



专栏：5G 技术与组网应用

面向 5G 前传的新型 CWDM 承载方案

程明, 杜喆, 张德智

(中国电信股份有限公司研究院, 上海 200122)

摘要: 随着 5G 网络流量快速增长, 6 通道 25 Gbit/s 前传承载需求日趋明显。介绍了移动前传在现网部署的主要方案和标准化情况, 针对 6 通道 25 Gbit/s 前传低成本承载需求, 提出了一种基于 CWDM/光环行器的承载方案, 分析了该方案的优势与面临的挑战, 介绍了该方案在实验室测试和现网试点的情况。

关键词: 5G 前传; 粗波分复用; 光环行器; 单纤双向

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021206

A novel CWDM bearer scheme for 5G fronthaul network

CHENG Ming, DU Zhe, ZHANG Dezhi

Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Shanghai 200122, China

Abstract: With the rapid growth of 5G network traffic, the bearer requirement for 6-channel 25 Gbit/s fronthaul has become increasingly obvious. The main schemes and standardizations of fronthaul technology in the existing network were introduced. A novel bearer scheme based on CWDM and optical circulator to satisfy the requirements for 6-channel 25 Gbit/s fronthaul with low cost was proposed. The advantages and challenges of the scheme were analyzed. Tests in laboratory and pilots in actual network were introduced.

Key words: 5G fronthaul, coarse wavelength division multiplexing, optical circulator, single fiber bi-directional

1 引言

近几年, 5G 网络实现了从小规模试点向大规模商用部署的快速转变, 与此同时, 5G 前传的现网建设方案也随之发生了改变。目前, 5G 前传承载主流方案已基本完成从采用双纤双向灰光模块的光纤直连模式向采用 6 波 3 通道 25 Gbit/s 粗波分复用 (coarse wavelength division multiplexing, CWDM) 的无源波分模式转变。

随着中国电信与中国联通共建共享 200 MHz 频谱带宽, 特别是 5G 网络流量快速增长, 6 通道 25 Gbit/s 前传承载需求日趋明显。现有 25 Gbit/s CWDM 方案中的前 6 波 (1 271~1 371 nm) 一般采用直接调制器激光器 (directly modulated laser, DML), 具有成熟的产业链支持和明显的价格优势。但是, 在面临 6 通道 12 波 25 Gbit/s 承载需求时, CWDM 方案的后 6 波 (1 511~1 611 nm) 面临色散代价大、需要采用电吸收调制激光器



(electro-absorption modulated laser, EML)等问题,整体方案成本较高。业内为此提出多种解决方案并开展了相关的标准化工作,主要包括:细波分复用(LAN wavelength division multiplexing, LWDM)、中等波分复用(medium wavelength division multiplexing, MWDM)、密集波分复用(dense wavelength division multiplexing, DWDM)等。上述波分复用解决方案在高带宽、线路保护、管理维护等方面都有一定的提升和创新,但最受运营商关注的低成本部署需求尚未得到满足。

2 现网部署的移动前传方案及标准化

2.1 4G 前传及标准化

4G 时代,无线基站基带处理单元(base band unit, BBU)与射频拉远单元(radio remote unit, RRU)之间的前传互联主要采用通用公共无线接口(common public radio interface, CPRI),接口速率为 10 Gbit/s 及以下,BBU 与 RRU 之间以光纤直连为主。4G 部署初期,前传基本采用双纤双向灰光模块互连。随着 BBU 集中、RRU 拉远的基站建设模式规模推广,光纤资源被大量消耗。因此,在 4G 部署中后期,采用能够节省一半光纤的单纤双向灰光模块成为主流。在一些光纤资源特别紧张的区域,有运营商少量部署了基于 CWDM 彩光模块的前传网络。初期采用 CWDM 彩光模块的前传方案价格非常昂贵,甚至达到灰光模块直连价格的 5~10 倍。后期随着应用规模的扩大,CWDM 彩光模块价格有所下降,但仍是灰光模块的 2~3 倍。

