

一种无线视频传输的跨层自适应不平等保护方法

邱锦波 朱光喜

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘要: 无线网络的异构性给多媒体业务带来了很大的挑战, 跨层设计因此成为研究的热点。该文提出一种针对视频传输的跨层自适应保护方法, 根据信道变化自适应选择应用层、链路层和物理层最优的编码和传输策略组合, 对视频码流中具有不同重要性的数据进行不平等保护。仿真结果证明, 该文提出的跨层保护方法能够在信道条件比较差的情况下提供更好的视频传输质量。

关键词: 无线网络; 跨层设计; 不平等保护; 精细粒度可伸缩; 自动请求重传; 自适应正交频分复用

中图分类号: TN915.43

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0209-05

An Unequal Protection Strategy for Adaptive Cross Layer Video Transmission over Wireless Channels

Qiu Jin-bo Zhu Guang-xi

(Dept. of Electron. & Info. Eng., Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)

Abstract: Robust multimedia transmission over heterogeneous wireless networks is challenging. A protocol architecture that considers cross layer interaction is required. In this paper, an adaptive cross layer unequal protection strategy is proposed for video transmission over wireless channels. This strategy performs joint optimization across application layer, link layer and physical layer to provide unequal protection ability for video bitstream with different priority. Experimental results show the extraordinary improvement in PSNR of the proposed adaptive cross layer strategy over a variety of channel conditions.

Key words: Wireless network; Cross layer design; UEP (Unequal Protection); FGS (Fine Granular Scalable); ARQ; AOFDM

1 引言

下一代移动通信系统需要支持高速率、高可靠性的多媒体数据传输, 提供端到端的服务质量(QoS)保证。正交频分复用 (OFDM)技术和自适应传输已经被广泛认为是未来移动通信系统中的主要候选技术。在频率选择性衰落信道中, 自适应OFDM(AOFDM)系统可以用较低的复杂度, 实现高性能、高频谱效率的通信, 并通过动态调整各种传输参数使系统资源配置能适应信道的变化^[1]。基于OSI标准分层的通信协议结构, 为了在信道条件最差的情况下工作, 在相邻层之间以固定的方式通信, 无法灵活地适应信道变化, 实现对有限频谱和功率资源的有效利用, 因此跨层设计成为研究的热点。跨层设计通过在层间传递信息来协调各层的工作过程, 根据无线环境的变化来实现对资源的自适应优化配置, 提高频谱和功率的利用率, 使系统能够满足各种业务的不同要求。

视频通信将是下一代移动通信系统的主要业务之一, 过去为了提高无线视频传输的质量, 每一层都有不同的优化方法。信源信道联合编码(JSCC)将信道视作一个黑盒子, 没有考虑无线信道时变的特性, 仅仅在应用层对编码器进行调

整。针对无线视频传输对于服务质量的要求, 越来越多的研究人员采用了跨层设计的方法。文献[3]提出一种物理层和链路层联合自适应方法, 将自适应调制编码(AMC)和自动请求重传(ARQ)相结合, 可以提供更高的频谱效率。文献[4]则将应用层精细粒度可伸缩(Fine Granular Scalable, FGS)编码、前向纠错编码(FEC)与链路层的ARQ以及打包策略相结合, 在WLAN中提供更好的视频流服务。文献[5]将应用层视频码流的重要性信息传递到链路层, 由链路层提供不同的重传策略, 以提供视频流的不平等保护。

本文针对无线信道的时变特性和视频业务对吞吐率、丢包率、时延等 QoS 约束, 提出一种跨层自适应保护方法, 通过物理层、链路层和应用层的联合优化设计, 获得最优的视频传输质量。本文主要包括以下几个部分: 第2节介绍系统模型, 并对 FGS 视频编码的率失真模型和传输性能进行分析; 第3节提出跨层保护方法的自适应过程; 第4节给出仿真结果与分析; 第5节为本文结束语。

2 系统模型与性能分析

2.1 系统模型与跨层自适应保护方法

在当前各种异构无线网络并存的情况下, 传统的分层网络协议结构无法灵活地适应网络变化, 不能很好地满足实时视频业务对于吞吐率、丢包率和延迟等 QoS 要求。如果能够

