

doi:10.3788/gzxb20164509.0906002

光纤光栅马赫-曾德干涉仪条纹信号的傅里叶分析

陈海云^{a,b}, 陈成^c, 彭保进^{a,b}, 黄秋萍^c

(浙江师范大学 a 信息光学研究所; b 浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室;

c 数理与信息工程学院, 浙江 金华 321004)

摘 要: 基于长周期光纤光栅马赫-曾德干涉仪的频分复用技术是实现光纤多参量传感的重要途径. 研究了频分复用中复合条纹信号的傅里叶处理方法, 分析了傅里叶频谱中和频与差频信号的幅值与单个干涉条纹信号的关系, 提出了抑制和频与差频信号的有效方法, 即改变光栅结构参量适当降低中心波长处的条纹对比度以提高频谱信号的信噪比, 增加特征频谱滤波的有效性. 结果表明: 经过优化调整的傅里叶频谱信噪比可以提高至原来的 2 倍以上; 对比频谱调整后恢复相位的余弦曲线与原条纹信号发现, 频谱信噪比提高的同时保留了反映各单个原条纹特征的足够相位信息. 该光谱优化方法可为基于光纤光栅马赫-曾德干涉仪和频分复用的光纤多参量传感技术提供理论与技术指导.

关键词: 光纤光学; 级联长周期光纤光栅; 马赫-曾德干涉; 对比度; 相位

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)09-0906002-6

Fourier Analyses for Fringe Signals of Fiber Grating Based on Mach-Zehnder Interferometer

CHEN Hai-yun^{a,b}, CHEN Cheng^c, PENG Bao-jin^{a,b}, HUANG Qiu-ping^c

(a *Institute of Information Optics*, b *Key Laboratory of Optical Information Detection and Display Technique in Zhejiang Province*, c *College of Mathematics, Physics and Information Engineering*, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract: Frequency division multiplexing based on long-period fiber grating Mach-Zehnder Interferometer (MZI) is an important way to implement fiber multiparameter sensing. The Fourier method for the composite fringes in frequency division multiplexing was investigated, with emphasis on the relationship between the value of different frequency and sum frequency in the Fourier frequency spectra and the structural parameters of the single grating in fiber MZI and then, an effect method for depressing the different and sum frequencies was proposed. The results show that the signal to noise ratio can be effectively improved by properly selecting the grating structural parameters to reduce the fringe contrast at central wavelength to a certain extent, which improves the effectiveness of filtering in frequency domain. After adjustment and optimization, the signal noise ratio of the frequency spectrum is doubled comparing to the original value. A comparison between the cosine curves of recovered phases and the original fringes confirms that the tuned frequency spectra remain sufficient phase information that characterize the original fringes. The spectrum optimization method developed in this paper can provide theoretical and technical guidance for multiparameter sensing based on fiber grating MZI and frequency division multiplexing.

Key words: Fiber optics; Cascaded long-period fiber grating; Mach-Zehnder interference; Contrast; Phase

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.2340; 060.3738

基金项目: 浙江省自然科学基金 (No. Y15F050012)、浙江省教育厅科研项目 (No. Y201534206)、浙江师范大学博士启动基金 (No. ZC304014028) 和浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室开放基金项目资助

第一作者: 陈海云 (1977-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光纤光栅传感理论与技术、光电检测技术. Email: chy@zjnu.cn

收稿日期: 2016-03-14; **录用日期:** 2016-06-03

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

长周期光纤光栅 (Long-Period Fiber Grating, LPFG) 能够将纤芯模耦合到同向传输的包层模, 从而在透射谱中留下分立的多个损耗峰, 具有良好的带阻光谱特性. 同时, 包层模易受环境影响而导致损耗峰移动, 因此, LPFG 被广泛应用于光纤通信和传感领域^[1-2]. 级联长周期光纤光栅 (Cascaded Long-Period Fiber Grating, CLPFG) 由两个相同结构的 LPFG 间隔一定长度光纤构成, 形成光纤光栅马赫-泽德干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI)^[3]. CLPFG 具有更精细的条纹谱线, 用于传感时, 除了 LPFG 本身对被测参量的响应外, 充当干涉臂的间隔光纤段会引入附加相移, 因而具有比单个 LPFG 更高的灵敏度, 已成为应用广泛的高灵敏光纤传感器件^[3-6].

