

相干光差分正交相移键控系统中改进的 Gardner 定时恢复方法实验研究

刘 磊^{1,2} 肖江南^{1,2} 唐 进^{1,2} 何 晶^{1,2} 陈 林^{1,2}

(¹ 湖南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082
² 湖南大学微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要 相干光通信系统中由于色散(CD)和采集信号时钟偏差导致了位同步的不准确,影响整个数字接收系统性能。提出了一种适用于相干光差分正交相移键控(DQPSK)信号的改进型 Gardner 定时恢复方法,该方法综合考虑正交相移键控(QPSK)信号自身特点以及由传输系统中色散而产生的码间干扰的特征,融合了信号时域和频域信息,来降低色散和噪声对时钟恢复的干扰。对 40 Gb/s 偏振复用相移键控(PM-DQPSK)信号传输相干检测数字通信系统进行了实验验证,结果表明,该方法能有效抵抗色散影响,具有较好的抖动性能。

关键词 光通信;相干光通信;定时恢复;数字相干接收;Gardner;差分正交相移键控

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0406002

Experimental Research on Timing Recovery of a Differential Quadrature Phase Shift Keying Coherent Optical Transmission System Based on an Improved Gardner Algorithm

Liu Lei^{1,2} Xiao Jiangnan^{1,2} Tang Jin^{1,2} He Jing^{1,2} Chen Lin^{1,2}

(¹ School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China
² Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract In coherent optical transmission system, the inaccurate bit synchronization induced by chromatic dispersion (CD) and local oscillation (LO) frequency modulation (FM) noise reduces the performance of the digital receiver system. To tolerate CD and time jitter, a modified Gardner phase detector for coherent optical differential quadrature phase keying (DQPSK) signal is presented. The proposed scheme, utilizing the features of the signal and inter-symbol interference (ISI), also combining the information both time and frequency domain of the signal, relieves the impairments to the timing recovery caused by CD and noise. A 40 Gb/s polarization division multiplexed DQPSK (PM-DQPSK) signal transmission and coherent detection digital communication system is experimentally demonstrated. The result shows that the scheme is efficient in resisting CD and has a good performance on time jitter.

Key words optical communications; coherent optical communication; timing recovery; digital receiver; Gardner; differential quadrature phase shift keying

OCIS codes 060.1660; 060.2330; 060.5060

1 引 言

近年来,高速数字信号处理(DSP)技术的进步

极大地推动了相干光通信的发展,数字相干检测凭借高接收灵敏度、高频谱效率以及可应用 DSP 技术

收稿日期: 2012-11-09; 收到修改稿日期: 2012-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(60977049)、国家 863 计划(2011AA010203)和湖南省自然科学基金(12JJ3070)资助课题。

作者简介: 刘 磊(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信技术方面的研究。E-mail: liulei_study@163.com

导师简介: 陈 林(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信技术方面的研究。

E-mail: lilichen12@vip.163.com(通信联系人)

能够较好地补偿光信号在传输系统中受到的一些线性及非线性损伤,这些优势已成为高速光通信的一个重要发展方向,近年来国内外做了许多相干光通信方面的研究工作^[1~5],如 Zhou 等^[1~3]完成了一系列相干光通信实验,单波长速率最大达到 64 Tb/s。数字相干光检测技术是将本振光源(LO)和信号光进行混频,将调制在光载波上的信号搬移到基带(零差检测),利用高速模数(A/D)转换器(ADC)对基带信号进行采样并进行相应的数字信号处理。由于在对光电转换后的电信号采样时,采样时钟与发送信号时钟总存在一定的偏移,这将影响相干系统的接收性能,因此时钟恢复是相干接收机中的重要问题之一。

全数字时钟恢复(位同步)中时钟恢复方法的结构主要分为两类:前馈式结构^[6,7]和反馈式结构^[8]。前馈式结构和反馈式结构中定时误差检测器又可分为数据辅助和非数据辅助。基于反馈式结构的 Gardner 时钟恢复环路^[9]由于不需要辅助数据,而且不受载波频偏的影响,实现复杂度较低等优势,广泛应用于高速相干光全数字接收机中^[4,5,10]。但在相干光通信传输中,信号即使通过色散(CD)补偿算法后,仍然存在一定程度的色散残留^[11],这些残余色散仍会使信号产生畸变。由于传输系统中色散和本地相位噪声相互作用引起了信号时钟的抖动^[12],

