

一种适用于丢包信道的小波编码图像传输方案

孙文珠 王洪玉 钱大兴 王洁*
(大连理工大学信息与通信工程学院 大连 116024)

摘要: 该文提出一种适用于丢包信道的基于小波变换的可伸缩图像编码传输方案。该方案利用分层多描述编码来提高信源编码的容错性能,利用信道编码来提高系统整体的抗丢包性能,采用编码后率失真优化技术对信源编码进行优化。利用非系统的RS码对信源编码符号和信道编码符号进行重新排序,将分层多描述编码和信道编码进行了有效的结合。通过在编解码端采用相同的排序算法,来减少传输开销。仿真结果表明,该方案与现有的方案相比,提高了接收图像的质量,并且需要较少的传输开销。

关键词: 图像处理; 多级树集合分裂; 多描述编码; 可伸缩编码; 不等错保护

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)10-2342-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01297

A Transmission Scheme for Wavelet Coding Images over Packet Erasure Channels

Sun Wen-zhu Wang Hong-yu Qian Da-xing Wang Jie

(School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A scheme is proposed for transmission of wavelet-based progressive image coding over packet erasure channel. The scheme uses layered multiple description coding to improve the error resilience performance of the source coding, and uses channel coding to combat the packet erasure. Post Compression Rate Distortion optimization (PCRD-opt) technique is adopted to optimize source coding. By reordering the source coding symbols and channel coding symbols through permuted systematic RS codes, the layered multiple description coding and channel code are combined efficiently. The same sorting algorithm is adopted at encoder and decoder to reduce the overhead. Experimental results show that the proposed scheme improves the received image quality with less overhead compared to the existing method.

Key words: Image processing; Set Partitioning In Hierarchical Trees (SPIHT); Multiple Description Coding (MDC); Scalable coding; Unequal Erasure Protection (UEP)

1 引言

可伸缩图像和视频压缩算法提供了一种渐进可改善的方式来对图像或者视频信号进行压缩。压缩后的比特流在任意一点截断后,都可以以一定的置信度对原始信号进行恢复。最有效的可伸缩图像编码算法 SPIHT(Set Partitioning In Hierarchical Trees)^[1]和 JPEG2000^[2]可以实现图像的比特级别的可伸缩表示。但是可伸缩比特流中后面比特必须在前面比特正确解码的基础上才能解码。所以可伸缩码流对信道噪声非常敏感。不等错保护(Unequal Erasure Protection, UEP)和多描述编码(Multiple Description Coding, MDC)是两种噪声信道中提高可伸缩码流鲁棒性的有效方法。

由于可伸缩码流中不同位置的比特具有不同的重要性,基于加权编码传输思想^[3]的不等错保护方法成为丢包信道中可伸缩码流传输的一种有效的方法。文献[4]详细介绍了基于信道编码的不等错保护的基本方法。文献[5]将不等错保护的方法应用到 OFDM 网络中,来提高 SPIHT 码流通过深衰落信道的性能。文献[6,7]分别采用基于 RS 码和 Fountain 码的不等错保护方案对可伸缩视频码流进行不等错保护。MDC 是另一种针对丢包信道可伸缩码流的有效传输方式。文献[8]提出一种针对 SPIHT 编码的分层多描述编码。文献[9]比较了 MDC 和 UEP 在丢包信道下的性能,指出在信道条件固定不变时,UEP 具有更好的性能;当实际的信道条件偏离系统设计时的信道条件时,MDC 具有更好的适应性。文献[10]将 MDC 和基于循环码的 UEP 相结合,提出一种适用于航空遥感图像的传输方案。

2011-12-09 收到, 2012-06-18 改回

国家自然科学基金(61172058)资助课题

*通信作者: 王洁 wangjie@dlut.edu.cn

基于信道编码的传统不等错保护方案，接收端不能充分利用接收到的所有数据。针对该问题，文献[11]提出一种针对SPIHT的M-UEP(Multi-stream UEP)传输方案。M-UEP在接收端能够充分利用所有正确接收到的数据，但是性能受码流间平衡性影响较大。同时，M-UEP方案需要较多的传输开销，并且传输开销在不同的信道条件下差别较大。

