



信息科学技术专著丛书

光与无线融合网络 资源优化机制与实现技术

张佳玮 谷志群 纪越峰 著

GUANG YU WUXIAN RONGHE WANGLUO
ZIYUAN YOUHUA JIZHI YU SHIXIAN JISHU



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



信息科学技术专著丛书

光与无线融合网络 资源优化机制与实现技术

张佳玮 谷志群 纪越峰 著



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

无线网络和光网络是通信网络中的两个重要分支。一直以来,无线网络与光网络技术的研究与发展相对独立。然而,随着对高速、泛在通信服务需求的与日俱增,单靠一种技术形态难以支撑未来接入网的发展,光与无线的融合成为必然趋势。本书以无线接入网架构的演进为切入点,聚焦多元异构网络环境下的资源优化机制与实现技术,系统地阐述了光与无线网络融合的产生背景、关键挑战、使能技术、核心算法与实现手段。

本书注重选材、科教融合,可供从事光通信及光与无线通信交叉领域方向研究的博士与硕士研究生使用,也可供从事相关工作的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光与无线融合网络资源优化机制与实现技术 / 张佳玮, 谷志群, 纪越峰著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2022. 8

ISBN 978-7-5635-6688-4

I. ①光… II. ①张… ②谷… ③纪… III. ①光纤网—网络信息资源—优化配置—研究②无线网—网络信息资源—优化配置—研究 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 141838 号

策划编辑: 彭 楠 责任编辑: 刘春棠 责任校对: 张会良 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: 唐山玺诚印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 21.25

字 数: 526 千字

版 次: 2022 年 8 月第 1 版

印 次: 2022 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-6688-4

定 价: 96.00 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

随着物联网、虚拟现实等新兴业务的不断涌现,人-机-物交互应用与日俱增,光与无线的高效融合、数据处理与网络传输的边缘协同等新特征与新需求日益凸显,融入核心要素并发挥各自优势的多网融合成为宽带接入网络发展的必然趋势。

本书偏重于从网络层的角度阐述光与无线融合的关键技术,聚焦在多元融合异构网络环境下的资源联合优化机制与实现技术,重点以移动通信中无线接入网架构的技术演进为切入点,分析移动通信在逐代演进过程中,从“无光”到“有光”再到“光与无线融合”的发展过程,系统地阐述光与无线融合网络的关键挑战、使能技术、核心算法与实现手段。

本书共 10 章。第 1 章介绍光与无线融合网络的产生背景以及面临的挑战;第 2 章分别从组网技术、接口技术、控管技术 3 个方面介绍光与无线融合网络多种使能技术的概念及工作原理,为后续章节的内容做铺垫;第 3 章和第 4 章介绍云无线接入网络架构下前传光网络与无线网络资源的联合优化技术,其中第 4 章侧重于前传光网络的时延优化技术;第 5 章介绍基带功能解耦架构下中/回传光网络与无线网络资源联合优化技术;第 6 章介绍光与无线融合网络中的网络切片技术;第 7 章介绍边缘计算下的光与无线融合网络资源优化技术;第 8 章介绍自由空间光网络与无线网络的资源联合优化技术;第 9 章介绍光与无线融合网络的控制与管理技术;第 10 章介绍人工智能技术在光与无线融合网络资源优化决策方面的优势,并对智能光与无线融合网络的技术发展进行了展望。

本书作者来自信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学),其所在项目组的师生多年来在国家 973 计划、重点研发计划、自然科学基金等国家级项目资助下,深入开展了光与无线融合网络的系统研究工作,在光通信顶级会议(OFC/ECOC)与旗舰期刊(JLT/JOCN)上连续发表多篇高水平学术论文。本书的核心内容是对上述研究成果的梳理、凝练与总结,并根据技术的最新趋势给出了未来的发展方向与研究思路。感谢项目组历年来参与相关研究的教师和研究生们的努力与支持。

由于作者水平所限,加之光与无线融合技术涉及面广,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请同行和读者指正。

作 者

2022 年 5 月

目 录

第 1 章 光与无线融合网络概述	1
1.1 无线接入网技术演进	1
1.1.1 分布式无线接入网	1
1.1.2 集中式无线接入网	1
1.1.3 功能解耦无线接入网	2
1.2 光与无线融合网络面临的挑战	3
1.3 光与无线融合网络的研究进展	4
1.3.1 国内外研究进展	4
1.3.2 国内外项目进展	8
本章小结	12
本章参考文献	12
第 2 章 光与无线融合网络使能技术	17
2.1 光与无线融合网络组网技术	17
2.1.1 前传组网技术	17
2.1.2 中/回传组网技术	23
2.2 光与无线融合网络接口技术	27
2.2.1 基带功能分割体系架构	27
2.2.2 前传接口	29
2.2.3 中/回传接口	31
2.3 光与无线融合网络智能控管技术	34
2.3.1 软件定义网络技术	35
2.3.2 网络功能虚拟化技术	36
2.3.3 网络切片技术	38
2.3.4 人工智能赋能技术	39
2.4 边缘计算下的光与无线融合网络	40
本章小结	43
本章参考文献	43

