

基于正交波形复用技术的无源光网络 上行信号传输方法

姚海涛¹ 李 蔚¹ 韩纪龙¹ 王艺蒙¹ 贺志学² 杨 奇² 余少华²

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

摘要 提出了一种复用技术——正交波形复用(OGDM),并将其应用于无源光网络(PON)系统中作为上行信号传输。在本方法中,对于 N 个光网络单元(ONU)端的 PON 系统,先将 N 个 ONU 端信号分别通过强度调制或无载波调幅调相(CAP)技术,调制到 N 个两两相互正交电波形上,使“1”码对应有波形,“0”码对应无波形,然后再将各路不同的波形信号分别调制到每个 ONU 用户的激光器上,这些激光器的波长可以是同一个波长;通过光分配网络(ODN)单元合路后上行传输到光线路终端(OLT)端,在 OLT 端采用相关接收的方法,把接收到的信号和 OLT 端的本地正交波形作相关运算,利用正交波形的正交性来区分不同 ONU 端的用户信息。仿真显示在理想情况下,32 路 ONU 信号当采用外调制方式时,每路单独占用 10 Gb/s,总带宽为 320 Gb/s,可以传输 20 km。

关键词 光通信; 正交波形复用技术; 无源光接入网; 无载波调幅调相技术; 上行信号传输

中图分类号 TN915.63 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0805006

Upstream Data Transmission in Passive Optical Networks Based on Orthogonal Waveform Multiplexing Technology

Yao Haitao¹ Li Wei¹ Han Jilong¹ Wang Yimeng¹ He Zhixue²
Yang Qi² Yu Shaohua²

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, Wuhan Research Institute of Post & Telecommunication, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract A multiplexing technique named orthogonal waveform (graph) division multiplexing (OGDM) and its application on the upstream data transmission in passive optical access networks (PON) are proposed. N mutually orthogonal electrical waveforms are assigned to N optical network units (ONU). For intensity modulator, ONU's code “1” means orthogonal electrical waveform and code “0” means no waveform. Those electrical orthogonal waveforms are modulated on lasers with the same wavelength and then are combined at optical distribution network (ODN) to be transmitted to optical line terminal (OLT) in a single fiber. At OLT, the mixed signals can be separated by using correlative demodulation method. Stimulation results show that, under external modulation, the transmission distance reaches 20 km with 320 Gb/s data transmission rates in ideal situation.

Key words optical communications; orthogonal waveform (graph) multiplexing technology; passive optical network; carrierless amplitude/phase modulation technology; upstream data transmission

OCIS codes 060.2330; 060.4510; 060.4230

收稿日期: 2014-02-25; 收到修改稿日期: 2014-03-17

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328305)、国家自然科学基金(61177063)、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: 姚海涛(1990—),男,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: hitoyao@hust.edu.cn

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

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

无源光接入网络(PON)是由局侧的光线路终端(OLT)、用户侧的光网络单元/光网络终端(ONU/ONT)以及光分配网络(ODN)组成,从OLT到ONU下行信号传输是一点对多点的广播式传输方式,而从ONU到OLT上行信号传输是多点对一点的传输方式,这时会导致传输冲突。为了解决上行信号的传输冲突问题,人们提出了多种复用方法应用于PON,比如:时分复用无源光网络(TDM-PON)、波分复用无源光网络(WDM-PON)、正交频分复用无源光网络(OFDM-PON)、光码分复用无源光网络(OCDM-PON)、混合波分时分复用无源光网络(Hybrid WDM-TDM PON)或者其他的几种技术混合使用的无源光网络等方案^[1-9]。

以 TDM-PON 和 WDM-PON 为例,对于 TDM-PON,上行传输时,将上行传输时间分为若干时隙,在每个时隙内只安排一个 ONU 以分组的方式向 OLT 发送分组信息,各 ONU 按 OLT 规定的顺序依次发送,各 ONU 采用同一波长的激光器。所以,OLT 只需要一个收发器,ONU 只需要一种波长的激光器,成本低,系统维护方便。但光发送机与光接收机需采用突发工作模式,需要严格的测距,要求 OLT 能快速控制 ONU 和时延,同时 ONU 端的激光器必须能快速地开启和关断,将速率提高到 10 Gb/s 及其以上的速率其技术难度很大。对于 WDM-PON,上行传输时,将各 ONU 的上行信号分别调整到不同波长的光载波上,然后耦合到同一根光纤上向 OLT 传输,在 OLT 中利用光分波器取出属于各 ONU 的不同波长的光信号,再分别通过光电探测器转变为电信号。这种方式,协议透明,可在物理层实现不同 ONU 间的保密性,而且用户数易扩展,但在每个 ONU 要求配置不同波长的激光器,使得 ONU 端的设备成本大大增加,尽管目前有多

