

基于 Raptor 码的视频多播跨层优化算法

钱晓捷 王 超

(郑州大学信息工程学院 郑州 450001)

摘 要 在第 4 代移动通信中,人们更加关注移动宽带网络传输的服务质量(QoS),尤其是多输入多输出(Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO)系统下的视频多播方面。提出了一种基于 Raptor 码的视频多播跨层优化算法,通过 Raptor 码和其他纠错码的包误差率的对比分析,选择合适的 Raptor 码率和调制编码方案(MCS)模式进行优化组合,在增大系统吞吐量的同时可以提高信道资源(时隙)利用率。仿真实验表明,该算法在下行链路的吞吐量至少增加了 28%,节约了至少 18%的信道资源;在 SNR=11.5 时,BUS 序列的客观重建质量(PSNR)的性能增益可达到 4dB 以上。

关键词 多输入多输出,视频多播,服务质量,Raptor 码,跨层优化算法

中图分类号 TP393, TN911. 22 **文献标识码** A **DOI** 10. 11896/j. issn. 1002-137X. 2016. 8. 010

Cross-layer Optimization Algorithm Based on Raptor Code for Video Multicast

QIAN Xiao-jie WANG Chao

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract In the fourth generation mobile communication, people pay much more attention to quality of service(QoS) of mobile broadband network transmission in video multicast based on multiple-input-multiple-output(MIMO) system. Video multicast cross-layer optimization algorithm based on Raptor code was proposed. By analyzing packet error rate between Raptor code and other erasure code, and selecting the appropriate Raptor rate and modulation and coding scheme(MCS) model in order to optimize the combination, the throughput of the system can be increased and the channel resource(time slot) utilization can also be improved. Simulation shows the algorithm has better throughput at least 28%, and saves the channel resources at least 18%. In addition, when SNR is 11.5, PSNR performance gain of BUS sequence can reach more than 4dB.

Keywords MIMO, Video multicast, QoS, Raptor codes, Cross-layer optimization algorithm

1 引言

Raptor 码是一种无码率的数字喷泉码,是 Shokrolli 于 2006 年在 LT 码的基础上增加预编码而形成的网路纠错码,但 Raptor 码具有比 LT 码更小的编解码开销^[1]。无线通信网络技术的迅速发展使得人们更加关注移动设备的高质量视频支持^[2]。因为视频多播技术没有单播技术那样完善的纠错机制,有效利用信道资源和稳定传输的技术正成为一个研究热点。

近些年,国内外学者对视频流在无线多播系统的有效传输进行了大量研究。文献[3]结合多输入多输出(Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO)技术,用 Turbo 码进行信道编译码,虽然计算复杂度不高,但是传输吞吐量偏低。而文献[4]使用了更逼近香农限的 LDPC 码,其不仅译码复杂度比 Turbo 码更低,而且结构并行的特点使硬件更容易实现。因此在大容量通信应用中,LDPC 码更具有优势。但是 LDPC 码的编码复杂度较高,本身采用固定码率,在状态信息随着时

间和空间变化的无线信道中很难达到最优传输。文献[5]针对上述难题,在单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)视频单播系统中运用 Raptor 码进行跨层编解码,然而在恶劣环境下,该系统接收信号弱,易受噪声干扰,频谱利用率低。

基于上述相关问题,本文提出了使用 Raptor 码的视频多播跨层优化算法。该算法将应用层的 Raptor 码和调制编码方案(Modulation and Coding Scheme, MCS)模式相结合,筛选适当的参数组合,以达到跨层优化的目的。实验证明,该算法能够通过合理化配置资源达到频谱利用率的优化,进而提高视频服务质量(Quality of Service, QoS)。

2 基于 Raptor 码的跨层设计

该跨层设计是基于 Raptor 模式的思想,从应用层跨越到介质访问控制(Media Access Control, MAC)层,然后再跨越到物理(physical, PHY)层。MAC 协议根据 Raptor 码率 c 对应用层的资源流(资源包和修复包)进行分配,该资源分配方

