

基于小波包变换码的新型无源光网络上行 信号复用和传输方法

王艺蒙¹ 李 蔚¹ 韩纪龙¹ 姚海涛¹ 余少华² 杨 奇²

(¹ 武汉光电国家实验室(筹), 华中科技大学, 湖北 武汉 430074
² 光纤通信技术和网络国家重点实验室, 武汉邮电科学研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要 提出了一种基于小波包变换正交码的多电平正交编码的无源光网络(PON)中上行信号复用和传输新方法, 将 PON 系统中各个不同的光网络单元(ONU)用户用小波变换正交码来进行调制、复用和传输, 能够实现各个不同 ONU 用户共享一个波长。由于采用了小波变换编码, 可以实现数量很多 ONU 用户同时上行, 在 ONU 端不需要突发光模块以及多波长激光器, 因而成本低, 传输速率高, 接入数量多。给出了基于该方法的上行系统调制、复用和传输的结构模型, 并仿真了传输速率为 1.25 Gb/s 和 10 Gb/s 下不同路 ONU 用户上行传输, 仿真结果表明, 最大可以实现上行 32 路, 每路 10 Gb/s, 总传输速率达到 320 Gb/s 的高速 PON 系统。

关键词 光通信; 无源光网络; 光网络单元; 上行数据传输; 多电平正交编码; 小波包变换

中图分类号 TN915.63 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0605001

Upstream Data Transmission Based on Wavelet Packet Transform Coding in Passive Optical Network

Wang Yimeng¹ Li Wei¹ Han Jilong¹ Yao Haitao¹ Yu Shaohua² Yang Qi²

(¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Fiber Home Technologies, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract An upstream data transmission method from optical network units (ONUs) to the optical line terminal (OLT) based on wavelet packet multi-level orthogonal coding in passive optical networks (PON) is proposed and studied. Each ONU can be assigned a special coding based on the wavelet packet coding method to share a wavelength. As the wavelet packet coding method is used, the number of ONU can be very large. And there are no need for the burst mode transmitter/receiver module and multi-wavelength lasers. So the proposed system has the advantages of low cost, high data transmission rate and large access number. This upstream system architecture model is established and simulated at the transmission rate of 1.25 Gb/s and 10 Gb/s. Simulation results show 32 ONUs, where each ONU is with a data rate of 10 Gb/s, and the total transmission rate is up to 320 Gb/s.

Key words optical communications; passive optical network; optical network unit; upstream data transmission; multi-level orthogonal encoding; wavelet packet transform

OCIS codes 060.2330; 060.4510; 060.4230

1 引 言

近年来随着宽带业务的迅猛发展, 用户对接入网的带宽需求大幅度增长, 而利用具有丰富宽带资源的

光纤无源光网络(PON)技术被认为是解决宽带接入的最佳方案。基于时分复用的以太无源光网络(EPON)和吉比特无源光网络(GPON)已经在全世界

收稿日期: 2013-12-13; 收到修改稿日期: 2014-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(6177063)、国家 973 计划(2010CB328305)、光纤通信和光网络技术国家重点实验室开放基金

作者简介: 王艺蒙(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: 424461866@qq.com

导师简介: 李 蔚(1968—), 女, 博士, 教授, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: weilee@hust.edu.cn(通信联系人)

范围内部署。而为了满足下一代接入网对接入用户数和带宽的要求,波分复用无源光网络(WDM-PON)^[1-5]、混合 WDM-PON^[6-7]、光码分复用无源光网络(OCDM-PON)^[8-10]、10 G-EPON^[11-12] 以及电码分复用无源光网络(ECDM-PON)^[13] 等被提出。

对于 PON 系统而言,虽然下行从光线路终端(OLT)到光网络单元(ONU)已经能够达到40 Gb/s 的速率,但是由于上行信号从 ONU 到 OLT 采用多点共享一根光纤的结构,为了防止不同信号在上行传输时的冲突,而无法实现上行高速的传输,导致对称传输 PON 的实现一直很困难。因此上行信号多点对一点的用户信息传输方法一直是无源光网络中上行信号接入的研究重点和难点。

