



“十三五”科学技术专著丛书

光与无线 融合网络

杨辉 著

Integrated Optical and Wireless Networks



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”科学技术专著丛书

光与无线融合网络

杨 辉 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书针对光与无线融合网络的控制低效问题,从控制、资源、同步和保护多个维度提出了解决方案。本书在内容安排上,首先,介绍了灵活高效的光与无线融合网络架构设计以及详细的多层资源优化技术方案;其次,介绍了在不同网络场景下的多维资源分配优化方法;再次,介绍了光与无线融合网络时间同步机制;最后,介绍了光与无线融合网络生存性的关键技术,并介绍了多种网络资源保护策略。

本书可作为高等院校相关专业(通信工程、电子工程、信息科学技术)师生的参考书,也适合打算进入光网络领域的非相关专业读者,以及正在从事光网络理论研究和实际系统设计的研发人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

光与无线融合网络 / 杨辉著. — 北京: 北京邮电大学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-5635-5725-7

I. ①光… II. ①杨… III. ①光接入网 IV. ①TN915.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 090664 号

书 名: 光与无线融合网络

作 者: 杨 辉

责任编辑: 徐振华 王小莹

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(邮编: 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: 北京九州迅驰传媒文化有限公司

开 本: 720 mm×1 000 mm 1/16

印 张: 7.75

字 数: 124 千字

版 次: 2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5725-7

定 价: 29.00 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

光与无线融合网络呈现出功能融合和控制协作的发展趋势,集成网络控制将成为光与无线融合网络的重要指标。因此,研究多制式光与无线融合网络多维控制理论与优化技术成为重要方向。但实现多维控制面临着四方面的挑战:如何实现光与无线融合网络组网,提升网络的适配性与交换的灵活性;如何实现多维资源优化,提升网络性能;如何保障网络时间同步,创建低延迟的网络环境;如何突破网络生存性的限制,提高网络抗毁能力。这些挑战将成为攻克多制式光与无线融合网络多维控制低效这一科学难题的关键点。

围绕上述科学难题,本书主要从以下四个方面对光与无线融合网络技术进行了研究。

第一,针对光与无线融合网络组网难的问题,利用灵活的转发器和弹性光交换机来连接 RRH(Remote Radio Head,射频拉远头)和 BBU(Base Band Unit,基带处理单元),在全局范围内有效优化射频、光谱和 BBU 处理资源,最大限度地提高无线覆盖范围,并通过垂直整合和水平合并模型满足端到端业务的 QoS(Quality of Service,服务质量)要求。

第二,针对光与无线融合网络资源分配不均衡的问题,设计了光与无线融合网络跨层优化算法、面向异构光与无线融合网络的虚拟化时频资源联合优化方法、基于软件定义的移动光承载网动态流量光层资源分配方案、面向节能的接入网动态带宽优化机制、基于网络功能虚拟化的光与无线融合网络多层资源优化方案,以及面向业务提供的光与无线融合网络多维资源聚合方法等来提升资源分配的有效性和网络的可靠性。

第三,针对光与无线融合网络同步精度较低的问题,分析了光与无线融合网络时间同步模型,构建了面向时间同步的光与无线融合网络架构,提出了基

于软件定义控制器的光与无线融合网络架构时间同步方案,设计了基于深度强化学习的高精度时间同步方法实现机制。

第四,针对光与无线融合网络的生存性问题,研究了面向光与无线融合网络的跨层资源保护策略,提出了一种基于跨层保护的光与无线融合网络架构,通过采用自主创新的带宽压缩保护算法,保证了光与无线融合网络的生存性,降低了网络的阻塞概率,提高了资源利用率。

本书凝聚了作者多年来的科研经验和实践总结,得到了国家“863”计划“新型超大容量全光交换网络架构及关键技术研究”、国家“973”计划“Pbits 级可控管光网络基础研究”等科研项目的支持,同时也包含了白巍、于奥、姚秋彦、何林宽、赵旭东、王博慧、南静文、梁永荣等在攻读学位期间的部分研究成果,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,本书中难免有错误或者不妥之处,敬请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外发展动态	2
1.2.1 光与无线融合网络控制与组网技术发展动态	2
1.2.2 光与无线融合网络资源优化技术发展动态	3
1.2.3 光与无线融合网络时间同步技术发展动态	5
1.2.4 光与无线融合网络生存性技术发展动态	7
1.3 主要内容安排	7
第 2 章 基于云光与无线融合网络的多维融合控制与组网模型	10
2.1 光与无线融合网络的控制与组网理论分析	10
2.1.1 网络需求分析	10
2.1.2 控制与组网分析	11
2.2 C-RoFN 系统方案设计	11
2.2.1 网络应用场景	11
2.2.2 网络架构设计	12
2.2.3 网络功能模块	13
2.3 多层资源优化详细技术方案	14
2.3.1 多层资源优化服务协作模式	14
2.3.2 全局评估策略	17
2.4 网络性能验证	18