到稿日期:2015-07-14 返修日期:2015-11-02 本文受国家自然科学基金项目(61379079)资助。

钱晓捷(1963-),男,副教授,硕士生导师,CCF 会员,主要研究方向为嵌入式系统、计算机系统结构;王超(1988-),男,硕士生,主要研究方向为协作通信、网络编码、视频传输。

式与物理层的被选择的 MCS 模式紧密相联,所以基于 Raptor 模式的系统通过把应用层的数据格式同 MAC/PDU 数据结构相统一,提高了数据流从上层到底层传输的效率。

2.1 跨层环境

Mobile WiMAX^[6]和 3GPP LTE 能提供高质量的用户数据码,是服务质量 QoS 的移动网络标准。两者在技术上采用了相似的下行链路(DL)媒体访问控制层(MAC)和物理层(PHY)。其中,无线信道资源的利用率是对多媒体服务质量 QoS 支持^[7]的关键。本文采用了 Mobile WiMAX 标准,它同时也适用于 LTE 标准的宽带网络。

基于 802.16e 协议传输的 MAC 层具有许多自适应特征,包括自适应的 MCS、自动回复应答(ARQ)^[8]、包的分解和组装、数据服务单元(Service Data Units, SDUs)和不同大小的 MAC 协议数据单元(Protocol Data Units, PDUs)、专用应用服务流以及基于 QoS 服务的 PDU 时序调度。其中 MAC 层的 SDUs 与应用层的 RTP/UDP 包相对应,在发送端数据流编码时,SDUs 分解成 PDUs 和 ARQ 块,而在接收端数据流解码时,PDUs 和 ARQ 块先组装成 SDUs 才能传送到上层。数据流从上层到底层传输和分配的方式已经在文献^[9]中提出。

移动 WiMAX 标准采纳可分层的正交频分复用多址(S-OFDMA)技术^[6]。表 1 列出了 PHY 的相关参数(粗体是本次实验仿真器使用的参数)。本文采用的仿真器^[10]在 10MHz 信道上模拟,时隙负载数据用 MCS 模式进行调制,各个 MCS 模式下的负载数据如表 2 所列。时隙是物理层最小的资源分配单位^[6],每一个时隙包含两个 OFDMA 调制符号,OFDMA 调制符号被分配给每一个下行链路帧的一系列时隙。而 OFDMA 调制符号含有 24 个数据副载波,所以一个时隙包括 48 个数据副载波^[10]。基于此,每一个 MCS 模式的时隙负载能力 P_s 如表 3 所列,其中 m 代表 MCS 调制阶数, r 代表码率,它们根据每一个 MCS 模式的时隙负载能力评估,并且这些资源都在移动 WiMAX 网络上进行数据传输。该仿真器的典型的下行/上行比为 22 : 15,这样下行链路子信道局部使用 330 个时隙比较合适。本文的分析方法适用于任何可接受的信道宽度或者下行/上行比。

表 1 802.16e 的 OFDMA PHY 外部参数

参数	值			
信道宽度(MHz)	1.25	5	10	20
FFT 大小	128	512	1024	2048
样例频率(MHz)	1.4	5.6	11.2	22.4
子信道频率空间(kHz)	10.94	10.94	10.94	10.94
有效符号时间 $T_b(\mu s)$	91.4	91.4	91.4	91.4
维护时间 $T_g(\mu s)$	11.4	11.4	11.4	11.4
OFDMA 符号持续时间 ($T_s = T_b + T_g$)(μs)	102.9	102.9	102.9	102.9
OFDMA 符号数量	48	48	48	48

表 2 802.16e 包含的 MCS 模式

编号	MCS	每个时隙的比特数	总体数据(Mbps)
0	QPSK1/2	48	6.18
1	QPSK3/4	78	9.25
2	16QAM1/2	102	12.34
3	16QAM3/4	148	18.48
4	64QAM1/2	149	18.49
5	64QAM2/3	196	25.02
6	64QAM3/4	220	27.67

