

中图法分类号: TP911.2 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)01-0008-06

论文索引信息: 宋丹, 彭华. 渐进图像传输的码率分配快速算法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(1): 8-13

渐进图像传输的码率分配快速算法

宋丹, 彭华

(信息工程大学信息工程学院, 郑州 450002)

摘要: 针对带限时变信道上的渐进图像传输, 提出了一种信源信道联合编码码率分配快速算法, 首先参考一组速率兼容信道码字的误码性能划分信道分区, 在各分区内缩小可用信道码率集后, 通过前后向码率搜索求解最佳码率分配。该算法运算复杂度低, 计算次数比启发式码率搜索算法降低了一个数量级, 缩短了运算时间。因此, 将其应用于自适应传输系统, 可根据信道状况快速调整码率分配。仿真结果表明, 接收端重建图像的 PSNR 值始终在 29.5 dB 以上, 同时波动范围小于 4 dB, 具有优良稳定的传输质量。

关键词: 渐进图像; 信源信道联合编码; 自适应传输; 快速码率分配算法

Fast rate allocation algorithm for progressive image transmission

Song Dan, Peng Hua

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002 China)

Abstract: A fast rate allocation algorithm of joint source and channel coding is proposed for progressive image transmission on band-limited and time varying channels. Firstly the channel is segmented into several operating regions according to the error-probability performance of a set of rate-compatible channel codes. In each operating region, the number of available channel codes in the rate set is reduced, and the optimal error protection scheme is obtained by forward and backward rate searching. The proposed algorithm has a low complexity, and its computation number is only ten percent of that of the heuristic search algorithm, thus the operation time is reduced. When the fast algorithm is applied in adaptive transmission systems, the rate allocation can be quickly adjusted according to channel conditions. Simulation results show that the PSNR value of reconstructed image is always above 29.5 dB and the fluctuation range is less than 4 dB, which shows a good and stable transmission quality.

Keywords: progressive image; joint source and channel coding; adaptive transmission; fast rate allocation algorithm

0 引言

嵌入式图像编码算法(如分层树的集划分算法(SPIHT)^[1])编码产生的码流具有在任意码率编解码、随着正确接收比特数的增加重建图像质量不断提高等优良特性,因此广泛应用于无线和网络多媒体通信中。但是,嵌入式码流对错误十分敏感,一个

比特的错误可能导致后续码流无法正确解码。同时,无线信道频带资源有限,而且存在复杂的衰落干扰以及具有时变的特性。如何将带宽合理分配给信源编码和信道编码,有效地保护嵌入式码流,使接收端解码图像的质量最佳,是多媒体通信领域研究的热点之一。

Sherwood 和 Zeger^[2]首先设计了一个信源信道联合编码系统,对 SPIHT 码流进行分组,并采用循

收稿日期:2009-06-05;修回日期:2009-09-12

基金项目:国防重点预研项目(6130620)。

第一作者简介:宋丹(1986—),女。信息工程大学信号与信息处理专业硕士研究生,主要研究方向为无线多媒体通信。

E-mail: sd5522@126.com。

环冗余码 (CRC) 和码率兼容删余卷积码 (RCPC) 级联对各分组进行差错保护。该系统中采用的是均等差错保护,在嵌入式码流中,不同位置的比特重要性不同,进行不均等差错保护将更加有效。文献[3]提出了求解最佳码率分配的准则:接收端重建图像失真的期望最小或者正确接收信源比特数的期望最大,并采用动态规划求解最佳不均等差错保护 (UEP) 策略。此后,一些简化算法相继得以提出,如局部搜索算法^[4]、前后向搜索算法^[5]、启发式搜索算法^[6]、遗传算法^[7]等。

但是,上述算法存在两个不足之处:第一,随着传输分组数和码率集的码率个数的增加,求解时要考虑的码率分配数目急剧增加。实际传输中,如果发送端要针对信道状况的变化及时调整码率分配,就需要进一步提高算法速度。第二,这些算法所求为失真最优解,求解中用到特定信源码流的失真-率函数,计算出的码率分配不具有一般性,本文对此进行了改进:第一,通过划分信道分区^[8],缩小可用码率集,再结合前后向搜索^[5]寻找最优解,极大降低了算法复杂度;第二,本文算法所求为码率最优解,与具体图像和信源编码器无关,可以离线 (off-line) 计算^[3],并且对于相同带宽限制下其他渐进图像传输的码率分配同样适用。仿真表明其性能接近失真最优解。

