

文章编号: 0253-2239(2010)07-1971-06

基于单边带调制单载波频域均衡技术的研究

张俊文 邵宇丰* 方武良 黄博 黄德修 迟楠

(复旦大学通信科学与工程系专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433)

摘要 单载波频域均衡技术在无线通信中是极为成熟且研究广泛的信道均衡及补偿技术,该技术采用高速数字信号处理将电信号从时域变换到频域进行均衡补偿。在光纤通信系统中,提出采用单载波频域均衡技术对接收信号进行电域色散补偿,在 10 Gb/s 的单边带幅移键控(ASK)调制光信号经过 50,80 和 100 km 普通单模光纤传输之后,验证了频域均衡对色散补偿的效果。其中单边带 ASK 调制光信号基于有限冲击响应希尔伯特变换,利用一个双臂马赫-曾德尔(MZ)调制器级联一个相位调制器来产生。结果证明,频域均衡模型能有效提高眼图开启度和降低时钟抖动,随着传输距离的增加,改善效果更加显著。最后在分析系统均衡和补偿效果参数的基础上,得出了实现最佳频域均衡效果单边带调制点。

关键词 光通信;单载波频域均衡;单边带调制;色散补偿

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103007.1971

Research of Single Carrier Frequency Domain Equalization Based on Single-Sideband Modulation

Zhang Junwen Shao Yufeng Fang Wuliang Huang Bo Huang Dexiu Chi Nan

(State Key Laboratory of ASIC & System, Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract Single-carrier frequency domain equalization (SC-FDE), as a mature technique in wireless communication, is widely researched for signal equalization and compensation utilizing high speed electronic devices such as digital signal processor. A SC-FDE technique in optical communication system for received signal dispersion compensation is proposed and demonstrated. After 50 km, 80 km, 100km transmission for a 10 Gb/s amplitude shift keying (ASK) single sideband (SSB) signal on a single mode fiber, the dispersion of optical signal is effectively compensated by adopting SC-FDE technique. The SSB signal is generated by a dual-arm Mach-Zehnder modulator cascading a phase modulator based on Hilbert finite impulse response digital filter. The results demonstrate that the eye opening and the clock recovery is improved, and the effect of compensation is enhanced as the transmission distance increases in proposed SC-FDE model. At last, the SSB modulation location for achieving the best SC-FDE effect is also obtained.

Key words optical communication; single-carrier frequency domain equalization; single-sideband modulation; dispersion compensation

1 引言

在当今的光网络发展中两个越来越明显的趋

势:1)单个传输通道的传输速率正在迅速增加,并迅速地接近 100 Gb/s^[1,2];2)由于光分插复用器的使

收稿日期: 2009-08-26; 收到修改稿日期: 2009-11-17

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328300)、国家自然科学基金(600837004, 60777010)、国家 863 计划(2009AA01Z253, 2007AA01Z260)、曙光学者基金和教育部信息光子学与光通信重点实验室(北京邮电大学)开放基金资助课题。

作者简介: 张俊文(1988—),男,博士研究生,主要从事光通信以及关键光电子器件等方面的研究。

E-mail: hustzjw@gmail.com

导师简介: 迟楠(1974—),女,教授,博士生导师,主要从事先进光信号调制、光标记交换和全光信息处理等方面的研究。E-mail: nanchi@fudan.edu.cn

*通信联系人。E-mail: shaoyufeng@fudan.edu.cn

用,使得能够动态重构的光网络已经逐渐变成现实。这对光网络的传输链路提出重大的挑战^[3~5]。特别地,动态重构的光网络应具有快速的链路建立能力,传统精确的间隔距离光色散补偿会变得过于昂贵且复杂,人工配置的光色散补偿变得不太现实^[6]。

电子均衡技术在解决光纤链路的色散、偏振模色散以及各种非线性效应等方面具有潜在优势^[7]。电子色散补偿作为一种色散补偿方案,作用类似于光域的色散补偿光纤、布拉格光栅以及光学谐振腔^[8]。电子均衡技术倍受关注主要有以下几点原因^[9]:1)能够灵活地适用于临时的色散补偿需求;2)在光标记交换网络中具有自适应链路色散补偿的特性;3)在传输层面对于光通信网络能实现传输速率透明适配;4)比较传统的光学色散补偿方案,所需的光子外围器件更少。例如,前向编码纠错(FEC)在高速光通信中处理信号失真和信道串扰方面已经表现出很大的潜力和优势^[10,11]。

