

光纤菲佐气体压力传感器的波分频分复用方法*

唐庆涛¹, 饶云江^{1,2, **}, 朱涛¹, 周昌学¹

(1 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

(2 电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术教育部重点实验室, 成都 610054)

摘 要:设计了一种新的光纤菲佐气体压力传感器, 结合波分复用技术和空间频率复用技术, 实现了不同腔长的光纤菲佐气体压力传感器的复用. 给出了该复用系统的结构, 阐述了其工作原理, 最后利用实验验证了该方法的可行性. 针对该系统中的串扰问题提出了基于参数化谱估计的 Pisarenko 谐波分解方案, 使可复用的传感器腔长差降至 100 μm 左右, 大大提高了系统的复用能力. 实验结果表明: 该系统在单个传感器气体压力分辨率达 0.76% F. S (量程为 0~150 kPa), 复用的传感器数目可达 80 个以上, 可满足实际工程应用中多点气压测量的需要.

关键词:光纤器件; 光纤传感器; Pisarenko 谐波分解; 光纤菲佐干涉仪; 粗波分复用

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)01-0056-5

0 引言

光纤 Fabry-Perot 传感器作为光纤干涉传感器的一种, 与传统的电类传感器相比, 它除了继承了光纤传感器体积小、重量轻、不受电磁干扰、适用范围广等优点之外, 还具有分辨率高、动态范围大以及实现方式灵活的显著优点, 因而迅速成为光纤传感器中极为重要的一员. 而基于 F-P 干涉仪的光纤传感器用于气体测量, 有着其它传感器不可比拟的优势: 1) 适合于长距离的在线测量. 光纤传输损耗小, 可长距离传输, 因而可将传感头放入恶劣危险的环境, 将探测信号引到安全地带进行遥测; 2) 可工作于强电磁干扰环境中, 如高压线、变电站附近; 适合于测量易燃易爆气体, 如甲烷、乙炔等. 这也是光纤传感器优于电类气体传感器的重要特点; 3) 传感器结构简单, 稳定可靠, 易于组成光纤传感网络, 实现分布式测量.

本文设计了一种新的光纤菲佐气体压力传感器, 在此基础上, 与波分复用技术以及频分复用技术相结合, 建立了多个传感器的复用系统. 采用基于参数化谱估计的 Pisarenko 谐波分解方案^[1], 解决了现有复用技术难以实现大容量复用的难题(复用数目通常小于 10 个), 为光纤气体压力传感器的规模应用创造了条件.

1 光纤菲佐气体压力传感器的结构设计

光纤菲佐气体压力传感器的结构见图 1. 传感

头由石英玻璃管、导入/导出光纤、弹性金属膜片构成. 导入/导出光纤和弹性金属膜片分别用 AB 胶与石英玻璃管粘在一起, 便构成了 F-P 腔. 构成 F-P 腔的两个反射端面分别为端面切割成平面的康宁单模光纤和经过镀膜处理的弹性金属膜片. 其中光纤端面反射率约为 4%, 而弹性金属膜片经过镀膜后, 反射率可达 80% 以上, 所以为了与两端面反射率相等的传统 F-P 腔相区别, 将本文中的 F-P 腔称为菲佐(Fizeau)腔, 菲佐腔的腔长可从几百微米到几毫米不等.

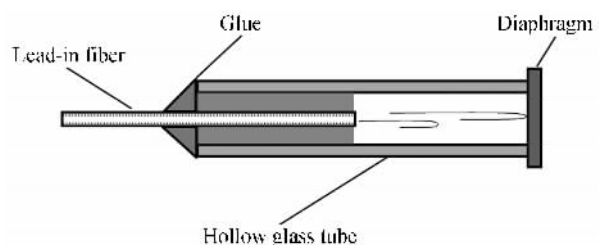


图 1 光纤压力传感器的结构

Fig. 1 The structure of fiber pressure sensor

菲佐腔体的半径 R 和长度 L , 以及金属膜片厚度 h 是传感器设计中 3 个十分重要的参数^[2-6]. 其中, 腔体半径 R 和膜片厚度 h 共同决定了传感器的量程、压力的线性测量范围等. 下面将通过具体的分析确定 R 、 h 和 L 的合理几何尺寸. 首先为保证传感器有较好的静态性能, 以载荷因数 $Q < 3.5$ (非线性小于 3%) 作为设计的依据^[7].