种解决方法,比如无色 ONU,但其成本仍然很高,系统维护成本高,大大阻碍了系统的应用^[6-9]。

针对 TDM-PON 和 WDM-PON 的不足,本文提出一种新的复用技术——正交波形复用(OGDM),用于 PON 的上行信号传输。在 OGDM-PON 中,仍然用同一个波长分配给所有的 ONU,但每个 ONU 分配不同的电正交波形,而这些波形是两两相互正交的,这里采用两级调制,先将各个 ONU 用户信息分别调制到这些正交的电波形上,再调制到激光器上,各路光信号通过光耦合器叠加后经光纤传输。在接收端采用相关解调的方法将各路信号解调出来。在 OGDM-PON 结构中,各个 ONU 都采用的是同一个波长的激光器,不同 ONU 信号共用一段频谱,共用一段时隙,只是波形不同,所以不需要 OLT 来控制各个 ONU 的发射,上行方向就可以采用连续工作模式,不需要复杂的突发工作模式,其工作的速率可以被提高。在上行中,不同 ONU 用户端所需要的光模块都相同,只是需要在电光转换前增加不同的正交波形发生电路来产生正交波形,由于都是采用成熟的电子电路来实现,降低了 ONU 端的成本,系统维护方便。

2 正交波形复用无源光网络原理

与 TDM 和 WDM 相比,OGDM 是一个新维度的复用技术,如图 1 所示,在 TDM-PON 中,不同 ONU 用户使用不同时间,但共用同一段频谱;在 WDM-PON 中,不同 ONU 用户使用不同段频谱,但共用同一时间;在 OGDM-PON 中多个 ONU 用户可以共用一个时隙和一段频谱,从而同时提高时间和频率的利用率,并且可以与 TDM、WDM 联合使用,大大提高了传输速率。

在正交波形复用无源光网络中,关键技术包括:发射端正交波形的产生,调制,接收端相关接收。

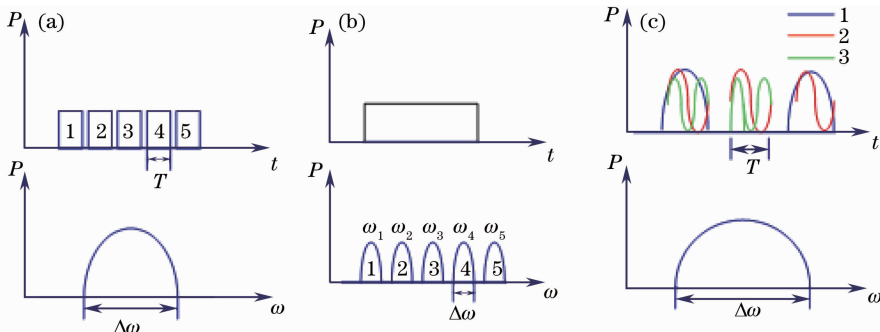


图 1 (a) TDM、(b) WDM 和 (c) OGDM 在时域和频域内的比较

Fig. 1 Comparison of (a) TDM, (b) WDM and (c) OGDM in the time domain and frequency domain

2.1 正交波形的选取

正交波形有许多种^[10],如椭圆球面波形^[11]、修正 Hermite 脉冲波形^[12]、基于小波包的正交脉冲波形^[13]以及用斯密特正交法产生的正交波形等都可以用在 OGDM 中作为信号的载波波形。

本文采用的是修正 Hermite 脉冲波形^[14],其表达式为

$$h_n(t) = \frac{(-\tau)^n}{\sqrt{n! \tau} \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{t^2}{4\tau^2}\right) \frac{d^n}{dt^n} \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right), \quad (1)$$

式中 τ 为时间因子,影响着脉冲宽度; $n = 0, 1, 2, \dots$,表示函数的阶数。该式具有归一性, $\int_{-\infty}^{+\infty} h_n(t) \cdot$

