

面向光接入网的光纤光栅传感数据数字化系统

王玉宝 管超

(燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 利用现有的光纤通信网实现对光纤光栅传感网络的远程监控,既可以避免重新铺设传感信道,节约成本,又可以增加传感网组网的灵活性。提出了一种基于阵列波导光栅(AWG)的面向光接入网的光纤布拉格光栅(FBG)传感网传感数据数字化系统,系统能够快速实现对携带传感信息的FBG反射波长的数字化。分析了系统的工作原理及主要误差来源,并设计了传感数据成帧模块的结构及适于在光接入网中传输的传感数据帧结构。采用OptiSystem/Matlab协同仿真的方法对一个 3×3 光纤光栅传感网络进行了仿真实验,实现了在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内精度为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度监测,能够满足日常温度监控需要。实验结果表明了该方案的可行性。

关键词 光学设计;光纤传感;传感数据数字化;传感数据帧;光纤布拉格光栅;阵列波导光栅

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.092202

Optical Access Network Oriented Fiber Grating Sensing Data Digitalization System

Wang Yubao Guan Chao

(Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract Remote monitoring for optical fiber grating sensing network making use of existing optical fiber communication network can not only avoid relaying sensing channel, thereby saving the cost, but also increase the sensing network flexibility. A new sensing data digitalization system is proposed based on arrayed waveguide grating (AWG). Quick digitalization of fiber Bragg grating (FBG) reflecting wavelengths which carry sensing information can be achieved. The operating principle and the main error source are analyzed. The sensing data framing module as well as the frame structure is designed. The simulation of a 3×3 fiber grating sensor network is carried out with OptiSystem/Matlab co-simulation approach. The accuracy of $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the range of $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ is realized, which can satisfy normal temperature monitoring requirement. The simulation results show the feasibility of the scheme.

Key words optical design; optical fiber sensing; sensing data digitalization; sensing data frame; fiber Bragg grating; arrayed waveguide grating

OCIS codes 220.4830; 230.5160; 250.4745; 280.4788

1 引言

光纤光栅传感器因其体积小、无源操作、抗电磁干扰、耐腐蚀、灵敏度高、环境适应能力强和易于实现分布式传感等^[1]优点而被广泛用于民用工程、航空航天、船舶工业、电力工业、石油化工和医学等领域^[2]。目前以光纤布拉格光栅(FBG)为传感器件的研究成为了传感领域的一大热点。在实际的传感应用中,单一FBG传感器的性价比很低,人们相继提出了波分复用(WDM)、时分复用(TDM)、空分复用(SDM)等传感网络复用技术。由于单一的复用技术都存在自身的缺陷,使得复用的传感器数目受限,难以满足分布式传感系统发展的需求,所以提出了结合各种复用技术的混合复用网络,如WDM/TDM混合复用网络^[3]、WDM/SDM混合复用网络^[4]、SDM/TDM混合复用网络^[5]以及WDM/SDM/TDM混合复用网络^[6]等。

收稿日期: 2012-05-24; **收到修改稿日期**: 2012-06-12; **网络出版日期**: 2012-08-03

基金项目: 河北省自然科学基金(F2011203067)资助课题。

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

当前对于光纤光栅传感网络的研究多集中于现场监控,然而并非所有的被测区域都可以采用这种方式。光纤光栅传感网远程监控可以弥补现场监控的不足,而且信息可以统一在监控中心解调,实现统一调度,这样既节约了成本,又提高了效率。本文提出了一种新的面向光接入网(OAN)的光纤光栅传感信息数字化采集系统,可以快速检测携带传感信息的光信号并输出相应的二进制脉冲序列,然后将序列组装成适于在接入网中传输的传感数据帧,以通过现有的接入网实现远程监控。