多参量传感是光纤光栅传感技术中的一个重要课题. 基本思路是利用单个光栅光谱中不同谐振峰对不同参量的响应灵敏度差异, 通过差分调制实现对两个参量的区分和测量^[7], 或者是设计特殊光栅结构通过光纤和光栅本身特性区分不同参量的响应^[8]. R. P. Murphy 等提出了一种基于 CLPFG 和频分复用的多参量传感技术^[9], 利用间隔光纤长度不同的 CLPFG 产生不同频率的条纹信号, 对系统输出复合条纹信号进行傅里叶变换, 通过频域滤波获得各 CLPFG 的特征频谱, 并进行逆傅里叶变换得到各自的相位信息, 用以表征不同参量的响应. 频分复用系统原理和结构简单, 为光纤多参量传感技术的发展提供了新的思路. 在频分复用技术中, 对复合条纹信号的傅里叶处理至关重要. 由于两个相邻 CLPFG 之间不存在模式干涉, 因此输出复合条纹信号是各个 CLPFG 条纹信号的算术迭加, 经傅里叶变换得到的频谱信号中除了特征频谱之外, 还存在和频与差频信号, 这些信号将直接影响特征频谱的有效提取. 因此, 如何抑制复合频谱中的和频与差频信号以提高频域滤波的有效性是频分复用技术中的一个重要问题.

本文研究了基于光纤光栅 MZI 的频分复用技术中复合条纹信号的傅里叶处理方法, 分析了傅里叶频谱中和频与差频信号的幅值与单个 CLPFG 条纹信号的关系, 以期找到抑制复合频谱中和频与差频信号的有效方法, 从而优化频分复用技术中光谱信号处理. 研究结果有望为基于频分复用的光纤光栅多参量传感技术提供理论基础与技术指导.

1 CLPFG 条纹信号的傅里叶处理

级联长周期光纤光栅结构如图 1, 两个相同结构的 LPFG 在同一光纤中形成级联结构, 两光栅之间的间隔光纤长度为 S . 纤芯中传输的基模经过 LPFG₁ 时,

部分被耦合到包层中形成包层模, 并沿光纤包层传播, 当经过 LPFG₂ 时部分包层模被重新耦合回纤芯中而再次成为纤芯模. 由于包层模与纤芯模的有效折射率不同, 由包层模重新耦合回纤芯而形成的芯模与由纤芯传输而来的剩余芯模之间存在相位差, 两者在纤芯中相遇时发生模式干涉. 由于相位差随波长呈周期性变化, 因而在输出谱中形成周期性的干涉条纹. 在 LPFG 构成的光纤光栅 MZI 中, 经过光栅耦合的纤芯模和包层模光强本身是波长的函数, 因此, 干涉条纹除相位差引起的周期性调制之外, 条纹的幅度亦随波长变化, 即存在一个包络, 如图 2, 其中点划线为级联结构中单个 LPFG 的透射谱.

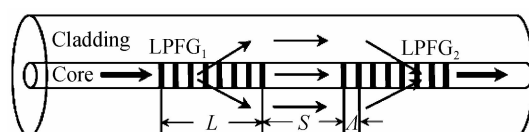


图 1 CLPFG 结构示意图
Fig. 1 Schematic of CLPFG

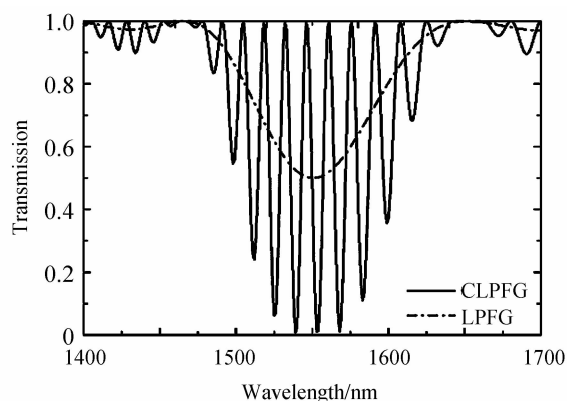


图 2 CLPFG 的典型干涉条纹
Fig. 2 Typical fringe of CLPFG

光纤光栅 MZI 中的模式干涉表示为^[10]