表 3 在信道下行链路中每一种 MCS 模式的时隙负载能力

MCS	m	r	时隙负载 P_{sl} (bits)
QPSK1/2	4	1/2	48
QPSK3/4	4	3/4	78
16QAM1/2	16	1/2	102
16QAM3/4	16	3/4	148
64QAM1/2	64	1/2	149
16QAM2/3	64	2/3	196
16QAM3/4	64	3/4	220

2.2 仿真模型

MIMO 系统采用 ETSI 3GPP 空间信道模式(Spatial Channel Model, SCM)^[11]。每一个瞬时信道产生基于时变的“城市微观”抽头延时线(TDL),它可以模拟拥挤的城市环境下的无线传输。TDL 存在 6 个时间相关性的衰落抽头,它们都具有无标准延时特性,传输频率是 2.3GHz,快速傅式变换(FFT)大小是 1024。为了模拟城市中正在步行的用户,移动站(MS)相对速度被设置为 1km/h。仿真器在 1.03Mbps、2000 个 UDP 包的无线信道下实现持续不断的数据传输。

由于多路径信道的频率选择,频率域中的大量码块会在子信道负载之间发生大量的信号与干扰加噪声比(SINR)变更。为了简化仿真器 PHY 连接层和 MAC 层的接口,在系统的动态行为建模中,文献^[8, 12]采用了有效 SINR 映射技术(文献^[13]使用相似的技术)。这种方法把每一个子信道负载的 SINR 矢量压缩到一个单独的有效 SINR,能在每一次信道传输时计算瞬时的包误差率(Packet Error Rate, PER)(基于给出一串包长的瞬时衰落信道)。

为准确计算应用层的包误差率,需要考虑 PHY 层时间相关性丢包影响和在 MAC 层的组包与解包过程的作用,以及应用层基于 Raptor 码的前向纠错的效果和所需求的冗余。由于有不同的系统参数,Raptor 码在 WiMAX 系统视频播放中的应用还存在很多技术难题,其中 MAC 调度和资源配置机制是其关键难题之一。通过寻找 Raptor 码应用层冗余和物理层 MCS 模式来达到跨层优化带宽的目的,以此建立 WiMAX 系统仿真模型。它可用于在时间相关性变化的衰落无线信道下仿真 PHY 层瞬时的实验结果。文献^[13]说明准确的仿真结果需要基于衰落信道下的瞬时结构,而不是衰落过程的平均结果。文献^[14]在这一点上没有考虑错误率的时间相关性,导致产生了一定的误差。

本文的跨层仿真模型由不同的模块组成,如图 1 所示。

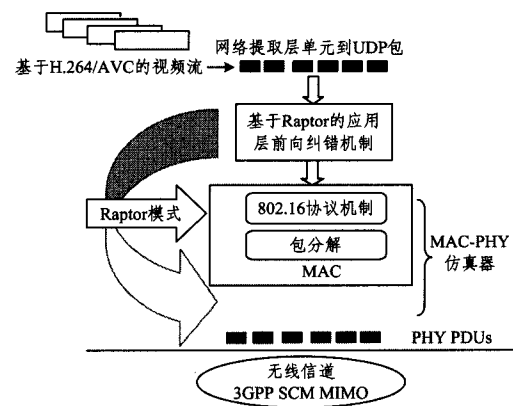


图 1 跨层系统仿真模型

(1)无线信道采用 3GPP SCM。因为无线 3GPP SCM 信道模型能够产生大量的时间相关衰落信道^[11],其作用在 MIMO 系统中尤为关键。

(2)MAC 和 PHY 层仿真器的实现过程遵循文献[6]中的标准,可以用来模拟 MAC SCU\PHY PDU 的丢包率,从而需要考虑在 MAC 层和应用层纠错码数据格式映射中包碎片对 MAC 和 PHY 上数据结构的影响。