2 工作原理及系统结构

2.1 工作原理

系统结构框图如图 1 所示。宽谱窄脉冲光源发出的周期窄脉冲经环行器、耦合器、光纤延迟单元进入光纤光栅传感网络,携带信息的反射光信号经原路返回至环行器,由环行器进入阵列波导光栅(AWG),AWG 将输入的混合光信号按波长衍射至不同的输出端口。波长数字化单元是该数字化系统的核心部分,为触发型光电器件阵列,其结构如图 2 所示。它可以检测接收到的光强度,控制中心控制序列存储器输出相应的二进制数字脉冲序列,完成传感信息的数字化。序列存储器中存有预先测量的 FBG 传感器波长-变量转换表。数字化后的脉冲数据送入传感数据成帧模块,完成传感数据的组装成帧。

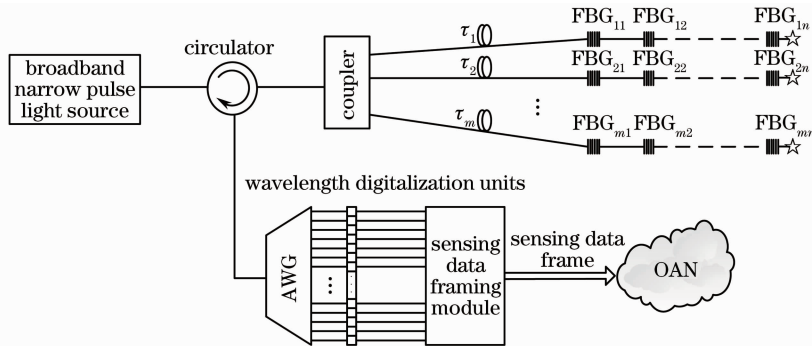


图 1 传感数据数字化系统结构图

Fig. 1 Schematic of sensing data digitalization system

FBG 为波长调制型传感器,即待测物理量对 FBG 的反射波长进行调制,因此准确识别反射波长的微小偏移是实现 FBG 传感的关键所在。为此人们提出了多种识别方案,其中,AWG 具有良好的应用前景。AWG 是一种基于平面波导技术的无源光器件,已被广泛用于制作各种光通信器件。近年来,随着制作工艺及性能的不不断提高^[7~9],AWG 逐渐被用于光纤传感领域^[10,11],实现了快速、高分辨率传感解调系统。

图 1 所示系统中传感网络部分采用了 WDM/TDM 混合复用的工作方式,每一条支路中采用 WDM,各 FBG 传感器中心波长不同,而且当测量被测物理量时,相邻传感器波长移动范围互不重叠;同一列 FBG 传感器的中心波长相同,这样实现了对相同波长资源的再利用。各支路之间采用 TDM 方式,通过延时区分每一条支路,这样就可以准确地定位网络中的每一个传感器。

2.2 成帧模块及传感数据帧结构

传感数据成帧模块的结构如图 3 所示。AWG 各通道波长数字化后的数据脉冲传输进入传感数据成帧模块,模块先将这些数据寄存在缓存中,等传感网络中所有的传感数据都到达时,开始组装数据帧。传感数据帧的组装必须在光源的一个脉冲周期内完成,并且要包含传感网络中所有传感器的传感信息。组装过程如下:模块调度控制中心从缓存中按顺序提取传感数据,依次为每个 FBG 传感器的传感数据添加包头、地址、工作状态、传感类型、包尾等组成传感数据包,待所有的传感数据包组装完成后,再给所有的数据包添加帧头帧尾,最终完成传感数据的封装成帧。成帧模块负责组装传感数据的同时,还完成速率的调整,使得由

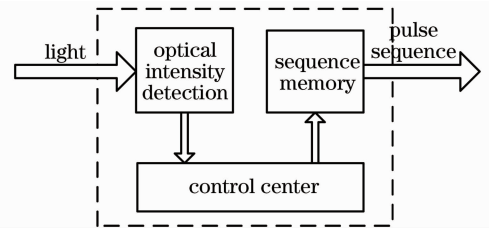


图 2 波长数字化单元

Fig. 2 Wavelength digitalization unit

模块输出的帧速率适合于现行的光接入网。封装完成的传感数据帧结构如图4所示。由于该数据帧是在光纤光栅传感网与接入网之间传输,其物理距离相对较短,可以忽略信号沿线路传播的延时展宽,所以每个FBG传感数据包之间并未设置保护间隔。

