



信息科学技术专著丛书

无线视频传输 优化技术

张志龙 编著

WUXIAN SHIPIN CHUANSHU YOUHUA JISHU



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



信息科学技术专著丛书

无线视频传输优化技术

张志龙 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

近年来,无线通信所承载的数据量呈爆炸式增长,其中视频数据占据主导地位。为了更好地满足用户日益增长的视频通信需求,业内涌现了一系列新型的无线视频传输系统和网络架构,以及相应的传输优化策略。本书结合作者多年来在该领域的研究积累和相关技术的发展现状,介绍了无线通信和视频通信理论基础,并深入探讨了短距离无线高清视频传输、无线视频广播多播、移动自适应流媒体等应用场景下的系统特征、抽象模型、优化方案以及优化效果。最后,本书展望了视频传输优化技术的发展方向。

本书可作为无线视频传输领域的科研参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

无线视频传输优化技术 / 张志龙编著. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2020.7

ISBN 978-7-5635-6096-7

I. ①无… II. ①张… III. ①图像通信—通信技术 IV. ①TN919.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第112194号

策划编辑:姚 顺 刘纳新 责任编辑:刘春棠 封面设计:七星博纳

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路10号

邮政编码:100876

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:10

字 数:215千字

版 次:2020年7月第1版

印 次:2020年7月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-6096-7

定价:48.00元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

近年来,无线通信所承载的视频数据量呈爆炸式增长。为了应对这一趋势,业内出现了一系列新型的无线视频传输技术和网络架构,例如无线虚拟现实系统、移动自适应流媒体、短距离无线高清视频、多媒体边缘计算等。在这些系统中,采用合适的传输优化策略可以提升用户体验以及降低系统开销。因此,无线视频传输优化技术受到了工业界和学术界的广泛关注,具有很高的研究和应用价值。

无线视频传输技术分别与无线通信和视频业务各自的发展息息相关,二者之中任一领域的变化都会给无线视频传输技术带来新的机遇和挑战。此外,通过已有的视频和无线技术重组和创新,也产生了很多性能优异的无线视频传输系统。本书结合作者在该领域的研究积累和该领域近年来的发展状况,介绍了相关背景知识和理论基础,并针对其中的特色传输优化问题进行深入探讨,最后展望了未来的技术发展方向。本书在对具体问题的叙述中,以优化理论为数学分析工具,分别论述系统特征、抽象模型、优化方案以及优化效果。

本书共包括 7 章。第 1 章为绪论,概述了无线通信技术和视频业务的互动关系,并选取三类典型的无线视频场景,总结了各自领域的发展现状。第 2 章为无线通信基础,第 3 章为视频通信基础,这两章介绍了本书涉及的背景知识和技术基础。如果读者已有先修基础,可忽略这两章或将其作为回顾内容。第 4 章为短距离无线高清视频传输技术,探讨了带宽相对充裕的短距离传输场景下,轻压缩和无压缩视频的传输优化策略。第 5 章为新型无线视频广播多播技术,分析了基于模拟视频编码的广播技术优势,抽象出一种通用的资源优化方法,并将其用于新型无线广播多播系统的设计中。第 6 章为移动自适应流媒体传输技术,分别面向视频流媒体点播和直播业务,设计小区接入、带宽分配和多播等传输优化策略。第 7 章为未来无线视频传输优化技术展望,介绍和分析了未来视频传输优化领域比较有挑战的新方向,包括无线虚拟现实视频传输,以及高动态毫米波场景和 5G 星地融合场景下的视频传输问题。

本书的主体内容涉及无线通信和视频处理的交叉领域,并采用优化方法为数学分析工具,所以建议读者具有无线通信、视频编码和流媒体技术以及凸优化等相关领域的先修知

识。本书可作为无线多媒体方向的科研参考书籍。

本书由北京邮电大学信息与通信工程学院的张志龙编著,高小萌、马张晖、梁川玉、袁亚雄、王安月和王岩在成书过程中给予作者很大的帮助和支持。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免出现错误和不妥之处,恳请读者给予批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 技术发展现状	3
1.2.1 无线短距离高清视频传输	3
1.2.2 无线视频多播广播	4
1.2.3 移动自适应视频流媒体	6
1.3 本书的总体结构	8
本章参考文献	9
第 2 章 无线通信基础	14
2.1 无线信道与信道容量	14
2.1.1 无线信道	14
2.1.2 信道容量	15
2.2 无线系统的基本概念	16
2.3 无线资源管理	17
2.4 典型无线网络协议与架构	19
2.4.1 移动蜂窝网	20
2.4.2 无线局域网	25
本章参考文献	33
第 3 章 视频通信基础	35
3.1 视频数据特征	35
3.2 典型视频压缩技术	36
3.2.1 H.264/AVC	37
3.2.2 H.265/HEVC	39

