

# 基于信号功率波形自相关函数的色散监测

赵东鹤<sup>1</sup> 席丽霞<sup>1</sup> 杨松<sup>1</sup> 翁轩<sup>1</sup> 张晓光<sup>1</sup> 张文博<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)  
(<sup>2</sup>北京邮电大学理学院, 北京 100876)

**摘要** 通过理论推导证明了信号功率波形自相关函数中包含一个脉冲, 利用该脉冲位置可以估计信道色散的大小。在此基础上, 给出了用于相干接收系统的色散监测算法。搭建了 112 Gb/s(28 GBaud)的偏分复用非归零四相相移键控(PDM-NRZ-QPSK)实验系统对此方法进行了验证。并利用 OptiSystem 和 Matlab 协同仿真, 搭建了 56 Gb/s的单偏振四相相移键控(QPSK)和 112 Gb/s 偏分复用四相相移键控(PDM-QPSK)仿真系统, 分析了该方法对非归零(NRZ)、归零 67(RZ67)、归零 50(RZ50)、归零 33(RZ33)等不同码型的适用性。实验和仿真结果与理论推导一致, 证明了该方法的可行性。实验监测误差小于 275 ps/nm, 仿真监测误差小于 185 ps/nm。

**关键词** 光通信; 色散监测; 自相关函数; 光性能监测; 相干检测

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1206004

## Chromatic Dispersion Monitoring Based on Auto-Correlation Function of Signal Power Waveform

Zhao Donghe<sup>1</sup> Xi Lixia<sup>1</sup> Yang Song<sup>1</sup> Weng Xuan<sup>1</sup> Zhang Xiaoguang<sup>1</sup> Zhang Wenbo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China  
<sup>2</sup> School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** It is confirmed through theoretical derivation that auto-correlation function of signal power waveform contains a pulse, whose location can be used to estimate chromatic dispersion. On this basis, the algorithm of chromatic dispersion monitoring is given. This method is verified in 112 Gb/s (28 GBaud) polarization division multiplexing non return to zero quadrature phase shift keying (PDM-NRZ-QPSK) experimental system. Using OptiSystem and Matlab, 56 Gb/s single polarization QPSK and 112 Gb/s PDM-QPSK simulation systems are setup and the applicability of this method to code pattern of NRZ, RZ67, RZ50 and RZ33 is analyzed. The experiment and simulation results are consistent with the analytical derivation, which confirms the feasibility of the method. The experimental monitoring error is less than 275 ps/nm, and the monitoring error of simulation is less than 185 ps/nm.

**Key words** optical communications; chromatic dispersion monitoring; auto-correlation function; optical performance monitoring; coherent detection

**OCIS codes** 060.4510; 060.1660; 060.2300

## 1 引言

随着光纤通信系统传输速率的提高和光网络复杂度的增加, 作为保障系统可靠性的技术手段之一, 光性能监测越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>。其中, 群速

度色散(以下简称色散)监测是光性能监测的重要内容之一。作为光纤的基本特性, 色散(CD)会导致光信号脉冲展宽和码间串扰, 使系统的性能降低。一方面, 在高速相干光纤通信系统中, 数字信号处理

**收稿日期**: 2013-05-13; **收到修改稿日期**: 2013-08-14

**基金项目**: 国家自然科学基金(61205065)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110005110014)、山东省自然科学基金项目(ZR2010FM043)

**作者简介**: 赵东鹤(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事光性能监测方面的研究。E-mail: zhaodonghe@bupt.edu.cn

**导师简介**: 张晓光(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事高速光通信系统方面的研究。E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn (通信联系人)

(DSP)的应用,理论上可以精确地补偿信道中的色散损伤,降低了光域色散补偿的需求<sup>[2]</sup>,而在未补偿色散的链路中,需要监测的色散范围显著增加;另一方面,在动态可重构光网络中,随着路径的动态切换,使色散呈现出了动态时变的特性<sup>[3]</sup>。这些都对色散监测提出了新的、更高的要求。

现有的色散监测方法大体上可以分为两类:一类是针对非相干检测系统的,包括基于射频(RF)谱测量的<sup>[4]</sup>,基于时钟频率分量的<sup>[5-6]</sup>,基于残留边带(VSB)间相对群时延的<sup>[7-8]</sup>,基于直方图监测的<sup>[9-10]</sup>,基于异步延迟抽头采样的<sup>[11-12]</sup>和基于非线性光学全光谱分析的方法<sup>[13-17]</sup>等,这些方法往往存在监测范围小、精度低,需要改变发射机结构或易受偏振模色散(PMD)等其他效应干扰等缺点,并不适用于高速相干光通信系统和动态可重构光网络;另一类是从相干检测系统中衍生而来的,包括利用相干接收机中均衡滤波器抽头系数估计色散<sup>[18]</sup>和利用搜索算法扫描预制色散范围估计色散<sup>[19]</sup>,这些方法存在复杂度较高、收敛速度慢等问题,且仅适用于相干接收端的色散监测。