这就要求时钟恢复在一定程度上能抵抗残留色散对信号的影响。针对目前 Gardner 方法容易受到色散影响^[13]的不足,近年来, Sun 等^[14]提出了在频域使用 Gardner 方法以及 Kuschnerov 等^[15]提出了联合均衡的方法,通过增加色散的容限来减少对定时误差检测的影响。

本文提出了一种适用于差分正交相移键控(DQPSK)相干光通信系统的改进型 Gardner 方法,该方法考虑了相干光传输中色散对信号的影响,利用正交相移键控(QPSK)信号自身特征,融合信号时域及频域信息,通过理论证明和实验验证,改进型 Gardner 方法能较快地进入同步状态和具有较好的抖动性能,还能有效地抵抗色散和噪声对定时恢复的影响,而且复杂度不高。

2 定时恢复

2.1 Gardner 定时恢复方法

相干光通信系统全数字接收机中,采样时钟偏移、频率偏移和色散等影响导致了采样相位和码元传输相位的不同步,需要通过定时恢复来进行调整,定时恢复的典型结构^[16,17]如图 1 所示,NCO 表示数字控制振荡器。

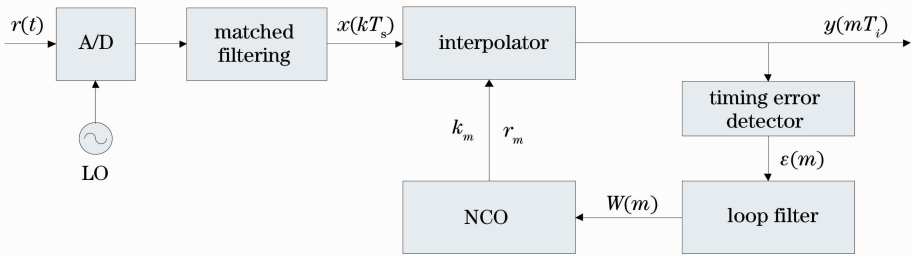


图 1 定时恢复结构框图
Fig. 1 Illustration of timing recovery

发送端周期为 T 的信号经信道传输后到达接收端,在接收端以周期 T_s 固定采样,经平方根升余弦滚降滤波器匹配滤波后,其等效模型可表示为

$$x(kT_s) = \sum_i c_i \cdot h(kT_s - iT - \tau) + n(kT_s), \quad (1)$$

式中 $\{c_i\}$ 为发送符号序列, τ 为信道引入的时延,滤波器函数 $h(t) = g_T(t) \otimes g_R(t)$, $g_T(t)$ 为发送端成形平方根升余弦滤波器的脉冲响应, $g_R(t)$ 为匹配滤波器的脉冲响应, \otimes 表示卷积, $n(t)$ 为经匹配滤波后复高斯过程。

定时恢复环路主要由 Gardner 定时误差检测

器、环路滤波器、控制单元及插值滤波器组成,通过插值滤波器对独立采样到的信号样本值进行插值运算,来调整定时相位及频率的偏差,最后锁定时钟并输出周期为 T_i 的同步信号。

根据文献^[17],插值滤波器的插值过程可表示为

$$y(mT_i) = y[(k_m + u_m)T_s] = \sum_{i=-I_1}^{I_2} x[(k_m - i)T_s] h_1[(u_m + i)T_s] = \sum_{i=-I_1}^{I_2} x[(k_m - i)T_s] c_i(u_m), \quad (2)$$

式中分数间隔 $u_m = mT_i/T_s$ ，基本指针 $k_m = \text{int}(mT_i/T_s)$ ， int 表示取整，插值抽头系数由 I_1 和 I_2 决定， h_1 为插值滤波器函数。对于 4 阶分段抛物线插值滤波器^[17] 有： $I_1 = 2, I_2 = 1, c_i$ 取值如下式所示：

$$c_{-2}(u_m) = -\alpha u_m + \alpha u_m^2, c_{-1}(u_m) = (\alpha + 1)u_m - \alpha u_m^2, c_0(u_m) = 1 - \alpha u_m - \alpha u_m^2, c_1(u_m) = -\alpha u_m + \alpha u_m^2, \quad (3)$$

