

基于跨层不等重功率分配的渐进图像传输方案

赵 锴, 崔慧娟, 唐 昆

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 为了在无线衰落信道下鲁棒和高效地编码传输渐进图像, 提出了基于跨层不等重功率分配的编码传输方案。和以往基于不等重功率分配的传输优化方案不同, 该方案综合考虑了反馈信道提供的物理层信道状态信息、链路层自动重传信息和应用层压缩编码率失真特性, 采用基于解析表达的数值优化算法, 求得各个层上最优不等重功率分配策略, 减小给定期望传输功率约束下的图像传输失真。实验表明, 相对于以往方案, 所提方案不但避免了启发式优化算法的高搜索复杂度; 而且能大大提高接收端重建图像的峰值信噪比。

关键词: 渐进图像编码; 不等重功率分配; 信道反馈信息; 跨层优化

中图分类号: TN 919.81

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.05.30

Transmission scheme for progressive coded images based on cross-layer unequal power allocation

ZHAO Kai, CUI Hui-juan, TANG Kun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For efficient and robust transmission of progressive coded images under wireless fading channels, an optimal scheme based on cross-layer unequal power allocation is proposed. Unlike previous optimal transmission schemes based on unequal power allocation, through effective use of channel state information in physical layer, automatic repeat request (ARQ) information in link layer and rate distortion characteristics of compression stream in application layer, the optimal unequal power allocation policies across all three layers are calculated by numerical optimization methods based on analytical expressions to minimize the image transmission distortion. Extensive experimental results show that not only the high searching complexity of heuristic optimization algorithm is avoided, but also the peak signal-to-noise ratio (PSNR) of the reconstructed image is significantly improved in the proposed scheme.

Keywords: progressive image coding; unequal power allocation; channel feedback information; cross-layer optimization

0 引言

渐进图像编码(SPIHT^[1]和JPEG2000^[2])可以产生渐进的编码压缩码流以适应无线信道上动态波动的信道状况, 得到了研究人员的普遍关注。然而由于其压缩码流对误码十分敏感(码流中位置靠前的重要比特如果受损, 可能会使得整幅图像不可解码), 因此传输框架中必须采用高性能物理层纠错码(forward error correction, FEC)技术或链路层自动重传(automatic repeat request, ARQ)技术, 保障差错信道下的鲁棒传输。结合二者优点的混合自动重传技术(hybrid ARQ, HARQ), 能在有限的传输带宽下, 动态适配无线信道的时变衰落特性, 保证数据的高可靠性传输。

无线多媒体通信系统传输带宽和功率资源十分稀缺宝贵, 因此考虑如何在上述鲁棒传输措施的基础上, 高效利用有限的传输资源, 制定结合信源压缩和信道保护的编码传输方案, 保障接收端好的重建图像质量, 具有很大的理论意义和工程实用价值。

以往文献关于此问题的解决方案, 按照约束资源的不同, 可以大致分为两类: ①考虑传输图像的总码率受限情况下, 利用不等重保护(unequal error protection, UEP)方案, 最小化图像传输的端到端失真; ②考虑传输图像的总功率受限情况下, 利用不等重功率分配(unequal power allocation, UPA)方案, 来最大限度地提高重建图像的传输质量。其中, 第一类问题的解决方案相对成熟, 文献[3-4]提出基

收稿日期: 2011-11-14; 修回日期: 2012-03-16。

基金项目: 国家自然科学基金(60572081)资助课题

作者简介: 赵锴(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多媒体通信。E-mail: zhaokai06@mails.tsinghua.edu.cn

于速率兼容删余型卷积码的编码保护框架,在无信道反馈信息的情况下,使用动态规划算法求得最小化传输期望失真的 UEP 保护方案。文献[5-6]采用速率兼容删余型 Turbo 码作为信道编码算法,得到了结合链路层 HARQ 协议的最佳 UEP 传输保护方案,进一步提高了接收端图像的重建质量。第二类问题由于涉及到多维连续型变量——最优功率分配向量的搜索,求解较为困难,解决方案目前并不完善。文献[7]提出基于拉格朗日乘子法的 UPA 方案,但是编码传输框架中并未考虑高性能信道编码保护算法。文献[8-9]提出利用 RS 码对压缩码流进行保护的传输方案,但链路层中并未考虑基于反馈信道的 HARQ 协议,且最优 UPA 方案的求解分别借助于并行搜索的启发式算法——遗传算法(genetic algorithm, GA)和模拟退火(simulated annealing, SA)算法,时间复杂度太高。