信号的自相关函数在信号处理和信号检测等领域中存在非常广泛的应用。利用信号功率波形自相关函数,文献<sup>[20-21]</sup>提出了一种用于相干光通信系统中估计色散的方法,该方法原理简单、复杂度低、监测范围大。

本文推导了基于光信号功率波形自相关函数的色散监测方法的工作原理,分析了其监测范围,给出

了相关算法,并利用实验和仿真对此进行了验证。

## 2 工作原理

光信号经历光纤链路的色散,产生畸变,该畸变包含了光纤链路色散的信息。若想通过光信号产生的某种畸变的大小来测量色散,就要采用某种方法从畸变信息里提取色散信息。利用光信号功率波形的自相关函数,通过适当的处理,将色散信息提取出来。为了简化分析,仅考虑单偏振的系统,相应的结论可以推广到偏分复用的系统中。

### 2.1 光信号功率波形的自相关函数

图1为典型的点到点光纤通信系统模型,其中 $x_n$ 为发送的零均值的独立同分布的信息符号, $n$ 为整数索引, $p(t)$ 、 $h(t)$ 和 $b(t)$ 分别为发送滤波器、光纤信道和接收机前带通滤波器的单位脉冲时间响应函数, $|\cdot|^2$ 为平方律检测, $y(t)$ 为接收到的信号功率波形<sup>[22]</sup>。

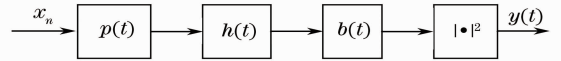


图1 光纤通信系统模型

Fig. 1 Model of fiber-optic communication systems

根据上述系统模型,接收到的光信号可以表示为

$$r(t) = \sum_n x_n q(t - nT), \quad -\infty < n < \infty, \quad (1)$$

式中 $q(t) = p(t) * h(t) * b(t)$ , $*$ 为卷积符号, $T$ 为系统的符号周期。

经过平方律检测后,接收到的信号功率波形为

$$y(t) = |r(t)|^2 = \sum_n |x_n|^2 q^2(t - nT) + \sum_{k \neq m} x_k x_m^* q(t - kT) q^*(t - mT) = y_0(t) + y_1(t), \quad (2)$$

式中 $y_0(t)$ 为单个符号的功率分量, $y_1(t)$ 为色散诱导的各个符号之间的串扰分量, $m$ 、 $k$ 为整数索引。

$y(t)$ 的自相关函数可以表示为

$$R_{yy}(t; t - \tau) = \left[ \sum_n |q(t - nT)|^2 \right] \left[ \sum_l |q(t - lT - \tau)|^2 \right] + \dots + \sum_{k \neq m} q(t - kT) q^*(t - mT) q^*(t - kT - \tau) q(t - mT - \tau), \quad (3)$$

显然, $y(t)$ 是一个循环平稳随机过程。令 $m = k - v$ ,其时间平均则可以简化为

$$\bar{R}_{yy}(\tau) = \frac{1}{T} \sum_v \int_{-\infty}^{\infty} |q(t)|^2 |q(t + vT - \tau)|^2 dt + \dots + \frac{1}{T} \sum_{v \neq 0} \int_{-\infty}^{\infty} q(t) q^*(t + vT) q^*(t - \tau) q(t + vT - \tau) dt = \bar{R}_{y_0 y_0}(\tau) + \bar{R}_{y_1 y_1}(\tau). \quad (4)$$

### 2.2 高斯脉冲功率波形的自相关函数

由(4)式可知,推导任意信号的功率波形自相关函数是比较困难的。但是在很多情况下,信号可近似为高斯脉冲。在此,推导了高斯脉冲功率波形自

相关函数表达式,以得到自相关函数与色散的关系,并且通过改变高斯脉冲的脉宽来探究该方法对不同码型的适应情况。

假设入射脉冲为初始无啁啾的高斯脉冲,忽略

其他损伤效应,仅考虑色散的影响,那么经过长度为  $z$  的光纤传输后,输出脉冲为

$$q(t) = \frac{T_0}{(T_0^2 - i\beta_2 z)/2} \exp\left[-\frac{t^2}{2(T_0^2 - i\beta_2 z)}\right], \quad (5)$$

