

# 光无线融合网络虚拟化机制研究

## 摘要

随着移动互联网的快速发展，特别是全球各种商业机构将云架构平台等相关产业置于业务重心，各种针对企业和消费者的业务呈现出空前的多样性和灵活性。宽带化、数字化和综合化的业务需求，使得用户对高带宽、高质量、高灵活性的接入需求日趋强烈。而光接入和无线接入由于互补的特性使得“光无线融合”成为最高效的接入方式，“光与无线融合”旨在接入在大宽带的基础上注重灵活性的实现。

网络虚拟化，即通过多个虚拟网在同一物理网络上共存，将物理设施提供与服务提供分隔开来，即某些厂商专门负责提供物理设备，而某些厂商专门负责提供网络资源服务。虚拟网络设施包括虚拟节点和虚拟链路，是由物理网络基础设施抽象而来，在逻辑上相对独立，不受物理设施的约束，屏蔽了下层物理设施的异构性。通过网络虚拟化，光与无线融合接入网可以实现跨层融合。跨层融合可以提高组网的灵活性和移动性，具有大容量、高可靠、低时延的特性，在资源和服务方面满足对接入网的要求。

针对以上问题和思路，本论文总结了光无线融合组网的关键技术，在现有光与无线融合组网架构和网络资源优化相关研究的基础上，提出了基于光无线融合组网虚拟化模型下的动态全局资源优化算法，及相关的实验验证和仿真。针对上述研究背景，本文的工作具体可以分成以下三个方面：

### （1）光无线融合组网方案及虚拟化机制研究

对光无线融合组网的相关技术展开分析和调研。围绕光无线融合组网技术和虚拟化模型两大方面展开论述，详细介绍了光与无线融合组网的网络规划、技术原理、系统设计及特性的调研情况，基于光无线网络异构性的技术瓶颈，引入了网络虚拟化技术，并论述了目前光无线融合组网的虚拟化模型。

### （2）网络资源优化的可靠算法

传统的资源优化算法通常从调整网络资源和应用资源权重出发进行优化，

本文在此基础上提出基于光无线融合组网架构的动态全局资源优化算法。

### (3) 业务场景仿真与验证

搭建不同业务请求场景的仿真环境，对所提出的动态全局资源优化算法进行验证。

**关键词：**光无线融合 网络虚拟化 软件定义网络 C-RAN C-ROFN 跨层优化

# RESEARCH ON THE NETWORK VIRTUALIZATION FOR OPTICAL-WIRELESS ACCESS NETWORK

## ABSTRACT

With the rapid development of mobile Internet, the global business organizations focus on the cloud architecture platform and other related industries. A variety of businesses for enterprises and consumers present unprecedented diversity and flexibility. The broadband, digital and integrated business demand makes the needs of access gradually increase. Due to the complementary characteristics of optical access and wireless access, the optical-wireless access has become the most efficient way of access. Optical-wireless access aims to achieve large broadband based on the flexibility.

Network virtualization, that is multiple virtual networks coexist in the same physical network, which can separate the physical facilities and service. In other words, some manufacturers are responsible for providing physical equipment and some manufacturers are responsible for providing network resources services. Virtual network facilities, including virtual nodes and virtual links, are abstracted by physical network infrastructures. It is independent in logic and not subject to physical facilities, which can shield the heterogeneity of underlying physical facilities. With network virtualization, optical and wireless access network convergences cross multiple layers. This convergence will make access network support flexibility and mobility in physical layer with low latency, high capacity and reliability. It will meet the requirement of resources and service in future network.

In view of the above problems and ideas, this paper summarizes the key technologies of optical-wireless convergence network. Based on the research on the existing optical-wireless convergence network architecture and network resource optimization, this paper proposes a Dynamic Global Resource Optimization (DGRO) Algorithm under the model of optical-wireless convergence, and conducts the related test and simulation. Based on the above research background, the work of this paper can be divided into the following three aspects:

(1) Research on Optical-wireless Convergence Network Scheme and Virtualization Mechanism

Analysis and research on the related technology of optical-wireless convergence network. This paper introduces the network planning, technical principle, system design and characteristics of optical-wireless convergence network. Because of the heterogeneity of optical-wireless network, we introduce the network virtualization technology and discuss the current optical-wireless networking virtual model.

(2) A reliable Algorithm for Network Resource Optimization

The traditional resource optimization algorithm is usually optimized by the adjustment the weights between network resource and application resource. But in this paper, we propose a dynamic global resource optimization algorithm based on optical-wireless convergence network architecture.

(3) Business scene simulation and verification

Set up the simulation environment of different business request scenarios, and verify the proposed dynamic global resource optimization algorithm.

**KEY WORDS:** Optical-wireless Convergence Network Virtualization SDN C-RAN C-ROFN Cross Stratum Optimization

# 目录

摘要	I
ABSTRACT	III
目录	1
第一章 绪论	3
1.1 引言	3
1.2 课题研究背景及意义	3
1.2.1 传统无线组网与光纤组网	3
1.2.2 网络虚拟化技术与资源优化	4
1.3 本文主要工作	5
1.4 文章结构	5
第二章 光与无线融合接入网的相关研究	7
2.1 C-RAN 网络架构及原理	7
2.1.1 传统无线网接入弊病	7
2.1.2 C-RAN 网络架构	7
2.1.3 C-RAN 技术特征	9
2.2 光载无线电 (ROF) 技术	9
2.2.1 ROF 技术原理	9
2.2.2 ROF 的特点及应用	11
2.3 网络虚拟化技术	12
2.3.1 网络虚拟化简介	12
2.3.2 网络虚拟化的分层模型	14
2.3.3 软件定义光网络 (SDON) 技术	16
2.3.4 C-ROFN	17
2.4 本章小结	17
第三章 光与无线融合组网方案与资源优化算法	19
3.1 组网方案	19
3.3.1 物理模型	20
3.3.2 网络虚拟化	21
3.2 资源优化算法	23
3.2.1 RBS、NBS、ABS	23
3.2.2 SGLB 静态全局负载均衡策略	24
3.3 本章小结	25
第四章 动态全局资源优化	26
4.1 动态全局资源优化算法	26
4.1.1 网络模型	26
4.1.2 策略描述	26
4.2 动态全局资源优化算法仿真分析	27
4.3 本章小结	27
第五章 总结与展望	28
5.1 论文工作总结	28

5.2 未来研究规划与展望.....	28
参考文献.....	28

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

思科公布的全球年度云指数报告（2015-2020）指出<sup>[1]</sup>，到 2020 年，全球移动数据总流量将从 2015 年的 3.9ZB 达到 14.1ZB（ZettaByte，1ZB=2<sup>70</sup>B），累积增长 3.7 倍。移动互联网的快速发展，特别是全球各种商业机构将云架构平台等相关产业置于业务重心，各种针对企业和消费者的业务呈现出空前的多样性和灵活性。宽带化、数字化和综合化的业务需求，使得用户对高带宽、高质量、高灵活性的接入需求日趋强烈。

作为重要的网络基础设施<sup>[2]</sup>，接入网（Access Network）所面对的问题是集中的数据传输和服务质量保障。光接入和无线接入由于互补的特性使得“光无线融合”<sup>[3]</sup>成为最高效的接入方式。

“光与无线融合”将光接入与无线接入的优势集成到了一起，光纤接入<sup>[4]</sup>具有高带宽、低误码率的优势，但传输路径固定，灵活性差；无线接入<sup>[5]</sup>相反，即可以为用户提供高度灵活、大面积覆盖的接入，但由于无线的物理特性，导致无线接入的传输速率和传输带宽较低，并且信道衰减严重。光与无线融合旨在接入在大带宽的基础上注重灵活性的实现。

## 1.2 课题研究背景及意义

### 1.2.1 传统无线组网与光纤组网

当前，光纤接入系统主要采用无源光网络（PON，Passive Optical Network）技术。PON 采用无源光节点（Passive Optical Node），带宽巨大，传输特性优良，成本低，易于扩展，便于维护。几乎所有的 PON 系统都支持多业务传输，对于未来向全光 IP 网络<sup>[6]</sup>的发展是必然的抉择。根据 2015 年 Point Topic 的发布报告<sup>[7]</sup>，在不同类型有线接入技术当中，全球范围增长最为显著的是光纤接入技术。应用于商业领域的无源光网络解决方案基于时分多址（TDM-PON），包括基于 IEEE（美国电气和电子工程师协会）标准的吉比特无源光网络（GPON，Gigabit