目前从多个 ONU 到一个 OLT 采用时分复用、波分复用和电码分复用的方式来实现用户之间的区分。对于码分复用,不同的用户分配不同的正交码来实现上行各个不同的 ONU 用户共享一个波长和一个时隙,从而凭借着其低成本、多用户、高接收灵敏度、抗干扰特性,受到人们重视,目前上行 4 信道^[14] (信道速率为 1.25 Gb/s 的 ECDM-PON)和 32 信道^[15-17] (信道速率为 62.5 Mb/s 的 ECDM-PON)已经有报道。

在这里码型的选择直接影响了 PON 的性能。上述 ECDM-PON 的研究都是基于 walsh 码的双电平调制^[15],因为 walsh 码有着正交完备性,长度为 N 的序列有 N 个,限制接入用户数。由于电子芯片处理技

术的发展,使得任意波形发生器(AWG)和数模转换(ADC/DAC)芯片能力大大提升,其中 tektronix 公司生产的 ADC/DAC 芯片均已达到 65 GS/s,AWG 芯片的采样速率也在以两年翻一倍的速度高速发展中,使得原来不能实现的多电平正交编码方式和模拟传输成为可能,而采用多电平正交编码方式,可以使得传输速率和接入用户数量等又大大提高。本文就是基于这方面的考虑,提出了一种基于小波变换多电平正交编码的多点对一点的信号传输,所用码型为由小波包变换产生的完备的正交序列,可以用于 PON 上行信号的传输,相对于已经有的码分复用 PON 可以大大提高信号传输速率和传输带宽,同时也能大大提高接入的 ONU 用户数量。

本文给出了系统结构和产生码型的基本原理,建立了仿真模型,并对结果进行了分析。

2 基于小波变换多电平 PON 上行系统

本文提出的 PON 上行系统结构如图 1 所示。将不同小波包正交码分配给不同的(ONU)对用户信号进行编码,经低通滤波后,再通过强度调制的方式调制到激光器上,各路光信号通过光耦合器叠加后经光纤传输。编码后的各个 ONU 用户两两之间相互正交,所以,在 ONU 端的激光器可以是同一个波长,经过光配线网络(ODN)单元后,各个 ONU 的光耦合在一起向 OLT 发送,虽然在同一根光纤上传输,相互之间也不会干扰。

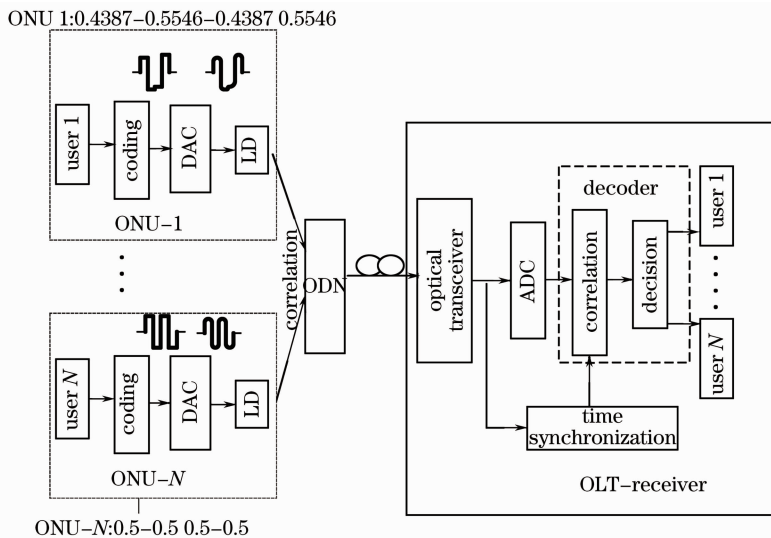


图 1 基于小波变换多电平正交码 PON 上行系统结构

Fig. 1 Architecture of the PON upstream transmission system based on wavelet packet coding

一个小波包码组可以支持 2^n 个用户接入, n 为正整数,这样可以采用很少位的编码来实现很多用

户的接入,应用于密集接入用户以及超级 PON。由于小波包变换产生的正交码是多电平码而非 01 码,

所以 ONU 端的编码信号是多电平信号,需要经过数模转换成为连续信号后,再调制到激光器,才能在链路上进行传输。所以,本方法提出的上行信号传输方法是一种模拟信号传输。