为了克服以往文献的不足,本文首先提出了一个基于高性能低密度奇偶校验(low-density parity check, LDPC)码和 HARQ 协议的渐进图像传输框架;接着结合物理层信道状态信息(channel state information, CSI)、链路层反馈重传 ARQ 信息,以及应用层压缩码流的率失真特性,求出最优功率分配方案,使得在无线衰落信道下接收端图像的重建质量达到最佳。仿真实验表明,本文提出的编码传输框架和功率分配方案,较以往方案能够高效利用稀缺的功率资源,大大提高接收端图像的重建质量。

1 基于 LDPC 码和 HARQ 协议的渐进图像编码传输框架

基于 LDPC 码和 HARQ 协议的图像渐进编码传输框架如图 1 所示。设允许传输的信源数据包数目最大为 N ,用于传输图像的期望功率约束为 P_0 ,物理层 LDPC 码信道编码符号帧长恒为 L_c ,效率恒定为 η 。根据链路层 HARQ 协议,在接收端信道译码失败的情况下,指示发送端进行重传,允许反馈重传的最大次数为 K 。信道模型采用了通用的高斯白噪声信道(additive white Gauss noise, AWGN)和准静态衰落(quasi-static fading channel, QSFC)信道,因为二者简单高效,被广泛地应用于无线通信系统信道编码调制方案的设计和仿真。

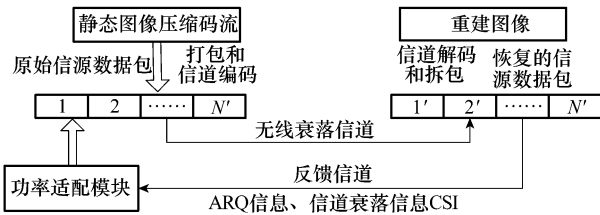


图 1 基于 LDPC 码和 HARQ 协议的编码传输框架

在发送端,经由渐进图像编码器输出的编码压缩码流,首先打包成长度为 $L_s = L_c \cdot \eta$ 的信源数据包,然后经过 LDPC 编码,形成长度为 L_c 的信道数据帧;接着功率适配模块根据 CSI、ARQ 信息、以及压缩码流的率失真特性,对

于当前第 i 个传输数据帧的第 k 次传输(其中 $i \in [1, T_0]$, $k \in [1, K]$),分配合适的传输功率 $p_{i,k}$,并送入无线信道。在接收端,首先 LDPC 译码器利用置信传播(belief propagation, BP)译码算法对数据帧 L_c 个信道符号,进行信道译码,同时向发送端反馈反映信道衰落状态的 CSI 信息;接着对译码后的符号进行校验,如果成功则放入应用层图像解码缓冲区,并向发送端发送 ACK 确认;否则向发送端发送 NAK 信息,要求数据重传,若反馈重传次数达到上限 K 后,仍校验失败,则根据图像渐进编码传输基本假设^[3-9],中止传输,将缓冲区的码流解码以获得重建图像。

2 跨层 UPA 方案

2.1 物理层 UPA 子方案

文献[10]中的理论分析和仿真实验表明,码字数分布经过优化的非规则 LDPC 码在 BP 迭代算法下的译码性能可以接近信道容量,并呈现出明显的门限效应。因此这里设定图 1 传输框架中在 AWGN 信道下的译码门限信噪比为 γ_{th} , 则若接收端信噪比 $\gamma \geq \gamma_{th}$, 译码误帧率 $FER_{awgn}(\gamma) \approx 0$; 否则 $FER_{awgn}(\gamma) \approx 1$ 。在 QSFC 信道下,所有传输符号的衰落因子 c 为恒定不变,而不同时隙内衰落因子相互独立,并且服从概率密度分布函数为 $f_{csi}(c)$ 的同一随机分布。记在平均功率约束为 \bar{p} , 信道衰落因子为 c 的情况下,功率分配方案为 $S(c, \bar{p})$, 则此时信噪比由 $S(c, \bar{p})$, 衰落系数 c 和双边功率谱密度 N_0 共同决定,即 $\gamma = c \cdot S(c, \bar{p}) / (N_0/2)$ 。不失一般性,假设噪声双边功率谱密度为 $N_0/2 = 1$, 且衰落因子的期望 $E\{c\} = 1$, 则 $\gamma = c \cdot S(c, \bar{p})$, 将其在概率空间内积分,即可得到物理层传输的平均误帧率为 $FER_{QSFC}(\bar{p})$ 。积分过程和功率分配约束的表达式如式(1)所示。若发送端采取恒定功率分配方案,即 $S(c, \bar{p}) = \bar{p}$, 则接收端物理层传输的误帧率可以计算如式(2)所示。

