

文章编号: 1001-3806(2016)02-0183-06

光分组交换系统中载波抑制光标签的研究

徐赐坚, 罗风光*, 王敬华

(华中科技大学 光学与电子信息学院 下一代互联网接入系统国家工程实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了研究高带宽利用率和容量的光分组交换系统,对载波抑制调制原理进行理论分析,提出了一种载波抑制调制光标签的方案,并对基于载波抑制调制的光标签系统进行了仿真分析和实验研究。结果表明,载波抑制光标签的中心载波抑制比达到 21.3dB;在 622Mbit/s 和 1.25Gbit/s 的标签调制速率下,系统传输距离超过 40km 时,依然能保持低于 10^{-10} 的误比特率;以误比特率 10^{-10} 为标准,在传输距离为 40km 时,两种标签调制速率的功率代价分别为 1.7dB 和 1.9dB。此结果说明载波抑制光标签在光分组交换系统中具有串扰小、功率代价低等特点,信号质量好,适合远距离传输。

关键词: 光通信; 光分组交换; 载波抑制; 光标签; OptiSystem 仿真

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.007

Research of carrier suppression label of optical packet switching system

XU Cijian, LUO Fengguang, WANG Jinghua

(National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to achieve optical packet switching system with high bandwidth utilization and large-capacity, based on theoretical analysis of carrier suppression principle, a scheme of optical label modulation was proposed. Simulation and experiment of the system were conducted. The results show that the center carrier suppression ratio of the carrier suppression light label is 21.3dB. Under label modulation rates of 622Mbit/s and 1.25Gbit/s, bit error rate (BER) of the system is lower than 10^{-10} when transmission distance is over 40km. In the standard of BER 10^{-10} , power penalty of two label modulation rates is 1.7dB and 1.9dB when transmission distance is 40km. Carrier suppression light label in optical packet switching system has high extinction ratio and low power penalty, therefore it is suitable for long distance transmission.

Key words: optical communication; optical packet switching; carrier suppression; optical label; OptiSystem simulation

引言

光分组交换(optical packet switching, OPS)属于分组级的光交换技术,能以分组的粒度快速分配光信道,同时支持异步传输模式(asynchronous transfer mode, ATM)和网络互连协议(internet protocol, IP)接入技术,有很大的应用前景^[1-2]。一个光分组通常由光标签和净荷两部分组成,其中光标签用来承载光分组的路由控制信息^[3-4]。常见的光标签方案包括串行比特光标签^[5]、正交调制光标签^[6]、波长光标签^[7]和副载波复用光标签^[8]。串行比特光标签方案采用时分复用

技术,将光标签和净荷在同一波长信道上串行传输,这种方案的带宽利用率高、发送端简单易行,但接收端的同步和定时控制复杂,成本非常高。正交调制光标签方案采用光载波的强度、频率或相位分别承载净荷和标签信息,这种方案支持灵活的波长变换,协议相对简单,但是信号质量较差。波长光标签方案在多个特定的波长分别发送光标签和净荷,充分利用了密集波分复用技术,链路上的信号传输速率不必太高,但是信号受色散的影响较大,发送端、接收端和中心节点必须配置高速串并转换器,扩展性较差。副载波复用光标签方案通常先必须用光带阻滤波器将中心载波频率滤除,然后再与净荷信号合成为光分组^[9]。这种方案对滤波器和激光器的稳定性要求很高,生成的标签往往消光比不理想,而且调制深度很小^[10-11]。而基于载波抑制的副载波调制光标签技术^[12]是利用马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder modulator, M-ZM)产生载波抑制的双边带副载波来承载光标签,再与另一路中心载波

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471179; 61301226; 61275069); 国家八六三高技术研究发展计划资助项目(2012AA011301)

作者简介: 徐赐坚(1990-),男,硕士研究生,现主要从事全光分组交换网络方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: fgluo@hust.edu.cn