(3)顶层协议栈包括了 H. 264/AVC 视频包和 UDP 包。

(4)Raptor 编码和解码的实现过程均遵循文献[5]中的标准。

根据文献[15],Raptor 编码器控制应用层 RTP/UDP 包的输入流,并且收集 UDP 包来形成资源数据块,每一个大小为 $K \times T$ Bytes 的资源块由 K 个长度为 T Bytes 的资源符号组成。Raptor 编码器^[15]不断地产生长度为 T Bytes 的资源块 K 和修复符号 R 。其中编码过的符号 K 和原始的资源符号等同,修复符号 R 的数量与选择的 Raptor 码率 c 有很大关系。为了能够无差错传递每一个资源块,需要产生 $N=K+R$ 个 Raptor 编码符号,Raptor 码率 $c=K/N$ 。

Raptor 编码器在每一个资源块(包含 Raptor 修复符号)产生 1 个修复 UDP 包,根据文献[15]资源和修复数据在网络形成两个单独的 UDP 流,过程如图 2 所示。接收者从应用层前向纠错码包恢复资源符号。

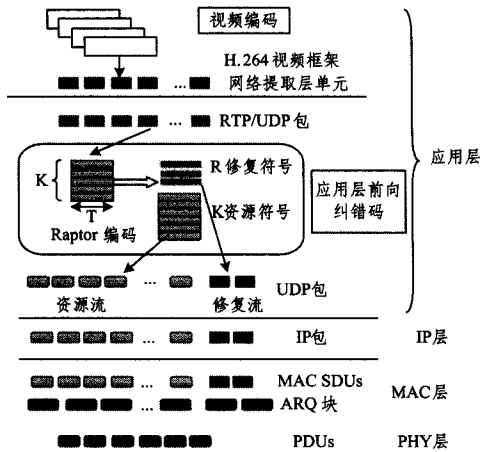


图 2 基于 Raptor 前向纠错码的跨层视频传输仿真

在 MAC 层传输时,每一个 UDP 包被映射到一个 MAC 服务数据单元(SDU)里,然后根据 802.16e MAC 层协议进行传送,SDUs 被分解成 PDU 包,并且每一个 MAC SDU 被分割成许多虚拟 ARQ 块,而 PDU 包却不能实现该功能。

3 跨层优化算法

本文通过选择 MCS 模式和 Raptor 码率 c ,来达到在每一个窄带子信道 SNR 上,保证时隙数最少的同时,最大化地提高吞吐量。

优化算法的具体步骤如下:

(1)首先选择合适的 ARQ 块误差率(BLER),使其可以在设置的误差上限范围内满足传输的 MCS 模式,例如: $E_{BLER} \leq 0.4$ 。这样构成的候选模式集 M_S 可以避免低 Raptor 码率的干扰。

(2)对于每个在候选模式集 M_S 里的 m_i ,符合 $UDP\ PER \leq E_{UDP}$ 的 Raptor 码率被保留,这样就形成了与模式 i 对应的码率集 $C_i = \{c_1, c_2, \dots, c_l\}$ 。假如码率不能满足要求,那么模式 i 将排除在 M_S 以外,且 $C_i = \{\emptyset\}$ 。

(3)定义候选码率 $C_k \in C_i$,使候选对能够对应候选模式 i ,即 $(m_i, c_1), (m_i, c_2), \dots, (m_i, c_l)$ 。

(4)在 MCS 所有模式 i 和候选码率 C_i 所形成的合适的对集 P 中找出满足条件 $p_{opt} = (m_k, c_y)$ 的候选对,使得每一帧的吞吐量达到最大化。这种优化的候选对依赖于特殊的窄带子信道和 Raptor 资源块长度 K 。

为了更加清晰地表示优化算法,也可以采用如下公式:

$$G_{flow}(s, c, m, K, T) = \frac{CorrectBits(s, c, m, K, T)}{F_T \cdot T_{OFDMA}} \quad (1)$$

其中, $CorrectBits$ 表示收到的修复比特码; F_T (定值)表示 OFDMA 帧下需要传送的 UDP 包; T_{OFDMA} 表示 OFDMA 帧下持续传送的时间; $G_{flow}(s, c, m, K, T)$ 表示关于窄带子信道 SNR s 、Raptor 码率 c 、MCS 模式 m 、资源块长度 K 和符号长度 T 的每一个数据流吞吐量。