单载波频域均衡(SC-FDE)技术作为一种电子均衡技术,是无线通信极为成熟且研究广泛的信道均衡和补偿技术^[12,13],该技术采用高速数字信号处理(DSP)将电信号从时域变换到频域进行均衡补偿。在光纤通信系统中,提出采用单载波频域均衡技术对接收信号进行电域色散补偿,在 10 Gb/s 的单边带幅移键控(ASK)调制光信号经过 50,80 和 100 km 普通单模光纤传输之后,验证了频域均衡对色散补偿的效果。结果证明,频域均衡模型能有效提高眼图开

启度和降低时钟抖动,随着传输距离的增加,改善效果更加显著。最后在分析系统均衡和补偿效果参数的基础上,得出了实现最佳频域均衡效果单边带调制点。

2 基于单边带调制的单载波频域均衡系统结构及原理分析

基于单边带(SSB)调制的频域均衡的理论核心是在高速 DSP 等电子器件处理下,将接收到的信号经过快速傅里叶变换(FFT)到频域;在频域均衡(FDE)模块的作用下对信号的频率相关性失真进行均衡补偿,均衡后的信号以快速傅里叶反变换(IFFT)变换回时域信号,信号经检查判决即为输出数据。这里,起关键作用的器件都使用高速电子器件,采用 FFT 和 IFFT 的算法将信号转换到频域进行处理。而光链路传输过程中,色散等效效应正是与频率相关的,因此频域均衡将能有效地进行信号补偿。

图 1 是基于单边带调制的适用于光通信的频域均衡结构图。分析单边带系统和双边带(DSB)系统中色散的不同作用^[14]:相比于双边带系统,单边带信号光谱带宽只是双边带信号的一半,系统的色散影响要小;同时,DSB 信号在直接检测时由于强度检测的平方率折叠效应,会将上下边带不同的色散影响混叠,而 SSB 信号传输则能“保留”某一边带的失真信息。