$$I = I_{co} + I_{cl} + 2\sqrt{I_{co}I_{cl}} \times \cos \phi \quad (1)$$

式中 I_{co} 和 I_{cl} 分别表示纤芯模与包层模的光强度, ϕ 为纤芯模与包层模之间的相位差. 为方便后续对条纹干涉信号的傅里叶处理, 干涉条纹表示成更一般的形式, 即

$$g(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \times \cos [\phi(\lambda)] \quad (2)$$

$$a(\lambda) = I_{co} + I_{cl}, b(\lambda) = 2\sqrt{I_{co}I_{cl}} \quad (3)$$

根据欧拉公式, 式(2)可进一步被改写为

$$g(\lambda) = a(\lambda) + c(\lambda) + c^*(\lambda) \quad (4)$$

$$c(\lambda) = \frac{1}{2}b(\lambda) \exp [j\phi(\lambda)] \quad (5)$$

式中, j 为虚数单位, 上角标“*”表示复共轭. 对式(4)作傅里叶变换可得

$$G(\omega) = A(\omega) + C(\omega) + C^*(\omega) \quad (6)$$

式中, 大写字母表示与式(4)相对应的傅里叶频谱, ω 为角频率. 对于离散的条纹光谱信号, 可用 Matlab 自

带的 FFT 函数作快速傅里叶变换,并用 fftshift 函数使零频位于频谱中心位置显示.图 2 所示条纹的傅里叶频谱如图 3(a)所示, $C(\omega)$ 和 $C^*(\omega)$ 对称地分布于零频两侧, $C(\omega)$ 在频域的位置反映了条纹的频率信息.

$C(\omega)$ 和 $C^*(\omega)$ 均包含了条纹的相位信息,可任选其一进行逆傅里叶变换^[11],如选 $C(\omega)$,则滤去 $A(\omega)$ 与 $C^*(\omega)$,滤波后的特征频谱如图 3(b).对 $C(\omega)$ 作逆傅里叶变换可得复数 $c(\lambda)$,对式(5)取对数形式可得

$$\ln[c(\lambda)] = \ln\left[\frac{1}{2}b(\lambda)\right] + j\phi(\lambda) \quad (7)$$

取式(7)中的虚部即可得到条纹的相位分析函数 $\phi(\lambda)$.由逆傅里叶变换性质可知,利用 Matlab 中 IFFT

函数得到的相位处于 $[-\pi, \pi]$ 区间,是不连续的包裹相位,如图 3(c).因此,所得的相位必须进行解包裹处理^[11],图 3(d)为经解包裹后得到的连续相位分布 $\phi_c(\lambda)$.在传感应用中,被测量的变化将引起条纹的移动,并引起相位变化,因而条纹相位信息同样可以表征被测量.图 3(e)为 $\cos \phi_c$ 与原条纹图谱的对比,两者的周期性完全一致,由此可知, ϕ_c 真实反映了原干涉条纹的相位信息,同时也印证了上述 CLPFG 条纹傅里叶处理方法的正确性.

