

光源带宽对基于光纤色散的光学相关器影响的研究

秦凤杰 谭中伟 宁提纲

(北京交通大学光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 随着光通信系统传输速率的提高, 尤其是光分组交换网络的使用, 光的相关检测技术将在未来的通信领域(包括 IP 路由等)中发挥越来越重要的作用。从基于光纤色散的光学相关器基本原理出发, 采用理论分析和数值仿真两种方法比较了不同带宽光源对光学相关器性能的影响, 分析了光源随机相位噪声向幅度噪声转化的问题, 得到了幅度噪声与光源带宽的关系, 以及光源带宽不同时光学相关器输出的信噪比变化。根据仿真结果得到, 基于非相干光源的光学相关器, 能对速率为 10 Gb/s 的 8 位和 16 位码元数据流进行高速相关检测, 而 32 位的码元数据流仅能采用相干光源进行检测。此外, 还对非相干光源在模拟信号的相关检测中的应用进行了探讨。

关键词 光通信; 光学相关器; 光纤色散; 相位噪声

中图分类号 TN911 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1006004

Research of the Influence of Bandwidth of Light Source on the Optical Correlator Based on Fiber Dispersion

Qin Fengjie Tan Zhongwei Ning Tigang

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract With the increasing of high-bit-rates transmission over optical fiber and especially with the appearance of packet-switched networks, optical correlation detection technology will have many applications in future telecommunication systems including IP router. Beginning with the basic theory of the optical correlator based on fiber dispersion, the influence of the bandwidths of different light sources on the performance of optical correlator is compared by using theoretical analysis and numerical simulation, and phase noise converted into intensity noise by dispersion is analyzed. So it concludes that intensity noise is related with the light source bandwidth, and the signal-to-noise ratio of the optical correlation can be changed when using light source with different bandwidths. According to the simulation results, it is demonstrated that optical correlator based on incoherent light source can recognize 8-bit and 16-bit patterns in 10-Gb/s data streams, but correlation detection of 32-bit patterns can only use coherent light source. Besides, potential application of optical correlator based on incoherent light in the detection of the analog signal is discussed.

Key words optical communications; optical correlator; fiber dispersion; intensity noise

OCIS codes 060.2330; 060.1155; 200.4560

1 引 言

光具有速度快、带宽大、能耗低和并行处理等优点, 光的相关检测技术在数据包过滤方面的应用在很大程度上缓解了电的相关检测以及网络软件的压力^[1-2]。利用基于光纤的光学相关器可以快速实现

大数据量的包头检测。2000 年, Cardakli 等^[3]采用半导体光纤放大器和布拉格光纤光栅阵列制成的光学相关器实现了对 2.5 Gb/s 的包头数据流的检测; 2008 年, Rasras 等^[4]采用有限长单位滤波器响应的原理实现了对速率为 40 Gb/s 的包头数据流的检

收稿日期: 2013-03-28; **收到修改稿日期**: 2013-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(61177012)

作者简介: 秦凤杰(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: qinfengjie_bjtu@163.com

导师简介: 谭中伟(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤通信、光纤传感和光信息处理等方面的研究。

E-mail: tanzwei@126.com(通信联系人)

测;2009年,Webb等^[5]采用全光逻辑门制成光学相关器,实现了对速率为42.6 Gb/s的包头数据流的检测。目前,基于光纤的光学相关器有基于光纤延时线的光学相关器^[6-8]、基于光学逻辑门的光学相关器^[5]、基于布拉格光纤光栅的光学相关器^[3]和基于光纤色散的光学相关器^[9-12]。

基于光纤延时线的光学相关器对延时控制困难;基于光学逻辑门的光学相关器采用的是全光逻辑门进行相关检测,其全光逻辑门仍处于研究阶段,真正投入使用还需要很长一段时间。2010年,Park等^[9]利用时间-频谱卷积原理实现了基于光纤色散的光学相关器,该光学相关器采用的是多个波长的激光器,因此,如果需要的光源路数较多时,其成本较高。而原则上,使用滤波器将非相干光源滤出多个波长也可以作为光学相关器的光源^[13]。然而,光源的相位噪声通过色散之后将会转化为幅度噪声(PM-AM噪声),会降低系统的信噪比(SNR)。因此,本文采用理论推导和仿真相结合的方法,对光源带宽对光学相关器的影响开展研究,探索了基于相