Passive Optical Network）和以太无源光网络（EPON，Ethernet Passive Optical Network）、10G-EPON（10Gbps EPON）。从 2016 年三大运营商的 PON 设备的集中采购可以看出，集采规模进一步扩大，10G-PON 正在成为主流的市场趋势。

无线接入使全部信道采用无线电波作为信息传输载体，用户终端摆脱了线缆的束缚，实现灵活便捷的接入。无线接入技术广泛应用于家庭组网、企业组网、物联网以及“智慧城市和无线的建设”中。无线局域网（WLAN）、全球微波互联接入（WIMAX）等无线技术在全球范围得到广泛应用，其标准分别在 IEEE 802.11a/b/g/n 和 IEEE 802.16 中定义。最新的 802.11n 标准中使用正交频分复用（OFDM，Orthogonal Frequency Division Multiplexing）和多输入多输出（MIMO，Multiple-Input Multiple-output）技术，可以提供最大 600Mbps 的传输速率。而下一代的超高吞吐无线局域网（VHTWLAN，Very High Throughput WLAN）最大传输速率可达 1Gbps<sup>[8]</sup>。

随着 5G 技术的兴起，C-RAN（Cloud Radio Access Network）正成为适应高性能服务的理想方案，其优势在于无处不在的用户覆盖和基于云 BBU（Base band Unit）的实时云计算。而 ROF（Radio Over Optical Fiber）相较于传统的无线接入，具有明显的带宽大、损耗低、传输距离长的优势，这为未来无线接入技术提供了一种可选择的无线接入方案。

### 1.2.2 网络虚拟化技术与资源优化

网络虚拟化，即通过多个虚拟网在同一物理网络上共存，将物理设施提供与服务提供分隔开来，即某些厂商专门负责提供物理设备，某些厂商专门负责提供网络资源服务。虚拟网络设施包括虚拟节点和虚拟链路，是由物理网络基础设施抽象而来，在逻辑上相对独立，不受物理设施的约束，屏蔽了下层物理设施的异构性。虚拟网络层中的资源子层是与物理网络资源相对应的，但不同的是，相同属性的虚拟网络资源可能由多种物理资源通过多种方式提供。

由于虚拟网络层是对底层网络的统一资源分片，对底层网络实现更细粒度的分割，为上层网络的组建提供了灵活的组网方式。同时，网络虚拟化的研究也面临诸多迫切需要解决的问题，网络资源分配与优化即是其中之一。虚拟网映射是依据服务提供商所发起的组网请求，按照虚拟网的节点数目、处理能力、



链路带宽及拓扑信息，将虚拟网映射到适配的物理基础设施之上。而如何能够在多个虚拟网之间，进行资源分配以及物理资源调度，实现物理资源利用率的最大化，是网络虚拟化的一个重要研究方向<sup>[8]</sup>。

### 1.3 本文主要工作

本文总结了光无线融合组网的关键技术，在现有光与无线融合组网架构和网络资源优化相关研究的基础上，提出了基于光无线融合组网虚拟化模型下的动态全局资源优化算法，及相关的实验验证和仿真。针对上述研究背景，本文的工作具体可以分成以下三个方面：

#### （1）光无线融合组网方案及虚拟化机制研究

对光无线融合组网的相关技术展开分析和调研。围绕光无线融合组网技术和虚拟化模型两大方面展开论述，详细介绍了光与无线融合组网的网络规划、技术原理、系统设计及特性的调研情况，基于光无线网络异构性的技术瓶颈，引入了网络虚拟化技术，并论述了目前光无线融合组网的虚拟化模型。

#### （2）网络资源优化的可靠算法

传统的资源优化算法通常从调整网络资源和应用资源权重出发进行优化，本文在此基础上提出基于光无线融合组网架构的动态全局资源优化算法。

#### （3）业务场景仿真与验证

搭建不同业务请求场景的仿真环境，对所提出的动态全局资源优化算法进行验证。

### 1.4 文章结构

针对上述工作，本文的结构安排如下：

第一章，对本课题的研究背景进行论述，阐述在 5G 时代到来之际，光无线融合组网方案相较于传统无线组网和光网络，融合了二者的优势，可以满足用户复杂灵活的接入需求。网络虚拟化可以有效改善光无线融合组网的异构性，而资源优化算法可以提升业务响应能力，提高资源利用率。

第二章对光无线融合组网的相关技术展开分析和调研。这一章围绕光无线融合组网技术和虚拟化模型两大方面展开论述，详细介绍了光与无线融合组网

的网络规划、技术原理、系统设计及特性的调研情况，并基于光无线网络异构性的技术瓶颈，引入了网络虚拟化技术，并论述了目前光无线融合组网的虚拟化模型。作为创新型组网方案，光无线融合接入网是实现接入高带宽、高灵活性的可行方案。

第三章，提出光无线融合组网架构并论述资源优化算法。首先论述组网架构的物理结构，从数据中心应用资源和网络资源的协同处理出发，介绍传统的资源优化算法。

第四章，在第三章基础上提出光无线融合组网架构基础上的动态全局资源优化算法，统筹数据中心应用资源和传送网网络资源，提高资源利用率和服务质量。同时搭建不同业务请求场景的仿真环境，对所提出的动态全局资源优化算法进行验证。

第五章,对全文进行了总结,并提出了对未来的展望和未来的研究目标。

## 第二章 光与无线融合接入网的相关研究

### 2.1 C-RAN 网络架构及原理

随着新兴移动互联网络所带来的巨大冲击，中国移动通信探索出一种符合移动互联网发展需求的新型网络结构，并于 2010 年 4 月提出 C-RAN 网络架构的概念。随后，国际标准组织纷纷投入研发，有力促进了 C-RAN 绿色网络架构的推广。

#### 2.1.1 传统无线网接入弊病

当前广泛部署的蜂窝网络（无线电接入，RAN）由大量独立基站组成，单个基站覆盖小的区域，由一定规模的基站共同覆盖一个广阔的区域。每个基站由基带处理单元（BBU）和射频单元（RU）及天线组成<sup>[9]</sup>，基站各自独立处理和传输各自信号给移动终端，或接受移动终端信号并各自处理和转发。由于频谱资源有限，小区网络须在不同小区复用频谱资源，在无线电传输过程中，使用相同载波的相邻小区会存在互相干扰<sup>[9]</sup>。此外，每一个基站均包含独立的制冷、回程线路传输、监控系统和储备电源，随之而来的是巨大的资源消耗和温室气体产生。有数据显示<sup>[10]</sup>，全球 3% 的能量由信息通信工业基础设施所消耗，并产生大约占全球 2% 的二氧化碳排放，而这当中，9% 的二氧化碳是由移动通信业务所排放，并且无线接入网络占据通信产业 70% 的资源消耗。最后，由于“潮汐现象”，即每个基站流量随时间波动大，且基站间不能共享处理资源，导致个体基站平均利用率极低。

#### 2.1.2 C-RAN 网络架构

C-RAN 是基于协作式无线电（Collaborative Radio），集中化处理（Centralized Processing）和接入网架构（Clean System）。C-RAN 技术核心在于打破了基带处理池（Baseband Unit, BBU）和远端无线单元（Remote Radio Unit, RRU）之间的静态连接关系，将以往基站的 RRH 从 BBU 当中独立出来，并将后者实现云计算架构（Real-time Cloud Infrastructure），可以显著提高频谱资源利用率，减小资源消耗。

中国移动所提出的 C-RAN 方案采用了分布式天线系统 (Distributed Antenna System, DAS), 在中心机房布置集中式 BBU, 将 RRU 部署在前期规划好的地理位置, 远端无线单元和基带处理池之间使用光纤骨干网连接。如此, RRU 摆脱了机房的束缚, 仅仅通过对天线和设备的解调处理, 即可实现大范围的无线覆盖, 运营成本被大大降低。C-RAN 的架构原理如图 2-1。