为了规范 4G 前传光模块,中国电信集团公司牵头制定了行业标准 YD/T 3131-2016《无线基站 BBU 与 RRU 互连用 SFP/SFP+光收发合一模块》,首次提出将无线前传链路光功率预算模型作为前传光模块指标制定的依据。4G 前传链路的光功率预算需要考虑传输(光纤含熔接)损耗、活动连接器损耗(多波系统增加 5 dB 的复用/解复用器插

入损耗)和维护冗余等因素,该链路预算模型在 5G 前传光模块的指标制定中也被参考。该标准主要对 10 Gbit/s 及以下速率的双纤双向灰光模块、单纤双向灰光模块进行了指标规范,也涵盖了基于 CWDM 的彩光模块技术要求,包括 ITU-T G.694.2 标准规范的 18 个波长,从 1 271 nm 到 1 611 nm,通道间隔 20 nm,但并未对不同波长的彩光模块指标进行差异细化。

2.2 5G 前传及标准化

5G 时代,无线基站有源天线单元(active antenna unit, AAU)与分布单元(distributed unit, DU)之间的前传互联主要采用 25 Gbit/s 速率的增强型通用公共无线接口(enhanced CPRI, eCPRI)。对于低频段 100 MHz 频谱宽度、S111(单频三扇面站址)、64T64R 站型,通常需要 3 通道 25 Gbit/s 的 eCPRI 链路。5G 试商用及部署初期,主要由无线主设备厂商提供前传解决方案,以 25 Gbit/s 双纤双向灰光模块互连为主。2019 年,运营商小规模集采和应用了 25 Gbit/s 单纤双向灰光模块,同年运营商省公司招标采购的 25 Gbit/s CWDM 彩光模块规模则超过百万量级。2020 年,随着 5G 网络部署规模的扩大和建设进度的加快,特别是 25 Gbit/s CWDM 彩光模块价格快速下降,CWDM 无源波分方案成为 3 通道 25 Gbit/s 前传承载的主流,国内运营商都开始大规模集采招标用于 5G 前传的 25 Gbit/s CWDM 彩光模块,部分无线设备的集采招标模型也明确要求采用 CWDM 无源波分方案。

现有用于 5G 前传的 25 Gbit/s CWDM 无源波分方案使用的波长是前 6 波(1 271~1 371 nm),主要原因是短波长的色散代价较小,且产业链更为成熟(前 4 波可共用 100GE CWDM4 产业链),具有明显的成本优势。对于 3 通道 25 Gbit/s 模型,DU 侧彩光模块一般放置在局端,可以只用满足商业温度要求,而 AAU 侧彩光模块一般放置在室外,需要满足工业温度要求。在综合考虑产业链

成熟度（1 351 nm 和 1 371 nm 彩光模块产业链相对较弱）后，行业内基本形成共识：1 271 nm、1 291 nm、1 311 nm CWDM 彩光模块放置在 AAU 侧，1 331 nm、1 351 nm、1 371 nm CWDM 彩光模块放置在 DU 侧，且成对使用。与 CWDM 彩光模块配套应用的 CWDM 复用/解复用器，早期主要使用多个不同的介质薄膜滤波器（thin film filter, TFF）进行串联堆叠实现。每个 TFF 都能把特定的单一波长通过透射筛选出来，从而实现复用/解复用功能，因此，可以通过调整 TFF 的串联排列顺序来控制各波长的插入损耗。根据链路预算模型，由于长波长的发送和色散代价（transmitter and dispersion penalty, TDP）较大，所以对 CWDM 复用/解复用器的要求是长波长插入损耗更小，从而实现 TDP 与线路损耗的均衡。此外，为了满足 4G 与 5G 混传的场景，运营商提出了基于 CWDM 的 12 波方案，其中，1 271~1 371 nm 波长为 25 Gbit/s 速率用于 5G 前传，1 471~1 571 nm 波长为 10 Gbit/s 速率用于 4G 前传。12 波 CWDM 方案在实际应用中相对较少，主要原因是现网对存量 4G 前传链路进行割接会影响正常业务，而考虑到新建的 4G 基站未来向 5G 基站平滑升级，会选择直接采用 25 Gbit/s 速率接口。