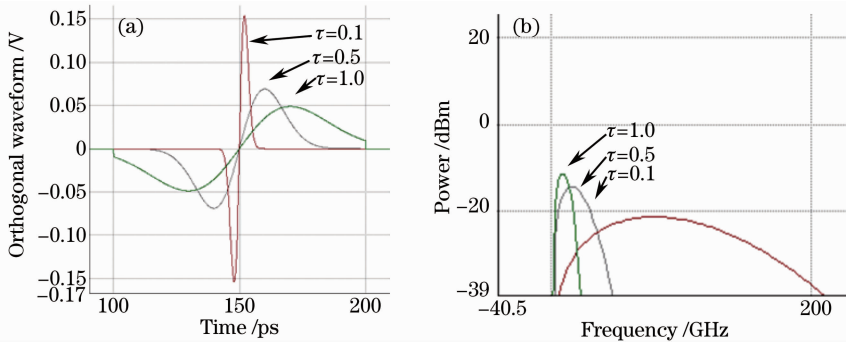


图2 传输速率为 10 Gb/s 时,不同 τ 的 1 阶修正 Hermite 脉冲在时域内的波形。(a) 时域波形; (b) 频域波形

Fig. 2 1th order modified Hermite impulse waveforms of different τ when the transmission rate is 10 Gb/s.

(a) Waveform in time domain; (b) waveform in frequency domain

如图 2(a)所示,随着时间因子 τ 的增加,脉冲宽度会变宽,如果 τ 的值大到一定程度时,波形的两端就会被砍掉,造成波形的不完整,正交性就会减弱。如图 2(b)所示,相应的时间因子 τ 也会影响带宽, τ 的值越小,带宽越大。因此,同时兼顾到正交

$h_n(t)dt = 1$;当 n 取不同值时, $h_n(t)$ 之间相互正交,即 $\int_{-\infty}^{+\infty} h_n(t) \cdot h_m(t)dt = 0 (n \neq m)$ 。虽然当积分限为从负无穷到正无穷时该积分值才精确等于零,但由于 $h_n(t)$ 函数衰减得非常快,所以在实际中只要在一定区间内积分即可使积分值近似为零,各阶波形近似正交。

修正 Hermite 脉冲波形如图 2 所示(传输速率为 10 Gb/s)。修正 Hermite 脉冲波形阶数越高,所含高频分量就越多,所以随着 ONU 路数的增加,对系统的带宽要求就越宽。时间因子 τ 影响着脉冲宽度,所以也影响了信号的带宽。

波形的完整性和带宽最小, τ 的取值应该适中。取修正 Hermite 脉冲波形的时域脉冲宽度和频谱半峰宽度的乘积最小时所对应的时间因子 τ ,通过数值计算,对于不同数量的 ONU, τ 取值如表 1 所示。

表 1 τ 的最佳取值

Table 1 Optimal value, of τ

Number of ONUs	4	8	12	16	20	24	28	32
Time factor / τ	0.42	0.39	0.36	0.33	0.31	0.29	0.27	0.26

2.2 OGDM-PON 的系统结构

OGDM-PON 系统结构如图 3 所示,在该系统中,采用强度调制-相关检测的方式来实现多路信号的传输。以外调制系统为例,在上行传输中,设有 N 路 ONU,将 N 路 ONU 信号分别调制到 N 阶不同的修正 Hermite 脉冲波形上,使“1”码对应有波形,“0”码对应无波形,则调制后第 i 路的每个码元的电压信号可以表示为

$$g_i(t) = \begin{cases} h_i(t), & \text{“1”level} \\ 0, & \text{“0”level} \end{cases} \quad (2)$$

然后采用外调制的方式,将这些正交波形分别调制到同一个波长的 N 个激光器上,每个激光器的波长一样。设第 i 路光载波的场强为: $E_i = A_i \exp[i(\omega_i t + \varphi_i)]$,由于每个正交波形信号是模拟信号强度调制,需要加偏置电压 b_i ,将信号调制到调制器的线性区,所以 $g_i(t)$ 调制到光载波上后,光信号场强为

$$E_i = \sqrt{b_i + g_i(t)} A_i \exp[i(\omega_i t + \varphi_i)]. \quad (3)$$

设各路激光器波长相同、功率相同,各路所加偏置相同,则 $\omega_i = \omega, b_i = b, A_i = A$ 调制后的 N 路光信号

经光耦合器叠加,形成一路混合光信号,其场强为

$$E = \sum_{i=1}^N \sqrt{b + g_i(t)} A \exp[i(\omega t + \varphi_i)]. \quad (4)$$

