



专栏：5G 架构与部署

面向 5G 前传的 open-WDM 新型技术架构

王东, 李晗, 张德朝, 蔡谦, 孙将, 赵阳, 李允博, 韩柳燕
(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 5G 前传网络架构发生重大变化, C-RAN 有望成为 5G 前传网络的主流组网方式。结合 5G 前传网络的新需求, 在分析光纤直驱、无源 WDM、有源 WDM/OTN 等现有方案的基础上, 提出了面向 5G 前传网络的开放式波分复用 (open-WDM) 系统。该系统采用波分复用技术, 缓解光纤资源压力; 基于半有源架构, 部署灵活; 采用低成本管控技术, 保障前传网络的可管可控和高效运维。

关键词: 5G 前传; 半有源; 管理运维

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020243

Novel open-WDM technical architecture for 5G fronthaul network

WANG Dong, LI Han, ZHANG Dechao, CAI Qian, SUN Jiang, ZHAO Yang, LI Yunbo, HAN Liuyan
China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: C-RAN may be a promising way for 5G fronthaul network associated with significant changes in 5G fronthaul architecture. Based on the analysis of existing schemes such as optical fiber direct connection, passive WDM and active WDM/OTN, open wavelength division multiplexing (open-WDM) system was proposed to satisfy the new requirements of 5G fronthaul network. In the open-WDM system, WDM technology is used to save optical fiber resource and the semi-active architecture can achieve flexible deployment. The low-cost management and control technology was further applied to perform efficiently network operation.

Key words: 5G fronthaul, semi-active, management and maintenance

1 引言

4G 网络建设以宏站和分布式基站为主, 射频拉远单元 (remote radio unit, RRU) 和基带处理单元 (base band unite, BBU) 间直接采用光纤连接; 少量场景采用 C-RAN (cloud RAN) 小规模

集中组网方式, BBU 集中后单个机房覆盖 5~6 个物理站点, 应用无源波分技术节省光纤资源。伴随无线接入网 (radio access network, RAN) 的重新功能切分, RRU、BBU 两级架构重构为有源天线单元 (active antenna unit, AAU)、分布单元 (distribute unit, DU)、集中单元 (centralized unit,

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2020-07-18

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2017ZX03001016)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project (No.2017ZX03001016)

CU) 多级架构。5G 传送网也相应划分为前传、中传和回传网络。同时, 机房建设、维护成本上升等问题日趋突出, 5G 前传网络架构发生重大变化, C-RAN 集中化基站规划和建设比例显著提高, 有望成为 5G 前传网络的主流组网方式。C-RAN 集中可分为小集中、中大规模集中。小集中场景下, 采用光纤直驱方式, 成本最优。而从目前来看, 中大规模集中为主流趋势, 单个机房覆盖 6~15 个物理站点为主, 部分场景可覆盖 20 个物理站点, 对光纤资源消耗极大, 建设成本和难度显著提高。业界面向 5G 前传网络的新需求和新特点, 提出光纤直驱、无源波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM)、有源 WDM/光传送网 (optical transport network, OTN) 等多种技术方案, 适用场景各异。同时, 由于 C-RAN 集中化程度和规模的提高, 前传网络需具备可管可控的能力, 作为传输网重要的组成部分。此外, 4G RRU 和 BBU 采用 10GE 光模块承载通用公共无线接口 (common public radio interface, CPRI) 业务, 而 5G AAU 和 DU 承载增强型通用公共无线接口 (eCPRI, enhanced CPRI) 业务的光模块接口速率提升至 25 Gbit/s。相比 10GE 灰光模块及 WDM 彩光模块, 25GE 灰光模块、WDM 彩光模块的产业链成熟度、传输性能、成本还相差较大, 25GE WDM 技术也存在多种竞争方案, 产业链发展方向各异, 亟需收敛技术方案、凝聚产业合力。

本文结合 5G 前传网络的新需求, 在分析光纤

直驱、无源 WDM、有源 WDM/OTN 等现有方案的基础上, 提出了面向 5G 前传网络的开放式波分复用 (open wavelength division multiplexing, open-WDM) 系统, 基于半有源架构, 实现低成本管控和灵活部署, 采用波分技术大幅节省光纤资源。