2.5 本章小结	20
第3章 光与无线融合网络资源优化机理	22
3.1 光与无线融合网络跨层优化算法	22
3.1.1 网络模型	22
3.1.2 全局评估因子	23
3.1.3 全局评估策略	24
3.1.4 网络性能验证	25
3.2 面向异构光与无线融合网络的虚拟化时频资源联合优化方法	29
3.2.1 软件定义的 V-HCRoFN 架构	29
3.2.2 基于 V-HCRoFN 架构的资源分配方案	31
3.2.3 网络性能验证	32
3.3 基于软件定义的移动光承载网动态流量光层资源分配方案	34
3.3.1 移动光承载网络架构	34
3.3.2 流量的动态资源分配方案	35
3.3.3 网络性能验证	37
3.4 面向节能的接入网动态带宽优化机制研究	38
3.4.1 接入网网络架构	39
3.4.2 多模混合动态带宽分配方案	41
3.4.3 光与无线融合网络下的多模混合动态带宽分配方案	43
3.4.4 网络性能验证	46
3.5 基于网络功能虚拟化的光与无线融合网络多层资源优化方案	49
3.5.1 软件定义的 C-RoFN 的 MSRO 架构	50
3.5.2 全局评估策略	53
3.5.3 网络性能验证	58
3.6 面向业务提供的光与无线融合网络多维资源聚合方案	61
3.6.1 软件定义的 MDRI 架构	62
3.6.2 基于辅助图的资源集成提供方案	63
3.6.3 网络性能验证	68
3.7 本章小结	70

第 4 章 光与无线融合网络时间同步机制	71
4.1 光与无线融合网络时间同步机制的理论分析	71
4.2 基于软件定义控制器的光与无线融合网络时间同步机制	72
4.2.1 面向时间同步的光与无线融合网络架构	72
4.2.2 基于软件定义控制器的光与无线融合网络架构时间同步方案 ...	74
4.2.3 网络性能验证	76
4.3 基于深度强化学习的高精度时间同步方法实现机制	77
4.3.1 深度强化学习模型与时间同步方案	78
4.3.2 网络性能验证	80
4.4 本章小结	82
第 5 章 面向生存性的光与无线融合网络保护方法	83
5.1 光与无线融合网络的生存性需求分析	83
5.2 面向光与无线融合网络的跨层资源保护策略研究	84
5.2.1 基于跨层资源保护的光与无线融合网络架构	84
5.2.2 跨层资源保护策略	87
5.2.3 网络性能验证	90
5.3 光与无线融合网络中带宽压缩保护策略	92
5.3.1 网络模型和问题陈述	93
5.3.2 光与无线融合网络中的带宽压缩保护	94
5.3.3 带宽压缩保护算法	97
5.3.4 网络性能验证	99
5.4 本章小结	104
参考文献	105

第1章 绪 论

1.1 研究背景

随着互联网业务形式的多样化和业务量的飞速发展,用户对网络的带宽和移动性有了更高的要求。光与无线融合网络得到了前所未有的发展,其利用了光波与微波在电磁波理论中统一的物理本质,将光网络的大容量与无线接入网的灵活移动性等各自优势相结合,实现了高速率、大容量、低成本、低损耗的灵活长距离通信,可以满足用户日益增长的通信需求。随着光与无线融合系统节点的增加,大规模组网的趋势将不可避免,由此凸显出网络控制所面临的组网僵化、资源利用低效、同步精度低以及生存性差的问题,迫使光与无线融合网络由功能僵化向资源共享、由分布维护向集中管控发展。光与无线组成的网络结构呈现出异构特征,因此本书从网络控制的视角,对面向光与无线融合网络的组网架构、资源调度、时间同步以及生存性等方面进行研究。

面向光与无线融合网络的多维控制主要存在以下问题亟待解决。

① 光与无线融合网络组网僵化,缺乏统一调度。光与无线融合网络在物理层面实现了信号以不同形态在不同媒介中传输,但是光网络与无线通信网络的控制相互独立,缺乏统一的调度机制,这直接导致了网络组网交互困难。

