

文章编号: 0253-2239(2010)08-2196-06

基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究

王玉宝 兰海军

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 在频率和时域网络中光纤布拉格光栅(FBG)传感网络的资源极其丰富,但单一的复用组网技术只能利用其一方面的资源,网络资源的利用率不高。为了充分利用传感网络资源,提出了一种新型的基于波分复用(WDM)/时分复用(TDM)的网络复用技术的光纤传感网络设计方案。首先将光纤带宽利用阵列波导光栅(AWG)进行波分复用,然后对波分复用的每一信道进行时分复用。在此基础上分析了网络中的散粒噪声和信道串扰对测量结果的影响。充分利用了光信号在频率和时域上的信息,使传感网络具有了寻址和解调数百个光栅信号的潜在能力。该网络可实现超大容量传感,提高带宽利用率,降低成本,具有很好的应用前景。

关键词 光纤传感网络;阵列波导光栅;波分复用;时分复用;波/时分复用传感网

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103008.2196

Study of Fiber Bragg Grating Sensor System Based on Wavelength-Division Multiplexing /Time-Division Multiplexing

Wang Yubao Lan Haijun

(The College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei. 066004, China)

Abstract The available resources of fiber bragg grating (FBG) sensor network is extremely rich in the frequency and time domain. A network employing single multiplexing technology can only use the resources on the one hand and the utilization ratio of network resources is low. In order to improve the efficiency of sensor network, a new type of FBG sensor network based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing (WDM/TDM) techniques is designed. The fiber bandwidth is employed to WDM with arrayed waveguide grating (AWG), and then to TDM on each WDM channel. The analysis results show that the system performance is affected by shot noise and crosstalk. Making full use of optical wavelength and time domain information, the system shows the potentialities of interrogating and demodulating signals from several hundreds of FBG sensors. The sensor network can achieve a large capacity, increase bandwidth utilization ratio, reduce costs and have a good application prospects in the future.

Key words fiber sensor network; arrayed waveguide grating; wavelength division multiplexing; time-division multiplexing; WDM/TDM sensor network

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG),简称光纤光栅,是近20年来迅速发展起来的微型光学元件,大大提高了光纤器件的性能,在光纤传感领域有着广泛的应用前景。光纤光栅为光纤传感技术开辟了一个新的应用研究领域,可以制作测量应力和温度等参量的光纤光栅传感器^[1~3]。用于传感信息的光纤有着相当大的带宽,但传统的单一组网技术中,单一光源和传感器占用整个带宽资源是极大浪费,带宽得不到充

分的利用。利用复用技术可以实现对各种传感参量的准分布式测量,于是引入了波分复用(WDM)^[4~7]技术,突出的特点是将可利用的带宽划分为多个传感信道来提高带宽资源的利用率。但在WDM光纤光栅传感系统中,光栅传感器复用个数受光源谱宽、光栅带宽以及相邻光栅间距的影响,数量很有限。考虑到传感参量的检测周期往往较长,在时域上也可以得到复用。于是又引入了时分复用(TDM)^[8,9]技术,在同一传输信道把每个传感器的

收稿日期: 2009-09-16; 收到修改稿日期: 2009-09-29

作者简介: 王玉宝(1968—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信技术、传感技术等方面的研究。

E-mail: wyb@ysu.edu.cn

反射光谱在时域进行划分,实现传感复用。但是在 TDM 光纤光栅传感网络中,一般都采用串行阵列,其复用的光栅传感器类型相同,且传感器个数受传输时间限制。本文提出了一种基于 WDM/TDM 的光纤传感网络,将同一宽谱光源先利用阵列波导光栅(AWG)进行波分复用,然后对波分复用的每一信道再进行时分复用,使复用光栅传感器的数目得以显著提高,提高了带宽利用率,实现了超大容量传感。

2 WDM/TDM 传感网络框图

图 1 为多 FBG 传感器复合传感网络的示意图,该传感网络的 WDM 解/复合器利用的是 AWG,具

有反应速度快、精确、复合程度高和插入损耗少等优点。一个平均 40 端口的 AWG 的插入损耗为 5~7 dB,而同样一个 32 端口的分配器却有 16~17 dB 的损耗^[10,11]。TDM 部分采用树状拓扑结构,选择这种拓扑结构是因为它可以在同一信道采用不同类型的传感器。同串联的拓扑结构相比,当反射的光谱在一定程度上发生重叠时,它可以避免“多反射”和“光谱阴影”的影响^[8]。图中 T_w 为发射宽谱光谱持续时间, T_q 为宽谱光源发射光谱的重复周期(宽谱光源发出光谱到解调系统解调结束的时间),在此期间,不会在光纤中出现光波的叠加而产生驻波和拍频等现象。