第 3 章 前传光网络与无线资源联合优化技术	45
3.1 移动前传网络的可重构需求	45
3.2 灵活可重构前传光网络组网	46
3.2.1 基于波长可调谐激光器和阵列波导光栅路由器的交换结构	46
3.2.2 AWGR 端口分解及路由信息表	47
3.3 案例一:面向 BBU 节能聚合的前传光网络优化技术	48
3.3.1 潮汐效应下的 BBU 节能聚合	48
3.3.2 BBU 聚合模型——二维装箱问题	49
3.3.3 能耗最小化的整数线性规划模型	51
3.3.4 面向高能效的动态光路调整策略	53
3.3.5 仿真设置及实验结果	55
3.4 案例二:面向无线协同多点传输的前传光网络优化技术	57
3.4.1 Intra-BBU CoMP 和 Inter-BBU CoMP	57
3.4.2 最大化 Intra-BBU CoMP 流量的波长重构示例	58
3.4.3 最大化 Intra-BBU CoMP 流量的波长重构技术	59
3.4.4 仿真设置及实验结果	61
3.5 案例三:面向大规模 MIMO 波束赋形的前传光网络优化技术	62
3.5.1 面向 MIMO 的 TWDM-PON 前传光网络架构	63
3.5.2 MIMO 波束赋形的光与无线资源建模	64
3.5.3 波长、天线、无线资源联合优化技术	65
3.5.4 仿真设置及实验结果	70
本章小结	74
本章参考文献	75
第 4 章 TDM-PON 前传光网络时延优化技术	76
4.1 TDM-PON 前传光网络上行传输时延挑战	76
4.1.1 TDM-PON 前传网络上行时延分析	77
4.1.2 因素一:SR-DBA 过程引起的时延问题	78
4.1.3 因素二:ONU 注册及测距引起的时延问题	80
4.1.4 因素三:无线数据帧发送引起的时延问题	81
4.2 基于光与无线协同的 DBA 技术	82
4.2.1 CO-DBA 原理	82
4.2.2 CO-DBA 中的光与无线信息协同	83
4.2.3 CO-DBA 的时延模型描述	84
4.3 基于分块传输的 TDM-PON 上行传输时延优化方法	86
4.3.1 等长分块传输的时延优化	87
4.3.2 变长分块传输的时延优化	88
4.3.3 时延优化方案的性能分析	93

4.4 面向 mini-slot 的 TWDM-PON 上行传输时延优化方法	98
4.4.1 面向多业务融合的联合 CO-DBA 和 SR-DBA 调度方案	99
4.4.2 mini-slot 场景下联合 CO-SR 调度方案时延问题描述	100
4.4.3 mini-slot 场景下基于波长带宽抢占的 DWBA 方案	102
4.4.4 时延优化方案的性能分析	106
本章小结	115
本章参考文献	115
第 5 章 面向基带功能分割架构的光与无线资源优化技术	117
5.1 基带功能分割架构下的多维资源建模	117
5.1.1 功能分割描述	117
5.1.2 计算资源建模	119
5.1.3 传输带宽建模	119
5.1.4 传送时延建模	119
5.2 灵活分割下的基带功能部署与光网络资源联合优化	122
5.2.1 灵活分割下的多维资源联合优化模型	122
5.2.2 分割粒度与集中式增益的关系	127
5.2.3 灵活分割方案的性能分析	128
5.3 高效 DU-CU 部署与光网络资源联合优化	135
5.3.1 网络架构与能耗模型	135
5.3.2 高效 DU-CU 部署与光路配置策略	137
5.3.3 高效部署与光路配置策略的性能分析	144
本章小结	148
本章参考文献	149
第 6 章 光与无线融合网络中的网络切片技术	152
6.1 网络切片的基本概念	152
6.1.1 网络切片的通用定义	152
6.1.2 端到端网络切片	153
6.1.3 RAN 网络切片	154
6.1.4 核心网网络切片	155
6.2 网络切片中的虚拟化技术	156
6.2.1 网络功能虚拟化	157
6.2.2 传输资源虚拟化	159
6.3 网络切片的全生命周期管理	162
6.3.1 阶段一:网络切片模板与网络切片生成	163
6.3.2 阶段二:网络切片部署与虚拟网络映射	165