3.3 自适应流媒体技术	42
3.3.1 基于 RTP 的实时流媒体传输协议族	42
3.3.2 基于 HTTP 的动态自适应流媒体技术	47
本章参考文献	54
第 4 章 短距离无线高清视频传输技术	55
4.1 引言	55
4.2 基于 802.11 的编码视频传输优化	56
4.2.1 基于 802.11n 的 H.264 视频传输系统介绍	57
4.2.2 失真开销方程建模	58
4.2.3 误比特率估计算法	59
4.2.4 性能评估	60
4.3 无线高清无压缩视频传输优化	62
4.3.1 无线无压缩视频传输系统介绍	63
4.3.2 无峰均比限制的功率分配策略	65
4.3.3 有峰均比限制的功率分配策略	68
4.3.4 基于自适应 Hadamard 变换的无线无压缩视频传输	71
4.3.5 性能评估	72
本章参考文献	75
第 5 章 新型无线视频广播多播技术	78
5.1 引言	78
5.2 面向线性结构的视频传输优化	80
5.2.1 通用系统模型和问题建模	80
5.2.2 最优的联合载波匹配和功率分配	83
5.3 新型无线视频广播多播系统设计	87
5.3.1 增强型模拟视频编码传输框架	88
5.3.2 载波匹配与功率分配机制	90
5.3.3 信道自适应机制	92
5.3.4 解调和模拟反馈机制	94
5.3.5 不同失真函数下的算法适用性	94
5.3.6 系统性能仿真验证	96
本章参考文献	102

第 6 章 移动自适应流媒体传输技术	107
6.1 引言	107
6.2 面向流媒体点播的小区接入与带宽管理	108
6.2.1 系统模型	109
6.2.2 优化问题建立	112
6.2.3 小区接入和视频版本选择的联合优化方案	112
6.2.4 性能评估	116
6.3 面向流媒体直播的多播分组方案	119
6.3.1 DASH 组播系统架构	119
6.3.2 基于簇的组播分组算法	122
6.3.3 基于 K -均值聚类的组播分组算法	124
6.3.4 仿真结果及性能对比分析	127
本章参考文献	135
第 7 章 未来无线视频传输优化技术展望	138
7.1 无线虚拟现实业务传输优化	138
7.2 高动态毫米波通信场景下的视频传输优化	140
7.3 面向 5G 星地融合的视频传输优化	141
本章参考文献	143
缩略语	144

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

随着无线通信技术的高速发展以及智能终端的普及,无线通信所承载的数据量呈爆炸式增长。在众多类型数据的增长中,视频数据占据主导地位,并且将在未来一段时间内保持这种趋势。这一趋势带来了大量机会,但同时也带来了巨大挑战。为了满足用户的视频通信需求,提高用户体验,针对主流视频业务的无线传输技术受到了工业界和学术界的广泛关注。无线视频传输分别与无线通信和视频业务各自领域的发展息息相关,二者之中任一领域的变化都会给无线视频传输技术带来新的机遇和挑战,是无线视频传输技术进步的动力。而最近 20 年,恰好是无线通信和视频技术及其相关产业发展最为迅猛的时期。