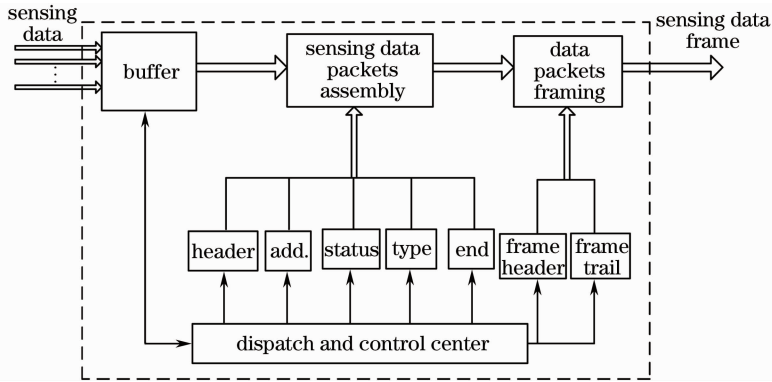


图3 传感数据成帧模块

Fig. 3 Sensing data framing module

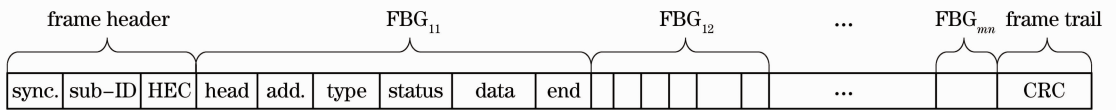


图4 传感数据帧结构

Fig. 4 Frame structure of sensing data

3 光纤光栅传感原理

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性,通过外界入射光子和纤芯内离子相互作用引起折射率永久性变化,从而在光纤纤芯内形成光栅。由耦合波理论可知,当满足相位匹配条件时,光栅的布拉格波长为^[1]

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

式中 n_{eff} 为光栅的有效折射率, Λ 为光栅周期。

对(1)式两边取微分得

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda. \quad (2)$$

由(2)式可以看出,当 n_{eff} 或 Λ 改变时,布拉格波长将发生变化。光纤光栅的中心波长移动量与温度和应变的关系可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon, \quad (3)$$

式中 $\alpha_f = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$ 为光纤的热膨胀系数, $\xi = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ 为光纤材料的热光系数, $P_e = -\frac{1}{n} \frac{dn}{de}$ 为光纤材料的弹光系数。当光栅周围的温度、应变等待测物理量发生变化时,光栅周期 Λ 或纤芯有效折射率 n_{eff} 发生变化,从而反射中心波长发生变化,即反射光中心波长的偏移反映了待测物理量的变化情况。

4 波长数字化单元工作原理分析

波长编码单元为基于光强度检测的触发型光电转换器件,当检测到的光照强度超过一定值时,单元会触发一串与该通道波长相对应的二进制脉冲序列。

FBG 反射谱 $R_{\text{FBG}}(\lambda)$ 与 AWG 通道透射谱函数 $T_{\text{AWG}}(\lambda)$ 可近似地用高斯函数^[12,13]表示为

$$R_{\text{FBG}}(\lambda) = \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_{\text{FBG}})^2}{2\sigma_{\text{FBG}}^2}\right], \quad (4)$$

$$T_{\text{AWG}}(\lambda) = \sum_{i=1}^n \exp\left\{-\frac{\{\lambda - [\lambda_1 + (i-1)\Delta\lambda]\}^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (5)$$

式中 λ_{FBG} 为 FBG 的中心波长, σ_{FBG} 决定 FBG 的半峰全宽(FWHM)值; n 为 AWG 的总通道数, λ_1 为第一个通道的中心波长, $\Delta\lambda$ 为通道波长间隔, σ 决定 AWG 的 FWHM 值, $\sigma = \tau_{\text{FWHM}} / (2\sqrt{2\ln 2})$ 。由(5)式可得 AWG 第 k 个通道的透射谱函数为

$$T_{\text{AWG}}(k, \lambda) = \exp\left\{-\frac{\{\lambda - [\lambda_1 + (k-1)\Delta\lambda]\}^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (6)$$