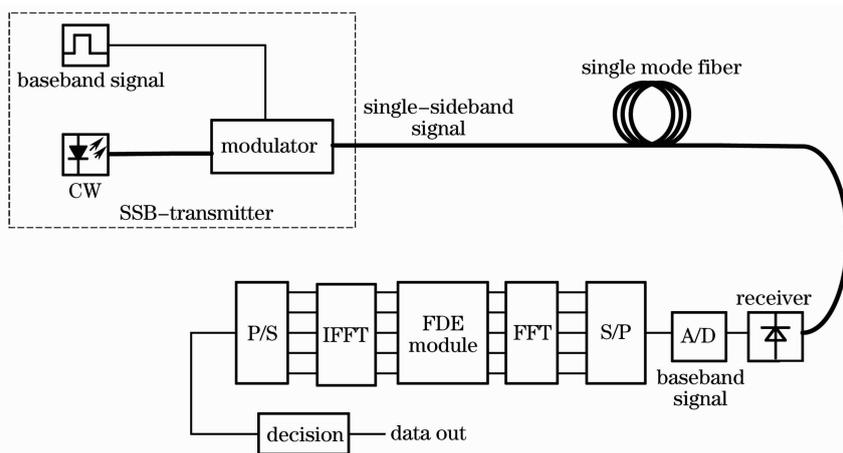


图 1 基于单边带调制的单载波频域均衡系统结构图

Fig. 1 System configuration of SC-FDE based on SSB modulation

单边带信号的产生分为调制法和滤波法。滤波法对滤波器的要求比较高,容易对信号引入新的畸变,同时系统功率利用率将减半,因此采用了调制法

产生单边带信号,具体的结构如图 2 所示,采用了 Mike Sieben 等^[15]提出的光信号单边带产生的方式,并在其基础上对结构和参数进行了修正和完善。

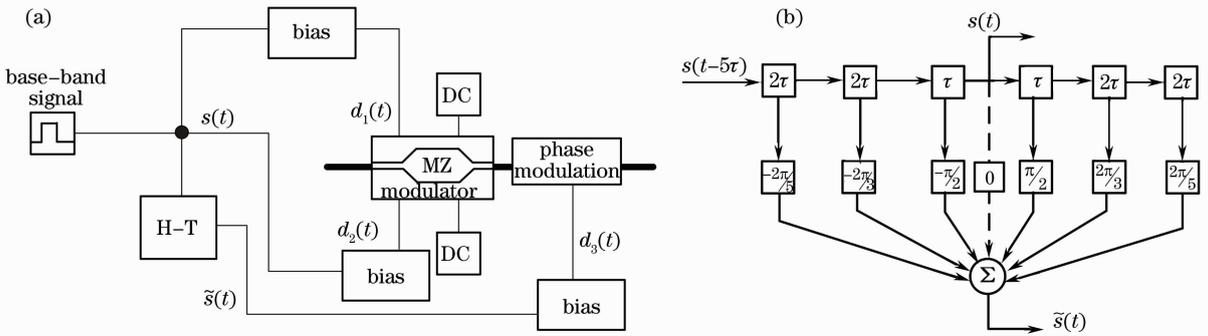


图 2 Mike Sieben 等提出的调制法产生单边带信号的结构(a), 希尔伯特有限冲击数字滤波器相移结构(b)

Fig. 2 (a) Configuration of SSB modulation, (b) Hilbert finite impulse response (FIR) digital filter proposed by Mike Sieben et al.

其中相应各臂驱动电信号分别为

$$d_1(t) = \alpha V_\pi s(t) - \frac{V_\pi}{4},$$

$$d_2(t) = -d_1(t), \quad d_3(t) = \alpha V_\pi \tilde{s}(t),$$

式中 α 为马赫-曾德尔 (MZ) 调制系数 (调制深度), $s(t)$ 是基带信号的交流分量。在上述电信号驱动 MZ 调制器和相位调制器共同作用下, 对输入光信号的调制结果为

$$E_{out} = \exp(j\omega_0 t) \exp[jq\tilde{s}(t)] \cos[qs(t) - \pi/4], \quad (1)$$

式中调制常数 $q = \alpha\pi$ 。对于(1)式, 做泰勒级数展开并保留第一阶分量, 则得到

$$E_{out} = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(j\omega_0 t) [1 + qs(t) + jq\tilde{s}(t)], \quad (2)$$

此即为单边带信号 SSB。

其中用于单边带产生的希尔伯特相移变换 (H-T) 采用高阶的有限脉冲响应数字滤波器进行, 其构造如图 2(b) 所示。对于 10 Gb/s 的信号, 高阶希尔伯特能得到比较好的效果, 其中的单位延时为 0.01 ns 量级的时间常数 τ 。 τ 的取值将根据最佳的单边带 FDE 传输效果进行选取。

FDE 色散补偿模块的设计是根据光纤对光信号的影响所决定的。采用分步傅里叶法将非线性效应和色散分别处理为

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\tilde{D} + \tilde{N})A,$$

式中 \tilde{D} 为差分算符, 它表示了线性介质的色散; \tilde{N} 则是非线性算符, 它决定了脉冲过程中的非线性效应。其中算符 \tilde{D} 经过展开为

$$\tilde{D} = -\frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3}{\partial T^3} + \dots, \quad (3)$$

式中 β_i 为各阶的传播常数微分。在均衡算法中, 将忽略非线性的作用, 并只考虑色散和吸收的影响。

将传输函数转换到频域, 则可以得到光纤的色散传递函数的表达式

$$H(\omega) = \exp\left[j \frac{1}{2} \beta_2 (\omega - \omega_c)^2 L + j \frac{1}{6} \beta_3 (\omega - \omega_c)^3 L + \dots \right], \quad (4)$$

将色散系数 D 带入, 并只考虑群速度色散, 那么可以得到色散信号频带的传递函数

$$H(f) = \exp\left(-j \frac{\pi \lambda_0^2 D L f^2}{c} \right), \quad (5)$$

式中 f 表示的是基带信号的频率, c 为光速, λ_0 为载波光波长, L 为传输的距离。那么进行补偿和均衡的函数可以直接由(5)式给出

$$H_{FDE}(f) = H(f)^{-1} = \exp\left(j \frac{\pi \lambda_0^2 D L f^2}{c} \right), \quad (6)$$

值得注意的, 这里求得的均衡和补偿函数得到的变量 f 频率对应的就是基带的电信号频率, 因此可以直接用于频域均衡处理。

3 结果及分析

系统的结构如图 3 所示。对双边带传输系统和单边带 FDE 系统进行对比。其中上半部分为单边带频域均衡系统, 采用的是单边调制的发射机, 接收时采用的直接接收; 下半部分采用的双边带调制, 调制时采用平衡 MZ 调制器, 接收时也采用直接接收。