1 系统基本结构

1.1 SPIHT 算法

SPIHT 算法是对嵌入式小波零树编码 (EZW) 算法的改进,它采用了有效的空间方向树结构和比特平面编码方法,压缩比高且编解码速度快。编解码流具有嵌入式特性,即在高码率编码产生码流的任意低码率位置截断,可以独立解码恢复出图像。同时,码率越高,恢复图像的质量越好。

1.2 RCPT 码

RCPT 码是码率兼容删余 Turbo 码的简称,它通过对一个码率为 $1/N$ 的 Turbo 码以周期 P 进行删除,得到一组码率为 $P/(P+l)$ 的码字, $l=1, \dots, (N-1)P$ 。RCPT 码的码率兼容特性是由删除矩阵决定的。在码率集中,高码率的码字包含在低码率的码字中,若较高码率的码字纠错能力不够,参照删除矩阵传送之前删除了的码位,就能降低码率,使码字的纠错性能提高。

1.3 自适应联合编码系统

图 1 所示为本文的自适应信源信道联合编码系统的结构框图。将原始图像送入信源编码 (SPIHT 编码) 器,产生的码流分成若干个分组,在信源分组中加入使 Turbo 编码器中第一个分量码的格图状态归 0 的 m 位结尾比特, c 位 CRC 码检错比特和一定数目的 RCPT 码校验比特,输出固定长度的信道分组。在接收端,若某一分组的 CRC 校验失败,表明该分组信道译码后存在未纠正的错误 (假设 CRC 校验可以检测到所有的误码),译码停止,同时将之前译码正确的分组包含的信息比特送入 SPIHT 解码器重建图像。

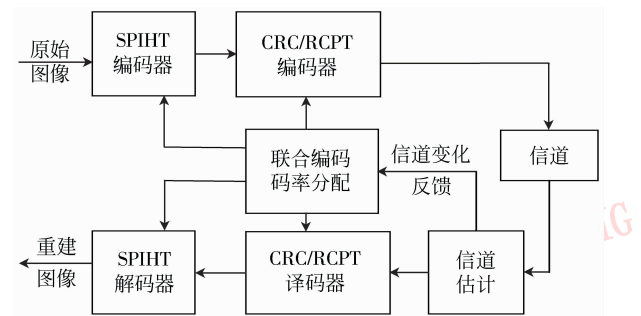


图 1 联合编码系统框图

Fig. 1 The structure of the JSCC system

假设信道估计良好且反馈及时,发送端可以根据当前信道状况及时调整码率分配策略。信道状况好时,适当提高信道编码码率和信源编码码率;信道状况差时,相应降低信道码率和信源码率,这样可以合理分配带宽资源,保证时变信道上稳定的传输图像质量。

系统的核心部分是联合编码码率分配,下面讨论在一定的带宽限制下,如何求解最佳码率分配。

1.4 最佳码率分配求解准则

假设 $R = \{r_1, \dots, r_M\}$ 是一个信道编码码率集,其中 $r_1 > \dots > r_M$ 。设 p_i 是信道码率为 r_i 的分组出现译码错误的概率,则有 $p_1 > \dots > p_M$ 。

在分析信源信道联合编码问题时,常常考虑两种分组方式。一种是定长信源分组方式 (fixed-length information blocks),即信源编码码流分成若干组,每个分组的长度固定。采用不同的信道码率,产生的校验比特数不同,因此经过信道编码后的分组长度不同。与之相反,定长信道分组方式 (fixed-length channel code words) 假设信道编码码流的分组长度固定,采用不同的信道码率对应的信息比特数

不同,即信源分组长度不同。该分组方式利于跨层设计以及同步,在实际传输系统中经常使用,例如,异步传输模式网络(ATM)^[9]。本文主要分析定长信道分组方式的码率分配问题。