② 光与无线融合网络资源分配不合理,资源利用低效。当前光与无线融合网络的中心局对不同远端天线单元的频谱、时隙等资源分配相对固定,不能感知业务流量大小变化,这种固定的分配策略使得网络资源利用率低下。

③ 光与无线融合网络时间同步精度低。5G 网络需要极低延迟的网络环

境。为了创建低延迟的网络环境,稳定可靠的计时系统对于 5G 移动网络至关重要。

④ 光与无线融合网络生存性差,限制了系统规模 and 用户需求的发展。由灾难引起的网络崩溃是一个威胁光与无线融合网络生存能力并导致用户服务大量中断的重要因素,而许多应用需要保证较高品质的连接质量。

综上所述,为了突破大规模组网所面临的组网控制复杂、资源利用低效、同步精度低以及生存性等问题,光与无线融合网络势必需要完成从功能僵化到资源共享、从分布维护到集中管控的变革。因此,从异构网络融合的视角,要想实现光与无线融合系统高效应用,必须研究面向光与无线融合网络的组网架构、资源调度、时间同步以及生存性等关键技术。

1.2 国内外发展动态

针对移动数据大带宽承载需求,2009 年中国移动首次提出云无线接入网 (Cloud-Radio Access Network,C-RAN)的概念,描述了通过光通信技术来实现分布式天线与集中化处理的连接部署。2014 年,波分复用(Wavelength Division Multiplexing,WDM)技术和通用公共无线电接口(Common Public Radio Interface,CPRI)压缩技术的引入,有效解决了前传网络对承载系统资源消耗过大的问题,光与无线融合网络作为 C-RAN 架构前传网的承载方式得到业界广泛的认可。随后光与无线融合网络控制与组网技术成为通信网络领域的研究热点,软件定义网络(Software Defined Network,SDN)和网络功能虚拟化(Network Function Virtualization,NFV)技术的发展为光与无线融合网络的控制与组网带来了诸多机遇与挑战,如网络协同控制技术、资源部署优化技术等。

1.2.1 光与无线融合网络控制与组网技术发展动态

配置僵化和控制复杂的问题伴随光与无线融合网络一起出现,这关系到服务提供的有效性和控制融合性。光与无线融合网络将不同设备、不同制式信号随时随地互联互通,SDN 和 NFV 等控制与组网技术成为网络控制融合的关键。

键。西班牙 CTTC 研究院提出了多租户网络切片架构,提供了包含虚拟网络资源、云资源以及网络功能的 5G 切片,设计了 SDN 与 NFV 的资源分配控制实体。针对物联网服务,西班牙拉戈萨大学提出了面向资源控制的 SDN/NFV 使能的边缘光网络节点,实验验证了物联网关和边缘光网络节点之间的网络连接性。针对超高密度异构网络资源分配问题,文献[5]提出了一种由 SDN 控制的基于群智能算法的功率分配方案,可将优化后的功率分配因子发送给基站源节点和中继节点,从而提升网络资源分配效率。文献[6]提出了用于光与无线融合网络的分层 SDN 编排体系结构,其中无线 SDN 控制器控制底层无线网络元素以及域间链路,而有线 SDN 负责对汇聚网络 and 核心网络的控制。文献[7]搭建了部署 NFV 和 SDN 功能的多域运营商网络服务的控制原型系统 5GEx,实现了 5G 场景下的网络切片与功能部署。由此可见,光与无线融合网络中的 NFV 和 SDN 等控制与组网技术已成为实现光与无线网络控制的重要研究方向。

1.2.2 光与无线融合网络资源优化技术发展动态

资源利用低效是光与无线融合网络所面临的重要问题,针对光与无线融合网络中无线域、光域以及基带处理单元(Base Band Unit, BBU)等多层资源并存的场景,文献[8]提出一种新型的接入架构,该架构可以全局优化射频、光谱和 BBU 处理资源,最大限度提高无线覆盖范围和服务质量。在此架构基础上,针对服务提供需求,文献[9]提出了多类别资源汇聚算法,可有效提升不同资源的利用效能。文献[10]提出了光聚合网络中基带处理部署策略,完成了基带资源合并与网络阻塞率之间的适当权衡,实现了处理资源和业务之间的自适应分配。文献[11]验证了 5G 传送网络可编程性对于运营商收益的提升作用,提出了动态资源切片策略,并与传统静态资源分配策略进行对比,实验表明该策略将资源利用等级提升了一个数量级。文献[12]预测了 5G 场景流量带宽趋势,设计了支持 5G 微基站的中传网络光接口,并选择适当的分离功能和基站配置,降低了接口的成本开销。文献[29]提出了新颖的分解无线接入网络架构,在无线、光和计算/存储域内部署分离的硬件和软件组件,并在理论上对所提方法进行了评估。针对宏基站和微基站之间的层间干扰和能效问题,文献[13]提出了