干光源和非相干光源的光学相关器在8位、16位和32位码元数据流的相关检测中的应用。

虽然基于非相干光源系统的信噪比低于相干光源的,但非相干光源具有价格低、带宽大的优点,近年来也得到了越来越多的关注。即使是在传统上认为必须采用相干光源的高速光通信系统中,也出现了滤波后的非相干光源的探索^[14]。本文采用数值仿真的方法对基于非相干光源的光学相关器在模拟信号相关检测中的应用进行了研究。

2 理论推导

2.1 光学相关器的基本原理

基于光纤色散的光学相关器的工作原理是时间-频谱卷积,如图1所示^[9]。将多波长光源信号 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 经过波分复用器(WDM)进行合波后,采用调制信号为 $m(t)$ 的马赫-曾德尔(MZ)调制器进行幅度调制,调制后的光信号进入长距离的单模光纤(SMF)传输,由于色散的作用,在输出端得到经过色散展宽后的光信号。

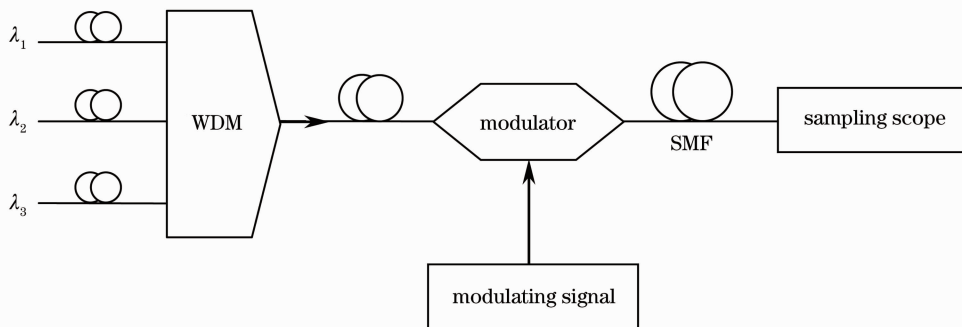


图1 基于光纤色散的光学相关器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of optical correlator based on fiber dispersion

光源电场强度的时域表达式为

$$E(t) = \sqrt{S(\omega)} \exp[-j\omega_0 t + \Phi(t)], \quad (1)$$

式中 $S(\omega)$ 表示输入光信号的光谱能量密度, ω_0 表示中心角频率, $\Phi(t)$ 表示光场的相位噪声。

基于光纤色散的光学相关器需要经过马赫-曾德尔调制器进行幅度调制,因此光源的相位噪声通过色散之后将会转化为PM-AM噪声。考虑到PM-AM噪声 σ^2 的存在,则系统输出端信号的能量表达式为

$$I_{\text{out}}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega S(\omega) [|m_{\text{chirped}}(t - \varphi''\omega) |^2 + \sigma^2], \quad (2)$$

式中 $\varphi'' = -\partial^2 \varphi / \partial \omega^2$ 表示色散,其中 $\varphi(\omega)$ 为光谱的相位传递函数。 $m_{\text{chirped}}(t)$ 表示经过色散处理之后的

调制信号。如果满足条件 $|\Delta \omega_m^2 \varphi'' / 8| \ll \pi^{[9]}$,其中 $\Delta \omega_m$ 是 $m(t)$ 的带宽,则 $m_{\text{chirped}}(t) \approx m(t)$ 。在满足该条件下,(2)式可以近似表达为

$$I_{\text{out}}(t) \approx \frac{1}{|\varphi''|} \int_{-\infty}^{+\infty} dt' S(t'/\varphi'') [|m(t-t')|^2 + \sigma^2] \propto S(t/\varphi'') \otimes [|m(t)|^2 + \sigma^2]. \quad (3)$$

由(3)式可知,如果幅度噪声足够小,输入光信号功率与调制信号功率的卷积和输出光信号的功率呈正比例关系。也就是说,当输入光信号正向频谱编码与调制信号的反向时域编码完全相同,则该相关器进行自相关运算,卷积结果将产生一个很大的相关峰;当输入光信号正向频谱编码与调制信号的反向时域编码不完全相同,则该相关器进行互相关运算,其相似性越大,产生的峰值越大。