不同间隔光纤长度 S 的 CLPFG 频谱如图 4(a),随着 S 的增大,特征频谱逐渐远离零频位置.因此,当

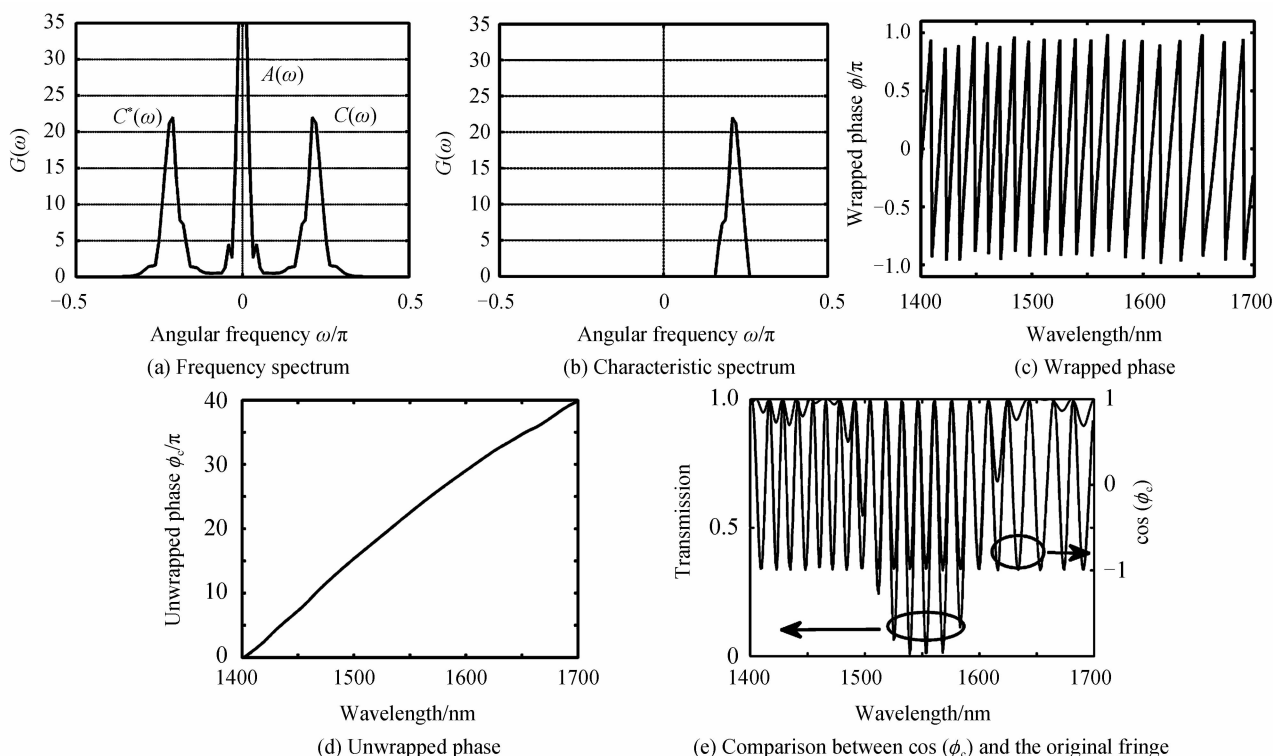


图 3 CLPFG 条纹的傅里叶处理
Fig. 3 Fourier processing for CLPFG fringe

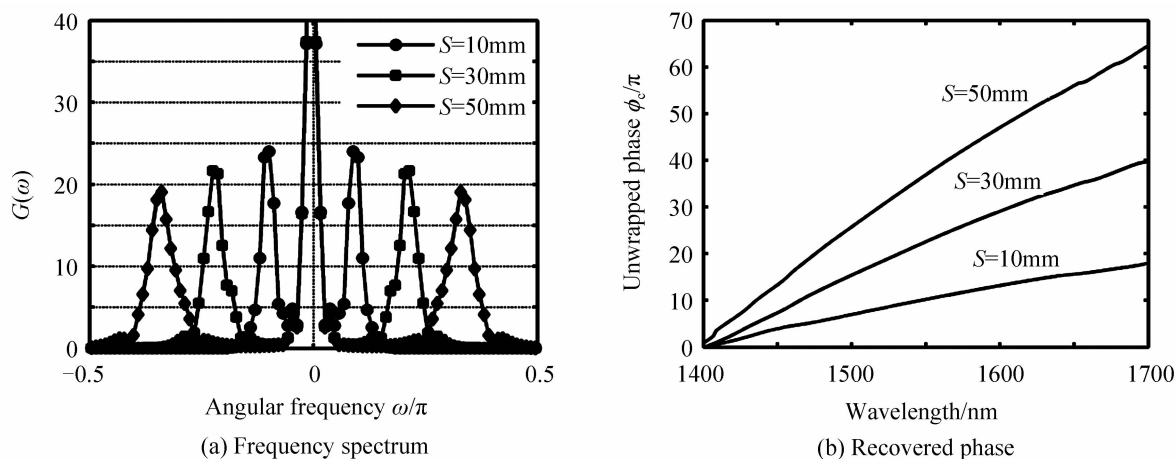


图 4 CLPFG 不同 S 时的频谱和相位
Fig. 4 Frequency spectra and phases for different separations