6.3.3 阶段三:网络切片动态调整与删除	168
6.4 网络切片中的虚拟网络隔离技术	169
6.4.1 网络功能隔离与传输资源隔离	169
6.4.2 网络切片的隔离等级模型	170
6.4.3 基于隔离感知的网络切片映射技术	171
6.4.4 基于隔离感知的网络切片映射性能分析	177
本章小结	184
本章参考文献	184
第7章 边缘计算下的光与无线融合网络资源优化	185
7.1 光与无线融合接入网数据中心边缘化需求	185
7.2 基于 MEC 的光与无线融合网络关键技术	187
7.2.1 MEC 网络时延优化技术	188
7.2.2 MEC 网络计算资源部署技术	188
7.2.3 多边缘计算中心的协同技术	189
7.3 边缘计算下的光与无线融合网络时延优化技术	191
7.3.1 边缘计算下光与无线融合网络时延模型分析	191
7.3.2 边缘计算下面向低时延的网络部署问题	195
7.3.3 边缘计算下网络时延和部署成本的联合优化模型	196
7.3.4 联合成本最小的集成多关联定位和路由优化技术	198
7.3.5 仿真设置及实验结果	199
7.4 边缘计算下的光与无线融合网络数据中心部署及负载分配技术	202
7.4.1 支持边缘数据中心部署的 5G RAN 架构	202
7.4.2 边缘数据中心分层部署和负载分配问题建模	203
7.4.3 边缘数据中心分层部署和负载分配联合优化技术	205
7.4.4 仿真设置和实验结果	210
7.5 基于 MEC 的光与无线融合网络多数据中心协同技术	213
7.5.1 网络模型	213
7.5.2 相关流模型	214
7.5.3 多相关流调度和光路配置联合优化技术	215
7.5.4 单相关流完成时间优化方法	216
7.5.5 基于时间反馈的相关流光路配置技术	219
7.5.6 仿真设置和实验结果	222
本章小结	226
本章参考文献	227
第8章 自由空间光与无线融合网络资源优化技术	228
8.1 光与无线融合网络空间组网需求	228

8.2 自由空间光通信技术	229
8.2.1 FSO 通信技术的特性	229
8.2.2 FSO 通信系统	231
8.2.3 FSO 信道分析	232
8.2.4 FSO 通信技术的研究现状	235
8.2.5 FSO 通信技术的应用场景	235
8.3 基于 FSO 的空间光与无线融合网络	236
8.3.1 基于 FSO 的移动前/回传中继网络架构	236
8.3.2 挑战一:FSO 链路脆弱性引发的网络拓扑控制及资源优化问题	237
8.3.3 挑战二:网络移动节点部署灵活性引发的网络节点定位及资源优化问题	238
8.4 基于 FSO 的空间光与无线融合网络建模	238
8.4.1 FSO 链路容量模型	238
8.4.2 FSO 链路可靠性模型	239
8.4.3 FSO 网络资源优化模型	240
8.5 基于 FSO 的光与无线融合网络拓扑控制与资源优化技术	241
8.5.1 先验式网络拓扑重置技术	242
8.5.2 反应式网络拓扑重置技术	249
8.6 基于 FSO 的光与无线融合网络节点定位与资源优化技术	254
8.6.1 基于链路负载均衡的网络配置问题建模	254
8.6.2 优化问题的转化和求解	255
8.6.3 基于链路负载均衡的 NFP 节点定位算法	257
8.6.4 仿真设置和结果分析	259
本章小结	260
本章参考文献	261
第 9 章 光与无线融合网络控制平面技术	262
9.1 光与无线融合网络统一控管需求	262
9.1.1 物理层设备白盒、可编程的需求	263
9.1.2 网络层异构资源统一编排的需求	264
9.1.3 服务层业务灵活、可定制的需求	264
9.2 基于软件定义的光与无线融合网络统一控制架构	264
9.3 光与无线融合网络控制平面使能技术	266
9.3.1 物理层设备硬件可编程技术	266
9.3.2 多层间控制协议可扩展技术	268
9.3.3 泛在异构资源统一编排技术	271
9.4 基于软件定义的光与无线融合网络创新实验演示	272
9.4.1 实验一:面向 BBU 聚合的光路调整演示	272



9.4.2 实验二:面向增强型 CoMP 的光波长调度演示	277
本章小结	282
本章参考文献	282
第 10 章 人工智能赋能的光与无线融合网络技术	284
10.1 光与无线融合网络的智能化需求	284
10.1.1 智能预测	285
10.1.2 智能决策	287
10.2 光与无线网络中的智能预测技术	290
10.2.1 案例一:前传网络流量的智能预测与带宽智能调整策略	290
10.2.2 案例二:光路传输质量智能预测技术	296
10.3 光与无线网络中的智能决策技术	303
10.3.1 案例一:DU/CU 智能部署和光路智能配置技术	303
10.3.2 案例二:跨层网络智能路由技术	307
10.4 基于数模协同驱动的网络智能化	314
本章小结	316
本章参考文献	316
缩略词	319