在时隙上数据流的平均信道能力 θ_{flow} 可表示为:

$$\theta_{flow}(s, c, m, K, T) = \frac{C_T(s, c, m, K, T)}{F_T} \quad (2)$$

其中, C_T 表示 DL 子帧下所需的实际时隙数。

根据上述提到的优化,本文的优化度量标准是每个下行链路子帧下的吞吐量,它可以用一个函数 $g_{fr}(s, c, m, K, T)$ 来表示,单位是 bps/帧,每一帧下的吞吐量是行之有效的传输有效性度量标准,可表示为:

$$g_{fr}(s, c, m, K, T) = \frac{G_{flow}(s, c, m, K, T)}{\theta_{flow}(s, c, m, K, T)} \quad (3)$$

设置合适的 MCS 模式 $M_c = \{m_i \in [0, 1, \dots, 6]\}$ 、基于 Raptor 的应用层前向纠错码率 $FECc = \{c_i \geq 0.5\}$ 、资源块长度 $1000 \leq K \leq K_{max}$ 、应用层的 UDP PER 取平均值,根据上述优化算法的计算和对比,找出能使函数 g_{fr} 取最大值的优化组 (m, c, K) ,其可表示为:

$$(m, c, K)_{opt} = \arg \max_{\forall (m, c, K)} g_{fr} \quad (4)$$

其中,UDP PER 限制在: $UDP\ PER(m, c, K)_{opt} \leq E_{UDP}$ 。

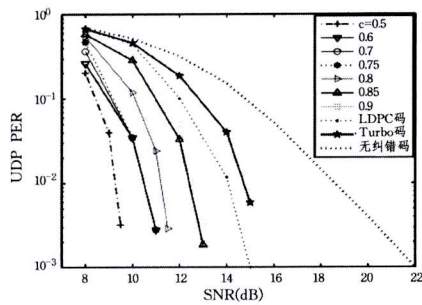
4 仿真结果及分析

本文采用 MATLAB 仿真 4×4 MIMO 系统下的视频多播跨层优化算法。基于 Raptor 有效利用率^[14],设置跨层系统仿真器的 MAC SDU 大小为 815 Bytes,MAC PDU 最大值为 200 Bytes,ARQ 块大小为 32 Bytes (PHY 层参数见表 1),Raptor 符号长度 $T = 32$ Bytes,资源块大小 $K = 1820$ (大于 1000,此值越大,错误率和突发性更高的无线信道输出效果越好)。仿真器获得在 1.03 Mbps、802.16e 下 PHY 和 MAC 层之间传输的 2000 个 UDP 包,选择码率 c 在 0.5~0.9 的范围内进行分析。

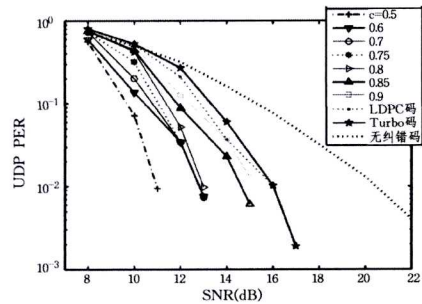
4.1 Raptor 性能测试结果

上述仿真实验是通过跨层优化算法选取优化对 (m, c) (资源块 $K = 1820$),并考虑用户移动,设置移动站相对速度 $v = 1$ km/h,误差 $E_{UDP} = 10^{-2}$ 。

终端-终端系统性能通过接收端的 UDP PER 测试,要保证接收到的视频服务质量,需要控制丢包率在 10^{-2} 以下。图 3(a)说明 MAC 接收层在每一个 SNR 的 UDP PER 下 (MCS 模式 = 1, Raptor 码率 $c = 0.8$, $SNR \geq 12$ dB),数据可以无错率传送。而在图 3(b)中,在码率 $c > 0.5$ 和 $SNR = 12$ dB 的情况下,数据不能无错传送且误差率大于 10^{-2} ;但是可以在 $SNR \geq 14$ dB 和 $c = 0.8$ 时无差错传送。图 3 表明,在 MCS 模式 = 1 时,为了达到无错数据传送,使用 Raptor 码比未用 Raptor 码多获得 6.5 dB,比 Turbo 码 $c_1 = 0.5$ 多获得 2.5 dB,比 LDPC 码 $c_2 = 0.5$ 多获得 2 dB。