2 5G 前传技术方案

面向不同的应用场景和组网需求, 5G 前传网络目前主要有 3 种技术方案, 分别为光纤直驱、无源 WDM、有源 WDM/OTN。

2.1 光纤直驱

基于光纤直驱方案的 5G 前传网络架构如图 1 所示。AAU 与 DU 的光模块之间通过光纤直接连接, AAU 和 DU 上的光模块均为 25GE 灰光模块。

光纤直驱方案架构简单、易于工程部署, 无须波长规划, 适用于光纤资源丰富、DU/CU 部署位置较低的场景。但是, 在 C-RAN 场景下, 该方案对光纤资源的需求将伴随集中部署规模的提高而显著增加。以 5G 160 MHz 场景为例, 每个物理站点通常部署 3 个 AAU, 每个 AAU 需要出 2 个 25GE 接口, 则一个物理站点就需要消耗 12 芯光纤 (含上下行)。当 DU/CU 部署在接入机房时, 对于接入 1~3 个站点, 需要 36 芯光纤; 而当 DU/CU 部署在业务汇聚机房时, 典型接入 10 个站点, 采用光纤直驱方案就需要 120 芯光纤。此

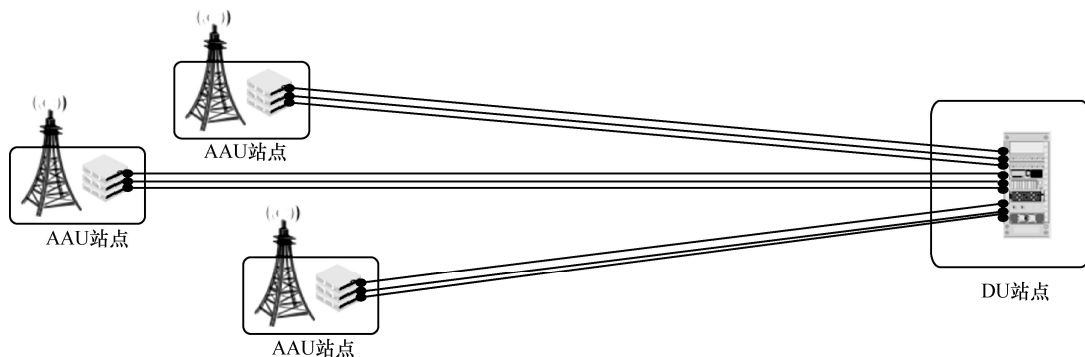


图 1 基于光纤直驱方案的 5G 前传网络架构示意图



外，传输网管无法获知 AAU 与 DU 间光纤连接状态等信息，管理和运维较为困难。

2.2 无源 WDM

基于无源 WDM 方案的 5G 前传网络架构如图 2 所示。AAU 侧和 DU 侧各配备一个无源合分波器，合分波器间通过 1 芯光纤连接。一侧通过合波器复用多个波长进行传输，另一侧通过分波器实现多波长的解复用。AAU 和 DU 上的光模块均为 25GE 彩光模块。

无源 WDM 方案采用波分复用技术，将若干彩光波长在同一芯光纤中传输，有效节省光纤资源，在 4G 前传网络中已有小规模应用。对于上述部署 3 个 AAU 的 5G 物理站点，与光纤直驱方案单站 12 芯光纤需求相比，无源 WDM 方案仅需 1 芯光纤。该方案采用的合分波器均为无源设备，无须供电，部署位置灵活。此外，该方案还具有不

引入传输时延、对业务和传输速率透明等优点。但是，无源方案对光纤链路故障的感知能力弱，缺乏管理手段，彩光模块的管理和运维较为困难，主要依靠人工排查。

2.3 有源 WDM/OTN

基于有源 WDM/OTN 方案的 5G 前传网络架构如图 3 所示。AAU 侧和 DU 侧各配备一个有源传输设备，有源传输设备的客户侧与无线设备采用 25GE 灰光模块对接，有源传输设备的线路侧采用彩光模块或高速率灰光模块对接，线路侧光模块间通过 1 芯光纤连接。有源传输设备具体设备类型可包括 WDM、OTN 等。