$$Q = (P/E)(R/h)^4 \quad (1)$$

式中 P 为被测压力, E 为膜的弹性模量. 本文中设计的传感器量程为 0~150 kPa, 金属膜片的杨氏模量 $E = 2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 泊松系数 $\gamma = 0.3$, 由式 (1) 得 R/h 的最大值为: $(R/h)_{\text{max}} = (3.5E/P)^{1/4} = 46$. 实际设计中取值 $R = 4.5 \text{ mm}$, $h = 100 \mu\text{m}$, 故

* 国家自然科学基金(60477030)、教育部重点基金(104210)和重庆市自然科学基金(8415)资助

** Tel: 023-65111973 Email: yjrao@cqu.edu.cn

收稿日期: 2006-06-21

$(R/h) = 45$ 满足要求。

当 R 和 h 确定之后,弹性膜片中心的最大挠度 ΔL_{\max} 即可确定。假设膜片受到的气体压力均匀分布,则弹性膜片可等效为周边固支的圆平板,周边挠度和转角均为零。根据圆平板的的挠度微分方程以及边界条件可求得弹性膜片受到的压力与其形变量之间的关系为^[4]

$$\Delta L(r) = L - L' = \frac{PR^4}{64D} \left| 1 - \frac{r^2}{R^2} \right|^2 \quad (2)$$

式中 r 为膜片上任意一点到腔体中心轴的距离, D 为膜片的抗弯强度,且 $D = \frac{Eh^3}{12(1-\gamma^2)}$, L 和 L' 分别为菲佐腔原长和实际测得的腔长,且仅当 $r = 0$ 时(膜片中心处),膜片挠度取得最大值 $\Delta L_{\max} = 52 \mu\text{m}$ 。也就是说,在膜片挠度小于 $52 \mu\text{m}$ 的范围内,可认为腔长变化量与气体压力呈线性关系。

2 Pisarenko 正弦波解调算法原理

本实验室的前期工作表明^[8],在多传感器的波分频分复用系统中,若采用 FFT 算法解调,当同一通道内两传感器的腔长差低至 $500 \mu\text{m}$ 时,传感器之间的串扰便不可忽略,这在一定程度上也限制了复用数量。为了进一步提高系统的复用能力,本文采用了基于参数化谱估计的 Pisarenko 谐波恢复方案。由于 Fizeau 气体压力传感器的反射信号频率与腔长密切相关,而腔长又是压力的函数,所以压力的求解最终归结为信号频率的解调。

根据 Pisarenko 算法^[1,9-10],设被解调的光强信号 $I(n)$ 是由 p 个实正弦波叠加组成的,即

$$I(n) = \sum_{k=1}^p A_k \cos(2\pi f_k n) \quad (n = 2p + 1, \dots, N) \quad (3)$$

式中 A_k 和 f_k 是待估计参量, N 为样本总数。实际

$$\begin{bmatrix} I(2p) + I(2) & I(2p+1) + I(3) & \cdots & I(p+1) \\ I(2p+1) + I(3) & I(2p+2) + I(4) & \cdots & I(p+2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ I(N-1) + I(N-2p+1) & I(N-2) + I(N-2p+2) & \cdots & I(N-p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} I(2p+1) + I(1) \\ I(2p+2) + I(2) \\ \vdots \\ I(N) + I(N-2p) \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过矩阵的奇异值分解可以求得系数向量 $[a_1, a_2, \dots, a_p]^T$, 将该向量系数首先代入特征多项式中求得 $2p$ 个特征根,然后代入式(5)即可得到正弦信号的频率 f_k 。实验中 $I(n)$ 可以通过光谱仪采集得到,本文中 N 取 500,为了使解调更准确,对应每一个腔长的传感器,这里均考虑至二次谐波的影响,所以 p 取 $2k$, k 为复用的传感器数目。

