

基于相位调制和线性滤波的多信道 多功能光学微分器*

罗博文 董建绩[†] 王晓 黄德修 张新亮

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

(2011年6月9日收到; 2011年9月5日收到修改稿)

多功能微分器可以满足光计算和光信号处理中的多种需求, 增强灵活性. 本文从理论上推导了一种基于相位调制和线性滤波的多功能光学微分器. 并在实验中, 将传输谱线近似为线性的光纤延时干涉仪 (DI) 和相位调制器级联, 得到了输入信号的两种微分结果. 通过调节 DI 的驱动电压调节其传输谱的漂移, 当光载波位于 DI 的传输谱线的谷值, 则获得信号的光场微分, 当光载波位于 DI 传输谱的线性斜率处, 则得到输入信号的光强微分. 通过分析各种微分的平均误差, 发现 DI 的线性度越高, 平均误差越小. 同时基于 DI 传输谱线的梳状特性, 证实了多信道信号的同时微分.

关键词: 相位调制, 线性滤波, 光学微分器, 多信道信号处理

PACS: 42.65.-k, 42.79.Sz, 42.81.-i

1 引言

近年来, 光学微分器在光计算和超快光信号处理中具有广泛应用价值而受到越来越多的关注^[1-5]. 而目前的光学微分器的设计和实现仅仅是未来光子计算电路中一个基础关键技术, 它可以克服电子瓶颈效应, 有望取代传统的电子回路.

根据光学微分操作中输入、输出信号的映射关系可以将光学微分器分成四类, 用数学公式分别表示为

$$A_{\text{out}}(t) = \frac{\partial A_{\text{in}}(t)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$P_{\text{out}}(t) = \frac{\partial P_{\text{in}}(t)}{\partial t}, \quad (2)$$

$$P_{\text{out}}(t) = \frac{\partial A_{\text{in}}(t)}{\partial t}, \quad (3)$$

$$A_{\text{out}}(t) = \frac{\partial P_{\text{in}}(t)}{\partial t}, \quad (4)$$

其中 P 和 A 分别表示为光强度和光场复包络, 满足 $P = |A|^2$, 下标 in 和 out 分别表示输入和输出信号. 目前大部分微分器的研究集中在前两类微分器,

即方程 (1) 表示的光场微分和方程 (2) 表示的光强微分. 其中第一类微分器在超短脉冲源产生^[3,6] 和奇对称厄米高斯波形产生^[2] 方面具有良好的应用, 而第二类微分器主要应用于超宽带微波通信^[7-9]. 实际上方程 (4) 和方程 (1) 具有同样的功能, 它使得输入信号的微分作用在输出信号的光场上, 也可命名为“光场微分”. 方程 (2) 描述的微分操作作用在光强上, 因此命名为“光强微分”. 目前, 光场微分的实现方法有利用光纤布拉格光栅 (FBG)^[10,11], 长周期光纤光栅^[2,4], 干涉仪^[12], 半导体光放大器 (SOA)^[6] 和硅基微环谐振器^[13] 等, 而光强微分则可以利用 SOA^[8], 非相干光子处理器^[14] 和高非线性光纤^[7] 等. 但是目前并没有同时实现光场微分和光强微分的报道, 这种多功能微分器可以满足光计算和光信号处理中的多种需求, 可以简化系统和增强灵活性.

综合上述因素, 我们将相位调制器和光纤延时干涉仪 (DI) 相结合, 提出了一种多信道多功能的光学微分器, 当信号光波长分别位于 DI 传输谱的谷值和线性斜率处, 分别获得输入信号的光场微分和

* 国家自然科学基金 (批准号: 60901006), 国家 973 计划 (批准号: 2011CB301704) 和中央高校基础研究基金 (批准号: HUST 2010QN033) 资助的课题.

[†] E-mail: jjdong@mail.hust.edu.cn

光强微分信号, 而无需改变系统装置. 由于 DI 传输谱的周期性, 该微分器可以用于多信道处理, 并从实验上证实了四信道微分器的可行性.