在 OLT 传输后的光信号经过光接收机后转变成电信号,再经过模数转换成为数字信号后,分别将数字信号与本地编码信号进行数字相关运算并解码,从而恢复发射端各个 ONU 用户信号。

在本文提出的上行结构中,各个 ONU 都采用的是同一个波长的激光器,而不同 ONU 的信号共用一段频谱,共用一段时隙,所以激光器可以采用连续工作模式而不需要采用突发式工作模式,其工作的速率不再受突发式发射/接收模块的限制,大大提高了传输速率。而且各个 ONU 端可以使用同一波长的激光器,ONU 端和 PON 升级成本将大大降低,同时又大大方便设备运营商的后期管理和设备维护。

3 基本原理

3.1 正交码的构造

j 尺度下的小波包重构公式为

$$c_{j+1}^{2n}(k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(k-2m)c_j^{2n}(m) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} g(k-2m)c_j^{2n+1}(m), \quad (1)$$

式中 $h(n)$ 和 $g(n)$ 是小波包重构滤波器组。利用重构项 $\sum_{m=-\infty}^{\infty} h(k-2m)c_j^{2n}(m)$ 和 $\sum_{m=-\infty}^{\infty} g(k-2m)c_j^{2n+1}(m)$ 的正交性,可以构造多组正交序列。

设 $x_1(l)$ 和 $x_2(l)$ 为任意长度相等的序列,令

$$f_1(k) = \sum_{l \in Z} h(k-2l)x_1(l), \quad k \in Z \quad (2)$$

$$f_2(k) = \sum_{l \in Z} g(k-2l)x_2(l), \quad k \in Z \quad (3)$$

可以得出

$$\langle f_1, f_2 \rangle = \sum_{k \in Z} f_1(k) \cdot f_2(k) = \sum_{l \in Z} x_1(l)x_2(l) \cdot \langle h(k-2l), g(k-2l) \rangle = 0, \quad (4)$$

$$\langle f_1, f_1 \rangle = \sum_{k \in Z} f_1(k) \cdot f_1(k) = \sum_{l \in Z} x_1(l)x_1(l) \cdot \langle h(k-2l), h(k-2l) \rangle = \sum_{l \in Z} x_1(l)x_1(l) \cdot \delta(0) = 1, \quad (5)$$

所以 $f_1(k)$ 和 $f_2(k)$ 相互正交。

当 $x_1(l)$ 和 $x_2(l)$ 为一串周期序列, $f_1(k)$ 和 $f_2(k)$ 也将为周期序列。若要产生更多的正交序列,只要在 $f_i(k)$ 的基础上再进行 $\sum_{l \in Z} h(k-2l)f_i(l)$ 和 $\sum_{l \in Z} g(k-2l)f_i(l)$ 的运算即可。

本系统所用的正交码是将 $x_1(l)$ 和 $x_2(l)$ 设为一串全一序列得到的。

例如假设有 4 个 ONU 接入,所分配的正交码组就是:

ONU-1: 0.5000, 0.5000, 0.5000, 0.5000;

ONU-2: 0.4387, -0.5546, -0.4387, 0.5546;

ONU-3: 0.5546, 0.4387, -0.5546, -0.4387;

ONU-4: 0.5000, -0.5000, 0.5000, -0.5000。

可见由小波包变换产生的正交码是数值不相等的多电平码,该正交码码长 $L=2^n$, n 为小波包变换次数,因为具有完备正交性,相互正交的码数等于码长,使同时接入的用户数等于所分配的正交码长度,提高了频带利用率。