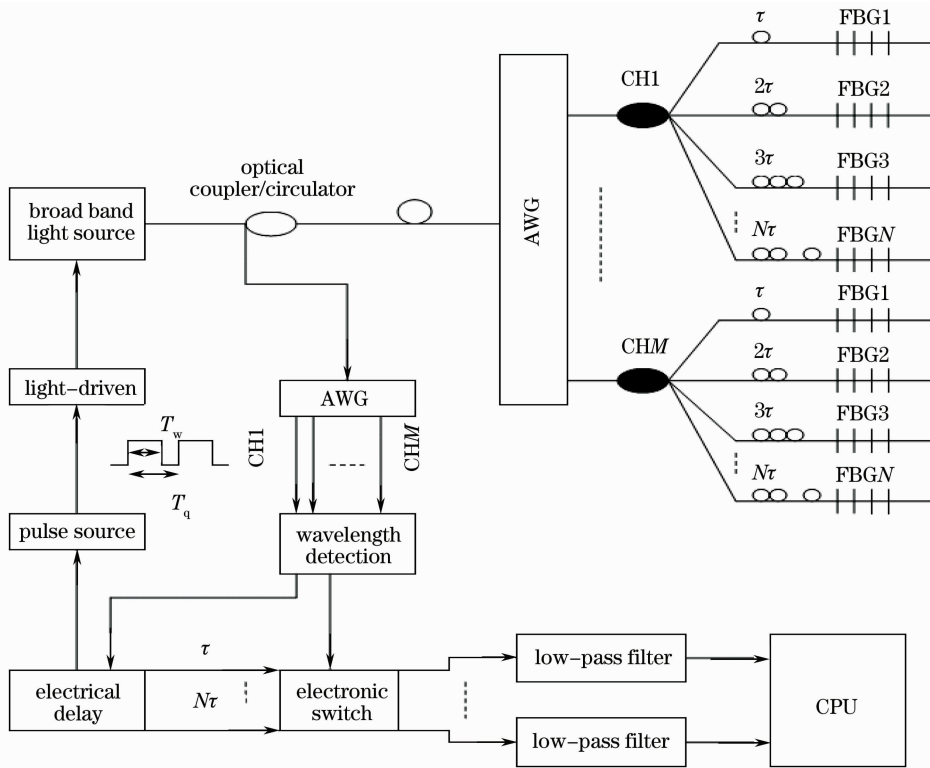


图 1 基于 WDM/TDM 技术的 FBG 阵列传感网

Fig. 1 Schematic diagram of FBG array sensing system based on TDM/WDM techniques

3 网络原理

3.1 FBG 反射原理

FBG 对入射光的反射具有选择性^[1]。其反射的窄带光中心波长满足布拉格条件

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 λ_B 为中心波长; n_{eff} 为光栅的有效折射率,即折射率调制幅度大小的平均效应; Λ 为光栅周期,即折射率调制的空间周期。

FBG 的反射波长取决于反向耦合模的有效折

射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ ,任何使这两个参量发生改变的物理过程都将引起光栅波长的漂移,测量此漂移量就可直接或间接地感知外界物理量的变化。一般情况下光纤光栅的反射波形可近似为高斯形^[4]。其反射光谱为

$$B_l(\lambda) = b_l \exp\left[-4(\ln 2) \frac{(\lambda - \lambda_{kl})^2}{\Delta\lambda_{kl}^2}\right], \quad (2)$$

式中 λ_{kl} 为高斯波形的中心波长, b_l 为 FBG 的反射率, $\Delta\lambda_{kl}$ 为高斯波形的半谱宽。

3.2 AWG 的原理

考虑到 AWG 设计灵活、滤波特性好,性能长期稳定,具有高重复性,高可靠性,低插损,低串扰,易于与光纤有效耦合以及半导体器件集成能力强等优点^[12~14],因此本系统选择 AWG 作为波分复用所使用的波分解/复合器。