收稿日期: 2015-03-10; 收到修改稿日期: 2015-04-14

调制的净荷信号进行耦合,得到完整的光分组。标签和净荷在光频域上是分开的,几乎没有串扰,能够很方便地进行提取和更新,不需要复杂的同步控制,由于标签和净荷在同一波长通道内传输,波长利用率高,适用于高速的光数据交换,有助于实现高带宽利用率和大容量的光分组交换系统^[13]。

1 光分组交换系统中载波抑制调制原理

光分组交换系统中的载波抑制调制标签是基于铌酸锂(LiNbO₃)波导的 M-ZM 来实现的^[14]。M-ZM 是应用最广泛的外调制器,可以提供很高的调制速度,而且消光比非常高。图 1 就是 M-ZM 的基本结构图,其中 V_{RF} 和 V_{bias} 分别为射频信号电压和偏置电压, ω_s 为射频角频率, θ 为双臂信号相位差。M-ZM 由两个 LiNbO₃ 平面波导材料的干涉臂组成,相当于两个独立相位调制器的组合,它通过控制两分支臂的信号电压和相位以及偏置电压来实现信号调制^[15]。

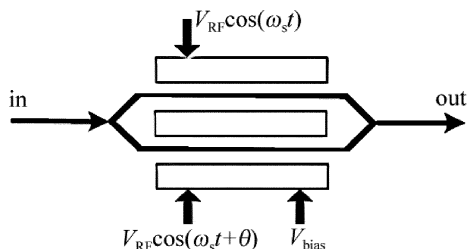


Fig. 1 Basic structure of M-ZM

相位调制器的基本数学模型如下:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \exp \{ j \Delta \varphi [V_{RF} \cos(\omega_s t + \theta)] \} \quad (1)$$

式中, $E_{out}(t)$ 和 $E_{in}(t)$ 分别为相位调制器的输入和输出, $\Delta \varphi$ 为相移常数, t 为时间变量。

$$E_{in}(t) = A \exp(j \omega_c t) \quad (2)$$

式中, A 为载波信号的振幅, ω_c 为载波角频率。将 $E_{out}(t)$ 取实部为 $E(t)$, 并用贝塞尔函数展开可得:

$$E(t) = A \left\{ \cos(\omega_c t) J_0(V_{RF} \Delta \varphi) + 2 \cos(\omega_c t) \times \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(V_{RF} \Delta \varphi) [\cos(2n(\omega_s t + \theta))] + 2 \sin(\omega_c t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(V_{RF} \Delta \varphi) \times [\cos((2n-1)(\omega_s t + \theta))] \right\} \quad (3)$$

式中, $J_n(\cdot)$ 为贝塞尔函数。

M-ZM 可看成是两个独立相位调制器的组合,因此两个相位调制器的输出光信号发生干涉^[16],得到 M-ZM 的信号输出,当两臂射频输入信号幅度和频率相同的情况下,方程简化为:

$$E_{out}(t) = \frac{A}{2} \left\{ J_0(\beta) [(\cos(\lambda \pi) + 1) \times \right.$$

$$\left. \cos(\omega_c t) - \sin(\lambda \pi) \sin(\omega_c t) \right] + 2 \left\{ \cos(\lambda \pi) \cos(\omega_c t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta) [\cos(2n\omega_s t)] - \sin(\lambda \pi) \sin(\omega_c t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta) [\cos(2n\omega_s t)] \right\} + 2 \cos(\omega_c t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta) [\cos(2n(\omega_s t + \theta))] + 2 \left\{ \cos(\lambda \pi) \sin(\omega_c t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \times J_{2n-1}(\beta) [\cos((2n-1)\omega_s t)] - \sin(\lambda \pi) \cos(\omega_c t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\beta) \times [\cos((2n-1)\omega_s t)] \right\} + 2 \sin(\omega_c t) \times \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\beta) [\cos((2n-1)(\omega_s t + \theta))] \right\} \quad (4)$$