3.2 编码与解码

第 i 个 ONU 的用户信号经过编码和低通滤波后,在这里用低通滤波来实现数模转换,其基带信号为

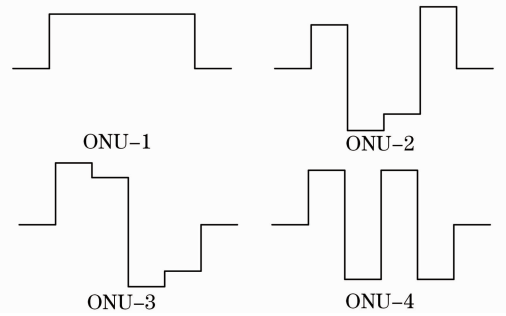


图 2 各 ONU 分配的正交码

Fig. 2 Orthogonal codes distributed to each ONU

$$g_i(t) = \sum_{k \in Z} y_i(t-kT)x_i(t-kT) \otimes h(t), \quad (6)$$

式中 $x_i(t)$ 为非归零(NRZ)码的用户信号, T 为用户信号脉宽, $y(mT_s)$ 为正交码的值, m 为第几个抽样点,采样间隔 $T_s = T/N$, N 为正交码长度, $h(t)$ 是低通滤波器传递函数, \otimes 为卷积。当用户上行速率为 $R = 1/T$ 时,码片速率为 $N \times R = 1/T_s$ 。

根据文献[18-19],如果光源不相干,则合路后的光信号被接收机接收后,由激光器线宽产生的拍频噪声为零。由于各 ONU 所用激光器光源不相干,故接收后的采样信号可简单表示为

$$S(kT_s) = \mathcal{R} \times \left[bA^2 + \sum_{i=1}^n \frac{A^2}{n} g_i(kT_s) \right] + n(kT_s), \quad (7)$$

式中 \mathcal{R} 为响应度, b 为调制所加偏置电压, A 为光振

幅, k 为整数。

将采样信号与本地正交码以每 N 个采样值进行一次相关运算, 则

$$R_m = \sum_{k=1}^N y_m(kT_s) \times S(kT_s) = \sum_{k=1}^N y_m(kT_s) \times \left\{ \mathcal{R} \times \left[bA^2 + \sum_{i=1}^n \frac{A^2}{n} g_i(kT_s) \right] + n(kT_s) \right\} = C + \mathcal{R} \times \left[\frac{A^2}{n} \sum_{i=1, i \neq m}^n \sum_{k=1}^N y_m(kT_s) \times y_i(kT_s) x_i(kT_s) + \frac{A^2}{n} \sum_{k=1}^N y_m(kT_s) \times y_m(kT_s) x_m(kT_s) \right] + \sum_{k=1}^N y_m(kT_s) \times n(kT_s), \quad (8)$$

式中第一项 C 为定值, 第二项为多址接入干扰, 第三项为第 m 个 ONU 的上行用户信号, 第四项为噪声带来的干扰项。由于小波包编码的完全正交性, 多址接入干扰很小, 几乎为零。故通过设定适当的阈值, 可以判决恢复用户上行信号。

4 仿真系统和结果分析

本文使用 VP Itransmission Maker 软件作为仿真软件。因为是模拟信号传输, 且信号频带比较宽, 仿真采用外调方式, 仿真系统如图 3 所示。

在发射端, 首先利用 Matlab 产生 N 个小波包

正交码, 并输入到 VP Itransmission Maker 软件中, 产生周期性的多电平信号, 再分别对该软件产生的 N 路随机信号(NRZ 码)进行编码和低通滤波。将调制后的各路光信号通过光耦合器合路, 经单模光纤传输。在接收端, 先经光接收器将光信号转变为电信号, 并通过同步时钟控制使接收到的电信号与本地信号同步; 用电分路器将接收到的电信号均分成 N 路并采样, 送到 Matlab 中分别和之前产生的 N 个正交码做相关运算, 得到相关值, 并与阈值进行比较判断, 大于阈值输出 1 码, 小于阈值输出 0 码, 从而恢复出各路用户信息。