根据(4)式和(6)式可得 AWG 第 k 个通道的输出光强度为

$$P(k) = (1-L) \int_0^{\infty} I_s(\lambda) \cdot R_{\text{FBG}}(\lambda) \cdot T_{\text{AWG}}(k, \lambda) \cdot d\lambda, \quad (7)$$

式中 L 为系统的总损耗, $I_s(\lambda)$ 为光源的强度。在设计的光纤光栅传感系统中, 光强度的检测就是根据(7)式进行的。

在实际应用时, 可以预先设定一个强度值 P_0 , 如图 5 所示。当 FBG 的中心波长偏移至 $\lambda_{\text{P}0-} \sim \lambda_{\text{P}0+}$ 范围之内, 即当检测到的光强度值超过 P_0 时, 波长数字化单元就输出相应的波长脉冲序列。由图 5 可以看出, 该系统的波长误差为 $\lambda_e = \lambda_{\text{P}0+} - \lambda_{\text{AWG}}$, 根据预先测定的波长移动与被测量变化的关系, 就可以将 λ_e 转化为被测量的测量误差。

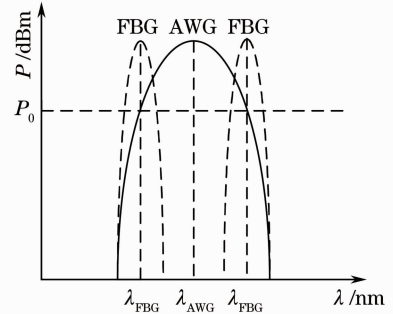


图 5 光强度检测原理图

Fig. 5 Light intensity detection principle

5 仿真结果与分析

为了验证系统的可行性, 以对环境温度监测为例, 根据图 1 在 OptiSystem 软件中搭建了一个 3×3 传感系统模型, 其结构如图 6 所示。仿真实验中, 用用户自定义比特序列 (UDBS) 发生器、高斯脉冲发生器和 LED 模拟图 1 中的宽谱窄脉冲光源。传感网络中延时 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 分别为 0、2、4 ns, 为了保证 FBG 反射谱在时间上不重叠, 用户自定义比特序列发生器的周期要大于 4 ns。波长编码单元采用一系列 Matlab 组件和非归零 (NRZ) 脉冲发生器模拟。图中传感网络中三列 FBG 中心波长 (25 °C 时) 分别为 1548、1550、1552 nm。在此以温度传感为例, 测量范围 -50 °C \sim 100 °C, FBG 的温度漂移系数约为 0.01 nm/°C, 因此波长漂移范围为 1.5 nm, 波长不会发生重叠。

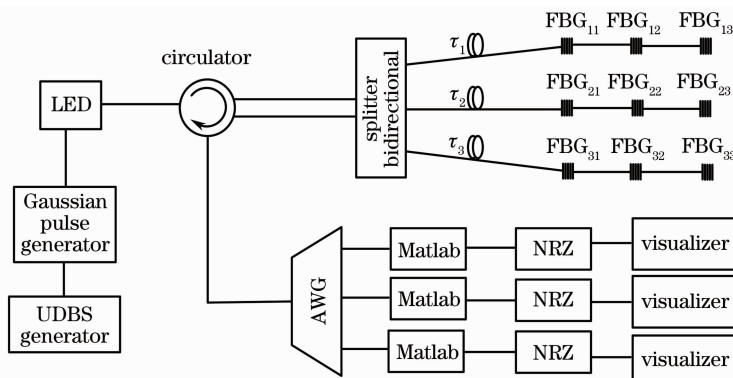


图 6 仿真模型图

Fig. 6 Simulation setup of the system

以中心波长为 1550 nm 的 FBG 为例, 其波长随温度的变化如表 1 所示, 将与各温度值相对应的波长编成二进制脉冲序列。考虑到实际温度检测情况, 这里取温度变化范围 -50 °C \sim 100 °C, 间隔 1 °C, 共有 151 个可能的测量值, 所以在编码时用 8 个二进制位就可以表示了。在实际选取脉冲序列时, 可去除一些不易分辨的序列, 如全“0”、全“1”的码序列, 这样, 接收端就可以更容易地分辨接收到的传感信息。