2 工作原理

基于相位调制器 (PM) 和 DI 的多功能光学微

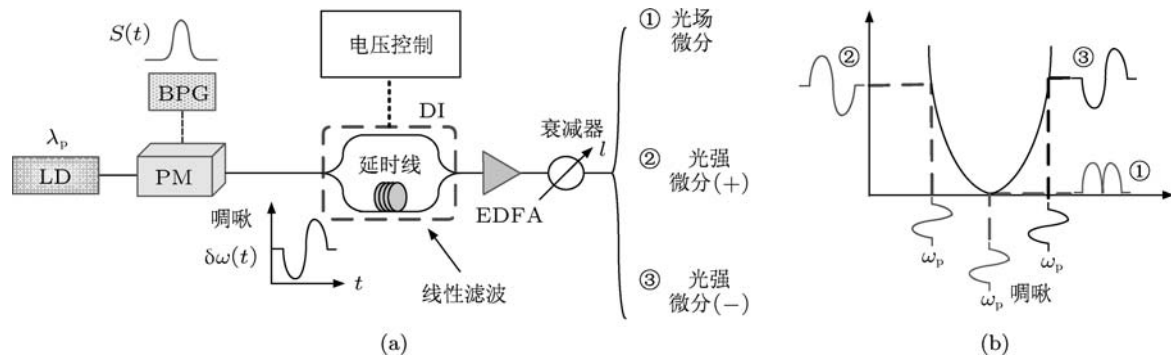


图 1 基于相位调制器和 DI 的光学微分器原理示意图 (a) 工作示意图; (b) DI 传输频谱分布图

然后调制光输入到 DI 中, 文献 [12] 证明 DI 的传输频谱在其谷值附近可以近似为线性, 其传递函数可以写为

$$H(\omega) = k(\omega - \omega_0), \quad (6)$$

其中 ω_0 为传输频谱对应谷值的角频率, ω 为输入频率, k 是滤波器线性系数. 经过 DI 后的输出信号光场在频域可以表示为 $A_{out}(\omega) = H(\omega)A_{in}(\omega)$, 利用反傅里叶变换求解 DI 的输出光功率为

$$P_{out}(t) = k^2 P_0 (\omega_p - \omega_0)^2 + k^2 P_0 \beta^2 \left[\frac{\partial s(t)}{\partial t} \right]^2 - 2k^2 P_0 \beta (\omega_p - \omega_0) \frac{\partial s(t)}{\partial t}. \quad (7)$$

记 $k^2 P_0 (\omega_p - \omega_0)^2 = \tau$, 显然 τ 为一定值, 它表征输出的直流分量.

当信号波长在 DI 传输谱的谷值附近, 即 $\omega_p - \omega_0 \rightarrow 0$, 此时 (7) 式右边第三项可以忽略, 输出功率可以近似写为

$$P_{out}(t) \approx k^2 P_0 \beta^2 \left[\frac{\partial s(t)}{\partial t} \right]^2. \quad (8)$$

这里定义 $\left[\frac{\partial s(t)}{\partial t} \right]^2$ 这种形式为输入信号的光场微分, 因为输出光功率为输入信号微分的平方.

当信号波长位于 DI 传输谱的线性斜率处, 则 (7) 式右边第二项远小于右边第三项, 此时 (7)

微分器工作原理如图 1(a) 所示, 相位调制器由比特眼图发生器 (BPG) 产生的电信号 $s(t)$ 驱动, 中心波长为 λ_p 的激光经过相位调制器后, 它的光场分布为

$$A_{in}(t) = \sqrt{P_0} \exp[j\omega_p t - j\beta s(t) + j\Phi_0], \quad (5)$$

其中, ω_p 为输入光的中心角频率, P_0 和 Φ_0 为输入光的初始功率和初始相位, β 为相位调制系数.

式中第二项可以忽略, 输出功率可以近似写为

$$P_{out}(t) = \tau - 2k^2 P_0 \beta (\omega_c - \omega_0) \frac{\partial s(t)}{\partial t}. \quad (9)$$

这里定义 $\frac{\partial s(t)}{\partial t}$ 这种形式为输入信号的光强微分, 因为输出信号光功率为输入信号的微分.