经光纤传输后,在 OLT 经光电转换后变为电信号,由于 ONU 到 OLT 的传输距离短,且光源一般采用波长为 1310 nm 的法布里-珀罗(FP)激光

器,所以可以忽略光纤的色散、非线性效应,同时也没有使用掺铒光纤放大器(EDFA),在不考虑放大自发辐射(ASE)白噪声的情况下,接收到的光信号转变成电信号的表达式为

$$I = \left\{ \sum_{i=1}^N \sqrt{b + g_i(t)} A \exp[i(\omega t + \varphi_i)] \right\} \cdot \left\{ \sum_{j=1}^N \sqrt{b + g_j(t)} A \exp[i(\omega t + \varphi_j)] \right\}^* =$$

$$NbA^2 + \sum_{i=1}^N A^2 g_i(t) + \sum_{i,j=1, i < j}^N \{ 2A^2 \sqrt{[b + g_i(t)] \cdot [b + g_j(t)]} \cos(\varphi_i - \varphi_j) \}. \quad (5)$$

式中 * 表示取共轭。第一项为偏置项,是由于调制前所加偏置造成的直流分量,是个常数,可在接受端通过电阻电容(RC)回路滤除或者用数字信号处理的方法去掉。第二项为 N 路光信号光强的叠加,第三项为相干叠加项。其中对于判决有用的是第二项; $\sum_{i=1}^N A^2 g_i(t)$ 。把第二项经过功放器放大电信号,

放大倍数为 M ,然后用电分路器均分为 N 路信号,则每路信号都为

$$\frac{M}{N} \sum_{i=1}^N A^2 g_i(t). \quad (6)$$

再分别送到相关检测电路中去作电相关处理,从而取出不同的正交波形信号。

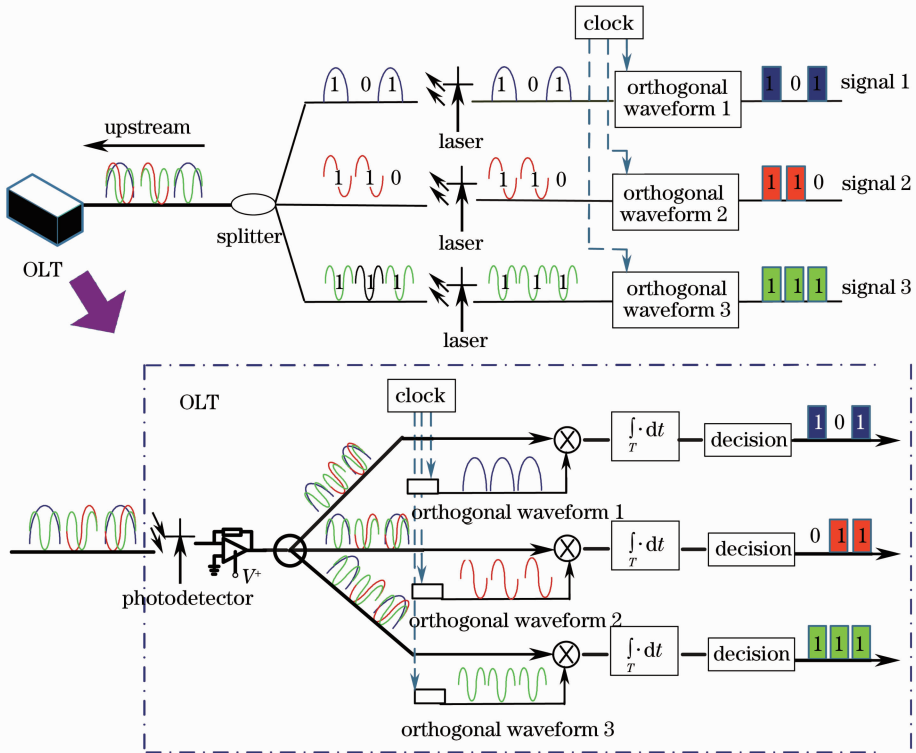


图 3 OGDM-PON(3ONUs)的系统结构

Fig. 3 Architecture of OGDM-PON system (3ONUs)