表 1 FBG 温度-波长转换表

Table 1 FBG temperature-wavelength conversion table

$T / ^\circ\text{C}$	λ / nm	Bit sequence
-50	1549.25	00000000
-49	1549.26	00000001
\vdots	\vdots	\vdots
-30	1549.45	00010100
\vdots	\vdots	\vdots
0	1549.75	00110010
\vdots	\vdots	\vdots
25	1550.00	01001011
\vdots	\vdots	\vdots
80	1550.45	10000010
\vdots	\vdots	\vdots
100	1550.75	10010110

对两种不同的情形进行了仿真。

1) 中心波长(25 $^\circ\text{C}$ 时)为 1550 nm 的传感器,环境温度相同,结果如图 7 所示。

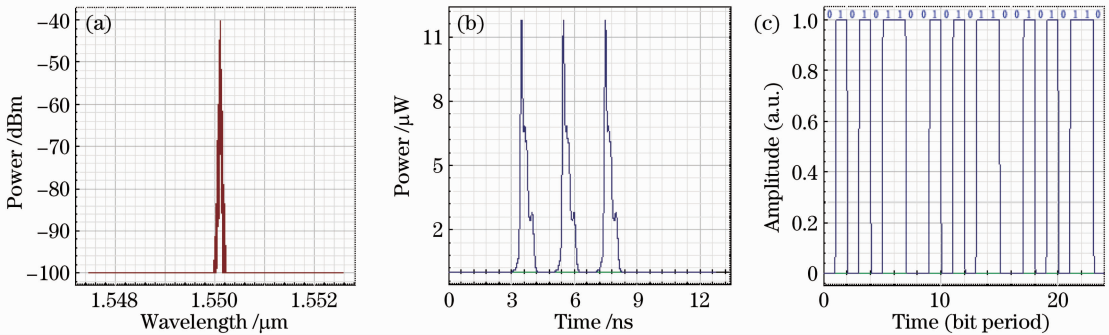


图 7 仿真结果图一。(a)频域信号;(b)时域信号;(c)脉冲序列

Fig. 7 Results of the simulation 1. (a) Signal in frequency domain; (b) signal in time domain; (c) pulse sequence

图 7(a)是中心波长为 1550 nm 的 3 个 FBG 反射谱的叠加,其中中心波长约为 1550.1 nm。图 7(b)是 FBG 反射波的时域脉冲图,相邻时域反射光脉冲的时间差 $\tau \approx 2$ ns。图 7(c)是波长数字化单元对携带传感信息的 3 个 FBG 反射波长的数字化结果,接收到的脉冲序列为“0101011001010110010110”,通过查询 FBG 传感器温度-波长转换表可知,传感器的环境温度值为 36 $^\circ\text{C}$ 。