2.2 光源带宽对信噪比的影响

PM-AM 噪声是由于光源发出的光不是单一频率的光,具有一定的带宽而产生的,即光源本身存在

相位的随机变化,当相位噪声经过马赫-曾德尔调制器进行幅度调制并经 SMF 进行色散处理后,得到 PM-AM 噪声的功率谱密度表达式为^[15]

$$N_{\text{PM-AM}}(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} 4J_n \left(\frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{2\Delta\nu}{\pi}} \right) J_{n+1} \left(\frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{2\Delta\nu}{\pi}} \right) \sin \left[\frac{1}{2} (2n+1) \omega^2 \varphi'' z \right] \right\}^2, \quad (4)$$

式中 $\Delta\nu$ 表示光源的带宽, z 表示单模光纤的长度, J_n 表示第一类 n 阶贝塞尔函数。

PM-AM 噪声功率为

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} N_{\text{PM-AM}}(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega, \quad (5)$$

式中 $H(\omega)$ 为系统传递函数。图 2 为 PM-AM 噪声功率与光源带宽的关系图, N 为归一化的噪声功率谱密度。由图可知,光源的带宽越宽,产生的 PM-AM 噪声功率谱越大,从而得到的噪声功率越大。由(3)式可知,PM-AM 噪声会影响系统输出端的信号能量,噪声越大,系统输出端的信噪比越小。因此,光源带宽越宽,系统输出端的信噪比越小。此外,根据(4)式,如果满足条件 $|\Delta\omega_m^2 \varphi'' / 8| \ll \pi$, 噪声功率随着距离的增加也会线性增大。

否则编码为 0,其频谱图如图 3 所示,其中 P 为信号功率, λ 为波长,对应光源的二进制编码为 10100001。对调制信号进行二进制编码,反映在调制信号的时域波形中,如果有光脉冲,则编码为 1,否则编码为 0。进行自相关运算的调制信号的时域波形如图 4(a)所示,其中 t 表示时间,对应的二进制编码为 10000101;进行互相关运算的调制信号的时域波形如图 4(b)所示,其二进制编码为 11000100。

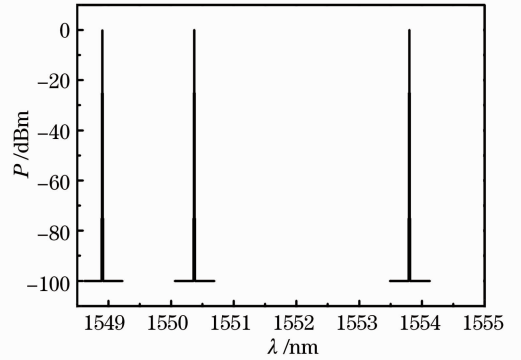


图 3 光源的频谱图

Fig. 3 Spectrum of light source

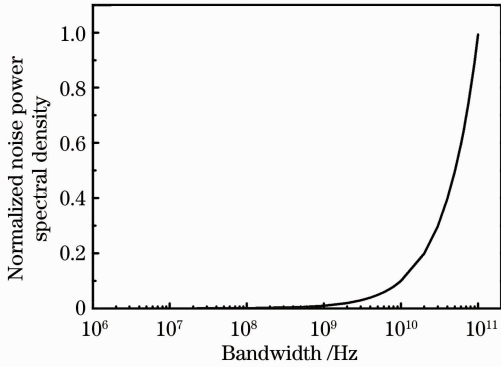


图 2 PM-AM 噪声功率与光源带宽的关系

Fig. 2 Relationship between PM-AM noise and bandwidth of light source

3 数值仿真

3.1 数字信号的相关检测

使用 Optiwave 公司的 OptiSystem 9.0 光通信系统仿真软件对不同带宽光源的光学相关器进行了仿真。采用码元速率为 10 Gb/s、位数为 8、中心波长分别为 1548.90, 1553.80, 1550.37 nm 的多波长相干光源(LD 激光)进行仿真实验。对输入的多波长光源信号进行二进制编码,反映在输入光信号的频谱图中,如果某一波长处有光信号,则编码为 1,