$$\begin{cases} FER_{QSFC}(\bar{p}) = \int_0^{\infty} f_{csi}(c) \cdot FER_{awgn}(c \cdot S(c, \bar{p})) dc \\ \text{s. t. } \int_0^{\infty} f_{csi}(c) \cdot S(c, \bar{p}) dc \leq \bar{p} \end{cases} \quad (1)$$

$$FER_{QSFC}(\bar{p}) = \int_0^{\infty} f_{csi}(c) \cdot FER_{awgn}(c \cdot \bar{p}) dc \quad (2)$$

考虑到图 1 传输系统中衰落信道编码和调制方式不变,使用文献[11]中的截断信道逆转(truncated channel inversion, TCI)功率分配方案改善图 1 传输系统物理层的纠错性能。其物理意义是,在平均功率为 \bar{p} 的约束条件下,若信道衰落因子 c 低于门限 $\sigma(\bar{p})$, 表示信道正处于深度衰落,不分配传输功率;否则分配 γ_{th}/c 的传输功率,使得此时的瞬时信噪比 $\gamma = c \cdot S(c, \bar{p}) = \gamma_{th}$, 刚好达到 LDPC 码的译码门限。通过联立式(2)和式(3),运用二分数值搜索算法可以方便求出 $\sigma(\bar{p})$ 。显然,经过功率分配后, QSFC 信道物理层传输的误帧率恒定,仅仅依赖于衰落因子门限 $\sigma(\bar{p})$, 可以表示为式(4)。

$$S(c, \bar{p}) = \begin{cases} \frac{\gamma_{th}}{c}, & c \geq \sigma(\bar{p}) \\ 0, & c < \sigma(\bar{p}) \end{cases} \quad (3)$$

$$FER_{QSFC}(\bar{p}) = \int_0^{\sigma(\bar{p})} f_{csi}(c) dc \quad (4)$$

然而考虑到实际通信系统反馈带宽有限,发送端只能得到有限比特量化的信道衰落因子,因此基于式(3)的 TCI 功率分配方案并不实用。下面本节提出分段截断信道逆转(piecewise truncated channel inversion, PTCI)算法对上述不足进行改善。具体地,设 c 按照图 2 中最优标量量化算法——Lloyd-Max 算法进行 k bit 量化,若 $c \in [C_q(i), C_q(i+1)]$,则量化值 $Q_k(c) = i$ 。考虑不同的量化区间,功率约束条件可以写成式(5)。PTCI 功率分配方案如式(6)所示,若 $Q_k(c) \leq Q_k(\sigma_k(\bar{p}))$,说明信道处于深度衰落,不分配任何功率;若 $Q_k(c) = Q_k(\sigma_k(\bar{p}))$,信道和允许衰落因子的门限处于同一量化区间, $S(c, \bar{p}) = \gamma_{th} / \sigma_k(\bar{p})$;若 $Q_k(c) > Q_k(\sigma_k(\bar{p}))$,说明信道情况较好, $S(c, \bar{p}) = \gamma_{th} / C_q(Q_k(c))$ 。联立式(5)和式(6),这里采用二分数值搜索算法求解衰落因子门限 $\sigma_k(\bar{p})$ 。此功率分配方案采取保守策略根据量化区间内衰落因子进行功率分配,可以保证当 $Q_k(c) \geq Q_k(\sigma_k(\bar{p}))$ 时,接收端的信噪比大于译码门限 γ_{th} ,因此 QSFC 信道物理层传输的误帧率依然只依赖于 $\sigma_k(\bar{p})$,可以写成式(4)的简单形式。

$$\sum_{i=0}^{M-1} S(c, \bar{p}) \cdot \int_{C_q(i)}^{C_q(i+1)} f_{csi}(c) dc \leq \bar{p} \quad (5)$$

$$S(c, \bar{p}) = \begin{cases} 0, & Q_k(c) < Q_k(\sigma_k(\bar{p})) \\ \frac{\gamma_{th}}{\sigma_k(\bar{p})}, & Q_k(c) = Q_k(\sigma_k(\bar{p})) \\ \frac{\gamma_{th}}{C_q(Q_k(c))}, & Q_k(c) > Q_k(\sigma_k(\bar{p})) \end{cases} \quad (6)$$