式中  $T_0$  为初始高斯脉冲的  $1/e$  强度点半宽,  $\beta_2$  为

群速度色散系数,  $z$  为光纤长度,  $\beta_2 z$  为累积色散<sup>[23]</sup>。

将(5)式代入(4)式,经过一系列的推导,分别求得  $\bar{R}_{y_0 y_0}(\tau)$  和  $\bar{R}_{y_1 y_1}(\tau)$  为

$$\begin{aligned} \bar{R}_{y_0 y_0}(\tau) &= \frac{T_0^3}{T} \sqrt{\frac{\pi}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}} \sum_v \exp\left[-\frac{T_0^2(\tau - vT)^2}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right], \\ \bar{R}_{y_1 y_1}(\tau) &= \frac{T_0^3}{T} \sqrt{\frac{\pi}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}} \exp\left[-\frac{T_0^2 \tau^2}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right] \times \cdots \times \sum_{v \neq 0} \exp\left[-\frac{v^2 T^2 T_0^2}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)} + \frac{i\tau v T \beta_2 z}{(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right]. \end{aligned} \quad (6)$$

接下来,对这两项分别加以讨论,进而得到  $\bar{R}_{yy}(\tau)$  的整体性质。

1)  $\bar{R}_{y_0 y_0}(\tau)$  的推导

令

$$g_0(\tau) = \exp\left[-\frac{T_0^2 \tau^2}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right], \quad (7)$$

则(6)式变为

$$\bar{R}_{y_0 y_0}(\tau) = \frac{T_0^3}{T} \sqrt{\frac{\pi}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}} \sum_v g_0(\tau - vT), \quad (8)$$

由(8)式可以看出,  $\bar{R}_{y_0 y_0}(\tau)$  项是一个由高斯脉冲  $g_0(\tau)$  移位形成的序列,移位间隔为  $T$ 。 $\bar{R}_{y_0 y_0}(\tau)$  的傅里叶变换为

$$\begin{aligned} S_{y_0 y_0}(f) &= \frac{\pi T_0^2}{T^2} \sum_v \exp\left[-\frac{2\pi^2 v^2 (T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}{T^2 T_0^2}\right] \times \\ &\delta\left(f - \frac{v}{T}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式表明,  $S_{y_0 y_0}(f)$  是一个加权的冲激函数序列,序列间隔为  $1/T$ ,且各冲激函数的强度随着累积色散

$\beta_2 z$  的平方和脉冲序号  $v$  的平方按负指数规律衰减。 $|v| = 1$  的冲激函数相对于  $v = 0$  的相对强度为

$$H_1 = \exp\left[-\frac{2\pi^2 (T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}{T^2 T_0^2}\right]. \quad (10)$$

令  $T_0 = 10$  ps,对于符号周期  $T$  为 35.7 ps 的系统,当累积色散  $|Dz| \geq 477$  ps/nm 时,  $H_1 \leq 0.01$ ,其中  $D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$ 。显然,序号  $v = 0$  的脉冲起主导作用,因此

(9)式可近似表示为

$$S_{y_0 y_0}(f) \approx \frac{\pi T_0^2}{T^2} \delta(f), \quad (11)$$

相应地,

$$\bar{R}_{y_0 y_0}(\tau) = f_{\text{IFFT}}[S_{y_0 y_0}(f)] = \frac{\pi T_0^2}{T^2}, \quad (12)$$

式中  $f_{\text{IFFT}}$  为快速逆傅里叶变换(IFFT)。

2)  $\bar{R}_{y_1 y_1}(\tau)$  的推导

从(7)式出发,对  $\bar{R}_{y_1 y_1}(\tau)$  作进一步的处理,其中对求和项进行傅里叶正变换( $f_{\text{FFT}}$ , FFT)和逆变换后可以得到

$$\begin{aligned} \sum_{v \neq 0} \exp\left[-\frac{v^2 T^2 T_0^2}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)} + \frac{i\tau v T \beta_2 z}{(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right] &= \frac{\sqrt{2\pi(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}}{T T_0} \exp\left[-\frac{\tau^2 \beta_2^2 z^2}{2T_0^2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right] * \\ &\sum_{v=-\infty}^{\infty} \delta\left[\tau - \frac{v2\pi(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}{T\beta_2 z}\right] - 1, \end{aligned} \quad (13)$$