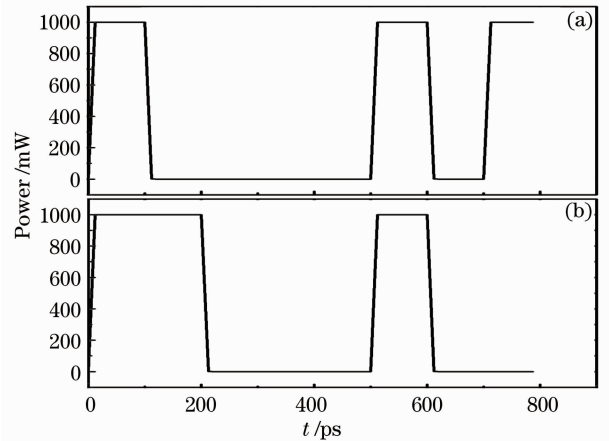


图 4 调制信号的时域波形。(a)自相关运算的时域波形;(b)互相关运算的时域波形

Fig. 4 Time domain waveforms of modulation signal. (a) Time domain waveform of autocorrelation; (b) time domain waveform of crosscorrelation

由于 LD 光源的带宽比较窄,即光源的单色性比较好,因此,LD 发出的光不需要经过处理就可以直接送入 WDM 进行合波。当光源的带宽为 10 MHz 时,基于光纤色散的光学相关器进行自相关运算和互相关运算的结果如图 5 所示,自相关运算的相关峰为 1.73 mW;互相关运算的峰值为 0.56 mW。自相关运算产生的峰值是互相关运算产生的峰值的 3.089 倍,即系统输出端的信噪比为 3.089。在应用于多位包头数据流的检测时,通过设置阈值就可以把目标信号检测出来。

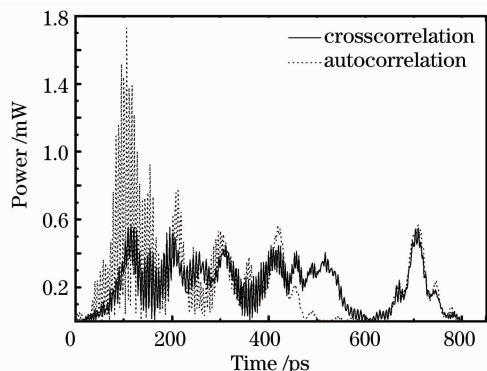


图 5 相干光源光学相关器的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of coherent light source optical correlator

在基于色散的非相干光源光学相关器的仿真中,采用的光源是发光二极管(LED)。由于 LED 是基于原子自发辐射发光,发出的光带宽比较宽。因此,需要将 LED 发出的光经过有限带宽的滤波器进行限带处理,以得到在中心频率附近近似平坦的有限带宽的脉冲频谱。采用与相干光源的光学相关器具有同样中心波长的光源与调制信号进行自相关和互相关运算。

图 6 为将滤波器的带宽设置为 1 GHz 得到的卷积结果。自相关运算的峰值为 0.692 mW,互相关运算的峰值为 0.438 mW。自相关运算产生的峰值是互相关运算产生的峰值的 1.571 倍。其系统输出端的信噪比明显小于带宽为 10 MHz 的 LD 光源的光学相关器系统输出端的信噪比。

分别对 8 位、16 位和 32 位的码元数据流进行仿真。图 7 为在半对数坐标系中的光源带宽与系统输出端信噪比关系的图像,其中三条曲线分别代表 8 位、16 位和 32 位码元在不同带宽光源下系统输出端的信噪比变化。