在无线技术方面,通信带宽越来越宽,网络架构不断演进,技术更新换代。其中蜂窝移动通信和宽带无线接入是无线通信高速发展的典型代表,与人们的日常生活和工作关系最为密切。一方面,蜂窝移动通信系统经历了多次革新,每一次更新换代都促使通信速率成倍增长。目前,第五代移动通信系统(Fifth Generation, 5G)的标准化工作不断完善,已经商用,移动用户的通信速率获得了极大提升。另一方面,以 IEEE 802.11 为代表的宽带无线接入技术及其相关产业也经历了高速发展。其中,802.11n 协议峰值速率可以达到 600 Mbit/s, 802.11ac 和 802.11ad 可以达到上 Gbit/s 甚至几 Gbit/s 的传输速率^[1]。支撑通信标准演进以及相关产业发展的是一大批先进无线通信技术的涌现。例如,4G/5G 和 802.11n/ac 标准都采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)和多人多出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术,提升了频谱利用率;对高频通信的探索和使用,增加了无线可用带宽;协作多点(Cooperative Multi-Point, CoMP)技术提升了小区边缘用户的通信质量。与此同时,无线网络结构也在不断演进。例如,异构网络(Heterogeneous Network, HetNet)^[2,3]通过多层网络联合部署,不仅能提高小区边缘覆盖率,还能显著提高频谱利用率和系统容量;云无线接入网络(Cloud Radio Access Network, C-RAN)^[4]技术也越来越受到关注,通过将分散的基带处理单元(Building Baseband Unit, BBU)集中到资源池中,可以有效降低网络开销,并且方便协作算法的实施;雾计算(Fog Computing)、无线缓存^[5]、无线网络虚拟化^[6]和设备到设备(Device-to-Device, D2D)^[7]等技术的提出也丰富了传统网络架构。此外,无线通信技术也朝着关注主流业务和用户体验质量(Quality of

Experience, QoE), 以及节约开销和能耗等方面发展。

在视频业务方面,人们对视频的分辨率、画面质量和流畅度等方面的要求越来越高,同时也越来越多地使用移动设备观看视频,例如平板计算机、智能手机和移动电视等。在网络视频业务方面,根据思科视觉网络指数报告^[8],随着无线传输速率的提升,高清(High Definition, HD)视频业务将会越来越成为主流,同时流式内容占据的比重也会随着网络连接速度的增大而增加。其中,基于超文本传输协议(HyperText Transfer Protocol, HTTP)的动态自适应流媒体(Dynamic Adaptive Streaming over HTTP, DASH)技术是近几年新兴的一种视频流媒体播放技术,具备动态自适应带宽、部署简单、不受防火墙影响等优点,逐渐成为流媒体领域的下一代主流技术之一^[9]。在数字家庭方面,人们期待通过无线技术取代困扰多媒体家庭网络的有线连接线路,使个人计算机、电视、机顶盒、投影仪、游戏控制台等设备的放置更加多样化,其中 HD 视频实时传输业务最受关注。在移动电视领域,人们对视频传输质量提出了更高要求。车载环境是移动电视应用的主要场景,覆盖问题是影响接收效果的主要原因。由于覆盖区域的特殊地理环境、复杂的信道环境以及接收信号的“断崖效应”,要实现商用级的无缝覆盖仍然是目前业界普遍的难题,特别是服务出租车这样接收天线位置低、无固定运行线路的车载移动电视终端^[10]。视频业务种类繁多,除了上述业务,还包括虚拟现实(Virtual Reality, VR)、视频电话、视频监控、远程医疗等。各自领域的发展和存在的问题不尽相同,但支持视频业务的核心技术基本一致。视频编码是核心技术之一,常见的视频编码协议包括 M-JPEG、MPEG-2/4、H. 264/AVC、H. 265/HEVC、分级视频编码(Scalable Video Coding, SVC)等。随着视频压缩技术的发展,压缩效率越来越高,并且视频编码的灵活度也越来越高。同时,由于通信带宽的增加,业内出现了轻压缩甚至无压缩的视频编码方案,用于进一步提升视频质量和降低端到端时延。

可见,近些年无线技术与视频业务经历着巨大的变化。无线与视频两个领域的发展是互相影响和互相促进的。一方面,视频数据量爆发式增长,对无线技术提出了新的挑战,要求无线带宽越来越宽、传输时延不断降低;视频业务占据无线网络流量很大比重,给无线网络带来了巨大压力,促使网络架构在演进过程中和网络算法在设计时越来越多地考虑视频业务的特点,有针对性地提升业务性能和降低网络开销。另一方面,无线信道的时变性要求视频传输技术具备更好的信道自适应机制,促使诸如 SVC 和 DASH 等技术在无线视频传输领域广受关注;同时,无线网络中边缘计算能力的引入为视频业务的设计带来了更大空间和灵活度,使得视频业务与无线网络之间的结合更加紧密。

