

40Gb/s 光纤传输单边带归零信号的产生和性能分析*

文爱军 傅 炜 潘 青

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室,西安 710071)

摘 要 对光的单边带归零信号(SSBRZ)的一种产生方式进行了推导.通过合理设置调制器的偏置电压,使产生的 SSBRZ 信号的一个边带得到更有效的抑制,而且没有引起光脉冲的变形.对其在普通单模光纤(SMF)40Gb/s 传输系统中的传输进行了仿真,并和归零(RZ)信号、载波抑制的 RZ(CSRZ)信号的性能相比较,结果表明:在色散完全补偿的单信道传输系统中,SSBRZ 的抗非线性能力比 RZ、CSRZ 强.

关键词 光纤通信;单边带;40 Gbps;MZ 调制器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

随着光纤传输系统中单波长容量的提升(从 10Gb/s 到 40Gb/s),原来影响并不严重的非线性效应随传输距离的增加对信号的影响越来越严重,成为光传输中除色散和光放大器自发辐射噪声(ASE)外的另一重要限制因素.在色散完全补偿的情况下,怎样抑制光纤的非线性效应和光放大器的自发辐射噪声成为研究的热点.光放大器噪声的抑制可通过增大信噪比实现,即提高光信号的平均功率;但另一方面,增大光信号的人纤功率势必引起更严重的非线性效应.原来提出的抗色散能力强的光双二进制(Duobinary)^[1]也由于抗非线性效应能力弱的原因在 40G 系统中应用不广.新型调制格式的引入可有效地抑制非线性效应,如载波抑制的归零信号(CSRZ)^[2,3],单边带归零信号(SSBRZ)^[3,4],啁啾归零信号(CRZ)^[5],载波抑制的差分相移键控归零信号(CSRZ-DPSK)^[6]等.

采用 SSBRZ 的优势在于:1)相对于普通的 RZ、CSRZ 来说,其抗非线性能力有所提高;2)相对于 CRZ 来说,其谱宽较窄;3)相对于 CSRZ-DPSK 来说,其调制解调简单.

单边带(SSB)信号的产生,文献[7,8]已有报道,但都需要希尔伯特变换器.由于希尔伯特变换器难实现,以及归零信号良好的抗非线性性能,所以引进了归零的单边带信号,文献[4]报道的 SSBRZ 频谱中的一个边带的一级边线谱并没有得到有效抑制,即边带的抑制不明显,文献[3]报道的 SSBRZ 的一个边带得到了有效抑制,但调制器偏置电压的设置并不理想,在进行单边带调制过程中将造成光脉冲的部分畸变.本文用公式推导了一种 SSBRZ 信

号的产生,使产生的 SSBRZ 的一个边带得到有效抑制,光脉冲也没有发生畸变.仿真对比了 RZ、CSRZ 和 SSBRZ 在 40G 单信道传输系统中的传输性能,结果表明,SSBRZ 信号的性能要优于 RZ 和 CSRZ.

1 单边带归零信号的产生原理

SSBRZ 信号的产生方式如图 1.使用两个 MZ (Mach-Zehnder)调制器,第一个 MZ 调制器产生 NRZ 编码信号,第二个 MZ 调制器对 NRZ 信号进行幅度和相位的调制,产生占空比为 50%的 SSBRZ. MZ 调制器偏置电压的设置见表 1.

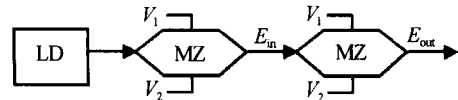


图 1 SSBRZ 信号的产生框图
Fig. 1 Generation of SSBRZ signal

表 1 调制器偏置电压的设置情况

第一个 MZ	$V_1 = -V_2 = \frac{V_\pi}{2} + \frac{V_\pi}{2}d(t)$
第二个 MZ	$V_1 = \frac{V_\pi}{2} + \frac{\sqrt{2}}{4}V_\pi \sin(\omega_b t + \frac{3\pi}{4})$ $V_2 = \frac{\sqrt{2}}{4}V_\pi \cos(\omega_b t + \frac{3\pi}{4})$