不同 S 的 CLPFG 构成频分复用系统时,可根据不同位置通过频域滤波得到各自的特征频谱.图 4(b)为不同 S 时的相位分布曲线,曲线斜率随 S 的增大而增大,这是由于 S 增大时,条纹频率增大,条纹分布变密,在相同波长范围内条纹变化的周期数增大,因而相位随波长的增大显著加快.

2 复合条纹信号的处理

在基于频分复用的光纤光栅多参量传感系统中,不同间隔光纤长度的 CLPFG 构成串行结构,相邻两个 CLPFG 之间不存在模式干涉,因此,系统输出的复合条纹信号可以表示为各个 CLPFG 归一化条纹信号的相乘,即

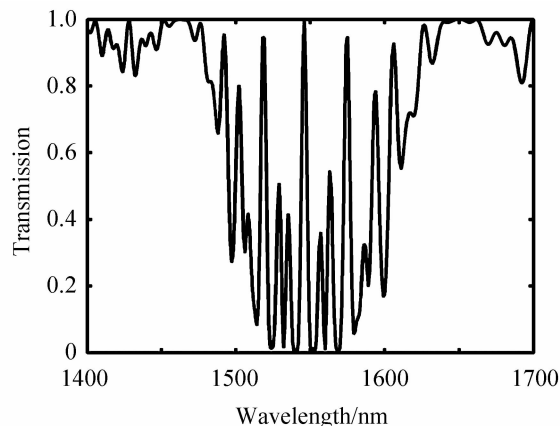
$$g_c(\lambda) = \prod_{i=1}^n \{a_i(\lambda) + b_i(\lambda) \times \cos[\phi_i(\lambda)]\} \quad (8)$$

以两个 CLPFG 构成的频分复用系统为例,有

$$g_c(\lambda) = \left[a_1 + \frac{1}{2} b_1 e^{j\phi_1} + \frac{1}{2} b_1 e^{-j\phi_1} \right] \times \left[a_2 + \frac{1}{2} b_2 e^{j\phi_2} + \frac{1}{2} b_2 e^{-j\phi_2} \right] = a_1 a_2 + a_2 \left(\frac{1}{2} b_1 \right) \cdot e^{\pm j\phi_1} + a_1 \left(\frac{1}{2} b_2 \right) e^{\pm j\phi_2} + \left(\frac{1}{2} b_1 \right) \left(\frac{1}{2} b_2 \right) e^{\pm[\phi_1 \pm \phi_2]} \quad (9)$$

由于 $a(\lambda) + b(\lambda) = 1$,故 $A(\omega) + B(\omega) = 2\pi\delta(\omega)$,即 $a(\lambda)$ 和 $b(\lambda)$ 的频谱分布位置和带宽相同. $A(\omega)$ 的频谱分布见图 3(a),处于零频位置且频带宽度相对 CLPFG 的特征频谱较窄,相应地 $B(\omega)$ 的带宽与位置与其相同.同时由式(9)可知,复合条纹信号的频谱中除两个特征频谱和零频外,还包含特征频谱的和频与差频信号.图 5(a)为两个 CLPFG ($S_1 = 30$ mm、 $S_2 = 50$ mm)的复合条纹信号,图 5(b)为相应的傅里叶频谱信号,其中 P_1 和 P_2 为两个特征频谱,而 P_c 和 P_s 即为差频与和频信号.