若 $\omega_p - \omega_0 < 0$, 则输出为正向的光强微分, 记为光强微分 (+); 若 $\omega_p - \omega_0 > 0$, 则输出为反向的光强微分, 记为光强微分 (-). 图 1(b) 显示了各种形式的微分对应的输入频谱与线性滤波器传输频谱的关系.

3 实验结果和讨论

文献 [12] 证明双光束的干涉仪在其幅度谱谷值附近可视为一个线性滤波器. 实验中使用基于光纤的延时干涉仪, 其幅度谱和相位谱如图 2 所示. 该延时干涉仪的自由光谱范围 (FSR) 为 40 GHz, 插入损耗约为 5 dB, 隔离度为 15 dB. 其相位谱在谷值发生了 π 相移跳变, 而在谷值的两侧相位的变化量则远小于 π , 同时理想的线性滤波器的功率谱如虚线所示, 可以看出在滤波器的谷值附近两者符合较好, 因此该延时干涉仪可近似认为是一个线性滤波器.

基于相位调制和线性滤波的光学微分器实验

装置如图 3 所示. 由四个可调谐激光器 TLD_1 — TLD_4 组成的可调谐激光器阵列作为实验装置的光源. 首先仅开启 TLD_1 , 激光光波的中心波长为 1564.17 nm. 光波经掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后进入 PM. 此时 PM 的驱动信号为 BPG 产生的工作速率为 40 Gbit/s 的归零码 (RZ) 信号, 得到电域波形如图 4 中 R_0 所示. 调制的光波经过 DI 解调. 该 DI 的输出谱漂移由电压精确控制, 调节电压可以使 DI 的输出谱左右移动, 在一定电压下, 其传输光谱不会受到外界温度等环境因素的影响. 当输入信号的峰值波长恰好对准 DI 传输光谱的谷值, 如图 5 中 Q_1 所示, 其输出波形为归零码信号的光场微分, 其输出波形如图 4 中 R_1 所示, 输入信号波长和 DI 谷值对准有两种方法, 调节 DI 的控制电压或者调节激光器波长. 目前商用可调激光器波长的步进可以达到 1 pm, 而调节 DI 的电压同样可以达到精确控制, 因此稳定性得到保证. 随后改变 DI 的控制电压, 使 DI 的传输光谱分别红移 0.043 nm 和蓝移 0.051 nm, 可得到归零码信号的光强微分 (+) 和光强微分 (-), 如图 4 中 R_2 和 R_3 所示, 图 5 中 Q_2

和 Q_3 为对应的输入光谱与 DI 传输光谱间的相对关系, 其中实线为信号光谱, 虚线为 DI 的传输谱. 另外从图 4 可以看出, 微分输出信号波形相比于原始输入脉冲, 存在不同程度的脉冲展宽, 这主要是因为高频处 DI 的实际幅度响应小于理想线性滤波器的幅度响应 (如图 2 所示), 故高频分量相对被抑制, 导致信号展宽. 如果换用更高重复频率的 DI, 则可以拓宽微分器的工作带宽, 但这将导致滤波器的线性系数变小, 致使输出功率下降.