5G 前传光模块行业标准的制定略慢于现网部署速度。2019 年发布了 25 Gbit/s 双纤双向灰光模块行业标准 YD/T 3125.2-2019《通信用增强型 SFP 光收发合一模块(SFP+) 第 2 部分: 25 Gbit/s》，2020 年发布了 25 Gbit/s 单纤双向灰光模块行业标准 YD/T 2759.2-2020《单纤双向光收发合一模块 第 2 部分: 25 Gbit/s》。目前，业内正在加紧制定针对 5G 前传场景的 xWDM（CWDM、LWDM、MWDM、DWDM）相关行业标准。其中，涉及 CWDM 方案的行业标准有系统技术要求《城域 N×25 Gbit/s 波分复用（WDM）系统技术要求 第 2 部分: CWDM》和 25 Gbit/s CWDM 光模块技术要求《25 Gbit/s 波分复用（WDM）光收发合一模

块 第 1 部分: CWDM》。此外，与 25 Gbit/s CWDM 光模块配套使用的 CWDM 复用/解复用器技术要求《城域接入用单纤双向波分复用器 第 2 部分: CWDM》刚于 2020 年年底完成行业标准立项。

3 新型 CWDM 承载方案

3.1 新型 CWDM 承载方案架构

为了满足 6 通道 25 Gbit/s 前传低成本承载需求，中国电信股份有限公司研究院率先提出并验证了基于 CWDM/光环行器的承载方案。该承载方案采用无源架构，主要包括 DU 侧光模块、DU 侧复用/解复用器、AAU 侧复用/解复用器和 AAU 侧光模块，总体架构示意图如图 1 所示。

其中，DU 侧光模块采用 CWDM 前 6 波（工作波长 1 271~1 371 nm），工作温度要求为商业温度或扩展温度。DU 侧复用/解复用器集成了 6 波复用器、6 波解复用器和光环行器，工作温度要求为商业温度或扩展温度，DU 侧彩光模块发送的光信号经复用器合波后，通过光环行器到达线路侧，从 AAU 侧过来的合波信号则经过光环行器和解复用器到达 DU 侧彩光模块。AAU 侧复用/解复用器集成了 6 波复用器、6 波解复用器和光环行器，工作温度要求为工业温度或扩展温度，AAU 侧彩光模块发送的光信号经复用器合波后，通过光环行器到达线路侧，从 DU 侧过来的合波信号则经过光环行器和解复用器到达 AAU 侧彩光模块。AAU 侧光模块采用 CWDM 前 6 波，工作温度要求为工业温度或扩展温度。

该方案利用 CWDM 前 6 波，通过复用器和解复用器实现合分波，利用光环行器的方向性实现合波信号在主干光纤中的单纤双向传送，从而完成 6 通道 25 Gbit/s 的承载。其中，光模块接收机为宽谱接收，链路的波长配对由光模块接收机与复用/解复用器之间光纤连接进行选择。两端波长配对建议沿用原有 CWDM 前传波长配对方案，即 1 271 nm 与 1 331 nm 波长配对，1 291 nm 与 1 351 nm