从图 7 可以得出结论,基于光纤色散的光学相关器的光源带宽越窄,相位噪声越小,则转化成的幅

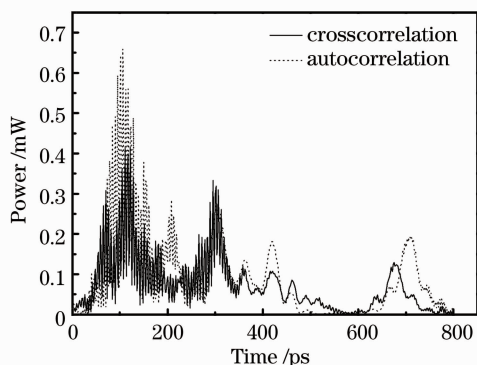


图 6 非相干光源光学相关器的仿真

Fig. 6 Simulation results of incoherent light source optical correlator

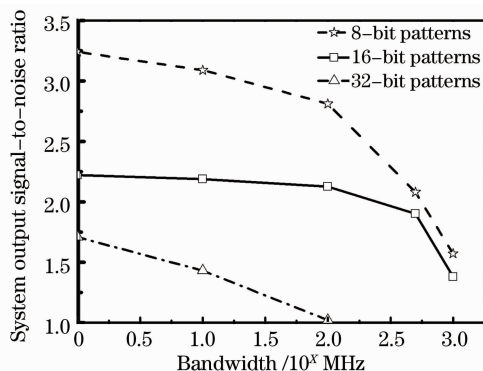


图 7 系统输出端信噪比与光源带宽的关系

Fig. 7 Relationship between system output signal-to-noise ratio and bandwidth of light source

度噪声越小,得到系统输出端的信噪比越大;反之,系统输出端的信噪比越小。并且,在相同带宽下,随着码元位数的增多,系统的信噪比也随之减小。假设以信噪比值 1.25 作为阈值^[9],当信噪比大于等于 1.25 时,匹配信号就能检测出来;反之,无法区分出自相关和互相关信号。如图 7 所示,当码元位数为 8 位和 16 位时,使用 LED 和滤波器作为光源进行相关检测可以得到较好的信噪比;而码元位数为 32 位时,只能使用 LD 作为光源进行相关检测。因此,可以得到结论,非相干光源的基于色散的光学相关器可以实现对速率为 10 Gb/s 的码元长度为 8 位和 16 位的数据流的相关检测。对 32 位的数据流的相关检测必须使用相干光源。

然而,相干光源的光学相关器只能对数字信号进行相关检测,非相干光源的光学相关器具有对模拟信号进行高速相关检测的潜在使用价值。

3.2 模拟信号的相关检测

在对模拟信号的仿真中,将多波长光源设置为具有一定形状的非相干光源。采用高斯型 LED 光

源进行仿真实验,其频谱如图 8 所示。进行自相关运算的调制信号为高斯型信号,如图 9(a)所示;进行互相关运算的调制信号采用的是正弦型信号和三角型信号,分别如图 9(b)和图 9(c)所示。

相关检测的结果如图 10 所示。如图 10(a)所示,使用高斯型调制信号进行自相关运算得到的峰值为 0.0059 mW;如图 10(b)所示,使用正弦型调制信号进行互相关运算得到的峰值为 0.0038 mW;如图 10(c)所示,使用三角型调制信号进行互相关运算得到的峰值为 0.0040 mW。进行自相关运算的峰值明显大于进行互相关运算的峰值。因此,基于非相干光源的光学相关器能实现对模拟信号的高速相关检测,这是基于窄带的激光光源的光学相关器

