

基于游标效应的并联法布里珀罗干涉仪传感特性的分析

罗春晖¹, 陈晓旭¹, 吴舜^{1,2*}

¹武汉工程大学, 光学信息与模式识别湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205;

²瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

摘要 光学游标效应能有效放大干涉仪探测指标的灵敏度, 因而受到光纤传感领域的广泛关注。本文针对应用高阶谐波游标效应时出现的内包络消失、外包络可见度低等问题, 从理论分析以及实验探索两方面出发, 得出了降低传感腔和参考腔的光强差异可以提高光谱质量的结论。此外, 本文通过合理设计优化传感腔与参考腔的腔长、折射率等影响游标放大倍数的参数, 在实验上采用平行结构的法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 干涉仪制成一阶谐波游标效应的光纤气压传感器, 不仅获得高对比度的游标干涉光谱, 还在 10kPa 到 190kPa 气压范围内, 实现 152pm/kPa 的气压灵敏度, 线性度高达 99%, 对应的放大倍数达到 35.3 倍。

关键词 光纤传感; 气压传感; 光学游标效应; 游标光谱

中图分类号 TQ342+.82 **文献标志码** A

1 引言

光纤干涉仪型的传感器具有抗电磁干扰, 高灵敏度等一系列优点, 因而受到广泛的关注^[1-3]。而光学游标效应能够增强干涉仪传感能力, 就像游标卡尺能提高测量精度那样^[4], 所以它被广泛应用于温度、气压、应力等诸多光纤传感领域^[5-19]。理论上, 当干涉仪的传感腔和参考腔满足游标条件 ($n_2L_2 = jn_1L_1 + \Delta L$) 时, 就可以产生光学游标效应^[20], 式中, j 、 ΔL 分别是传感腔和参考腔频率相差的倍数以及失谐量, n_1 、 n_2 和 L_1 、 L_2 分别表示传感腔和参考腔的折射率及腔长。先前的工作^[20, 21]已经表明游标放大倍数与 j 的数值成正比, 与失谐比成反比, 失谐比定义为 $\Delta L/n_1L_1$, 并且在失谐比足够小或者 j 的数值比较大时, 传感器的放大倍数可以达到几十倍^[22-25], 甚至上百倍^[26, 27]。尽管光学游标效有如此优势, 但在涉及高阶谐波游标效应 ($j > 1$) 的应用时, 往往会出现随着 j 的增大, 外包络的对比度下降、内包络消失等问题, 使数据分析变得困难。文献^[21]表明, $j=3$ 时的外包络对比度会下降到 0.5dB 以下, 难以用于数据分析。虽然文献^[20]采用提取内包络的方法, 实现了基本游标效应 ($j=1$)

基金项目: 瞬态光学与光子学国家重点实验室开放研究基金 (SKLST202105)、武汉工程大学科学基金 (批准号: 22QD01)

通信作者: *E-mail: Wushun_wit@163.com

到三次谐波游标效应($j=4$)的探索, 但该类型传感器采用的设计具有较高技术难度, 难以广泛应用。根据笔者的调研, 到目前为止, 很少有探索如何推广高阶谐波游标效应的工作。

本文基于并联式法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 干涉仪结构的气压传感器, 在实验方面完成了不同阶次的光学游标效应的探索。从实验结果出发, 结合理论模拟, 我们找出了应用高阶谐波游标效应时, 产生高质量游标光谱 (包括清晰内包络) 的基本条件, 并提出了在气压传感中应用光学游标效应时获得更高放大倍数的普适性方法。本文对高阶谐波游标效应的广泛应用, 以及高灵敏度的传感器设计, 都具有一定的借鉴作用。

2 基本原理

本文的工作采用两个平行的法布里-珀罗干涉仪的结构来充当并联式气压传感器的两条臂, 如图 1 所示。由于耦合器到反射镜 M1、M2 的长度近似相等, 所以本文提到的四个反射面 M_i ($i=1, 2, \dots, 4$) 产生的反射电场可以表示为:

$$E_r = E_0[\sqrt{R_1} + \sqrt{R_3} + (1 - \alpha_1)(1 - R_1)\sqrt{R_2}e^{-j\phi_1} + (1 - \alpha_2)(1 - R_3)\sqrt{R_4}e^{-j\phi_2}] \quad (1)$$

在上面的公式当中, $\phi_1 = 2\pi n_1 L_1 / \lambda$, $\phi_2 = 2\pi n_2 L_2 / \lambda$, E_0 为到达两个 Fabry-Perot 的电场强度大小, R_i ($i=1, 2, \dots, 4$) 分别表示对应反射镜面 M_i ($i=1, 2, \dots, 4$) 的反射率, α_1 、 α_2 分别表示光在传感腔和参考腔中往返产生的总损耗。因为 M_i ($i=1, 2, \dots, 4$) 两边的介质几乎都可以看作是“空