V_π 为 MZ 调制器的开关电压, ω_b 等于比特率乘以 2π ,设置的参量使产生的 SSBRZ 信号为占空比 50%的上边带信号. MZ 调制器的输入电场和输出电场的关系为式(1)^[9], E_{out} 为调制器输出电场, E_{in} 为调制器输入电场

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{2} \exp(j\pi \frac{V_1}{V_\pi}) + \frac{\gamma E_{in}}{2} \exp(j\pi \frac{V_2}{V_\pi}) \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{\delta}-1}{\sqrt{\delta}+1} \quad (2)$$

γ 是考虑到输入/输出 Y-分支器的非对称性和 MZ 两臂损耗不一样等因素引入的参量, $0 \leq \gamma \leq 1$, γ 与消光比 δ (最大光功率与最小光功率之比)的关系见上式. 完全消光情况下(即理想情况下), $\gamma=1$, 由此

* 华为科技基金资助项目

Tel: 029-88204468 Email: ajwen@xidian.edu.cn

收稿日期: 2005-06-13

式(2)可简化为

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{2} \exp(j\pi \frac{V_1}{V_\pi}) + \frac{E_{in}}{2} \exp(j\pi \frac{V_2}{V_\pi}) = E_{in} \cos \frac{\pi(V_1 - V_2)}{2V_\pi} \exp j \frac{\pi(V_1 + V_2)}{2V_\pi} \quad (3)$$

对于幅度调制信号为 $m(t)$, 载频为 ω_c 的波形为

$$X(t) = [m(t) \pm j \hat{m}(t)] \exp(j\omega_c t) \quad (4)$$

信号 $X(t)$ 为单边带信号^[10], $\hat{m}(t)$ 是 $m(t)$ 的希尔伯特变换, 式中的正负号表示上边带或下边带.

将图 1 第二个 MZ 调制器的偏置电压代入式(3), 并将正弦信号和余弦信号泰勒展开, 省略高阶项, 可得

$$\begin{aligned} E_{out} &= E_{in} \cos \left[\frac{\pi(V_1 - V_2)}{2V_\pi} \right] \exp \left[j \frac{\pi(V_1 + V_2)}{2V_\pi} \right] = \\ &E_{in} \cos \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \cos \omega_b t \right] \exp \left[j \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{4} \sin \omega_b t \right] \right] = \\ &E_{in} \exp \left[j \frac{\pi}{4} \right] \cos \left[\frac{\pi}{4} \cos \omega_b t + \frac{\pi}{4} \right] \exp \left[-j \frac{\pi}{4} \sin \omega_b t \right] = \\ &\frac{\sqrt{2}}{2} E_{in} \exp \left[j \frac{\pi}{4} \right] [1 - m(t) + \dots] [1 - j \hat{m}(t) + \dots] = \\ &\frac{\sqrt{2}}{2} E_{in} \exp \left[j \frac{\pi}{4} \right] \{1 - [m(t) + j \hat{m}(t)] + \dots\} \quad (5) \end{aligned}$$

式(5)中, $m(t) = \frac{\pi}{4} \cos \omega_b t$, $m(t)$ 的希尔伯特变换为

$$\hat{m}(t) = \frac{\pi}{4} \sin \omega_b t, m(t) \text{ 和 } \hat{m}(t) \text{ 的绝对值都小于}$$

1. E_{in} 为已调制的 NRZ 编码信号, 其频谱宽度较窄, 因此 $E_{in} m(t)$ 的希尔伯特变换近似为^[10] $E_{in} \hat{m}(t)$, $E_{in} m(t) + j E_{in} \hat{m}(t)$ 项即为单边带信号. 由于推导过程中存在高阶项, 因此 E_{out} 是近似的单边带信号, 它的一个边带信号受到抑制, 并保留了载波分量.