式中, $\beta = \pi V_{RF} / V_{\pi, RF}$, $\lambda = V_{bias} / V_{DC}$, $V_{\pi, RF}$ 和 V_{DC} 分别是 M-ZM 的交流和直流开关电压。

当 M-ZM 的偏置电压 $V_{bias} = -V_{DC}$ 的时候,调制器为载波抑制调制状态,此时 $\lambda = -1$,调制器的输出方程变为:

$$E_{out}(t) = A \left\{ \cos(\omega_c t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta) \times [-\cos(2n\omega_s t) + \cos(2n(\omega_s t + \theta))] + \sin(\omega_c t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta) [-\cos((2n-1)\omega_s t) + \cos((2n-1)(\omega_s t + \theta))] \right\} \quad (5)$$

下面进一步讨论 M-ZM 两臂相位差的变化引起的载波抑制比的变化对光标签系统的影响。当调制器的双臂信号相位差为 0° , 即 $\theta = 0$ 时,调制器的输出方程变为:

$$E_{out}(t) = 0 \quad (6)$$

从方程可以看出,中心载波消失,奇数边带和偶数边带全部被抑制。经过 OptiSystem 仿真后得到的光谱图如图 2a 所示。当调制器的双臂信号相位差为 90° , 即 $\theta = \pi/2$ 时,调制器的输出方程变为:

$$E_{out}(t) = 2A [J_1(\beta) \sin(\omega_c t) \sin(\omega_s t) + J_2(\beta) \cos(\omega_c t) \cos(2\omega_s t) + J_3(\beta) \sin(\omega_c t) \times \sin(3\omega_s t) + J_4(\beta) \cos(\omega_c t) \cos(4\omega_s t) + \dots] \quad (7)$$

从方程可以看出,中心载波被抑制,输出信号中包含奇数边带和偶数边带。经过 OptiSystem 仿真后得到的光谱图如图 2b 所示。当调制器的双臂信号相位差为 180° , 即 $\theta = \pi$ 时,调制器的输出方程变为:

$$E_{out}(t) = 2A [J_1(\beta) \sin(\omega_c t) \cos(\omega_s t) + J_3(\beta) \sin(\omega_c t) \cos(3\omega_s t) + \dots] \quad (8)$$

从方程可以看出,中心载波消失,输出信号中仅有

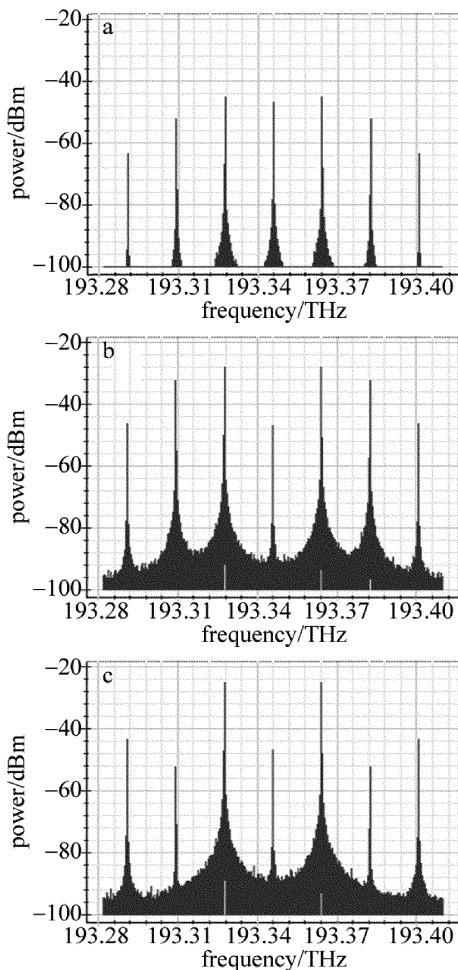


Fig. 2 Carrier suppression spectrum with phase difference between the modulator arms