式中 α 取值为 0.5。

整个定时恢复环路中，环路滤波器一方面滤除定时误差 ϵ 中的噪声，另一方面作为环路的调节器件，决定环路的稳定性和同步建立时间，其 2 阶比例积分结构如图 2 所示，传递函数和时域递推式如下所示：

$$F(z) = c_1 + c_2 \frac{1}{1 - z^{-1}}, \quad (4)$$

$$W(m) = c_1 \epsilon(m) - c_1 \epsilon(m-1) + c_2 \epsilon(m). \quad (5)$$

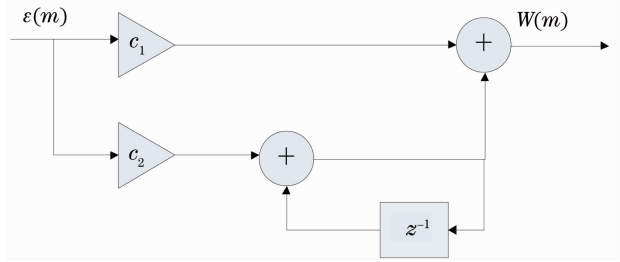


图 2 环路滤波器结构框图

Fig. 2 Illustration of loop filter

Gardner 定时误差检测方法为每个符号周期计算一次，根据文献[9]，Gardner 定时误差检测方法为

$$\epsilon(m) = y_1 \left(m - \frac{1}{2} \right) \times [y_1(m) - y_1(m-1)] + y_Q \left(m - \frac{1}{2} \right) \times [y_Q(m) - y_Q(m-1)] = \text{Re} \left\{ y^* \left(m - \frac{1}{2} \right) \times [y(m) - y(m-1)] \right\} = \text{Re} [y_{m-1/2}^* \times (y_m - y_{m-1})]. \quad (6)$$

式中 $\epsilon(m)$ 为第 m 个码元定时误差信号值， y_1 和 y_Q 分别表示信号样值的实部和虚部， $*$ 表示取共轭， $\text{Re}\{ \}$ 表示取实部， y_m 表示第 m 个码元的样点值， $y_{m-1/2}$ 表示位于第 m 个码元和第 $m-1$ 个码元的中间时刻的样点值。

2.2 改进型 Gardner 定时恢复方法

根据以上理论上的定时恢复方法所述，该方法中定时误差检测是通过 y_m 和 y_{m-1} 差值极性来调整定时的方向， $y_{m-1/2}$ 值体现调整的大小。但在高速相干光传输中，一方面，由于发送端采用滚降因子较小的平方根升余弦成形滤波器影响了 Gardner 方法的性能^[9]，及色散补偿后残余色散和信号频偏等影响，使得 y_m 和 y_{m-1} 差值不明显，甚至出现反向调整的情况。另一方面，因色散和传输信道的频带有限等造成

的码间干扰，导致 $y_{m-1/2}$ 的原本数值产生偏差，影响整个定时性能。

为了克服这些影响，提出了一种改进型 Gardner 方法。该方法从定时调整方向的准确性和幅值控制两部分进行改进。一方面，融合信号的频域信息，通过快速傅里叶变换(FFT)变换到频域后，利用频域中信号相位信息代替 y_m 和 y_{m-1} 差值，使其在色散影响和噪声干扰下，能准确地反映出定时调整的方向。另一方面，通过频域滤波去除信号直流成分后，进行快速傅里叶逆变换(IFFT)，保留部分时域信息，使其在不改变信号相位的情况下，把畸变信号能量分散到其他各点，从而减少了码间干扰。改进型 Gardner 误差检测处理框图如图 3 所示。

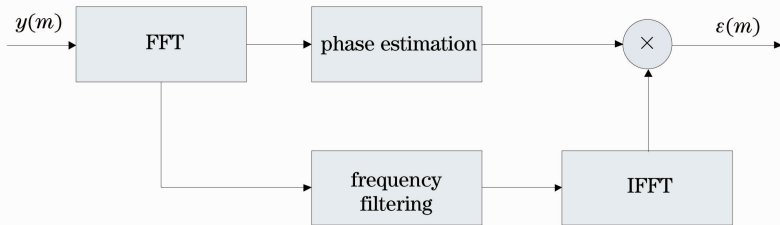


图 3 改进型 Gardner 误差检测处理框图

Fig. 3 Illustration of modified Gardner algorithm

根据信号自身特点，信号在无失真情况下，码元翻转时，信号波形如图 4 所示，第 m 个码元样点值 y_m 可用模和相角表示为 $\rho_m \exp(j\theta_m)$ 。根据信号在码元翻转时仅幅值反向可知， b_3 与 b_1 的模值相等而幅