有源 WDM/OTN 方案采用波分复用或流量汇聚方式，同样可以利用 1 芯光纤完成部署 3 个 AAU 的 5G 物理站点的连接，从而节省光纤资源。有源传输设备还支持操作维护管理（operation

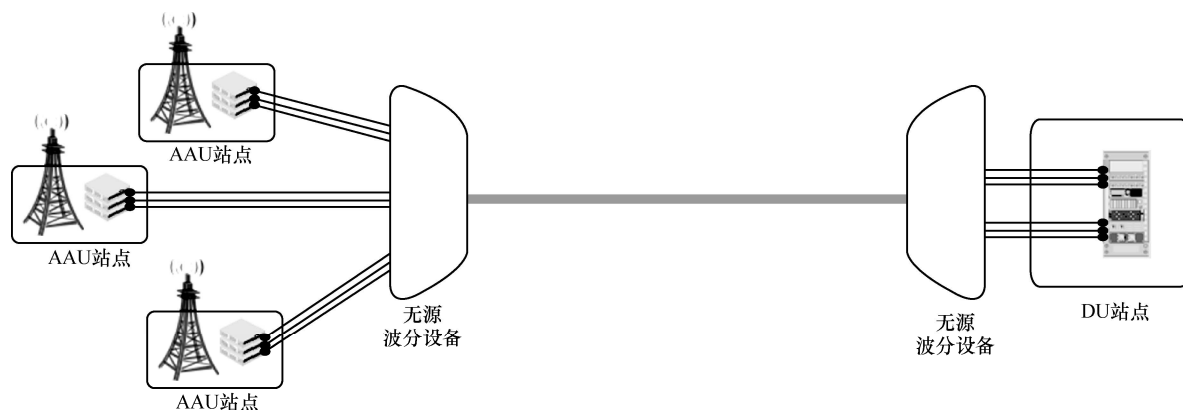


图 2 无源 WDM 方案组网架构示意图

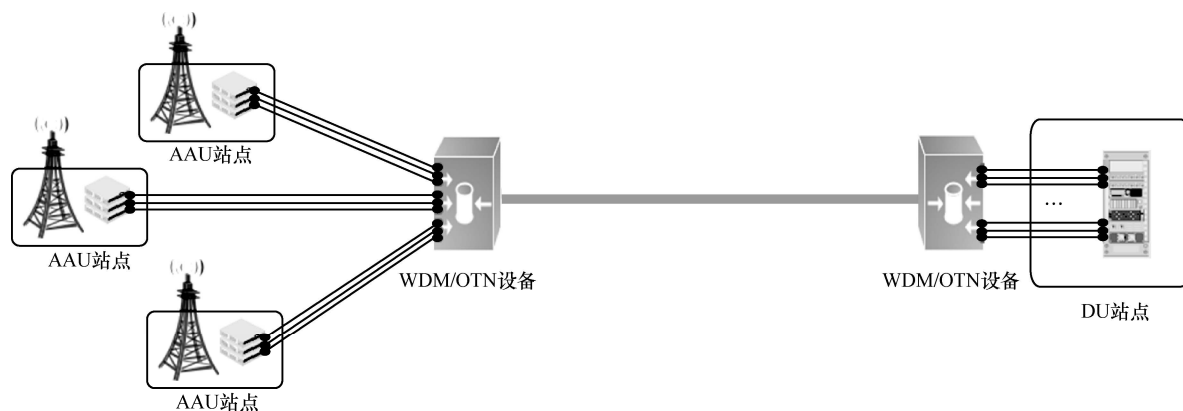


图 3 基于有源 WDM/OTN 方案的 5G 前传网络架构示意图

administration and maintenance, OAM) 和保护倒换, 通过开销实现故障的快速定位和管理, 具有有效的网络管控能力。但是, 相比光纤直驱和无源 WDM 方案, 有源传输设备成本高且需要考虑供电、空调等部署问题, 远端传输设备部署位置受限, 网络建设和运维成本高昂。