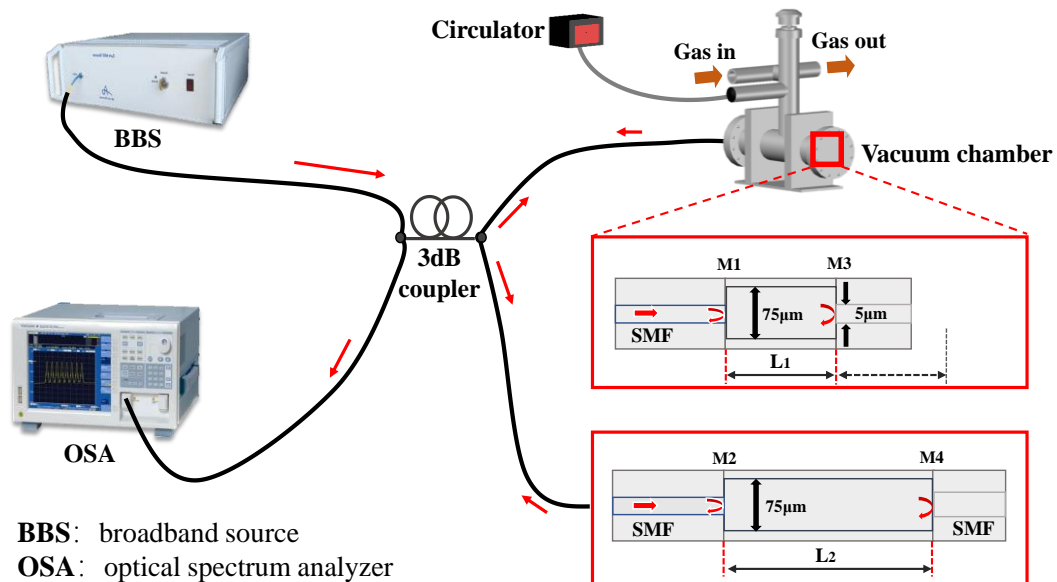


图 1 气压传感装置图

Fig.1 The schematic diagram of the gas pressure sensing device

气—玻璃”, 所以 R_i 可以统一用 R 来表示。则反射电场可以化简为:

$$E_r = E_0 \left(A + B e^{-j\phi_1} + C \sqrt{R} e^{-j\phi_2} \right) \quad (2)$$

其中, $A = 2\sqrt{R}$, $B = (1 - \alpha_1)(1 - R)\sqrt{R}$, $C = (1 - \alpha_2)(1 - R)\sqrt{R}$

因此, 最终干涉形成的反射光强可以表示为:

$$I_r \propto \left| \frac{E_r}{E_0} \right|^2 = D + I_1 + I_2 + I_3 \quad (3)$$

其中, $D = A^2 + B^2 + C^2$, $I_1 = 2AB \cos(\phi_1)$, $I_2 = 2AC \cos(\phi_2)$, $I_3 = 2BC \cos(\phi_1 - \phi_2)$ 。

通过公式 (3) 进行模拟, 得出 I_1 、 I_2 能直接决定游标光谱的主体特征, 两者叠加决定包络的基本形状; I_3 只会在此基础上增大游标包络的单边对比度。依据实验经验及文献^[13, 21, 20, 28], 取反射率 $R=0.04$, $\lambda=1300\sim 1600\text{nm}$, $n_1=n_2=1$, $L_1=200\mu\text{m}$, 不同 j 值 ($j=1, 2, 3, 4$) 对应的 L_2 分别取 210、410、610、810 μm , 用 I_1 、 I_2 叠加模拟了图 2 中从 $j=1$ 到 $j=4$ 对应的游标光谱。如图 2 所示, 随着 j 数值增大, 外包络的对比度会随之降低; 而内包络 ($j > 1$) 的数目会随之增多, 其数目 m 可表示为 $m=j+1$ 。

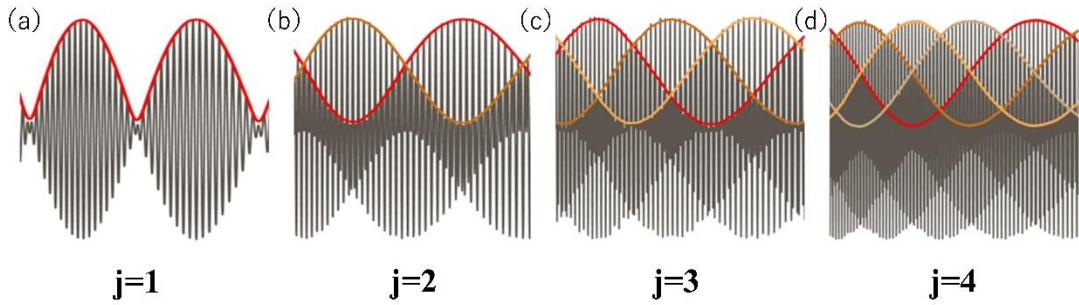


图 2 不同 j 数值条件下, 模拟 I_1 、 I_2 叠加产生的光学游标光谱。(a) $j=1$; (b) $j=2$; (c) $j=3$; (d) $j=4$

Fig.2 With different j -value conditions, the Vernier spectrum generated by the I_1 and I_2 is simulated.