电相关处理的工作原理如下:在 OLT 分别设置 N 个本地的正交波形产生器,连续地产生对应于 OLT 发射端的 N 种正交波形。通过时钟控制,将

(6)式中的 N 路混合信号和 OLT 本地的正交波形信号通过相关器在同一码元周期内作相关运算(相乘、积分)。例如,对于第 k 路信号

$$\int_T \left[\frac{M}{N} \sum_{i=1}^N A^2 g_i(t) \right] \cdot h_k(t) dt = \begin{cases} \frac{A^2 M}{N} \int_T h_k(t) \cdot h_k(t) dt = \frac{A^2 M}{N}, & \text{"1" level} \\ \frac{A^2 M}{N} \int_T 0 \cdot h_k(t) dt = 0, & \text{"0" level} \end{cases} \quad (7)$$

由(7)式可知,混合信号中含本地波形的码元相关后为一个大于0的值,不含波形或只含其他路正交波形的码元与本地波形作相关运算后都为零,所以,通过在每个码元周期的最末段进行采样得到相关值,经过判决后就可以恢复出对应的 ONU 信号了。

以上分析是在理想条件下得到的,而在实际中,需要考虑的一个比较重要的问题就是激光器的线宽对于系统的性能的影响。当考虑激光器的线宽时,那么在探测器端光电转换后的信号表达式为

$$I = NbA^2 + \sum_{i=1}^N A^2 g_i(t) + \sum_{i,j=1, i < j}^N \{2A^2 \sqrt{[b + g_i(t)] \cdot [b + g_j(t)]} \cos(\Delta\phi_{ij})\}. \quad (8)$$

此时,第三项也即相干叠加引入的拍频噪声的影响就成为一个必须考虑的问题。而在光码分多址(OCDMA)系统中也遇到了类似的情况,即拍频噪声对于系统性能的影响,文献[15]和[16]对这些做了比较详细的研究,其中,文献[16]提出了几种可以用来实现克服拍频噪声的方案如利用精确地同步控制方案和使用低相干度的光源,也可以用在 OGDM-PON 中实现对于拍频噪声的限制。此外,也可以使用中心频率不一样的激光器(但又没有 WDM-PON 对激光器的要求严格)来避免相干项的影响。这些都有待做进一步的研究。

此外,为了保证各路信号间的正交性,还需要:

1) 在每个 ONU 处,需要时钟控制正交波形信号的产生或者延迟,使在光合路器合路时,各路调制波形在同一个码元周期或相差码元周期整数倍 NT 上进行波形对应叠加,波形叠加时不能错开;如果错开,有延时 τ ,则不同路的调制波形将不再满足正交性,即 $\int_T f_i(t + n\tau) \cdot f_j(t) dt \neq 0, (i \neq j)$,此时会影响判决。所以,在安装 ONU 时,需要先对每个 ONU 做一次测距,算出时差,然后用时钟控制各路产生波形的时间,以满足波形对齐叠加的要求。在相差码元周期的整数倍或同步时都可以完全相关,所以对时钟的同步性要求要低于时分复用。

2) 由于是模拟调制,信号必须调制到调制器的

线性区,使调制后的波形尽量保持形状不变。另外,激光器不能锁相,如果相位锁定,则各路光信号之间会发生相干现象,经过光电探测器后,会得到很大的干扰。

3) 在接收端,本地正交波形信号要和发射端波形信号同步或者时钟相差码元的整数倍,以保证作最佳的相关运算。

4) 由于是模拟信号调制和传输,当正交波形阶次很高时,信号的频谱会变宽,为了保持接收到的波形不变,OLT 端光电探测器的带宽要足够的宽,才能无损地探测。

3 仿真结果分析

本文使用 VPI transmission Maker 软件作为仿真软件,仿真系统如图 4 所示。

采用外调制方式,对 OGDM-PON 系统的上行传输性能进行了仿真。首先在发射端利用 Matlab 产生 1 到 N 阶修正 Hermite 脉冲波形(共 N 种正交波形),并输入到 VPI transmission Maker 软件中,使其分别连续产生 N 种正交波形,再由该软件产生 N 路 NRZ 信号,并分别调制到这 N 种不同阶修正 Hermite 脉冲波形上。用连续(CW)激光器和幅度调制器(AM)进行外调制,偏置使调制器工作在线性区,再将调制后的各路光信号通过光耦合器合为一路,然后经过单模光纤传输。