伴随着无线技术和视频业务的各自发展与相互影响,无线视频传输技术也出现了新的研究动向。在传统无线视频传输技术的研究中,通常认为无线带宽资源有限、干扰因素多、速率波动较大,而视频信号数据量大、信息重要性不均等、实时性要求高,所以在设计无线视频传输系统时,需要采用视频编码器将视频信号充分压缩,并进行视频编码层和无线传输层之间的适配。但是,无线通信带宽不断增加、网络架构不断演进促使无线视频传输技术面临着与以往不同的挑战,颠覆了传统的设计理念。于是,无线视频传输技术不单单是

关于视频编码与无线传输层之间适配的研究,还出现了牺牲部分压缩效率以使视频更适于无线传输的设计思想。例如,在室内 Wi-Fi 和毫米波通信等场景,无线带宽甚至已经不是瓶颈,可用带宽足够承载部分无压缩或轻压缩视频的传输。此外,无线网络架构也随着以视频流媒体为代表的移动互联网业务发生着深刻的变革,如何充分利用新的基础设施和网络架构提升用户体验质量,成为近些年来视频通信领域的研究热点。

在上述大背景下,本书选取人们日常生活和工作中应用最为广泛的三类无线视频业务进行介绍。

- 无线短距离高清视频传输:用于取代视频产生和显示设备之间的有线连接,例如笔记本电脑与投影仪之间、机顶盒与电视之间的连接。
- 无线视频多播广播:方便人们在车载环境和其他公共场所通过电视或手持设备获取公共视频信息。
- 移动自适应视频流媒体:包括直播和点播,作为移动互联网的主要业务之一,使人们可以随时随地按照个人喜好以流的方式观看视频。

近些年,上述三类业务广受关注,在面向这三类业务的无线传输领域出现了大量的前沿成果。由于三种应用场景的差异,其各自设计的出发点并不相同。在这些领域中,仍有很多开放性问题值得关注,仍有很多相关的系统和网络需要优化甚至重新设计。鉴于此,解决好这三类视频业务的无线传输优化问题,最大化满足用户的视频通信需求,对于整个无线网络和视频应用领域的发展具有重大意义。

1.2 技术发展现状

本节概述无线短距离高清视频传输、无线视频多播广播以及移动自适应视频流媒体三种业务的无线传输技术发展现状和热点问题。

1.2.1 无线短距离高清视频传输

在消费类电子、多媒体家庭以及某些医用领域,为了取代视频产生和显示设备之间的有线连接,需要低时延和高质量的短距离无线视频传输通道。由于传统视频编码和解码过程较为耗时,并且对视频质量有一定程度的损害,所以为了保证视频传输质量和时延要求,通常采用无压缩或轻压缩的视频编码技术。对于无线承载技术的选择,业内主要有两种思路:一种是在常规频段利用 OFDM、MIMO、高阶调制以及复杂的信号处理技术传输高清视频信号;另一种是采用毫米波通信技术,利用高频充足的带宽资源传输高清视频信号。下面分别从上述两方面介绍相关领域的研究现状。

在常规频段进行无线高清视频实时传输,主要是基于 Wi-Fi 技术和 UWB 技术。从高清视频编码技术层面来看,又可以分为两大类:无压缩方式和有压缩方式。WHDI 是一种典型的商用无压缩视频传输系统^[11]。WHDI 使用 5 GHz 自由频段的 40 MHz 带宽,对

802.11n 进行创新和改进,采用信源信道联合编码(Joint Source Channel Coding, JSCC)技术使无线传输层可以承载高清无压缩视频,通信时延在 1 ms 左右。对于无压缩视频的传输方式,学术界也有很多讨论,例如,在一种基于 802.11ac 协议的无压缩视频监控系统中,每个 8 比特像素分为不均等的两部分:重要比特(Most Significant Bit, MSB)组由最高位的两个比特构成,映射到一个 QPSK 符号;次要比特(Least Significant Bit, LSB)组由低 6 位比特构成,映射到一个 64QAM 符号,以达到对视频信息不均等保护(Unequal Protection, UEP)的目的^[12]。在有压缩的高清视频传输方面,通常采用 H.264/H.265/MPEG-4 等通用视频编码器压缩视频。与无压缩视频传输相比,有压缩的视频传输系统时延较大,这是由于视频在压缩和解压的过程占用了更多的处理时间。例如,Wi-Vu 系统采用 H.264 低时延压缩算法,在 Wi-Fi 网络 2.4/5.8 GHz 双频段传输高清视频,时延约 20 ms^[13]。