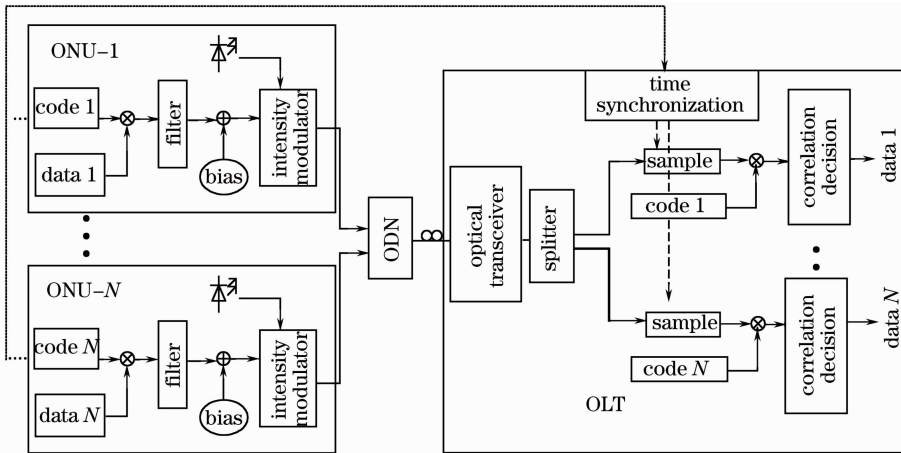


图 3 仿真系统结构图

Fig. 3 Architecture of simulation system

接入用户数越多, 每个用户所分配的正交码长度越长, 在传输速率一定的情况下, 码片速率越高, 经数模变换和低通滤波后其频带就越宽, 例如 32 个用户, 每个用户分配的正交码长度为 32。在 10 Gb/s 的速率下, 每路信号 20 dB 带宽均约为 160 GHz, 因为是码分复用, 每个用户所占用的频带空间是基本相同的, 所以 32 路系统上行信号所需的总频带也为 160 GHz。在基于小波包变换多电平

PON 系统中, 由于上行信号采用一个波长 1310 nm, 信道带宽很宽, 所以不会发生串扰, 只要接收机的带宽能达到要求就可以。在接收端本系统采用数字处理, 不需要接收波形的全部频率分量, 就可恢复信号。根据文献[20], 目前光电探测器的 3 dB 带宽可以达到 150 GHz, 基本满足本系统的要求。由于发射端的信号是模拟传输, 为了保证调制波形尽量不失真, 对直调激光器或强度调制器的线

性度要求较高,可以在调制的时候加上偏置电压,使得调制信号能工作在激光器功率-电流($P-I$)曲线的线性区,这样可以大大降低对激光器和调制器的线宽的要求,目前普通激光器的线宽可以满足要求,所以,在本系统仿真中,通过在调制信号时加偏置电压的方法可以减少模拟信号的失真。

在 PON 系统中,由于传输的距离比较近(小于 20 km),速率较低(速率小于 40 Gb/s),一般色散和非线性效应可以忽略。

根据上述的分析,对整个上行信号传输系统的参数设定如下:激光器波长采用 1310 nm,光纤为标准单模光纤,中心波长为 1310 nm,损耗系数为 0.2×10^{-3} dB/m,色散系数为 0,色散斜率为 0,非线性指数为 2.6×10^{-20} m^2/W 。

仿真结果如下:当每路用户速率为 10 Gb/s 时,不同复用路数的发射端带宽及接收端滤波器最佳接收带宽如表 1 和图 4 所示,最佳接收带宽由眼图张开最大时得到,其值略高于发射端带宽。当接收端滤波器带宽小于最佳接收带宽时,接收到的信号产生一定失真,使相关运算后的眼图闭合;而接收端滤波器带宽大于最佳接收带宽时,则会使更多无用的高频噪声通过,对信号产生干扰,使眼图闭合。

表 1 不同路数的发射端带宽及最佳接收带宽

Table 1 Bandwidth of transmitter and filter in receiver with different access numbers

Access number	4	8	16	32
Transmitter bandwidth /GHz	20	40	80	160
Filter bandwidth /GHz	22	45	90	190

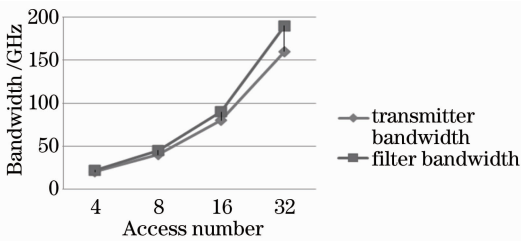


图 4 用户接入路数与带宽的关系

Fig. 4 Bandwidth of different access numbers

激光器功率为 10 dBm,在接收端没有做任何信号处理的情况下,误码率小于 10^{-4} 时,复用路数与传输速率及最长传输距离的关系如表 2 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 可以看出,在相同误码率的情况下,传输距离会随着传输速率和复用路数的增加而减小,而减小趋势基本呈线性。随着传输速率的提高,接收端带宽增加,造成信噪比降低;随着复用路数的增加,每路上行用户信号经过的 3 dB 耦合器数