AWG 实际上是一个在相邻信道存在一个固定的光程差的阵列波导光栅,从而形成阶梯光栅实现波分解/复合。AWG 的光谱透射函数一般为高斯函数形式,其表达式为^[4]

$$A_s(\lambda) = a_s \exp\left[-4(\ln 2) \frac{(\lambda - \lambda_{as})^2}{\Delta\lambda_{as}^2}\right], \quad (3)$$

式中 a_s 为波形峰值透射率, λ_{as} 为 AWG 第 s ($0 < s < M+1$) 信道的高斯函数的中心波长, $\Delta\lambda_{as}$ 为 AWG 的第 s 信道的高斯函数的半谱宽。

假设信道 CH(s) 光纤光栅传感器受外场作用时波长的“红移量”为 $\Delta\lambda_{s+}$, “蓝移量”为 $\Delta\lambda_{s-}$ ^[15]。则第 s ($0 < s < M+1$) 信道受外界外场作用的漂移量 δ_s 为

$$\delta_s = |\Delta\lambda_{s+} - \Delta\lambda_{s-}|. \quad (4)$$

考虑到 FBG 在制作过程中可能存在一定的制作误差,导致传感器的中心波长存在 $\pm\Delta\epsilon$ 的误差。故 FBG 的波长漂移范围为 $\Delta\lambda_\epsilon$

$$\Delta\lambda_\epsilon = \delta_s + 2\Delta\epsilon. \quad (5)$$

因此 AWG 的第 s ($0 < s < M+1$) 信道的半谱宽应满足条件

$$\Delta\lambda_{as} \geq \Delta\lambda_\epsilon, \quad (6)$$

只要满足(6)式,就可认为 WDM 信道彼此间完全区分。

假设 TDM 中的相邻信道的时延相等,用 τ 表示,若重复周期 T_q 和 AWG 中任一信道脉冲的半峰全宽 T_w 满足条件

$$\tau \geq T_w, \quad T_q \geq N\tau + 2L/v, \quad (7)$$

式中 L 为传输距离, v 为光脉冲在光纤中传播的速度,则信号到达光电探测器后就可以被电子开关在时间上区分开来。

4 性能分析

设 I_0 为入射光强,每个 FBG 信道上的来回线路上的损耗记成 $f_{s,l}^2$ 。则第 s 信道第 l 个传感器反射回来的光功率为

$$I_{s,l}(\lambda) = \frac{f_{s,l}^2 I_0 A_s^2(\lambda) B_l(\lambda)}{N^2},$$

$$s = 1, 2, \dots, M, \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

光电探测器接收到的平均光强为

$$I_{s,l,\text{avg}}(\lambda) = \frac{f_{s,l}^2 I_0 A_s^2(\lambda) B_l(\lambda)}{N^2} \frac{T_w}{T_q},$$

$$s = 1, 2, \dots, M, \quad l = 1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

由(2),(3),(9)式和当 x 很小时, $e^{-x} \approx 1 - x$ (其中 $\lambda - \lambda_{sl}$ 为能量泄露造成的微小误差),可得

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_{sl}}\right)^2 = \frac{1}{4(\ln 2)} \times \frac{N^2 T_q}{f_{s,l}^2 I_0 A_s^2(\lambda) b_l T_w} \Delta I, \quad (10)$$

式中 ΔI 为 TDM 中信道之间的能量泄露, $\Delta\lambda$ 为能量泄露造成的波长检测误差。主要来自于两方面:一是信道散粒噪声;一是信道内不同传感器用户信号的串扰。

为了讨论方便,假设电子开关都是理想的,不会造成误差。经过解调以后,散粒噪声引起的能量的波动为^[8]

$$I_{s,l,\text{shot}} = \sqrt{\frac{2qBf_{s,l}^2 I_0 b_l T_w}{RN^2 T_q}}, \quad (11)$$

式中 R 为光电探测器反射率, B 为检测带宽,假定各信道的检测带宽是相等的。把(11)式代入(10)式就得到了散粒噪声引起的波长检测误差

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_{sl}}\right)^2 = \frac{1}{4(\ln 2)A_s^2(\lambda)} \times \sqrt{\frac{2qBT_q N^2}{RI_0 b_l T_w f_{s,l}^2}}. \quad (12)$$