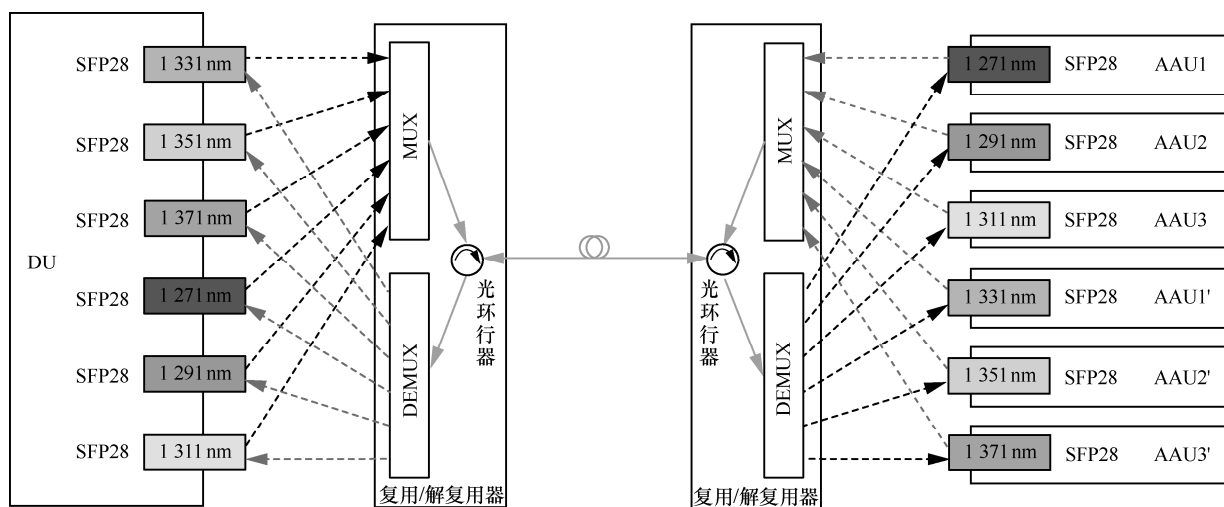


图1 基于光环行器的 CWDM 承载方案架构示意图

波长配对，1 311 nm 与 1 371 nm 波长配对。

3.2 新型 CWDM 承载方案的优势与面临的挑战

该方案使用 CWDM 前 6 波彩光模块，产业链最为成熟，相比其他方案有明显的成本优势。与原有 CWDM 无源波分方案相比，新方案使用的彩光模块指标略有提升，这是因为该系统引入一对光环行器会带来 1 dB 左右的插入损耗。此外，前 6 波彩光模块都可能放置在 AAU 侧，因此 1 331 nm、1 351 nm、1 371 nm 彩光模块也需要满足工业温度或扩展温度的要求，该需求可以通过在光模块中集成低成本的加热器来满足。对于复用/解复用器，其集成的 6 波复用器和 6 波解复用器非常成熟，支持 CWDM 前 6 波的光环行器技术上不复杂并已有成熟商用产品，完全能够满足规模部署的供货需求。

该方案面临的最大的挑战是引入光环行器后前传链路上的反射光更容易对正常的业务信号光产生干扰。采用该方案的前传链路分为 3 段：DU 到复用/解复用器（DU 侧）之间的局内跳纤段；复用/解复用器（DU 侧）到复用/解复用器（AAU 侧）之间的主干光纤段；复用/解复用器（AAU 侧）到 AAU 之间的配线光纤段。根据前传链路光反射点的位置不同，产生的反射光对正常业务光信号的影响也不一样。以 DU 侧发送

的业务光信号为例，不同光反射点对其影响如图 2 所示。

（1）当光反射点出现在 DU 到复用/解复用器（DU 侧）之间时，产生的反射光将从光反射点折返回光模块的发送端。光模块发送机的光回波损耗容限指标能够确保光模块容忍一定的反射光信号，此外，25 Gbit/s 光模块在发送端内置有隔离器来降低反射光对光模块发送机的影响。

（2）当光反射点出现在复用/解复用器（DU 侧）到复用/解复用器（AAU 侧）之间时，产生的反射光将从光反射点折返，与 AAU 侧发送的相同波长业务光信号一起，经过复用/解复用器（DU 侧）中的光环行器和解复用器，到达 DU 侧光模块的接收端。此时，AAU 侧发送的正常光信号将受到反射光的同频串扰，降低链路的光信噪比（optical signal noise ratio, OSNR），从而影响正常业务的承载。

（3）当光反射点出现在复用/解复用器（AAU 侧）到 AAU 之间时，产生的反射光将从光反射点折返回复用/解复用器（AAU 侧）中的光环行器，因为光环行器具有方向性、高隔离度和高回波损耗等特性，因此反射光将不会继续传播。