从幅度的角度分析, 不考虑相位调制项, 则

$$\cos \left[\frac{\pi(V_1 - V_2)}{2V_\pi} \right] \text{ 项对 NRZ 编码信号进行幅度调制, 产生占空比为 50\% 的 RZ 信号, 和普通的 RZ 一样. 从图 2(a) 可看出, 所产生的单边带信号并不是完全的上边带信号, 下边带只受到部分抑制, 但一级边线谱受到极大抑制. 当第二个 MZ 调制器的 } V_1 = \frac{3V_\pi}{2} + \frac{\sqrt{2}}{4} V_\pi \sin(\omega_b t - \frac{\pi}{4}), V_2 = \frac{\sqrt{2}}{4} V_\pi \cos(\omega_b t - \frac{\pi}{4}) \text{ 时, 产生的信号为下边带信号, 频谱见图 2(b). SSBZR 信号的眼图见图 2(c).}$$

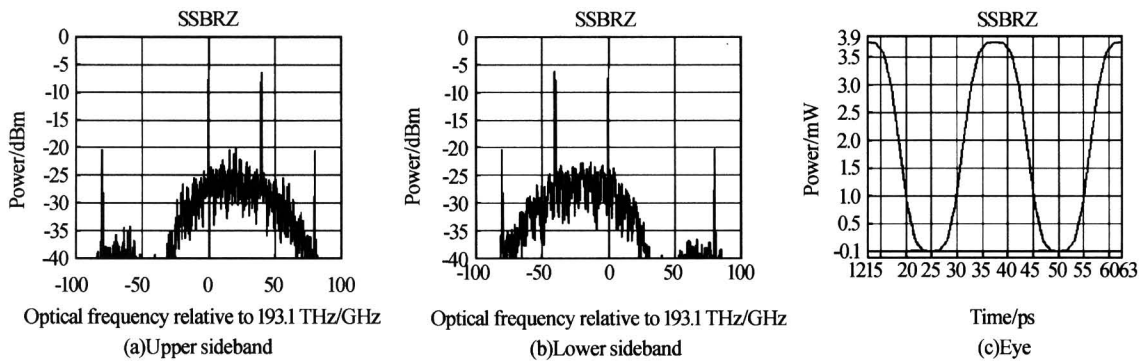


图 2 SSBZR 的频谱和眼图
Fig. 2 Optical spectra and eye of SSBZR

SSBZR 信号的解调和 RZ、CSRZ 信号一样, 用普通的平方律检波器(PIN 或 APD)即可.

2 传输系统模型及仿真结果

传输系统为 40 G 单信道系统, 模型见图 3. 光载波波长为 1552.5 nm, 传输链路由若干个跨距组成, 每个跨距包括一段 80 km 的单模光纤(SMF)和

一段 17 km 的色散补偿光纤(DCF), 使得色散值完全补偿, 光纤参量的设置见表 2. SMF 的前置掺铒光纤放大器(EDFA)用于补偿跨距衰减, 并规定 SMF 的入纤光功率, DCF 的前置 EDFA 规定 DCF 的入纤光功率为 -3 dBm, 使得 DCF 的非线性效应对光信号的影响可以忽略.

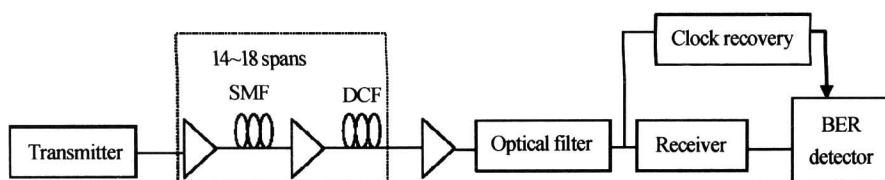


图 3 40 Gb/s 传输系统框图
Fig. 3 Schematic diagram of the optical 40 Gb/s transmission system

表 2 光纤参量

	SMF	DCF
衰减/(dB · km ⁻¹)	0.2	0.6
色散/(ps/nm/km)	17	-80
色散斜率/(ps/nm ² /km)	0.08	-0.21
非线性折射率系数/(10 ⁻²⁰ m ² · W ⁻¹)	2.6	4.0
有效纤芯面积/μm ²	80	30

传输跨距后的 EDFA 用于补偿传输衰减,使得经过传输的光信号功率为 0 dBm, EDFA 的噪声指数为 4 dB,光滤波器为 1 阶高斯带通滤波器,带宽为 100 GHz,当传输的信号为上边带的 SSBZ 时,设置的光滤波器的中心频率向上边带方向偏移 20 GHz. 接收机中 PIN 的响应度为 1 A/W,电滤波器为 3 阶贝塞尔低通滤波器,带宽为 30 GHz. 信号在光纤传输中所受传输效应的计算,采用分步傅里叶算法求解非线性薛定谔方程. 仿真过程中不考虑偏振模色散(PMD). 仿真软件为 VPI6.0,仿真的比特数为 2¹¹ 个伪随机二进制数.