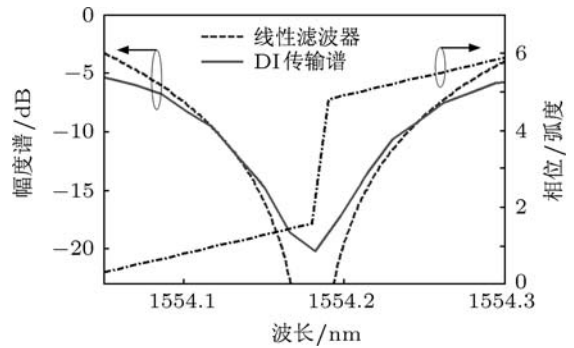


图 2 延时干涉仪的幅度和相位谱特性

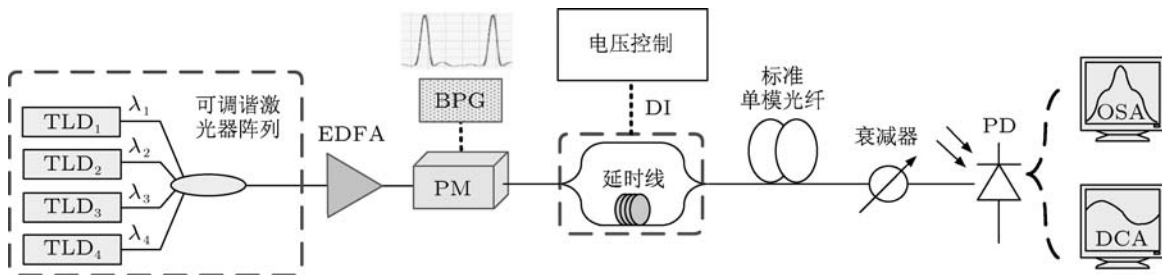


图 3 基于相位调制器和 DI 的光学微分器实验装置图

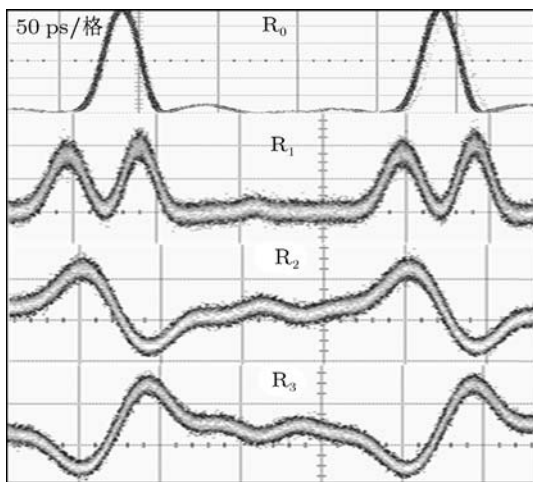


图 4 输入信号为 RZ 信号对应的微分结果波形图, R_0 为输入 RZ 信号的波形, R_1 为光场微分的输出波形, R_2 和 R_3 为光强微分 (+) 和光强微分 (-) 的波形

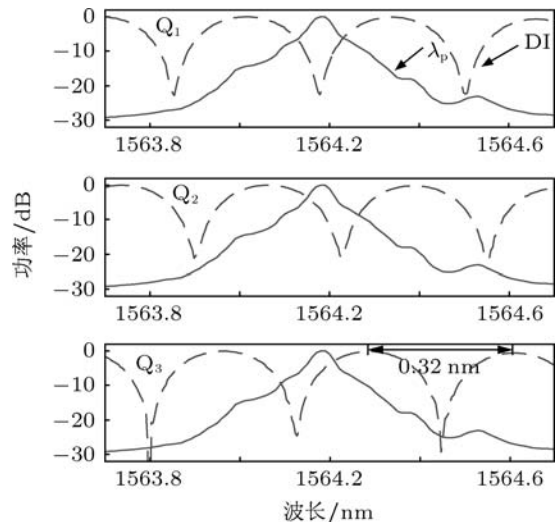


图 5 输入信号光谱与 DI 传输光谱的相对关系 (Q_1 : 光场微分, Q_2 : 光强微分 (+), Q_3 : 光强微分 (-))

将 BPG 的输出信号变更为 $2^7 - 1$ 伪随机序列的非归零码 (NRZ), 调整工作速率至 10 Gbit/s 和 20 Gbit/s, 并调整 DI 的控制电压, 可以得到伪随机 NRZ 信号的所有形式微分结果, 输出波形如图 6 所示. 其中 A_1 和 A_3 为 BPG 输出的 NRZ 的电域波形, 工作速率分别为 10 Gbit/s 和 20 Gbit/s. M_f 和 M_i 为实际测得的 NRZ 信号的光场微分波形和光强微分波形. C_f 和 C_i 为计算得到的 NRZ 信号的光场微分波形和光强微分波形. 由图 6 可知, 实测结果与计算结果比较符合.