(a) $j=1$; (b) $j=2$; (c) $j=3$; (d) $j=4$

3 实验结果分析

本文的工作采用两个平行法布里-珀罗干涉仪结构, 如图 1 所示。传感腔放置在真空腔内, 它由 $75\mu\text{m}$ 直径的空芯毛细玻璃管分别熔接单模光纤 (SMF) 和 $5\mu\text{m}$ 的毛细玻璃管形成, 后者作为进气口。参考腔在传感腔的基础上将 $5\mu\text{m}$ 空芯毛细玻璃管换成实芯的 SMF, 使空气腔与外界环境隔绝, 测试时放置在空气中。宽谱光源 (BBS) 打出的光经过 50/50 耦合器分别进入参考腔和传感腔, 然后分别依次经过 M2-M4 和 M1-M3 反射, 再回到耦合器发生干涉。干涉谱由光谱仪 (OSA) 显示。

实验中，固定传感腔腔长，通过设计参考腔的腔长，我们制备了满足不同阶次游标效应的传感头，进而得到对应的游标光谱，如图 3 所示。在 j 数值小于 3 时，实验测得的游标光谱的包络特征与理论模拟一致。当 $j=3$ 时，仅在部分波长段内有较为清晰的包络谱；而当 $j=4$ 时，游标包络逐渐消失。我们分析了不同 j 数值对应的 FFT 图谱，发现得到的两个频率成分

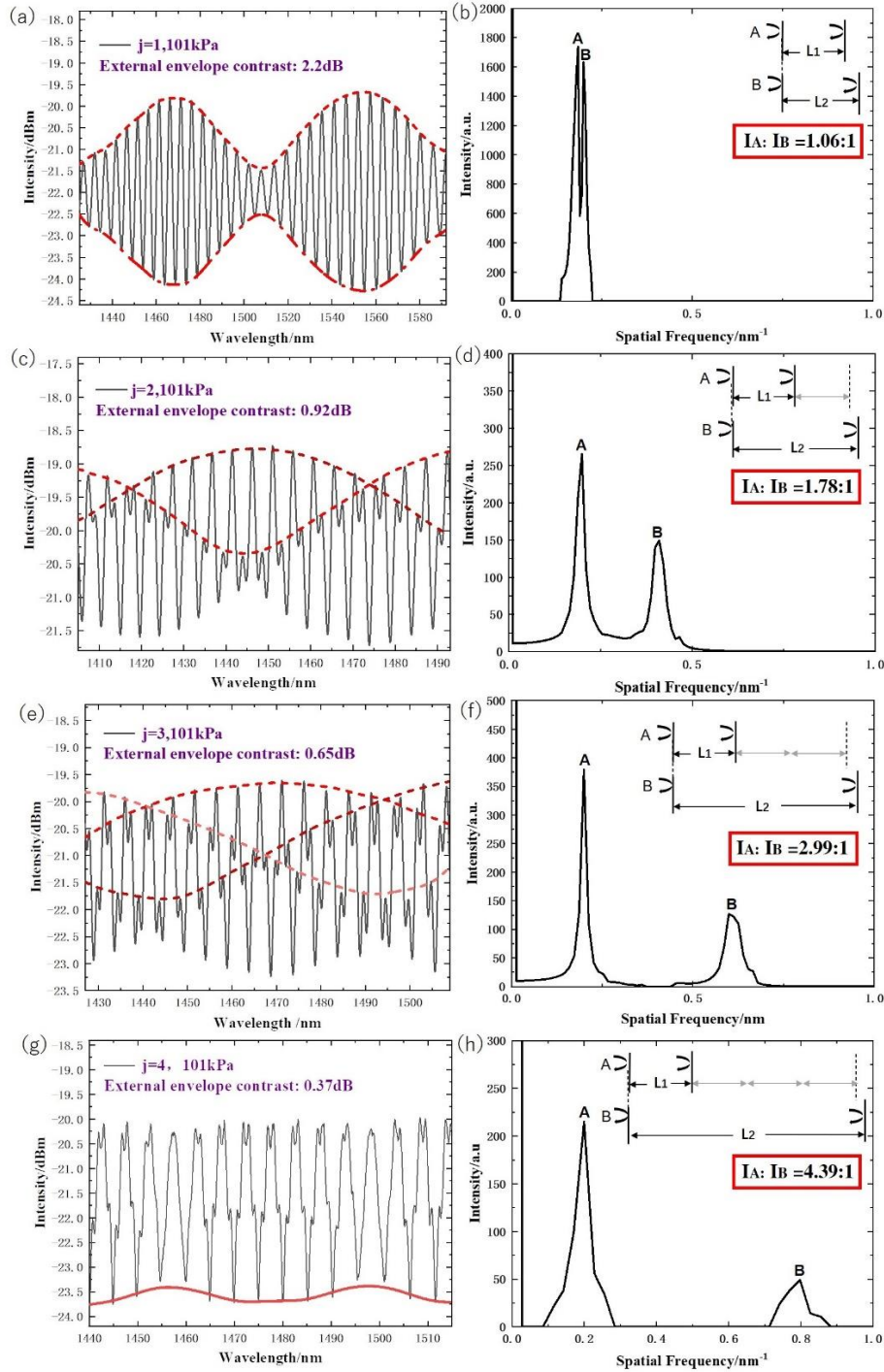


图 3 实验中不同 j 值对应的游标反射谱及其 FFT（快速傅里叶变换）图。

(a) (b) $j=1$; (c) (d) $j=2$; (e) (f) $j=3$; (g) (h) $j=4$

Fig.3 With different j -value conditions, The graphics of Vernier spectrum and its FFT.