2) 传感器环境温度不同,结果如图 8 所示。

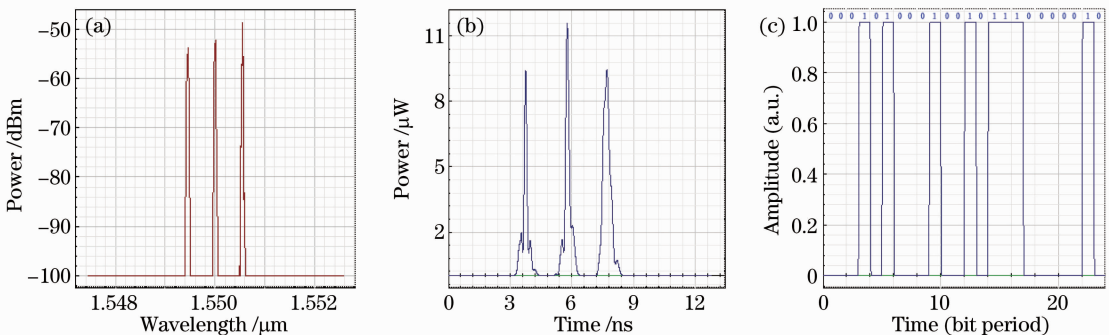


图 8 仿真结果图二。(a)频域信号;(b)时域信号;(c)脉冲序列

Fig. 8 Results of the simulation 2. (a) Signal in frequency domain; (b) signal in time domain; (c) pulse sequence

图 8(a)为 3 个 FBG 传感器反射谱,由于环境温度不同,所以反射谱的中心波长也不相同。图 8(b)为 FBG 反射谱的时域脉冲图。图 8(c)为 FBG 反射波长数字化后的脉冲。从图中可以看出,序列为

“000101000100101110000010”, 查询温度-波长转换表, 可知 FBG_{12} 、 FBG_{22} 、 FBG_{32} 的环境温度分别为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6 结 论

为了利用现有的光通信网实现对光纤传感网络的远程监控, 提出了一种面向光接入网的基于 AWG 的光纤光栅传感数据数字化方案, 重点分析了系统结构、工作原理以及主要的误差来源, 并给出了传感数据成帧模块的结构及其产生的适于在接入网中传输的传感数据帧结构。实验以对环境温度监测为例, 采用 OptiSystem/Matlab 协同仿真的方法对方案进行了验证, 实现了在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内精度 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度监测。该方案具有工作简单、响应速度快等优点, 不足之处在于解调精度受 FBG 及 AWG 性能的影响明显, 主要体现在 FBG 反射谱、AWG 通道透射谱宽及 AWG 的分波能力上。

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): 1442~1463
- 2 Liu Deming, Sun Qizhen. Distributed optical fiber sensing technology and its applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 29~33
刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(11): 29~33
- 3 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2196~2201
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2196~2201
- 4 M. A. Davis, D. G. Bellemore, M. A. Putnam *et al.*. Interrogation of 60 fiber Bragg grating sensors with microstrain resolution capability[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(15): 1393~1394
- 5 Y. J. Rao, A. B. L. Ribeiro, D. A. Jackson *et al.*. Combined spatial- and time-division-multiplexing scheme for fiber grating sensors with drift-compensated phase-sensitive detection[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(20): 2149~2151
- 6 Y. J. Rao, A. B. Lobo Ribeiro, D. A. Jackson *et al.*. Simultaneous spatial, time and wavelength division multiplexed in-fibre grating sensing network[J]. *Opt. Commun.*, 1996, **125**(1-3): 53~58
- 7 K. Takada, M. Abe, Y. Hida *et al.*. Fabrication of 2 GHz-spaced 16-channel arrayed-waveguide grating demultiplexer for optical frequency monitoring applications[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(19): 1643~1644
- 8 K. Takada, M. Abe, T. Shibata *et al.*. 5 GHz-spaced 4200-channel two-stage tandem demultiplexer for ultra-multi-wavelength light source using supercontinuum generation[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(12): 572~573
- 9 Wang Youbin, Huang Xuguang. Analysis and optimum of a novel arrayed-waveguide grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 454~459
王有斌, 黄旭光. 新型阵列波导光栅的分析与优化[J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 454~459
- 10 Sano Yasukazu, Yoshino Toshihiko. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **20**(1): 132~139
- 11 Honglei Guo, Gaozhi Xiao, Nezih Mrad *et al.*. Interrogation of a long-period grating sensor by a thermally tunable arrayed waveguide grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(21): 1790~1792
- 12 Damian Robertson, Pawel Niewczas, James R. McDonald *et al.*. Interrogation of a dual-fiber-Bragg-grating sensor using an arrayed waveguide grating[J]. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 2007, **56**(6): 2641~2645
- 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