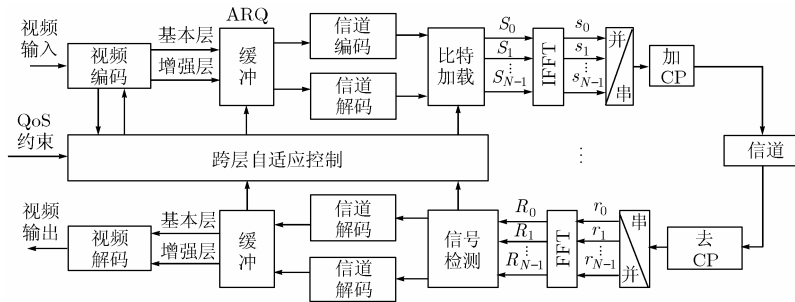


图 1 系统模型

在满足业务约束条件下, 跨越网络协议的层次对其参数进行联合的调整, 将能为用户提供更好的服务质量。图 1 所示为本文研究的系统模型。

应用层采用的 FGS 视频编码可以提供伸缩性很强的码流, 适应信道的变化。FGS 在同样的总码率情况下, 采用不同的基本层和增强层码率组合可以提供不同的错误恢复能力。链路层采用了选择重传机制, 对出错的数据包进行重传。通过重传可以降低丢包率, 但是会带来有效吞吐率的降低和延迟的增加。物理层采用的 AOFDM 能够根据当前各子载波的信道状况, 选择合适的调制方式, 提供更高的频谱利用效率, 其具有很高的自由度, 可以通过不同的约束条件, 获得不同的性能。

可以看出, 各层参数的调整都会对视频业务的服务质量产生影响, 只有对它们进行联合的优化才能获得最好的效果。因此本文提出了一种跨层自适应保护方法, 根据信道变化自适应选择最优的传输策略组合, 对视频码流中具有不同重要性的数据进行不平等保护。

跨层方法首先需要收集各层的信息, 主要包括物理层的信道状况, AOFDM 子载波分配情况, 链路层的丢包率, 应用层当前码流长度及其重要性等。跨层方法然后根据当前信道状况和 FGS 的率失真模型, 以视频恢复质量最好为目标, 对物理层子载波分配, 链路层不同重要性数据的重传策略, 应用层 FGS 码率及其分配等进行调整。下面分别对 FGS 率失真模型, 重传性能和 AOFDM 性能进行详细的分析。

2.2 FGS 视频编码的失真度分析

精细粒度的可伸缩 FGS 编码是 MPEG-4 标准的一部分, 基本原理如图 2 所示。

FGS 的基本层采用传统的基于运动估计和补偿的 DCT 编码, 产生一个具有可接受质量的基本层码流, 包含了最重要的、质量较低的视频信息, 与网络所能保证的最低带宽相适应。增强层对原始视频与基本层恢复视频的差值进行比特

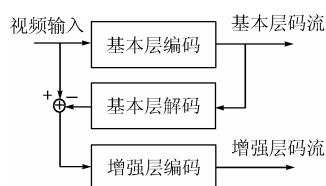


图 2 FGS 原理图

平面编码, 由于比特平面编码的嵌入式特性, 增强层码流可以在任意位置截断, 因此在信道带宽变化的情况下, FGS 具有很高的灵活性, 提供平滑的视频质量变化。由于增强层码流带来的质量改善要依赖于基本层码流的解码, 因此基本层码流具有比增强层码流更高的重要性。

为了在无线环境中提供更好的视频传输质量, 本文采用了质量可分级的 FGS 视频编码(SNR-FGS), 第一个目的是通过增强层码流的伸缩性适应无线信道的变化; 第二个目的是提高码流的抗错性, 因为 SNR-FGS 其增强层的解码不依赖于前一帧图像, 可以减小误差的蔓延。第三个是便于利用链路层和物理层传输的自由度对基本层和增强层以及增强层码流不同部分提供不平等保护。