通过以上的分析可知,光纤菲佐气体压力传感

上,每个菲佐气体压力传感器的干涉光强信号可由下面的公式表示^[9-10]

$$I_R = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \Phi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \Phi} I_i \quad (4)$$

I_R 和 I_i 分别表示反射和入射的光强, R_1 和 R_2 为菲佐腔两端面的反射率, Φ 是干涉仪中光来回传播形成的相位差,可以由式表示: $\Phi = 4\pi nL/\lambda$ 。将式(4)经过归一化后化简可得: $I_R/I_i = 1 + (A/B + \cos \Phi)$, 考虑到 $\cos \Phi$ 的取值范围为 $[-1, 1]$, 所以对式(4)用泰勒级数进一步展开取其二阶近似,并滤掉直流分量可得: $\frac{I_R}{I_i} = C \cos \Phi + D \cos 2\Phi$, 式中 A 、

B 、 C 、 D 是只和 R_1 、 R_2 有关的常数。由此可见,每个传感器的反射信号都可以转变成不同频率的余弦函数之和,即式(3)的形式,从而通过 Pisarenko 正弦波解调算法实现传感器干涉光强信号所包含的不同频率成分的解调。Pisarenko 正弦波恢复算法需要进行频率的估计。对式(3)做 Z 变换得到特征多项式 $\sum_{i=1}^{2p} a_i z^{2p-i} = 0$, 如果 p 个实正弦信号频率互不重复,则 p 个频率值由特征多项式的根决定。由于特征多项式的根都是以共轭对的形式出现的,所以其系数 $a_i = a_{2p-i}$, $i = 0, 1, \dots, p$ 通过求解多项式得到 $2p$ 个共轭特征根,待求的空间频率 f_k 就可以用特征根表示出来

$$f_k = \frac{\arctan[\text{Im}(z_k)/\text{Re}(z_k)]}{2\pi\Delta t} \quad (k = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

式中 $\Delta t = 1/\delta\nu$ 为采样的时间间隔。与特征多项式对应的差分方程为: $I(n) + \sum_{i=1}^{2p} a_i I(n-i) = 0$, 用矩阵形式可以表示为

器的干涉光强 $I(n)$ 是 Φ 的函数,而 $\Phi = 4\pi nL_k/\lambda = 4\pi nL_k \delta\nu = 2\pi f_k$ (n 为空气的折射率, $\delta\nu = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{(N-1)\lambda^2}$ 表示频率域的取样间隔), 因此先求出混合信号的各个空间频率就可得到各个传感器的腔长 $L'_k = f_k/2\delta\nu$, 设传感器的原始腔长为 L_k , 再结合腔长和压力的关系式(2)就可求出第 k 个传感器所承受的压力大小

$$P_k = \frac{16Eh^3}{3r^4(1-\gamma^2)}(L_k - L'_k) = \frac{16Eh^3}{3r^4(1-\gamma^2)} \cdot (L_k - \frac{f_k}{2\delta\nu}) \quad (7)$$

3 复用系统的原理与实现

光纤菲佐气体压力传感器的频分/波分复用系统如图2. 从宽带光源(波长范围为:1 520~1 600 nm)发出的光经过 2×2 耦合器后进入 CWDM, 通过 CWDM 的宽带光被分解成 4 个带宽分别为 20 nm 的通道, 在每一个通道上通过分束器可并联多个不同腔长的压力传感器, 就实现了波分和频分的同时复用. 传感器反射回来的信号进入光谱仪(Si720), 然后由计算机进行数据的采集和后续处理. 为防止光纤端面反射带来的干扰, 将 2×2 耦合器的一端浸入折射率匹配液中.