角相差 π 。当数字信号为 $S_1(a_1, a_2, a_3, \dots)$ 时，设其起始相位为 0，幅值为 A 。当数字信号为 $S_2(b_1, b_2, b_3, \dots)$ 时，设其起始相位为 θ_2 ，幅值为 A 。当信号由 S_1 偏移至 S_2 时，可认为信号相位由 0 偏移至 θ_2 ，幅

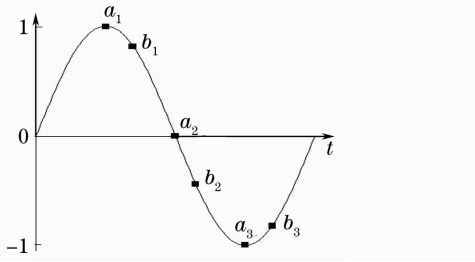


图 4 信号波形图
Fig. 4 Signal waveform

值不变。

根据图 4 中所示, \$S_2\$ 信号相位 \$\theta_2\$ 大约等于其起始样本值 \$b_1\$ 的辐角 \$\theta_{b_1}\$。由此可得, 信号 \$S(y_m, y_{m-1/2}, y_{m-1}, \dots)\$ 的起始相位 \$\theta\$ 约等于 \$y_m\$ 辐角 \$\theta_m\$:

$$y_m - y_{m-1} = \rho_m \exp(j\theta_m) - \rho_{m-1} \exp(j\theta_{m-1}) = \rho_m \exp(j\theta_m) - \rho_{m-1} \exp[j(\theta_m - \pi)] \approx 2\rho_m \exp(j\theta). \quad (7)$$

信号经过 FFT 变换到频域后, 频域显示了信号各频率成分以及相对应的相位。长度为 4 的序列

\$z(n) = [y_m, y_{m-1/2}, y_{m-1}, 0]\$, 其离散傅里叶变换 (DFT) 为

$$Z(k) = \sum_{n=0}^{N-1} z(n) \exp\left(\frac{-j2\pi kn}{N}\right), \quad k = 0, 1, \dots, N-1; N = 4, \quad (8)$$

$$Z(1) = y_m - y_{m-1} - jy_{m-1/2}, \quad (9)$$

对于每个符号 2 点采样的信号, FFT 频率分辨率 \$\Delta f = F_s/4\$, 能反映出平方根升余弦信号相位 \$\theta\$ 的频率范围为 \$(F_s/4 - \Delta f, F_s/4 + \Delta f)\$, 即 \$Z(1)\$ 信号可反映出平方根升余弦信号相位 \$\theta\$。

由于相干光传输系统中色散产生的码间干扰, 导致了接收信号部分失真, 相应的 \$y_{m-1/2}\$ 信号出现了畸变, 如果能把畸变的信号能量分散到其他信号采集点, 就降低了色散对信号的干扰。因此, 信号先进行 FFT 变换, 变换后的信号经过频域滤波器, 去掉信号直流成分后, 再进行 IFFT 变换。这样, 在不改变信号相位的情况下, 把畸变信号能量分散到其他各采样点, 从而减少色散的干扰:

$$z(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Z(k) \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1; N = 4, \quad (10)$$

$$z(1) = -0.25(y_m + y_{m-1}) + 0.75y_{m-1/2}, \quad (11)$$

根据(6)、(7)、(9)、(11)式, 对信号幅值归一化处理, 可得

$$\epsilon(m) = \text{Re}[y_{m-1/2}^* \times (y_m - y_{m-1})] = \text{Re}[\rho_{m-1/2} \exp(-j\theta_{m-1/2}) \times 2\rho_m \exp(j\theta)] = \text{Re}\left[2z(1) \times \frac{Z^*(1)}{|Z(1)|}\right] = \text{Re}\left\{2 \times [-0.25(y_m + y_{m-1}) + 0.75y_{m-1/2}] \times \frac{[y_m - y_{m-1} - jy_{m-1/2}]^*}{|y_m - y_{m-1} - jy_{m-1/2}|}\right\}. \quad (12)$$