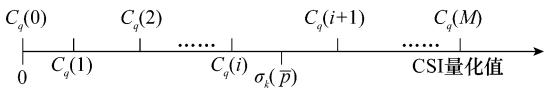


图 2 物理层基于 q 比特信道衰落因子量化的 PTCL 功率分配算法

通过本节物理层基于有限比特 CSI 反馈的功率分配方案,改善了渐进图像实际传输系统的物理层纠错性能。第 3 节将通过实验数据说明此方案相对于均匀功率分配方案对于重建图像质量的增益,并详细评估量化比特数目 q 的影响。

2.2 链路层 UPA 子方案

根据 HARQ 协议,在接收端如果信道数据帧译码失败,则通过反馈信道指示发端重新发送该帧,最多可以发送 K 次,如果 K 次传输都不成功,则链路层传输失败。

设衰落信道下传输功率约束为 p 时,经过物理层功率分配方案的误帧率为 $FER(p)$ 。链路层最多 K 次传输的功率向量配置为 $\bar{p} = [p_1, p_2, \dots, p_K]$,则发送端根据接收端反馈的 ARQ 信息所消耗的平均功率 p_{avg} 和链路层传输数据帧失败的概率 P_{Fail} 可以分析如式(7)所示。

$$\begin{cases} p_{avg}(p) = \sum_{i=1}^K p_i \cdot \prod_{j=1}^{i-1} FER(p_j) \\ P_{Fail}(p) = \prod_{i=1}^K FER(p_i) \end{cases} \quad (7)$$

根据文献[12]的理论分析,在给定的数据帧传输失败概率 P_{out} 约束下,使得平均传输功率 p_{avg} 最小的不等重功率分配方案 $p^* = [p_1^*, p_2^*, \dots, p_K^*]$ 满足式(8)的约束关系。显然根据式(8),对于给定的传输失败概率,能求出最优的功率分配方案。

$$\begin{cases} \min_p p_{avg}(p) \\ \text{s. t. } P_{Fail}(p) \leq P_{out} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} FER(p_{i+1}^*) - p_{i+1}^* - \frac{1}{FER'(p_i^*)} = 0 \\ P_{Fail}(p^*) = P_{out} \end{cases} \quad (8)$$

利用式(8)结论,对可达的传输失败概率在对数域进行二分搜索,寻找满足约束条件 $p_{avg}(\hat{P}) = \bar{p}$ 的链路层功率分配优化方案。具体步骤如下:

步骤 1 初始化 $\epsilon_{min} = 10^{-10}$, $\epsilon_{max} = 10^{-0}$ 。

步骤 2 取 $\epsilon_{mid} = 10^{\lg((\epsilon_{min} + \epsilon_{max})/2)}$,对于给定的数据帧传输失败概率 $P_{out} = \epsilon_{mid}$,根据式(8)求出对应的最优功率分配方案 $\hat{P}(\epsilon_{mid})$ 和平均传输功率 $p_{avg}(\hat{P}(\epsilon_{mid}))$ 。

步骤 3 若 $|p_{avg}(\hat{P}(\epsilon_{mid})) - \bar{p}| < \delta$,说明找到了合适的功率分配向量(参数 δ 用来控制算法误差精度,本文中取 $\delta = 10^{-3}$);算法结束。

步骤 4 若 $p_{avg}(\hat{P}(\epsilon_{mid})) < \bar{p}$, $\epsilon_{min} = \epsilon_{mid}$; 否则 $\epsilon_{max} = \epsilon_{mid}$,返回步骤 2。

根据本节对于链路层功率分配方案的优化,功率利用效率得到提升,本文将在第 3 节通过实验证明此方案相对于均匀功率分配方案的性能增益及详细评估最大传输轮数 K 对于图像重建质量的影响。

2.3 应用层 UPA 子方案

本部分给出结合信源压缩率失真特性的应用层功率分配方案,使得在给定的传输约束下,接收端图像的重建质量达到最佳。设发送端链路层在 ARQ 反馈信息的基础上,通过功率有效分配,在平均传输功率为 p 时,数据帧传输失败的概率为 $P_{Fail}(p)$,传输成功的概率为 $P_{Succ}(p) = 1 - P_{Fail}(p)$ 。应用层在有限延迟条件约束下,最多可以发送 N 个长度为 L_s 的信源分组数据包,总的传输功率为 P_0 ,分配给第 i 个信源压缩数据包的平均传输功率为 P_i 。根据文献[3-9]中关于渐进图像压缩码流特性的假设,设图像的原始失真为 D_0 ,第 i 个信源压缩数据包引起的失真减小为 ΔD_i ,则若成功收到前 i 个信源压缩数据包,则接收到的图像失真为 $D_i = D_0 - \sum_{j=1}^i \Delta D_j$ 。考虑到链路层数据帧的传输失败,接收端图像重建的期望失真 $E\{D\}$ 可以计算如式(9)。应用层 UPA 方案的优化目标是在 P_0 给定的情况下,最小化 $E\{D\}$ 。根