第 1 章

光与无线融合网络概述

1.1 无线接入网技术演进

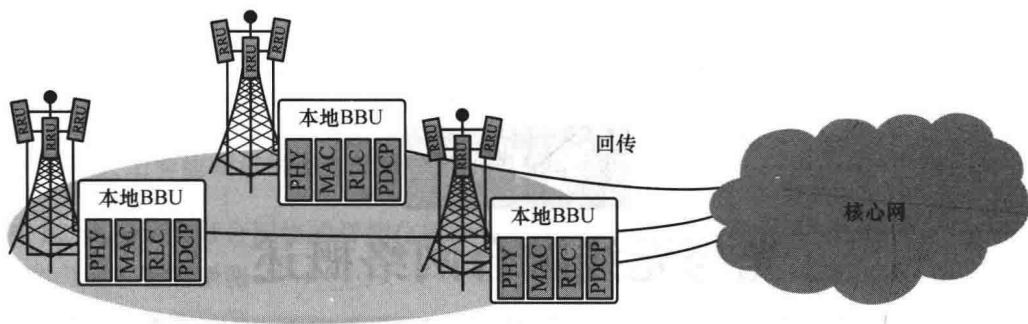
随着用户需求的不断升级,未来移动通信网络将是面向差异化场景、多样化业务而构建的高性能网络,需在数据速率、传送时延、流量密度、连接数量以及能耗效益等方面进一步提升网络性能。RAN(Radio Access Network,无线接入网)作为万物互联的最前端,在移动通信发展过程中扮演着至关重要的角色,发挥着关键的基础性支撑作用。随着通信技术的迭代升级,以及接入侧需求的不断提升,移动接入网架构经历了从 D-RAN(Distributed Radio Access Network,分布式无线接入网)到 C-RAN(Centralized Radio Access Network,集中式无线接入网),再到 Disaggregated RAN(功能解耦无线接入网)3 个发展阶段。

1.1.1 分布式无线接入网

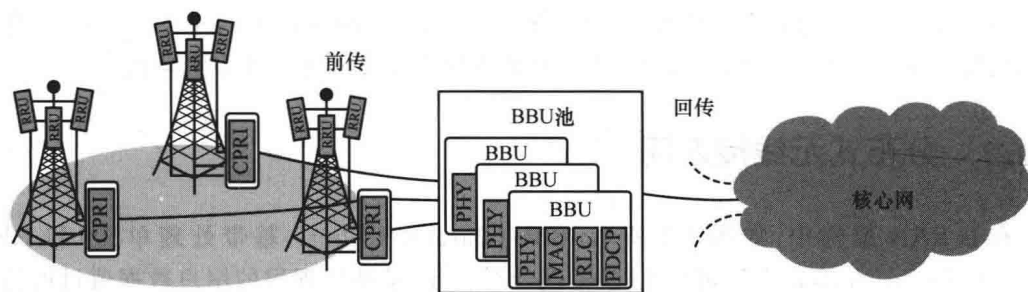
在 D-RAN 架构中,如图 1-1 所示,BBU(Baseband Unit,基带处理单元)和 RRU(Remote Radio Unit,远端射频单元)紧密耦合在一起,基站处理后的用户数据通过回传网络传输至核心网。在基站内部,天线与射频单元间通过短距离馈线实现连接。该架构在 3G 及 4G 时代被广泛应用。D-RAN 架构的优势在于:系统实现及组网部署简单,且各基站配备专用处理器,可独享处理资源,处理速度较快。但该架构也存在一定局限性:每个基站都需要独立的机房、冷却系统、监控系统、供电系统等,因此单基站的部署成本及能耗较高。此外,因地理位置不同,各基站用户流量的波动规律不尽相同,但处于闲时状态的基站的处理资源无法共享给其他站点,使得 D-RAN 资源效率较低。

1.1.2 集中式无线接入网

随着网络演进与技术发展,为克服 D-RAN 中存在的弊端,降低网络运维成本,C-RAN 架构应运而生。如图 1-2 所示,在 C-RAN 架构中,BBU 被从传统基站中剥离出来,多个基站的 BBU 被集中在一起形成 BBU 池。分布式部署的 RRU 与 BBU 之间通过前传光网络



进行互联。该架构在 4G+ 时代及 5G 初期被广泛应用。C-RAN 架构的优势在于：简化了基站结构，大大降低了单站能耗与成本；将 BBU 集中池化显著提升了基带处理资源的统计复用增益；适用于 CoMP (Coordinated Multiple Points, 协同多点) 技术，可减少干扰、提高频谱效率。在 C-RAN 中，RRU 处理后生成的 I/Q 抽样信号被封装成 CPRI (Common Public Radio Interface, 通用公共无线接口) 帧，CPRI 采用与负载无关的固定接口速率，其大小仅与基站天线数、无线频谱宽度成正相关。C-RAN 架构的劣势在于：前传网络面临着严峻的带宽压力，且带宽需求随着天线规模以及无线频谱的不断拓宽而增加。此外，BBU 中的时延敏感型功能〔如 HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request, 混合自动重传请求) 等〕被部署在远端处理池中，难以满足 5G 的超低时延需求。综上所述，C-RAN 架构存在严重的带宽与时延短板。