本文提出一种适用于丢包信道的分层多描述编码和信道编码相结合的传输方案(Layered MDC-Equal Erasure Protection, LMDC-EEP)。在信源编码端利用分层多描述编码来提高重要比特平面容错性能，同时采用等码率的信道编码来提高整个系统的性能。采用编码后率失真优化技术(Post Compression Rate Distortion optimization, PCRD-opt)对信源编码的不同描述进行优化。采用重新排序的RS码来对信源和信道编码符号进行重新排列，将分层多描述编码和信道编码有效地结合起来。在进行信道编码的同时，考虑信源编码的率失真特性。本文中信源编码采用SPIHT算法，信道编码采用RS码。实验结果表明该方法降低了码流间平衡性对系统性能的影响；同时该方案所需要传输开销较少，且传输开销不随信道条件的变化而变化。

2 UEP与MDC传输方案

2.1 UEP和M-UEP传输方案

图1(a)描述了传统的UEP方案。在该方案中，可伸缩的比特流被分成 L 个长度递增的部分，每个部分信源编码符号数为 m_j ($m_1 \leq m_2 \leq \dots \leq m_j \leq \dots \leq m_L \leq N$)。每一个部分用码率为 (N, m_j) 的系统RS码来保护。当接收到 m_j 个包时，前 j 个信源部分能够被正确恢复出来。

图1(b)描述了M-UEP传输方案。该方案首先将原始可伸缩比特流编码成独立可解码的 N 个子码流，将 N 个子码流分别打包在 N 个信道编码包中。然后利用重新排序的RS码，对每个码流中的不同重要性的部分进行不等错保护。

2.2 多描述编码

分层多描述编码的主要思想是在编码端将一个子码流中的重要比特平面的数据嵌入其他码流中，来提高重要数据的容错性能。当其中一个子码流丢失后，该子码流中部分重要数据可以通过其他正确接收的码流恢复。图1(c)给出了分层多描述编码的基本结构。

3 LMDC-EEP传输方案

本文提出的LMDC-EEP方法在编码端采用分层多描述编码的方法，通过将子码流的重要数据嵌入到其他的子码流中来提高重要数据的容错性能；通过PCRD-opt算法对子码流编码码率进行优化；采用重新排序的RS码对信源编码符号和信道编码符号进行重新排列，将长度不等的子码流打包到长度相等的信道编码包中；通过编码和解码端采用相同的排序算法，来减少传输开销。系统的性能以式(1)表示。

$$D = D_{\text{MAX}} - \sum_i^N (\Delta D_i \cdot P_i + \Delta D'_i \cdot P'_i + \Delta D''_i \cdot P''_i) \quad (1)$$

其中 D_{MAX} 为没有接收到任何数据时解码端的失真， ΔD_i 为正确接收到第 i 个子码流对应的失真减少量， P_i 表示第 i 个子码流能正确接收的概率， $\Delta D'_i$ 表示第 i 个子码流不能正确接收，但可从其他子码流中恢复所对应的失真减少量， P'_i 表示其对应的概率。当第 i 个子码流不能正确接收，也不能通过其他码流恢复时，接收端可以通过错误隐藏技术对其进行恢复。用 $\Delta D''_i$ 表示通过错误隐藏方法恢复第 i 子码流引起的失真减少量。 P''_i 表示第 i 个子码通过其他子码流恢复的概率。其中对于码流 i ， $P_i + P'_i + P''_i = 1$ 。由于 $\Delta D''_i$ 对整个系统的影响较小并且难于计算，计算过程中未考虑这一部分的影响。

在基于包交换的网络中，由下层物理信道造成的信息传输错误在应用层的具体体现是数据包的丢失。LMDC-EEP 是一种在应用层抗数据包丢失的方法。所以本文采用两种常用的随机丢包信道模型：