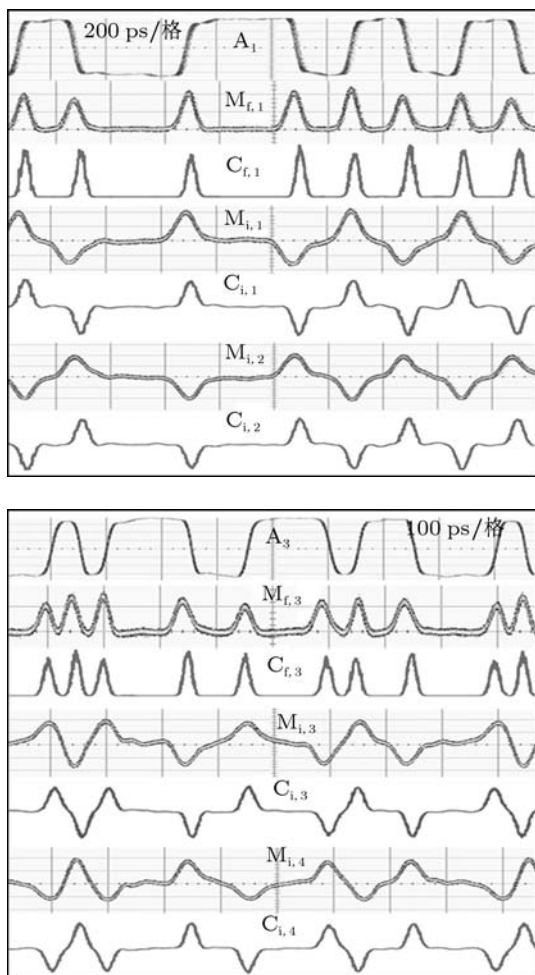


图 6 输入信号为伪随机 NRZ 信号的各种微分结果, A_1 和 A_3 为输入 NRZ 信号波形图, 工作速率分别为 10 Gbit/s 和 20 Gbit/s, M_f 和 M_i 为实际测得的 NRZ 信号的光场微分波形和光强微分波形. C_f 和 C_i 为计算测得到得 NRZ 信号的光场微分波形和光强微分波形

为了定量分析实际测量值与理论计算值之间的符合程度, 可计算实际测量值与理论计算值之间的平均误差, 其表达式为

$$\text{Error} = \frac{1}{T} \int_0^T |P_c(t) - P_m(t)| dt, \quad (10)$$

其中 T 为输入信号的周期, $P_c(t)$ 为归一化的理论

计算值, $P_m(t)$ 为归一化的实际测量值. 值得注意的是, 计算光强微分的误差时 $P_c(t) = \partial s_m(t)/\partial t$, 其中 $s_m(t)$ 表示测量的输入波形. 而对于光场微分而言, $P_c(t) = |\partial s_m(t)/\partial t|^2$. $P_m(t)$ 始终是测量的微分结果输出光功率. 图 7 给出了 NRZ 信号的各种形式微分的平均误差. 当工作速率分别为 5 Gbit/s, 10 Gbit/s 和 20 Gbit/s 时, NRZ 信号的光场微分的平均误差分别为 0.0374, 0.0562 和 0.1297, 光强微分 (+) 的平均误差分别为 0.0735, 0.1267 和 0.1948, 光强微分 (-) 的平均误差分别为 0.0932, 0.1463 和 0.1757. 由图 7 可知, 当工作速率较低时, 平均误差相对较小, 这是因为此时输入信号的谱宽相对较窄, 与之对应的 DI 传输光谱的线性近似程度更高. 在工作速率一定的情况下, 光场微分相比于光强微分, 其误差较小, 这主要是因为强度微分方程 (9) 存在一定的近似.