从上述分析可知，主干光纤的链路质量情况将是影响该方案在现网应用效果的主要因素。

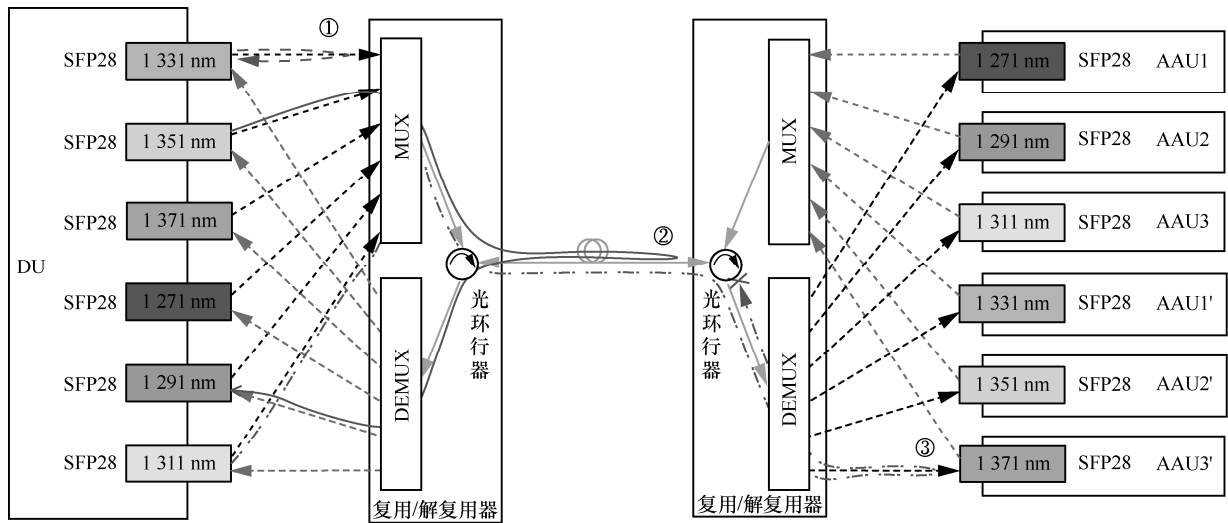


图2 不同光反射点对 CWDM/光环行器承载方案的影响

对于正常连接的主干光纤，其链路光反射一般较小，因为光纤连接器和光环行器的回波损耗很大。可能出现较强反射光的情况主要有：光纤连接器或光纤断开、光纤连接器虚连接、光纤端面脏污等。

当光纤连接器或光纤断开时，正常业务光信号将中断，而断开的端面可能产生较强反射光并形成光路环回，从而可能会影响现场运维人员的故障判断。

当光纤连接器虚连接或光纤端面脏污时，会增加光纤线路损耗，并有一定概率产生相对较强的反射光，从而导致业务光信号 OSNR 下降。当业务光信号 OSNR 劣化到一定程度时，会影响光模块接收正常的业务光信号。

此外，当该方案承载 3 通道时，如果波长配对沿用了原有 CWDM 无源波分方案，即前 6 波波长两两配对，则业务光信号将不受反射光的影响，因为反射光与业务光不会出现同波长且同方向的情况。

3.3 线路光反射的影响分析

在传输系统中，OSNR 一般由式 (1) 定义，单位为 dB。

$$\text{OSNR} = P_i - N_i + 10 \lg \frac{B_m}{B_r} \quad (1)$$

其中， P_i 是第 i 个通路内的信号功率，单位为 dBm， N_i 是等效噪声带宽 B_m 范围内窜入的噪声功率，单位为 dBm， B_m 是噪声等效带宽， B_r 是参考光带宽。

对于 CWDM/光环行器方案，前传链路距离一般较短，当 OSNR 劣化可能影响正常业务光信号接收时，反射光将明显强于后向瑞利散射噪声，等效噪声主要需要考虑反射光的因素。当接收到的业务光信号与反射光信号中心波长相同时，反射光对业务光的影响一般最大。此时，OSNR 可以简化为第 i 个通路内信号功率（单位 dBm）与反射光功率（单位 dBm）的差值。