据 $P_{\text{Succ}}(P_i) = 1 - P_{\text{Fail}}(P_i)$, 将式(9)稍作整理, 即可得到式(10)中更为简洁的优化目标和功率约束条件。

$$E\{D\} = \sum_{i=0}^{N-1} D_i \cdot P_{\text{Fail}}(P_{i+1}) \cdot \prod_{k=1}^i (1 - P_{\text{Fail}}(P_k)) + D_N \cdot \prod_{k=1}^N (1 - P_{\text{Fail}}(P_k)) \quad (9)$$

$$\begin{cases} \min E\{D\} = \min \{D_0 - \sum_{i=1}^N \Delta D_i \cdot \prod_{j=1}^i P_{\text{Succ}}(P_j)\} \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^N P_i \leq P_0 \end{cases} \quad (10)$$

不同于文献[7], 下面使用解析推导和简单数值计算的方法求解最优 UPA 方案。首先, 借助拉格朗日乘子法, 将式(10)的约束极值问题转化为无约束极值问题(11)。为了方便下文公式推导, 记 g_k 和 h_k 如式(12)所示。将目标函数 F 对变量 $P_1, P_2, \dots, P_N, \lambda$ 分别求偏导, 并令其为 0, 可以得到式(13)。

$$\min F(P_1, P_2, \dots, P_N, \lambda) = \min \{D_0 - \sum_{i=1}^N \Delta D_i \prod_{j=1}^i P_{\text{Succ}}(P_j) - \lambda (\sum_{i=1}^N P_i - P_0)\} \quad (11)$$

$$\begin{cases} g_k = \prod_{i=1}^k P_{\text{Succ}}(P_i) \\ h_k = \frac{P_{\text{Succ}}(P_k)}{P_{\text{Succ}}'(P_k)} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial P_i} = \frac{P_{\text{Succ}}'(P_i)}{P_{\text{Succ}}(P_i)} \cdot [0, 0, \dots, 0, \Delta D_i, \Delta D_{i+1}, \dots, \Delta D_M] \cdot [g_1, g_2, \dots, g_M]^T - \lambda = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = P_0 - \sum_{i=1}^N P_i = 0 \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)稍作整理, 得式(14), 将其展开即得式(15), 再将相邻等式依次相除得式(16)。观察式(16), 本节得到了最优功率分配方案之间的递推关系。令 $h_{N+1} = 0$, 进一步化简可以式(17), 即得到第 $i-1$ 个和第 i 个信源数据包分组的最优分配功率之间的显示递推关系。

$$[0, 0, \dots, 0, \Delta D_i, \Delta D_{i+1}, \dots, \Delta D_N] \cdot$$

$$[g_1, g_2, \dots, g_N]^T = \lambda \cdot \frac{P_{\text{Succ}}(P_i)}{P_{\text{Succ}}'(P_i)} = \lambda \cdot h_i \quad (14)$$

$$\begin{cases} g_N = \lambda \cdot h_N / \Delta D_N \\ g_{N-1} = \lambda \cdot (h_{N-1} - h_N) / \Delta D_{N-1} \\ \vdots \\ g_1 = \lambda \cdot (h_1 - h_2) / \Delta D_1 \end{cases} \quad (15)$$

$$P_{\text{Succ}}(p_i) = \frac{h_i - h_{i+1}}{h_{i-1} - h_i} \cdot \frac{\Delta D_{i-1}}{\Delta D_i}, \quad \forall i \in [2, N] \quad (16)$$

$$h_{i-1} = h_i + \frac{\Delta D_{i-1} \cdot (h_i - h_{i+1})}{\Delta D_i \cdot P_{\text{Succ}}(p_i)} \quad (17)$$

基于式(17)所描述的最优功率分配方案之间的递推关

系, 通过对将第 N 包信源数据包分组的传输功率 \hat{P}_N 的二分搜索, 直至传输总功率满足边界约束条件 $\hat{P}_{\text{sum}} = P_0$, 最终得到应用层最优 UPA 方案 P^* 。其具体步骤如下:

步骤 1 初始化 $p_{\min} = 0, p_{\max} = P_0$ 。

步骤 2 令 $\hat{P}_N = (p_{\min} + p_{\max})/2$; 根据式(16), 计算 \hat{h}_N 。

步骤 3 根据式(17)递推计算 $\hat{h}_{N-1}, \hat{h}_{N-2}, \dots, \hat{h}_1$; 进而根据式(12), 计算前 $N-1$ 包功率分配方案 $\hat{P}_{N-1}, \hat{P}_{N-2}, \dots, \hat{P}_1$ 。

步骤 4 计算传输总功率 $\hat{P}_{\text{sum}} = \sum \hat{P}_i$, 若 $|\hat{P}_{\text{sum}} - P_0| < \delta$ (参数 δ 用来控制算法误差精度, 本文取 $\delta = 10^{-3}$), $P^* = [\hat{P}_1, \hat{P}_2, \dots, \hat{P}_N]$, 算法结束。

步骤 5 若 $\hat{P}_{\text{sum}} < P_0, p_{\min} = \hat{P}_N$; 否则 $p_{\max} = \hat{P}_N$, 返回步骤 1。

3 仿真实验

本节仿真实验从两方面分析本文提出跨层 UPA 方案的性能。①独立验证本文物理层、链路层和应用层提出的 UPA 方案相对于 EPA 方案给接收端图像重建质量带来的性能增益; ②讨论在最优跨层 UPA 方案下, 不同传输参数对于图像重建质量的影响。

为了避免信源数据的单一性, 本节采用两幅典型图像——Lenna(512×512)和 Goldhill(512×512)进行实验, 接收端图像重建的客观质量采用峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)来衡量。按照图 1 编码传输框架, 信源压缩编码算法采用 JPEG2000 算法^[2]; 信道编码采用性能优异的非规则 LDPC 码, 信道编码帧长为 $L_c = 512$ Bytes, 编码效率为 $\eta = 0.5$, 而变量节点的度数分布经过优化, 如式(19)所示; QSFC 衰落信道模型为瑞利衰落, 双边噪声功率谱密度为 $N_0/2 = 1$, 信道衰落因子 c 满足 $E\{c\} = 1$, 服从指数分布 $f_{\text{csi}}(c) = 1 - \exp(-c), c \in [0, \infty)$ 。设图 1 跨层图像传输框架中, 物理层反馈 CSI 的比特数目为 q , 数据链路层每个数据包最大传输轮数为 K , 而应用层传输信源数据包数目为 N 。为了下文叙述方便, 下面介绍图例标记说明。不同功率分配方案的图例标记分为 3 部分, 其中第一部分表示物理层的功率分配方案, “NCSI”表示不考虑 CSI 反馈信息的均匀功率分配方案, “QCSI”表示采用第 2.1 节有限比特量化反馈 CSI 信息的 PTCI 功率分配方案; 第二部分表示链路层的功率分配方案, “EPA”代表链路层 K 轮传输采取均匀分配功率方案, “UPA”代表采取第 2.2 节最优不等重分配功率方案; 第三部分表示应用层的功率适配方案, “EPA”表示信源数据包之间采用均匀功率分配方案, “UPA”表示使用 2.3 节基于简单数值计算的最优不等重功率分配方案, “UPA-GA”表示使用文献[7]中基于 GA 的不等重功率分配方案。

$$\lambda(x) = 0.475 3x^2 + 0.279 5x^3 + 0.034 8x^4 + 0.108 89x^5 + 0.101 38x^{15} \quad (18)$$

图 3 和图 4 分别给出了 Lenna 和 Goldhill 在 $q=2, K=3, N=25$ 和 $q=2, K=3, N=20$ 情况下,不同功率分配方案重建图像质量的性能对比曲线。通过对比可以看出:①两幅测试图像中,方案“QCSI-EPA-EPA”相对于“NCSI-EPA-EPA”取得了分别均值约 2.3 dB 和 4.7 dB 的 PSNR 增益,说明在上层功率分配方案一致情况下,物理层基于有限比特量化反馈衰落因子的 UPA 方案能够独立的显著提高图像重建质量;②两幅图像中,方案“QCSI-UPA-EPA”比“QCSI-EPA-EPA”取得了均值约 4.2 dB 和 4.1 dB 的 PNSR 增益,说明第 2.2 节链路层的 UPA 方案通过对传输功率的高效利用,也能够独立提升图像传输效果;③两幅图像中,方案“QCSI-UPA-