在高频段进行无线高清视频实时传输,主要采用 60 GHz 毫米波相关通信技术。随着低频段带宽拥挤度不断增加,60 GHz 毫米波通信吸引了国内外学者的广泛兴趣。在 60 GHz 频段附近有 7 GHz 左右的可用带宽(58~65 GHz)可以用于传输上 Gbit/s 的无压缩的高清视频流媒体。IEEE 也制定了基于 60 GHz 毫米波通信技术的标准,例如 802.15.3c 以及 802.11ad。同时,工业界出现了 WirelessHD 和 WiGig 联盟,致力于发展无线高清视频传输相关的标准,其中 WirelessHD^[14]传输 1080P 无压缩视频的时延可以限制在 5~15 ms。学术界也出现了很多基于 60 GHz 毫米波的视频传输的研究成果。例如,文献[15]考虑视频直播场景,视频源通过中继节点发送视频信息到汇聚节点,提出了一种视频编码和中继选择策略。文献[16]和[17]提出基于多描述编码(Multiple Description Coding, MDC)的非均等保护方案,将更多的前向纠错编码符号分配给重要的比特,多个视频帧之间通过交织来对抗 60 GHz 毫米波信道的突发错误。UVoW 系统^[18]通过多级循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)和不同的重传机制为 MSB 和 LSB 提供不均等保护。文献[19]针对无压缩视频传输中的差错,基于 RS 编码为 MSB 和 LSB 设计了不同级别的错误隐藏机制。

综上,在短距离高清视频通信领域,由于无线带宽充裕,压缩效率并不是系统设计最为关注的。如何利用视频数据的冗余性以及不同比特之间的差异性,将其转换为传输可靠度,同时不引入较大的处理时延,是无压缩或轻压缩视频短距离传输设计的核心问题之一。视频分辨率的不断提升和人们对时延要求的不断提高,使这一领域的研究越来越具挑战性。

1.2.2 无线视频多播广播

常见的无线视频多播广播应用场景包括移动电视,媒体共享,以及车站、机场、商场、大学等公共场所播放体育赛事、讲座、安全宣传视频等^[20,21]。无线视频多播广播技术的主要挑战是如何更好地服务信道质量差异化的多个视频用户。这些用户可以支持的最大接收速率、可获得的平均吞吐量以及视频信号失真各不相同,但是都对同样的视频内容感兴趣。国内外已有的无线多播标准包括数字视频广播(Digital Video Broadcasting, DVB)标准^[22]、

蜂窝移动通信中的多媒体广播多播业务(Multimedia Broadcast Multicast Service, MBMS)、中国移动多媒体广播(China Mobile Multimedia Broadcasting, CMMB)等。

传统的无线视频多播技术通常对传输错误敏感,并具有“断崖”效应。“断崖”效应与物理层和视频编码层的决策相关。首先数据包在物理层以固定的码率传输,接收机的信道条件如果无法支持此码率,那么将无法正确接收数据包还原视频信号。因此在传输视频信号时,需要以信道质量最差的接收机为基准选择传输码率,要求视频编码器将视频信号编码为较低质量的版本。在这种情况下,信道条件好的用户则只能接收相对低速的视频信号,无法继续提升视频质量。因此,在一个多播组中,所有用户的视频质量都受限于信道质量最差的用户。

无线视频多播的理想状态是发射机可以将视频信号广播到多个用户,每个用户接收到的视频质量由其信道状态决定。显然,传统的视频多播技术不能做到这一点。针对这个问题,专家学者们提出了多分辨率编码(Multiple Resolution Coding, MRC)^[23-25],将视频编码为一个基本层和多个增强层。基本层以最低码率发送使多播组内所有用户都可以正确接收,增强层以较高码率传输,只有信道质量好的用户可以正确解调。SVC是近些年最为流行的多分辨率编码方法^[26]。采用MRC的方式进行无线多播传输,通常需要特殊的物理层技术配合。例如,在物理层采用叠加编码(Superposition Coding)^[27],发送端可以同时发送独立码流到不同用户,接收端通过串行干扰消除解调信号。这种方式复杂度较高,需要根据用户信道状态决定如何为各层分配资源以及每层使用的码率,同时接收机硬件也需要有所调整^[28]。并且MRC并不能完全消除“断崖”效应,仅仅把大的“断崖”变成两个或多个小的“断崖”。