3 实验结果

本实验将信号发生器产生的两路 10 Gb/s 长度为 \$2^{13} - 1\$ 的非归零码(NRZ)伪随机序列信号(PRBS)通过马赫-曾德尔调制器(MZ)调制到由外部腔式激光器(ECL)产生的中心波长为 1565.4 nm, 功率为 14.5 dBm 的光载波上以产生光 QPSK 信号, 通过调节周相正交(IQ)调制器的偏置电压及调节 I 和 Q 两路信号的延时, 使 I 和 Q 两路信号正交地调制到光载波上。IQ 调制器输出的光 QPSK 信号由偏振分束器(PBS)分成偏振正交的两路, 其中一路经长约 2 m 的保偏光纤延时, 使两路信号不相关, 通过偏振合束器(PBC)耦合, 形成 40 Gb/s 的偏振复用 DQPSK(PM-DQPSK)信号, 随后通过光探测器(PD)接收, 其传输系统结构如图 5 所示。IQ 调制器输出的 QPSK 光信号眼图和接收端信号的光谱图分别如图 5(a)、(b)所示。

在接收端通过示波器对信号进行 2 倍数采样,

并对采样后的信号进行离线处理^[18~20]。同步环路中, 噪声带宽 \$B_L\$ 越大, 完成捕获的时间越短, 然而抖动也越大。因此, 噪声带宽 \$B_L\$ 的选取应根据系统噪声、环路稳定性及锁定时间综合考虑。在 \$B_L\$ 一定的情况下, 信号在不同的光信噪比(OSNR)和光纤长度下, 小数插值间隔 \$u_k\$ 的同步过程如图 6 所示。光信噪比越小, 光纤长度越长, 同步完成捕获需要的时间越长。对比图 6 中 \$u_k\$ 同步过程曲线, 可以看到, 在条件相同的情况下, 改进型 Gardner 方法较 Gardner 方法能够较快地进入同步状态, 完成捕获。

在相对等效噪声带宽条件下, 稳态相对定时抖动用均方差值 \$\sigma\$ 表示。在接收端通过色散补偿算法的情况下, 信号经背靠背(BTB)和 100 km 标准单模光纤(SSMF)传输后, 实验得到了信号定时抖动与光信噪比(OSNR)的关系曲线分别如图 7(a)、(b)所示。对比图 7(a)、(b)可以看出, 随着输入信号信