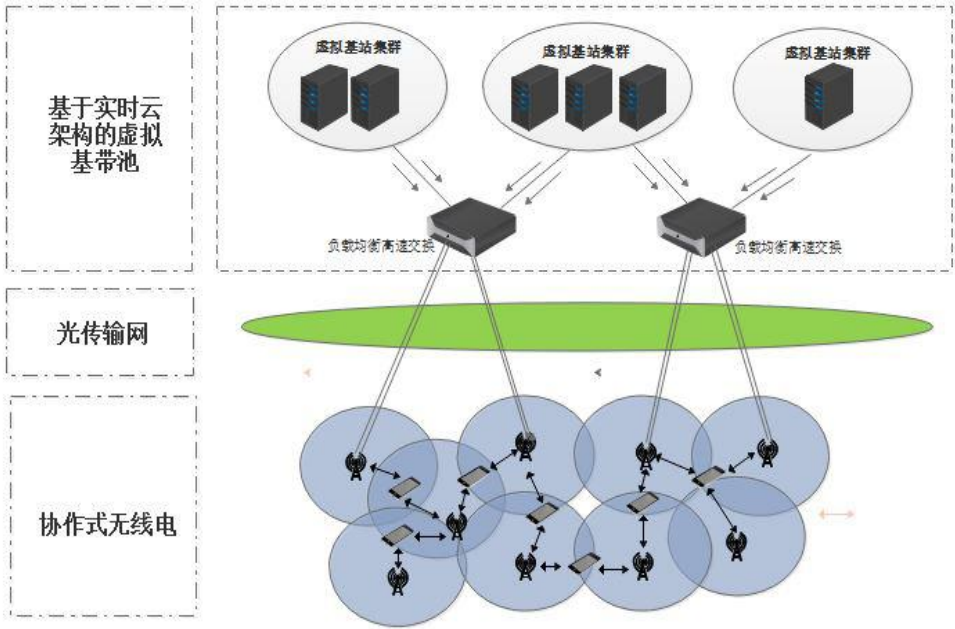


图 2-1

值得注意的是, C-RAN 方案的具体实现方法并不唯一, 除了上文中中国移动的方案, 另一种中心站——基站分布式系统方案同样可行。中心站集成了 RRU 和 BBU 的功能, 基站仅包含光电解调和天线系统, 通过基站, 光信号被转变为射频信号, 通过天线最终到达移动终端。实现方案如图 2-2 所示。

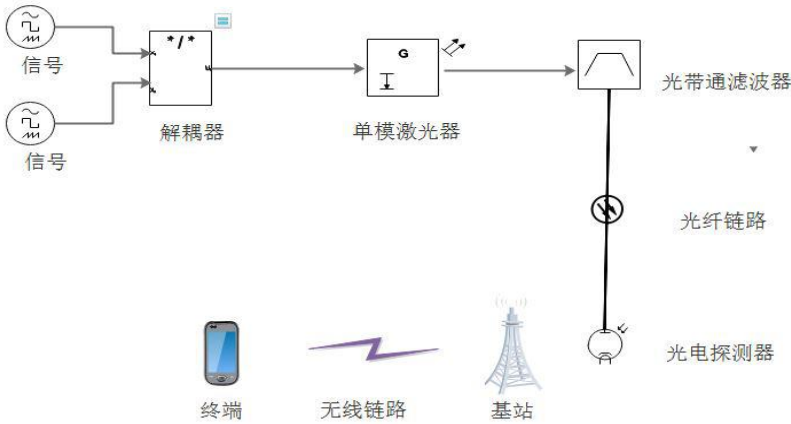


图 2-2

与图 2-1 不同，光纤骨干网当中传送的是经过调制的射频信号，而非基带信号，如此一来，信号的加载过程更为集中化，并且多路射频信号可以只通过一根单模光纤同时被传送，资源利用率更高。

### 2.1.3 C-RAN 技术特征

相较于传统蜂窝网络，C-RAN 网络架构具有以下技术特征：

(1)大规模集中式部署：一个集中式基带池 BBU 可以通过光纤骨干网远程数目众多的远端无线单元 RRU。表 2-1 是几种不同通信制式对应的最大光纤链路距离：

4G（LTE 和 LTE-A）	20Km
3G（WCDMA 和 TD-SCDMA）	40Km
2G（GSM/CDMA）	80Km

表 2-1

(2)本地支持协作无线：基带处理池 BBU 之间可以实现任意通信，基带处理池中和相互连接的 BBU 带宽极高而传输迟延极低（带宽>10Gbits/s,传输迟延<10us）。在传统基站模式当中，不同基站的 BBU 没有直接联系，只是简单集成堆叠在一起，这是同 C-RAN 架构的主要区别。

(3)基于通用平台的实时云计算：以往基站的硬件设备由专门的供应商提供，因此软件系统必须同硬件平台相一致，难以扩展，局限性很大。C-RAN 架构中的 BBU 基于开放的硬件平台，如基于 x86/ARM 架构的高性能可编程处理器。接口处理可以实现 RRHs、光纤骨干网和 BBU 之间的内部连接。通过实时虚拟化技术，BBUs 以虚拟基站的方式实现基带信号处理以及无线网络资源分配与优化等功能。当前云架构环境对实时性能的要求是 ms 量级，而 C-RAN 的实时性能需要达到小于 10  $\mu$ s 才能满足无线通信系统对时序的严格要求。

## 2.2 光载无线电（ROF）技术

### 2.2.1 ROF 技术原理

光载无线电技术（Radio Over Optical Fiber）在宽带高频无线信号的传输中引入光通信技术，利用光波承载高频信号通过光纤实现远距离传输，相较于高

频微波、毫米波信号在空气当中传播，减小了衰减，延长了传输长度。1990 年，第一个 ROF 系统成功实现了 4 信道的无绳电话信号通过副载波复用技术经过单模光纤的传输。文献<sup>[11][12]</sup>描述了利用不同网络拓扑结构的波分复用（WDM）或者副载波复用（Subcarrier Multiplexing, SCM）的 ROF 系统。

ROF 中的关键技术是光毫米波的产生。在众多毫米波的产生方法中，通过外调制器产生光毫米波信号的方法具有宽带宽、低损耗的优势。ROF 的基本原理是将来自中心站（Central Station, CS）的射频信号（Radio Frequency, RF）调制到光波上，经过低损耗光纤传送到远端无线单元，随后转换为电信号经天线发射最后被移动终端天线接收。射频信号的处理工作从基站（Base Station）转移到中心站，所以在远端无线单元只有光收发机、放大器和天线单元等组件，大大简化了基站结构，降低了系统成本。ROF 技术的优点是通过使用低损耗的光纤来降低信号的损耗，并且可以避免传输过程中电磁干扰和复杂大气条件（大气散射、湍流等）自然因素对无线信号的影响。

图 2.3 是 ROF 架构的示意图。其中，多个 BS 通过低损耗光纤与 CS 相连接，BS 与用户终端通过无线链路连接，可以为用户端提供高覆盖、大容量的接入方式。

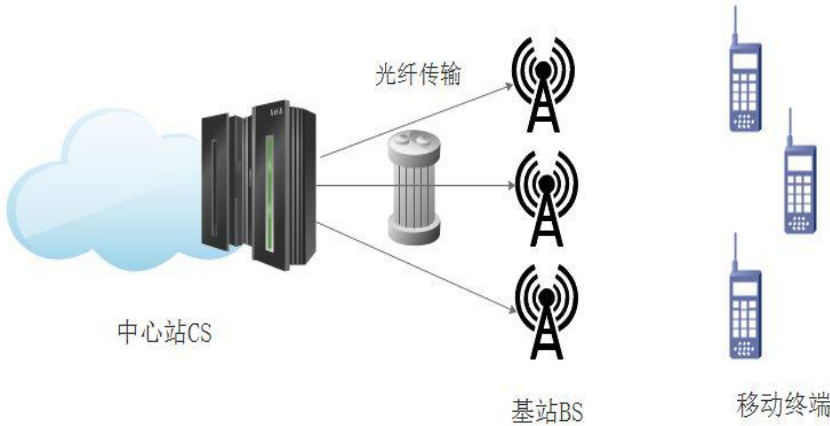


图 2-3

将信息加载到光波的过程即为调制。光源调制分为内调制和外调制两种方式。内调制又被称为直接调制，即信号直接影响光源的注入电流，以改变光源的发光强度。外调制又称简介调制，借助外调制器，通过介质的电光效应、声光效应等性质实现对光源出射光束的调制。直接调制原理简单，很容易实现，

