

频谱分割波分复用无源光网络及色散影响

寿国础 胡怡红 郭志刚 钱宗珏

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要 频谱分割是使用窄带光滤波器选择宽带光源光谱的一个切片的 WDM 技术,在波分复用无源光网络(WDM-PON)中采用波分复用器(λ MUX)进行频谱分割,能够实现光网络单元(ONU)的无色化。模型分析表明由于频谱分割的作用,使得波分复用器光通带外的频谱成分被过滤,减小了宽带光源的色散影响。在 20 nm CWDM 标准信道间隔下,能够以不超过 1 dB 的光功率代价支持 155 Mb/s 信号在 20 km 的 G. 652 常规光纤上传输;在 0.8 nm DWDM 信道间隔下则能够支持 2.5 Gb/s 信号传输,色散引起的光功率代价低于 0.5 dB。采用中心波长为 1550 nm、谱宽 70 nm、输出功率为 -10 dBm 的 LED,研制了 125 Mb/s 速率信号直接调制的无色 ONU。在信道间隔为 20 nm、光纤长度为 20 km 的 4 波长 WDM-PON 系统上进行测试,色散等因素引起的光功率代价小于 1 dB,系统光功率余量则超过 5.6 dB。

关键词 光通信;波分复用无源光网络;频谱分割;无色光网络单元;色散

中图分类号 TN915.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0312

Spectrum-Sliced Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Networks and Effects of Chromatic Dispersion

Shou Guochu Hu Yihong Guo Zhigang Qian Zongjue

(School of Information and Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Spectrum-slicing is an attractive WDM technique for realizing colorless ONUs in wavelength division multiplexed passive optical network (WDM-PON). It uses wavelength multiplexer (λ MUX) as optical filters to obtain a spectral slice of light from a broadband light source (BLS) and modulates encode data onto the slice. A theoretical analysis elucidates that the effects of chromatic dispersion will reduce because the spectrum outside the bandwidth of λ MUX will be filtered out after spectrum slicing. At the 20 nm CWDM channel spacing, 155 Mb/s per channel at distance of 20 km on a G.625 fiber is supported with optical power penalty less than 1 dB; while at 0.8 nm DWDM channel spacing, 2.5 Gb/s per channel is supported with optical power penalty less than 0.5 dB. Direct modulation colorless ONU at 125 Mb/s is proposed and demonstrated by using LED with centre wavelength at 1550 nm, output power of -10 dB and a bandwidth of 70 nm. A four-channel WDM-PON over 20 km fiber with channel spacing of 20 nm is tested. The result shows optical power penalty caused by chromatic dispersion is less than 1 dB and optical power margin is more than 5.6 dB.

Key words optical communications; wavelength division multiplexed passive optical networks (WDM-PON); spectrum slicing; colorless optical networks unit (ONU); chromatic dispersion

1 引言

近年来,随着面向光纤到户(FTTH)光接入网的发展,波分复用无源光网络(WDM-PON)受到了人们更多的关注。与目前已应用的 EPON、GPON 等基于时分复用方式的无源光网络(TDM-PON)相比,WDM-PON 具有容量大、易升级、信息安全性等优

点,被认为是新一代的光接入网技术^[1,2]。

经济性是 WDM-PON 能否推广应用的一个决定因素。虽然 WDM 技术已广泛地应用于骨干网络,近些年来在城域网中也得到了应用,但骨干网、城域网中的 WDM 技术应用于面向 FTTH 的光接入网中的成本过高;另一方面,传统的 WDM 技术

常基于固定波长激光器(DFB 或 VCSEL),如果直接应用于 WDM-PON,在系统安装时需要准备不同波长的光网络单元(ONU),工程建设和网络运行维护时不仅要保存特定波长清单,而且需要多种波长的备件备品,这样很难实现 WDM-PON 的规模化应用。因此人们希望能够以经济的方式实现 WDM-PON 系统,并且 ONU 的波长能够灵活配给,使 ONU 无色化^[3]。