对于信道内不同传感器用户信号的串扰,主要由信号时延和光源消光比引起。实际上,当光源关闭的时仍有一小部分光从光源泄露出来导致串扰。消光比定义为光源最小的功率(I_L 光源关闭时的功率)和光源最大的功率(I_H 光源正常发光时的功率)的比值, $\varphi = 10\lg(I_L/I_H)$ 。

串扰可以分为两类:

1) 由于时延、消光比,信道之间能量泄露造成的一阶相干串扰。

串扰产生的原理如图 2 所示,其中 T_0 为 FBG 传感器反射光信号的半峰全宽, τ 为相邻的信道的时延。由于在时延 τ 内,串扰能量分布随时延 τ 不

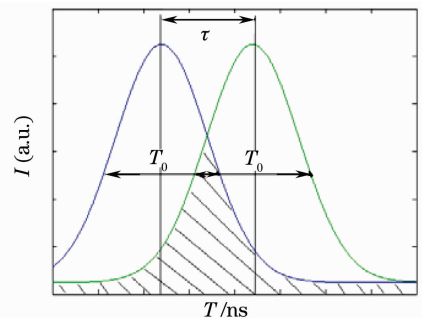


图 2 信道串扰模型

Fig. 2 Schematic of channel crosstalk

同而呈现不均匀性,光检测器在 T_0 时间内检测到的串扰能量为平均值,则检测器对应延时 τ 接收的平均串扰能量可作如下推导:

设从光源发出来的电场为

$$E(t) = \sqrt{I_0} \times \exp[j(\frac{2\pi c}{\lambda_0}t)], \quad (13)$$

式中 c 为光速, λ_0 为每个 FBG 反射波长。则一阶相干串扰引起的能量波动为

$$I_{s,l,1} = \frac{2T_w}{T_q} \frac{T_0}{\tau} \phi \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{Re}\langle E_i(t)E_j(t) \rangle, \quad (14)$$

式中 T_0/τ 为相邻信道的串扰因子。 $\tau=0$ 时,两个相邻时隙用户传感信号重合,无法分辨,串扰为最大; $\tau=\infty$ 时,表示两个相邻时隙用户传感信号理想分离,串扰为最小; τ 的大小与复用的用户数直接相关。由(10),(13),(14)式得到第一类信道串扰引起的波长检测误差

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_M}\right)^2 = \frac{1}{A_s^2(\lambda)} \frac{T_0}{\tau} \phi \times \sum_{j=1, j \neq i}^N \sqrt{\exp\left[-4(\ln 2) \frac{(\lambda_i - \lambda_j)^2}{\Delta\lambda_M^2}\right]} \cos(v_{i,j} - \phi), \quad (15)$$

式中 $v_{i,j} = \frac{2\pi c(i-j)\tau}{\lambda_0}$, ϕ 为初相。由于消光比一般较小,这里消光比引起的二阶相干串扰同一阶串扰相比相当小^[8],可以忽略不计。

2) 由于光源的消光比产生的非相干串扰。

非相干能量串扰引起的能量波动为

$$I_{s,l,2} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{T_w}{T_q} \frac{f_{s,l}^2}{N^2} I_0 \phi^2 B_j(\lambda), \quad (16)$$

把(16)式代入(11)式得到第二类能量串扰而引起的波长检测误差为

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_M}\right)^2 = \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{\phi^2}{4(\ln 2)A_s^2(\lambda)} \times \exp\left[-4(\ln 2) \frac{(\lambda_i - \lambda_j)^2}{\Delta\lambda_M^2}\right], \quad (17)$$

根据以上分析得到的结论,假设以第一个传感器为对象,对第二个到第 N 个传感器对第一个传感器的影响进行了模拟分析。设定参数为: $I_0 = 1 \text{ mW}$, $f_{s,l}^2 = 0.5 \text{ dB}$, $\phi^2 = -60 \text{ dB}$, $a_s = 0.801$, $\Delta\lambda_M = 0.1 \text{ nm}$, $R = 1$, $b_l = 1$, $T_0 = 0.1 \text{ ns}$, $T_q = 70 \text{ }\mu\text{s}$, $T_w = 10 \text{ ns}$, $\tau = 100 \text{ ns}$, $B = 1 \text{ s}$ 。