在传统的视频多播系统和基于MRC的多播系统中,信源编码和信道编码为独立的处理模块,再通过不同的适配方式将二者融合在一起。视频编码层和无线传输层往往基于各自领域的标准和协议分开设计,只有少量信息在视频编码层和无线传输层之间交互。2009年,美国麻省理工学院的Szymon和Dina提出模拟视频编码设计SoftCast^[29-31],颠覆了以往视频传输系统的设计思路,引起业内的广泛关注。SoftCast采用特殊的模拟视频编码结构,视频数据首先进行三维离散余弦变换(Three-Dimensional Discrete Cosine Transform, 3D-DCT),得到离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)系数,再组成一系列视频块,然后以不同的比例线性缩放。在物理层,将DCT系数映射为64K正交幅度调制(64K Quadrature Amplitude Modulation, 64K-QAM)符号,不经信道编码直接经过OFDM后发射。与传统的视频编码不同,这个框架去掉了熵编码模块,这是因为熵编码使得视频质量对信道错误极其敏感。

SoftCast的核心思想在于保证视频数据压缩和处理过程为线性过程,将干扰与噪声对视频码流的影响直接对应到像素值上,保持视频像素值与传输符号之间的线性关系,最终使得信道质量与视频质量成近似线性关系,增强视频传输系统的稳健性和扩展性。SoftCast优势明显:在广播服务覆盖区内,不同信道质量的用户可以有不同的视频体验,视频质

量不再受限于最差的信道质量;接收视频质量与信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)曲线变化一致,对时变信道差错率不敏感。

在 SoftCast 之后,出现了很多改进的模拟视频编码方案^[32-38],取得了较好的性能。例如,采用三维离散小波变换(Three-Dimension Discrete Wavelet Transform, 3D-DWT)替换 3D-DCT^[36];在编码时采用特殊的运动估计来降低冗余度^[34,35];通过自适应的块划分方法使视频块的划分更符合 DCT 系数的能量分布^[37];利用传统的数字编码和新型模拟编码的优势,设计混合编码方案 WSVC^[32];引入 MIMO 技术,将重要的视频数据映射到可靠的子信道上^[33,39]。

目前,对模拟视频传输技术的研究主要侧重在视频编码层面的改进,对无线承载技术的研究还不够充分。同时,这一新兴技术还只在学术探讨阶段,离实际商用仍有距离。但对无线传输层面的进一步研究是非常必要的,这一领域也具有较大的研究空间和应用前景。

1.2.3 移动自适应视频流媒体

视频流媒体业务是近些年来无线网络数据流量激增的主要动力之一,要求无线网络提升业务承载能力。但是传统的增加蜂窝网络吞吐量的方式遇到严重的问题:可用频谱资源逐渐耗尽,并且成本越来越高;无线链路容量增加越来越困难,采用 MIMO 和 OFDM 技术、逼近信道容量的编码以及干扰协调等技术基本上已经使物理层容量达到了目前可实用的理论极限^[40,41];降低小区半径部署小小区(Small Cell, SC)虽然可行,但是代价较高^[42]。可见,传统方式无法很好地应对视频数据量爆发式增长的趋势,建立视频友好型无线网络环境十分迫切。

区别于普通的数据业务,视频流媒体业务有其独特之处。一方面,大量点播用户请求相同的视频数据源,导致大量重复性数据在网络中传输。从信息传递的角度来看,全网传输的数据包存在极大冗余。另一方面,热点直播内容通常会有很多在线用户,以传统单播方式传递视频内容也会导致传输效率下降。上述两种场景都存在对网络资源利用不充分的情况。此外,流媒体数据有视频信号本身的特点,例如数据重要性不均等、时延敏感、需要服务质量(Quality of Service, QoS)保障等,流媒体协议也有其特定的数据包到达规律。在无线网络设计时,如果可以充分利用视频业务的这些特点,将带来更好的用户体验以及更低的网络开销。