1.1.3 功能解耦无线接入网

为缓解 C-RAN 的带宽及时延压力，增强网络的灵活性、可扩展性与快速部署能力，同时满足 5G/B5G 业务的差异化、高性能承载需求，基于功能解耦的无线接入网被提出。如图 1-3 所示，Disaggregated RAN 将 BBU 功能通过软件形式进行解耦，并重新划分为 DU (Distributed Unit, 分布式单元) 与 CU (Central Unit, 集中式单元) 两个逻辑实体，其中 Low-PHY (Low Physical, 低物理层) 功能被放回至基站侧，形成新的 RU。时延敏感型 BBU 功能划归至 DU 中，而非时延敏感型 BBU 功能划归至 CU 中。前传网络承载了 RU 和 DU 间的数据传输，中传网络承载了 DU 和 CU 间的数据传输，回传网络承载了 CU 和

CU间及CU和核心网间的数据传输。Disaggregated RAN架构的优势在于:延续了C-RAN中的基带处理资源复用及站点协同能力。通过功能解耦与分割,一方面可缓解前传带宽压力,另一方面可减少前传时延(即将DU靠近用户侧部署);DU-CU的分离与按需部署可满足多元业务的差异化承载需求,有助于实现网络切片与云化,是5G和6G RAN的主要架构。Disaggregated RAN架构的劣势在于:由于Low-PHY功能被推回至基站侧,单站的系统复杂度与部署成本提升。BBU功能的分割与多级部署增加了网络管控与资源调配的难度。

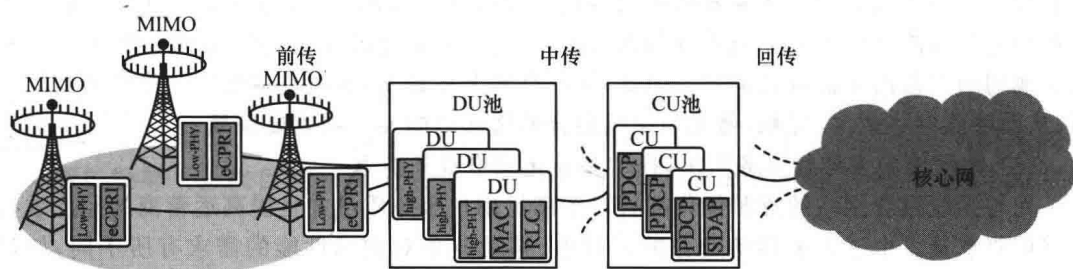


图 1-3 Disaggregated RAN 架构示意图

1.2 光与无线融合网络面临的挑战

无线接入网的发展趋势迫使网络资源由单一性向多元化方向发展,具体表现为3种异构资源的共存:无线网络资源、光网络资源以及基带处理资源。这3类资源相互独立又相互依存。光网络作为无线信号的载体担负着从RU到DU再到CU(在C-RAN中为从RRU到BBU)的传输任务,其带宽的大小、传送时延等都影响整个移动网络的性能。同时,DU/CU是整个数据流的终点,其数据处理能力和资源调度能力直接影响移动通信网络的服务质量。在光与无线融合组网下,多种资源形式与网络技术相互交织在一起,加剧了不同网络之间资源管理与调配的实现难度,突显出多维异构网络环境下资源利用低效的问题。如何协调无线、光以及基带处理资源,使网络整体性能达到最优化,是光与无线融合网络研究工作面临的主要难题,其具体表现为以下3个方面的挑战。

(1) 如何实现无线与光传输资源间的高效协同

随着网络技术的发展,RAN呈现出多元异构资源共存的形式,无线传输〔天线、RB(Resource Block,资源块)等资源〕与光传输(波长)资源两者既相互独立又相互依存。然而,上述资源之间的物理属性存在差别,从而造成两种资源适配时效率较低,进而影响网络容量与服务性能。在传统网络中,光与无线网络管控各自独立,各维资源调度模式僵化,造成了无线与光资源的整体利用率严重低下。DU-CU侧云化的发展进一步加剧了资源统一调配的实现难度。此外,随着先进无线接入技术的引入,如波束赋形、协同多点、载波聚合等,无线元素间的协同能力持续加强,进而要求各无线单元与光设备间实现逻辑上的灵活映射,同时强化无线与光资源之间弹性适配的能力。因此,如何打破异构资源之间的物理约束、联合调度多维资源,实现无线接入与光传送之间的高效协同,是光与无线融合网络面临的一项重要挑战。