假设所传图像大小为 S 像素,总的传输码率限制为 b_0 比特/像素,则最大可传输的总比特数为 $B = Sb_0$ 比特。设信道分组长度固定为 L_C 比特,一共有 $N = \lfloor B/L_C \rfloor$ 个信道分组,对应的差错保护策略为 $\boldsymbol{\pi} = (r_{k_1}, \dots, r_{k_N})$,其中, r_{k_i} 是第 i 个分组的信道编码码率, $r_{k_i} \in \mathbf{R}, i = 1, \dots, N$ 。设 P_i 是前 i 个分组译码正确,而第 $i+1$ 个分组发现译码错误的概率,可通过下式求解:

$$P_i = p_{k_{i+1}} \cdot \prod_{j=1}^i (1 - p_{k_j}) \quad i = 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

$$P_0 = p_{k_1} \quad (2)$$

$$P_N = \prod_{j=1}^N (1 - p_{k_j}) \quad (3)$$

在接收方,重建图像失真的期望 $E_N[d](\boldsymbol{\pi})$ 和正确接收信源比特数的期望 $E_N[r](\boldsymbol{\pi})$ 可分别由下式求解

$$E_N[d](\boldsymbol{\pi}) = \sum_{i=0}^N P_i \cdot D_i \quad (4)$$

$$E_N[r](\boldsymbol{\pi}) = \sum_{i=1}^N P_i \cdot V_i \quad (5)$$

式中, D_0 是一个常数, D_i 是由前 i 个信道分组恢复出的图像与原始图像相比的失真, V_i 是前 i 个信道分组的信息比特数, $V_i = \sum_{j=1}^i v_j$ 。其中, $v_j = (L_C r_{k_j} - c - m)$ 。通常 c 为 8、16 或 32, m 一般小于 10, 而 $L_C r_{k_j}$ 一般为 10^3 , 因此, $(c + m)$ 与 $L_C r_{k_j}$ 相比很小, 可以将 v_j 近似为 $L_C r_{k_j}$ 。

使 $E_N[d](\boldsymbol{\pi})$ 最小或 $E_N[r](\boldsymbol{\pi})$ 最大求解得到的最佳码率分配, 分别称为失真最优解和码率最优解^[3]。信源码率的期望最大准则将嵌入式码流的失真率函数线性化处理, 虽然优化性能不如失真最优解, 但是求解过程大为简化。此外, 在求出目标传输速率的码率最优解的情况下, 很容易得到低于该速率的最优码率分配, 而不需要重复求解过程^[9]。因此, 本文算法重点研究码率最优解, 下面对式(5)作进一步简化:

$$\begin{aligned} E_N[r](\boldsymbol{\pi}) &= (1 - p_{k_1})p_{k_2}V_1 + \dots + \\ &(1 - p_{k_1})\dots(1 - p_{k_N})V_N = \\ &(1 - p_{k_1})L_C r_{k_1} + (1 - p_{k_1})(1 - p_{k_2})L_C r_{k_2} + \dots + \end{aligned}$$

$$(1 - p_{k_1})\dots(1 - p_{k_N})L_C r_{k_N} = L_C \sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^i (1 - p_{k_j}) r_{k_i}$$

$$\text{设 } V_N(\boldsymbol{\pi}) = \sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^i (1 - p_{k_j}) r_{k_i}, \text{ 则 } E_N[r](\boldsymbol{\pi}) =$$

$L_C V_N(\boldsymbol{\pi})$, 这样, 码率最优解 $\boldsymbol{\pi}^*$ 可由下式求出,

$$\boldsymbol{\pi}^* = \operatorname{argmax} V_N(\boldsymbol{\pi}) \quad (6)$$

快速算法中用 $V_N(\boldsymbol{\pi})$ 代替 $E_N[r](\boldsymbol{\pi})$ 求解最优码率分配。

2 快速算法

对于定长信道分组方式, 若信源编码码流的率失真函数为凸函数, 最佳码率分配中信道码率随分组位置后移呈递增或保持不变的规律^[6]。嵌入式码流的率失真函数符合这一特点, 编码比特的重要性随位置后移依次降低, 因此各分组的信道码率依次递增或保持不变。这样, 码率分配的复杂度由 $O(M^N)$ (指数复杂度) 降低为 $O(N^M)$ (多项式复杂度)^[5]。在此基础上, 提出了一种快速码率分配算法, 首先根据码率兼容信道码字的误码特性划分信道分区, 在一定分区内缩小 \mathbf{R} , 然后采用前后向码率搜索得到最佳码率分配。具体步骤如下:

1) 划分信道分区, 缩小可用码率集。这里以一组 RCPT 码为例, 设 p_T 为分组差错率的门限值。当码率为 r_i 的分组差错率低于 p_T 时, 开始一个新的信道分区, 该分区内进行差错保护的可用最低信道码率为 $r_L = r_i$ 。同时, 由式(7) 求出最高信道码率 r_H ^[6] ($1 \leq H \leq L \leq M$):

$$r_H = \operatorname{argmax}_{r_i \in \mathbf{R}} \{(1 - p_i) \cdot r_i\} \quad (7)$$

求出边界码率 r_L 和 r_H 后, 将分区内的可用码率集从 \mathbf{R} 缩小到 $\mathbf{R}' = \{r_H, \dots, r_L\}$, 后面的两步均在一定的信道分区内进行。

2) 确定初始码率分配。在各分区内, 从新的码率集 \mathbf{R}' 中由式(8) 求出均等差错保护 (EEP) 时的最佳信道码率

$$r_0 = \operatorname{argmax}_{r_k \in \mathbf{R}'} \left\{ \sum_{i=1}^N (1 - p_k)^i \cdot r_k \right\} \quad (8)$$

3) 设定初始码率分配为 $\boldsymbol{\pi}_0 = \{r_L, \underbrace{r_0, \dots, r_0}_{N-2\text{个}}, r_H\}$, 通过前后向码率搜索, 由式(6) 求解最佳码率分配。基本流程如下:

(1) 前向改变码率。初始设定:

$$N_{\text{stop}} = N, V_T = V_N(\boldsymbol{\pi}_0), i = 2。$$

① 若 $i < N_{\text{stop}}$ 且 $r_{k_i} > r_L$, 将 π 中第 i 个分组的码率 $r_{k_i} = r_j$ 替换为 r_{j+1} , 得到 π' 并计算 $V_N(\pi')$; 否则, 迭代停止。

② 若 $V_N(\pi') > V_T$, $r_{k_i} = r_{j+1}$, $V_T = V_N(\pi')$, 同时将当前 π 更新为 π' , $i = i + 1$, 转到①步; 否则, i 之后的分组停止码率降低操作, $N_{\text{stop}} = i$, $i = 2$, 转到①步。

(2) 后向改变码率。初始设定: $N_{\text{stop}} = 1$, $V_T = V_N(\pi_0)$, $i = N - 1$ 。

① 若 $i > N_{\text{stop}}$ 且 $r_{k_i} < r_H$, 将 π 中第 i 个分组的码率 $r_{k_i} = r_j$ 替换为 r_{j-1} , 得到 π' 并计算 $V_N(\pi')$; 否则, 迭代停止。

② 若 $V_N(\pi') > V_T$, $r_{k_i} = r_{j-1}$, $V_T = V_N(\pi')$, 同时将当前 π 更新为 π' , $i = i - 1$, 转到①步; 否则, i 之前的分组停止码率升高操作, $N_{\text{stop}} = i$, $i = N - 1$, 转到①步。

最后, 得到最佳差错保护策略 π^* 。

该算法具有以下优点: 1) 在各分区内缩小可用码率集后, 减少了需要计算和比较的码率分配个数; 同时, 第 3) 步中前向和后向码率搜索可以并行处理, 进一步提高求解速度。2) 算法基于信道分区进行求解, 因此所得码率分配能适应一定范围内的信道波动。将该算法应用于自适应联合编码系统中, 可根据当前信道状况对应的分区快速选择合适的码率分配, 在时变信道上获得优良的传输性能。

3 仿真结果

采用标准的灰度图像 Lena (分辨率为 512×512) 对本文方案的性能进行测试。对原始图像利用 D4 小波做 6 级小波变换后进行 SPIHT 编码。信道编码以生成多项式为 $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ 的 16 比特 CRC 码为外码, RCPT 码为内码。其中, RCPT 码的两个 RSC 编码器的生成多项式均为 $G = (13, 15)_{(8)}$, 删除周期为 4, 参照文献 [10] 中的删除矩阵, 得到一组码率为 $4/(4 + l)$ 的 RCPT 码 ($l = 1, \dots, 8$), 对应码率集 \mathbf{R} 为 $\{4/5, 2/3, 4/7, 1/2, 4/9, 2/5, 4/11, 1/3\}$ 。仿真中信道输出分组长度为 4 096 比特。对信道编码输出码流进行 BPSK 调制, 经过 AWGN 信道后送入解码端。Turbo 译码采用 Log-MAP 算法, 迭代次数为 10。仿真中设定 p_T 为 10^{-3} 。本文采用接收端译码重建图像的峰值信噪比 (PSNR) 来衡量码率分配的性能:

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \lg(255^2 / \text{MSE})$$

式中 MSE 是接收端重建图像与原始图像之间的均方差。

首先, 对比本文算法与其他算法的性能和复杂度。

以启发式码率搜索算法^[6]为例, 和本文算法进行比较, 当信道信噪比 (SNR) 依次为 0.75 dB, 1 dB, \dots , 3 dB 时, 算法求解过程中需要计算并比较的码率分配个数如表 1 所示。可见, 本文算法的运算次数较启发式码率搜索算法降低了一个数量级 (由 10^2 降低到 10^1), 因此计算时间大为缩短。

表 1 本文算法和启发式码率搜索算法运算复杂度比较
Tab. 1 The complexity comparison between the proposed algorithm and the heuristic algorithm

SNR/dB	启发式码率搜索算法	本文算法
0.75	111	14
1.0	258	33
1.25	70	5
1.5	138	4
1.75	75	5
2.0	210	3
2.25	144	10
2.5	55	3
2.75	18	3
3.0	93	3

总码率限制为 0.5 比特/像素时, 采用两种算法求得的码率分配方案, 在 AWGN 信道上传输时, 信噪比在 0.75 ~ 3 dB 内变化时的性能对比如图 2 所示。本文算法所求码率分配为码率最优解, 与启发式码率搜索算法^[6]求出的码率最优解参考值一致, 同时接近所求的失真最优解。

其次, 对比自适应码率分配方案与固定码率分配方案的性能。

选取信道码率固定为 1/3 (EEP1) 和 1/2 (EEP2) 的均等差错保护方案, 以及信道信噪比为 1.0 dB (fixedUEP1) 和 2.1 dB (fixedUEP2) 时的最佳不均等差错保护方案, 与基于本文快速算法的自适应码率分配方案进行比较。图 3 所示为总的码率限制为 0.5 bpp, 在 AWGN 信道上传输时, 信噪比在 0.75 ~ 3 dB 内变化时各方案的性能对比。固定的码率分配方案只能在小范围内达到最好的性能。若信道波动较大, 当信噪比低于该范围时, 信道码率相对高, 信道保护不够导致误码率高, 降低了重建图像质量。以信道信噪比为 0.8 dB 时为例, EEP2 方案和 fixedUEP2 方案接收端重建图像的 PSNR 与高信

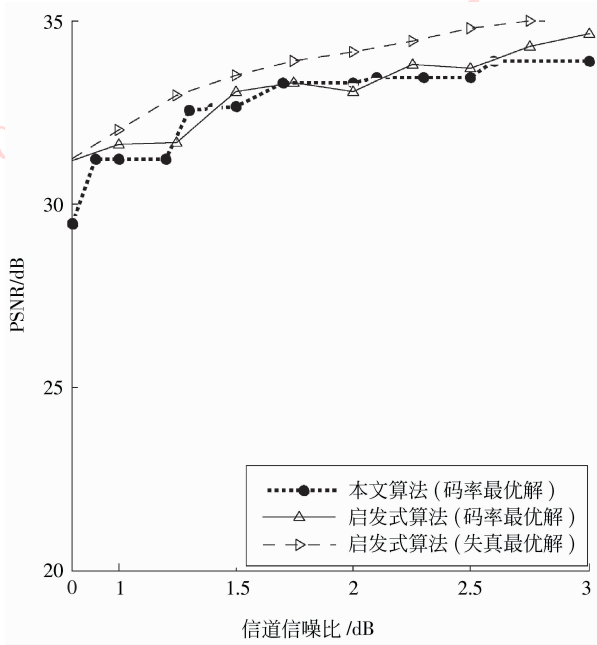


图 2 总码率限制为 0.5 比特/像素时,本文算法和启发式码率搜索算法求解的码率分配性能对比

Fig. 2 The performance comparison between the rate allocation obtained by the proposed algorithm and that of the heuristic algorithm when the bandwidth limit is 0.5 bit/pixel