a— $\theta=0$ b— $\theta=\pi/2$ c— $\theta=\pi$

奇数边带,偶数边带全部被抑制。经过 OptiSystem 仿真后得到的光谱图如图 2c 所示。

从图 2 中可以明显看出,调制器双臂的输入射频信号相位差对载波抑制的效果有很大的影响。当 $\theta=0$ 时,中心载波、奇数边带和偶数边带全部被抑制,调制器输出功率很小,而且载波抑制比很小,非常不适合承载标签信息;当 $\theta=\pi/2$ 时,中心载波被抑制,输出信号中同时包含奇数边带和偶数边带,中心载波抑制比较理想,但是对相邻 2 阶边带的抑制效果很小,相当

于 1 阶边带和 2 阶边带同时承载标签信息,受光纤色散影响很大,而且标签解调也非常复杂;当 $\theta=\pi$ 时,输出信号中仅有奇数边带,中心载波和偶数边带全部被抑制,用于承载标签的 1 阶边带对中心载波和 2 阶边带的抑制效果都达到了 20dB 以上,标签可以在干扰很小的情况下调制到副载波上。因此只有在 $\theta=\pi$ 时,载波抑制的效果最好。

2 基于载波抑制调制的光标签系统

基于载波抑制调制的光标签系统结构如图 3 所示,主要由光标签产生、提取与更新三部分组成。

激光器发出的连续光经光耦合器 (optical coupler, OC) 先分为两路光,分别承载净荷和标签信息的电信号调制。图 3 中上面的一路光,先利用偏振控制器 (polarization controller, PC) 调节偏振态以便于 M-ZM₁ 的偏振轴对准,然后将 M-ZM₁ 的偏置电压调节到零点电压,同时从 M-ZM₁ 的射频 (radio frequency, RF) 调制端加入相位差为 180° 的射频信号,调制的光信号中,其中心载波被抑制,而只含有了两个副载波边带。然后利用第 2 个调制器 M-ZM₂ 把标签电信号调制到两个光边带上;下面一路光经偏振控制后直接被净荷电信号调制到中心载波上,然后两路光信号通过耦合器耦合成光分组信号。光分组经过光纤链路的传输,到达网络中的核心节点。核心节点接收到光分组后,先用光环行器和光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 组成的光滤波器将净荷与标签信号分离。分离出来的光标签信号经过雪崩光电二极管 (avalanche photo diode, APD) 光电探测器转换成电信号,进入标签处理器,提取出路由和控制信息,并生成新的标签电信号。从光环行器和 FBG 分离出来的净荷信号进入光交换矩阵中,光交换矩阵根据光标签中的路由信息进行光路切换,将净荷信号从目的端口输出。经过光交换后的净荷信号通过耦合器分成两路,其中一路采用载波抑制调制方案产生两个副载波边带来承载标签处理器生成的新标签,然后将新标签与另一路合成

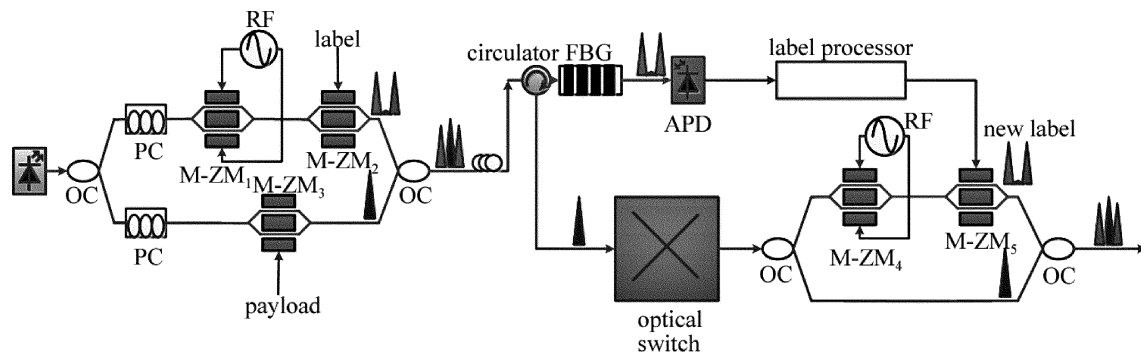


Fig. 3 Configuration diagram of labeling system based on carrier suppression modulation