由于增强层编码没有帧与帧之间的运动估计与补偿, 因此可以对 FGS 的恢复质量与比特率之间的关系建立如下的线性模型:

$$Q = \theta(R - R_b) + Q_b = \theta R_e + Q_b \quad (1)$$

其中 Q 为视频总的 PSNR, Q_b 为基本层 PSNR, R 为总比特率, R_b 为基本层比特率, R_e 为增强层比特率, θ 是与输入视频特性相关的率失真参数。这里的 PSNR 的计算方法为: $PSNR = 10 \lg(255^2 / MSE)$, MSE 为两帧图像之间的均方误差。由于视频数据之间的相关性, 在一段时间窗口内, θ 是一个相对稳定的值。增强层待编码的数据是原始视频与基本层恢复视频的差值, 这个差值可以作为失真的度量。对该差值, FGS 每编码一个比特平面, 即可将该比特平面从差值中减去, 这时根据当前产生的 FGS 码流长度, 待编码的比特平面所带来的失真即可估计出当前帧的 θ 值。本文对常用的几种标准测试序列进行了仿真, 其仿真结果如图 3 所示, 图中实线为理论值。从图中可以看出该线性模型对各种序列都能够较为准确地描述 FGS 的率失真特性。

基本层码流的信道失真特性在文献[2]中有详细的描述, Q_b 是基本层码率 R_b 和基本层丢包率 p_b 的函数。经过传输以后基本层的恢复质量 $Q_b = 10 \lg(255^2 / D)$ 。这里 D 是码流的总失真, $D \approx D_s + D_c$, D_s 是信源编码失真, D_c 是信道传输失真:

$$\left. \begin{aligned} D_s &= \sigma^2 e^{-\lambda(R_b - C_h)} \\ D_c &= \frac{a}{1-b} \frac{p_b}{1-p_b} E[F_d(n, n-1)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

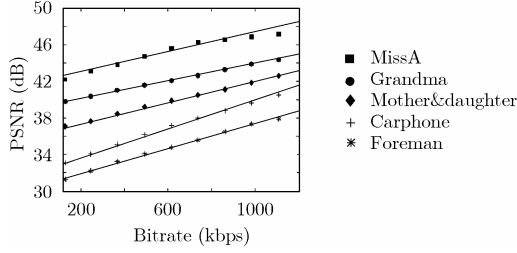


图 3 FGS 编码的率失真特性

式中 σ^2 是原始视频数据的协方差, λ 是与视频特性相关的常数, C_h 是码流中头信息和运动矢量所使用的比特数, a 是与编码比特率有关的参数, b 是与视频的运动情况相关的参数, $E[F_d(n, n-1)]$ 是视频前后两帧图像之间均方误差的期望。

本文主要对 FGS 增强层的信道失真特性进行了研究。假设视频增强层数据包长为 L , 每一帧视频编码后增强层数据包数为 N , 视频帧率为 f , 则增强层的总比特率 $R_e = L \cdot N \cdot f$ 。由于增强层码流之间的相关性, 如果在增强层发生丢包, 那么从该丢失的包起剩余的包将全部被丢弃, 由此可见增强层靠前的码流比靠后的码流具有更高的重要性。基于上述约定, 假设增强层丢包率为 p_e , 得到增强层有效比特率的期望为

$$R_e = \left[\sum_{n=1}^{N-1} n(1-p_e)^n p_e + N(1-p_e)^N \right] Lf \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1)即可得到 FGS 的率失真特性。

2.3 链路层重传性能分析

在链路层, 为了保证视频传输的实时性, 本文采用了限制最大重传次数为 N_{\max} 的截短 ARQ, 超过最大重传次数的数据包将被丢弃。假设丢包率为 p , 那么链路层每个数据包传输次数的期望为

$$\begin{aligned} \bar{N}(p, N_{\max}) = & \left[(1-p) + 2p(1-p) + \dots \right. \\ & \left. + (N_{\max} + 1)p^{N_{\max}}(1-p) \right] \\ & + (N_{\max} + 1)p^{N_{\max}+1} \end{aligned} \quad (4)$$