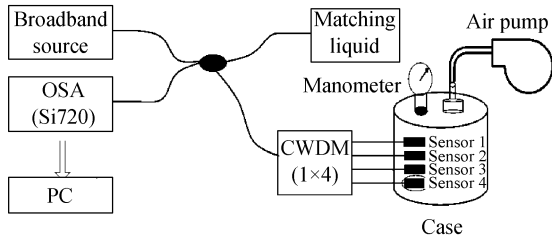


图2 基于 CWDM 的光纤菲佐气体压力传感器复用系统
Fig. 2 Fiber Fizeau pressure sensor system based on CWDM

首先进行了单个传感器的压力测试实验. 实验中采用的传感器(腔长为 300 μm)的典型干涉谱图如图 3. 通过气泵使密封容器内的压力从 0 Pa 缓慢升至 150 kPa, 传感器测得的气体压力与安装在容器上的标准压力计测得的压力对比关系如图 4. 由图 4 可见, 在 0~150 kPa 的气压范围内, 该传感器的重复性良好. 多次实验表明: Pisarenko 算法能够解调的最小腔长变化量 ($L_k - L'_k$) 约为 0.4 μm, 将其代入式 (7) 得到该传感器的压力分辨率为 ~1 kPa, 即 0.67% F. S; 传感器测得的压力值与实际压力的偏差不超过 ±0.28 kPa.

在多传感器的复用实验中, 预先制作了四个不同腔长的传感器. sensor 1 腔长 $L_1 = 300 \mu\text{m}$ 、

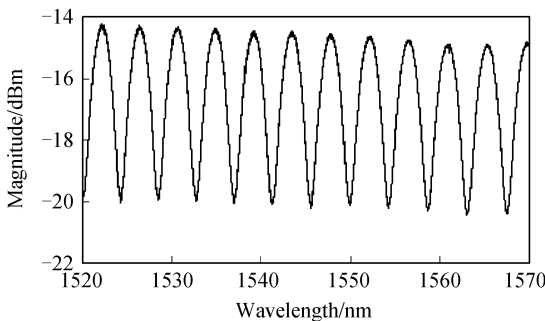


图3 传感器的典型干涉谱图
Fig. 3 Typical interferometric spectrum of a sensor

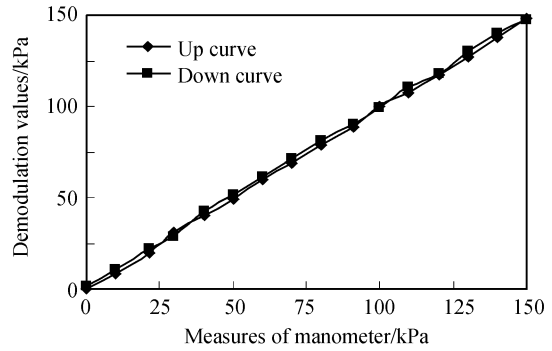


图4 压力实验曲线
Fig. 4 Curves of pressure experiment

sensor2 腔长 $L_2 = 5.18 \text{ mm}$ 、sensor3 腔长 $L_3 = 275.6 \mu\text{m}$ 、sensor4 腔长 $L_4 = 413.98 \mu\text{m}$, 将 sensor1 和 sensor2 并联接入 CWDM 的第一通道(波长范围:1 520~1 540 nm), sensor3 和 sensor4 并联接入 CWDM 的第二通道(波长范围:1 540~1 560 nm)中进行复用. 四个传感器的反射谱如图 5. 对每一个通道的混合信号采用同样的算法分别进行解调, 解调结果为 $L'_1 = 300.08 \mu\text{m}$, $L'_2 = 5.18 \text{ mm}$, $L'_3 = 275.65 \mu\text{m}$, $L'_4 = 413.91 \mu\text{m}$. 由第一通道的解调结果说明, 金属膜片经过镀膜后, 当传感器的腔长达 5.18 mm 时的反射信号强度仍然较高, 完全可以满足实际解调的需要^[11]; 而第二个通道的两传感器的腔长差在 138 μm 的情况下, 通过 Pisarenko 谐波分解算法得到的仍可以准确的解调, 相比较 FFT 算法^[8], 进一步降低了相邻传感器的腔长差, 提高了复用数量, 使 CWDM 四个通道可并联复用的传感器数目可达 (4×45) 个左右, 大大提高了复用能力.

