

用于“3S”系统的树型 BOFG 分布传感阵列¹

张兴周

(哈尔滨工程大学电子工程系 哈尔滨 150001)

摘要 阐述了 Bragg 光纤光栅 (BOFG) 树型传感阵列概念。该阵列与串型结构相比具有如下优点: 对阵列传感元的中心波长不存在间隔分布要求, 可以采用统一(中心波长相同)的传感元组阵, 造价低, 易于商用化; 带载能力强(组阵传感元数量可以做得很大), 适用于大面积实时监测; 光电接合部多光路传输, 提高了抗故障能力。以具体方案介绍了系统构成原理。通过原理分析和典型参数, 进行了数值计算, 并分析了阵列特性, 得出了一些有价值的结论。

关键词 Bragg 光纤光栅 (BOFG), 树型拓扑, 分布传感阵列

中图分类号 TP212.5

1 引言

光纤光栅及其应用技术的出现和发展将在众多信息领域引起一场新的技术革命。这其中, Bragg 光纤光栅 (BOFG) 传感器应用技术——“3S”系统^[1,2](Smart material、Smart structure、Smart skin system), 即灵敏材料、灵敏结构、灵敏皮肤系统, 由于它潜在的巨大社会效益和经济效益, 已经引起全球性极大关注并成为研究热点。“3S”的技术含意是, 把高超的 BOFG 技术, 光纤神经网络, 光纤致动仪器有机地融为一体, 利用掩埋或贴附技术把它们复合到制造现代运载体(如飞机、舰船等)或各种建筑结构(如桥墩、大坝、楼房等)的框架、承力件外蒙皮的复合材料中, 制成灵敏材料, 灵敏结构和灵敏皮肤, 形成智能系统。该系统象人体神经网络一样, 对被测体的各种物理参数如应变、应力、温度、老化、裂变等进行大面积实时地综合监测、诊断和控制。

目前“3S”系统的研究在实用化问题上面临许多技术难点。其中, 多 BOFG 分布阵列就是必需解决的一个难题。就所见报道, 大部分采用的是 BOFG 串型结构的分布阵列^[3]。这种复合阵列形式具有很好的利用效率, 但存在两个问题: 一是相互串联的 BOFG 的中心反射波长必须是不相同的, 并且保持一定的间隔, 这就大大增加了 BOFG 的研制难度和造价。特别是当串联的 BOFG 数量需要增加的时候, 其难度和造价所带来的困难会更大; 二是这种 BOFG 分布阵列通常是被复合到某种材料和结构中去的, 因此一旦结构体和电子设备间的光路(光纤)出现问题(断裂或损伤), 整个系统就无法正常工作, 甚至可能完全瘫痪。针对上述问题, 本文中的树型 BOFG 阵列结构合理地应用了时分复用技术, 相对地补偿了串联型阵列的不足。这种阵列由于对 BOFG 的中心反射波长没有特殊限制, 允许选用相同 BOFG 作为传感元, 使得 BOFG 制造工艺简化, 成本大大降低, 为大面积多元分布阵列实用化创造了条件。另外, 由于结构体与电子设备间形成多光纤通道, 大大提高了系统抗故障的能力和可靠性。

¹ 1997-09-17 收到, 1998-06-20 定稿

图 1 给出了 BOFG 树型分布阵列原理图。它是由 m (m 为偶数) 个具有相同反射波长的 BOFG, ($m-1$) 个 3dB 耦合器 (C_k), 由调制信号源、激光器和干涉仪等组成的可调谐光源 (TLD) 以及光电检测设备 (OE) 等构成的树型结构传感网络。不同 BOFG 之间由光路分离, 在“树梢”处, 由同一光耦合器连结的相邻两个 BOFG (比如 B_1 和 B_2) 的传感信号则是通过光纤延迟线 d 实现时分复用。该系统采用似外差技术^[4] 进行检测。