所不能实现的。在实际应用中,可以使用 Waveshaper 等任意波形的光滤波器将宽带光源的光谱变成需要的形状。

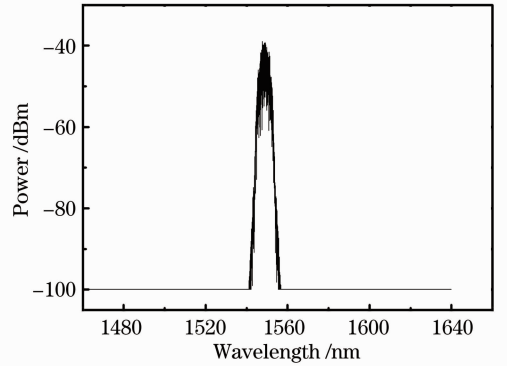


图 8 高斯型光源的频谱图

Fig. 8 Spectrum of Gaussian light source

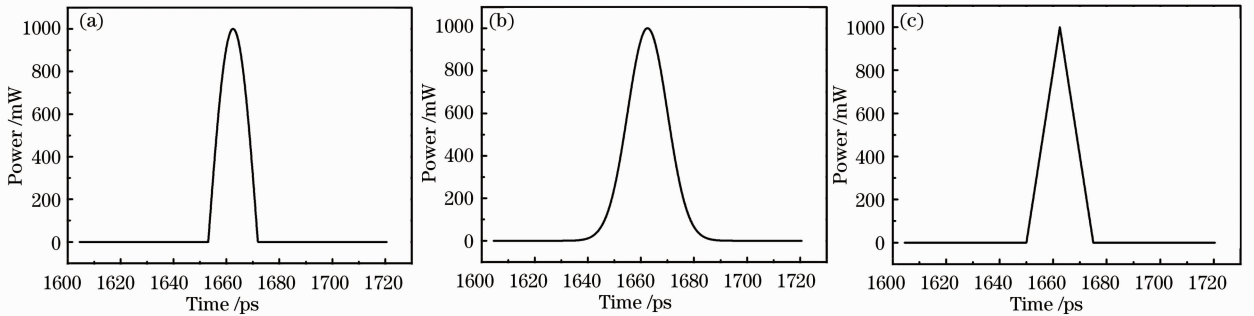


图 9 模拟调制信号的时域波形。(a)高斯型信号;(b)正弦型信号;(c)三角型信号

Fig. 9 Time domain waveforms of analog modulation signal. (a) Gaussian signal; (b) sine signal; (c) triangle signal

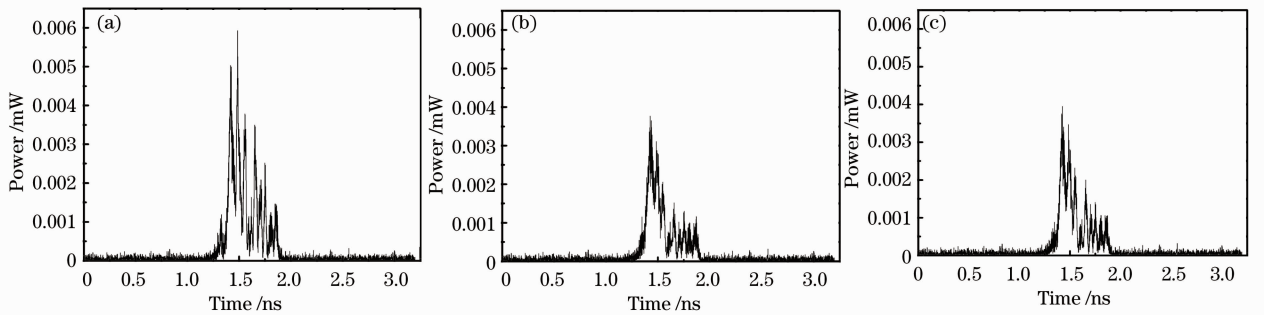


图 10 模拟信号相关检测的结果。(a)高斯型信号;(b)正弦型信号;(b)三角型信号

Fig. 10 Simulation results of analog signal correlation detection. (a) Gaussian signal; (b) sine signal; (c) triangle signal

通过理论分析和数值仿真可以总结出,LD 作为光源的基于光纤色散的光学相关器在很多方面优于 LED 作为光源的基于光纤色散的光学相关器。首先,LD 光源稳定,适合该相关器利用单模光纤的色度色散进行色散处理,因此,LD 作为光源的光学相关器系统输出信噪比较高。其次,LD 发出的光带宽比较窄,不需要经过处理可以直接进行合波,而 LED 发出的光带宽比较宽,需要经过一定带宽的滤

波器进行限带处理,因此,LD 作为光源的光学相关器使用简单、方便。但是,LD 较 LED 价格昂贵,而且,当需要进行处理的数字信号码元较长时可能需要大量的 LD,因此成本较高,而使用 LED 或放大自发辐射(ASE)光源^[16]时,只需要使用阵列波导光栅(AWG)等多波长滤波器就足够了。

基于光纤色散的光学相关器的色散是在纳米和皮秒数量级上进行量化,可以灵活调整光纤的色散

值使系统输出信噪比达到最优,改善了难以控制光纤延时线的光学相关器的延时问题。但是,基于光纤色散的光学相关器也有其缺点和不足。首先,基于光纤色散的光学相关器在对数字信号进行相关检测时需要使用多波长有限带宽的光源,对光源的要求比较严格。而相干光源和非相干光源的使用都存在各自不能克服的缺点。其次,基于光纤色散的光学相关器需要将电信号调制到带宽光源上进行检测,不能实现全光域的相关检测。