用以上参数来分析散粒噪声引起的波长检测误差,假定 AWG 中的一个信道中的复用的传感器数为 100 时,由(12)式可知,散粒噪声所造成的波长检

测误差 $\Delta\lambda$ 为 $0.025 \text{ }\mu\text{m}$ 。

考虑串扰因素后,图 3 给出了波长检测误差和相邻用户的时延关系。从图上可以看出,随着相邻用户时延的增加波长检测误差越来越小。另外从图中还可以看出随着传感器 N 的增加,信道的波长检测误差越来越大。当 $N=100$ 时,由(15)式可知一阶相干串扰造成的波长判决的误差 $\Delta\lambda$ 为 $8.32 \text{ }\mu\text{m}$ 。由(17)式可以得出第二类非相干串扰的波长判决的误差 $\Delta\lambda$ 为 $1.2 \text{ }\mu\text{m}$ 。以上分析结果表明,不同用户间能量串扰造成的测量误差远大于散粒噪声引起的测量误差,前者是产生测量误差的主要因素。

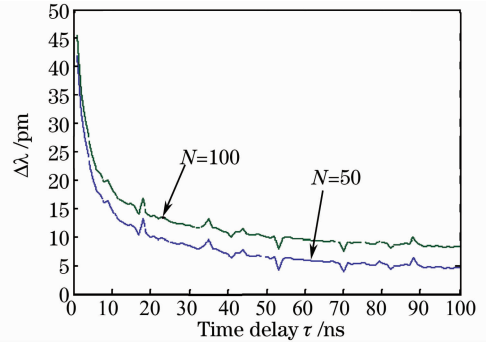


图 3 波长检测误差

Fig. 3 Wavelength detection error

5 原理与实验结果

为验证上述功能,设计了如图 4 所示的装置。

如图 4 所示,其中 $G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_{21}, G_{22}, G_{23}, G_{31}, G_{32}, G_{33}$ 的反射率依次为 $90.1\%, 94\%, 90\%, 91\%, 96.7\%, 89.0\%, 90.7\%, 89.7\%, 84.5\%$ 。CH1, CH2, CH3 各通道的传感器在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的理论反射波长为 $1545.5, 1547.4$ 和 1549.6 nm , $40\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的理论反射波长为 $1546, 1548$ 和 1550 nm ,

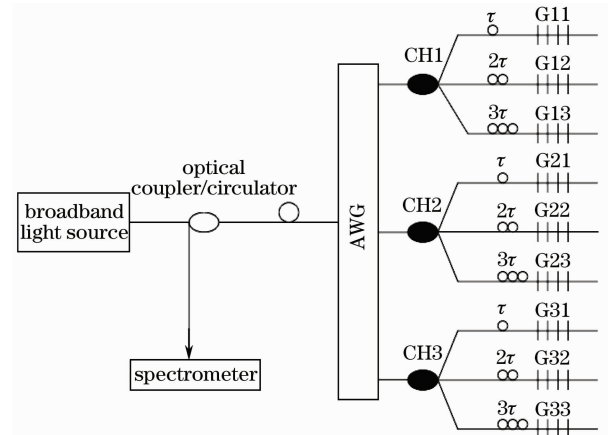


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental arrangement

70 °C 条件下的理论反射波长为 1546.75, 1548.77 和 1550.7 nm。实验中 CH1, CH2, CH3 中的 G_{12}, G_{22}, G_{32} 置于室温(20 °C)下,把 G_{11}, G_{21}, G_{31} 置于 40 °C 中的恒温箱, G_{13}, G_{23}, G_{33} 置于 70 °C 中的恒温箱,其中耦合器的插入损耗为 0.4 dB,线路总损耗为 30.1 dB。

由(1)式可知温度变化引起的光纤光栅反射波长移动可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_g}{\lambda_g} = (\alpha_s + \zeta_s) \Delta T, \quad (18)$$

式中 $\zeta_s = \frac{1}{n_{\text{eff}}} = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta T}$ 为光纤的热光系数,描述光纤折

射率随温度的变化关系; $\alpha_s = \frac{1}{\Lambda} \frac{\Delta\Lambda}{\Delta T}$ 为光纤的热膨胀系数,描述光栅的栅距随温度变化的关系。从(18)式可以看出, $\Delta\lambda_g$ 与 ΔT 之间呈线性关系,通过测量光纤光栅反射波长的移动 $\Delta\lambda_g$,便可以确定温度。