新的光分组。合成的新分组进入光纤链路中继续传播。

3 载波抑制调制的光标签系统仿真分析

3.1 仿真参量设置

OptiSystem 软件具有强大的模拟环境和真实的器件和系统的分级定义,是一款非常优秀的光通信系统设计软件。本文中采用 OptiSystem7.0 对载波抑制调制的光标签系统进行模拟仿真。

设定激光器的中心波长为 1550.540nm,带宽为 10MHz;M-ZM 的消光比为 20dB,微波信号源的射频频率为 18GHz;FBG 的反射波长为 1550.540nm,带宽为 20GHz,反射率是 97%;接收端 APD 光探测器的响应度为 1A/W。净荷是 10Gbit/s 的非归零码(non-return to zero, NRZ)伪随机序列,标签信号为 1.25Gbit/s 的 NRZ 伪随机序列。

3.2 仿真结果分析

3.2.1 载波抑制光标签 采用载波抑制方法实现的光分组调制的光谱图如图 4 所示。由相位差为 180° 的两路射频信号调制产生的载波抑制双边带光谱图如

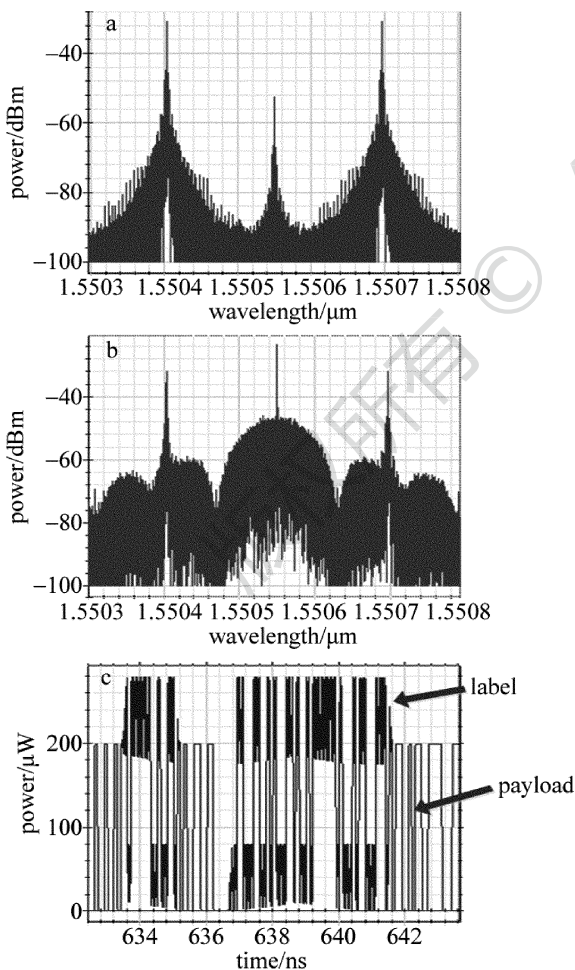


Fig. 4 Spectrum of optical packet modulation

a—spectrum of label b—spectrum of optical packet c—time domain waveform of optical packet

图 4a 所示,标签和净荷通过耦合器组成光分组的光谱图如图 4b 所示,光分组的时域波形图如图 4c 所示。

从图 4 中可以看出,两个副载波边带的频率间隔为 36GHz,中心光载波的抑制比大于 20dB,使副载波边带能更有效地承载标签电信号。这种光标签方案分两路分别调制净荷信号和标签信号,二者互不干扰,从而使标签和净荷都有很高的消光比。由于标签信号和净荷信号是由同一个连续激光器产生,而且二者的频率间隔恒定,因此对激光器的稳定性要求不高,非常容易实现。