异构化 C-RAN 中有效的在线学习资源分配方案,可以显著减轻层间干扰并提高能效,同时满足所有用户的服务要求。由此可见,资源优化已成为光与无线网络的重要研究内容。

光与无线融合网络是 5G 发展的重要组成部分,被各国际标准化组织先后进行了研究,主要包括国际电信联盟(ITU-T)、第三代合作伙伴计划(3GPP)、电气和电子工程师协会(IEEE)、国际互联网工程任务组(IETF)。

ITU-T 将其标准化研究分为三个阶段:第一阶段为 2015 年完成 IMT-2020 国际标准的前期研究;第二阶段为 2016 年开展 5G 技术性能需求和评估方法研究;第三阶段为 2017 年底启动相关候选方案征集,2020 年底完成标准制定。其目标是在连接密度、网络能量效率、流量密度等方面实现光与无线网络技术的提升和完善。

3GPP 承担 5G 国际标准技术的内容制定工作。在核心网方面,聚焦 5G 新型网络架构的功能特性,优先推进网络切片、功能重构、边缘计算、新型接口和协议以及控制和转发分离等技术的标准化研究。在接入网方面,其重点推进融合接入网络架构、功能和协议栈设计、接口与交互、无线智能感知和业务优化等关键技术的标准化工作,在此基础上进一步研究定制化部署和服务、接入网功能虚拟化和网络切片、网络的自组织自优化等关键技术,增强对增强移动宽带(Enhanced Mobile Broadband,eMBB)、大规模物联网(Massive Machine Type of Communication,mMTC)和超高可靠超低时延通信(Ultra Reliable-Low Latency Communication,URLLC)场景的支撑能力。

IEEE 发起了 IEEE 5G 计划,其 SDN 研究组于 2016 年 7 月发布名为“软件定义的 5G 生态系统:技术挑战、商业模式可持续性、通信政策问题”的白皮书,提出了“电信网络的软件化”概念,其中四大关键技术分别为:SDN、NFV、云以及边缘雾计算。

IETF 与 3GPP 协同工作来定义支持互联网的 5G 网络,提出了关于虚拟化功能的主要规范,这些虚拟化功能将支持 IP 协议演进。在架构层面上,其要求将整个无线接入网和基础设施进行虚拟化,进一步扩展并完善相关性能。

在项目研究方面,光与无线网络对未来网络的关键作用已引发主要发达国家的高度重视,成为信息技术研究热点。例如,欧盟 5G 公私合资合作研发机构(5G-PPP)在 Horizon2020 中发布了 5G-XHaul 项目,在可弹性带宽的时分

复用光网络中利用可动态编程的毫米波收发器和智能控制平面,提出了光纤和无线传输相融合的解决方案。Flex5Gware 项目研究了 10 GHz 光纤收发器子系统与异构网络复杂资源的高灵活、可扩展控制和协调技术。2017 年 6 月 5G-PPP 启动的 5G-PHOS 项目侧重于 5G 集成光与无线融合网络,增强光纤无线 (FiWi) 融合,为高密度用例提供经济高效的 5G 网络解决方案。5G-PPP 发布的 5G-Picture 项目依靠融合的前传和回程解决方案,将无线接入和光网络相结合。而城域传送网 (Metro-Haul) 项目通过光谱高效自适应地将光传输网络相互连接,旨在建立智能光城域网基础设施。COMBA 项目为集成网络定义了一个新的功能框架,统一用户有线和无线的网络接口,推进网络融合。而美国国家标准与技术研究院 (NIST) 在 5G 及未来移动无线通信系统项目中明确提出,需要先进的光学技术和无线电技术通信系统作为支撑,以进一步驱动多制式光与无线融合网络的研究进程。