化简为

$$\bar{N}(p, N_{\max}) = 1 + p + p^2 + \dots + p^{N_{\max}} = \frac{1-p^{N_{\max}+1}}{1-p} \quad (5)$$

重传将带来吞吐率的下降, 如果物理层的吞吐率为 R , 那么需要将应用层发送速率调整为 $R/\bar{N}(p, N_{\max})$, 以避免由于数据包不能及时发送带来的延时。

2.4 自适应 OFDM 的性能分析

由于频率选择性衰落的影响, OFDM 的不同子载波之间往往信道状况差异很大, AOFDM 通过在不同子载波上分配不同的功率、发送不同数量的比特, 能够有效地提高系统的性能或者容量, 适应信道的变化。按照约束条件的不同, AOFDM 系统大体可以分为两类, 一类是常速率 AOFDM 系统, 其设计的目标是在限定的速率范围内使功率最小或者误码率最低; 另一类是变速率 AOFDM 系统, 速率可以在时间

和频率两个方向自适应调整, 其设计的目标是在总的平均发射功率和一定的误码率限定下, 使频谱效率最大。当子载波数比较多时, 如果每个子载波都按照自适应传输的算法来调整传输参数, 那么实现的复杂度就会很大, 所以可以利用子载波之间的频率相关性将相邻的子载波组成一个子带, 在每一个子带中使用相同的传输参数, 这样一方面降低了传输参数调整的计算量, 另一方面也可以减少控制信道中发射端和接收端交换有关信道信息和传输参数的开销, 从而大大降低系统的复杂度。

下面对本文采用的常速率 AOFDM 的性能进行分析。定义 n 为子载波的编号, $s=1\sim 5$ 为调制方式索引, 分别对应于不发送数据, BPSK, 4QAM, 16QAM, 64QAM 等 5 种调制方式。定义 $e_{n,s}$ 为第 n 个子载波采用调制方式 s 时的比特错误数, $b_{n,s}$ 为第 n 个子载波采用调制方式 s 时每个符号能够传输的比特数。初始状态下, 每个子载波的调制方式索引都为 1, 即不发送数据, 这时 $e_{n,0}=c_{n,0}=0$ 。信道状况利用接收端信噪比 γ 来衡量, 自适应机制根据每个子载波当前的 γ 计算代价函数:

$$c_{n,s} = \frac{e_{n,s+1} - e_{n,s}}{b_{n,s+1} - b_{n,s}} \quad (6)$$

式中 $e_{n,s} = b_{n,s} \text{BER}$, 将代价 $c_{n,s}$ 最小的那个子载波的调制方式从 s 变为 $s+1$, 重复此过程直到满足指定的吞吐率要求。为了减小系统的复杂度, 本文利用近似式(7)来计算当前的 BER:

$$\text{BER} = 0.2 \exp(-g\gamma) \quad (7)$$

其中 $g = \frac{6}{5M-4}$ (BPSK), $g = \frac{1.5}{M-1}$ (M-QAM)。式中 M

为调制阶数, 对于 BPSK, 4QAM, 16QAM 和 64QAM 调制, M 分别取 2, 4, 16 和 64。

本文对常速率 AOFDM 在不同吞吐率下进行了仿真, 图 4 为其仿真结果。图中分别对 1bps(比特/符号)的非自适应 OFDM, 0.5~2bps 基于子带的 AOFDM, 以及 1bps 基于子载波的 AOFDM 等进行了仿真。这里采用的 OFDM 都是 512 个子载波, 基于子带的 AOFDM 将 512 个子载波平均分为 16 个子带, 每个子带 32 个子载波。从仿真结果可以看出, 同样是在 1bps 的情况下, AOFDM 比非自适应 OFDM 有 5~10dB 的性能增益。基于子带的 AOFDM 和基于子载波的 OFDM 相比, 性能有一定的损失, 这个损失的大小与信道传递函数在频率方向的变化程度有关, 如果划分的子带带宽小于信道的相干带宽, 那么基于子带与基于子载波的自适应 OFDM 性能就很接近, 但是基于子带的方法其计算复杂度大大降低, 便于实现。