参考 SDH 通信系统和 WDM 光纤传输系统工程设计要求，10 Gbit/s 传输系统接收机 OSNR 容限为 20 dB，25 Gbit/s 传输系统接收机 OSNR 容限约为 24 dB（提高 4 dB 左右），即接收端比特误码率不低于 10^{-12} 时，接收机可以容忍的最小 OSNR 值为 24 dB。

4 新型 CWDM 承载方案的实验室评估与现网试点

4.1 实验室测试评估

新方案使用的 CWDM 彩光模块与原方案相比，只在发光功率或接收灵敏度指标上提高



了 1 dB，以及要求安装在 AAU 侧的 CWDM 6 波（工作波长 1 271~1 371 nm）光模块工作温度均满足工业温度。25 Gbit/s CWDM 彩光模块的可靠性和稳定性已经过行业内光模块厂商测试和现网规模部署的检验。对于内置光环行器的 CWDM 复用/解复用器，其工作温度要求满足扩展温度，插入损耗指标增加 1 dB。光环行器、CWDM 复用器和解复用器均为无源器件，作为成熟商用器件，其可靠性和稳定性也经过行业内光器件厂商的测试检验。

为了评估光反射可能造成的影响，中国电信股份有限公司研究院定制了集成 6 波复用器、6 波解复用器、光环行器的 CWDM 复用/解复用器，通过了第三方检测机构的功能、性能和高低温在线可靠性测试，并在实验室开展了利用新型 CWDM/光环行器方案模拟承载前传链路的测试工作，得到以下结果。

- 当光纤链路正常连接时，该系统在室温及高低温环境下均能够正常工作。
- 在 CWDM 彩光模块和复用/解复用器之间增加反射点或提高反射光功率，正常业务不受影响。
- 当主干光纤段的光纤连接器或光纤断开时，可能产生较强的反射光信号。特别地，当复用/解复用器的线路端口断开时，支路侧同波长的出射光比入射光功率小 18~20 dB。该出射光不是因为光环行器串扰导致，而是因为线路侧端口出现大的光反射导致，如图 3 所示。此时，业务处于中断/

环回状态，业务板卡告警指示灯变红，但是端口告警指示灯可能显示正常，需要网管或现场运维人员基于复用/解复用器不同端口的光功率数据做出综合故障判断。当线路端口连接恢复正常后，无线设备能够从环回状态中恢复正常。

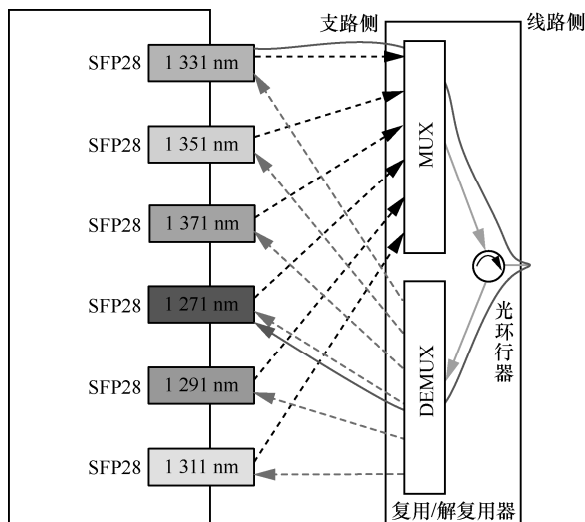


图 3 复用/解复用器线路端口断开后反射光的传播路径示意图

- 当人为造成光纤连接器虚连接或光纤连接器端面脏污时，有一定概率在产生较强反射光的同时业务光信号不中断。此时，需要根据光模块接收端的业务光信号光功率和反射光信号光功率来初步判断是否会对业务的正常接收产生影响。

为了评估反射光对业务的影响，中国电信股份有限公司研究院搭建了测试环境，如图 4 所示。光模块 1 模拟正常业务光信号的收发，光模块 2 模拟发送反射光，温度控制管理模块通过温度调