综合以上分析, 从单物理站光纤需求、成本、组网保护、工程部署和管理运维等方面对 3 种前传技术方案进一步总结比较, 具体见表 1。光纤直驱方案对光纤资源需求高、无保护能力, 无源 WDM 存在链路管理和光模块运维能力不足的问题, 有源传输设备成本高、部署位置受限。以 C-RAN 组网为主的 5G 前传网络场景下, 光纤需求量大, 需要支持 OAM 以及具备对前传链路及光模块的管控能力, 兼具低成本要求, 目前光纤直驱、无源 WDM、有源 WDM/OTN 方案均有一定挑战, 需要新的低成本前传方案。

3 open-WDM 系统及关键技术

针对 5G 前传网络的新需求、新特性, 本文提出 open-WDM 系统, 兼具可管可控和波分优势。open-WDM 系统采用波分复用技术, 显著节省前传光纤资源; 采用低成本管控技术, 对系统中的彩光模块、无源 WDM 设备和有源 WDM 设备进行统一管控, 保障有效的网络运维和管理。

3.1 系统架构

open-WDM 系统采用半有源架构, 主要包括 AAU 彩光模块、AAU 侧无源合/分波器、DU 侧有源 WDM 设备及光纤, 构成统一管控的前传网络, open-WDM 总体架构示意图架构如图 4 所示。

其中, AAU 设备采用彩光模块, 不同 AAU 上的光模块或同一 AAU 上的多个光模块均对应不同的光波长。AAU 侧无源合波器将不同 AAU 上的光模块或同一 AAU 上的多个光模块发送的

表 1 前传技术方案对比分析

对比项	光纤直驱	无源 WDM	有源 WDM/OTN
单物理站光纤需求	12	1	1
成本	低	较低	高
组网保护	无保护能力	无保护能力	支持保护
工程部署	无须规划波长	需规划 WDM 波长和模块备件安装; 部署位置灵活、无须供电	无须规划波长; 部署位置受限、需供电
管理运维	光纤故障点在网管上无法监控	光模块运维困难, 主要靠人工; 对光纤链路故障感知能力弱	有源设备开销支持故障快速定位和管理

注: 假设 3 个 AAU, 每个 AAU 出 2 个 25GE 端口

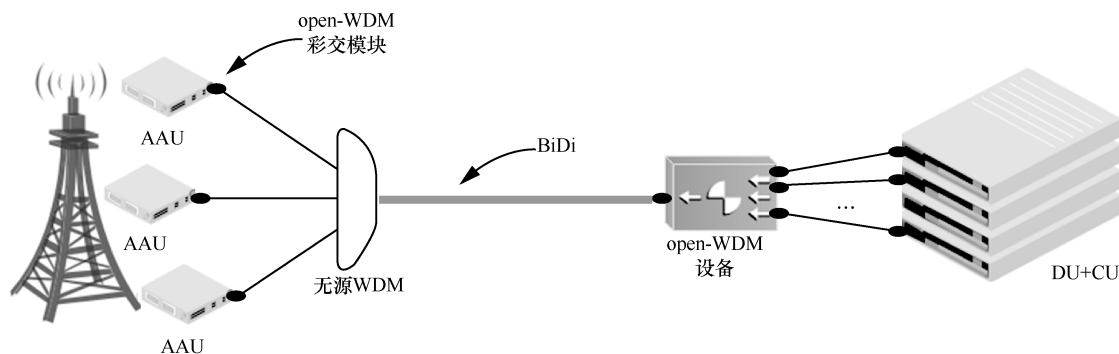


图 4 open-WDM 总体架构示意图



不同波长光信号进行波分复用后送至光纤传输，无源分波器将光纤线路传输来的不同波长光信号进行波长解复用后发送给对应的 AAU 彩光模块。DU 侧有源 WDM 设备的客户侧使用灰光或彩光模块与 DU 连接，线路侧集成合/分波器与 AAU 侧无源合/分波器通过光纤连接。除采用波分复用技术，DU 侧有源 WDM 设备还可以管控远端 AAU 设备中的彩光模块，包括查询、配置、监控等各项功能。此时，需对远端 AAU 设备中的彩光模块进行功能增强，引入 OAM 机制。