但在高速调制的情况下会出现频率啁啾。而间接调制可以将调制频率做的很高，到 10GHz 量级，并且不会出现频率啁啾。但通常在 ROF 系统当中，低频段信号（2.4GHz 频段、5GHz 频段）采用内调制，高频段信号（60GHz 频段）采用外调制技术。

在下一代无线接入网络中需要更高频率的射频载波和更为高效的调制格式，为了提供合适的覆盖面积和支持多入多出系统（Multi Input Multi Output, MIMO），需要极大扩充每个地理区域的远端无线单元数量。面对如此高密度的远端无线单元，需要一个大容量的回传光纤网络使得传输的信息汇聚到中心站。这种光纤网络不限于有源网络或者无源网络，但通常将无源网络（PON）运用到 ROF 系统中，而有源设备基本都设在中心站或基站。在传输层，强度调制-直接探测(IM-DD)是该链路最简单的传输技术，是通过模拟的射频信号直接调制到光载波上，接收端直接探测来实现的。如果将 WDM 或混合 TDM/WDM 技术应用到此系统,将大幅提高系统灵活性和容量，这样，众多的 ROF 信道就可以被不同光波长承载在单个光纤链路中传输。

### 2.2.2 ROF 的特点及应用

ROF 将无线通信技术与光通信技术相结合,融合了光通信和无线通信的优点，具体如下：

（1）低损耗远距传送。光纤在 1310nm 和 1550nm 两个传输窗口的衰减分别为 0.5dB/km,0.2dB/km，相较于同轴电缆，衰减几乎可以忽略不计。低损耗传送一方面可以增大传送距离，另一方面可以降低发送功率，降低能耗。

（2）宽带宽资源。光纤在各个频段的三个传输窗口分别为 850nm、1310nm、1550nm，带宽资源大约 50THz。而当波长向 S 波段（1470nm-1520nm）和 L 波段（1570nm-1610nm）扩展之后，带宽资源趋近无穷大。

（3）突破电子学瓶颈。高频电信号在电子学领域的处理具有难以突破的电子学瓶颈，但一旦转化到光域处理，瓶颈问题将迎刃而解。

（4）抗电磁干扰，安全性高。信号在光纤中传输具有安全封闭的传输环境，不会受到外界复杂电子环境的干扰，也不会对外界环境产生影响。使得对信号抗干扰处理的难度降低，保证了信号的传输质量和安全性。除此而外，ROF 系统安装便利，维护简单。因为 ROF 基站（BS）众多，所以信号的加载和处理过

程都发生在中心站（CS），BS 只需部署 E/O、O/E 转换设备等少量组件，实现基站无源化。CS 可以被多个远端基站（RBS）共享，系统结构被极大简化，移动接入更加灵活。

ROF 系统的应用前景广泛，涵盖移动通信、卫星通讯、智能交通等方方面面。

（1）ROF 在移动通信中的应用：ROF 系统以小单元的形式覆盖，并且各小单元的射频资源可以重复利用，单个微单元覆盖范围小使得发射功率大大减小，频谱的空间利用率提高。

（2）ROF 在智能交通中的应用：伴随着社会经济的飞速发展，越来越多的出行需求所带来的交通安全问题不可忽视。智能交通系统是一种把人、路和车结合在一起的技术。在该系统中，通过光纤将分布在公路两旁的基站同中心站相连，车内移动接受装置可以接收中心站的交通动态管控和实现宽带无线接入。

（3）ROF 在室内覆盖中的应用：室内覆盖系统又称为分布式天线系统，该系统可以应用于如火车站、机场、商场、体育场等各种公共场所。将微蜂窝基站部署在建筑的规划点，通过分布式天线（DAS）完成射频信号（RF）的分布和收发，实现室内信号覆盖率的最大化。

## 2.3 网络虚拟化技术

### 2.3.1 网络虚拟化简介

网络虚拟化实质是集中资源再分配，集中资源即将物理硬件资源、软件资源及相关网络功能集成在一起，统一调度和控制；再分配过程提供资源抽象的实现方式，将各种网络元素抽象为虚拟的终端、链路、节点以及可编程 API，然后由这些虚拟资源组建抽象的网络实例<sup>[1]</sup>。网络虚拟化主要涉及虚拟机、服务器、桌面、存储、链路、路由器、交换机，以及云计算及其资源等方面。

不同于 IP 互联网，网络虚拟化的环境是一组由不同网络服务提供商（SP，Service Provider）提供的异构网络架构。每一个 SP 的资源则通过向不同基础设施提供商（Infrastructure Provider，InP）租用，依据业务特点来构建多种虚拟网络，并在之上部署定制的协议，为终端用户提供服务。近年来，网络虚拟化技术在各国引起广泛关注，并赢得学术界的一致共识，逐渐成为未来网络的主流



发展趋势。

网络虚拟化并不是新兴的概念，在现有网络中，网络虚拟化的成果已经存在，如 VLAN（Virtual Local Area Network），VPN（Virtual Private Network）。

### （1）VLAN

VLAN 主要通过对物理网络的划分来创建不同的广播域（Broadcast Domain）。基于传统的网络，网络物理拓扑以及地理位置分布将对用户的分配形成限制。VLAN 技术可以减小以太网段中冲突域的大小，通过在 MAC 帧当中追加 4 个字节的字段信息，其中包括 12bit 的 VLAN ID，具有 VLAN 功能的交换机依据 VLAN ID 和 MAC 地址转发帧信息。VLAN 是逻辑的划分而不是物理的连接，因此就管理和配置而言，相较于物理结构，VLAN 在管理和配置上都更加简单，并且便于对端交换机接收到数据后进行准确的过滤，具有较好的隔离水平。

### （2）VPN

VPN 基于隧道技术，在共享或开放的通信网中使用私有和安全的隧道连接多个区域。在实际应用当中，VPN 可以把分散地理位置上的区域相连接。每个 VPN 区域都包含若干用户边缘设备(CE)，而 CE 又隶属于若干个服务提供商设备（PE）。依据数据平面（Data Plane）运行的协议的不同，VPN 可以被划分为多种类型：

#### A. 一层 VPN

一层 VPN (Layer1 VPN, LI VPN): LI VPN 结构的提出是基于将二三层 VPN (L2/L3 VPN)包转发扩展到高级的电路交换域。它提供多重服务骨干网，允许用户在当中提供自己的服务，并且对网络的任意层服务均可生效。如此，每个服务网络都有单独的地址空间、一个独立的 Layer1 资源视点、单独的策略并且完全同其他 VPN 隔离。

#### B. 二层 VPN

二层 VPN (Layer2 VPN, L2 VPN): L2 VPN 在不同的分散区域内转发二层帧。因此同高层网络协议无关，具有更高的灵活性，但缺乏管理可达性的控制平面（Control Plane）。

#### C. 三层 VPN

三层 VPN (Layer3 VPN, L3 VPN): L3 VPN 在骨干网上使用三层协议来承载分散的 CE 之间的数据, 其中包括基于 CE 的 VPN 和基于 PE 的 VPN。用户边缘设备 VPN 中, 运营商网络并不会感知 VPN 的存在, 由 CE 设备创建、管理和拆除他们之间的通道。发送端的 CE 设备封装需要传送的数据包并且将它们路由到承载网。当这些被封装的数据包到达隧道对端时, 它们被解封装后注入到接收方的网络中。在基于 PE 的 VPN 中, 运营商负责 VPN 的配置和管理, 一个连接到 VPN 中的 CE 设备就好像加入到了私有的网络中。

#### D. 高层 VPN

高层 VPN (High-Layer VPN) 基于 SSL(安全套接层)/TLS(传输层安全), 由于高层 VPN 拥有在防火墙和远程网络地址转换的优点而被广泛使用, 用户可以拥有更高的控制空间。