在接收端,先用光电探测器(PD)将接收到的光信号转变为电信号,再加上负向直流电压,去掉混合信号中的直流分量。经过功放放大后均分为 N 路。在接收端,同样利用 Matlab 产生 1 到 N 阶连续修正 Hermite 脉冲波形作为本地波形信号,并通过同步时钟控制波形的传输时间,使接收到的混合电信号与本地波形信号同步或者相差码元周期的整数倍。将均分的 N 路混合信号,分别与 N 路本地波形信号对应相乘,再经积分器积分,积分的周期是一个码元周期,再对每个周期内积分后的信号进行采样,得到积分值,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。

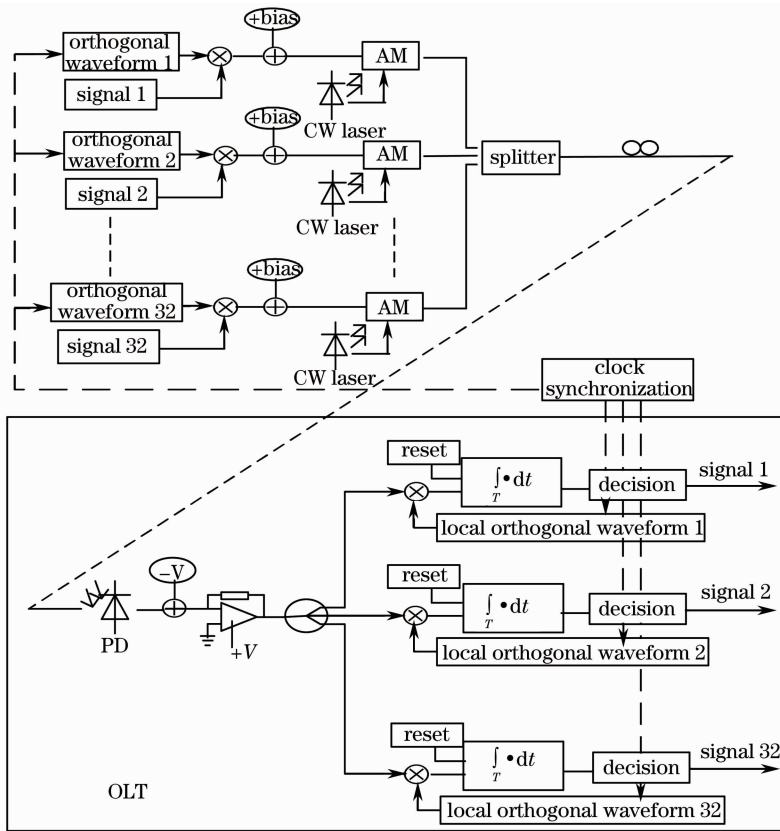


图 4 OGDM-PON 的仿真结构

Fig. 4 Stimulation architecture of OGDM-PON

仿真中,因为是模拟信号外部强度调制,所以光源采用 CW 激光器,上行传输波长为 1310 nm。首先,考虑理想情况,线宽设为 0,外调制器采用理想的 AM 调制器;光纤选用单模光纤,损耗为 0.2 dB/km,由于 PON 的传输距离短,光源波长为 1310 nm,所以色散、色散斜率和非线性都设为 0。每路 ONU 调制后的输出峰值光功率都小于 10 mW,每路 ONU 的传输速率为 10 Gb/s,接收端误码率(BER)控制小于 10^{-4} ,得到数据如表 2 所示。由表 2 可以得到 ONU 的复用路数与传输距离关系曲线,如图 5 所示。

表 2 仿真结果

Table 2 Results of simulation

Number of ONUs	Transmission distance /km
4	90
8	70
12	60
16	45
20	35
24	28
28	25
32	20