3.2 关键技术

3.2.1 管理界面划分

对于光纤直驱方案，AAU 和 DU 设备及之间光纤链路由无线系统管理。伴随 C-RAN 集中化部署，引入 WDM 技术可有效节约光纤资源。无源 WDM 设备分别位于 AAU 侧和 DU 侧，在原有无线管理域内部署无源 WDM 设备后，导致无线和传输专业管理界面划分问题。WDM 设备通常作为传输设备，但是无源 WDM 设备不支持管理，无网管功能，传输专业无法有效管理。而无线专业仅能管理 AAU 和 DU 设备，同样无法管理无源 WDM 设备。Open-WDM 管理界面划分对比示意

图如图 5 所示。

open-WDM 架构重新定义了无线与传输专业的管理界面，其中，传输专业可对 AAU 光模块、光纤链路、DU 侧有源设备进行管理，无线专业则对 AAU（不含光模块）、DU 进行管理。管理域的明确划分，有利于无线、传输专业各自的维护管理、职责界定，更加符合各专业的专业特点。管理域重新划分后，由于 AAU 光模块和 DU 侧有源传输设备均支持 OAM 机制，AAU 和 DU 间的传输链路和传输设备均可以由传输网管系统进行管控。此外，该划分方式还有利于推动新的采购模式，即单独采购 AAU 彩光模块。前传网络对成本敏感、光模块需求量大，通过集中统一采购光模块，有利于市场充分竞争从而推动光模块产业链的快速发展和成本下降。

3.2.2 WDM 技术选择

open-WDM 系统的物理层采用波分复用技术，AAU 设备和 DU 侧有源 WDM 设备的线路侧均采用彩光模块，AAU 侧无源合/分波器与 DU 侧有源 WDM 设备的线路侧合/分波器通过光纤连接，构成 WDM 光层。