3.2.2 系统的传输性能 光分组信号在光纤链路中传输,由于光纤中的损耗、色散和非线性等因素的影响,系统的传输距离将会受到限制。经过一段光纤的传输到达核心节点的光分组,再经过光环行器和 FBG 提取出的光标签的误比特率 γ_{BER} 相对于传输距离的关系如图 5 所示。仿真系统分别从 622Mbit/s 和 1.25Gbit/s 的标签调制速率来对载波抑制光标签系统进行研究,然后进行比较分析。光纤采用零色散波长在 1.3 μ m 窗口的 G.652 标准单模光纤(同时考虑光纤的损耗、色散和非线性等负面因素)。

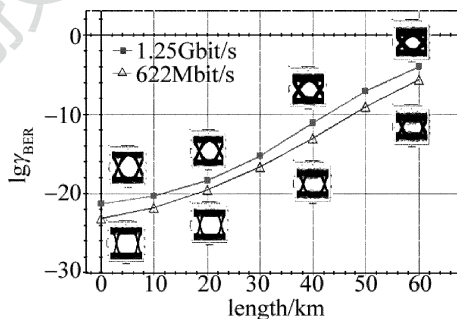


Fig. 5 Relationship between bit error rate of label and transmission distance

从图 5 中可以看出,基于载波抑制调制的光标签信号眼图非常清晰,信号质量很好,传输距离超过 40km 时,依然能保持低于 10^{-10} 的误比特率。在光标签系统中,由于中心载波被抑制,只有两个 1 阶边带承载标签信息,在接收端没有出现信号质量随着传输距离出现周期性变化,避免了“射频衰减效应”。在相同的传输距离的情况下,622Mbit/s 调制速率的光标签信号质量相对 1.25Gbit/s 调制速率的光标签信号要好一些。因为净荷调制后的边带既包括一定的线状谱,也包含一定的连续谱。因此会和标签信号发生一些微小的相互干扰。当标签的调制速率增大时,使标签信号的带宽增大,两者之间的干扰也随之增大,使标签信号质量略微下降。

4 基于载波抑制调制的光标签系统实验

4.1 实验平台

基于载波抑制调制的光标签系统实验平台如图 6

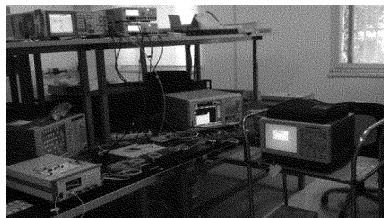


Fig. 6 Light labeling system platform of carrier suppression modulation

所示。铌酸锂 M-ZM 采用 Photine 的 MX-LN-20 强度调制器,调制带宽为 20GHz,交流和直流开关电压都是 6.5V,插入损耗为 2.7dB,消光比达到 22dB。窄线宽激光器输出中心波长为 1550.540nm 的直流光,微波信号源输出 18GHz 的射频信号到第 1 个调制器进行载波抑制,由美国泰克的误码仪 BSA125C 同时产生速率为 1.25Gbit/s 和 10Gbit/s 的伪随机码序列,经过微波放大器后加载在 M-ZM₂ 和 M-ZM₃ 上,两路信号经过光耦合器耦合成分组信号。由德国惠美可编程电源 HMP4030 为 3 个调制器和微波放大器提供直流偏置。光纤光栅的定制参量为中心波长为 1550.540nm,带宽为 0.203nm,反射率为 96.13%,边模抑制比为 19.88dB。

4.2 实验结果分析

4.2.1 载波抑制光标签的产生和提取 利用偏振控制器和 M-ZM 的直流偏置电压综合调节实现光载波抑制,然后用高精度光谱分析仪测得载波抑制标签、合成的光分组信号以及提取出的光标签光谱如图 7 所示。