激光光源为分布反馈 (DFB) 激光器产生的连续光源, 中心频率为 193.1×10^{12} Hz, 即波长为 1553.6 nm。调制方式均为 ASK 振幅调制, 码元为 PRBS 伪随机码。同时观察区间取为 2^9 个码元, 码元速率为 10 Gb/s。所使用的光纤为标准单模光纤, 其中色散系数为 $D = 16$ (ps/nm·km)。直接检测时采用的是 PIN 管, 对接收到的低通信号均采用了截至频率 7.5 GHz 的四阶贝塞尔低通滤波器以滤掉高频噪声。对单边带 FFT-FDE-

IFFT 采用的是数字信号处理模块。对上半部分单边带调制系统,涉及到了许多偏置和希尔伯特变换参数

的选取。基带码元为伪随机二进制序列(PRBS)的非归零(NRZ)码。

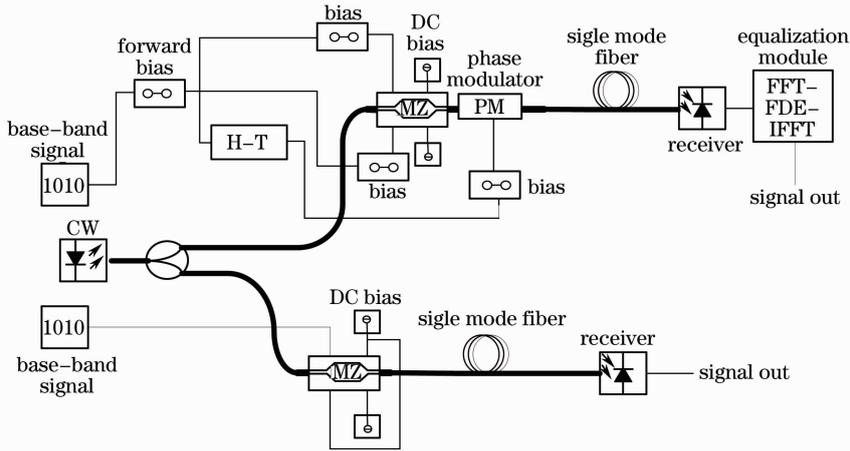


图 3 FDE-SSB 与 DSB 传输性能对比系统结构图

Fig. 3 Transmission quality comparison configuration for FDE-SSB and DSB signal

对 10 Gb/s 信号,所设计的单边的调制系统能够很好地产生单边带调制信号。图 4 所示,为不同的希尔伯特变化延时单位对单边带调制产生的信号频谱结果。其中 T 为其码元周期,中心频率为 193.1 THz,频率 f 单位为 GHz。可以看出,不同的参数选取,将直接影响单边带的抑制效果。图 4 中可以看出,以 $\tau=0.5, T=0.05$ ns 为中心, τ 变小时,对高频分量抑制得更好,低频分量残留变大; τ 变大时,对低频分量抑制得更好,对高频分量残留变大。当 $\tau=0$ 时,相当于无希尔伯特变换,此时为双边带信号,无边带抑制作用。因此, τ 的选取将对系统的质量产

生一定的影响,需要进行一定的权衡,在接下来的研究中, τ 作为均衡参数由于边带的抑制作用的不同而对均衡的效果产生影响将做进一步的讨论。

图 5 所示为选取经过单模光纤传输 100 km 后的接收到信号眼图结果。可以明显地看出,单边带单载波频域均衡对信号质量的改善效果明显,双边带信号由于色散影响,畸变严重,眼图几乎要闭合,而单边带信号由于本身的抗色散能力,信号质量要比双边带的好,而在经过均衡后,抗色散性能得到了进一步的提高。这表明,基于单边带单载波频域均衡的模块设计是有效的。