3 跨层方法的自适应过程

通过上一节的分析, 本节对本文跨层方法的自适应过程

进行描述, 各层参数对应的符号如表所示。

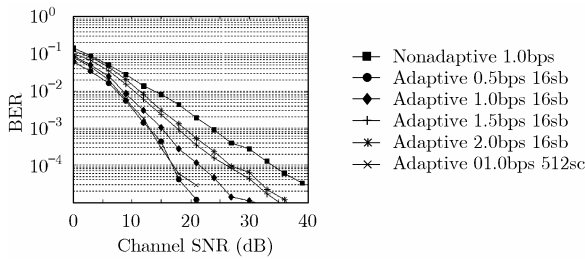


图 4 常速率 AOFDM 系统性能

表 1 符号定义

层	参数	符号
物理层	吞吐率	R
物理层	丢包率	p
链路层	基本层最大重传次数	N_{maxb}
链路层	增强层最大重传次数	N_{maxe}
链路层	基本层平均重传次数	\bar{N}_b
链路层	增强层平均重传次数	\bar{N}_e
应用层	基本层丢包率	p_b
应用层	增强层丢包率	p_e
应用层	基本层码率	R_b
应用层	增强层码率	R_e

跨层自适应过程如下:

(1) 根据当前物理层的约束条件 R 和信道状况进行各子载波调制方式的选择, 并计算 p ;

(2) 根据 p 和当前 N_{maxb} , N_{maxe} 计算 p_b 和 p_e , 这里 $p_b = p^{N_{maxb}+1}$, $p_e = p^{N_{maxe}+1}$;

(3) 根据式(5)计算 \bar{N}_b 和 \bar{N}_e ;

(4) 计算 R_b 和 R_e , 使得 Q 最大, 并满足 $R \geq R_b \cdot \bar{N}_b + R_e \cdot \bar{N}_e$; 本文对不同的基本层和增强层码率组合进行仿真发现, 在同样的信道状况下, 将传输带宽平均分配给基本层和增强层码流, 可以获得的最好的效果, 因此为了简化自适应的实现, 在自适应传输的仿真中, 本文根据当前基本层和增强层的平均重传次数, 在基本层和增强层之间平均分配比特:

$$R_b = R_e = R / (\bar{N}_b + \bar{N}_e);$$

(5) 根据 R_b 和 R_e , FGS 编码器视频码流进行传输;

(6) 根据当前链路层缓冲区的占有率, 对 N_{maxb} 和 N_{maxe} 进行调整, 避免出现缓冲区上溢或者下溢, 带来过大的延迟抖动。

4 仿真结果与分析

视频传输端到端的时延包括编解码时延、打包与解包时延以及传输时延, 前面两种是一个相对固定的值, 时延抖动主要由传输时延引起。按照 3GPP 的建议, 实时视频传输对于延迟的要求在 150~400ms 之间, 假设数据包平均往返时间为 100ms, 那么链路层重传次数最多不能超过 4。考虑到其

他固定时延的影响, 将链路层最大重传次数限定为 2, 由自适应机制根据当前数据的重要性和缓冲区的状态在 0~2 之间选择, 以满足时延和抖动的要求。由于基于子载波的 AOFDM 比基于子带的计算复杂度高得多, 因此采用了 16 个子带, 每个子带 32 个子载波的 AOFDM 进行后面的仿真。仿真所用序列为 QCIF carphone 序列, 采用的 MPEG-4 视频编码, 30 帧/秒。发送端为了增强码流的错误恢复性能, 将每行宏块做为一个片(slice), 每片码流的开始位置插入重同步信息。接收端如果检测到数据丢失或者错误, 从错误处到下一个重同步之间的码流将全部丢失, 这中间丢失的宏块采用复制前一帧相同位置宏块的方法来进行错误隐藏。传输信道为 Rayleigh 衰落信道, 理想信道估计, 整个仿真用 C 语言实现。