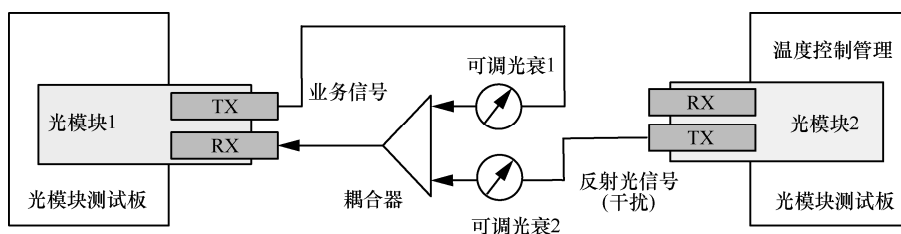


图 4 反射光对业务影响实验室评估测试示意图

节来控制光模块2发送光信号的中心波长,可调光衰减器用于控制业务光信号和反射光信号的光功率。

实验室测试发现,业务光信号能否正常传输与反射光的中心波长和光功率关联度很高。反射光与业务光的中心波长越接近,光模块对反射光的光功率容忍度越低,即要求业务光与反射光的光功率差值越高。图5为实验室测试环境下,误码率为 10^{-12} 时,不同测试光模块接收端反射光信号与业务光信号的中心波长差值和光功率差值之间的关系。

当反射光与业务光中心波长非常接近($\leq \pm 0.1$ nm)时,为确保传输前误码率 $<10^{-12}$,业务光应比反射光的光功率高23.5 dB以上,测试结果与理论计算基本一致。随着反射光与业务光中心波长偏差越多,正常业务承载对业务光与反射光之间的光功率差值要求也越低。当反射光与业务光中心波长之间的差值超过0.4 nm后,业务光比反射光的光功率高8 dB以上,就能保证传输前误码率小于 10^{-12} 。此外,5G前传25 Gbit/s eCPRI采用前向纠错(forward error correction,

FEC) RS(528, 514)有约5 dB的编码增益,会降低对接收端OSNR的要求。实际应用中,相同规格光模块的发射中心波长会有差异,但为保证接收端的反射光不对正常接收的业务光产生影响,建议线路测试时确保业务光应比反射光的光功率高19 dB以上。

4.2 现网试点

为了验证新型CWDM承载方案的可行性,2020年,中国电信在多个地市公司开展了现网试点测试工作。试点场景包括:同波长配对部署3通道25 Gbit/s、波长两两配对部署3通道25 Gbit/s、部署6通道25 Gbit/s。目前,所有现网试点基站均运行良好。

现网测试中发现,城市范围内部署的5G基站普遍前传距离较短,接收端光功率也较大。同向同波长的业务光与反射光之间的差值正常情况下都超过20 dB(复用器/解复用器与主干光纤连接后在线测试),部分线路质量好的光纤中业务光与反射光之间的差值甚至超过30 dB。现网试点过程中也发现了个别主干光纤存在线路质量较差、反射光较强的情况,此时,光纤链路在线路损耗