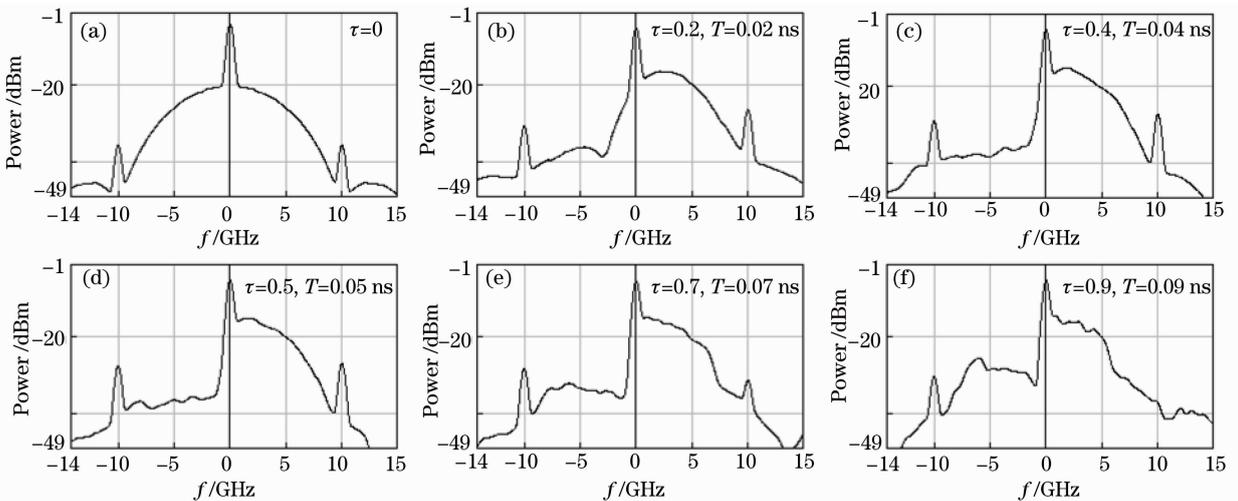


图 4 希尔伯特延时单位 τ 对单边带调制信号边带抑制作用的影响

Fig. 4 Effects on SSB signal spectrum by different Hilbert time-delay τ

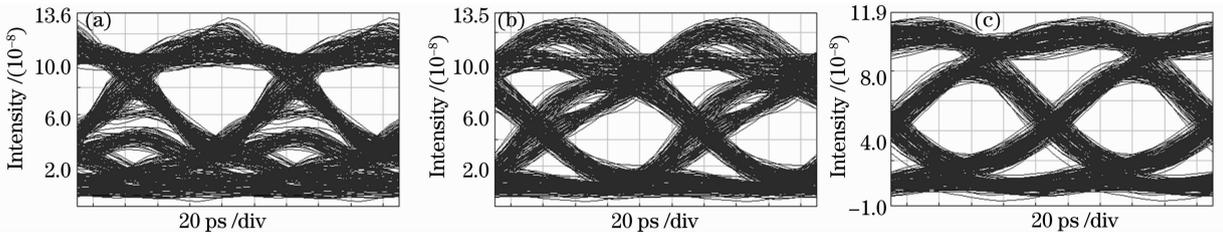


图 5 传输长度为 100 km 时。(a)双边带信号;(b)FDE 前的单边带信号;(c)FDE 后的单边带信号眼图

Fig. 5 Eye diagrams of (a) DSB signal; (b) SSB signal before FDE; and (c) SSB signals with FDE after 100 km stransmission

单边带调制单载波频域均衡对系统传输性能的提高的对比结果如图 6 所示,通过对接收到的信号的眼开度代价(EOP)和时钟抖动失真量随传输长度和光纤色散系数的变化情况,对比双边带信号,未