根据发送光信号的波长范围和间隔，目前前

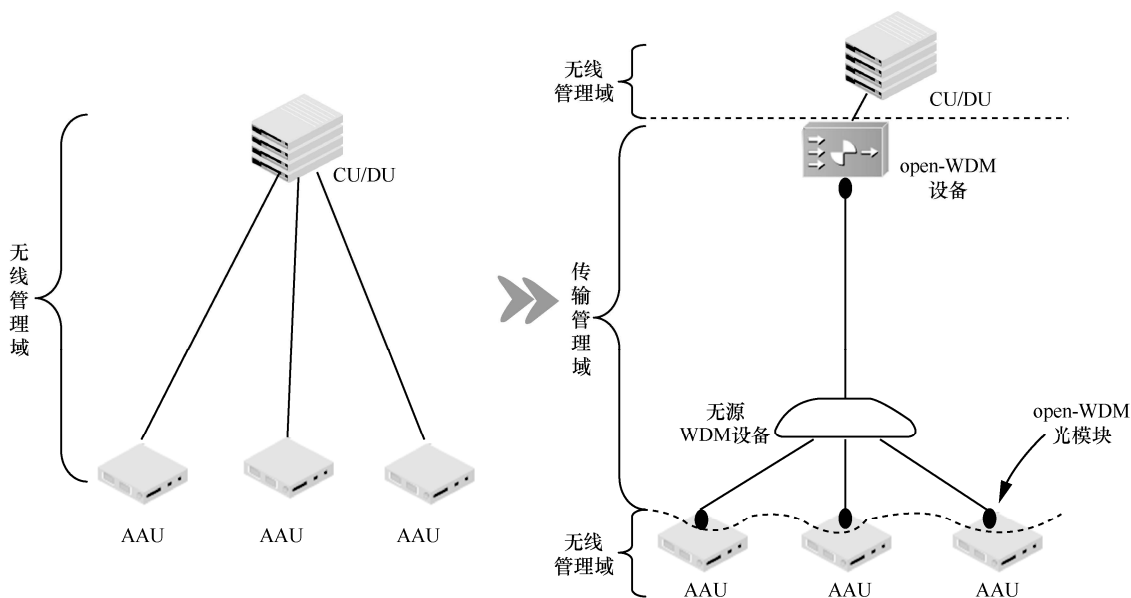


图 5 open-WDM 管理界面划分对比示意图

传网络存在 3 种潜在的 WDM 技术：粗波分复用（coarse wavelength-division multiplexing, CWDM），局域网-波分复用（local area network wavelength-division multiplexing, LAN-WDM）和密集波分复用（dense wavelength division multiplexing, DWDM）。前传网络 WDM 技术的选择与系统成本、波长数量、传输能力直接相关。以典型 5G 160 MHz 物理站为例，单站 3 个 AAU，每个 AAU 出 2 个 25GE 端口，线路侧基于单纤双向实现一站一芯，则每个物理站需要 12 波的 25GE WDM 系统，且其 25GE 彩光模块的传输性能需满足 10 km 的链路预算要求。

ITU-T G.694.2 标准中，定义了 CWDM 的波长范围为 1 271~1 611 nm，波长间隔为 20 nm，总计 18 个波长。目前，波长为 1 271 nm、1 291 nm、1 311 nm、1 331 nm 的 25GE 彩光模块已商用部署，波长为 1 351 nm、1 371 nm 的 25GE 彩光模块可以小批量供货，该 6 波 25GE 彩光模块业界采用直接调制器激光器（directly modulated laser, DML），具有成本优势。而位于 1 471~1 571 nm 的 25GE 彩光模块受光纤色散效应影响，需采用电吸收调制激光器（electro-absorption modulated laser, EML），成本大幅提升，与 DWDM 光模块价格相近。

IEEE 802.3cd 标准中，定义了 LAN-WDM 的波长范围为 1 273.54~1 309.14 nm，波长间隔为 800 GHz，总计 8 个波长。LAN-WDM 波长范围均位于 O 波段，具有色散代价小的优势，降低了对光模块性能的要求，可在链路预算满足的前提下采用 DML 等低成本器件。目前，LAN-WDM 主要面向 100GE（4×25GE）、400 GE（8×50 GE）应用，仅定义 8 个波长，且光模块工作在室内温度。

ITU-T G.694.1 标准中，定义了 12.5 GHz、25 GHz、50 GHz 和 100 GHz 及以上多种 DWDM 波长间隔。10 Gbit/s OTN 和 100 Gbit/s OTN 已大量应用 50 GHz 和 100 GHz 的 DWDM 合分波器件，可分别支持最大 48 波、96 波信号传输。目前，

25GE DWDM 彩光模块已可以小批量供货。但是，由于 C 波段色散代价较大，25GE DWDM 彩光模块需采用 EML 激光器，成本显著提高。

CWDM、LAN-WDM、DWDM 3 种方案在支持波长数量、系统成本等方面各有侧重，适用于不同的业务场景。对于波长数量为 12 波、接口速率为 25GE、传输距离为 10 km 的 5G 前传网络要求，CWDM 后 6 波产业链不成熟，色散代价大，需高成本光器件；LAN-WDM 产业链仅支持 8 个波长，色散代价小，理论上可采用低成本光器件；DWDM 波长数量充足，受限于 C 波段色散效应，需高成本光器件。综合考虑传输性能和系统成本，O 波段 WDM 具有一定优势，但需要进一步研究 12 波 O 波段 25GE WDM 技术方案。

3.2.3 管控 OAM 机制

open-WDM 架构可实现对 AAU 光模块、光纤链路、DU 侧有源设备的管理，关键在于增强 AAU 彩光模块功能，引入 OAM 机制。现有 AAU 彩光模块仅支持 AAU 对光模块基本信息的读取，如波长、速率、温度、电压、偏置电流等。open-WDM 系统中，DU 侧有源传输设备可对 AAU 的彩光模块进行管理，包括查询、配置、监控等功能。AAU 彩光模块增加 OAM 机制，需考虑封装尺寸、功耗散热、成本等因素，目前存在多种潜在技术方案。

采用 OTN 定帧长开销形式，将 eCPRI 报文作为净荷封装到定长的数据帧中，在帧的固定位置设置管理开销字节，可以实现功能完善的管控机制。但是，需要增加成帧芯片处理高速业务流，成本高，对光模块的封装尺寸、功耗散热有很大压力。