将(13)式代入(7)式并整理得

$$\begin{aligned} \bar{R}_{y_1 y_1}(\tau) &= \frac{\pi T_0^2}{T^2} \exp\left[-\frac{T_0^2 \tau^2}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right] \times \cdots \times \\ &\left\{ \exp\left[-\frac{\tau^2 \beta_2^2 z^2}{2T_0^2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right] * \sum_{v=-\infty}^{\infty} \delta\left[\tau - \frac{v2\pi(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}{T\beta_2 z}\right] - \frac{T T_0}{\sqrt{2\pi(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}} \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

令

$$R_{\text{env}} = \frac{\pi T_0^2}{T^2} \exp\left[-\frac{T_0^2 \tau^2}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right],$$

$$g_1(\tau) = \exp\left[-\frac{\tau^2 \beta_2^2 z^2}{2T_0^2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right],$$

$$\tau_1 = \frac{2\pi(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}{T\beta_2 z}, \quad (15)$$

则

$$\bar{R}_{y_1 y_1}(\tau) = R_{\text{env}} \left[ \sum_v g_1(\tau - v\tau_1) - \frac{TT_0}{\sqrt{2\pi(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}} \right], \quad (16)$$

显然,  $\bar{R}_{y_1 y_1}(\tau)$  是一个具有高斯包络的高斯脉冲序列, 序列间隔为  $\tau_1$ 。

由(12)式可知,  $\bar{R}_{y_0 y_0}(\tau)$  为一常数。由(16)式可知,  $\bar{R}_{y_1 y_1}(\tau)$  是一个具有高斯包络的高斯脉冲序列, 序列间隔为  $\tau_1$ 。

令  $T_0 = 10$  ps,  $Dz = 800$  ps/nm, 对于符号周期  $T$  为 35.7 ps 的系统, 画出相应的  $\bar{R}_{y_1 y_1}(\tau)$ , 如图 2 所示。

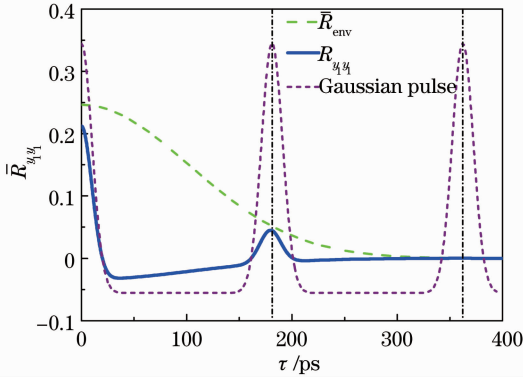


图 2  $T_0$  为 10 ps, 累积色散为 800 ps/nm, 符号周期  $T$  为 35.7 ps 相干系统的  $\bar{R}_{y_1 y_1}(\tau)$

Fig. 2  $\bar{R}_{y_1 y_1}(\tau)$  for  $T = 35.7$  ps coherent system when  $Dz = 800$  ps/nm and  $T_0 = 10$  ps

为了方便, 图 2 中的高斯脉冲序列在幅度上做了适当的缩放。

各高斯脉冲在  $\tau = v\tau_1$  处取得极大值为

$$\bar{R}_{y_1 y_1}(v\tau_1) \approx \frac{\pi T_0^2}{T^2} \exp\left[-\frac{2\pi^2 v^2 T_0^2}{T^2}\right], \quad (17)$$

式中的近似关系在累积色散比较大时成立。显然, 各高斯脉冲的极大值随着脉冲序号  $v$  的平方按负指数的规律衰减。

而第一个脉冲的位置为

$$\tau_1 = -\frac{2\pi(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}{T\beta_2 z} \approx -\frac{2\pi\beta_2 z}{T} = \frac{\lambda^2 Dz}{cT}, \quad (18)$$

在色散较大时, (18)式近似成立。这表明可以利用第一个脉冲的位置  $\tau_1$  估计色散的大小, 即

$$Dz \approx \frac{cT\tau_1}{\lambda^2}, \quad (19)$$

该脉冲可称为色散指示脉冲。

### 2.3 讨论

根据(17)式,  $|v| = 1$  的脉冲极大值相对于  $v = 0$

的脉冲的相对值为

$$H_2 = \exp\left(-\frac{2\pi^2 T_0^2}{T^2}\right), \quad (20)$$

显然, 该值随着  $T_0$  的增大而减小。这表明脉宽越窄, 该方法越有效。当脉宽过宽时, 需采取手段加以恢复。

在  $T_0$  给定时, 如果  $g_1(\tau)$  的半峰全宽

$$2(2\ln 2)^{1/2} T_0 \sqrt{1 + T_0^4/(\beta_2^2 z^2)} \geq \tau_1, \quad (21)$$

任意两相邻高斯脉冲的峰值将无法区分, 根据(21)式可给出此方法的测量下限:

$$|\beta_2 z| \geq \sqrt{2\ln 2(T_0 T/\pi)^2 - T_0^4}, \quad (22)$$

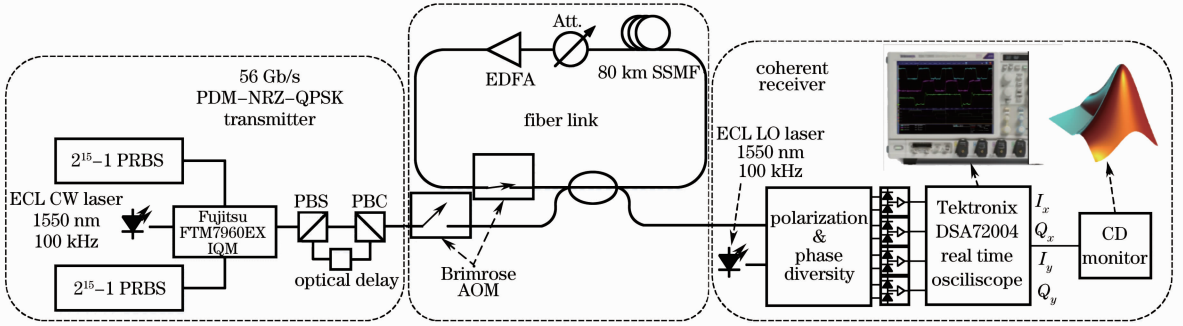
比如, 对于  $T_0 = 10$  ps, 符号周期  $T$  为 35.7 ps 的系统, 此方法的测量下限为  $|Dz| = 69.8$  ps/nm。

理想情况中, 该方法没有监测上限, 但是累积色散越大, 所需要的符号数越多, 计算复杂度也就越高。

## 3 实验和仿真验证

### 3.1 系统描述

为了验证这种方法, 搭建了 112 Gb/s 的偏分复用非归零四相相移键控 (PDM-NRZ-QPSK) 实验系统, 对链路色散进行了监测。实验系统框图如图 3 所示, 两路 28 Gb/s 的  $2^{15} - 1$  伪随机比特序列 (PRBS) 码型生成器, 产生两路射频 (RF) 信号, 驱动 Fujitsu 的 FTM7960EX IQ 调制器。IQ 调制后的光信号, 经过偏振分束器 (PBS) 分成两路, 其中一路通过延迟实现偏分复用, 再经过偏振合束器 (PBC) 合成一路, 形成 112 Gb/s 的 PDM-NRZ-QPSK 调制信号, 并送入 80 km 的光纤环路中循环传输 8 次, 实现最长 640 km 的传输, 且每次循环的数据都进行了采集。从光纤环路出来的光信号, 经过零差相干接收和 Tektronix 实时示波器 DSA72004 的 8 bit 模数转换 (ADC)  $5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$  采样, 得到 4 路数据流  $I_x[n]$ 、 $Q_x[n]$ 、 $I_y[n]$  和  $Q_y[n]$ , 并送往用 Matlab 编写的 CD 监测模块, 用于监测信道色散。系统中, 发送端激光器和接收端本振激光器均为外腔激光器 (ECL), 工作在 1550 nm 波长, 线宽为 100 kHz。光纤环路所用光纤为 Sumitomo 的 G652D 光纤, 1550 nm 处色散系数  $D$  标称值为 16.75 ps/(nm·nm)。



CW: continuous wave; IQM: IQ modulator; AOM: acousto-optic modulator; EDFA: erbium-doped optical fiber amplifier; Att.: attenuator; SSMF: standard single mode fiber; LO: local oscillator

图 3 实验系统框图

Fig. 3 Experimental system setup

同时,为了进一步考察此方法对各种码型的适应性,限于实验条件,利用 OptiSystem 和 Matlab 协同仿真,分别仿真了和实验系统类似的 56 Gb/s 的单偏振四相相移键控(QPSK)和 112 Gb/s 偏分复用四相相移键控(PDM-QPSK)光传输系统,并对非归零(NRZ)、归零 67(RZ67),归零 50(RZ50)和归零 33(RZ33)等码型进行了仿真。系统仿真框图如图 4 所示,QPSK 发射机产生的光信号送入光纤链路中传