下面对本文提出的跨层不平等保护方法进行了仿真, 并和其他几种传输方法进行对比, 用于对比的几种方法见表 1, 仿真结果见图 5。

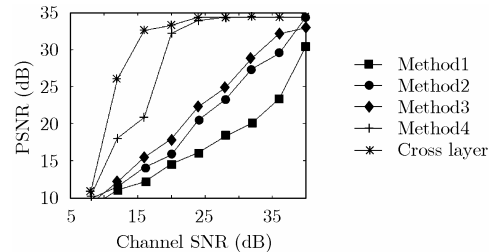


图 5 仿真结果

表 1 几种传输方法对比

	物理层	链路层	应用层
方法 1	非自适应 OFDM	无 ARQ	恒定速率, 无 FGS
方法 2	常速率 AOFDM	无 ARQ	恒定速率, 无 FGS
方法 3	常速率 AOFDM	无 ARQ	恒定速率, FGS
方法 4	常速率 AOFDM	$N_{maxb}=N_{maxe}=1$	变速率, FGS
本文方法	常速率 AOFDM	$N_{maxb}=0, 1, 2$	变速率, FGS
	自适应比特加载	$N_{maxe}=0, 1$	

从仿真结果可以看出, 方法 1 在各个层次都没有对信道进行自适应调整, 因此其视频恢复的质量最差; 方法 2 在物理层引入 AOFDM 后, 能够针对信道的变化在不同子带采取不同的调制方式, 物理层的性能有很大的改善, 将视频恢复质量提高了 1~7dB; 方法 3 在方法 2 的基础上, 在应用层引入 FGS 编码, 牺牲了一定的编码效率, 但是提高了码流对传输错误的抵抗能力, 因此比方法 2 的 PSNR 获得大约 1dB 的改善, 在信道条件非常好的情况下, 传输错误引起的失真已经很小, 编码效率的降低使得方法 3 有一定的退化, 方法 2 的效果反而更好。前面 3 种方法分别在物理层和应用层进行独立的自适应调整, 没有针对视频码流的重要性不同进行区别对待, 因此其质量的改善还是比较有限。方法 4 在

方法 3 的基础上引入了重传,通过牺牲一定的吞吐率换取错误率的降低,获得非常明显的质量改善,比方法 3 的 PSNR 提高了 5~10dB。

本文提出的方法在方法 4 的基础上,通过跨层信息传递,在链路层和物理层对视频码流具有不同重要性的数据采取不同的传输策略,对其进行不平等的保护,在信道条件比较差的情况下,仍然比方法 4 的 PSNR 获得大约 7~10dB 的改善,这对于无线视频传输来说是非常有意义的。

5 结束语

本文提出了一种针对无线网络中视频传输的跨层自适应保护方法,随着信道的变化,通过在层与层之间传递信息来实现联合的控制,对具有不同重要性的视频数据进行不平等保护。仿真结果证明,本文提出的跨层自适应保护方法能够提供更好的视频传输质量。

参 考 文 献

- [1] Keller T and Hanzo L. Adaptive multicarrier modulation: A convenient framework for time-frequency processing in wireless communications. *Proc. IEEE*, 2000, 88(5): 611–642.
- [2] He Z H, Cai J F, and Chen C W. Joint source channel rate-distortion analysis for adaptive mode selection and rate

control in wireless video coding. *IEEE Trans. on CSVT*, 2002, 12(6): 511–523.

- [3] Liu Q W, Zhou S L, and Giannakis B. Cross-layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links. *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, 2004, 3(5): 1746–1755.
- [4] Mihaela van der Schaar, Santhana Krishnamachari, Sunghyun Choi, *et al.* Adaptive cross-layer protection strategies for robust scalable video transmission over 802.11 WLANs. *IEEE J. on Select., Area. Commun.*, 2003, 21(10): 1752–1763.
- [5] Bucciol P, Davini G, and Masala E, *et al.* Cross-layer perceptual ARQ for H.264 video streaming over 802.11 wireless networks. *Globalcom*, Dallas 2004: 3027–3031.
- [6] Zhou S L and Giannakis B. Adaptive modulation for multiantenna transmissions with channel mean feedback. *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, 2004, 3(5): 1626–1636.

邱锦波: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为宽带无线与多媒体通信。

朱光喜: 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带无线与多媒体通信。