UPA”和“QCSI-UPA-GA”性能十分相近,相对于方案“QCSI-UPA-EPA”都能取得 3.1 dB 和 4.9 dB 的 PSNR 增益,这说明第 2.3 节基于低复杂度数值计算的应用层 UPA 方案能大幅度提高图像的重建质量,同时避免了文献[7]中基于并行启发式算法的高复杂度。同时,通过图 3 中还可以看出在低信噪比情况下,各层经过优化的 UPA 方案相对于 EPA 方案均能显著提升图像质量(最大增益能达到 7~10 dB),但是在信噪比较高时,二者性能几乎接近(增益 0~0.2 dB)。这是由于在功率资源富余时,两种分配策略都能保证 LDPC 的正确解码,这时如果要继续增加图像质量,只能通过采取增加延迟(信源传输包数目)或高频谱利用效率的编码调制方案来提高图像质量。

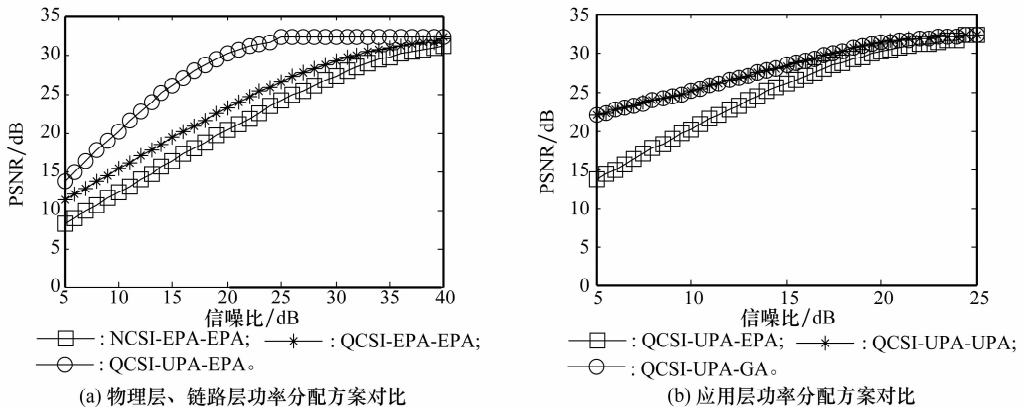


图 3 跨层 UPA 和 EPA 方案对比(Lenna)

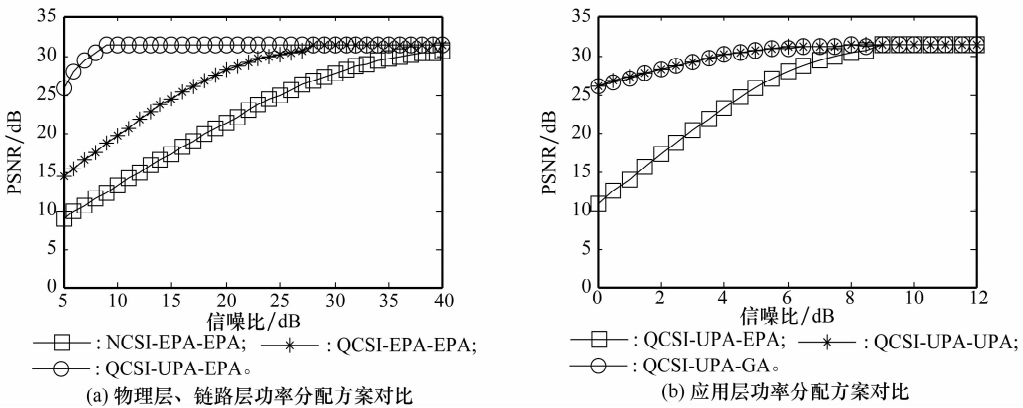


图 4 跨层 UPA 和 EPA 方案对比(Goldhill)

下面分析,在跨层 UPA 方案“QCSI-UPA-UPA”下,不同传输参数对于接收端重建图像质量的影响。具体的,图 5 给出了 Lenna 图像在不同物理层衰落因子量化反馈比特数 q 、链路层允许数据帧的最大传输轮数 K 及应用层允许传输的信源数据包数目 N 下,接收端重建 PSNR 曲线。经过观察可以看出:①物理层随着参数 q 的增大,图像传输质量有所提升,但是质量增益随着反馈比特数目和信噪比的增加逐渐饱和,这是由于随着 q 和信噪比的增大,基于有限比特 CSI 反

馈的 PTCI 算法逐渐逼近无失真 CSI 反馈的 TCI 算法的性能;②链路层随着允许重传次数 K 的增大,图像的传输质量得到较大幅度提升(均值 5~6 dB PSNR 增益),这是因为 HARQ 协议中,参数 K 的增大可以指数级的减少数据帧传输失败的概率;③应用层随着参数 N 增大,不同信噪比下的图像传输质量有稳步提升,但是提升的幅度也越来越小,这是由渐进图像压缩编码的率失真特性所决定的,因为随着码率的提升,失真曲线将逐渐趋于平滑。