输,经过相干接收和  $5.6 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$  采样后,得到 2 路数据  $I[n]$  和  $Q[n]$ ,并送入用 Matlab 编写的 CD 监测模块,进行信道色散监测。与 QPSK 系统不同的是,经过相干接收后,PDM-QPSK 系统得到 4 路数据  $I_x[n]$ 、 $Q_x[n]$ 、 $I_y[n]$  和  $Q_y[n]$ 。仿真系统中标准单模光纤(SSMF)参数采用 OptiSystem 的默认设置。

在 NRZ 光信号产生之后,可以经过不同的脉冲切割,分别得到 RZ67、RZ50 和 RZ33 等码型。

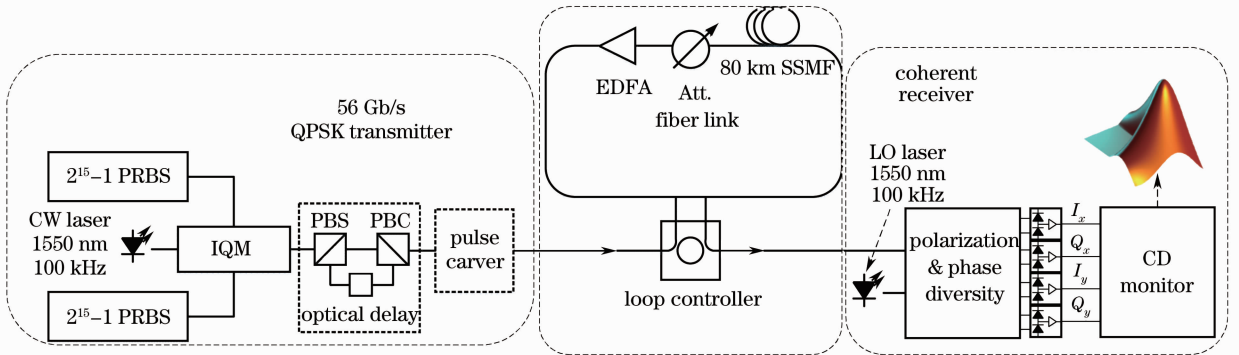


图 4 系统仿真框图

Fig. 4 System simulation block diagram

### 3.2 算法部分

通常,计算序列自相关函数的算法有两种:1)时域法;2)频域法。得益于高效的快速傅里叶变换(FFT)算法,本文选用频域法。

对于单偏系统,自相关函数可计算为

$$R[n] = f_{\text{IFFT}}[|f_{\text{FFT}}(I^2[n] + Q^2[n])|^2], \quad (23)$$

同理,偏分复用系统的自相关函数为

$$R[n] = f_{\text{IFFT}}[|f_{\text{FFT}}(I_x^2[n] + Q_x^2[n] + I_y^2[n] + Q_y^2[n])|^2], \quad (24)$$

在获得  $R[n]$  的基础上,通过适当的数据处理,得到

$\tau_1$ ,并根据(19)式估算累积色散的大小。

对于 NRZ 等脉宽较宽的码型,采用高通滤波来加强自相关函数中的指示脉冲。

### 3.3 结果和讨论

在实验和仿真中,令光信号经过  $8 \text{ km} \times 80 \text{ km}$  的光纤链路,在每一个跨段结束处监测色散的大小,实验的监测结果如图 5 所示,仿真的监测结果分别如图 6 和图 7 所示。

图 5 表明,此方法对 PDM-NRZ-QPSK 系统适用,且监测的最大误差小于  $275 \text{ ps/nm}$ 。



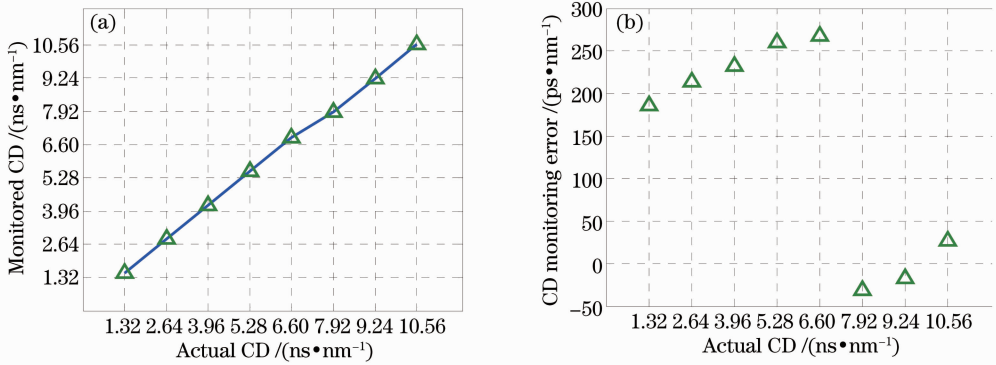


图 5 PDM-NRZ-QPSK 实验系统的色散监测结果。(a)色散监测值和真实值的对比曲线；(b)监测误差分布  
Fig. 5 Results of CD monitoring for PDM-NRZ-QPSK experimental system. (a) Curve of CD monitoring value versus CD actual value; (b) distribution of monitoring error