在频分复用多参量传感系统中,真正有用的是特征频谱,而差频与和频信号的存在将影响特征频谱信



(a) Composite fringe

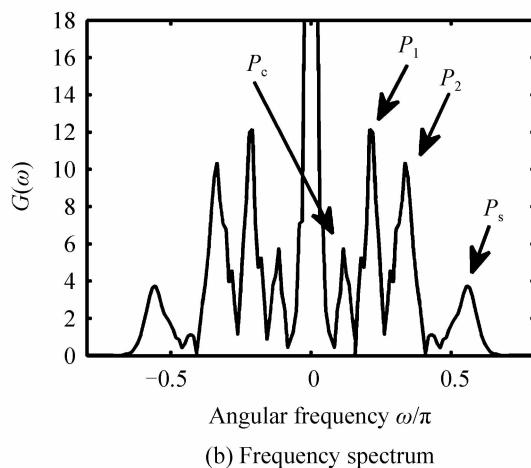


图 5 复合条纹信号及频谱

Fig. 5 Composite fringe and frequency spectrum

号的滤波,若差频与和频信号的幅值与特征频谱幅值相当甚至超过特征频谱,则频域滤波将变得更加复杂和困难,甚至影响恢复相位信号的准确性.因此,在光纤光栅 MZI 频分复用技术中,如何抑制复合频谱中的差频与和频信号,使其幅值远小于特征频谱尤为重要.

由傅里叶变换的线性性质可知, $a(\lambda)$ 和 $b(\lambda)$ 直接影响各频谱分量的幅值.由式(8)可得, $a_1 b_2$ 和 $a_2 b_1$ 决定了频谱中的特征频谱幅值,而和频和差频的幅值与 $b_1 b_2$ 成正比.若能实现使 $a_1 \gg b_1, a_2 \gg b_2$,则可以使频谱中的两个特征峰比除零频外的和频和差频成分高得多,即抑制和频和差频信号,有效提高信噪比.需要指出的是, a 和 b 的乘积项只影响各频率成分幅值大小,但不影响频谱位置.改变 a 和 b 比例造成的影响仅仅是降低了干涉条纹的对比度,特征频谱的位置和相位不受影响.在基于频分复用的多参量系统中,并不直接检测条纹波长或透过率的变化,而是傅里叶频谱处理和相位解调.因此,适当降低条纹对比度以提高频谱信号信噪比是完全可行.

图 6 是与图 2 所示条纹对应的 a 和 b 曲线,其中所取光栅结构参量使第一个光栅在中心波长 $\lambda_0 = 1550$ nm 处的耦合效率为 50%,由 MZI 性质可知,此时在中心波长处条纹对比度达到最大值.若定义 $K(\lambda) = a(\lambda)/b(\lambda)$,则在中心波长处 $K(\lambda_0) = 1$,相应的频谱如图 5(b).进一步分析图 6 所示的曲线特性可知, K 值在 λ_0 处最小,因此,改变光栅结构参量增大 λ_0 处的 K 值,即可实现 $a \gg b$.由耦合模理论可知, LPPFG 在中心波长处的耦合效率 $\gamma = \cos^2(\kappa L)$ ^[12],式中 κ 为互耦合常数,与光栅中纤芯模式和包层模式的场分布及光栅的折射率调制量有关,而改变中心波长处耦合效率最方便的途径是改变光栅长度 L ,这在光栅制作过程中很容易实现.