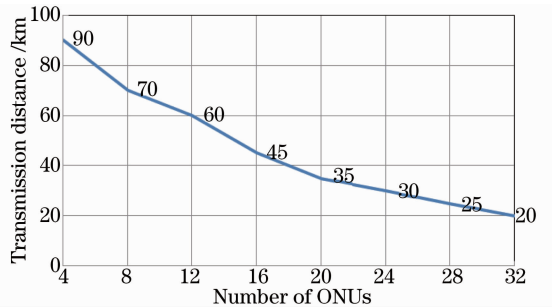


图 5 每路 ONU 速率为 10 Gb/s 外调制时, ONU 的数目和传输距离的关系

Fig. 5 Number of ONUs and transmission distance relationship for a 10 Gb/s signal in each ONU under external modulation

传输距离显现出下降的趋势,这主要是因为随着路数增加,耦合时光的分路比会增加,损耗增大,传输距离减小。如对于 16 路,光分路比为 1:16,插入损耗为 12 dB,对于 32 路,光分路比为 1:32,插入损耗为 15 dB,这种损耗对于所有功率分割型无源光网络(PSPON)都是存在的,不可避免。而且在光纤传输系统中,由于激光器和光电探测器的噪声等影响会造成正交性的减弱,各路之间必然产生影响,而且在相同条件下,路数越多,每一路信号给其他路信号带

在这种情况下,随着 ONU 复用路数的增加,传

来的干扰就越大。对于 32 路 ONUs, 可以达到总传输速率为 320 Gb/s, 每路 ONU 最大可以独自占 10 Gb/s, 传输距离为 20 km。

为了确定线宽对于系统性能的影响的大小, 选择用 0 阶和 1 阶波形来测试在调制到不同的线宽激光器并合路后的信号。图 6 为分别取了线宽为 10、100、1000 kHz 调制并合路后的信号。可以看出, 随着线宽的增加, 调制并混合后的光信号将逐渐出现很大的波动, 而这还只是传输前的信号。如果考虑到传输, 那么在线宽为 1000 kHz 时, 信号已经不具有用来传输的意义了。而在线宽为 100 kHz 时, 可

以看到信号的波动很小; 在线宽为 10 kHz 时, 信号几乎没有了波动。因此, 可以看到激光器的线宽对于信号的影响还是很大的。因而, 需要选择线宽小于 100 kHz 的激光器来进行仿真, 来进一步验证线宽对于 OGDM-PON 系统的性能的影响。

为了验证激光器线宽对于系统的传输性能的影响, 对一个含有 4 个速率为 10 Gb/s 的 ONU 的 OGDM-PON 系统进行了仿真。仿真结果也验证了在激光器线宽为 100 kHz, 误码率小于 10^{-4} 的情况下, 所设计的 PON 系统传输距离可以达到 50 km。

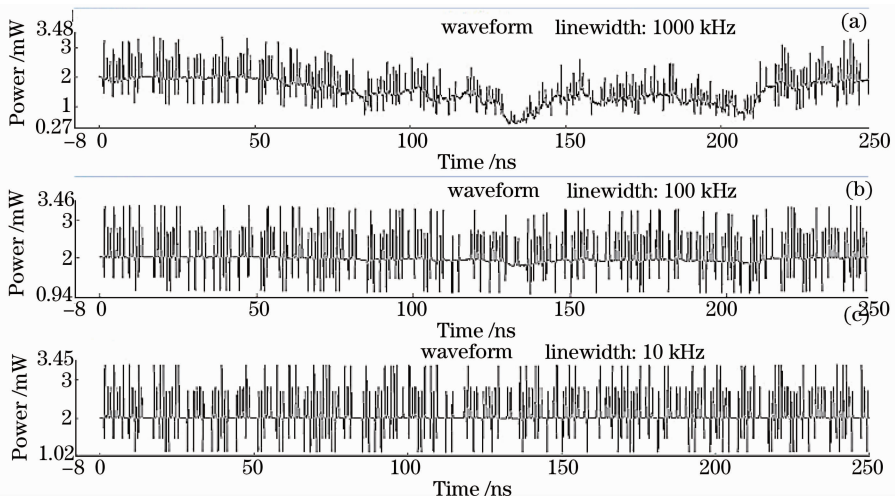


图 6 用不同线宽激光器时的混合信号(2×10 Gb/s)。(a) 1000 kHz; (b) 100 kHz; (c) 10 kHz

Fig.6 Mixed signal (2×10 Gb/s) for different linewidths of lasers. (a) 1000 kHz; (b) 100 kHz; (c) 10 kHz