(a)(b) $j=1$; (c)(d) $j=2$; (e)(f) $j=3$; (g)(h) $j=4$

分别与传感腔和参考腔的腔长吻合，这表明针对不同 j 数值而设计的实验样品与游标条件对应良好。频谱图中 I_A 、 I_B 分别表示传感腔和参考腔的光强，由公式(3)可知， $I_A=2AB$ ， $I_B=2AC$ ，即 I_A 、 I_B 代表了光波 I_1 、 I_2 的强度。此外，值得注意的是随着 j 数值的增大，实验中传感腔和参考腔对应的光强比值也在增大，这与传感腔和参考腔的总损耗差异随 j 数值的增大而增大存在一定的关系。

根据如图3所示的结果，为了确保反射光谱能够出现清晰的游标包络特征，本文在测试气压灵敏度时选择 $j=2$ 的另一组样品S1来进行气压测试。如图4所示，在常温下，通过追踪内包络交叉点对应的参照点漂移情况，得出样品S1在10kPa到190kPa范围内对应的气压灵敏度为152pm/kPa，其放大倍数为35.3倍，线性度为99%。该并联结构的气压传感器相较于一般的级联结构，包络质量更佳，对恶劣环境的适应能力更强，在极端环境下的气压监测领域具有潜在的应用价值。

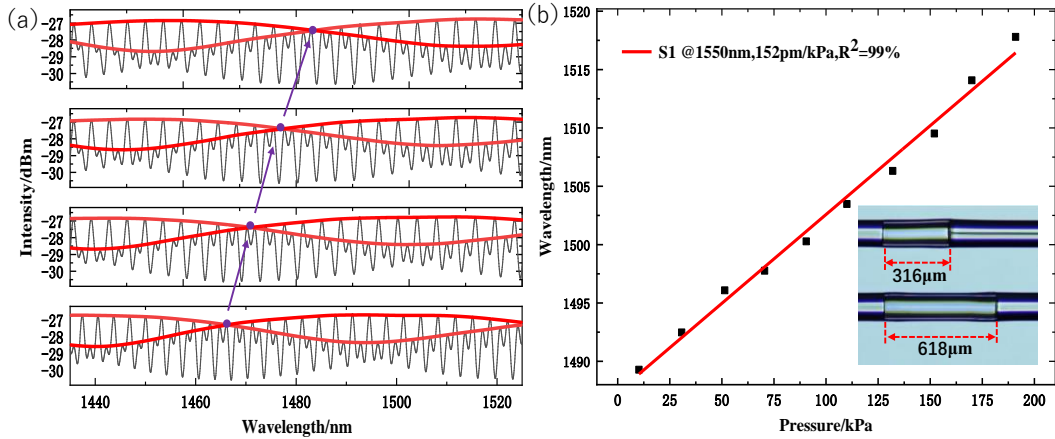


图4 样品S1的气压测试结果。(a)不同气压下S1对应的内包络参照点漂移图；(b)S1对应的气压灵敏度图。插入图：传感Fabry-Perot、参考Fabry-Perot的侧视显微图

Fig.4 Gas pressure test results for sample S1. (a) S1 corresponding to the drift of the internal envelope reference point; (b)S1 corresponding to the gas pressure sensitivity. Inset: Side view microscopic pictures of the sensing and reference Fabry-Perot interferometer

4 分析与讨论

为了探索游标光谱的外包络对比度下降以及内部包络消失的原因，本文依据实验中观察到的现象，从传感腔和参考腔不同的光强比值 I_A 、 I_B 的模拟光谱这一角度来进行讨论。维持理论部分 $j=2$ 的设定，使 ϕ_1 、 ϕ_2 保持不变，直接改变 I_A 、 I_B 的比值，叠加 I_1 、 I_2 得到

如图 5 所示的光谱。在 I_A 数值不变时, I_A 、 I_B 比值越小, 对应的光学游标谱的外包络对比度越大, 同时, 也越可能存在内包络。这表明传感腔与参考腔的光强差异确实会影响到同一阶数对应的内包络的存在以及外包络的对比度大小。结合参考文献^[20], 我们发现 j 数值增大引起的外包络对比度下降, 甚至是失去基本的包络形状, 也可以归咎于传感腔和参考腔光强差异过大。文献^[28]中指出条纹对比度会随腔内光强增大而增大的结论为此提供了相应的理论支撑, 我们据此从包络的形成机制上进行了相关的探究。

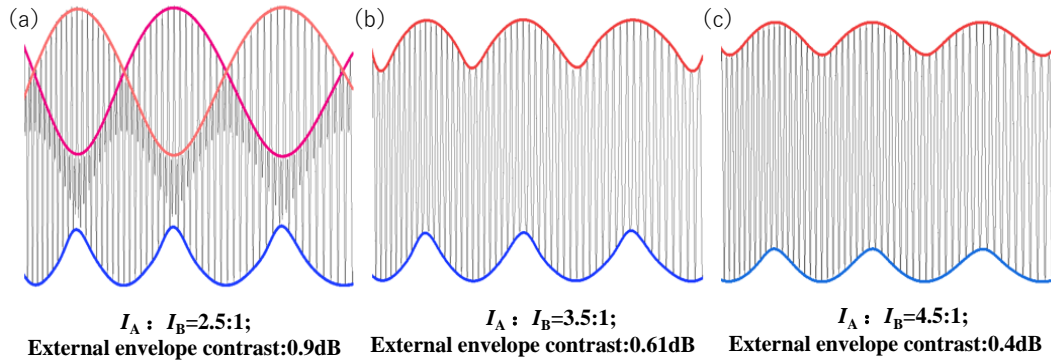


图 5 I_A 数值不变的情况下, 不同的 I_A 、 I_B 比值对应的游标光谱及其特征。(a) $I_A:I_B=2.5:1$; (b) $I_A:I_B=3.5:1$; (c) $I_A:I_B=4.5:1$

Fig.5 With unchanged I_A , the Vernier spectrum and their characteristics correspond to different I_A and I_B ratios.