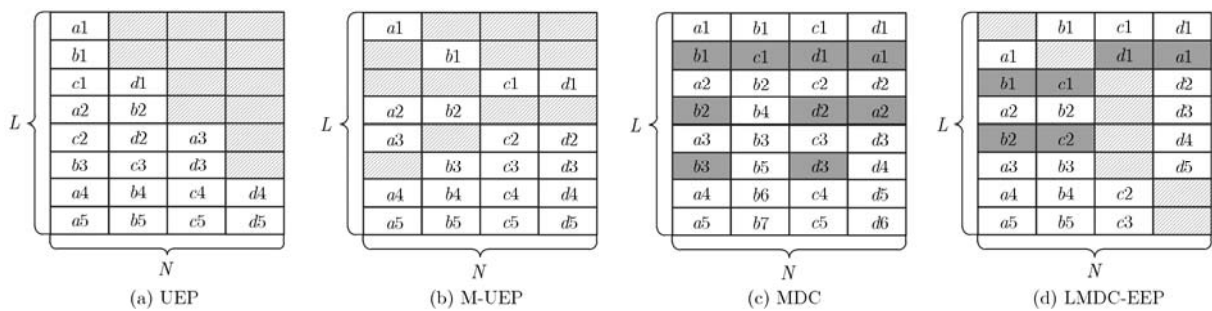


图1 4种传输方案结构图

独立丢包 (Independent Packet Loss, IPL) 模型和指数丢包 (Exponential Packet Loss, EPL) 模型来对信道建模。设信道的平均丢包率为 μ ，信道编码采用码率为 (N, K) 的 RS 码。首先计算第 i 个子码流能正确解码的概率 P_i 。当且仅当以下两种情况发生时，第 i 个子码流可以正确解码，即：(1) 第 i 个子码流能接收到；(2) 第 i 个子码流丢失，接收端至少正确接收到其他 K 个子码流。上述两种情况都不发生的概率为 \bar{P}_i ，则 $P_i = 1 - \bar{P}_i$ 。用 Φ 表示所有子码流的集合。 $\phi \subseteq \Phi$ 表示信道丢包的集合， k 表示集合 ϕ 中包含子码流的数目。 $P_N(k)$ 表示 N 个子码流中丢失 k 个的概率。当 $k > N - K$ 并且集合 ϕ 中包含第 i 个子码流的时候，第 i 个子码流完全丢失。则 \bar{P}_i 由式(2) 得出

$$\bar{P}_i = \sum_{k=N-K+1}^N \frac{C_{N-1}^{k-1}}{C_N^k} P_N(k) = \sum_{k=N-K+1}^N \frac{k}{N} P_N(k) \quad (2)$$

概率 P_i' 与码流嵌入次数 IR_i 有关系。 P_i' 可以通过 $P_i' = 1 - P_i - P_i''$ 获得。而 P_i'' 通过式(3) 求出：

$$P_i'' = \sum_{k=\max(N-K+1, IR_i)}^N \frac{C_{N-IR_i}^{k-IR_i}}{C_N^k} P_N(k) \quad (3)$$

ΔD_i 和 $\Delta D_i'$ 可以利用文献[12] 中的方法求得。

3.1 子码流嵌入

如图 1(d) 所示，子码流嵌入可以有多种方式。为了简化系统的设计，本文对子码流的嵌入加入一些限制。首先，进行码流嵌入的时候只考虑以比特平面为单位的码流嵌入。其次，对所有子码流采用相同的嵌入方式，包括嵌入比特平面层数和嵌入次数。用 IL 表示码流嵌入层数， IR 表示码流嵌入的次数。即将每个码流中前 IL 个比特平面重复嵌入到其他的 IR 个子码流中。假设共有 N 个子码流，码流嵌入次数 $IR \leq N$ 。同时规定第 i 个子码流分别嵌入到第 $\text{mod}\{(i+1, i+2, \dots, i+IR), N\}$ 个子码流中。

3.2 子码流的截断

如图 1(d) 所示，系统总传输开销为 $R = R_s + R_c = N \times L$ 。其中 R_s 为信源编码开销， R_c 为信道编码开销。用 n_i 表示第 i 个子码流的截断点， $D_i(n_i)$ 和 $R_i(n_i)$ 表示截断点 n_i 对应失真和码流长度。为最优化信源编码效率，子码流截断点的选取需要满足式(4)。

$$D_s = \min \left[\sum_{i=1}^N D(n_i) \right], \quad \sum_i R(n_i) \leq R_s \quad (4)$$