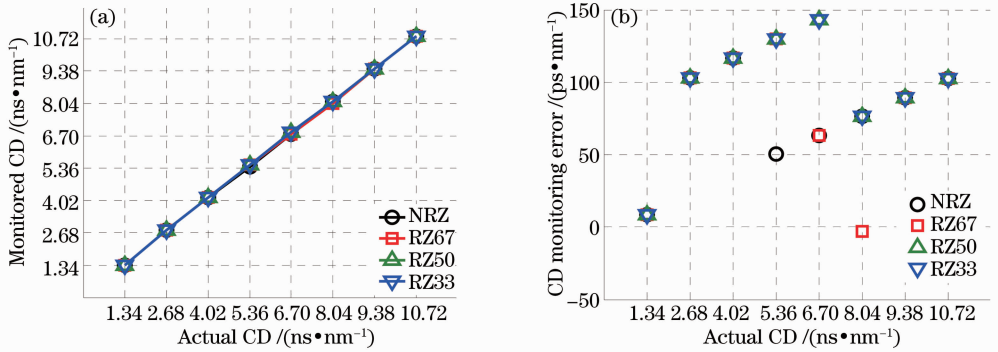


图 6 QPSK 系统的色散监测结果。(a) 色散监测值和真实值的对比曲线；(b)监测误差分布  
Fig. 6 Results of CD monitoring for QPSK system. (a) Curve of CD monitoring value versus CD actual value; (b) distribution of monitoring error

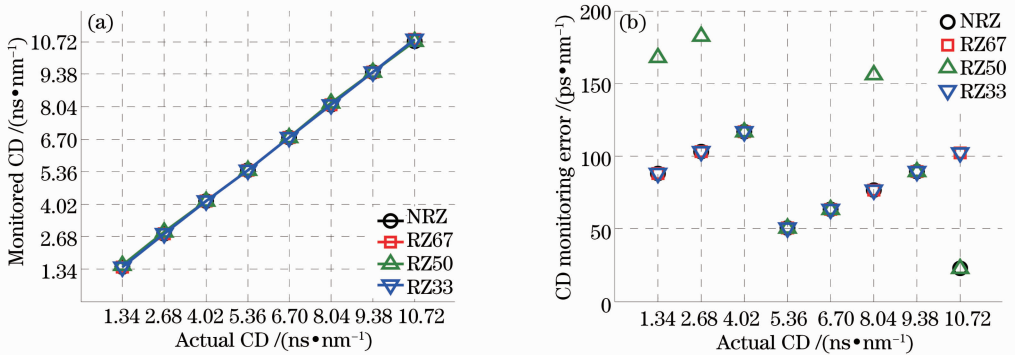


图 7 PDM-QPSK 系统的色散监测结果。(a)色散估计值和真实值的对比曲线；(b)监测误差分布  
Fig. 7 Results of CD monitoring for PDM-QPSK system. (a) Curve of CD monitoring value versus CD actual value; (b) distribution of monitoring error

图 6 和图 7 表明,对于 QPSK 系统和 PDM-QPSK 系统,色散的最大监测误差分别小于 150 ps/nm 和 185 ps/nm,且此方法对 NRZ、RZ67、RZ50 和 RZ33 等码型都适用。

## 4 结 论

理论推导了基于信号功率波形自相关函数的色

散监测的工作原理,讨论了码型脉宽对该监测方法的影响,脉宽越窄,该方法越有效。并通过实验和仿真对此进行了验证。结果表明,实验和仿真结果与理论分析一致,而且该方法对不同的码型具有普遍适用性。该方法具有算法简单、复杂度低、监测速度快、监测范围大的优点,因此,适用于高速相干接收系统的快速色散监测。