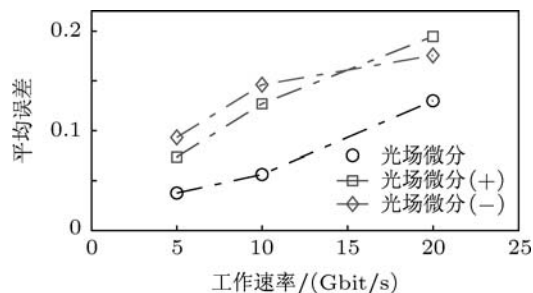


图 7 不同工作速率下, 各种形式微分的平均误差

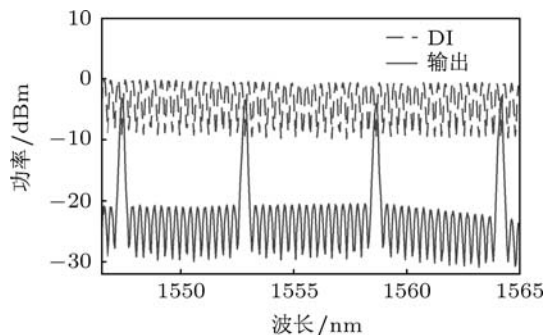


图 8 系统为多信道输入, DI 输出信号的光谱图

基于 DI 传输光谱的梳状特性, 该装置可以实现多信道同时微分的功能. 同时开启激光器阵列中的四个激光器作为四个信道同时输入系统, 其激光射光波的中心波长依次为 1547.41 nm, 1552.86 nm, 1558.64 nm 和 1564.18 nm. 调整 BPG 的输出信号为 RZ 格式, 工作速率为 20 Gbit/s. 此时测得 DI 的输出信号的光谱如图 8 所示. 从图 8 中可以看出, 四个信道的中心波长均对准 DI 传输光谱的谷值,

输出的结果为 RZ 信号的光场微分. 输出光波经过一段长为 2 km 的标准单模光纤后被光电探测器接收. 单模光纤的色散系数为 17 ps/(km/nm), 由于群速度色散效应, 各个不同波长的信号在时域上展开, 于是示波器探测到的系统输出波形如图 9 中 S_1 所示. 通过改变 DI 的控制电压, 可以使得 DI 的传输谱线红移和蓝移, 分别得到多信道信号的光强微分 (+) 和光强微分 (-), 其波形如图 9 中 S_2 和 S_3 所示. 这验证了本方案实现多信道同时微分的可行性.

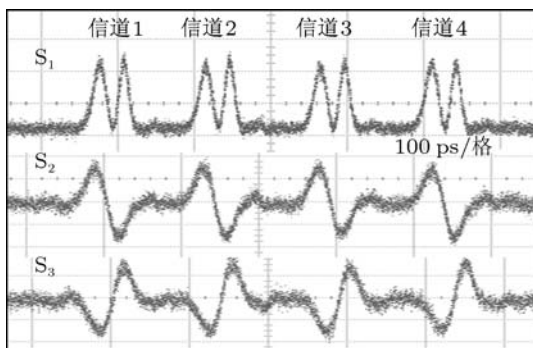


图 9 系统为多信道输入, 系统输出信号的波形图, S_1 为信号的光场微分波形, S_2 为信号的光强微分 (+) 波形, S_3 为信号的光强微分 (-) 波形

值得注意的是, 虽然本实验只实现了两种微分器的一阶微分功能, 但是基于本方案可以进行拓展和改进, 实现高阶微分. 对于高阶的光强微分, 可以利用多波长激光器输出多个不同的波

长, 利用 DI 的正、负线性斜率实现强度微分 (+) 和强度微分 (-), 然后通过有限时域差分的方式得到高阶微分. 例如实验装置图 3 中波长 λ_1 经过 DI 解调后得到了正的一阶微分 $\partial s(t)/\partial t$, 同时波长 λ_2 解调后得到了负的一阶微分 $-\partial s(t)/\partial t$, 然后通过对这两路波长的延时相加得到的输出波形为 $\Delta t \frac{\partial s(t+\Delta t)/\partial t - \partial s(t)/\partial t}{\Delta t}$, 当 Δt 足够小时可以近似为 $\Delta t \frac{\partial^2 s(t)}{\partial t^2}$, 即得到二阶微分. 而对于二阶光场微分, 也可以通过级联两个相同的 DI 获得, 因为两个级联的 DI 的系统函数在其谷值处近似为 $(j\omega)^2$. 通过理论计算可以证明, 当载波位于 DI 的谷值时输出光场为输入光场的二阶微分.