本文通过 JPEG2000 中的编码后率失真优化方法来为不同的子码流选取最优截断点。

3.3 信道编码的重新排列

LMDC-EEP 方案与 M-UEP 方案相同，信道编

码包的长度是等长的。经过 PCRD-opt 算法后，每个子码流包含的信源编码部分长度不同。通过对 RS 信道编码符号重新排列，将长度不等的 N 子码流打包到长度为 L 的等长信道编码包中，如图 1(d) 所示。共有 N 个信道编码包，每个信道编码包中包含一个子码流。用 $L \times N$ 矩阵 SC 表示信道编码排列矩阵，矩阵元素为 1 代表该位置上符号为信道编码符号，为 0 代表信源编码符号。用 LS 记录每个信道编码包中信源编码部分的长度 $\sum_i LS(i) = R_s$ 。第 i 信道编码包中，可以排列信道编码的位置个数为 $L - LS(i)$ 。对 N 个子码流按照信源部分长度排序，用 $SN(i)$ 记录第 i 个子码流的长度排序信息。用 $LR(j)$ ($j = 1, 2, \dots, L$) 表示每一行中的 RS 编码的符号数目。

通过表 1 中给出的伪代码可以获得排序矩阵 SC ，然后根据排序矩阵对信源编码符号和信道编码符号进行排列。解码端只需知道每个子码流的长度，就可以通过同样的排序算法来获得排序矩阵，从而对收到的数据进行信道解码。

表 1 排序算法伪代码

```

Initialization:
    LR(j) = 0, (j = 1, 2, ..., L)
    SC = zeros(L, N)
For m = 1 to N
    find i, which satisfy SN(i) = max(SN)
    While n ≤ L - LS(i)
        For j=1 to L
            LR(j) = LR(j) + 1
            If LR(j+1) + 1 ≥ LR(j) ≥ LR(j+1)
                n = n + 1
                SC(j, i) = 1
            Else
                LR(j) = LR(j) - 1
        End If
    End For
End While
    SN(i) = 0
End For

```

3.4 最优编码方案的选择

LMDC-EEP 方案的性能由两部分决定，一是子码流嵌入方式，二是信道编码码率。本文通过遍历搜索的方法来进行最优方案的选择。针对每一种信道编码码率和嵌入方式计算式(1) 的值。使式(1) 取最小的信道编码码率和码流嵌入方式对应的编码方案即为最优编码方案。

对于信道编码码率为 (N, K) ，码流嵌入层数为 IL 和次数为 IR 的编码方案，式(1)的计算过程简单描述如下：首先计算出概率 P_i 和 P'_i 。用 PCRD-opt 方法对各个子码流截断点进行优化，选出每个子码流的最优截断点，根据截断点得出 D_i 和 D'_i ，最后计算出式(1)的值。对可能的 K ， IL 和 IR 值进行遍历搜索，找到使得式(1)取得最小值的 K ， IL 和 IR 值。

遍历搜索的复杂度受 K ， IL 和 IR 值的影响。本文将码流嵌入层数限制在 5 层以内，即 $IL \leq 5$ 。式(1)中针对所有码流 i ，概率 P_i 和 P'_i 相同，分别用 P 和 P' 表示。 K 和 IR 的取值为 $1 \leq K, IR \leq N$ 。为了降低复杂度，采用文献[13]的方法来缩小 K 和 IR 的选择范围。图 2 和图 3 分别给出了在不同的丢包率的情况下， P 与 K ， P' 与 IR 的关系。如图 2 所示，以 $\mu = 0.40$ 曲线为例，当 $K \leq k1$ 时最优信道编码为 $(N, k1)$ ，当 $K \geq k2$ 时最优信道编码为 $(N, k2)$ 。所以只需在 $(k1, k2)$ 之间对 K 进行搜索。同样如图 3 所示，只需对 $IR \leq IR1$ 的值进行搜索。

4 仿真结果

4.1 LMDC-EEP 和 M-UEP 性能比较

仿真采用 512×512 的标准灰度图像 Lena 来进行。采用 Daubechies 9/7 小波变换对图像进行 5 级小波分解，通过不同方式将 SPIHT 结构中零树和孤立节点分成 N 个分组，然后对 N 个分组分别独立编码，以形成 N ($1 \leq N \leq 256$) 个独立可解码的子码流。仿真过程中采用文献[11]中的固定顺序分组方式来形成 N 个独立可解码子码流。该方式按照两种扫描顺序 Dispersed Dot-dithering(DD)和 Subband Dispersed(SD)将所有零树结构平均分配到 N 个分组中。在接收端，当某个子码流完全丢失时，通过文献[14]的错误隐藏方法对丢失的子码流进行恢复。