均衡 SSB 信号和经频域均衡的单边带信号(FDE-SSB)的不同表现,可以看出基于单边带调制的单载波频域均衡系统能有效地提升系统的传输性能。

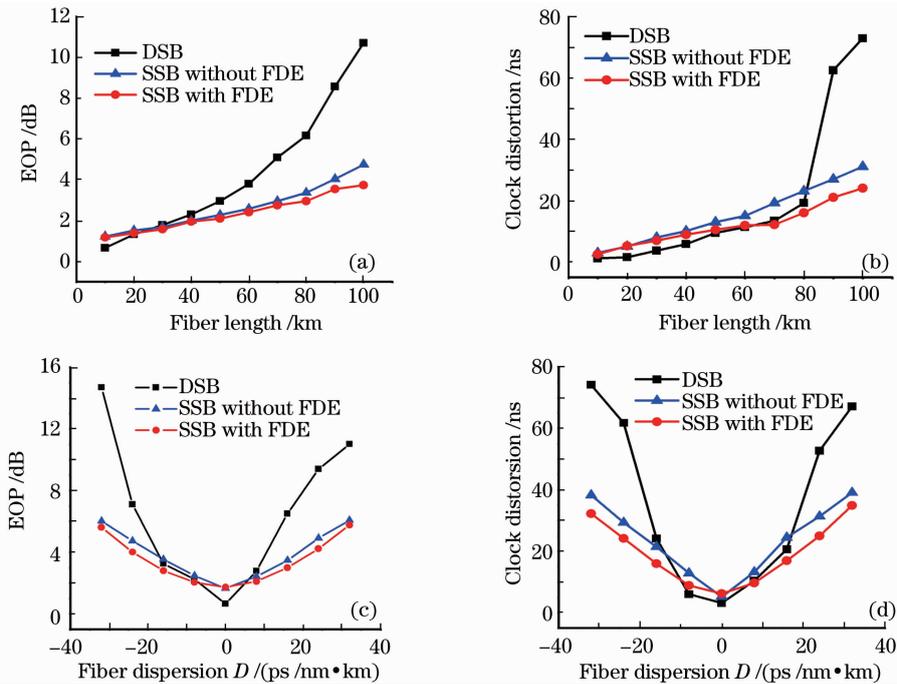


图 6 (a)不同信号眼开度代价;(b)不同信号时钟抖动失真随传输长度的关系;(c)不同信号眼开度代价;(d)不同信号时钟抖动失真随光纤色散系数关系

Fig. 6 (a) EOP of three signals; (b) clock distortion of three signals vary with fiber length; (c) EOP of three signals; (d) clock distortion of three signals vary with fiber dispersion

其中图 6(a),(b)是在发射机激光器功率为 1 mW,光源工作波长为 1553.6 nm,标准单模光纤色散系数为 16 (ps/nm·km)的链路中传输的结果。可以看出,随着传输长度的增加,SSB 信号和 FDE-SSB 信号的对系统的改善更加明显。当传输长度为 80 km 时,相比于传统的 DSB 信号,SSB 信号和 FDE-SSB 的眼开度代价分别降低了 2.8 dB 和 3.4 dB,而当传输距离为 100 km 时,相比于 DSB 信号,SSB 信号和 FDE-SSB 信号眼开度代价则分别降低了 5.3 dB 和 6.3 dB。特别的,虽然传输距离较短时,双边带信号的时钟抖动要小,但是当传输距离大于 80 km 后,

DSB 信号恶化严重,相反,经过均衡的 FDE-SSB 信号,时钟抖动失真较小,相比 DSB 信号,在 90 km 以后,时钟抖动降低 40 ns 以上。因此,对较长距离传输而言,FDE-SSB 信号对眼开度代价和时钟抖动失真的抑制明显,相比于 DSB 信号,能有效地提高系统的传输性能。值得注意的是,在传输距离较小时,SSB 信号和 FDE-SSB 信号对信号的改善并不明显,特别是当距离小于 30 km 时,DSB 信号在 EOP 和时钟失真方面都比采取单边带信号和均衡时小,这是由系统的结构所决定的。由于单边带调制相比于双边带调制,多采用了一个相位调制器,同时结构也更为复杂,调

制器的非线性效应也更加严重,传输距离短时,优势并不明显。

图 6 中(c),(d)为系统光纤色散系数 D 在 $-32 \sim 32$ (ps/ns·km)之间时,信号的眼开度代价和时钟抖动失真的表现情况。可以看出,当光纤的色散较大时,改善效果更为明显。而当光纤的色散系数较小时,SSB 信号和 FDE-SSB 的信号对信号的改善也并不突出,这也是因为当光纤的色散系数较小时,色散所带来的信号失真并不严重,引入复杂的传输方式和信号处理方式,并不能给系统带来明显的提高,反而由于增加了调制器,所带来的非线性效应也更为严重。在 16 (ps/nm·km)的色散系数下,相比于 DSB 信号,SSB 信号和 FDE-SSB 信号的 EOP 分别降低了 4.5 dB 和 5.2 dB,而时钟抖动时钟分别降低了 21 ns 和 27 ns。

不同的单位延时 τ 的希尔伯特变化下,接收到的 FDE-SSB 信号的误码率(BER) n_{BER} 变化如图 7 所示,其中光纤传输距离为 80 km,激光器功率为 1 mW。可以发现,当 τ 过大或过小时,由于对高频分量或低频分量的抑制过低,而使得频域均衡的效果变差。同时,可以发现,当延时单位时间在 $0.3 \sim 0.6$ T 之间时,将能取得最佳的均衡效果。