1.2.3 光与无线融合网络时间同步技术发展动态

近年来,时间同步业务正在以前所未有的速度改变着用户体验与有线无线网络设施。在物联网和自动驾驶等新兴业务的推动下,在 2012 年到 2017 年的时间里,时间同步业务量快速增长。支持大范围的数据速率、格式、协议和用户需求的接入网络十分必要,大覆盖范围、高移动性与超高同步精度成为对时间同步业务的普遍需求,可以在任何时间任何地点提供无线接入,并且具有较小延时与较快的信息传输速率的通用用户接口将会给用户带来巨大便利。因此,光与无线融合技术应运而生。而作为典型代表,光载无线 (Radio over Fiber, RoF) 技术则是针对时间同步业务解决以上问题最有前景的技术之一。目前,该技术的研究已成为有线、无线接入网领域重要的研究方向,产业界对 RoF 技术的推广与商用十分关注。

在美国,佐治亚理工大学提出了两种可以融合到超密集波分复用无源光网络 (Ultra Dense WDM-PON, UDWNM-PON),适用于未来宽带光无线接入网的 RoF 架构,分别是全波段 RoF 架构和带宽映射的 60 GHz RoF 架构。上述这些架构使传统无线服务与毫米波应用整合在一起,并可以在共享的底层设施中并行传输。这些 RoF 架构利用集中式控制方案与信号处理,为下一代多服务异

构网提出了一种成本低、效益高、协议透明的解决方案。在全波段 RoF 网络中,无线服务被保持在起始的载波频段,对于 WiFi、WiMAX 以及 60 GHz 高速毫米波服务的光滤波与大带宽光电子器件的需求,该技术利用子载波复用与双波长外差拍频技术实现。在室内环境下,设计了具有带宽映射的毫米波 RoF 架构,通过在统一的光与大气链路中传输模拟电视信号、WiFi 以及高速数字基带数据。该架构将不同的无线信号映射到 60 GHz 频带上,可以实现更高的光谱效率与更低的能耗。

欧盟的法国巴黎电信研究所在 NOF2011 会议上提出了一个可以连接第四代无线电移动基站的全光馈线网架构(GeRoFAN)。基于控制层,该架构可以通过动态的无线电资源管理,实现宽频段中的大量服务。然而,由于在光层传输无线电信号将产生传输损伤,此宽波段的传输性能可能会受到影响,为此,研究人员强调了损伤感知控制平面的必要性,在保证传输的无线电信号质量的同时,实现了光资源的有效利用。在 ICC2012 会议上,该研究所将上述研究进一步延伸,提出了采用模拟 RoF 技术的低成本 4G 无线系统天线与透明光回路相连接构成的 LTE 天线回程架构。通过对物理层损伤分析,实现单元容量优化。在 ICOND2014 会议上,根据发展现状,该研究所提出了有效提高无线电移动网络容量的方法,彻底减小了每个单元的大小,该方法对于运营商有着巨大的经济效益,RoF 则是非常有前景的途径。针对多样化的链路增长,德国慕尼黑理工大学对模拟 RoF(A-RoF)与数字 RoF(D-RoF)在部署成本、能耗上实现定量比较。

在 ICC2013 会议上,香港理工大学提出并演示了一种基于频谱抖动直接调制(DMFD)LTE-RoF 系统的非线性补偿技术,有效地保证了数据的高吞吐量,并针对受激布里渊散射建立了一种单元延伸技术。另外,它展示了 DMFD 理论上对线性化依赖于频率啁啾的 OLP 域没有任何影响,可以实现 50 km 跨度的有效传输。

在基于单接入点通过不同长度的光纤链路与多个远程天线单元(Ramote Antenna Unites,RAU)相连接的 RoF 分布式天线系统场景中,北京邮电大学国家重点实验室研究并比较了在基础接入模式下的分布式协调功能(DCF)、RTS/CTS 交换模式下的 DCF 以及点协调功能(PCF)等三种机制以及对应 WLAN 的多路访问控制(Multiple Access Control Protocol,MAC)协议,并将

