使信道的丢失率较高, 发送端仍可以产生充足的编码符号来恢复原始图像。相比于第 1 类喷泉码 LT 码, 系统 Raptor 码的计算复杂度更低。而 UEP 中将小波变换后的子带进行区别对待, 重要性高的子带编码后产生的码流采用了更高级别的保护, 由此获得了比 EEP 更好的性能。此外, 该方法也可以应用于多光谱图像的压缩传输。鉴于系统 Raptor 码所具有的优越性能, 一些国际组织已经将其纳入相关标准中, 包括 3GPP, DVB 等。

参 考 文 献

- [1] Morelos-Zaragoza R H. The Art of Error Correcting Coding [M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2006: 3-119.
- [2] Hamming R W. Error detecting and error correcting codes[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1950, 29(2): 147-160.
- [3] Reed I and Solomon G. Polynomial codes over certain finite fields[J]. *Math Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1960, 8(2): 300-304.
- [4] Gallager R G. Low-density parity-check codes[J]. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(1): 21-28.
- [5] Tanner R M. A recursive approach to low complexity codes [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1981, 27(5): 533-547.
- [6] Liva G, Paolini E, and Chiani M. Performance versus overhead for fountain codes over F_q [J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(2): 178-180.
- [7] Luby M. LT codes[C]. IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, Washington, USA, 2002: 271-280.
- [8] Shokrollahi A. Raptor codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(6): 2551-2567.
- [9] Mladenov T, Nooshabadi S, and Kim K. Efficient incremental raptor decoding over BEC for 3 GPP MBMS and DVB IP-datacast services[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2011, 57(2): 313-318.
- [10] Zhang Xin-yang and Zhang Ren-jin. The technology research in decomposition and reconstruction of image based on two-dimensional wavelet transform[C]. The 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Chongqing, 2012: 1998-2000.
- [11] Cho Sungdae and Pearlman W A. Improved error resilient embedded video coding[C]. Data Compression Conference, Snowbird, Utah, 2003: 83-92.
- [12] Hagh M J and Soleymani M R. Application of raptor coding with power adaptation to DVB multiple access channels[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2012, 58(3): 379-389.
- [13] Luby M, Shokrollahi A, and Watson M. Raptor forward error correction scheme for object delivery[S]. IETF RFC 5053, 2007.
- [14] Huang Yu-chih and Narayanan K R. Joint source-channel coding with correlated interference[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(5): 1315-1327.

刘 国: 男, 1972 年生, 博士生, 研究方向为信道编译码技术。
 于文慧: 女, 1989 年生, 研究生, 研究方向为信源信道联合编码。
 吴家骥: 男, 1973 年生, 教授, 研究方向为静止图像编码、视频图像编码。