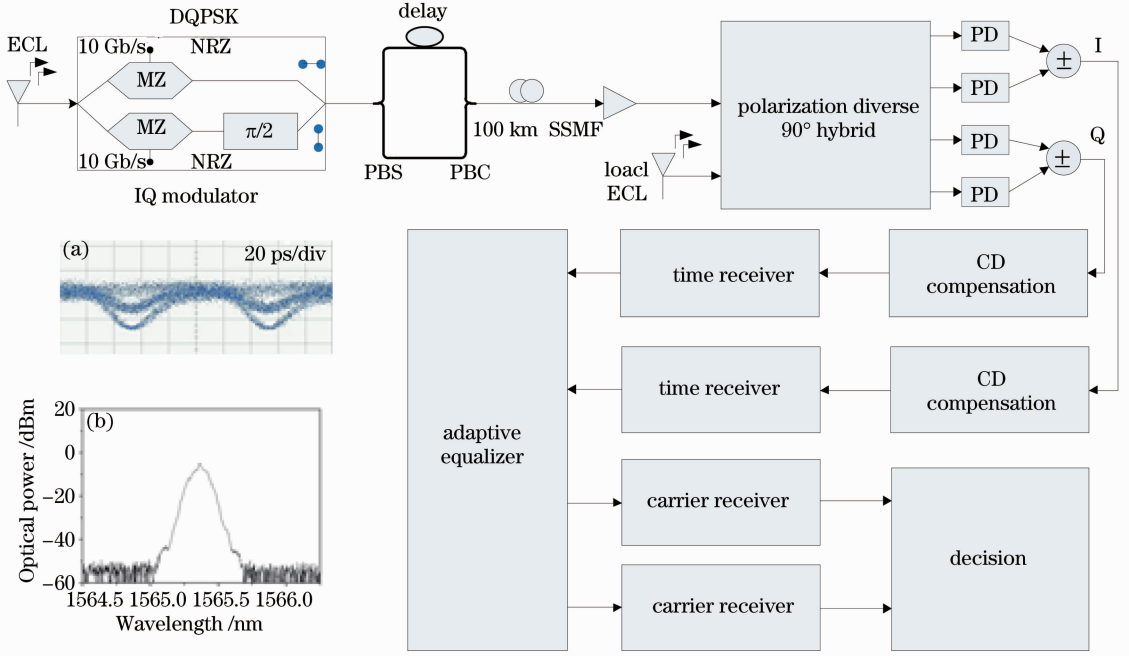


图 5 40 Gb/s 偏振复用 DQPSK 信号传输与相干检测系统。(a)光 QPSK 信号眼图；(b)接收端信号的光谱图

Fig. 5 System with 40 Gb/s PM-DQPSK signal transmission and coherent detection. (a) Eye-diagram of the optical QPSK signal; (b) optical spectra of the received signal

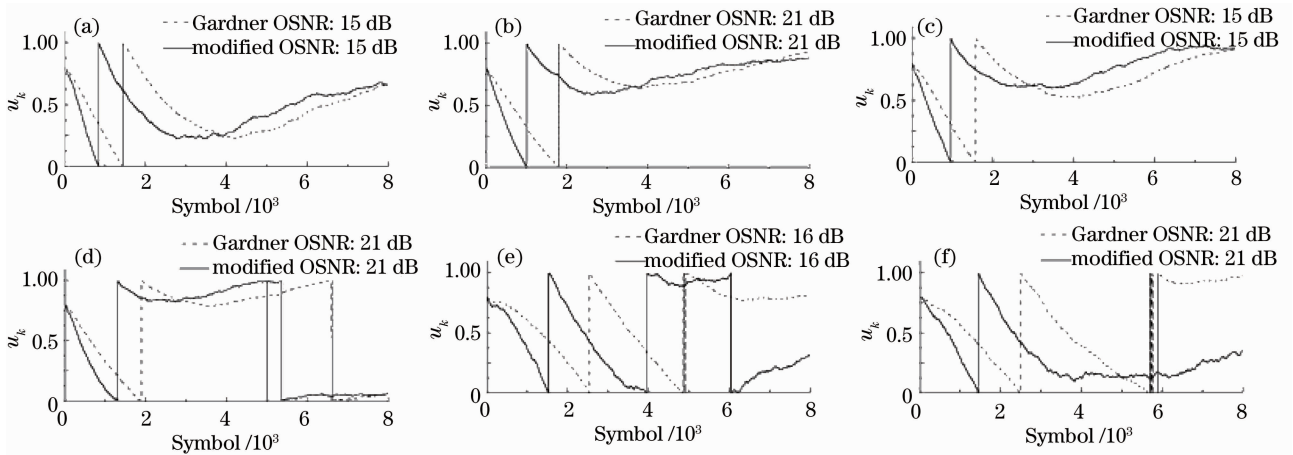


图 6 $\tau \approx 0.5T$ 光纤传输 100 km 和 BTB u_k 同步曲线图。(a)光纤传输 100 km, 光信噪比 15 dB, 色散补偿；(b)光纤传输 100 km, 光信噪比 21 dB, 色散补偿；(c) BTB, 光信噪比 15 dB, 色散补偿；(d) BTB, 光信噪比 21 dB, 色散补偿；(e) 光纤传输 100 km, 光信噪比 16 dB；(f) 光纤传输 100 km, 光信噪比 21 dB

Fig. 6 $\tau \approx 0.5T$ optical transmission 100 km and BTB u_k transient response. (a) Optical transmission of 100 km, OSNR of 15 dB, CD compensation; (b) optical transmission of 100 km, OSNR of 21 dB, CD compensation; (c) BTB, OSNR of 15 dB, CD compensation; (d) BTB, OSNR of 21 dB, CD compensation; (e) optical transmission of 100 km, OSNR of 16 dB; (f) optical transmission of 100 km, OSNR of 21 dB