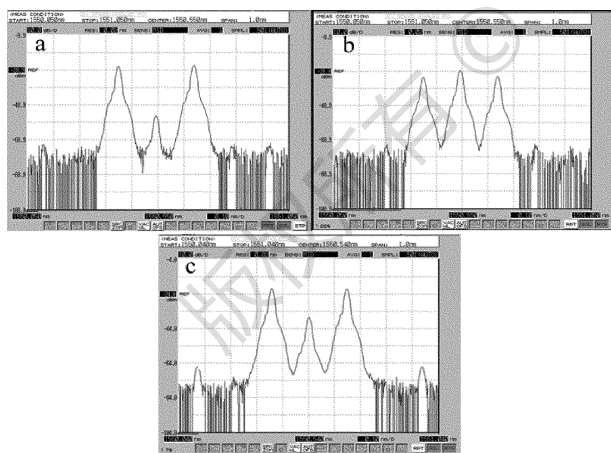


Fig. 7 High-precision spectrum

a—the spectrum of carrier suppression labels b—the spectrum of optical packet signal c—the spectrum of extracted optical labels

从图 7a 中可以看出,载波抑制的效果非常好,两个 1 阶边带的峰值光功率为 -28.9dBm,中心载波的峰值功率为 50.2dBm,中心光载波抑制比达到了 21.3dB,与仿真结果基本相符。图 7b 和图 7c 分别为光标签系统在光环行器和 FBG 组成的光滤波器滤波前后的光谱图,二者相比较可以得到 FBG 的消光比达

到了 16dB 左右。

4.2.2 误比特率 在载波抑制光标签系统的接收 APD 光电探测器前端加一个 1×2 光耦合器,同时进行接收光功率和误比特率的测量。分别设置误码仪中标签电信号为 622Mbit/s 和 1.25Gbit/s 的伪随机码,同时在光标签系统中连接上不同长度的标准光纤,得到不同标签调制速率和不同传输距离的情况下,误比特率相对接收光功率的变化。

图 8 是载波抑制系统误比特率曲线图,背靠背系统(back to back, BTB)的传输距离为 0。以误比特率 10^{-10} 为标准,分别讨论两种标签调制速率下,在 BTB、光纤传输 20km 和 40km 3 种情况时系统的接收端功率。从图中可以看出,当标签调制速率为 622Mbit/s 时,传输距离为 20km 和 40km 的接收光功率的功率代价分别为 0.8dB 和 1.7dB;当标签调制速率为 1.25Gbit/s 时,传输距离为 20km 和 40km 的接收光功率的功率代价分别为 0.8dB 和 1.9dB。也就是说以误比特率 10^{-10} 为标准,在传输距离在小于 20km 时,系统的传输性能很好;传输距离为 40km 时,系统的传输性能下降不到 2dB。其它光标签方案^[17-18]在没有色散补偿光纤的情况下,传输 40km 后的功率代价大于 3dB。由此可以得出,载波抑制光标签系统很适合远距离传输。

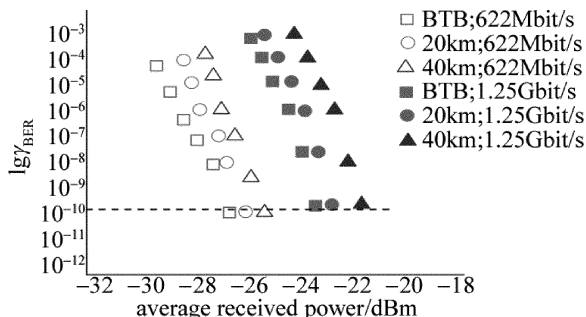


Fig. 8 Curves of bit error rate

5 结论

对基于载波抑制调制的光标签系统,首先对不同传输距离的光标签信号的误比特率进行了仿真和分析,得到基于载波抑制调制的光标签信号质量很好,当传输距离超过 40km 时,依然能保持低于 10^{-10} 的误比特率。然后通过实验研究了在不同标签调制速率和不同传输距离下,光标签误比特率相对于接收光功率的变化。实验发现,以误比特率 10^{-10} 为标准,在传输距离在小于 20km 时,系统的传输性能很好;传输距离为 40km 时,系统的传输性能下降不到 2dB。表明基于载波抑制调制的光分组标签的抗误比特率能力很强,适合远距离传输,证明了基于载波抑制调制标签技术实