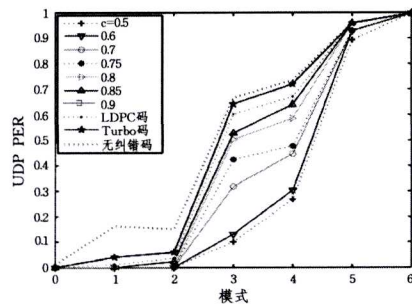
(a) MCS 模式 1(QPSK 3/4)



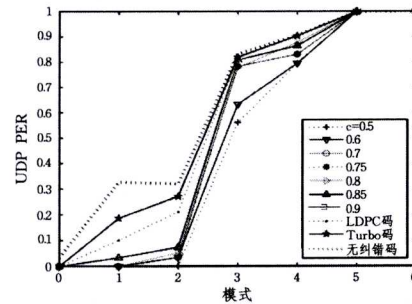
(b) MCS 模式 2(16QAM 1/2)

图 3 MCS 模式 1 和 2——SNR 区间下的 UDP PER($K=1820$)

为了便于理解传送多少 Raptor 码才能成功解码,需考虑在各个 SNR 区间与 MCS 模式的结合。图 4(a)展示了在窄信道 $SNR=14\text{dB}$ 时每一个 MCS 模式下 Raptor 解码的 UDP PER。可以看出在 MCS 模式 2(16QAM1/2)以上时,没有任何码率可以无错传送。在 MCS 模式 2 时,0.5~0.8 范围中的码率可以达到 $UDP\ PER=0$ 。图 4(a)也说明在 $SNR=14\text{dB}$ 且 MCS 模式 1 时, $c=0.9$ 就可以通过接收足够多的编码符号成功解码;图 4(b)说明在 $SNR=12\text{dB}$ 时出现相似的情况。从中可以看出,Raptor 码除了在 PER 上有很大优势外,信道资源需求通过使用更高的 MCS 模式也有所降低,这对带宽利用率有很大提升。



(a) $SNR=14\text{dB}$



(b) $SNR=12\text{dB}$

图 4 所有 MCS 模式和码率的 UDP PER($K=1820$)

4.2 优化后的 Raptor 码性能仿真

为了验证优化的 Raptor 系统的有效性,增加优化的 LD-

PC、未优化的 Raptor 码作为对比,结果如图 5 所示。图 5 表明,优化的 Raptor 系统随着 SNR 值的增加,吞吐量趋于线性增长,并且比优化的 LDPC 码系统在每个 SNR 下至少多输出 28% ($SNR=10\text{dB}$),比未优化的 Raptor 系统至少多输出 30% ($SNR=20\text{dB}$),提高了整个 OFDMA 帧的传输效率。

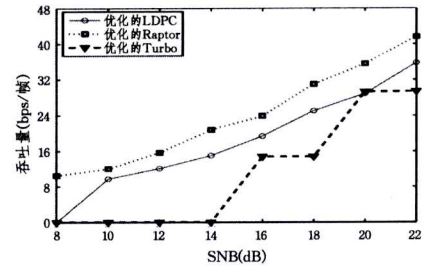


图 5 基于 Raptor 前向纠错码优化系统的传送输出

优化的 Raptor 系统不仅在传输效率方面有优势,而且在节约信道资源方面也有所突破。如图 6 所示,优化的 Raptor 系统随着 SNR 值的增加,需求时隙资源数下降;优化的 LDPC 码系统在 $SNR=10\text{dB}$ 时才开始利用时隙资源达到无错传输。随着 SNR 值的增加,优化的 LDPC 码系统和优化的 Raptor 系统需要时隙资源的数量差有所减小;而未优化的 Raptor 系统的效果不太理想,直到 $SNR=16\text{dB}$ 时才可以利用时隙资源达到无错传输,当 SNR 的值在 20 以上时,其和优化的 LDPC 码系统需求时隙资源趋于相同。窄带子信道为 16dB ,LDPC 优化系统比 Raptor 优化系统多需要 18% 的信道资源,而未优化的 Raptor 系统比优化的 Raptor 系统多需要 50% 的信道资源。