噪比的增加,总体上均方差值逐渐减小。在14 dB~25 dB光信噪范围内,改进型 Gardner 方法比 Gardner 方法的均方差值降低约 20%,说明改进型 Gardner 方法具有较好的抖动性能。在未添加色散补偿的情况下,信号经 100 km 标准单模光纤传输后,两种方法的定时抖动与输入光信噪比的关系曲

线如图 7(c)所示。从图中可以看出,因色散的存在, Gardner 方法抖动性能不稳定,而改进型 Gardner 方法能够保持较好的稳定性;当光信噪比大于 16 dB 时,改进型 Gardner 方法比 Gardner 方法的均方差值降低约 30%。因此改进型 Gardner 方法较 Gardner 方法能够在有色散残留的情况下,

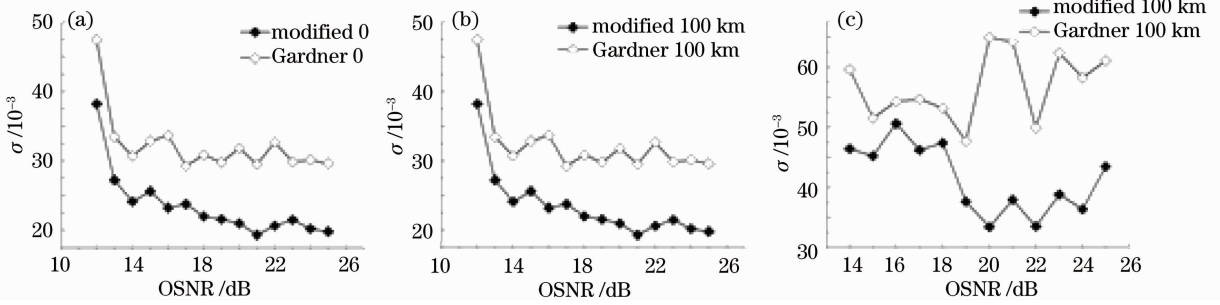


图 7 定时抖动均方差值与光信噪比关系。(a) BTB, 色散补偿; (b)单模光纤传输 100 km, 色散补偿; (c)单模光纤传输 100 km

Fig. 7 Timing jitter mean square value versus OSNR. (a) BTB, CD compensation; (b) optical transmission 100 km, CD compensation; (c) optical transmission 100 km

仍能保持较好的抖动性能。

系统误码性能如图 8 所示,可以看出,在经过色散补偿、自适应均衡和载波恢复的情况下,使用改进型 Gardner 方法的系统比使用 Gardner 方法的系统在误码率(BER)为 10^{-3} 时系统接收功率代价降低了 0.4 dB。通过图 6 和图 7 在实验上验证了改进型 Gardner 方法能较快地进入同步状态且具有较好的抖动性能和抵抗色散能力。

明改进型 Gardner 方法能较快地进入同步状态且具有较好的抖动性能和抗色散能力。

参 考 文 献

- Xiang Zhou, Jianjun Yu. Multi-level, multi-dimensional coding for high-speed and high-spectral-efficiency optical transmission [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(16): 3641~3653
- Xiang Zhou, Jianjun Yu. Digital signal processing for coherent optical communication[C]. *Wireless and Optical Communications Conference*, 2009. 1~5
- Xiang Zhou, Jianjun Yu, Mingfang Huang *et al.*. 64 Tb/s, 8 b/s/Hz, PDM-36QAM transmission over 320 km using both pre- and post-transmission digital signal processing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(4): 571~577
- Han Sun, Jamie Gaudette, Yue Pan *et al.*. Modulation formats for 100 Gb/s coherent optical system [C]. *Optical Fiber Communication*, 2009. 1~3
- Han Sun, Kuang-Tsan Wu, Kim Roberts. Real-time measurements of a 40 Gb/s coherent system[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 873~879
- Kim Roberts, Maurice O' Sullivan, Kuang-Tsan Wu *et al.*. Performance of dual-polarization QPSK for optical transport systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(16): 3546~3559
- Chris R. S. Fludger, Thomas Duthel, Dirk van den Borne *et al.*. Coherent equalization and POLMUX-RZ-DQPSK for robust 100-GE transmission [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(1): 64~72
- M. Kuschnerov, F. N Hauske, E. Gourdon *et al.*. Digital timing recovery for coherent fiber optic systems [C]. *Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2008. 1~3
- Floyd M. Gardner. A BSPK/QPSK timing-error detector for sampled receivers[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1986, **34**(5): 423~429
- Michael G. Taylor. Coherent detection method using DSP for demodulation of signal and subsequent equalization of propagation impairments[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **6**(2): 674~676
- Han Sun, Kuang-Tsan Wu. Clock recovery and jitter sources in coherent transmission systems[C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, 2012. 1~3
- Shoichiro Oda, Chihiro Ohshima, Toshiki tanaka *et al.*. Interplay between local oscillator phase noise and electrical chromatic dispersion compensation in digital coherent transmission system[C]. *IEEE Optical Communication (ECOC)*,