需要指出的是, 诸如 VPN、VLAN 这样的虚拟化技术仅仅部分满足了在公共基础设施之上构建专用网络的需求, 但并不具有网络虚拟化技术的核心功能。不同于虚拟机(Virtual Machine)和虚拟网络(Virtual Network), 网络虚拟化在于资源类型的虚拟化。数据平面和控制平面的分离是网络虚拟化的重要特征。基于现有的网络, 如果使用相同基础设施则必须使用相同的通信和控制协议。但假如运营商通过不同的网络基础设施向终端用户提供特色的服务, 则必须使用为目标业务而开发的专门的传输协议。举个例子, 现有一家提供多媒体业务流服务的提供商, 那么传统的 TCP (传输控制协议)/IP (网际协议) 协议栈将不再是视频传输的最优选择, 使用附加或替代的协议则有更好的性能表现, 比如 UDP (用户数据报协议), RSVP (资源预留协议), SCTP (流控制传输协议)。但这样的选项目前暂时不能用。融合网络控制管理的可定制性保证了各个共享相同基础设施的运营商之间独立性, 各个运营商之间可以使用不同的协议, 最终实现完整虚拟化网络的定制。

### 2.3.2 网络虚拟化的分层模型

分层思想是网络架构设计当中十分重要的思想。分层的目的是通过将大型复杂的问题转化为较小的局部问题进行分析和处理。层次结构的设计有效支撑了网络架构。在电信领域, 针对电路交换通常采用“交换-传输-终端”的网络模型来建立。而在计算机领域, 针对分组交换主要采用“存贮转发”的模型。如

OSI (Open System Interconnect,开放式系统互连)的参考模型和 TCP/IP 的分层结构。当前，网络结构越来越复杂，无论是接入、承载、交换还是服务，多样化的特征在各个层次日趋明显。

网络虚拟化分层模型中包含 3 层结构，分别为：基础设施层(物理层)、虚拟网络层和服务层<sup>1</sup>，如图 2-4 所示。

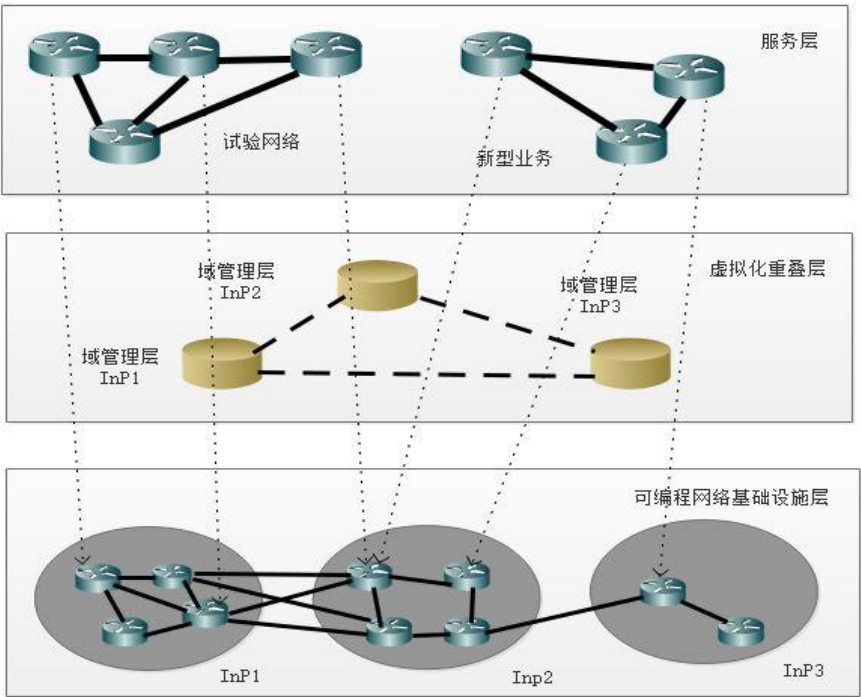


图 2-4

(1) 基础设施层（物理层）

物理层中的网络子层是物理基础设施，包括若干支持虚拟化的可编程节点<sup>1</sup>，网络设备、传输媒质以及各种网络技术等。网络类型包括多种异构网络，如正在被广泛应用的的无源光网络（PON）、无线网状网络(WMN)、公用交换电话网(PSTN)等等。可以认为，任何物理上可实现的网络技术都属于基础设施层。物理层中的资源子层是物理基础设置所能提供的网络资源，包含带宽、吞吐量、网络设备的 CPU 处理能力等。物理层中的运营子层表示拥有物理层中设备或可以运营物理层中网络实体的基础设施提供者(InP)。

(2) 虚拟网络层（虚拟化重叠层）

从物理网络基础设施中抽象出来的网络设备和链路组成了虚拟网络设施，它是虚拟网络层中的网络子层，包括虚拟的节点和链路。虚拟网络进行了逻辑

上的独立划分，不受物理设施的限制。虚拟网络层中的资源子层是与物理网络资源相对应的，由虚拟网络设施所能提供的网络资源。不同的是，虚拟网络资源是物理网络资源的抽象和集合，相同属性的虚拟网络资源可能由多种物理资源通过多种方式提供。虚拟网络层中的运营子层表示拥有虚拟层中的网络设施和网络资源的虚拟网络提供者(VNP),或者是可以运营虚拟层中的虚拟网络的虚拟网络运营者。

(3) 服务层

与物理层和虚拟网络层中的相应子层和子层中相应的元素相对应,服务层也分为了三个子层。包括服务实体,服务资源和服务提供者(SP)。

2.3.3 软件定义光网络（SDON）技术

基于 OpenFlow<sup>[1]</sup>的软件定义网络（SDN）自诞生以来日渐成为行业瞩目的焦点，在随之而来的 SDx（软件定义一切）的浪潮中向光纤网络发展<sup>[1]</sup>。软件定义光网络最终实现的是光网络能够通过软件编程，根据用户或运营商实际需求进行动态化设置，统一调度和控制光网络资源，其请求响应快、资源利用率高、服务灵活。通过软件编程的方式实现动态设置，核心在于包括逻辑、管控策略、传输器件等光网络元素的程序化，解决功能上难以扩展的弊端，满足日趋复杂多样需求。SDN 和 SDON 分别对应在电网络和光网络上的虚拟化，并且 SDON 可以虚拟化可伸缩资源切片，更加有效地控制多层多域各种约束条件下的光网络。此外，SDON 具有面向用户的南北向接口，实现灵活的业务接入和硬件平台的控制。T-SDON 架构如图 2-5。

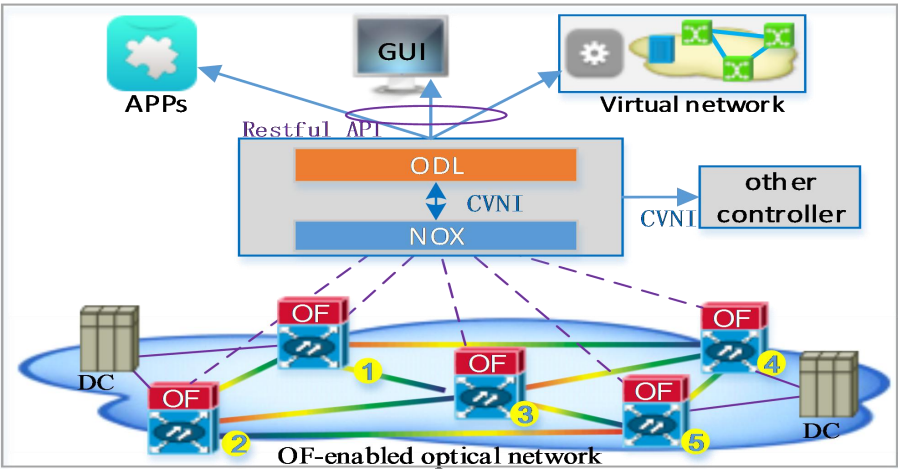


图 2-5

SDON 的标准化工作主要由四个国际标准化组织完成，即开放网络基金会(ONF)、国际电信联盟(ITU-T)、国际互联网工程任务组(IETF)、光互联论(OIF)。其中 IETF 有两个相关工作组。

A.PCEWG，基于有状态的 PCE，研究 PCE 中增加连续控制，随后演进为 SDN 控制器。Google、思科、Juniper、华为等公司正积极推进标准化，2013 年 11 月工作组会议基本同意该提案成为工作组文稿。

B. ACTN 讨论组，旨在推进传送网开放网络接口，向上层网络提供资源抽象和控制。

基于以上进展路线可以发现，在多业务灵活性接入要求的驱动下，网络呈现出向更加简单、开放的结构发展的势头。光网络的发展将使得依托于光网络的应用服务取得长足的发展。

### 2.3.4 C-ROFN

在国家“973 计划”课题“分布式动态可重构微波光融合系统的建模与实验研究”的支持下，北京邮电大学提出一种基于软件定义的光载无线融合网络架构，即 C-ROFN（Cloud-Radio Over Optical Networks）。如图 2-5 所示。