4 结 论

提出了一种应用于 PON 的上行传输技术, 利用时域中正交波形间的两两相互正交特性, 将各个 ONU 用户信息调制到不同的相互正交的波形上, 再分别调制到同一个波长的激光器上, 来实现上行信号的传输。在 OLT 接收端利用相关运算来分离各个 ONU 信号, 从而在现有的带宽资源限制下, 进一步提高信息的传输容量。并且, 不需要改变现有 PON 系统的结构, 不需要增加新的光学元件, 实现了 ONU 端光模块的无色性, 同时, 可以采用非突发式工作模式, 提高了传输速率。

选用修正 Hermite 脉冲波形作为正交波形, 仿真了理想情况下同时传输 32 路 ONU 信号, 在外调制情况下, 总传输速率为 320 Gb/s, 每个 ONU 独自占用 10 Gb/s, 传输距离达到 20 km。同时, 通过仿真, 分析了激光器线宽对于系统的性能的影响。在线宽为 100 kHz 时, 仿真显示在 4 路速率为 10 Gb/s 的 ONU 传输 50 km 时可以实现误码率小

于 10^{-4} , 进一步验证了正交波形复用技术应用在 PON 的上行传输是可行的。

参 考 文 献

- Luying Zhou, Xiaofei Cheng, Yong-Kee Yeo, *et al.*. Hybrid WDM-TDM PON architectures and DWBA algorithms[C]. IEEE 5th International ICST Conference on Communications and Networking in China, 2010. 1-6.
- Yufeng Shao, Junwen Zhang, Wuliang Fang, *et al.*. A novel OFDM-CPM modulation scheme and its application in WDM-PON [J]. Chin Opt Lett, 2011, 8(9): 894-898.
- Lin Rujian, Song Yingxiang, Zhang Lin. Discussion on OFDM-PON and WDM-PON [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(7): 070601.
林如俭, 宋英雄, 张林. 论 OFDM-PON 与 WDM-PON [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7): 070601.
- He Chen, Shilin Xiao, Lilin Yi, *et al.*. SAC-OCMD/TDM system for upgrading the TDM PON [J]. Chin Opt Lett, 2011, 9 (10): 100606.
- He Chen, Shilin Xiao, Min Zhu, *et al.*. Hybrid WDMA/OCDMA 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.

- 6 Patrick P Iannone, Kenneth C Reichmann. Optical access beyond 10 Gb/s PON [C]. European Conference on Optical Communications (ECOC), 2010, 1—5.
- 7 Jea-Hoon Yu, Byoung-Whi Kim, Nam Kim. WDM/TDMA Hybrid-PON: Wx-PON system [C]. IEEE International Conference on Advanced Communication Technology, 2009, 3; 1707—1711.
- 8 Lilin Yi, Zhengxuan Li, Yi Dong, *et al.*. Upstream capacity upgrade in TDM-PON using RSOA based tunable fiber ring laser [J]. Opt Express, 2012, 20(9): 10416—10425.
- 9 Lijia Zhang, Xiangjun Xin, Bo Liu, *et al.*. A novel ECDM-OFDM-PON architecture for next-generation optical access network[C]. Opt Express, 2010, 18(17): 18347—18353.
- 10 Wu Xuanli, Qiu Xin, Ning Xiaoyan, *et al.*. Orthogonal Hermite functions based orthogonal pulse shaping method [C]. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2009. 496—499.
- 11 Lachlan B Michael, Mohammad Ghavami, Ryuji Kohno. Multiple pulse generator for ultra-wideband communication using Hermite polynomial based orthogonal pulses [C]. IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2002. 47—51.
- 12 Craig Mitchell, Ryuji Kohno. High data rate transmissions using orthogonal modified Hermite pulses in UWB communications[C]. International Conference on Telecommunications, 2003, 2: 1278—1283.
- 13 Alan R. Lindsey. Wavelet packet modulation for orthogonally multiplexed communication [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1997, 45(5): 1336—1339.
- 14 Mohammad Ghavami, Lachlan B Michael, Shinichiro Haruyama, *et al.*. A novel UWB pulse shape modulation system [J] . Wireless Personal Communications, 2002, 23(1): 105—120.
- 15 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.
- 16 Xu Wang, Ken-ichi Kitayama. Analysis of beat noise in coherent and incoherent time-spreading OCDMA [J]. J Lightwave Technol, 2004, 22(10): 2226—2235.

栏目编辑: 王晓球