码流之间的不平衡性可以通过不同子码流编码到相同比特平面后的长度反应出来。设 $len(i)$ 为第 i 个子码流的长度。通过式(5)来反映子码流之间的平衡性。

$$\sigma = E(len - E(len) - E(len - E(len)))^2 \quad (5)$$

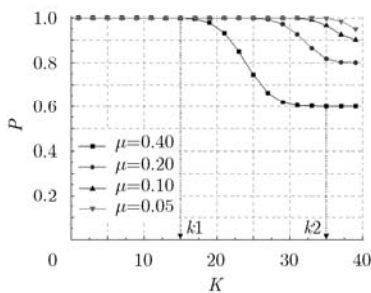


图 2 P 与 K 的关系

其中 σ 值越小说明子码流之间的平衡性越好， σ 越大说明子码流之间的平衡性越差。图 4 给出了固定分组方式下，编码到第 8 和第 12 个比特平面时，子码流之间的平衡性的示意图。从图中可以看出，与 SD 扫描顺序相比，DD 扫描顺序下子码流之间的平衡性较差。SD 扫描顺序下，子码流之间的平衡性随着 N 数目的增加而逐渐减小。

M-UEP 是现有文献中针对丢包信道中小波编码图像传输性能最好的信源信道联合编码方案。M-UEP 比其余现有的其他的联合编码方法如：MDC, UEP 等方法性能均有所提高，文献[11]给出了 M-UEP 与现有其他方法的性能比较和分析。另外，针对小波编码图像传输问题，联合编码对于分离编码的增益，现有文献中已经做出了详细的分析和比较。所以下实验部分只给出了本文方法与 M-UEP 方法结果的比较。

图 5 和图 6 给出了 IPL(Independent Packet Loss)和 EPL(Exponential Packet Loss)两种信道模型和不同信道条件下 LMDC-EEP 和 M-UEP 性能的比较。曲线 M-UEP 上界是子码流完全平衡时 M-UEP 性能上界。PSD 和 PDD 表示采用固定分组方式，扫描顺序分别采用 SD 和 DD 扫描顺序。由图中可以看出采用 PSD 和 PDD 分组方式时，M-UEP 性能都有不同程度的下降。由图 4 可以看出，相比与 PSD 分组方式，PDD 分组方式下码流之间的平衡性更差，所以系统的性能下降较为严重。当采用 PSD 分组方式时，码流间平衡性随着子码流数目 N 的增大而变差，所以系统性能随着 N 数目的增加而降低。LMDC-EEP 方案在不同子码流数目，不同信道模型，不同平均丢包率条件下，性能均好于 PDD M-UEP。当 $N \geq 16$ ，LMDC-EEP 性能优于 PSD M-UEP。随着码流间平衡性变差，LMDC-EEP 对系统性能的改善越明显，并且码流的平衡性对 LMDC-EEP 性能影响较小。

图 7 给出了 $N = 40$ ， $\mu = 0.01 \sim 0.30$ 时，IPL 和 EPL 信道模型下，LMDC-EEP 与 M-UEP 性能比较。此时，两种扫描方式下码流之间的平衡性都较差，LMDC-EEP 的性能均优于 M-UEP。