(2) 如何协调基带功能部署成本与光网络资源效率的矛盾关系

无线接入网络中存在基带处理集中化与光传输带宽优化这一对矛盾,集中化处理会导致光传输带宽需求急剧增加(C-RAN 模式),而边缘化的处理又会导致需要建设/启用过多机房,因而该矛盾严重制约了网络成本/能耗效益的提升,已成为运营商的一大痛点。大带宽、低时延以及密连接等业务的持续涌入使得传统“一刀切”的网络承载模式不再适用,而差异化的承载又将导致基带处理与光网络资源联合调度的难度进一步加大。此外,基带功能部署与光网络策略的建立还需兼顾协同多点等无线接入技术的需求,尽量保证处于协作中站点的基带功能部署于同一或邻近的物理池,从而一方面保证无线侧的处理性能,另一方面减少池间的东西向传输带宽消耗。因此,如何克服上述难点,解决基带处理与光传送间的矛盾,从而降低网络成本/能耗,是光与无线融合网络面临的又一项重要挑战。

(3) 如何面向多样性业务需求,提供差异化网络服务能力

光与无线融合网络的资源优化部署对于满足用户服务质量并且提高运营商的经济效益具有重要意义。由于未来移动业务的多样性,移动业务对网络性能的需求有所不同,如带宽、计算、时延、安全性等方面的不同需求,使得业务驱动下的网络资源部署成为光与无线融合网络建设过程中的关键挑战。一方面,网络中需要进行带宽与处理等资源的分配以满足业务对资源的差异化需求;另一方面,出于成本的考虑,网络资源需高效分配以降低网络运营成本。实际上,业务的服务质量与网络建设成本存在权衡问题,如果业务的服务需求严格,如时延敏感型业务,网络将付出更高的成本来提供服务。如何根据业务的需求对异构资源进行按需分配,在满足业务各项性能需求的同时,最优化资源部署的成本成为网络建设与运营中的关键问题。

1.3 光与无线融合网络的研究进展

1.3.1 国内外研究进展

针对光与无线融合网络资源优化技术,国内外开展的研究工作主要集中在以下 6 个方面:移动前传组网模型与接口方面、光与无线网络资源优化方面、基于 PON(Passive Optical Network,无源光网络)的前传光网络时延调控方面、边缘计算下的光与无线融合网络资源协同优化方面、光与无线融合网络控制平面方面以及人工智能赋能的光与无线融合网络方面。下面将从国内外研究进展分析光与无线融合网络的发展现状。

1. 移动前传组网模型与接口技术

西班牙马德里卡洛斯三世大学列举了大规模蜂窝部署带来移动承载能力急剧增加的情况下构建移动前/回传网络的潜在技术^[1]。文章认为基于时分或波分复用的无源光网络技术是未来移动前传网络的趋势,并提出了 OADM(Optical Add-Drop Multiplexer,光分插复用器)技术将在回传网中发挥关键作用,其不仅提供大容量和低延迟的连接,而且可以增强基站间的协作。此外,前传接口将持续演进以支持大带宽需求,并将适配具有高成本效益的 TDM-PON(Time Division Multiplexing Passive Optical Network,时分复用无源光网络)技

术。中国移动通信研究院等单位介绍了传统 CPRI 规范的概念、设计、接口和在现实的 LTE (Long Term Evolution, 长期演进) 方案中前传网络的使用情况^[2], 并介绍了 CPRI 基于时分复用技术, 其特性表现为固定带宽、恒定速率, 支持多种拓扑结构, 要求严格的时间同步与校准。NTT 实验室指出对于当前的前传接口, CPRI 已经成为 C-RAN 大规模部署的关键障碍, 并提出了 NGFI (Next Generation Fronthaul Interface, 下一代前传接口) 的相关内容、设计原则、应用场景以及潜在解决方案^[3]。相比于 CPRI, NGFI 基于基站功能分割的架构, 接口速率灵活可变, 并且根据用户流量进行统计复用, 适用于未来移动前传网络的超大规模带宽需求。此外, CPRI 标准组织方面同样在着手推出新的接口规范 eCPRI (enhanced Common Public Radio Interface, 增强型通用公共无线接口), 该规范在基站设计方面所具有的优点体现为: 新的分割点使所需带宽减少为原来的 1/10、所需带宽可以根据用户平面流量灵活扩展等^[4]。就目前的情况来看, 前传网接口速率的灵活可变是未来 RAN 的发展趋势。

2. 光与无线网络资源优化技术

在光与无线资源适配方面, NTT 实验室研究了不同功能分割点下的移动前传带宽需求与 CoMP 性能, 实验表明 split-PHY 分割方式在获得与 C-RAN 架构相近的 CoMP 性能的同时, 减少了近 90% 的带宽需求量^[5]。上海交通大学针对 TWDM-PON (Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network, 时分和波分复用的无源光网络) 传送网络, 提出了基于强化学习的光与无线资源联合分配策略, 实现了对前传链路资源与无线接口上行资源 (RB) 的高效分配^[6]。作者所在课题组提出了一种可重构的前传组网模式, 并解决无线协同多点传输技术中 BBU 间东西向流量过大的问题^[7]。加州大学戴维斯分校提出了一种弹性的射频-光组网架构以支持 5G 毫米波通信, 该架构能够获得优性的能耗效率与吞吐量^[8]。在此基础上, 作者所在课题组研究了基于 TWDM-PON 前传的波长、天线及 RB 联合分配问题, 并提出了针对该问题的 ILP (Integer Linear Programming, 整数线性规划) 模型与 3 种启发式算法, 旨在最小化前传带宽需求、最大化各天线中 RB 资源的利用效率^[9]。