噪比时(2.2 dB)的 PSNR 相比降低了 14.91 dB 和 7.23 dB。信噪比高于该范围时,信道码率相对低,处于过保护状态,同时信源码率低,影响了重建图像质量的进一步提高。以信道信噪比为 2.6 dB 时为例,EEP1 方案和 fixedUEP1 方案接收端重建图像的 PSNR 与相同信噪比下自适应码率分配方案分别相差 3.29 dB 和 2.67 dB。相比之下,采用自适应传输,发送端根据信道状况调整码率分配方案,使接收端重建图像的质量好而且稳定。仿真中,自适应码率分配方案得到的接收端重建图像的 PSNR 值始终在 29.5 dB 以上,同时波动范围小于 4 dB。

4 结 论

设计了一个嵌入式码流渐进传输的自适应信源信道联合编码系统,并针对定长信道分组方式提出了一种码率分配快速算法。通过缩小可选码率集和前后向码率搜索并行处理,极大降低了码率分配求解的复杂度。同时,所求码率分配与信源率失真特性无关,适用于同一带宽限制下任何嵌入式码流的

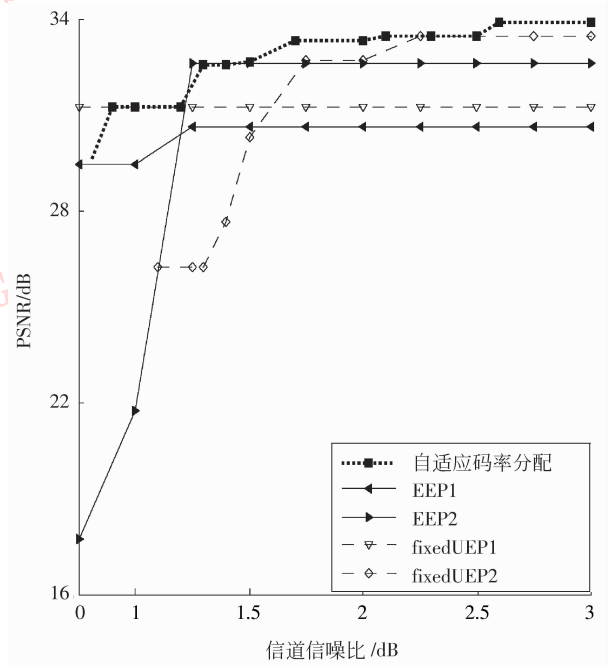


图 3 总码率限制为 0.5 比特/像素时,自适应码率分配方案和固定码率分配方案性能对比

Fig. 3 The performance comparison between the adaptive rate allocation scheme and fixed rate allocation schemes when the bandwidth limit is 0.5 bit/pixel

渐进图像传输,并且其性能接近失真最优解。将该算法应用于自适应传输系统中,可以适应信道变化,保证了接收端较好的重建图像质量。下一步的工作是研究接收方信道估计的高效算法,使自适应联合编码系统更好地适应时变信道。

参考文献 (References)

- [1] Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image code based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(6):243-250.
- [2] Sherwood P G, Zeger K. Progressive image coding for noisy channels [J]. IEEE Signal Processing Lett, 1997, 4(7):191-198.
- [3] Chande V, Farvardin N. Progressive transmission of images over memoryless noisy channels [J]. IEEE Journal on Select. Areas Commun, 2000, 18(6): 850-860.
- [4] Hamzaoui R, Sankovic V, Xiong Z. Fast algorithm for distortion-based error protection of embedded image codes [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2005, 14(10):1417-1421.

- [5] Sprljan N, Mrak M, Izquierdo E. A fast error protection scheme for transmission of embedded coded images over unreliable channels and fixed packet size // Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Philadelphia, USA: IEEE-Verlag, 2005, 3(3): 741-743.
- [6] Cao L. On the unequal error protection for progressive image transmission [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2007, 16(9):2384-2388.
- [7] Cao L. Joint source and channel coding for image transmission over time varying channels // Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC). Glasgow: IEEE Communication Society, June 2007, 2660-2664.
- [8] Liu W, Daut D G. An adaptive UEP transmission system for JPEG2000 codestream using RCPT Codes // Proceedings of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. California, USA: IEEE Signal Processing Society, November 2004, 2265-2269.
- [9] Sankovic V, Hamzaoui R, Xiong Z. Fast algorithm for rate-based error protection of embedded codes [J]. IEEE Trans. on Commun, 2003, 51(11): 1788-1795.
- [10] Rowitch D N, Milstein L B. On the performance of hybrid FEC/ARQ systems using rate compatible punctured turbo (RCPT) codes[J]. IEEE Commun Lett, 2000, 48(6): 948-959.