实验采用中心波长为 1550 nm,峰值功率为 1 mW,均方差为 20 nm 的近似高斯分布的 LED 光源,如图 5 所示。这里采用的三通道的 AWG,其插入损耗为 1 dB,透射率为 80.1%,其透过光谱如图 6 所示。实验中每个通道分支上的三个传感器光栅在相同温度下反射的布拉格波长都是相同,且 FBG 波长随温度的漂移均满足(18)式,呈线性关系。

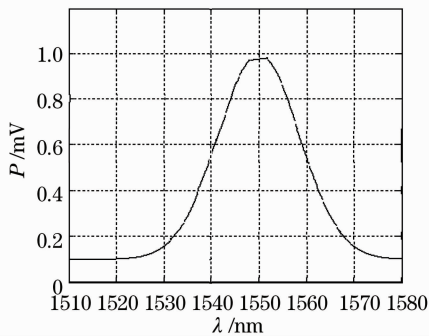


图 5 宽带 LED 光源的功率谱

Fig. 5 Power spectrum of broadband LED

图 1 延时 $\tau=100$ ns,时钟控制系统运作,它触发延时信号发生器。与时钟信号同频的、脉宽为 100 ns 的延时信号用来控制电子开关。延时量编程可控,以确保被测信号到达时开关处于导通状态^[16]。

图 7 为光谱仪观察到的实验结果,可以看出随着温度的变化反射光谱的波长也发生了漂移,且各传感器的反射波长符合其理论反射波长,从而证明本系统具有 WDM 解调能力。图 8 为 CH1 中反射光谱在 TDM 部分解调通过示波器观察到的实验结果,结果表明通过时钟控制,准确解调出期望用户信号。从而证明本系统具有在时域上的解调能力。

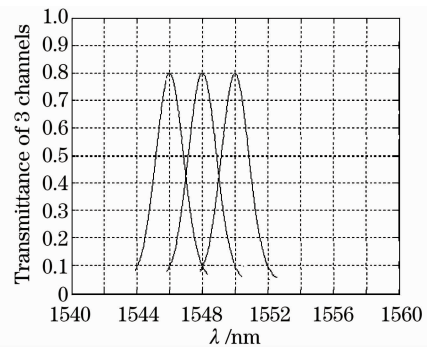


图 6 AWG 的透射光谱

Fig. 6 Transmission spectra of AWG

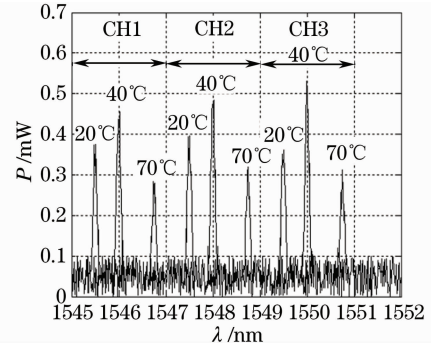


图 7 WDM 解调实验结果示意图

Fig. 7 Diagram of WDM demodulation results

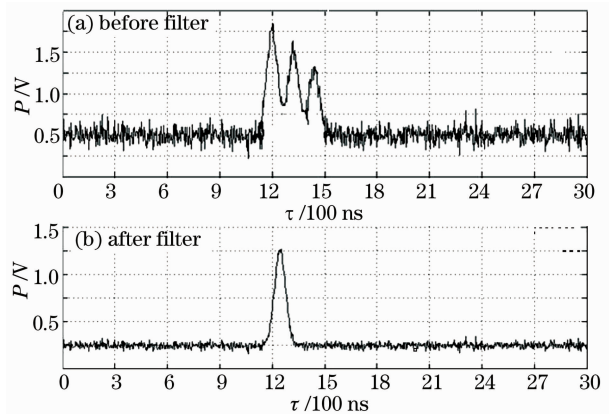


图 8 TDM 实验结果示意图

Fig. 8 Schematic diagram of TDM experimental results

6 结 论

提出一种新型的 WDM/TDM 光纤传感网络,首先利用 AWG 在频域上进行复用,然后对频域上复用的每一信道进行时分复用。因此该系统继承了 WDM 和 TDM 系统的优点,大大提高了系统的容量。本文对系统性能进行了理论分析,特别对引起光纤光栅传感波长判决的误差因素进行了详细论证,结果表明信道串扰是影响系统性能的主要因素,而信道噪声影响相对较小。并且进行了实验,实验