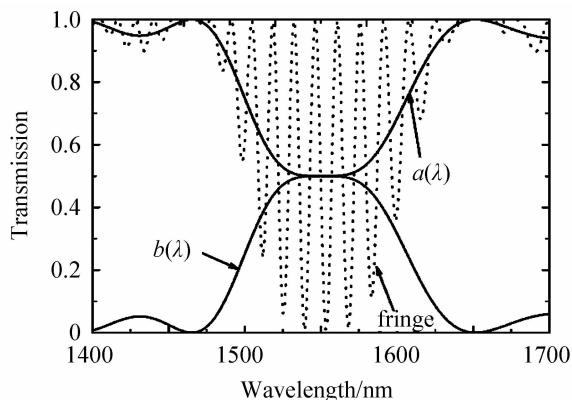
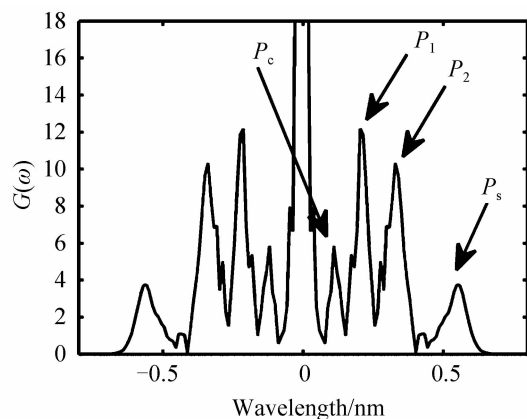
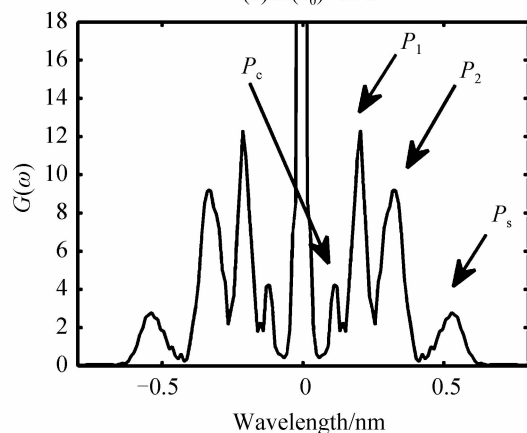


图6 条纹 a 和 b 曲线
Fig. 6 Curves of a and b

$K(\lambda_0)$ 为 1.25 和 2.6 时的频谱如图 7,若定义频谱信噪比为频谱中任一特征频谱的幅值与差频或和频幅值的比值,如采用图中 P_1 与 P_c 的峰值之比,则由图 5 (b)、图 7(a)、(b)可知, $K(\lambda_0) = 1, 1.25$ 和 2.6 时的信噪比分别为 2.08、2.90 和 4.11. 显然,随着 $K(\lambda_0)$ 的增大,频谱信号的信噪比大大增加. 当信噪比足够大时,特征峰明显高于和频和差频的峰值,更有利于频谱信号的滤波.



(a) $K(\lambda_0)=1.25$



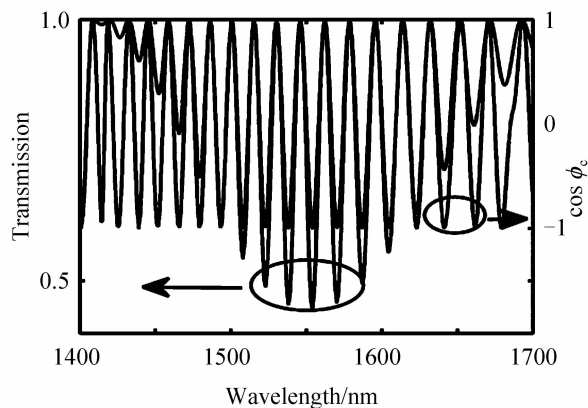
(b) $K(\lambda_0)=2.6$

图7 不同 $K(\lambda_0)$ 值的频谱

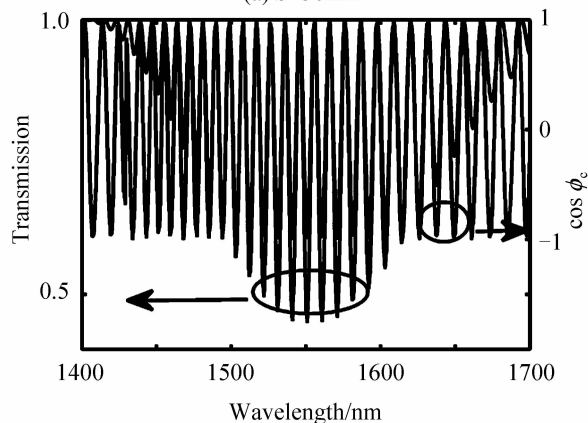
Fig. 7 Frequency spectra for different $K(\lambda_0)$