量会增加,接收功率会降低,同时,不同用户信号间的串扰也会越严重,在接收端就越难解调出来。

表 2 复用路数与传输速率及最长传输距离的关系

Table 2 Relationship between access number and distance at different transmission rates

Access number	4	8	16	32
Transmission distance at 10 Gb/s /km	95	60	40	10
Transmission distance at 1.25 Gb/s /km	115	90	70	45

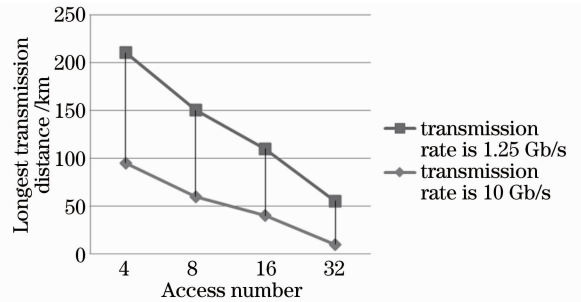


图 5 在不同速率下接入用户数与传输距离的关系

Fig. 5 Relationship between access number and distance at different transmission rates

由于小波变换产生正交码的特点,第一路所分配的码型是一串数值相等的码,其平均值不为零。而其他几路所分配的码型是平均值为零的码,故该路调制信号具有与其他信号不同的特性,与其他几路合路后,会降低系统性能。所以本文还仿真了去掉第一路码型的各用户传输的系统,仿真结果如下:激光器功率为 10 dBm,在不用任何信号处理技术的情况下,误码率小于 10^{-4} 时,复用路数与传输速率及最长传输距离的关系如表 3 所示。将此数据与包括第一路的用户系统数据进行比较,得到图 6 所示的关系曲线。

表 3 去掉第一路后复用路数与传输速率及最长传输距离的关系

Table 3 Relationship between access number and distance at different transmission rates without No. 1 user

Access number	3	7	15	31
Transmission distance at 10 Gb/s /km	95	80	50	30
Transmission distance at 1.25 Gb/s /km	120	105	80	55

从图 6 可以看出,去掉第一路后,系统性能有了明显的提升。当速率为 10 Gb/s,用户数为 31 时,系统最大传输距离可达 30 km,相比于包括第一路码型的 32 路用户系统,传输距离提高了 20 km。那么在实际系统中使用时,可以不采用第一路编码来

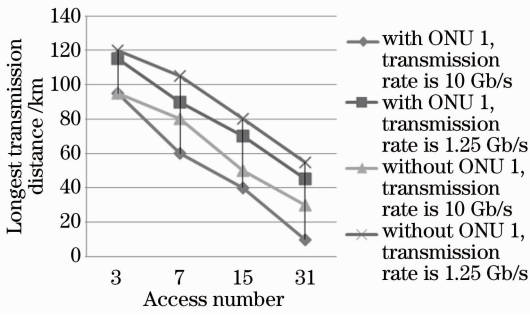


图 6 第一路去掉与否的系统性能

Fig. 6 System performance with or without ONU 1 传输 ONU 用户信息。

5 结 论

提出了一种基于小波包变换所产生的正交多电平码编码方式的 PON 上行信号接入和传输系统, 对多电平正交编码的 PON 结构进行了研究, 针对小波包变换所产生的正交码特性, 分别仿真了两种情况的系统, 仿真结果表明, 多电平正交编码的 PON 结构, 可以实现 31 路和 32 路每路 10 Gb/s ONU 信号分别传输 30 km 和 10 km, 总的上行速率达到 310 Gb/s 和 320 Gb/s 的高速对称 PON 上行信号的接入和传输。由于各个 ONU 用户采用同一个波长的激光器, 并且不需要突发式光发射和接收方式, 成本低, 易于维护, 随着电子芯片处理技术的发展, 高速多电平正交编码可以得到实现, 完全满足下一代高速对称 PON 的要求。