(a) $I_A:I_B=2.5:1$; (b) $I_A:I_B=3.5:1$; (c) $I_A:I_B=4.5:1$

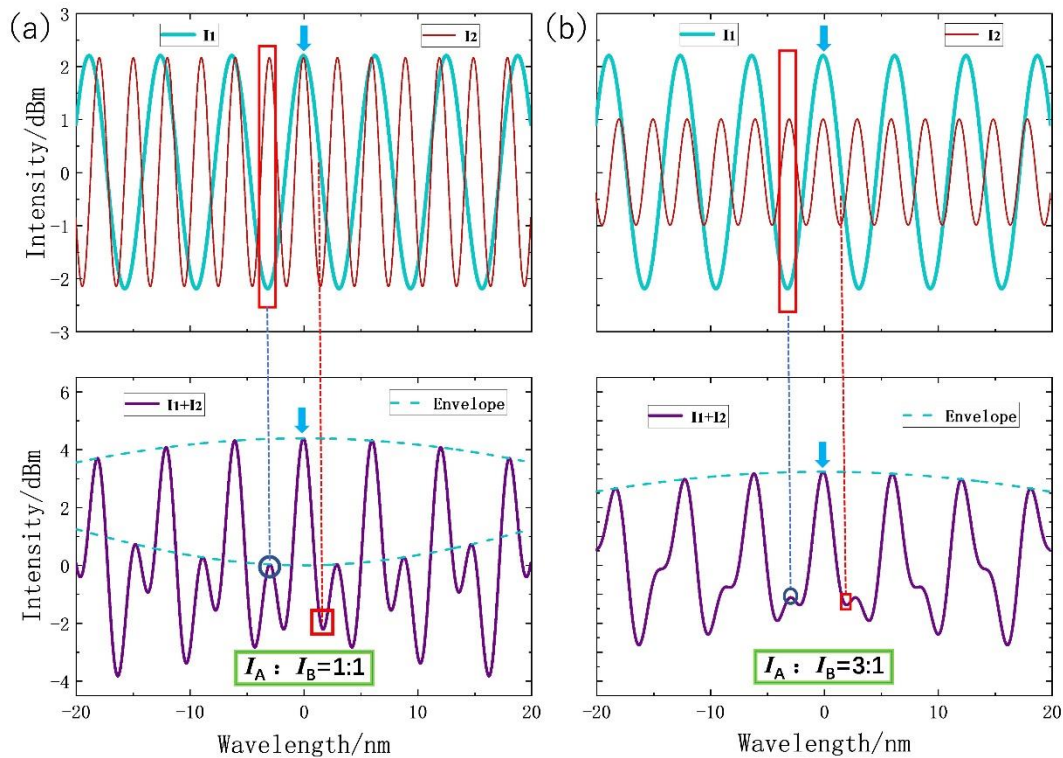


图 6 传感腔光强 I_A 不变, 不同参考腔光强 I_B 对包络特征点的影响。(a) $I_A:I_B=1:1$; (b) $I_A:I_B=3:1$

Fig.6 The I_A is unchanged, and the effect of different I_B on the envelope feature points.

(a) $I_A:I_B=1:1$; (b) $I_A:I_B=3:1$

如图 6 所示, 令 $\phi_1=1$ 、 $\phi_2=2.1$, 直接改变 I_A 、 I_B 的比值, 叠加 I_1 、 I_2 得到如图 6 所示光谱。 I_1 、 I_2 波峰叠加处, 会形成包络的主极大, 如图 6 中蓝色箭头所示的位置; I_1 、 I_2 波谷以及波峰叠加的位置, 会形成一个次极大, 这也就是内包络的由来, 如图 6 蓝色圆圈所示的位置。当两腔光强相差较大时, 两个光波的调制效果就将减弱, 进而造成光拍的对比度下降。而当光拍对比度下降到图 6 所示的圆圈、方框等特征点难以辨识时, 内包络就会消失。同时, 光拍对比度减弱, 也意味着光谱将更容易受到光源质量或者噪声的影响, 这从根源上解释了应用高阶谐波游标效应时出现的外包络对比度低、内包络消失等光谱质量不佳的原因。综上所述, 在传感技术中应用高阶谐波游标效应时, 应该注意使传感腔和参考腔的光强差异尽可能减小, 这是产生完整清晰游标光谱的前提条件。