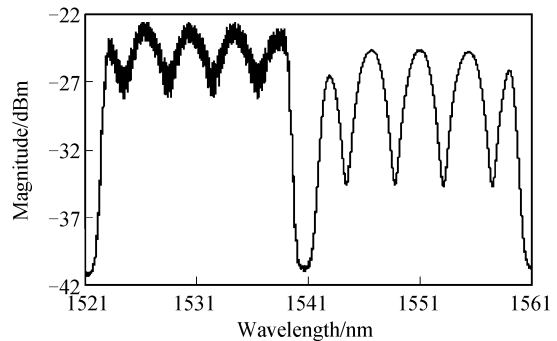


图5 粗波分复用两通道的反射谱
Fig. 5 Reflection spectrum from two CWDM channels

为了研究基于 Pisarenko 解调算法的传感器之间的串扰影响, 本文用一个腔长可以调整的传感器 S 替换第一通道中的 sensor2, 并使 S 的腔长从 1 mm 开始, 每减少 20 μm 采集一次数据进行解调, 以观察传感器 S 腔长的变化对 sensor1 解调结果的影响, 其结果如图 6. 横坐标为传感器 S 与 sensor1 的腔长差, 纵坐标表示 sensor1 的测量误差. 从图 6 可以看出, 当 S 与 sensor1 的腔长相差 100 μm 时, sensor1 的测量误差不超过 0.3 kPa, 说明传感器 S

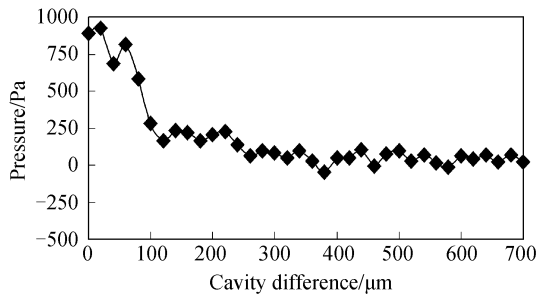


图 6 串扰实验结果

Fig. 6 Results of experimental crosstalk

对 sensor1 的串扰影响较小。

在实际应用中,传感器复用的数目越多,则每个传感器分配的光功率越低,再考虑到传感器之间串扰的影响,可以将同一通道内传感器的腔长差设置的稍大一些(如 $250 \mu\text{m}$),这样仍能并联复用约 80 个传感器,相比无复用大大降低了系统的成本。

4 结论

本文设计了一种新的隔膜式光纤菲佐气体压力传感器,结合频分/波分复用技术,并采用基于参数化谱估计的 Pisarenko 谐波分解算法,将可复用的传感器腔长差降至 $100 \mu\text{m}$,总体可复用的传感器数目提高到 80 个以上,有效地提高了系统的复用能力,进一步降低了系统的成本。实验证明单个传感器的压力分辨率为 $0.67\% \text{ F. S}$,测量误差小于 $\pm 0.28 \text{ kPa}$,在准分布式气体压力传感方面具有很大的应用潜力。