改变 SMF 的入纤功率,普通的 RZ(占空比为 50%)、CSRZ(占空比为 67%)和用上面方法产生的占空比为 50%的 SSBZ 信号经过 14 个跨距传输后的误码率曲线如图 4. 可看出,在入纤功率较低的时候,光纤的非线性效应比较小,信号受 EDFA 的自发辐射噪声(ASE)的影响比较大. 增大入纤功率有利于增大信噪比,从而降低误码率;当入纤功率较高时,光纤的非线性效应随入纤功率的增加影响越来越严重,从而导致误码率随入纤功率的增加而快速上升,其中 RZ 的误码率上升最快,SSBZ 最慢,说明 SSBZ 的抗非线性能力最强,CSRZ 次之. 在规定误码率的情况下,SSBZ 所允许的 SMF 的入纤功率也较高.

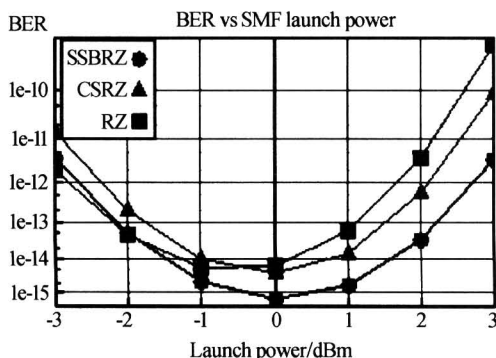


图 4 三种调制格式经 14 个跨距传输的 BER 随 SMF 入纤功率的变化情况

Fig. 4 BER versus SMF input powers for the three modulation formats after fourteen transmission spans

规定 SMF 的入纤功率为 0 dBm,这三种调制格式经过 14~18 个跨距传输后的误码率比较见图 5. 由图可知,随着跨距的增加,RZ、CSRZ、SSBZ 信号的误码率不断增大,这是由于随传输距离的增大

非线性效应影响越来越严重的结果. 在色散完全补偿的单信道传输系统中,SSBRZ 的误码率始终低于 RZ 和 CSRZ,CSRZ 和 RZ 的误码率相当,说明在这三种调制格式中,SSBRZ 的抗非线性能力最强. 图 6 为这三种调制格式经过 18 个跨距传输后的眼图. 从眼图可看出,经过 18 个跨距传输后的 SSBZ 信号的眼张开度要比 RZ、CSRZ 大.

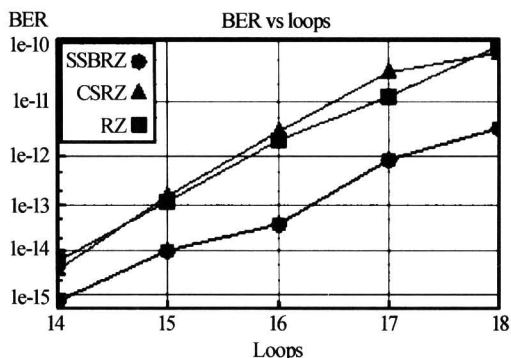


图 5 当入纤功率为 0 dBm 时三种调制格式的 BER 随传输跨距的变化情况

Fig. 5 BER versus transmission spans for the three modulation formats when input fiber power is 0 dBm

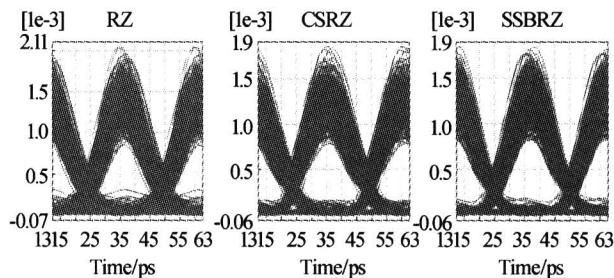


图 6 三种调制格式经过 18 个跨距传输后的眼图

Fig. 6 Simulated eye diagrams of the three modulation formats after eighteen transmission spans