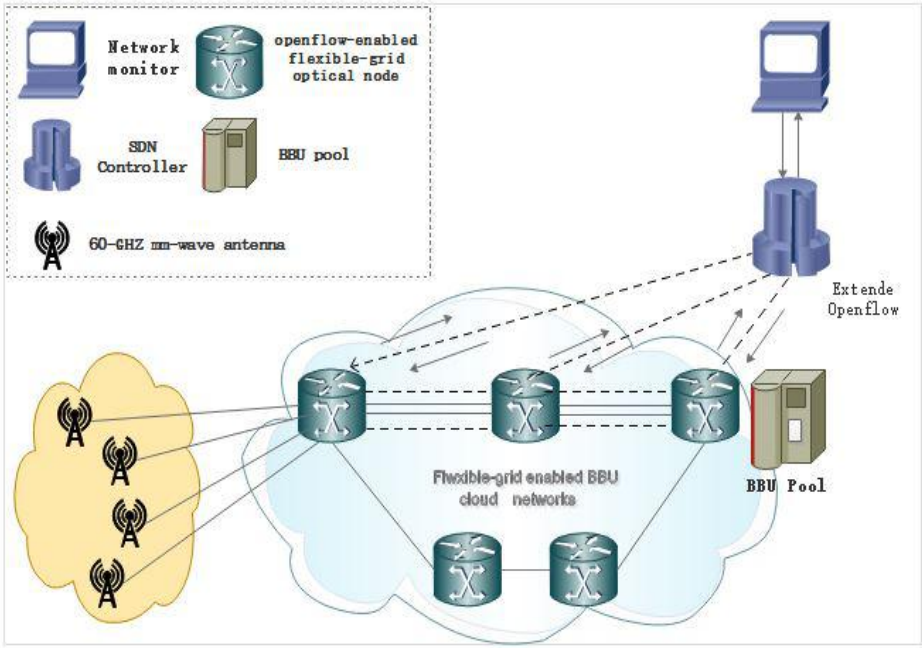


图 2-6

## 2.4 本章小结

这一章围绕光无线融合组网技术和虚拟化模型两大方面展开论述，详细介绍了光与无线融合组网的网络规划、技术原理、系统设计及特性的调研情况，并基于光无线网络异构性的技术瓶颈，引入了网络虚拟化技术，并论述了目前光无线融合组网的虚拟化模型。本文将在以下内容里，根据现有的虚拟化模型，对其中的资源优化算法进行分析和改进，并进行仿真验证。

## 第三章 光与无线融合组网方案与资源优化算法

### 3.1 组网方案

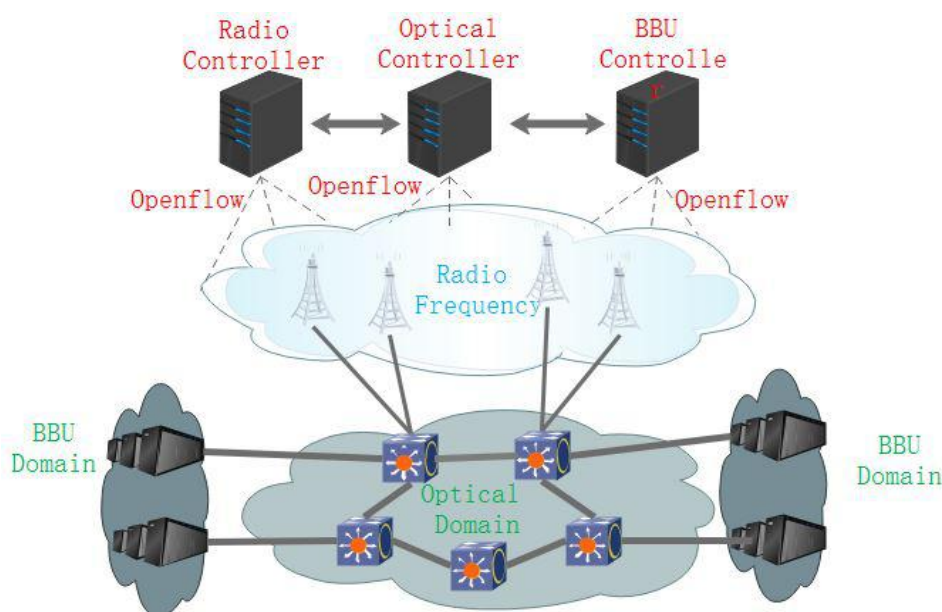


图 3-1

支持 SDN 的 C-ROFN 光无线融合组网架构如图 3-1 所示。本文所提出的光与无线融合接入网的总体架构采用了 2.3.2 节当中的分层模型，即将网络纵向分为三个层次：物理层、虚拟网络层和应用层。

物理层设计的出发点主要是满足未来网络大容量数据交换、高可靠性和移动性。基于 2.1 节的论述，组网架构物理层采用 C-RAN 的层级结构，将所有基站的计算资源聚合为一个云 BBU 池，而 RRU 通过分布式射频信号与终端交互，即 BBU 执行带宽处理，RRU 执行基站的射频功能。结合 2.2 节的论述，EON 满足 BBU 与 RRU 的互联要求，形成与 EON 相连的增强型 C-RAN，即 C-ROFN。当前，由于移动互联网用户数量呈指数增长，移动应用与数据量急剧增加，RRU 与 BBU 之间的互动以及 BBU 之间的资源调度日趋复杂，传统网络架构无法满足服务质量。而主要基于 OpenFlow 协议的 SDN 在 IP 网络和光网络方面得到了广泛的研究，包括光分组与突发交换，固定与柔性网络接入，城域网和骨干网。因此，在具体的技术上，我们使用 OpenFlow 交换机作为灵活网格光节点，使用



OpenFlow 协议进行网络控制和数据转发。

虚拟网络层的设计正是为满足未来网络对于多样服务的支持以及网络灵活性和可进化性的需求。光与无线融合接入网在虚拟网络层必须构建一个专门用于网络管理和控制的虚拟网络，来保证整个网络的正常运转。图 3-1 中，引入三个 SDN 控制器来表示对一个虚拟网络的控制。在 BBU Domain、Optical Domain、RRU Domain 中分别引入 BBU Controller (BC)、Optical Controller (OC)、RRU Controller (RC)，它通过 NFV 将 C-ROFN 物理设施虚拟化为各种资源云，这些资源通过 SDN 控制器实现无线电、光学、BBU 域内的统一编排。在传统架构中，通常只考虑一种资源，例如单一无线电、光域或者 BBU，没有在体系结构下全局调度多个层次资源环境。因此，基于软件定义网络的 C-ROFN 可以打破无线电、光学及 BBU 域的限制，实现多层集成和跨层优化。

服务层的设计不是本文论述的主要对象。光无线融合组网架构当中，基于物理层的网络性能和基于虚拟层的网络应用最终都服务于服务层。分层模型一个重要思想是各层可以进行单独的设计，下层服务于上层。我们在虚拟网络层当中提供对于服务层的服务接口。因此，在未来网络中出现的新技术只需通过调用服务接口就可以获取虚拟网络资源实现快速部署。