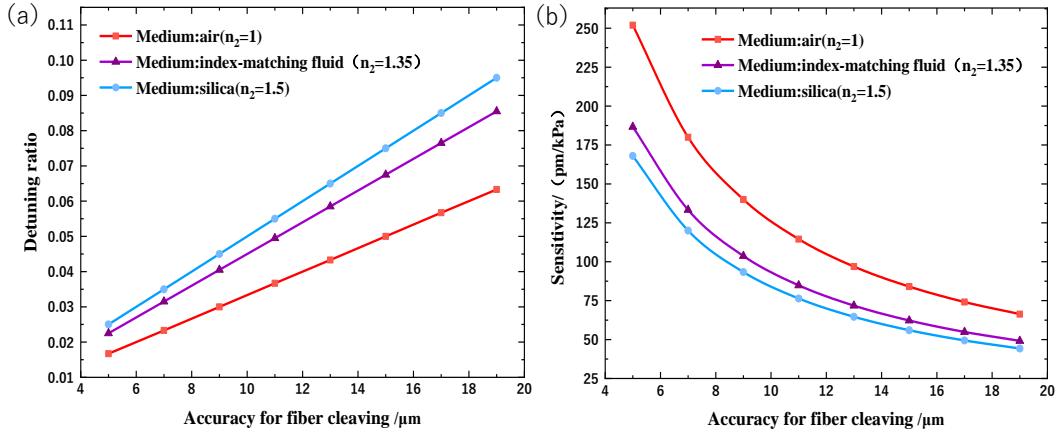


图 7 传感腔长 L_1 长度为 $300\mu\text{m}$, 且 $j=1$ 。(a) (b) 分别为不同参考腔介质对应的切割误差与失谐比、灵敏度的关系图

Fig.7 L_1 is $300\mu\text{m}$ and corresponds to $j=1$. (a) (b) shows the relationship between cutting error and detuning ratio or sensitivity in different reference cavity media, respectively

接着, 我们研究了不同参数对游标效应放大倍数的影响。由参考文献^[20]可知, 光学游标效应的放大倍数可以表示为:

$$M = \frac{\text{FSR}_{env}}{\text{FSR}_2 / j} = \frac{jn_1L_1}{jn_1L_1 - n_2L_2} = \frac{jn_1L_1}{-\Delta L} \quad (4)$$

应用游标效应的主要目的就是获得更高的灵敏度。由公式 (4) 可知, 游标放大倍数的绝对值与 j 成正比, 与失谐比 $\Delta L / n_1 L_1$ 成反比。所以, 设计应用游标效应的传感器时, 优化思路是在确保两腔光强差异不影响光谱进行数据分析的前提下, 尽可能选择对应更大的 j 值, 更小的失谐比, 从而得到更高的游标放大倍数。其中, 合理设计传感腔与参考腔的腔长、入射光强大小以及内部损耗等系数、确保腔面平整, 都是达到目标的关键。一方面, 我们可

通过提高阶数获得更高放大倍数。但是前文已表明，对于高阶谐波游标效应，传感腔和参考腔的光强差异将变大，从而引起游标光谱对比度的降低。若出现外包络对比度低、内包络消失等游标光谱质量不佳的情况，将直接影响数据分析，所以一味增大游标阶数 j 并不可取。另一方面，增大放大倍数也能通过增大传感腔腔长 L_1 和减小失谐量 ΔL ，以降低失谐比来实现。增大 L_1 虽然是比较常见的方法，但其并不适合高阶谐波游标效应，因为随着传感腔腔长 L_1 的增大，参考腔腔长 L_2 也将随之变得 longer，这将引起两腔的光强差异变得更大。此外，失谐量 $\Delta L = n_2 \Delta L_2$ 与两腔的切割精度 ΔL_2 和折射率 n_2 有关，其中， ΔL_2 会受到光纤切割精度的限制，但折射率 n_2 则有可能通过独特的设计来尽可能变小。在气压传感中，由于传感腔折射率 n_1 是空气，即使气压改变，其数值仍约等于 1。令 $L_1 = 300 \mu\text{m}$, $j = 1$, 图 7 显示了不同的 n_2 时，失谐比以及灵敏度与切割精度 ΔL_2 之间的关系。其中，灵敏度 $S = M \cdot S_0$, S_0 取 $4.3 \text{ pm/kPa}^{[21]}$ 。如图 7 所示，若参考腔介质折射率 n_2 越小，则相同的切割精度下产生的失谐量就越小，从而越有利于在相同的切割精度下得到更高的灵敏度。

5 结 论

本文通过理论分析和实验验证了一种基于高阶谐波游标效应的平行结构的法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 干涉仪型光纤气压传感器。理论表明传感腔与参考腔反射光强差异越大，产生的游标光谱的外包络对比度就越小，甚至可能造成高阶谐波游标光谱的内包络消失。本文采用一阶谐波 ($j=2$) 游标效应的样品 S1 进行气压测试，得到了 152 pm/kPa 的高气压灵敏度，线性度为 99%，放大倍数达到 35.3，与理论计算吻合。除此之外，本文还分析了如何在产生高阶光学游标效应的同时，通过合理设计传感器的参数获得高对比度的游标干涉光谱，并针对如何增大传感器灵敏度提出合理建议。这将为设计高灵敏度的传感器提供思路。

参考文献

- [1] Mao C, Bo H, Ying W, *et al.* High-sensitivity gas pressure sensor based on hollow-core photonic bandgap fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30108-30115.
- [2] Wu S, Haihao C, Jw M, *et al.* Temperature-independent ultra-sensitive refractive index sensor based on Hollow-core Silica Tube and tapers[J]. Optics Express, 2021, 29(7): 10939-10948.
- [3] Jm A, Sw A, Hc A, *et al.* Sensitivity-enhanced temperature sensor based on encapsulated S-taper fiber Modal interferometer[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 139(30): 106933.
- [4] Gomes AD, Bartelt H, Frazo O. Optical Vernier Effect: Recent Advances and Developments[J]. Laser & Photonics Review, 2021, 15(7): 2000588.
- [5] Mingran Q, Jiajun T, Yong Y. Ultra-high sensitivity Fabry-Perot interferometer gas refractive