频谱分割是实现 WDM-PON 的一项关键技术^[4],当在 ONU 中采用宽带光源,ONU 的波长由 WDM-PON 中的波分复用器(λ MUX)端口确定,而各个 ONU 可以一模一样。用作频谱分割的宽带光源主要有发光二极管(LED)、超辐射发光二极管(SLD)、掺铒光纤放大器(EDFA)等。LED 成本低廉并具有大的谱宽、高的温度稳定性、高的可靠性。但由于 LED 大的谱宽,速度距离乘积受到光纤色散限制,基于 LED 的系统一般只能支持数十 Mb/s 速率信号传输几公里^[5],频谱分割技术则能够有效减小实际传送的光信号谱宽,为 LED 在光接入网中的高速应用创造了条件。本文定量分析了宽带光源频谱分割后色散对于系统传输性能的影响,研制了以 LED 作为宽带光源的无色 ONU,并结合 CWDM 频谱分割 WDM-PON 系统进行了测试验证。

2 原 理

频谱分割是使用窄带光滤波器选择宽带光源(BLS)光谱的一个切片(Slice)的一种 WDM 技术。如果宽带光源发射的光谱足够宽,则光信号在通过 WDM-PON 中的波分复用器(λ MUX)时被分割,只有 λ MUX 通带部分的相应光谱信号被允许通过,也就是说每个输出端口的信号谱都是原来宽带光源光谱信号的一部分,但都带有被调制的信息,因此通过 λ MUX 后获得了波分输出。输出波长取决于与宽带光源相连的 λ MUX 端口,这时 λ MUX 相当于中心频率互不相同的一组光滤波器。

频谱分割 WDM-PON 通常在 ONU 中采用宽带光源,产生的信号经 λ MUX 时进行频谱分割和复用,ONU 成为无色。

3 色散特性

宽谱光信号在光纤上传输时会受到色散的影响。色散会导致完全闭眼效应,它将限制信号传输性能。为了便于考察其影响,以色散引起的光功率代价进行评估。由于色散与接收机展宽了的脉冲形状等许多

因素有关,对于光功率代价的精确计算相当困难,通常采用假设输入光脉冲服从高斯分布建立模型加以分析^[5]。以不同信道间隔进行频谱分割,针对不同线路速率,可以得出由色散引起的光功率代价如图 1(a)(粗波分频谱分割)、图 1(b)(密集波分频谱分割)所示。其中,选传输距离为 20 km(光接入网标准要求达到的距离),采用 G. 652 常规光纤,取 1550 nm 波长色散系数为 16 ps/(nm·km)。

由于频谱分割的作用,宽带光源的色散影响显著减小。从图 1(a)中可以看出,在 20 nm CWDM 标准信道间隔下,能够以不超过 1 dB 的光功率代价支持 155 Mb/s 以下速率传输 20 km。进一步减小信道间隔,当在 0.8 nm DWDM 信道间隔下则可以支持 2.5 Gb/s 速率信号在光接入网中传输,宽带光源的色散引起的光功率代价低于 0.5 dB,如图 1(b)所示。因此,采用宽带光源频谱分割具备支持 WDM-PON 高速接入应用的可能。

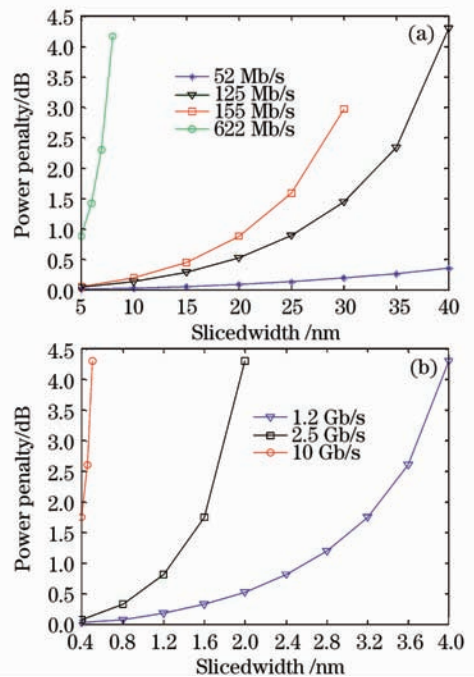


图 1 频谱分割与色散影响。(a) 粗波分, (b) 密集波分

Fig. 1 Chromatic dispersion of spectrum slicing.

