第一章 绪论

1.1接入网概述

思科公布的寰球年度云指数报告（2015-2020）指出[1]，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=2^70B），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[2]，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”[3]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[4]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[5]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宽带的基础上注重灵活性的实现。

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[6]的发展是必然的抉择。根据2015年Point Topic的发布报告[7]，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[8]。

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BBUs（Base band Unit）的实时云计算。而ROF（Radio Over Optical Fiber）相较于传统的的无线接入，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国内外研究现状

1.3本文主要工作

1.4文章结构

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[9]，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[9]。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[10]，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%的能耗。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），可以有效提高频谱利用率，降低能耗。

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。

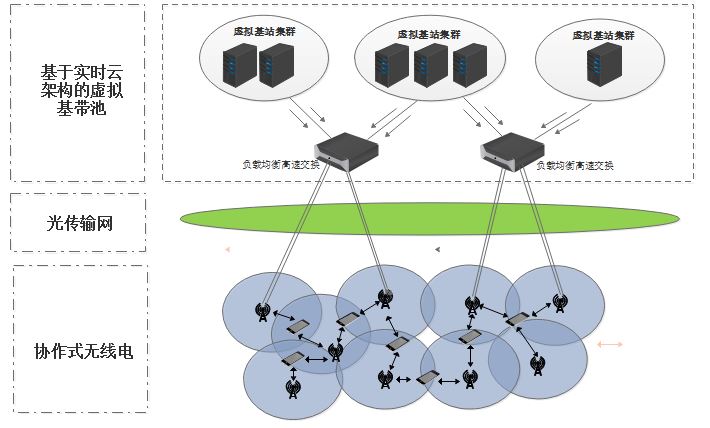


图 2-1

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。

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

1. 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。
2. 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。接卡口处理可以实现RRHs、光纤骨干网和BBUs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。为了满足无线通信系统严格的时序要求，C-RAN实时性要求在10us以内，高出当前云架构环境中的ms量级实时性两个数量级。

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[11][12]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（Redio 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。

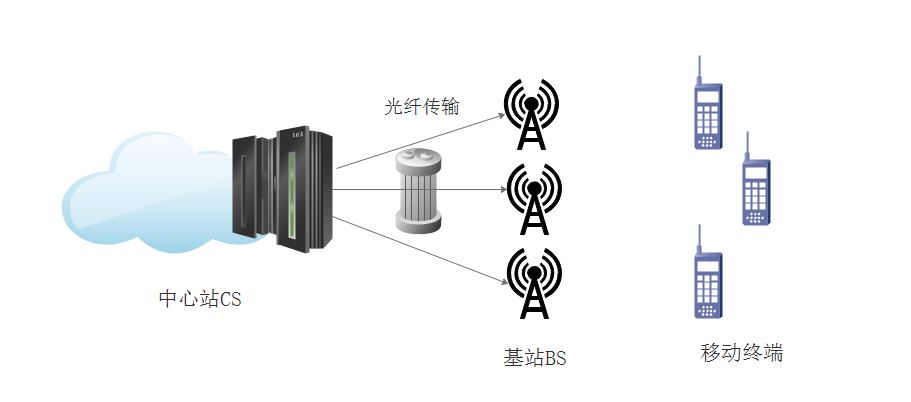


图 2-3

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，借助外调剂器，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。直接调制易于实现，但在告诉调制时存在频率啁啾。而间接调制的调制速率可达到10GHz量级，而且几乎不会产生频率啁啾。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，众多的的ROF信道就可以被不同光波长承载在单个光纤链路屮传输。

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：伴随着社会经济的高速发展，交通安全问题日趋被提上议事日程。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

网络虚拟化是将各种硬件或者网络软件资源及相关网络的功能集成到一个可用的软件中统一管理和控制的过程，并将这些物理网络元素抽象为虚拟终端、虚拟结点、可编程接口或者虚拟链路之类的虚拟资源，然后由这些虚拟资源组件抽象的网络实例[]。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，VALN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。

1. 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又附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一个私有的网络中。

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。但如果网络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，就必须使用为目标业务而开发的专门的传输协议。举个例子，现有一家视频服务提供商向用户提供多媒体流服务。那么传统的TCP (传输控制协议)/IP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备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,幵放式系统互连)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[]，如图2-4所示。

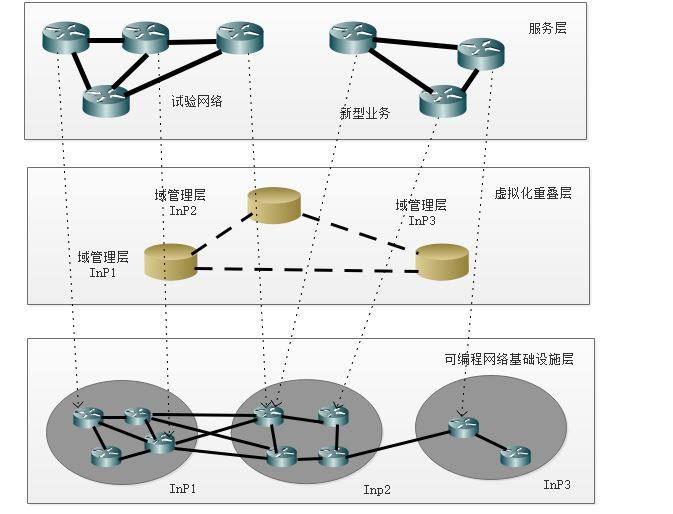


图2-4

（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[]，包括网络设备、传输媒质以及各种网络技术等。就网络类型而言，则由多种异构的网络组成。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，包括虚拟节点和虚拟链路。虚拟网络在逻辑上相对独立，不受物理设施的约束。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(VNO)。

（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

软件定义网络（SDN）自诞生以来日渐成为行业注目的焦点，在随之而来的SDx（软件定义一切）的浪潮中向光纤网络发展[]。 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。

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。

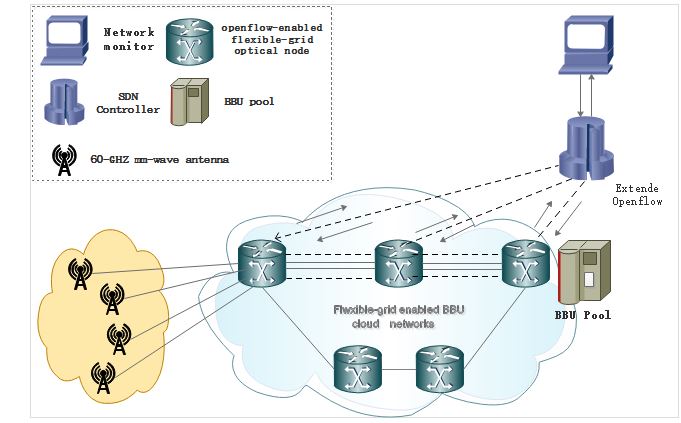


图2-5

1. 光与无线融合接入网组网方案

3.1总体方案