参考文献

- [1] ZHANG Xian-da. Modern signal processing [M]. Beijing: Tinghua University Press, 2002: 65-151.
张贤达. 现代信号处理[第二版][M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 65-151.
- [2] RAO Y J, JACKSON D A, JONES R, *et al.* Development of prototype fiber-optic-based Fizeau pressure sensors with temperature compensation and signal recovery by coherence reading[J]. *J Lightwave Technol*, 1994, **12**(9): 1685.
- [3] RAO Y J, JACKSON D A. A prototype fibre - optic-based Fizeau medical pressure and temperature sensor system using coherence reading[J]. *Meas Sci Tech*, 1994, **5**: 741-741.
- [4] ZHANG Kang-da, HONG Qi-chao. Pressure vessel handbook [M]. Beijing: Labor Relations and Human Resources Press, 1988: 215-218.
张康达, 洪起超. 压力容器手册(上)[M]. 北京: 劳动人事出版社, 1988: 215-218.
- [5] LI Ming, WANG Ming, WANG Ting-ting, *et al.* The design of optical MEMS pressure sensor [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology)*, 2004, **4**(4): 20-24.
李明, 王鸣, 王婷婷, 等. 光纤微机电压力传感器的设计[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2004, **4**(4): 20-24.
- [6] FAN Da-jun. Design of metal diaphragms [M]. Beijing: China Machine Press, 1987: 22-28.
樊大钧. 金属膜片的设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 22-28.
- [7] Institute of Agriculture and Mechanics, Jilin University of Technology. Technology of Strain gauge electrical measurement [M]. Beijing: China Machine Press, 1978: 382-384.
吉林工业大学农机系. 应变片电测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1978: 382-384.
- [8] ZHOU Chang-xue, RAO Yun-jiang, ZHU Tao. SFDM/CWDM of fiber-optic fizeau strain sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1472-1476.
周昌学, 饶云江, 朱涛. 光纤菲佐传感器的波分频分复用方法[J]. 光学学报, 2005, **25**(11): 1472-1476.
- [9] YU Sheng, YAN Bo, CHEN Guang-ju. Retrieving the sinusoidals in noise by the TLS method [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2000, **14**(2): 6-10.
喻胜, 闫波, 陈光举, 等. 一种提取噪声中正弦信号的总体最小二乘法[J]. 电子测量与仪器学报, 2000, **14**(2): 6-10.
- [10] BI Wei-hong. Mathematical models for fiber optical fabry-perot interferometric cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(8): 744-747.
毕卫红. 光纤 Fabry-Perot 干涉仪在传感应用中的数学模型[J]. 光子学报, 1999, **28**(2): 744-747.
- [11] ZHU Yong, ZHANG Jie, CHEN Wei-ming, *et al.* Study on the method of improving efp_i's signal quality [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 544-548.
朱永, 张洁, 陈伟民, 等. 提高光纤 F-P 应变传感器输出信号质量的方法研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(5): 544-548.
- [12] ZHANG Peng, ZHU Yong, CHEN Wei-min. A study on fourier transformation demodulating theory of the gap of optical fiber fabry-perot sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1449-1452.
章鹏, 朱永, 陈伟民. 光纤法布里-珀罗传感器腔长的傅里叶解调原理研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(12): 186-189.
- [13] ZHANG Xiang-dong, LI Yu-lin, PENG Wen-da, *et al.* Pressure and temperature measurement system based on efp_i combined with fbg for oil and gas down-hole [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 864-867.
张向东, 李育林, 彭文达, 等. 光纤复合型气井下压力温度测量系统[J]. 光子学报, 2003, **32**(7): 864-867.

SFDM/CWDM of Fiber-Optic Fizeau Gas Pressure Sensors

TANG Qing-tao¹, RAO Yun-jiang^{1,2}, ZHU Tao¹, ZHOU Chang-xue¹

(1 Key Lab of Optoelectronic Technology and Systems (Education Ministry of China),

Chongqing University, Chongqing 400030, China)

(2 Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks Technologies (Education Ministry of China), University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

Received date: 2006-06-21

Abstract: A fiber-optic Fizeau sensor for gas pressure measurement is described. By using coarse wavelength division multiplexing (CWDM) and spatial-frequency division multiplexing (SFDM) techniques, a large number of sensors array is realized. The structure of the multiplexing system and its working principle are also demonstrated, finally we verify the practicality of our approach via experiment and present a valid demodulation scheme based on the Pisarenko Method to minimize the existing cross-talk. The experimental results show that a pressure accuracy of 0.76% F.S over a pressure range of 0~150 kPa is achieved, this system has a potential capability for multiplexing more than 80 sensors, which could meet the need of multi-points gas pressure measurement in practical applications.

Key words: Optical fiber devices; Optical fiber sensor; Pisarenko demodulation algorithm; Fiber-optic Fizeau interferometer; Coarse wavelength division multiplexing



TANG Qing-tao was born in Shandong, China, in 1981. He received his Bachelor degree in optoelectronic information engineering from Chongqing University. He is pursuing master degree in the optical fiber communication and sensors field at the same academy. His research is mainly focusing on novel fiber-optic communication and sensing devices.