参 考 文 献

- 1 K Iwatsuki, J Kani. Applications and technical issues of wavelength-division multiplexing passive optical networks with colorless optical network units[J]. J Opt Commun Netw, 2009, 1(4): C17-C24.
- 2 K Prince, T B Gibbon, R Rodes. GigaWaM-next-generation WDM-PON enabling gigabit per-user data bandwidth[J]. IEEE J Lightwave Technol, 2007, 30(10): 1444-1454.
- 3 Y R Ma, D K Liu, J W Yu. System evaluation of economic 16/32 chs 1.25 Gbps WDM-PON with self-seeded RSOA[J]. Opt Express, 2012, 20(20): 22523-22530.
- 4 Yi Lilin, Li Zhengxuan, Zhang Tao, et al.. 10 Gb/s symmetric WDM-PON using stable multi-longitudinal mode Brillouin/SOA fiber laser as upstream colorless source[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(12): 120603.
- 5 Zhu Min, Xiao Shilin, Guo Wei, et al.. Novel WDM-PON architecture for simultaneous transmission of unicast data and multicast services[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(10): 972-975.

- 6 Y Q Luo, X P Zhou, F Effenberger, et al.. Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2) [J]. IEEE J Lightwave Technol, 2013, 31(4): 587-593.
- 7 Chen He, Xiao Shilin, Zhu Min, et al.. Hybrid WDM/OCDM system with the capability of encoding multiple wavelength channels by employing one encoder and one corresponding optical code[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(8): 745-748.
- 8 B Dai, S S Shimizu, X Wang. Full-asynchronous gigabit-symmetric DPSK downstream and OOK upstream OCDMA-PON with source-free ONUs employing all-optical self-locked time gate[J]. Opt Express, 2012, 20(26): 21-31.
- 9 T Kodama, N Kataoka, N Wada, et al.. 4096-ary OCDM/OCDMA system using multidimensional PSK codes generated by a single multipoint en/decoder [J]. IEEE J Lightwave Technol, 2011, 29(22): 3372-3380.
- 10 Li Chuanqi, Zhou Xu, Song Biao, et al.. A new OCDMA passive access network and its performance analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 660-664.
- 李传起, 周 谔, 宋 标, 等. 一种光码分多址无源接入网及其性能研究[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 660-664.
- 11 K Tanaka, A Agata, Y Horiuchi. IEEE 802.3 av 10G-EPON standardization and its research and development status[J]. IEEE J Lightwave Technol, 2010, 28(4): 651-661.
- 12 R Kubo, J Kani, H Ujikawa, et al.. Study and demonstration of sleep and adaptive link rate control mechanisms for energy efficient 10G-EPON[J]. J Opt Commun Netw, 2010, 2(9): 716-729.
- 13 T Kamijoh, M Kashima, H Tamai, et al.. CDM-technologies for next generation optical access networks[C]. San Diego: Conference on Optical Fiber Communication, 2009.
- 14 K Yasuhiro, I Hideyuki, T Hideaki, et al.. Demonstration of 1.25 Gb/s 8-channels ECDM using eight-chip electrical coding [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(12): 875-877.
- 15 G C Gupta, M Kashima, H Iwamura, et al.. Over 100 km bidirectional, multi-channels COF-PON without optical amplifier [C]. Anaheim: Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2006.
- 16 H Iwamura, G C Gupta, M Kashima, et al.. 42 dB loss budget hybrid DWDM-CDM-PON without optical amplifier [C]. Anaheim: Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007.
- 17 G C Gupta, M Kashima, H Iwamura, et al.. A simple one-system solution COF-PON for metro/access networks[J]. IEEE J Lightwave Technol, 2007, 25(1): 193-200.
- 18 X Wang, K Kitayama. Analysis of beat noise in coherent and incoherent time-spreading OCDMA [J]. IEEE J Lightwave Technol, 2004, 22(10): 2226-2235.
- 19 Yan Hui, Qiu Kun, Ling Yun. Impact analysis of beat noise on coherent OCDMA system[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(4): 851-856.
- 闫 辉, 邱 昆, 凌 云. 相干光码分多址系统中拍频噪声的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 851-856.
- 20 A Beling, H G Bach, G G Mekonnen, et al.. Miniaturized waveguide-integrated P-I-N photodetector with 120-GHz bandwidth and high responsivity[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(10): 2152-2154.

栏目编辑: 王晓琰