结果表明信道串扰和信道噪对实验结果的影响可以忽略,可以实现光纤光栅传感阵列的寻址,该系统方案可有效提高光纤传感网络资源利用率,降低成本,对大容量传感,具有良好的适用性。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1462
- 2 Yun Jiang Rao, D. J. Webb, D. A. Jackson *et al.*. In-fiber Bragg-grating temperature sensor system for medical applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(5): 779~785
- 3 Yu Youlong, Tam Hwayaw. Active spatial/wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(2): 131~134
余有龙, 谭华耀. 有源波、空分复用光纤光栅传感网络 [J]. 中国激光, 2002, **29**(2): 131~134
- 4 Y. Sano, T. Yoshino. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(1): 132~139
- 5 Rao Yunjiang, Luo Xiaodong, Ran Zengling. A 100 km fiber Bragg grating sensor system based on swept laser and optical amplification [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 680~683
饶云江, 罗小东, 冉曾令. 基于扫描激光器和光放大的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统 [J]. 中国激光, 2007, **34**(5): 680~683
- 6 P. C. Peng, J. H. Lin, H. Y. Tseng *et al.*. Intensity and wavelength-division multiplexing FBG sensor system using a tunable multiport fiber ring laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **16**(1): 230~232
- 7 Cao Xue, Yu Youlong, Liu Shengchun *et al.*. Interrogation techniques for fiber Bragg grating sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1405~1408
曹 雪, 余有龙, 刘盛春等. 具有有源闭合腔的光纤光栅传感系统地址查询技术 [J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1405~1408
- 8 C. C. Chan, W. Jin, H. L. Ho *et al.*. Performance analysis of a time-division-multiplexed fiber Bragg grating sensor array by use of a tunable laser source [J]. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, 2000, **6**(9): 741~749
- 9 Yu Youlong, Liu Shenchun, Hwayaw Tam *et al.*. Time-domain addressing technique for fiber Bragg grating sensor system with the function of real-time monitoring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 865~868
余有龙, 刘盛春, 谭华耀等. 具有实时监测能力的光纤光栅传感系统时域地址查询技术 [J]. 光学学报, 2005, **25**(7): 865~868
- 10 C. Bock, J. Prat, S. D. Walker. Hybrid WDM/TDM PON using the AWG FSR and featuring centralized light generation and dynamic bandwidth allocation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12): 3981~3988
- 11 Zhu Daqing. A way of adjacent crosstalk reduction for AWGs [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 313~317
朱大庆. 一种降低阵列波导光栅相邻信道串扰的方法 [J]. 中国激光, 2004, **31**(3): 313~317
- 12 Zhu Daqing, Xu Zhen'e. Study on a temperature-insensitive arrayed wave guide grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **24**(7): 907~911
朱大庆, 许振鄂. 一种温度不敏感型阵列波导光栅的研究 [J]. 光学学报, 2004, **24**(7): 907~911
- 13 Huang Jingtang, Huang Xuguang, Zhao Huawei. Quasi-distributed fiber Bragg grating sensor using the interrogation of arrayed waveguide grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2067~2071
黄景堂, 黄旭光, 赵华伟. 阵列波导光栅解调的准分布式光纤光栅传感器 [J]. 光学学报, 2008, **28**(11): 2067~2071
- 14 Huang Huamao, Liu Wen, Huang Dexiu. Analytical solutions for the temperature stability of central wavelength in arrayed waveguide gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1725~1729
黄华茂, 刘 文, 黄德修. 阵列波导光栅中心波长温度稳定性的研究 [J]. 光学学报, 2007, **27**(10): 1725~1729
- 15 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi *et al.*. Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 330~336
张伟刚, 开桂云, 董孝义等. 光纤光栅多点传感的理论实验研究 [J]. 光学学报, 2004, **24**(3): 330~336
- 16 Yu Youlong, Tam Hwayaw, Wang Qi. Passive fiber Bragg grating sensor system using combined spatial and time division multiplexing technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1313~1315
余有龙, 谭华耀, 王 骐. 无源式光纤光栅空、时分复用传感系统 [J]. 光学学报, 2001, **21**(11): 1313~1315