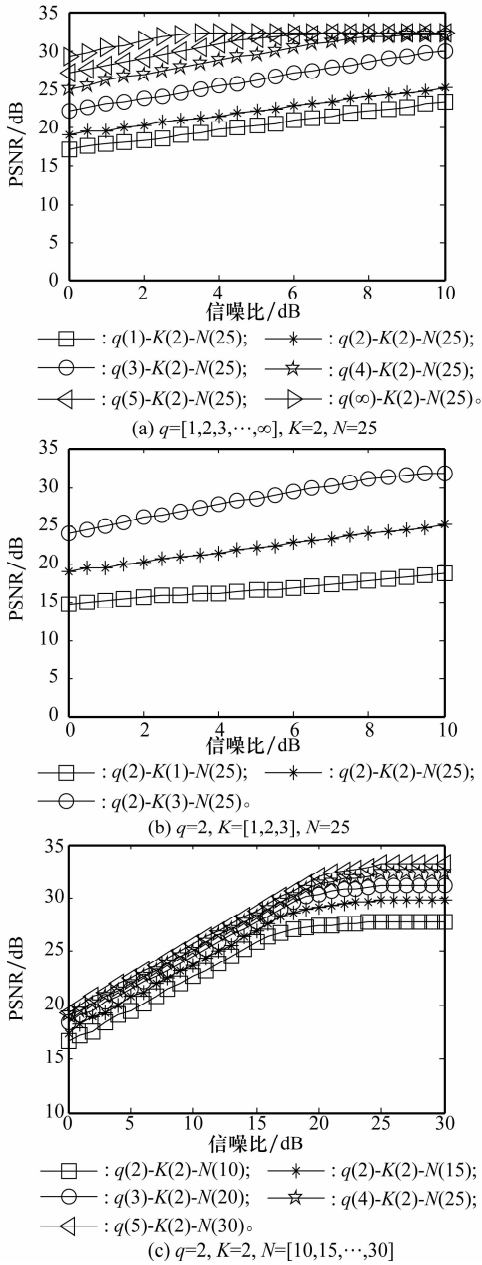


图 5 跨层 UPA 方案“QCSI-UPA-UPA”在不同传输参数时的影响(Lenna)

4 结 论

本文首先介绍了基于 LDPC 编码和 HARQ 协议的渐进图像编码传输系统,接着根据信道反馈 CSI 和 ARQ 信息以及压缩码流率失真特性,提出了一种新型跨层 UPA 方

案。经过对不同测试图像、传输参数和信道条件下的广泛测试,本文方案同以往功率分配方案相比,不但求解复杂度低,而且使得接收端重建图像的质量有了大幅度提高,对于无线信道下渐进图像的实时传输有很强的实用价值。

参考文献:

[1] Said A, Pearlman W A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees[J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, 6(3): 243 - 250.

[2] ISO/IEC 15444 - 1. JPEG2000 image coding system part 1: core coding system[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2002.

[3] Sherwood P, Zeger K. Error protection for progressive image transmission over memoryless and fading channels[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1998, 46(12): 1555 - 1559.

[4] Chande V, Farvardin N. Progressive transmission of images over memoryless channels[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(6): 850 - 860.

[5] Nosratinia A, Lu J, Aazhang B. Source channel rate allocation for progressive transmission of images[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2003, 51(2): 186 - 196.

[6] Cao L. On the unequal error protection for progressive image transmission[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2007, 16(9): 2384 - 2388.

[7] Atzori L. Transmission of JPEG2000 images over wireless channels with unequal power distribution[J]. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2003, 49(4): 883 - 888.

[8] Toriki M, Hajshirmohammadi A. Unequal power allocation for transmission of JPEG2000 images over wireless channels[C]// *Proc. of the Global Telecommunications Conference*, 2009: 1 - 6.

[9] Murrioni M. A power-based unequal error protection system for digital cinema broadcasting over wireless channels[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2007, 22(3): 331 - 339.

[10] Richardson T, Shokrollahi A, Urbanke R. Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2001, 47(2): 619 - 637.

[11] Goldsmith A. *Wireless communications* [M]. London: Cambridge University Press, 2004:91 - 103.

[12] Seo H, Lee B G. Optimal transmission power for single-and multi-hop links in wireless packet networks with ARQ capability[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2007, 55(5): 996 - 1006.