4 结论

本文通过理论推导和实验论证了利用相位调制器级联 DI 获得输入信号的光场微分和光强微分. 通过理论分析和实验结果得到了不同微分形式下输入信号的光谱与 DI 传输光谱间的对应关系, 并计算了各种微分形式的平均误差, 结果表明在低工作速率下的结果与理论值更接近. 同时基于 DI 的梳状谱特性, 实现了多信道信号的光场微分和光强微分.

- [1] Zhao C, Zhang X L, Dong J J, Hang D X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4150 (in Chinese) [赵焯, 张新亮, 董建绩, 黄德修 2006 物理学报 **55** 4150]
- [2] Slavik R, Park Y, Kulishov M, Morandotti R, Azana J 2006 *Opt. Express* **14** 10699
- [3] Dong J J, Zhang X L, Fu S N, Shum P, Huang D X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2250 (in Chinese) [董建绩, 张新亮, 付松年, 沈平, 黄德修 2007 物理学报 **56** 2250]
- [4] Slavik R, Park Y, Kulishov M, Azana J 2009 *Opt. Lett.* **34** 3116
- [5] Dong J J, Zhang X L, Wang Y, Huang D X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2222 (in Chinese) [董建绩, 张新亮, 王阳, 黄德修 2008 物理学报 **57** 2222]
- [6] Li Z, Wu C 2009 *Opt. Lett.* **34** 830
- [7] Velanas P, Bogris A, Argyris A, Syvridis D 2008 *Lightwave Technology, Journal* **26** 3269
- [8] Dong J, Zhang X, Xu J, Shum P, Huang D 2007 *Optics Letters* **32** 1223
- [9] Yao J 2009 *IEEE Microwav. Mag* **10** 82
- [10] Rivas L M, Singh K, Carballar A, Azana J 2007 *Photonics Technology Letters, IEEE* **19** 1209
- [11] Li M, Janner D, Yao J, Pruneri V 2009 *Opt. Express* **17** 19798
- [12] Park Y, Azana J, Slavik R 2007 *Opt. Lett.* **32** 710
- [13] Liu F, Wang T, Qiang L, Ye T, Zhang Z, Qiu M, Su Y 2008 *Opt. Express* **16** 15880
- [14] Yongwoo P, Asghari M H, Helsten R, Azana J 2010 *Photonics Journal, IEEE* **2** 1040

Multi-channel multifunctional optical differentiator based on phase modulation and linear filtering*

Luo Bo-Wen Dong Jian-Ji[†] Wang Xiao Huang De-Xiu Zhang Xin-Liang

(School of Optoelectronics Science and Technology Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 9 June 2011; revised manuscript received 5 September 2011)

Abstract

Multifunctional photonic differentiation is robust in optical computing and optical signal processing. We theoretically propose a multifunctional optical differentiator based on phase modulation and linear filtering. We also experimentally demonstrate two kinds of differentiators by using a phase modulator cascaded a fiber delay interferometer (DI) whose transmission spectrum is approximately linear. Difference between the two differentiators relies on whether the differentiated signals are formed by the optical intensity or the optical field of the output signal, which in turn depends on the relative shift between the signal wavelength and the closest notches of a linear filter. We also show the average errors of all kinds of differentiations and results show that the increase of the degree of linearity of the transmission spectrum of the DI will reduce the average error. Moreover, we demonstrate multi-channel multifunctional differentiation due to the comb spectrum of the DI.

Keywords: phase modulation, linear filtration, optical differentiator, multi-channel signal processing

PACS: 42.65.-k, 42.79.Sz, 42.81.-i

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB301704), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60901006), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (HUST: No. 2010QN033).

[†] E-mail: jjdong@mail.hust.edu.cn