(a) CWDM, (b) DWDM

然而,除了色散的影响,频谱分割 WDM-PON 系统还受到差拍噪声、串扰、损耗等因素的影响^[6,7]。

4 测试分析

我们研制了支持 125 Mb/s 速率直接调制的无色 ONU。该 ONU 的光发送机采用中心波长处于 1550 nm 波段的 LED,谱宽大于 70 nm,输出功率为

-10 dBm。考虑经济性,接收机采用市售的普通 PIN 组件。

频谱分割 WDM-PON 系统测试示意图如图 2 所示。ONU 支路光纤为 1 km,连接 OLT 的主干光纤为 20 km,采用 G. 652 常规单模光纤。ONU、OLT 均设置了 100 Mb/s 以太网接口,经 4B5B 编码后光线路速率为 125 Mb/s。 λ MUX 为 4 端口 CWDM 波分复用器,波长为 1510 nm、1530 nm、1550 nm 和 1570 nm。在光分配网(ODN)中连接了可调节光衰减器 (VOA),以配合网络测试仪 (Network Tester)进行性能测试。

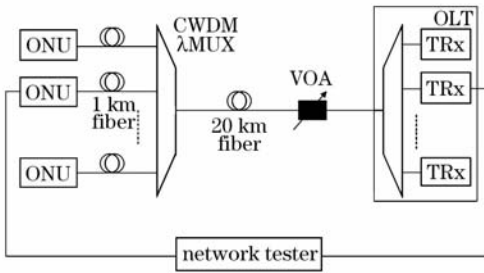


图 2 频谱分割 WDM-PON 系统测试示意图

Fig. 2 Experimental setup for the measurement of spectrum-sliced WDM-PON

ONU 光接口典型的频谱图如图 3 所示。4 个 ONU 通过 λ MUX 频谱分割后信号合波的频谱图如图 4 所示。

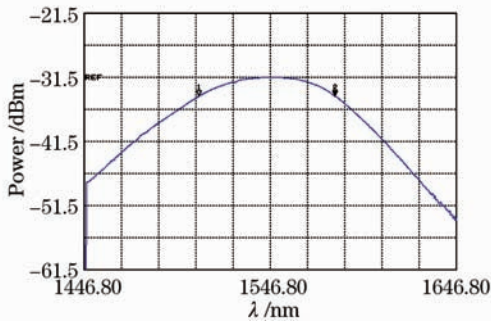


图 3 ONU 光接口频谱图

Fig. 3 Measured optical spectrum of a ONU

为了说明频谱分割 WDM-PON 系统特性及色散的影响,我们结合测试进行简要分析。

系统光功率余量可以写为:

$$P_m = (P_{bls} - P_r) - L_s - L_f - L_i - P_p,$$

式中 P_{bls} 为宽带光源 LED 的发送功率, P_r 为接收机灵敏度, L_s 为分割损耗, L_f 为为光纤损耗, L_i 为光通道中的波分复用器、活动连接器、接头等的插入损耗, P_p 为由差拍噪声、色散和串扰等引起的光功率代价之和。

设波分复用器信道间隔为 Δf ,光通带宽度为

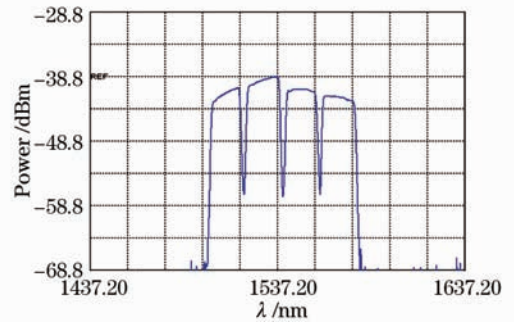


图 4 频谱分割后的合波频谱(4 个 ONU)

Fig. 4 Measured optical spectrum of 4 ONUs with spectrum slicing

B_o , 频谱分割损耗主要取决于分割的波长数目以及 $B_o/\Delta f$ 。该 WDM-PON 系统波长数为 4 个,如果宽带光源的全部光功率均匀分配,则引入的损耗为 6 dB。20 nm CWDM 波分复用器的光通带宽度 B_o 为 13 nm,即 $B_o/\Delta f$ 为 0.65,其引入的损耗约为 1.8 dB,则累积分割损耗为 7.8 dB。由于宽带光源的频谱是不均匀的,因此实际测试的分割损耗不同。以图 3 的 ONU 为例进行了实测,频谱分割最小损耗发生在 1550 nm 波长,为 7.2 dB,最大损耗发生在 1510 nm 波长,为 11.4 dB。从图 3 中可以看出,1550 nm 波长包含了频谱中的较大值,而 1510 nm 波长的分割损耗大的原因是其通带的一部分已处于光源的 3 dB 频谱之外。