RAU 间隐藏节点问题与光链路长度差异问题纳入考虑,而且证明了 PCF 相对于另外两种机制,尤其在嵌入光纤较短的情况下具有较好的吞吐量性能。

1.2.4 光与无线融合网络生存性技术发展动态

在光与无线融合网络中,首先,为了解决在故障业务恢复过程中的频谱资源不足问题,文献[20]提出了在恢复过程中的恢复方法,这种恢复方法称为频谱带宽挤压方法。它的核心思想是在受损业务没有足够的频谱资源时,利用恢复路径中的可用频谱带宽资源,通过采用不同的调制格式,用较小的频谱宽度来承载受损业务,最大限度地恢复受损业务,从而提高网络的业务恢复率,实现更高的频谱效率和更可靠的光与无线融合网络生存性。为了有效减小网络的阻塞率,提高网络中的频谱效率,文献[21]采用了多路径承载同一个业务需求的方法,研究了可生存性的路由提供方法,仿真结果验证了提出的方法可实现最小的频谱资源消耗。然后,针对频谱资源的共享保护策略,文献[22]研究了可生存性业务流量疏导问题,采用新的频谱资源分配方法,能够有效减小网络的阻塞率,节约网络的频谱资源。为了减小网络阻塞率,提高受损业务成功恢复率,在建立工作路径或保护路径时,需要考虑网络的负载均衡问题。最后,针对光与无线融合网络生存性多目标设计问题,文献[26]研究了多速率的频谱资源优化与最小网络成本之间的均衡问题,提供了可靠的业务保护恢复技术,评估了如何有效选择不同调制格式的频谱信道的频谱效率问题。考虑到光与无线融合网络的生存性问题,文献[27]研究了光与无线融合网络生存性的能效问题,通过提出的启发式算法评估了能量效率。在网络虚拟化生存性映射中,针对物理网络节点的多故障问题,文献[28]研究了虚拟化映射过程中的成本效率问题,提出了两种不同的线性规划模型,实现了最小化的网络成本。

1.3 主要内容安排

光与无线融合网络呈现出功能融合和控制协作的发展趋势,多维资源集成性将成为光与无线融合网络的重要指标。因此,研究多制式光与无线融合网络

多维控制理论与优化技术成为重要方向。实现多维控制面临着四方面的挑战：如何实现光与无线融合网络组网，提升网络的适配性与交换的灵活性；如何实现多维资源优化，提升网络性能；如何保障网络时间同步，创建低延迟的网络环境；如何突破网络生存性的限制，提升网络抗毁能力。这些挑战将成为攻克多制式光与无线融合网络多维控制低效这一科学难题的关键点。

围绕上述科学难题，如图 1-1 所示，本书主要从以下四个方面对光与无线融合网络多维控制技术进行了研究。

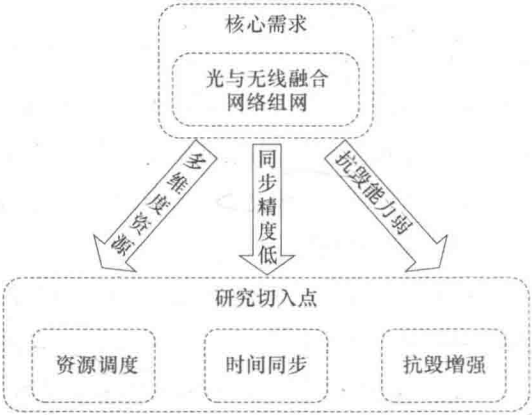


图 1-1 研究内容及构成关系

第一，针对光与无线融合网络组网难的问题，利用灵活的转发器和弹性光交换机来连接 RRH 和 BBU，在全局范围内有效优化射频、光谱和 BBU 处理资源，最大限度地提高无线覆盖范围，并通过垂直整合和水平合并模型满足端到端业务的 QoS 要求。

第二，针对光与无线融合网络资源分配不均衡的问题，设计了光与无线融合网络跨层优化算法、面向异构光与无线融合网络的虚拟化时频资源联合优化方法、基于软件定义的移动光承载网动态流量光层资源分配方案、面向节能的接入网动态带宽优化机制、基于网络功能虚拟化的光与无线融合网络多层资源优化方案，以及面向业务提供的光与无线融合网络多维资源聚合方法等来提升资源分配的有效性和网络的可靠性。

第三，针对光与无线融合网络同步精度较低的问题，分析了光与无线融合网络时间同步模型，构建了面向时间同步的光与无线融合网络架构，提出了基

于软件定义控制器的光与无线融合网络架构时间同步方案,设计了基于深度强化学习的高精度时间同步方法实现机制。

第四,针对光与无线融合网络的生存性问题,研究了面向光与无线融合网络的跨层资源保护策略,提出了一种基于跨层保护的光与无线融合网络架构,通过采用自主创新的带宽压缩保护算法,保证了光与无线融合网络的生存性,降低了网络的阻塞概率,提高了资源利用率。