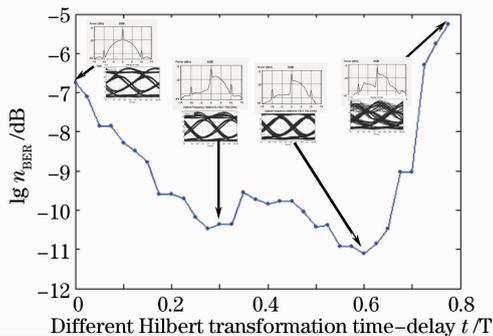


图 7 希尔伯特变换延时时间单位对信号均衡效果影响

Fig. 7 BER for equalized signal affected by Hilbert transformation time-delay

4 结 论

单载波频域均衡采用 DSP 等高速电子元件将电信号变换到频域,在频域进行均衡补偿。提出了在光通信中采用基于单边带调制的单载波频域均衡技术。通过对 10 Gb/s 的 ASK 信号进行信号均衡和补偿作用,验证了在 $50, 80$ 和 100 km 等不同距离的光纤链路中电域频域均衡对色散补偿的效果。研究表明,基于单边带调制的单载波频域均衡技术能有效地降低传输信号的眼开度代价并抑制时钟抖动失真。在较

长距离的传输范围内,随着传输距离的增加,这种改善效果更加显著。当传输距离为 100 km 时,相比于 DSB 信号,SSB 信号和 FDE-SSB 信号眼开度代价则分别降低了 5.3 dB 和 6.3 dB,信号经过有限冲击响应希尔伯特变换延时单位时间在 $0.3 \sim 0.6$ T 之间时,能取得最佳的均衡效果。

参 考 文 献

- 1 Yufeng Shao, Shuangchun Wen, Lin Chen *et al.*. A staggered differential phase-shift keying modulation format for 100 Gbit/s applications[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12937~12942
- 2 Shao Yufeng, Li Jia, Cheng Lili *et al.*. Four serial differential phase-shift keying modulation formats for 100 Gbit/s transmission applications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 574~580
邵宇丰, 李 佳, 程黎黎. 四种级联差分相位调制码的 100 Gbit/s 传输[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 574~580
- 3 Yufeng Shao, Lin Chen, Shuangchun Wen *et al.*. Novel optical orthogonally modulation scheme for superimposing DPSK signals on dark RZ signals[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(14): 3658~3667
- 4 Shao Yufeng, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. Novel scheme for generation of optical dark RZ label signals [J]. *Acta Optical Sinica*, 2007, **27**(9): 1580~1584
邵宇丰, 陈 林, 余建军 等. 产生暗归零码光标记信号的新方案 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1580~1584
- 5 Shao Yufeng, Wen Shuangchun, Chen Lin *et al.*. Additional application of modified duobinary RZ signal in a label switching optical system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1201~1207
邵宇丰, 文双春, 陈 林 等. 改进型双二进制归零码信号在标记交换系统中的新应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1201~1207
- 6 W. Shieh, H. Bao, Y. Tang. Coherent optical OFDM: theory and design[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 841~859
- 7 Ezra Ip, Joseph M. Kahn. Digital equalization of chromatic dispersion and polarization mode dispersion[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(8): 2033~2043
- 8 D. J. Moss, M. Lamont, S. McLaughlin *et al.*. Tunable dispersion and dispersion slope compensators for 10 Gb/s using all-pass multicavity etalons[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(5): 730~732
- 9 A. J. Lowery, Liang Bangyuan Du, Jean Armstrong. Performance of optical OFDM in ultralong-haul WDM lightwave systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 131~138
- 10 I. B. Djordjevic, M. Arabaci, L. L. Minkov. Next generation FEC for high-capacity communication in optical transport networks[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(16): 3518~3530
- 11 P. J. Winzer, F. Fidler, M. J. Matthews *et al.*. 10 -Gb/s upgrade of bidirectional CWDM systems using electronic equalization and FEC [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(1): 203~210
- 12 F. Pancaldi, G. M. Vitetta, R. Kalbasi. Single-carrier frequency domain equalization[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 37~56
- 13 D. Falconer, S. L. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar. Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, **40**(4): 58~66
- 14 K. Iwashita, N. Takachio. Chromatic dispersion in coherent optical communications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(3): 367~375
- 15 M. Sieben, J. Conradi, D. E. Dodds. Optical single sideband transmission at 10 Gb/s using only electrical dispersion compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(10): 1742~1749