- index fiber sensor based on photonic crystal fiber and Vernier effect[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4891-4894.
- [6] Hao L, Ping L, Xin F, *et al.* Sensitivity amplification of fiber-optic in-line Mach–Zehnder Interferometer sensors with modified Vernier-effect[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 26898-26909.
- [7] Luo P, Zhang M, Ghassemlooy Z, *et al.* Experimental Demonstration of RGB LED-Based Optical Camera Communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 7(5): 7904212.
- [8] Kong L, Zhang Y, Zhang W, *et al.* Cylinder-type fiber-optic Vernier probe based on cascaded Fabry–Perot interferometers with a controlled FSR ratio[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(18): 5043-5047.
- [9] Su H, Zhang Y, Zhao Y, *et al.* Parallel Double-FPIs Temperature Sensor Based on Suspended Core Microstructured Optical Fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(24): 1905-1908.
- [10] Tian J, Li Z, Sun Y, *et al.* High-Sensitivity Fiber-Optic Strain Sensor Based on the Vernier Effect and Separated Fabry–Perot Interferometers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(21): 5609-5618.
- [11] Wu Y, Xia L, Li W, *et al.* Highly Sensitive Fabry–Perot Demodulation Based on Coarse Wavelength Sampling and Vernier Effect[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(6): 487-490.
- [12] Xie M, Gong H, Zhang J, *et al.* Vernier effect of two cascaded in-fiber Mach–Zehnder interferometers based on a spherical-shaped structure[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(23): 6204-6210.
- [13] Yang Y, Wang Y, Jiang J, *et al.* High-sensitive all-fiber Fabry-Perot interferometer gas refractive index sensor based on lateral offset splicing and Vernier effect[J]. *Optik*, 2019, 196:163181.
- [14] Li Z, Zhang Y, Zhang W, *et al.* High-Sensitivity Gas Pressure Fabry–Perot Fiber Probe With Micro-Channel Based on Vernier Effect[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(14): 3444-3451.
- [15] Hongfeng L, Fufei L, Huiyong G, *et al.* Ultra-highly sensitive gas pressure sensor based on dual side-hole fiber interferometers with Vernier effect[J]. *Optics express*, 2018, 26(22): 28763-28772.
- [16] 刘福禄,张钰民,庄炜,等.基于游标效应和基底增敏的复合光纤结构温度传感器[J].*光学学报*,2021,41(15): 1506002.
Liu F L , Zhang Y M, Zhuang W, *et al.* Fiber Temperature Sensor with Composite Structure Based on Vernier Effect and Substrate Sensitization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021,41(15): 1506002.
- [17] 方莎莎,吴许强,张刚,等.基于游标效应的高灵敏光纤温度和应变传感器[J].*中国激光*,2021,48(01): 0106004.
Fang S S, Wu X Q, Zhang G, *et al.* High Sensitivity Fiber Optic Temperature and Strain Sensors Based on the Vernier Effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021,48(01): 0106004.
- [18] 蔡礼邹,覃亚丽,蔡小磊,等.基于游标原理的法布里-珀罗温度传感器的增敏方法[J].*激光与光电子学进展*,2021,58(11): 1106004.
Cai L Z, Qin Y L , Cai X L, *et al.* Sensitization Method of Fabry-Perot Temperature Sensor Based on Vernier Principle[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2021,58(11): 1106004.

- [19] 郝晋青, 韩丙辰. 基于游标效应的高灵敏度光纤耦合器折射率传感器[J]. 光学学报, 2020, 40(02): 0206002.
Hao J Q, Han B C. Ultrasensitive Refractive Index Sensor Based on Optical Fiber Couplers Assisted with Vernier Effect[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(02): 0206002.
- [20] Gomes AD, Ferreira MS, Bierlich J, *et al.* Optical Harmonic Vernier Effect: A New Tool for High Performance Interferometric Fibre Sensors[J]. Sensors, 2019, 19(24): 5431.
- [21] Yang X, Wu S, Cheng H, *et al.* Simplified highly-sensitive gas pressure sensor based on harmonic Vernier effect[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 140(5): 107007.
- [22] Chen P, Dai Y, Zhang D, *et al.* Cascaded-Cavity Fabry-Perot Interferometric Gas Pressure Sensor based on Vernier Effect[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3677.
- [23] Zhang G, Wu X, Zhang W, *et al.* High temperature Vernier probe utilizing photonic crystal fiber-based Fabry-Perot interferometers[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 37308-37317.
- [24] Wenjun N, Ping L, Xin F, *et al.* Simultaneous implementation of enhanced resolution and large dynamic range for fiber temperature sensing based on different optical transmission mechanisms[J]. Optics Express, 2018, 26(14): 18341-18350.
- [25] Peng Z, Ming T, Feng G, *et al.* Cascaded fiber-optic Fabry-Perot interferometers with Vernier effect for highly sensitive measurement of axial strain and magnetic field[J]. Optics express, 2014, 22(16): 19581-19588.
- [26] Robalinho P, Gomes A, Frazee O. Colossal enhancement of strain sensitivity using the push-pull deformation method[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(4): 4623-4627.
- [27] Gomes AD, Kobelke J, Bierlich J, *et al.* Giant refractometric sensitivity by combining extreme optical Vernier effect and modal interference[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 19313.
- [28] Yang X, Li Y, Yang S, *et al.* Comparison of fiber-based gas pressure sensors using hollow-core photonic crystal fibers[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(2): 3059925.