现高速率、长距离光分组交换系统的可行性。

参 考 文 献

- [1] LI B, LUO F G, YU Zh H, *et al.* A novel architecture of optical code label generation and recognition for optical packet switching [J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2010, 3(4):347-353.
- [2] YOO S J B. Optical packet and burst switching technology for future photonic internet [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12):4468-4492.
- [3] ROESE J, BRAUN R P, TOMIZAWA M. Optical transport network evolving with 100 gigabit ethernet [J]. *IEEE Optical Communications*, 2010, 48(3):28-34.
- [4] CHEN F J, LUO J H, LUO F G. Single circularly polarized attosecond pulse generation by spatially inhomogeneous fields from atoms with nonvanishing angular quantum number [J]. *Optics Communications*, 2015, 342(1):68-72.
- [5] MORIWAKI O, SAKAMOTO T, OKADA A, *et al.* Optical packet switching using pattern-matching label processing based on an optical timing pulse generator [C]//2002 28th European Conference on Optical Communication. New York, USA: IEEE, 2002, 2: 1-2.
- [6] CHI N, XU L, CHRISTIANSEN L J, *et al.* Optical label swapping and packet transmission based on ASK/DPSK orthogonal modulation format in IP-over-WDM networks [C]//Optical Fiber Communication Conference. New York, USA: IEEE, 2003:1248576.
- [7] OKADA A. All-optical packet routing in AWG-based wavelength routing networks using an out-of-band optical label [C]//Optical Fiber Communication Conference. New York, USA: IEEE, 2002:213-215.
- [8] CHEN F J, LUO F G, FENG G. Design of double-weight code for synchronous OCDMA systems with power control [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(11):110608.
- [9] KIM H. Long-reach WDM-PON using directly modulated RSOAs and subcarrier multiplexing [C]//Optical Fiber Communication Conference. New York, USA: IEEE, 2012:1-3.
- [10] DONG Z, CAO Z Zh, CHEN L, *et al.* Experimental research on a radio-over-fiber system based on 60GHz millimeter-wave [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4):1018-1021 (in Chinese).
- [11] LEE H J, HERNANDEZ V, TSUI V K, *et al.* Simple, polarization, independent and dispersion-insensitive SCM signal extraction technique for optical switching systems applications [J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(20):1240-1241.
- [12] CHEN L X, HUANG Ch, CHEN L. A modified scheme for optical millimeter-wave generation based on optical carrier suppression modulation [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6):659-662 (in Chinese).
- [13] de HEYN P, LUO J, di LUCENTE S, *et al.* In-band label extractor based on cascaded si ring resonators enabling 160Gb/s optical packet switching modules [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(9):1647-1653.
- [14] HE Zh, HUANG B, CHI N, *et al.* Research on optical label technology in optical packet switching [J]. *Telecommunications Science*, 2008(7):73-78 (in Chinese).
- [15] REN T T, XU Ch, ZHENG Sh L, *et al.* Effect of dither tone-based electro-optic modulator bias control on radio-frequency signal [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6):773-776 (in Chinese).
- [16] HIGUMA K, MORI S, KAWANISHI T, *et al.* A bias condition monitor technique for the nested Mach-Zehnder modulator [J]. *Leice Electronics Express*, 2006, 3(11):238-242.
- [17] CAO Y S. Research of novel optical labeled switching systems and optically controlled optical switching components [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010: 18-44 (in Chinese).
- [18] JIA Z, YU J, CHANG G K. A full-duplex radio-over-fiber system based on optical carrier suppression and reuse [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(16):1726-1728.