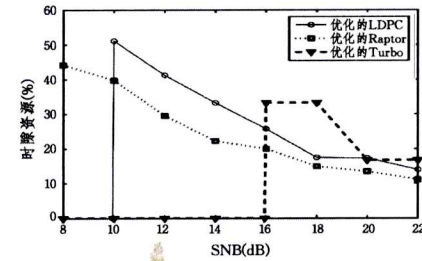


图 6 基于 Raptor 前向纠错码优化系统的所需信道资源百分比

图 7 给出在视频测试序列 BUS 的仿真环境下,针对优化 LDPC、优化 Turbo 码和优化 Raptor 系统进行的性能对比(取信道编码码率均为 0.8)。



图 7 基于 Raptor 前向纠错码优化系统的 PSNR-SNR 曲线图

从图 7 可看出,本文提出的传输优化策略在 $SNR=11$ 时,BUS 序列的客观重建质量(PSNR)性能增益达到 2dB 以上;在 $SNR=11.5$ 时,BUS 序列的客观重建质量(PSNR)性能增益达到 4dB 以上;在 $SNR=12$ 时,BUS 序列的客观重建质量(PSNR)性能增益达到 2.5dB 以上。随着 SNR 的增加,这 3 种策略趋于一致,其主要是因为随着 SNR 的增加,信道条件逐渐变好,即由信道误码所引起的失真变得越来越小,从而使得这 3 种策略对峰值信噪比 PSNR 的影响趋于一致。

结束语 本文通过选择 MCS 模式和 Raptor 码率的最佳组合,达到视频多播移动网络的跨层优化目的。在移动站相对速度为 1km/h、资源块 $K=1820$ 的情况下,Raptor 优化系统比其他纠错码在下行链路的吞吐量至少增加 28%;Raptor 码至少节约信道资源 18%;Raptor 优化系统在 SNR 小于 13dB 时,PSNR 的值比其他两种优化系统的要高,最大性能增益可达 4dB 以上,但随着 SNR 的增加,PSNR 的值趋于一致。本文只是在仿真环境下模拟,在实际的移动带宽系统上实现时,实验结果可能会随着参数值的不同有所变动。下一步工作将研究 Raptor 码优化算法对不同天线数的 MIMO 系统产生的影响。