Analysis for the Sensing Characteristics of a Parallel F-P Interferometer Based on Vernier Effect

Luo Chunhui¹, Chen Xiaoxu¹, Wu Shun^{1,2*}

¹ *Hubei Key Laboratory of Optical information and Pattern Recognition, Wuhan
Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China;*

² *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and
Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710119, Shanxi, China*

Abstract

Objective Optical fiber sensor technology is extensively applied in gas pressure sensing in the field of industrial and environmental safety monitoring on account of its high sensitivity, compact structure, immunity to electromagnetic interference. Compared with long-period fiber gratings and anti-resonant waveguide, optical fiber sensors based on Vernier effect generally have greater advantages in terms of sensitivity. Vernier effect is an effective method for amplifying interferometer sensitivity, which has been well-known in the field of optical fiber sensing. However, as the harmonic order j increases, Vernier spectra deteriorates, i.e. the contrast of the external envelope decreases and the inner envelope disappears. The objective of this work is to obtain a method of generalizing the high-order Vernier effect and obtaining high sensitivity through experimental exploration and theoretical analysis. In addition, We intend to explore the reason of the decrease of external envelopes contrast and the loss of internal envelopes that affect spectral contrast. We expect to contribute to the extensive application of high-order harmonic Vernier effects and high-sensitivity sensor designs.

Methods First of all, we performed theoretical simulated for high-order Vernier spectrum for the cases from $j=1$ to $j=4$. Then, four parallel structure of the Fabry-Perot interferometers were experimentally fabricated and the corresponding Vernier spectrum were explored. After that, we investigated the effect of the difference in light intensity between the sensing chamber and the reference cavity on the Vernier spectrum by changing the light intensity difference between the two chambers. In addition, we analyzed various parameters that affect the Vernier magnification factor and designed a highly sensitive fiber-based gas pressure sensor.

Results and Discussions Based on a parallel structure Fabry-Perot interferometer, the article compared theoretical simulation (Fig.2) and the experimental results (Fig.3) of Vernier spectra for cases from $j=1$ to $j=4$. We found they are consistent, which indicated Vernier effect valid in the experiment. After that, we simulated spectrum corresponding to the different light intensity of the sensing cavity and the reference cavity. We found that as the increase of the light intensity difference between the two cavities, On the one hand, the contrast of the external envelope decreases; On the other hand, the internal envelope also disappears (Fig.5). Then, we fundamentally explained the deterioration of the Vernier spectrum when the higher-order harmonic Vernier effect is applied in the

experiment (Fig.6). In addition, the factors affecting the Vernier magnification was discussed from the aspects of increasing the value of j and decreasing the detuning ratio. And we put forward reasonable suggestions for obtaining higher magnification when applying the Vernier effect in gas pressure sensing. Then, a samples corresponding to the first-order harmonic Vernier effect was produced for gas pressure test. And at room temperature, its gas pressure sensitivity is 152 pm/kPa in the range of 10 kPa to 190 kPa, corresponding magnification is 35.3 times, linearity of 99% (Fig.4).

Conclusions We study the high order harmonic Vernier effect and proposed a method of improving interference fringe contrast for the external Vernier envelope and verified it experimentally. We found the reason for the reduction in the contrast for the Vernier spectrum is because of the reduction in the imbalance of light intensity between the sensing and the reference cavity. In the application, as the increase of the difference in light intensity of two chambers, the Vernier spectrum will be more susceptible to the quality or noise of the light source, resulting in the reduction in the visibility of envelope for higher harmonic orders. In addition, we analyzed various experimental parameters for obtaining high sensitivity and demonstrated a parallel structure Fabry-Perot sensor with gas pressure sensitivity of 152 pm/kPa with a linearity of 99% in the range of 10 kPa to 190kPa. A magnification factor of 35.3 is reported.

Key words Optical fiber sensing; Gas pressure sensing; Optical vernier effect; Vernier spectrum

网络首发:

标题: 基于高阶游标效应的并联法布里珀罗干涉仪传感特性的分析

作者: 罗春晖, 陈晓旭, 吴舜

收稿日期: 2022-07-29

录用日期: 2022-09-28

DOI: 10.3788/AOS221550

引用格式:

罗春晖, 陈晓旭, 吴舜. 基于高阶游标效应的并联法布里珀罗干涉仪传感特性的分析[J]. 光学学报, 2023, 43(05): 0506002.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

高空间分辨率大带宽分布式光纤振动传感系统

赵艳夺 王目光 张静 李东辉 陈德胜 黄晓砥

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

光学学报, 2022, 42(19): 1906004

光纤端面微型传感单元的共振模式及影响因素

贾向杰 郝鹏飞 黎敏 文晓艳 吕海飞

武汉理工大学理学院, 湖北 武汉 430070

光学学报, 2022, 42(2): 0206005

基于光频域反射仪的光纤分布式三维形状传感技术

尹国路 徐州 蒋锐 邓明 朱涛

重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

光学学报, 2022, 42(1): 0106002

基于金属有机骨架的水中微量乙醇光纤传感器

刘恒畅 张翔 程迪 陆云清 许吉 王瑾 梁忠诚

南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023

光学学报, 2021, 41(23): 2328002

一种新型光子晶体光纤的布里渊动态光栅传感

赵丽娟 梁若愚 徐志钮

华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003

光学学报, 2021, 41(7): 0706001