由于光通带宽度远大于接收机带宽,消光比通常足够大,差拍噪声引起的光功率代价很小^[8],可以忽略。该系统采用的复用器的通带与信道间隔的比约为 0.65,引起的串扰小于 -30 dB,对于功率预算几乎不产生影响^[9]。由前面模型分析可知在 20 km 传输距离下,色散引起的光功率代价为 0.53 dB。

针对 ODN 主干光纤直连(BtoB)和 20 km 光纤连接两种情况下进行接收机灵敏度测试,实际测试

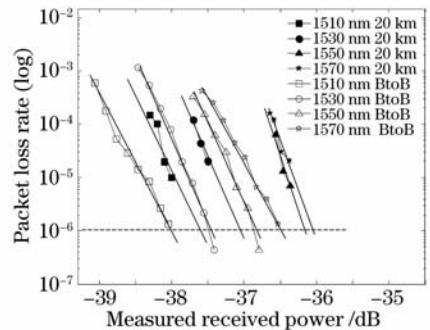


图 5 接收机灵敏度测试(BtoB, 20 km 光纤)

Fig. 5 Measured optical receiver sensitivity (back-to-back, 20 km SMF)

结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 20 km 光纤引起的光功率代价约为 0.5~1 dB, 接收机灵敏度可达到 -36 dBm (丢包率 10^{-6} 约对应比特误码率 10^{-9})。可以看出色散是引起这部分光功率代价的主要因素。

ODN 中波分复用器、活动连接器、接头等插入损耗 L_i 累计为 3 dB, 光纤损耗为 5 dB, 取分割损耗最大一路计算得出系统光功率余量 P_m 为 5.6 dB。该系统具有实用性。

简而言之, 通过频谱分割, 色散对于系统性能的影响较小。根据计算或实际测试表明, 即使采用 CWDM 频谱分割, 其分割损耗也是较大的。

5 结 论

由于宽带光源频谱分割的作用, 使得波分复用器光通带外的频谱成分被过滤, 减小了宽带光源的色散影响, 提高了频谱分割 WDM-PON 的传输性能。模型分析表明, 在不采用色散补偿等手段的情况下, 基于宽带光源频谱分割 WDM-PON 在 G. 652 常规光纤上能够支持高速光接入应用, 即在 WDM-PON 中通过合理选择波长间隔, 宽带光源的色散对于系统性能的影响能够控制在可接受的范围。通过系统测试表明: 采用 LED、125 Mb/s 速率直接调制的无色 ONU, 在 20 nm 波长间隔的 CWDM 波分复用器上进行频谱分割, 能够在 G. 652 常规光纤上有效传送 20 km, 由色散等因素引起的光功率代价小

于 1 dB, 系统光功率余量则达到 5.6 dB。由于采用了廉价的光器件, 研制的无色 ONU 以及通过频谱分割实现的 WDM-PON 系统不仅具有实用性, 而且具有很好的经济性。

参 考 文 献

- 1 K. Grobe, J.-P. Elbers. PON in Adolescence: from TDMA to WDM-PON[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, **46**(1): 26~34
- 2 Chang-Hee Lee, Sang-Mook Lee, Ki-Man Choi *et al.*. WDM-PON: a next generation access network[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6353**: 63531P1~3
- 3 C. K. Chan, L. K. Chen, C. Lin. WDM PON for next-generation optical broadband access networks[C]. *OECC*, 2006, 5E2-1-1~5E2-1-3
- 4 A. Banerjee, Y. Park, F. Clarke *et al.*. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review[J]. *J. Optical Networking*, 2005, **4**(11): 737~758
- 5 G. P. Agrawal. *Fiber-Optic Communications Systems* [M]. Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002
- 6 Shin Kaneko, Jun-ichi Kani, Katsumi Iwatsuki. Scalability of spectrum-sliced DWDM transmission and its expansion using forward error correction[J]. *J. Lightwave Technology*, 2006, **24**(3): 1295~1301
- 7 G. J. Pendock, D. D. Sampson. Transmission performance of high bit rate spectrum-sliced WDM systems[J]. *J. Lightwave Technology*, 1996, **14**(10): 2141~2148
- 8 K. H. Han, E. S. Son, H. Y. Choi *et al.*. Bidirectional WDM PON using light-emitting diodes spectrum-sliced with cyclic arrayed waveguide grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10): 2380~2382
- 9 Y. S. Jang, C.-H. Lee, Y. C. Chung. Effects of crosstalk in WDM systems using spectrum-sliced light source[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 715~717