### 3.3.1 物理模型

光与无线融合组网的物理模型，即 C-ROFN 如图 3-2 所示。

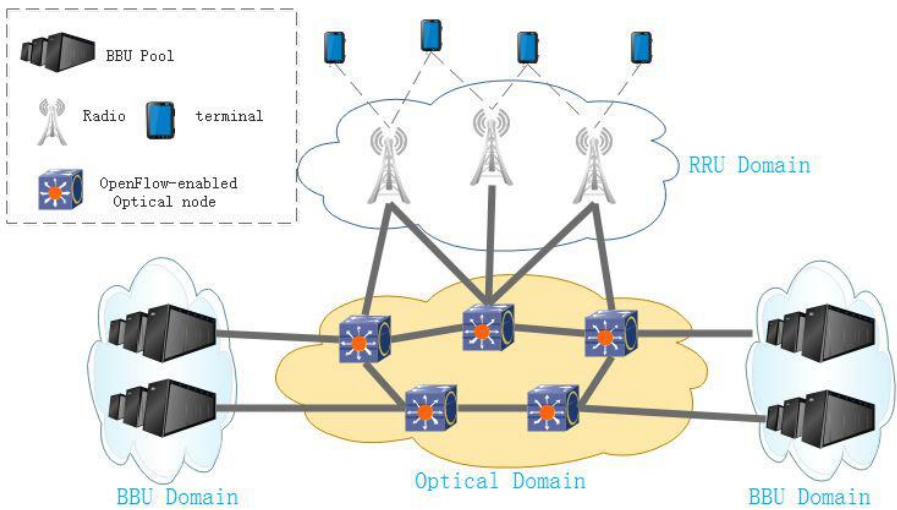


图 3-2



C-RAN 是基于协作式无线电，集中化处理和接入网架构。C-RAN 技术核心在于打破了基 BBU 和 RRU 之间的静态连接关系，将以往基站的 RRH 从 BBU 当中独立出来，并将后者实现云计算架构（Real-time Cloud Infrastructure），可以有效提高频谱利用率，降低能耗。

物理层设计的出发点主要是满足未来网络大容量数据交换、高可靠性和移动性。基于 2.1 节的论述，组网架构物理层采用 C-RAN 的层级结构，将所有基站的计算资源聚合为一个云 BBU 池，而 RRU 通过分布式射频信号与终端交互，即 BBU 执行带宽处理，RRU 执行基站的射频功能。结合 2.2 节的论述，EON 满足 BBU 与 RRU 的互联要求，形成与 EON 相连的增强型 C-RAN，即 C-ROFN。当前，由于移动互联网用户数量呈指数增长，移动应用与数据量急剧增加，RRU 与 BBU 之间的互动以及 BBUs 之间的资源调度日趋复杂，传统网络架构无法满足服务质量。而主要基于 OpenFlow 协议的 SDN 在 IP 网络和光网络方面得到了广泛的研究，包括光分组与突发交换，固定与柔性网络接入，城域网和骨干网。因此，在具体的技术上，我们使用 OpenFlow 交换机作为灵活网络光节点，使用 OpenFlow 协议进行网络控制和数据转发。

### 3.3.2 网络虚拟化

图 3-1 架构中，EON 同部署网络和处理（计算和存储）层资源的 BBU 互连，分布式 RRH 互联并融入到 EON 中，为无线电信号分配了更细粒度的定制频谱。C-ROFN 包含三个层次：无线电资源、光谱资源和 BBU 处理资源。多层资源优化的组网方式向两个方向扩展。一是从资源形式的角度，光学和计算资源优化是沿着东西方向互联的交叉光网络和 BBU 层，被建立为“异质跨层”。另一个沿纵向建立多层互连和联网，被称为“多层承载”。基于上述具有网络功能虚拟化的网络模式，形成了该架构中的三个应用，RRH 之间的相互作用（如协作无线电），从 RRH 到 BBU 的服务，BBU 之间的资源调度（如虚拟资源迁移 BBU）。RRH 之间的相互作用（例如，协作无线电），从 RRH 到 BBU 的服务、BBU 之间的资源调度（例如虚拟资源迁移 BBU）。C-RoFN 的组网方式和应用场景之间的逻辑关系如图所示，每个资源层可以用 OpenFlow 协议（OFP）和由 Radio Controller（RC），Optical Controller（OC）和 BBU Controller（BC）分别控制。图示架构强调 RC 与 OC 之间的互动，以克服多层叠加网络导致的互通障碍，有

效实现射频与光网络的垂直整合。其次，可以通过 OC 和 BC 合并多层次资源，同时实现光网络和 BBU 资源的全球跨层优化。基于集成在两个方向，全球资源评估和分配可以在图示架构下实现，以优化无线电、光学和 BBU 资源，以增强端到端 Qos。

为了支持以上架构的实现，RC、OC、BC 需要进行功能扩展，如图 3-2 所示。C-ROFN 架构的主要特征是规则被拓展为进/出端口，信道间隔，网格，中心频率，频谱带宽，射频等。节点的动作主要包括四种类型：添加（add），交换（switch）和停用（drop）到达具有指定适配功能（例如调制格式）的端口或标签的路径，删除路径以恢复设备原始状态。

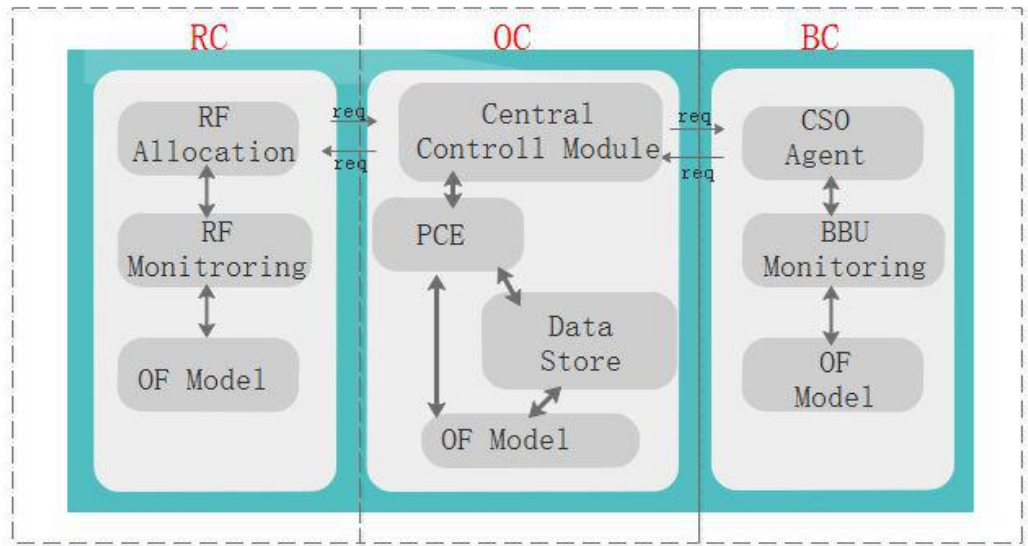


图 3-3

- 无线电控制器 RC: RC 的射频监测模块（RF Monitoring）获取和管理 RRH 中的虚拟无线资源，射频分配模块（RF Allocation）通过 OpenFlow 协议为算路进行射频分配。信息可以通过光-无线融合接口进行交互。
- 基带池控制器 BC: BC 通过 BBU 监控模块（BBU Monitoring）定期包含 BBU 资源信息或者基于事件触发器。为了能够通过光域和 BBU 域资源的跨层优化来方便执行算路，BC 中的 CSO 代理（CSO Agent）模块可以周期性地提供 BBU 计算资源使用情况的信息并从 OC 接受结果，同时通过 Optical-BBU 接口与 OC 进行交互。
- 光控制器 OC: 当服务请求到达时，中央控制模块（Central Controll Module）将根据无线域、光域、BBU 域的资源进行决策，以决定哪一个 BBU 节点是资源

迁移的目的地或者与对应的 RRH 相适配，分配应用程序资源并确定应用程序位置及往何处迁移虚拟机。之后，请求连同请求参数（如带宽与迟延）将被提交给 PCE 模块（Path Computation Element），并最终成功返回包含配置路径的信息。从 BC 收到资源处理信息之后，PCE 会基于光域资源和 BBU 资源的跨层资源优化完成从 BBU 到 RRU 的端到端路径计算。当路径被成功设置后，路径信息将被转移到数据存储模块（Data Store）当中存储。

## 3.2 资源优化算法

资源优化算法，主要研究基于网络资源和应用资源的跨层优化。资源跨层优化旨在实现应用资源和网络资源的联合优化，提升网络层和应用层之间的响应能力。并且，通过应用和网络之间的合作恢复技术，跨层优化可以有效提高故障场景下业务的恢复能力。

如何全局掌握并考虑网络资源和应用资源的利用情况，当业务到来时，为用户选择最适合的 BBU 目的节点以及对应光路，是研究资源优化算法的关键。跨层资源优化最终实现利用有限的资源提升用户的应用体验质量（Quality of application Experience, QoE），实现光即服务（Optical as a Service, OaaS）的目标。