参考文献

- [1] Multimedia broadcast/multicast services (mbms); protocols and codecs[S]. 3GPP TS 26. 346, technical specification group services and system aspects, 2007
- [2] Khalid F, Speidel J. Advances in MIMO Techniques for Mobile Communications—A Survey[J]. Network and System Sciences, 2010, 3(4): 213-252
- [3] Paper W. Global Mobile Data Traffic Forecast Update[R]. Cisco Visual Networking Index, 2013
- [4] Wang Peng, Wang Xin-mei. Fast encoding research on DPC code [J]. Journal of Electronic Science and Technology University, 2004, 32(9): 134-139(in Chinese)
王鹏,王新梅. DPC 码的快速编码研究[J]. 电子科技大学学报, 2004, 32(9): 134-139
- [5] Wu Ye-qing, Hu Fei, Zhu Ying-ying, et al. Cross-Layer Forward Error Correction Scheme Using Raptor and RCPC Codes for Prioritized Video Transmission Over Wireless Channels[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2014, 24(6): 1047-1060
- [6] Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems[S]. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. IEEE Std, 2013
- [7] Esmailpour A, Nasser N, Dynamic. QoS-Based Bandwidth Allocation Framework for Broadband Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 6(7): 2690-2700
- [8] Sgardoni V, Bull D, Nix A. ARQ-aware scheduling and link adaptation for video transmission over mobile broadband networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 14(2): 401-415
- [9] Martikainen H, Sayenko A, Alanen O, et al. Optimal MAC PDU size in IEEE802. 16[C]// 4th International Telecommunication Networking Workshop on QoS in Multiservice IP Networks(IT-NEWS 2008). 2008: 66-71
- [10] Mobile WiMAX—part I: a technical overview and performance evaluation[S]. 2006
- [11] Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations (Release 6) [S]. 3GPP TR 25. 996 V6. 1. 0. 2009
- [12] Halls D, Nix A, Beach M. System level evaluation of UL and DL interference in OFDMA mobile broadband networks[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2014: 1271-1276
- [13] Luby M, Gasiba T, Stockhammer T, et al. Reliable multimedia download delivery in cellular broadcast networks [J]. IEEE Trans, Broadcast, 2007, 53(1): 235-246
- [14] Munaretto D, Jurca D, Widmer J. A fast rate-adaptation algorithm for robust wireless scalable streaming applications[C]// IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WIMOB 2009). 2009: 246-251
- [15] Thomas N, Frossard P. Collaborative videostreaming with Raptor network coding [C] // IEEE International Conference on Multimedia and Expo. 2008: 497-500
- (上接第 12 页)
- [25] Gaspers S, Szeider S. Strong backdoors to bounded treewidth SAT [C]// Proceedings of the 54th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS'13). 2013: 489-498
- [26] Marx D, Razgon I. Constant ratio fixed-parameter approximation of the edge multicut problem [J]. Information Processing Letters, 2009, 109 (20): 1161-1166
- [27] Bousquet N, Daligault J, Thomassé S. Multicut is FPT [C]// Proceedings of the 43th Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC'11). 2011: 459-468
- [28] Ramanujan M S, Saurabh S. Linear time parameterized algorithms via skew-symmetric multicut [C]// Proceedings of the 25th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA'14). 2014: 1739-1748
- [29] Bodlaender H L. On disjoint cycles [J]. International Journal of Foundations of Computer Science, 1994, 5(1): 59-68
- [30] Chitnis R, Hajiaghayi M T, Kortsarz G. Fixed-parameter and approximation algorithms; a new look [C]// Proceedings of the 8th International Symposium on Parameterized and Exact Computation (IPEC'13). 2013: 110-122
- [31] Arvind V, Raman V. Approximation algorithms for some parameterized counting problems [C]// Proceedings of the 13th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC'02). 2002: 453-464
- [32] Chen Jian-er, Liu Yang, Lu Song-jian, et al. A fixed-parameter algorithm for the directed feedback vertex set problem [C]// Proceedings of the 40th Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC'08). 2008: 177-186
- [33] Karp R M, Luby M, Madras N. Monte-Carlo approximation algorithms for enumeration problems [J]. Journal of Algorithms, 1989, 10: 429-448
- [34] Liu Yun-long, Chen Jian-er, Wang Jian-xin. On counting 3-D matchings of size k [J]. Algorithmica, 2009, 54: 530-543
- [35] Chen Jian-er, Lu Songjian, Sze S H, et al. Improved algorithms for path, matching, and packing problems [C]// Proceedings of the 18th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA'07). 2007: 298-307
- [36] Liu Yun-long, Wang Jian-xin, Chen Jian-er. Improved parameterized algorithm for the Multicut problem [J]. Journal of Software, 2010, 21(7): 1515-1523(in Chinese)
刘运龙,王建新,陈建二. Multicut 问题参数算法的改进[J]. 软件学报, 2010, 21(7): 1515-1523
- [37] Marx D. Can you beat treewidth? [J]. Theory of Computing, 2010, 6: 85-112
- [38] Fellows M R, Guo J, Marx D, et al. Data reduction and problem kernels (Dagstuhl Seminar 12241) [R]. Dagstuhl Reports, 2012, 2(6): 26-50