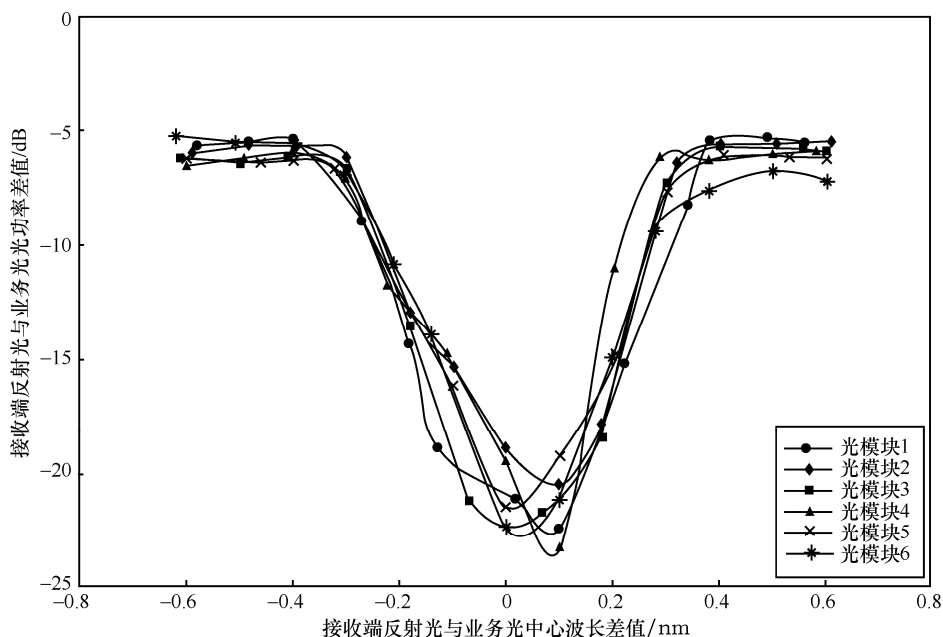


图5 业务光信号与反射光信号的光功率差值和中心波长差值之间的关系



等指标上也不满足要求,需要进行施工整改。绝大多数光反射问题可以通过重新插拔光纤和清洁光纤端面来解决。

5 结束语

基于 CWDM/光环行器的 5G 前传承载方案,利用 CWDM 前 6 波波长,通过光环行器的方向性实现单纤双向 12 波光信号的传送,能够满足 6 通道 25 Gbit/s 的低成本承载需求。通过实验室测试和现网试点,初步验证了该方案的可行性及稳定性。采用该方案的前传系统对反射光更加敏感,可能会对后续现网建设、施工、验收及维护带来一定挑战,但这些问题可以通过制定相关规范和进行流程管理予以解决。

参考文献:

- [1] IMT-2020(5G)推进组. 5G 承载光模块白皮书[R]. 2020.
IMT-2020(5G) Promotion Group. 5G transport optical transceiver module white paper[R]. 2020.
- [2] 宋梦洋, 李岩, 蒋波, 等. 5G 光模块技术及方案对比[J]. 信息通信技术与政策, 2020(5): 29-32.
SONG M Y, LI Y, JIANG B, et al. 5G optical module technologies and programs comparison[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2020(5): 29-32.
- [3] 中华人民共和国工业和信息化部. 无线基站 BBU 与 RRU 互连用 SFP/SFP+光收发合一模块: YD/T 3131—2016[S]. 2016.
Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China. SFP/SFP+ optical transceiver module between BBU and RRU for base station interconnecting: YD/T 3131—2016[S]. 2016.
- [4] 郑波. 高速率 WDM 系统光信噪比(OSNR)计算方法及软件实现[J]. 邮电设计技术, 2014(1): 60-66.
ZHENG B. The calculation method of OSNR in high rate WDM system and software realization[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2014(1): 60-66.
- [5] 熊菲, 高鹏, 朱晓庚. 同波长单纤双向传输技术在电力专用光纤

通信网络中的应用探讨[J]. 内蒙古电力技术, 2017, 35(4): 5-9.

XIONG F, GAO P, ZHU X G. Application of single-wavelength bidirectional transmission in optical fiber communication network of power system[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2017, 35(4): 5-9.

- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 波分复用(WDM)光纤传输系统工程设计规范: GB/T 51152—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for engineering design of wavelength division multiplexing (WDM) optical fiber transmission systems: GB/T 51152—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2016.

- [7] 中国通信标准化协会. WDM 系统性能监视技术研究[R]. 2018.
China Communications Standards Association. Technical Requirements of Performance Monitoring in WDM System[R]. 2018.

[作者简介]



程明(1985-), 男, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为 5G 前传、光传输、量子保密通信等。



杜喆(1978-), 男, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为光接入、PON 综合业务承载、光链路测量与诊断、5G 承载等。



张德智(1978-), 男, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为光接入、PON 综合业务承载、PON SDN、5G 承载等。