在基带功能部署与光路配置方面, 米兰理工大学研究了 C-RAN 架构下的 BBU 部署优化问题^[10], 主要包括: ①对 C-RAN 架构下的不同 BBU 部署方案进行分类; ②提出了一种基于 WDM (Wavelength Division Multiplexing, 波分复用) 网络的 BBU 部署方案, 从而最小化网络成本, 同时提出了该方案的 ILP 模型; ③研究了所提方案在 BBU 与电域交换器联合部署场景中的网络优化问题; ④评估了 OTN (Optical Transport Network, 光传送网) 与 Overlay 两种前传传输方式对于 BBU 部署的不同影响。加州大学戴维斯分校针对 TWDM-PON 传送网络, 提出了一种 CF-RAN (Hybrid Cloud-Fog RAN, 混合的云-雾无线接入网) 架构, 将计算能力部署至 ONU (Optical Network Unit, 光网络单元) 节点, 实现对前传/云流量的快速处理, 设计了相应的 ILP 模型与基于图论的启发式算法, 以决策何时激活边缘计算节点及如何分配光波长资源^[11]。加州大学圣克鲁兹分校针对 DU-CU 部署问题提出了一个混合整数二次规划模型, 以最小化 DU-CU 处理池及光链路的部署成本^[12]。EURECOM 研究中心聚焦切片使能的无线接入网中的 DU-CU 部署问题^[13]。作者所在课题组研究了 WDM 城域光网络中的 DU-CU 部署问题, 通过构建 ILP 模型, 旨在最小化网络中各层处理池数量及网络前/中/回传带宽消耗^[14]。马尔凯理工大学将基带功能分割与部署抽象为虚

拟网络映射问题,并通过所建立的 ILP 模型,灵活地选择功能分割点,实现基站间干扰的最小化以及前传带宽效率的最大化^[15]。为解决高动态流量场景下的高 RAN 集中化增益与低业务阻塞率问题,米兰理工大学提出了时延感知的动态 CU 部署算法,旨在最小化 CU 开启数量^[16]。加泰罗尼亚理工大学探讨了 BBU 物理层不同分割点下的数据速率与运维成本,并通过灵活选择分割点来最小化网络成本,同时最大化集中处理增益^[17]。布里斯托大学立足于光与无线融合下的 5G 网络架构,将网络中的基带功能进行虚拟化处理,并部署于多个中心机房的 SPP(Specific Purpose Processor, 专用服务器)或 GPP(General Purpose Processor, 通用服务器)中^[18],提出了区别于 D-RAN 与 C-RAN 的新型非聚合接入网结构,即可采取 PHY 层任意功能分割方式,在此基础上对比讨论了 3 种移动接入网架构的计算资源与光传输成本问题。

3. 基于 PON 的前传光网络时延调控技术

无源光网络是未来前传网络中的潜在方案之一,针对 CPRI 帧在 PON 中的成帧与时延优化方面,加州大学戴维斯分校研究了 CPRI over Ethernet 封装方案是否能够满足移动前传网络中延迟和抖动要求的问题,实验结果表明使用固定以太网帧大小的 CPRI over Ethernet 封装可使抖动减少 $1 \mu\text{s}$ ^[19]。柏林工业大学提出了能够用于形成 NG-PON(Next-Generation Passive Optical Network, 下一代无源光网络)的子网容量和分组延迟的综合概率分析,分析结果准确地表征了 EPON(Ethernet Passive Optical Network, 以太网无源光网络) / GPON(Gigabit-Capable Passive Optical Network, 吉比特无源光网络)树形拓扑的吞吐量和延迟性能^[20]。EURECOM 研究中心研究了分组和功能分割对代表性场景的前传网络性能的影响,实验结果表明分组化开销和延迟之间的作用关系能够改变前传网络的性能^[21]。NTT 实验室分析了 RRU 数量对 TDM-PON 移动前传网络的影响^[22],分析结果表明 TDM-PON 能够将延迟降低到小于 $100 \mu\text{s}$ 。NTT 实验室提出了一种基于移动调度信息 Mobile-DBA(Dynamic Bandwidth Assignment, 动态带宽分配)的 TDM-PON 移动前传网络方案,实验结果表明该方案的测量时延是传统方案的 $1/20$ ^[23]。图卢兹联邦大学提出了一种基于排队论的时延分析数学模型,分析结果表明 TDM-PON 上多条 CPRI 链路通过数据块分割的方法可以满足 $250 \mu\text{s}$ 的时延要求^[24]。诺基亚-贝尔实验室分析了基于以太网的前传网络时延抖动问题,提出了利用端到端的时延控制协议减少抖动,实验结果表明该方案可以满足多种架构下的时延需求^[25]。目前,对于时延的研究主要是基于 CPRI 体系,但是在功能分割的背景下,构建一种低成本且高效率的前传网络势必成为下一阶段的研究趋势。