图 8 为 $K(\lambda_0) = 2.6$ 时通过特征频谱恢复得到的

相位余弦信号与原条纹的对比,相位余弦与干涉条纹仍严格同步,说明经过频谱调整得到的相位信息仍可以完整反映原条纹特征,因此,通过改变光栅长度适当降低条纹对比度,以实现抑制差频与和频信号从而提高频域滤波有效性的方法是切实有效的. 需要特别指出的是,当 $K(\lambda_0)$ 继续增大时,在信噪比继续增大的同时会使频谱中各个峰的谱宽度增大,并可能出现交迭,这将增加滤波难度. 因此, $K(\lambda_0)$ 的取值需要综合考虑信噪比和谱宽.



(a) $S=30\text{mm}$



(b) $S=50\text{mm}$

图8 $K(\lambda_0) = 2.6$ 时恢复相位余弦信号与原条纹对比

Fig. 8 Comparison between cosine of recovered phase and the original fringes for $K(\lambda_0) = 2.6$

3 结论

本文研究了基于光纤光栅 MZI 的频分复用系统中复合条纹信号的傅里叶分析方法,考察了复合频谱中差频及和频信号与条纹特征参量之间的关系,提出了抑制差频与和频信号的有效方法. 通过改变 CLPPG 中的光栅长度,改变中心波长处的模式耦合效率,适当降低单个 CLPPG 的条纹对比度,有效提高了频谱信号的信噪比,从而提高频域滤波的有效性. 频谱调整后恢复相位的余弦信号与原条纹信号的对比表明,频谱信噪比提高的同时保留了反映各 CLPPG 原条纹特征的足够相位信息. 本文提出的提高频谱信号信噪比的方

法是切实可行,可为基于光纤光栅 MZI 和频分复用的多参量传感技术提供理论和技术指导。

参考文献

- [1] DONG Xin-yong, LI Lan, SHENG Ping, *et al.* Hybrid fiber grating-based optical comb filters with changeable channel numbers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 238-242.
董新永, 李岚, 沈平, 等. 一种通道数可变的光纤光栅梳状滤波器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 238-242.
- [2] HU H F, DENG Z Q, ZHAO Yong, *et al.* Sensing properties of long period fiber grating coated by silver film[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(1): 46-49.
- [3] LEE BH, NISHII J J. Bending sensitivity of in-series long-period fiber gratings[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(20): 1624-1626.
- [4] FAN Y E, ZHU T, SHI L L, *et al.* Highly sensitive refractive index sensor based on two cascaded special long-period fiber gratings with rotary refractive index modulation[J]. *Applied Optics*, 2014, **50**(23): 4604-4610.
- [5] JAMES S W, ISHAQ I, ASHWELL G J, *et al.* Cascaded long-period gratings with nanostructured coatings[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(17): 2197-2199.
- [6] GU Z T, JIANG X L, CHEN H Y. High-sensitivity sensor design based on cascaded long-period fiber grating with film coating[J]. *Optical Engineering*, 2013, **53**(2): 021104.
- [7] BHATIA V, CAMPBELL D, CLAUS R O, *et al.* Simultaneous strain and temperature measurement with long-period gratings[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(9): 648-650.
- [8] ZHANG A P, SHAO L Y, DING J F, *et al.* Sandwiched long-period gratings for simultaneous measurement of refractive index and temperature [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(11): 2397-2399.
- [9] MURPHY R P, JAMES S W, TATAM R P. Multiplexing of fiber-optic long-period grating-based interferometric sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(13): 825-829.
- [10] LEE B H, KIM Y J, CHUNG Y. Fiber modal index measurement based on fiber gratings [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2001, **20**(5): 443-455.
- [11] TAKEDA M, INA H, KOBAYASHI S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, **72**(1): 156-159.
- [12] TURAN E. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1468-148.

Foundation item: The Natural Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. Y15F050012), Research Project of Education Department of Zhejiang Province (No. Y201534206), the Zhejiang Normal University Foundation for Doctor (No. ZC304014028), the Opening Foundation of Key Laboratory of Researching Optical Information Detecting and Display Technology in Zhejiang Province