4 结 论

通过理论分析和数值仿真得出了光源带宽与基于光纤色散的光学相关器输出信噪比之间的关系。光源带宽越窄,系统输出信噪比越大;光源带宽越宽,系统输出信噪比越小。LD可以提供理想带宽的光源,但是其价格昂贵,不适合广泛使用;LED或ASE光源价格便宜,但光源带宽比较宽,即使使用滤波器进行限带处理,系统输出信噪比仍然比较小。使用非相干光源能实现10 Gb/s的8位和16位数字码元数据流的相关检测,但是对于实现更高速率更多位码元的数字数据流的相关检测还需要使用相干光源。而基于宽带的非相干光源的光学相关器的另一个潜在的应用是实现高速的模拟信号的相关检测。因此,基于光纤色散的光学相关器在光源的选择上需要综合考虑这些问题。

参 考 文 献

- 1 D F Geraghty, R Salem, M A Foster, *et al.*. All-optical packet-header recognition at 100 Gb/s using a simplified 4-*f* correlator [C]. OFC/NFOEC, 2008.
- 2 Guo Yamin, Zhang Xuping, Xie Fei, *et al.*. Characteristic research and detection scheme of gigabit passive optical network upstream optical signal [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0306003.
郭亚敏, 张旭苹, 谢 飞, 等. 千兆无源光网络上行光信号特性研究与检测方案[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0306003.
- 3 M C Cardakli, S Lee, A E Willner, *et al.*. Reconfigurable optical packet header recognition and routing using time-to-wavelength

- mapping and tunable fiber Bragg grating for correlation and decoding [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2000, 12(5): 552-554.
- 4 Mahmoud S Rasras, Inuk Kang, Mihaela Dinu, *et al.*. A programmable 8-bit optical correlator filter for optical bit pattern recognition [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(9): 694-696.
- 5 Roderick Peter Webb, Xuelin Yang, Robert J Manning, *et al.*. All-optical binary pattern recognition at 42 Gb/s [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(13): 2240-2245.
- 6 Wu Chongqing. Study on fiber-delay-line-based buffer [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900116.
吴重庆. 光纤延迟线型全光缓存器的研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900116.
- 7 Robert A Minasian. Photonic signal processing of high-speed signals using fibre gratings [J]. Optical Fiber Technology, 2000, 6(2): 91-108.
- 8 Jong-Dug Shin, Min-Yong Jeonand, Cheoul-Shin Kang. Fiber-optic matched filters with metal films deposited on fiber delay-line ends for optical packet address detection [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(7): 941-943.
- 9 Yongwoo Park, José Azaña. Optical signal processors based on a time-spectrum convolution [J]. Opt Lett, 2010, 35(6): 796-798.
- 10 C Dorrer. Temporal van Cittert-Zernike theorem and its application to the measurement of chromatic dispersion [J]. J Opt Soc Am B, 2004, 21(8): 1417-1423.
- 11 Yongwoo Park, José Azaña. Ultrafast photonic intensity integrator [J]. Opt Lett, 2009, 34(8): 1156-1158.
- 12 Sang Hyup Kim, Keisuke Goda, Ali Fard, *et al.*. Optical time-domain analog pattern correlator for high-speed real-time image recognition [J]. Opt Lett, 2011, 36(2): 220-222.
- 13 Muhsen Aljada, Kamal E Alameh. Integrated 10 Gb/s AWG-based correlator for multi-wavelength optical header recognition [J]. Opt Express, 2008, 16(7): 5150-5157.
- 14 Nikola Alic, Magnus Karlsson, M. Sköld, *et al.*. Joint statistics and MLSD in filtered incoherent high-speed fiber-optic communications [J]. J Lightwave Technol, 2010, 10(8): 1546-1572.
- 15 Shu Yamamoto, Noboru Edagawa, Hidenori Taga, *et al.*. Analysis of laser phase noise to intensity noise conversion by chromatic dispersion in intensity modulation and direct detection optical-fiber transmission [J]. J Lightwave Technol, 1999, 11(2): 1716-1722.
- 16 Lin Hao, Zhou Jun, Yan Cheng'en, *et al.*. Properties of fluorescence spectra and amplified spontaneous emission of the dye-doped film based on quasi-waveguide structure [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0631003.
林 豪, 周 骏, 颜承恩, 等. 准波导结构下染料薄膜的荧光光谱和放大自发辐射光谱特性 [J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0631003.

栏目编辑: 王晓瑛