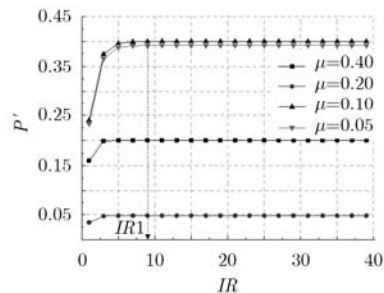


图 3 P' 与 IR 的关系

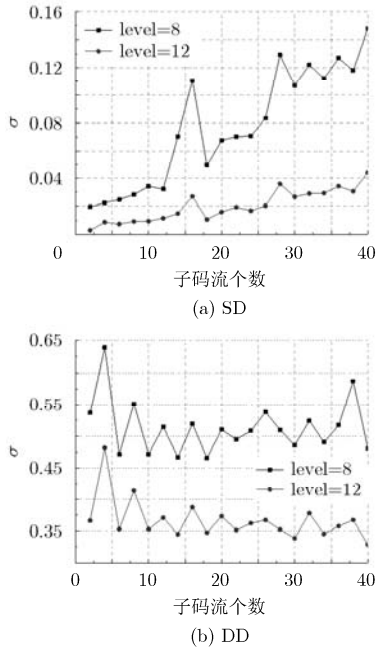


图4 固定顺序分组方式两种扫描顺序下子码流的平衡性

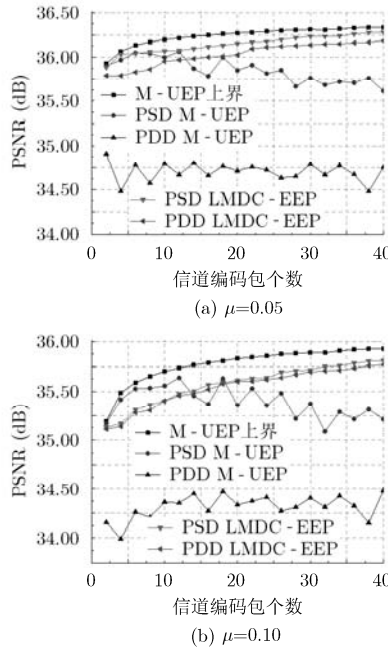


图5 IPL 信道 LMDC-EEP 和 M-UEP 性能比较

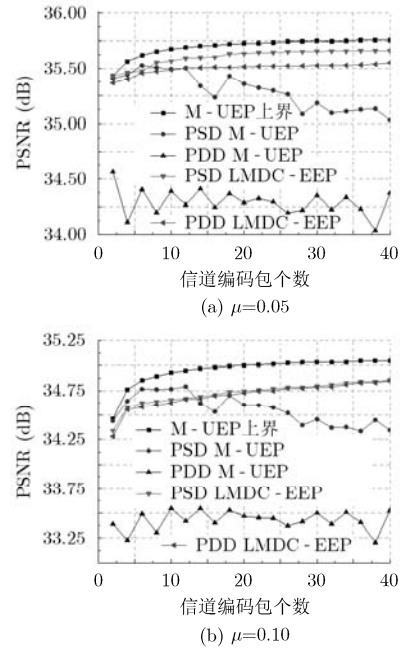


图6 EPL 信道 LMDC-EEP 和 M-UEP 性能比较

4.2 传输开销比较

为使接收端能够正确解码, LMDC-EEP 与 M-UEP 方案同样需要两部分传输开销。第 1 部分用来说明子码流的顺序, 第 2 部分用来说明信道编码的排列信息。这两种方案中, 第 1 部分传输开销相同。针对第 2 部分的传输开销, M-UEP 方案传输开销上限如式(6)所示。

$$(N-1)(\log_2(L+1)+1) + (N-1)^2 \cdot (\log_2(L/(N-1)+1)+1) \quad (6)$$

而 LMDC-EEP 对应的传输开销如式(7)所示。

$$N \log_2(L+1) + 7 \quad (7)$$

LMDC-EEP 只需要知道每个子码流的长度, IR 和 IL , 就可以正确解码。所有子码流长度用 $N \log_2(L+1)$ 可以表示。由于上文中对 IL 和 IR 的限制, 这两项的传输开销分别为 3 bit 和 4 bit。

图 8 为传输速率为 0.5 bps 时, 不同信道模型

下, LMDC-EEP 与 M-UEP 传输开销的比较。从图中可以看出本文方案的传输开销在不同信道模型和不同平均丢包率条件下均小于 M-UEP 方法。在相同的信道模型下, M-UEP 方案的传输开销随着平均丢包率的增大而增大; 在平均丢包率相同的情况下, M-UEP 方案的在 EPL 信道模型条件下的传输开销比 IPL 信道模型大。而本文方案传输开销随着信道模型和信道条件的变化而基本保持不变。

5 结束语

本文提出了一种适用于丢包信道的基于小波变换的可伸缩码流的传输方案。该方案通过重新排序的 RS 码和编码后的率失真优化技术将分层多描述编码和信道编码有效结合起来。在此基础上, 给出了一种选择最优编码方案的方法, 并通过在编码端和解码采用相同的排序算法来降低传输开销。仿真结果表明该方案降低了码流之间的不平衡性对系统