## 参 考 文 献

- 1 C K Chan Calvin. Optical Performance Monitoring: Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks [M]. Academic Press, 2010. 162–165.
- 2 Seb J Savory, Giancarlo Gavioli, Robert I Killey, *et al.*. Electronic compensation of chromatic dispersion using a digital coherent receiver [J]. *Opt Express*, 2007, 15(5): 2120–2126.
- 3 A E Willner. The optical network of the future [J]. *Optics and Photonics News*, 2006, 17(3): 30–35.
- 4 M N Petersen, Z Pan, S Lee, *et al.*. Online chromatic dispersion monitoring and compensation using a single inband subcarrier tone [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, 14(4): 570–572.
- 5 Z Pan, Y Xie, S A Havstad, *et al.*. Real-time group-velocity dispersion monitoring and automated compensation without modifications of the transmitter [J]. *Opt Commun*, 2004, 230(1): 145–149.
- 6 S M Kim, C H Lee. The efficient clock-extraction methods of NRZ signal for chromatic dispersion monitoring [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17(5): 1100–1102.
- 7 Q Yu, Z Pan, L S Yan, *et al.*. Chromatic dispersion monitoring technique using sideband optical filtering and clock phase-shift detection [J]. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(12): 2267.
- 8 Y Hirota, Y Takushima, S Matsumoto, *et al.*. Real-time monitoring and fast adaptive compensation of chromatic dispersion in a 40 Gb/s optical cross-connect network [C]. *ECOC*, 2005, 3: 325–326.
- 9 I Shake, H Takara. Chromatic dispersion dependence of asynchronous amplitude histogram evaluation of NRZ signal [J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(10): 2154–2161.
- 10 Z Li, G Li. Chromatic dispersion and polarization-mode dispersion monitoring for RZ-DPSK signals based on asynchronous amplitude-histogram evaluation [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(7): 2859–2866.
- 11 T B Anderson, S D Dods, K Clarke, *et al.*. Multi-impairment monitoring for photonic networks [C]. *ECOC*, 2007. 1–4.
- 12 Y K Lizé, J Y Yang, L C Christen, *et al.*. Simultaneous and independent monitoring of OSNR, chromatic and polarization mode dispersion for NRZ-OOK, DPSK and duobinary [C]. *OFC*, 2007. OThN2.
- 13 P S Westbrook, B J Eggleton, G Raybon, *et al.*. Measurement of residual chromatic dispersion of a 40-Gb/s RZ signal via spectral broadening [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, 14(3): 346–348.
- 14 Chen Ming, Zhang Yejin, He Lina, *et al.*. Chromatic dispersion monitoring method based on frequency-shift of SOA [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(4): 544–547.  
陈明, 张冶金, 贺丽娜, 等. 基于半导体光放大器频移的色散监测方法研究[J]. *半导体光电*, 2007, 28(4): 544–547.
- 15 Zou Lianggang, Song Muping. Dispersion monitoring based on self phase modulation and cross phase modulation effects in semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(s2): 277–281.  
邹良港, 宋牟平. 基于半导体光放大器自相位调制和交叉相位调制的色散监测技术[J]. *中国激光*, 2009, 36(s2): 277–281.
- 16 Zou Lianggang, Song Muping. Dispersion monitoring based on nonlinear effects in silicon optical waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 944–948.  
邹良港, 宋牟平. 基于硅光波导非线性效应的色散监测技术研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 944–948.
- 17 Song Muping, Zou Lianggang. Chromatic dispersion monitoring based on four wave mixing in silicon optical waveguides [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(s1): 181–185.  
宋牟平, 邹良港. 基于硅光波导四波混频的色散监测技术[J]. *中国激光*, 2010, 37(s1): 181–185.
- 18 F N Hauske, M Kuschnerov, B Spinnler, *et al.*. Optical performance monitoring in digital coherent receivers [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(16): 3623–3631.
- 19 R A Soriano, F N Hauske, N G Gonzalez, *et al.*. Chromatic dispersion estimation in digital coherent receivers [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(11): 1627–1637.
- 20 Q Sui, A P T Lau, C Lu. Fast and robust chromatic dispersion estimation using auto-correlation of signal power waveform for DSP based-coherent systems [C]. *OFC*, 2012. 1–3.
- 21 Q Sui, A P T Lau, C Lu. Fast and robust blind chromatic dispersion estimation using auto-correlation of signal power waveform for digital coherent systems [J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(2): 306–312.
- 22 J Zhao, A P T Lau, K K Qureshi, *et al.*. Chromatic dispersion monitoring for DPSK systems using RF power spectrum [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(24): 5704–5709.
- 23 G P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2000.

栏目编辑：王晓琰