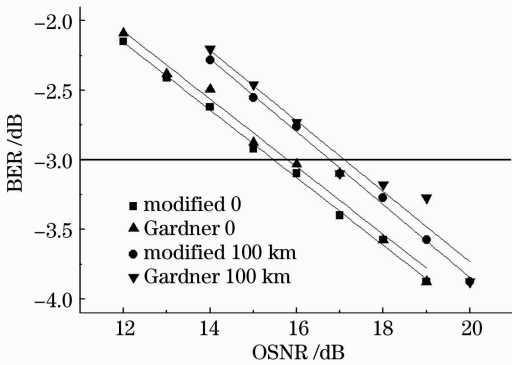


图 8 相干检测的误码率曲线
Fig. 8 BER curves of coherent detection

4 结 论

通过理论分析 DQPSK 相干光接收系统中位同步过程中受采样时钟偏移、频率偏移和色散等影响,提出了一种利用 QPSK 自身信号特征,融合了信号时域信息和频域信息的改进型 Gardner 方法。通过 40 Gb/s 偏振复用相移键控传输系统实验,实验结果表明,改进型 Gardner 方法比 Gardner 方法的均方差值降低约 20%;在未色散补偿的情况下,经 100 km SSMF 传输后,使用改进型 Gardner 方法有较好的稳定性,在光信噪比大于 16 dB 时,改进型 Gardner 方法比 Gardner 方法的均方差值降低约 30%。说

2010. 1~5
- 13 Zhou Xian, Chen Xue, Fan Yangyang. All-digital timing recovery scheme for high-speed optical coherent receiver[J]. *J. Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2010, **33**(5): 10~16
周 娴, 陈 雪, 樊洋洋. 高速相干光接收机的全数字时钟恢复方案[J]. *北京邮电大学学报*, 2010, **33**(5): 10~16
- 14 Han Sun, Kuang-Tsan Wu. A novel dispersion and PMD tolerant clock phase detector for coherent transmission systems [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition, 2011. 1~3
- 15 M. Kushnerov, F. N Hauske, K. Piyawanno *et al.*. Joint equalization and timing recovery for coherent fiber optic receivers [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2008. 1~2
- 16 Floyd M. Gardner. Interpolation in digital modems—part I: fundamentals [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1993, **41**(3): 501~507
- 17 Lars Erup, Floyd M. Gardner, Robert A. Harris. Interpolation in digital modems—part II: implementation and performance[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1993, **41**(6): 998~1008
- 18 Feng Yong, Wen He, Zhang Hanyi *et al.*. Digitalized optical coherent detection of differential phase shift keying signal and chromatic dispersion compensation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 471~476
冯 勇, 闻 和, 张汉一等. 差分相移键控信号的数字相干光检测与色散补偿研究与实现 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 471~476
- 19 Feng Yong, Wen He, Zhang Hanyi. Digital optical coherent detection of polarization multiplexed differential phase shift keying signal and analysis of adaptive digital polarization demultiplexing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1268~1273
冯 勇, 闻 和, 张汉一. 偏振复用差分相移键控信号的数字相干解调与偏振解复用算法研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1268~1273
- 20 Qiao Yaojun, Du xiao, Ji Yuefeng. Phase estimation method in optical QPSK transmission system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1229~1234
乔耀军, 杜 晓, 纪越峰. 光四相相移键控传输系统中相位估计算法研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1229~1234

栏目编辑: 王晓琰