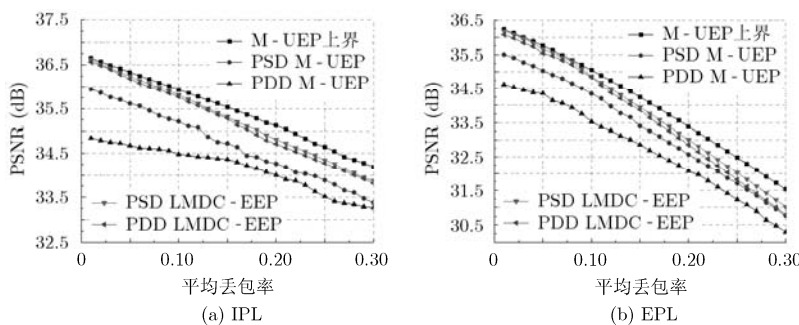


图7 $N = 40, \mu = 0.01 \sim 0.30$, 两种信道模型下 LMDC-EEP 和 M-UEP 性能比较

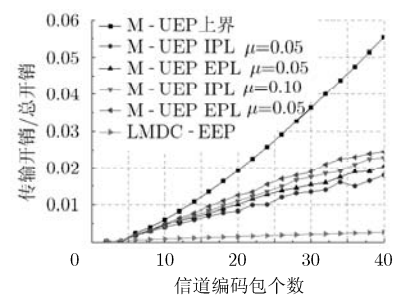


图8 传输开销比较

性能的影响，同时减少了传输开销。进一步的研究工作主要对视频编码噪声信道传输问题展开研究，使 LMDC-EEP 能够应用到视频传输中。由于 LMDC-EEP 方法属于一种信源信道联合编码，对信源编码的结构有一定依赖性，需要对 LMDC-EEP 方法进行改进，使其能够与现有的分层视频编码标准 H.264/SVC 相结合，提高视频传输的鲁棒性。

致谢 感谢 McMaster 大学的 Sorina Dumitrescu 教授提供的数据。

参 考 文 献

- [1] Said A and Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, 6(3): 243-250.
- [2] Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(7): 1158-1170.
- [3] Albanese A, Blomer J, Edmonds J, et al. Priority encoding transmission [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1996, 42(6): 1737-1744.
- [4] Hamzaoui R, Stankovic V, and Xiong Z X. Optimized error protection of scalable image bit streams [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(6): 91-107.
- [5] Chang S H, Cosman P C, and Milstein L B. Performance analysis of n-channel symmetric FEC-based multiple description coding for OFDM networks[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(4): 1061-1076.
- [6] Maani E and Katsaggelos A K. Unequal error protection for robust streaming of scalable video over packet lossy networks [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, 20(3): 407-416.
- [7] Ahmad S, Hamzaoui R, and Al-Akaidi M M. Unequal error protection using fountain codes with applications to video communication [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2011, 13(1): 92-101.
- [8] Miguel A C, Mohr A E, and Riskin E A. SPIHT for generalized multiple description coding [C]. International Conference on Image Processing, Kobe, Japan, October, 1999, 3: 842-846.
- [9] Baccaglioni E, Tillo T, and Olmo G A. Comparison between ULP and MDC with many descriptions for image transmission [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(1): 75-78.
- [10] 李群迎, 张晓林. 基于多描述和不等差错保护的航空遥感图像传输方法[J]. 电子学报, 2010, 38(11): 2655-2659.
Li Qun-ying and Zhang Xiao-lin. Aerial remote sensing image transmission using multiple description coding and unequal error protection[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(11): 2655-2659.
- [11] Dumitrescu S, Rivers G, and Shirani S. Unequal erasure protection technique for scalable multistreams[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(2): 422-434.
- [12] Auli L F and Marcellin M W. Distortion estimators for bitplane image coding [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(8): 1772-1781.
- [13] Chi C, Zhang Y, and Fu Z X, et al. A new joint source and channel coding scheme for packet-based scalable multimedia streams[C]. IEEE Globecom, Miami, FL, USA December 6-10, 2010: 954-959.
- [14] Shi H Y and Pofeng C. Robust transmission of SPIHT-coded images over packet networks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, 17(5): 558-567.

孙文珠：男，1983年生，博士生，研究方向为信源信道联合编码、多媒体通信。

王洪玉：男，1968年生，教授，博士生导师，研究方向为信源信道联合编码、无线传感器网络、移动自组织网络等。

钱大兴：男，1979年生，博士生，研究方向为可伸缩视频编码。

王 洁：男，1981年生，讲师，研究方向为无线传感器网络、RFID、移动自组织网络等。