针对视频内容在无线网络中重复传输的问题,业界提出了多种内容重用方式。通过在网络边缘节点装备计算和缓存设备,使无线网络具备移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)功能,增强了网络架构对视频业务的支撑能力。

首先,对于点播业务,缓存部分热点数据,可以使部分视频用户从本地缓存下载所请求的视频文件。美国南加州大学和 Intel/Cisco/Verizon 的合作项目 VAWN(Video-Aware Wireless Networks)^[43]首先提出了这样的思路,建议使用廉价的缓存设备替代回程链路,降

低网络负载^[5,44,45]。与此项目相关的研究包括两方面:其一,在蜂窝网络中引入缓存了热点视频数据的辅助节点,通过建立本地无线连接服务视频用户。这种辅助节点与 SCBS 不同,具有很大的缓存空间,没有高速的回程链路^[46,47]。其二,利用用户设备(User Equipment, UE)自身的存储空间缓存热点数据,视频用户在基站控制下通过 D2D 通信的方式从其周围的 UE 下载所需视频文件^[48-51]。在 VAWN 项目的引导下,出现了大量相关的研究和探索。由于无线网络纷繁复杂,适用于引入缓存的场景和可以装备缓存的网络节点也多种多样,例如,在 5G 蜂窝网络边缘装备缓存,在 C-RAN 的 BBU 资源池中部署缓存等。其中,大部分研究集中在不同网络场景下的缓存策略设计上,例如异构网络中基于地理位置的缓存策略^[52]、适用于多播的缓存策略^[53]、降低无线网络能耗的缓存策略^[54]等。另外,也可以通过基站缓存提升 CoMP 机会,将链路间干扰转变为空间复用增益^[55],以及通过将下行数据预先缓存到目的小区提升切换时的通信质量^[54]。

其次,对于直播业务,视频内容通常需要被转码成不同码率和格式的版本以适应接收用户的网络状态和设备能力。由于视频数据经过采集、转码、回放等处理过程,往往端到端时延较高,这是目前视频直播业务遇到的主要问题。网络直播的主流传输方案通常采用实时转码。在自适应流媒体业务中,由于接收者的观看内容、观看设备和网络带宽的差异性,若在视频源完成转码,不仅会给视频源服务器带来过重负荷,还会造成大量带宽资源消耗和时延。云服务具有计算资源集中的特点,将转码任务交给云端处理可以解决此问题。但是,在自适应流媒体业务中引入云服务还需要考虑两方面的问题。第一,计算资源并不是无限的,应用服务商需要租借云服务器来进行转码,不同地理位置的服务器价格不同,并且服务能力也不同,因此,计算资源应该如何分配才能节约成本和提升用户体验是需要考虑的问题。第二,对于实时转码的视频业务,转码服务器的部署和整个云网络的构架对性能的影响很大。若部署在内容分发网络(Content Delivery Network, CDN)节点,则需要耗费大量的处理时延。MEC 将计算资源迁移到接入网,能够减小视频传输的端到端时延。此外,在直播场景中,有很大概率存在大量用户请求同一视频的情况。可以借助边缘计算能力,通过控制用户带宽,使用户请求相同的下载速率,最大限度形成多播,节省无线资源,提高用户体验。基于 MEC 的无线网络为视频业务的转码策略、资源分配、版本选择和高效多播提供了有利的支撑环境。

针对视频业务的自身特点,业界主要采用跨层设计的方式,利用有限的网络资源谋求最佳的用户体验。无须更改网络结构,而是通过设计合理的算法,使现有网络可以识别特定的视频业务类型,并根据业务特点分配网络资源,通过这种方式可以在一定程度上将现有网络转变为视频友好型无线网络。虽然这是网络视频传输较为传统的研究领域,但是由于网络不断演进以及视频业务类型不断更新,一直有新的挑战出现,所以此领域也是专家学者们关注的热点。通常在这类研究中,需要建立较为合理的 QoE 评价模型。在移动视频流媒体业务中,对 QoE 的评价不仅要考虑传统的平均视频质量指标,例如峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)、结构相似性(Structural Similarity, SSIM)等^[56],还需要将重