### 3.2.1 RBS、NBS、ABS

RBS、NBS 和 ABS 分别对应随机资源分配、网络资源优先和应用资源优先三种资源分配策略。

- **RBS:** 当业务到来时，为业务随机分配 BBU 目的节点以及到该目的节点的对应光路。

- **NBS:** NBS 采用 Dijkstra 算法选择从源节点到目的节点具有最小跳数的路径作为目标。当业务到来时，优先考虑不同路径上的网络资源利用情况。 $f_{b1}$ ,

$f_{b2} \dots f_{bk}$  则分别对应着相关 k 条候选路径的网络资源函数，且有

$f_{bc}(H_p, W_j) = \sum_{l=1}^{H_p} W_l$ ，选取最小  $f_{bc}$  光路所对应的 BBU 目的节点。

- **ABS:** 优先考虑 BBU 节点应用资源的利用情况，以保证不同服务节点的

负载均衡性。用两个应用参数 CPU 使用率  $U_c^t$  和内存利用率  $U_m^t$ ，来描述当前数据中心应用资源的使用情况。 $\phi$  是两个参数的权重因子， $f_{\alpha 1}, f_{\alpha 2} \dots f_{\alpha k}$  分别对应  $k$  个候选服务器节点的应用资源函数式，且有  $f_{ac}(U_m^t, U_c^t, \phi) = \phi \times U_m^t + (1 - \phi) \times U_c^t$ ，选取  $f_{bc}$  最小的目的节点作为处理业务的数据中心。

### 3.2.2 SGLB 静态全局负载均衡策略

基于上文论述的跨层资源优化架构，SGLB 策略研究了具有静态参数的网络资源与应用资源全局负载均衡策略。该策略具有较低的复杂度，对实现异构网络跨层优化的目标具有指导意义。通过 SGLB 策略，AC 根据由数据中心收集的应用资源状态和 SC 传递的网络资源利用情况，选择数据中心位置和服务器节点。SGLB 策略定义了联合优化因子  $\alpha$ ，用于衡量网络资源与应用资源间的平衡权重。此因子包括网络参数和应用参数，其中两个应用参数 CPU 使用率  $U_c^t$  和内存利用率  $U_m^t$ ，用来描述当前数据中心应用资源的使用情况。而网络参数也包含两个参数，分别是当前网络链路中的流量权重  $W_l$  和候选路径中的跳数  $H_p$ ，通过这些网络参数来衡量网络资源的利用情况。

因此整体的应用资源函数表达为式 (3-1)，其中  $\phi$  是 CPU 资源与内存资源间的调整比重。此外，网络资源函数表达为式 (3-2)。 $f_{\alpha 1}, f_{\alpha 2} \dots f_{\alpha k}$  分别对应  $k$  个候选服务器节点的应用资源函数式，而  $f_{b1}, f_{b2} \dots f_{bk}$  则分别对应着相关  $k$  条候选路径的网络资源函数。

$$f_{ac}(U_m^t, U_c^t, \phi) = \phi \times U_m^t + (1 - \phi) \times U_c^t \quad (3-1)$$

$$f_{bc}(H_p, W_l) = \sum_{l=1}^{H_p} W_l \quad (3-2)$$

所以，根据上述应用资源和网络资源函数，联合优化因子  $\alpha$  满足式(3-3)，其中  $\beta$  是可调整的网络与应用参数间的权重。

$$\alpha = \frac{f_{ac}(U_m^t, U_c^t, \phi)}{\max\{f_{\alpha 1}, f_{\alpha 2} \dots f_{\alpha k}\}} \beta + \frac{f_{bc}(W_l, H_p)}{\max\{f_{b1}, f_{b2} \dots f_{bk}\}} (1 - \beta) \quad (3-3)$$

根据应用资源利用情况, AC 首先在应用层寻找应用资源利用率最低的  $k$  个数据中心服务器节点作为最优的  $k$  个候选节点。然后在网络层面上, 选择  $k$  个候选节点中拥有联合优化因子  $\alpha$  最小值的节点, 作为最终提供服务的目的节点。

### 3.3 本章小结

这一章提出了光与无线接入网融合组网方案。在总体方案的设计当中, 按照网络虚拟化的分层模型, 分别对光与无线融合接入网中的物理层、虚拟网络层和服务层进行了描述。在具体设计上, 物理层中将所有基站的计算资源聚合为一个云 BBU 池, 而 RRU 通过分布式射频信号与终端交互, 即 BBU 执行带宽处理, RRU 执行基站的射频功能。EON 满足 BBU 与 RRU 的互联要求, 形成与 EON 相连的增强型 C-RAN, 即 C-ROFN。网络虚拟层引入 RC、OC、BC 三个 SDN 控制器来表示对一个虚拟网络的控制, 以及三个控制器内部工作机制。

如何能够在多个虚拟网之间, 进行资源分配以及物理资源调度, 实现物理资源利用率的最大化, 是网络虚拟化的一个重要研究方向。3.2 节论述了现有的几种资源优化算法以及存在的局限性。

## 第四章 动态全局资源优化

### 4.1 动态全局资源优化算法

基于第三章的论述，静态全局资源优化算法具有权重因子固定，不能适应网络资源实时变化的局限性。如果能够考虑网络资源和应用资源的权重时变性，特别是在业务量较大的情况下，满足资源实时变化的需求，将进一步提升资源利用率和用户体验质量。基于此，本章在动态全局资源优化算法上展开研究。

#### 4.1.1 网络模型

在每个服务节点当中，通过抽象和简化，应用资源由三个随时间变化的参数决定，分别为存储利用率  $U_R^t$ 、CPU 利用率  $U_C^t$  以及 I/O 调度情况  $U_I^t$ 。网络资源同样由三个参数所决定，分别为每条链路被占用的带宽  $B_l$ ，传输时延  $\tau_l$  和每条候选路径的跳数  $H_p$ 。可以想见，对于业务请求者来讲，由于应用资源（包括存储利用率  $U_R^t$ 、CPU 利用率  $U_C^t$  以及 I/O 调度情况  $U_I^t$  对其具有不可见性，换言之，业务最终由哪一个服务节点响应，用户并不关心，他们更加关注服务自身的用户体验以及业务的完成质量。

对于任意从源节点  $s$  发出的业务请求，都需要为其分配占用的链路带宽  $B_l$ 、传输时延  $\tau_l$  和占用目的节点  $d$  的应用资源  $A_r$ ，不妨将第  $n$  个业务请求抽象为  $Se_n(s, B_l, \tau_l, A_r)$ 。根据业务请求和现有资源的利用情况为业务分配最适合的目的节点。

#### 4.1.2 策略描述

对于决定应用资源的三个时变参数  $U_R^t$ 、 $U_C^t$ 、 $U_I^t$ ，可以引入三个时变的权重因子  $K_a^t$ 、 $K_b^t$ 、 $K_c^t$  来描述三个参量的相对比率。考虑到  $K_a^t$ 、 $K_b^t$ 、 $K_c^t$  三个时变量的复杂性，在不影响策略效果和流程的情况下，可以将其进行简化，将连

续的估计值变为离散的典型值，即  $K_a$ 、 $K_b$ 、 $K_c$ 。为了保证仿真的可操作性，在不影响实验结果的情况下，对  $K_a$ 、 $K_b$ 、 $K_c$  进行进一步简化，即  $K_a > K_b > K_c$ 。因此，当前每个目的节点服务器的应用资源占用率如式 4-1 所示，为满足参数间的线性关系，对参数进行归一化处理：

$$f_{ac}(U_C^t, U_R^t, U_I^t) = \frac{K_a \times U_C^t + K_b \times U_R^t + K_c \times U_I^t}{K_a + K_b + K_c} \quad (4-1)$$

同样的，对于网络资源以及相关参数，可以采用类似的处理方法。因此，对于从源节点  $s$  出发的业务请求，每条候选路径的网络资源如式 4-2，其中  $B$  代表链路总的带宽， $\tau$  为链路传输时延， $K_d$ 、 $K_e$  分别代表两个离散的权重因子。

$$f_{bc}(B_l, \tau_l, H_p) = K_d \sum_{l=1}^{H_p} \frac{B_l}{H_p B} + K_e \sum_{l=1}^{H_p} \frac{\tau_l}{H_p \tau} \quad (4-2)$$

## 4.2 动态全局资源优化算法仿真分析

## 4.3 本章小结

## 第五章 总结与展望

### 5.1 论文工作总结

### 5.2 未来研究规划与展望

## 参考文献