3 结论

本文阐述了一种 SSBZ 信号的产生原理,通过合理的设置调制器的偏置电压,使信号的一个边带得到更大抑制,并且产生的光脉冲形状和普通的归零光脉冲形状一样,没发生变形. 本文用仿真研究 RZ、CSRZ 和 SSBZ 信号在单信道中传输的性能. 结果表明,SSBZ 信号的产生可通过调节 MZ 调制器的偏置电压实现,不需经过希尔伯特变换,比不归零的单边带信号的实现更简单;在色散完全补偿的情况下,SSBZ 信号的抗非线性能力比普通的 RZ 和 CSRZ 强.

参考文献

- 胡辽林,刘增基. 光双二进制传输系统的性能研究. 光子学报,2003,32(6): 727~730
Hu L L, Liu Z J. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(6): 727~730
- Miyamoto Y, Hirano A, Yonenaga K, et al. 320Gbps(8

- $\times 40$ Gbps) WDM transmission over 367km repeater spacing using carrier-suppressed return-to-zero format. *Electron Lett*, 1999, **35**(23): 2041~2042
- 3 Hodzic A, Konrad B, Petermann K. Alternative modulation formats in $N \times 40$ Gb/s WDM standard fiber RZ-transmission systems. *J Lightwave Technol*, 2002, **20**(4): 598~607
- 4 胡辽林, 刘增基, 杨国庆. 40Gb/s 非零色散位移光纤传输系统中四种调制格式的性能比较. 光子学报, 2003, **32**(10): 1181~1184
Hu L L, Liu Z J, Yang G Q. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1181~1184
- 5 Bergano N S, Nissov M, Pilipetskii A, et al. Chirped Return-to-Zero Formats for Ultra Long-Haul Fiber Communications. IEEE/LEOS Workshop on Advanced Modulation Formats, San Francisco, CA, 2004, pp. 1~2
- 6 Bosco G, Carena A, Curri V, et al. Modulation formats suitable for ultrahigh spectral efficient WDM systems. *IEEE J Quantum Electronics*, 2004, **10**(2): 321~328
- 7 Sieben M, Conradi J, Dodds D E. Optical single sideband transmission at 10 Gb/s using only electrical dispersion compensation. *J Lightwave Technol*, 1999, **17**(10): 1742~1749
- 8 胡辽林, 刘增基, 杨国庆. 光的单边带传输的性能研究. 光子学报, 2004, **33**(2): 179~182
Hu L L, Liu Z J, Yang G Q. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 179~182
- 9 Walklin S, Conradi J. Effect of mach - zehnder modulator DC extinction ratio on residual chirp-induced dispersion in 10-Gb/s binary and AM-PSK duobinary lightwave systems. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, **9**(10): 1400~1402
- 10 [美] Ziemer R E, Tranter W H 著, 袁东风, 江铭炎译. 通信原理. 北京: 高等教育出版社, 2004: 78~81, 121~122
Ziemer R E, Tranter W H, translated by Yuan D F, Jiang M Y. Principles of Communications. Beijing: Higher Education Press, 2004: 78~81, 121~122

Generation and Performance Analysis of Single Sideband RZ Signal for 40Gb/s Optical Transmission System

Wen Aijun, Fu Wei, Pan Qing

National Key Lab. on Integrated Services Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071

Received date: 2005-06-13

Abstract A method to generate Single Sideband Return-to-Zero Signal(SSBRZ) is introduced by deriving formulas. One sideband of the generated SSBRZ signal is suppressed more effectively without distortion of the optical pulses. 40Gb/s single channel transmission of Return-to-Zero(RZ) signal, Carrier Suppressed Return-to-Zero(CSRZ) signal and SSBRZ signal over single mode fiber(SMF) are simulated. The results show that SSBRZ is superior to RZ and CSRZ against fiber nonlinearities when chromatic dispersion is completely compensated.

Keywords Fiber communication; Single sideband; 40Gbps; Mach-Zehnder modulator

Wen Aijun was born in 1968 in Shaanxi. He received Ph.D degree in communication and information system from Xidian University, Xi'an, China in 1998. Currently, he is an associate professor of Xidian University. His main research interest is in optical transmission and optical networks.