采用以太网 OAM 机制，在业务流中插入以太网报文，管理信息带宽较高，可以实现丰富的管理协议。但是，光模块在收发过程中需要缓存高速 eCPRI 以太网报文，对芯片处理能力要求高、实现复杂、成本高，功耗和光模块面积均存在挑战。



采用带外方式，如 WDM 系统中利用光监控信道（optical supervisory channel, OSC）通道来传递管理信息，方案原理和实现简单，但是，需要占用单独波长，浪费宝贵的波长资源，提升系统成本。

采用光层低速幅度深度调制，在原有光信号基础上调制低速率的管理信息。该方案不涉及高速电层处理，对光模块硬件改造较小，管理信息速率一般为 Kbit/s~Mbit/s 量级，实现成本较低，但是，管理信息带宽较小，不适于大带宽管理功能。

open-WDM 系统面向 5G 前传网络，OAM 机制应尽量简化以兼顾成本，光层低频调制方式具有一定优势。此外，在 C-RAN 高度集中且业务重要的场景，考虑引入光层保护技术，在 AAU 侧合波器后增加 1:2 分光器、DU 侧有源设备中增加光开关，实现“1+1”保护。

4 结束语

本文结合 C-RAN 组网对 5G 前传网络的新需求，提出了面向 5G 前传网络的 open-WDM 系统。open-WDM 系统中采用波分复用技术，可节省 10 倍以上前传光纤资源；采用半有源架构，支持远端设备的灵活部署；基于 AAU 功能增强的彩光模块和 DU 侧有源设备，实现 AAU 彩光模块、DU 侧有源设备及之间链路的低成本管控，支持 5G 前传网络的管理运维。

参考文献：

- [1] IMT-2020(5G). 5G 承载需求白皮书[R]. 2018.
IMT-2020(5G). 5G transport requirements white paper[R]. 2018.
- [2] ITU-T. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid:G.694.2[S]. 2003.
- [3] IEEE. 50 Gbit/s, 100 Gbit/s and 200 Gbit/s ethernet task force: 802.3cd[EB]. 2018.
- [4] ITU-T. Spectral grids for WDM applications DWDM frequency grid:G.694.1[S]. 2012.
- [5] 扶奉超, 王鹏, 毛宇, 等. 5G 前传方案研究和部署策略[J]. 电信科学, 2019, 35(8): 147-151.
FU F C, WANG P, MAO Y, et al. Key technology and deploy-

ment strategy of 5G fronthaul transport networks[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(8): 147-151.

- [6] 赵春华. 5G 承载网的架构演进及带宽分析[J]. 电信科学, 2019, 35(2): 85-89.

ZHAO C H. Architecture evolution and bandwidth analysis of 5G bearer networks[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(2): 85-89.

[作者简介]



王东（1986—），男，博士，中国移动通信有限公司研究院工程师，主要从事 OTN/WDM、前传 open-WDM、SPN 光层领域的研究和标准化工作。

李晗（1975—），男，博士，中国移动通信有限公司研究院教授级高级工程师，主要从事 SPN/PTN、前传 open-WDM、OTN/WDM、PON 和同步等光通信领域的策略、标准和技术研究工作。

张德朝（1979—），男，博士，中国移动通信有限公司研究院高级工程师，主要从事 SPN/PTN、OTN/WDM、前传 open-WDM、PON 和同步等光传输与接入网领域的技术研究和标准化工作。

蔡谦（1978—），男，中国移动通信有限公司研究院工程师，主要从事 5G 回传网络 SPN 和前传网络 open-WDM 的研究工作。

孙将（1987—），男，博士，中国移动通信有限公司研究院工程师，主要从事 OTN/WDM、前传 open-WDM 的研究工作。

赵阳（1985—），男，博士，中国移动通信有限公司研究院工程师，主要从事 OTN/WDM、SOTN、前传 open-WDM 的研究工作。

李允博（1975—），男，中国移动通信有限公司研究院教授级高级工程师，主要从事 100GE/400GE OTN/WDM、前传 open-WDM、SPN 光层领域的研究和标准化工作。

韩柳燕（1982—），女，博士，中国移动通信有限公司研究院高级工程师，主要从事 SPN、前传 open-WDM、同步技术领域的研究和标准化工作。