缓冲事件、初始时延、质量波动性以及用户喜好等测量指标纳入考虑范围。然后,通过最大化无线视频传输网络中与多种 QoE 指标相关的效用函数来确定传输策略,提升视频传输性能。在这个基本思路下,现有研究各有不同的侧重点。例如,通过采用播放缓存反馈的资源调度算法提升网络质量^[57],利用缓冲状态的随机性和网络状态信息来进行自适应决策^[58]等。

综上,针对有利于承载视频业务的网络架构和针对视频业务特点的网络资源分配两方面的研究已经引起了专家学者们的重视,并取得了较多的研究成果,但是仍有很多开放性问题值得研究。

1.3 本书的总体结构

本书针对新型无线视频传输系统和网络中的优化问题,介绍了视频传输优化的背景知识,深入探讨了三类视频业务的无线传输优化设计,并展望了该领域未来发展方向。各章的结构具体安排如下。

第 1 章:绪论。介绍无线视频传输技术的应用背景,分析视频业务需求的变化、视频传输技术的发展以及无线通信技术的演进。随后,介绍无线视频传输技术的研究热点和发展现状,梳理各领域视频传输技术存在的问题。

第 2 章:无线通信基础。概述无线信道模型和经典香农容量的相关结论,分析无线资源管理技术的核心问题以及未来发展现状,并以移动蜂窝网和无线局域网为例介绍典型的无线网络协议与资源共享模式。

第 3 章:视频通信基础。介绍视频通信的基本原理与方法,以 H. 264 与 H. 265 为例概述典型视频压缩编码技术的核心技术,并介绍两大视频流媒体协议体系。

第 4 章:短距离无线高清视频传输优化技术。介绍非均等保护和信源信道联合编码的应用背景和核心思想。在短距离无线高清视频传输场景下,分别针对有压缩和无压缩的视频传输问题进行分析和系统设计。

第 5 章:新型无线视频广播多播技术。首先,分析传统无线视频广播多播系统的结构和潜在问题,引出基于模拟视频编码技术的新型系统。然后,抽象出符合系统设计的一般性优化问题,并设计一种通用联合载波匹配和功率分配方法。最后,将算法应用到新型视频广播多播系统中,并设计完整的解决方案。

第 6 章:移动自适应流媒体传输技术。针对流媒体点播和直播两大场景,以 DASH 协议为例,分别探讨装备缓存的无线网络小区接入与带宽管理以及无线视频流媒体组播的优化设计。

第 7 章:未来无线视频传输优化技术展望。

本章参考文献

- [1] PERAHIA E, STACEY R. Next generation wireless LANs: 802.11n and 802.11ac [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J, GATHERER A. Femtocell networks: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 33(9): 59-67.
- [3] ABDELNASSER A, HOSSAIN E, KIM D. Tier-aware resource allocation in OFDMA macrocell-small cell networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(3): 695-710.
- [4] CHECKO A, CHRISTIANSEN H L, YAN Y, et al. Cloud RAN for mobile networks—a technology overview[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2015, 17(1): 405-426.
- [5] CAIRE G, MOLISCH A F. Femtocaching and D2D communications: a new paradigm for video-aware wireless networks[J]. Intel Technology Journal, 2015, 19(1): 92-118.
- [6] LIANG C, YU F R. Wireless network virtualization: a survey, some research issues and challenges[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2015, 17(1): 358-380.
- [7] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A survey on device-to-device communication in cellular networks[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2014, 16(4): 1801-1819.
- [8] INDEX C V N. Global mobile data traffic forecast update, 2015-2020[R]. Cisco white paper, 2016.
- [9] SEUFERT M, EGGER S, SLANINA M, et al. A survey on quality of experience of HTTP adaptive streaming[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2015, 17(1): 469-492.
- [10] 董鑫, 黄仕清, 谭劲松, 等. 车联网技术下的移动电视[J]. 卫星电视与宽带多媒体, 2015(7): 74-76.
- [11] Developing wireless high-definition video modems for consumer electronics devices [EB/OL]. <https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/developing-wireless-high-definition-video-modems-for-consumer-electronics-devices.html>.
- [12] YOON HEEYONG, JUNG YUNHO, LEE SEONGJOO. An image sequence transmission method in wireless video surveillance systems[J]. Wireless personal communications: an International Journal, 2015, 82(3): 1225-1238.
- [13] WiVu Technology Overview[EB/OL]. http://www.cavium.com/pdfFiles/WiVu_