4. 边缘计算下的光与无线融合网络资源协同优化技术

面向 5G 新业务的需求,国内外对分布式边缘计算光网络展开了大量的研究。针对光频谱资源优化方面,CNIT 实验室在固定网格 WDM 的数据中心互连网络中,提出了一种基于时延约束的路径选择和分配方案^[26]。然而,具有固定波长网格的 WDM 网络在光网络的带宽配置中仅提供有限的可伸缩性和灵活性,无法适应边缘数据中心间网络流量的不稳定性和异构性。因此,为了改善固定网格 WDM 网络中存在的不足,EON(Elastic Optical Network, 弹性光网络)作为一种可以根据边缘数据中心间实际流量自适应的建立光路,并且可以在光路上以更细粒度分配带宽的技术被应用于数据中心间。北京邮电大学在数据中

心互联弹性光网络研究中提出了联合考虑频域和时域的静态路由和频谱分配优化算法,在有效时间复杂度内提高了数据中心间数据传输的频谱利用率^[27]。美国富士通实验室针对无缝连接的服务,提出了通过调节服务请求迁移顺序,优化网络资源的优化算法,提高了网络资源利用率,降低了无缝连接服务的终端率^[28]。针对数据接入量优化方面,中国科学技术大学在数据中心互联弹性光网络中针对频谱资源和计算资源的联合碎片重组问题,提出了联合考虑多维资源的复杂度可控的网络重配方案,不仅改变了光路的路由和频谱资源,还改变了数据中心内的计算资源^[29]。中国科学技术大学提出了通过联合考虑光频谱资源和计算资源进行有效的虚拟网络功能服务链配置的优化算法,从而减少频谱资源的消耗,降低数据传输的阻塞率^[30]。针对时延优化方面,南洋理工大学在跨异地数据中心环境下针对一个任务(一个任务之中包含多个相关联的子任务)提出了优化目标数据中心选取算法,通过确定最优任务处理的目标数据中心,最小化任务数据在网络中的传送算法,从而减少了单个任务的完成时间^[31]。但是在一般情况下,网络中有多个任务共存。因此,南加州大学提出了根据任务在数据中心内的处理时间安排任务在数据中心内处理顺序的优化算法,实现最小化任务完成时间的任务调度算法^[32]。香港科技大学提出了在跨异地分布的多数据中心网络内,通过优化任务处理的位置,将任务分配到最优的数据中心内,从而实现多个任务的平均完成时间最小^[33]。中国科学技术大学提出了通过联合考虑数据计算和处理的目标数据中心位置和路径的优化算法,降低用户请求的响应时间^[34]。

5. 光与无线融合网络控制平面技术

在移动光接入网络统一承载与智能化管控技术方面,美国 NEC 实验室提出了一种基于 SDN(Software Defined Network,软件定义网络)控制的光拓扑可重构的移动前传架构,用来支持 CoMP 与低时延的设备间通信,实验证明该架构能够实现每个小区 10 Gbit/s 的峰值速率以及小于 $7 \mu\text{s}$ 的背对背传送时延^[35]。作者所在课题组为了提高网络智能性,提出了一种基于软件定义的集中控制平面,以协调由 BBU 资源、无线资源和光资源组成的多层异构网络环境^[36]。瑞典皇家理工学院描述了在 5G 网络场景分层的软件定义架构中,控制器和编排器之间不同的资源抽象模型将对系统性能产生不同影响,提出了两种智能控管技术^[37]。意大利佛罗伦萨大学提出了一种人工智能的网络决策结构,其中包含两个相互关联的能够交互的决策内核^[38],一个负责感知物理层信息,另一个执行对网络资源的控制,该架构旨在对回传网络与用户小区中的流量分布进行联合优化,尽可能地满足所有用户对数据速率的实际需求,并通过控制蜂窝开启数量最大限度地减少网络能耗。

6. 人工智能赋能的光与无线融合网络技术

利用人工智能算法(如监督学习、非监督学习和强化学习等)解决光传送网的关键性问题(如业务需求预测、资源智能优化分配等)将成为光与无线融合网络的研究热点。

无线接入光网络流量较骨干网波动性更大,突发性更强,因此对该网络下的流量预测关系到如何进行有效的资源部署。针对智能化光网络流量预测方面,米兰理工大学基于机器学习对城域网的流量状况进行了预测,并基于启发式算法对系统资源进行了离线调度和规划,最终实现了在线的合理路由决策^[39],结果表明此种方法能有效合理地进行路由重构。都柏林三一学院在移动前传网络研究中提出了基于深度神经网络对用户流量进行预测的方法,