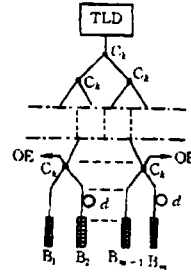


图 1 BOFG 树型阵列

2 原理分析

由应变场引起的 Bragg 反射波相移增量 $\Delta\theta_B$ 与应变增量 $\Delta\varepsilon$ 存在如下关系^[1]:

$$\Delta\theta_B = (2\pi\gamma\mu)\Delta\varepsilon/\lambda_B, \quad (1)$$

式中 λ_B , γ 和 μ 分别为 Bragg 波长、干涉仪光程差和应变-波长偏移正规化响应率。为了实现时分复用, 必须满足 $(2n_0d_0/c) \geq \sigma$ 和 $\xi \geq 2\sigma$ 两个条件。其中 n_0 , d_0 , c , σ 和 ξ 分别为光纤导模折射率、延迟线光程、光速、激励光源方波脉宽和脉冲周期。设 Q_k 为光调制方波高度, \bar{Q}_k 为平均入纤光功率, 则

$$\bar{Q}_k = \sigma Q_k / \xi. \quad (2)$$

为了取得理想结果, 所有 BOFG 应具有相同的灵敏度 (这可以通过对器件筛选和合理地调节光路损耗来实现)。

将光路损耗和耦合器光损耗系数集总于光耦合器中, 设 α_1 为耦合器的插入损耗系数。根据上述设定, 第 i 个 BOFG 返回的光功率 Q_i 为

$$Q_i = \sqrt{\pi/(4 \ln 2)} [(M\bar{Q}_k G_B)/G_i] \cdot [(1 - \alpha_1)/2]^{(1 + \log_2 m)} \quad (3)$$

式中 M 是 BOFG 最大反射率, G_i 和 G_B 分别为光源信号和 BOFG 反射光信号带宽。

传感器灵敏度可以用系统所能检测到的最小相位信号来表征。考虑三个主要噪声源, 即相位噪声、散粒噪声和电子噪声, 根据文献 [5], 对于信噪比为 1 的情况, 设三种噪声源最小可检测相位分别为 Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 , 它们可由下式确定

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 &= \sqrt{(Ab_c e^{-2\rho}/(4u^2)) \cdot [\cosh(2\rho) + \sinh(2\rho) - 2\rho - 1]}, \\ \Gamma_2 &= \sqrt{(8ADg h f_0)/(\eta u^2 Q_i)}, \\ \Gamma_3 &= [h f_0/(\eta e_0 u D Q_i)] \sqrt{2A[2e_0 i_d D^{2+g} + (4C_b T_0/R_f) + i_a^2]}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 b_c 为相干时间, ρ 为干涉仪光程差引起的时延与 b_c 之比; A , D , u 和 η 分别为系统带宽, 检测器增益, 条纹可见度和检测器量子效率; h , f_0 , C_b , T_0 和 e_0 分别为 Planck 常数, 光源光频, Boltzman 常数, 绝对温度和电子电荷; i_d , i_a , g 和 R_f 分别为检测器暗电流,

跨阻抗放大器噪声电流谱密度, 过噪声系数和反馈电阻。假设噪声源独立不相关, 则系统最小可检测相位为

$$\theta_d = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3. \tag{5}$$

3 系统构成

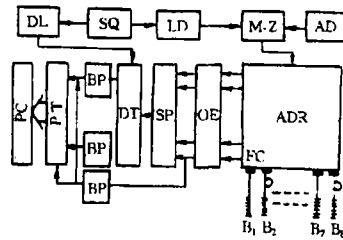


图 2 系统构成

系统构成方案如图 2 所示, 取 $m=8$, 用似外差检测技术, 由方波源 SQ、激光器 LD、锯齿波源 AD 和 M-Z 干涉仪构成可调谐光源。ADR 为 BOFG 树型阵列 (其内部结构参考图 1)。FC 活动接头同时兼作光路衰减和平衡部件。BOFG 反射的光信号在 OE 处进行光电转换和放大、经选通器 SP 顺序选通, 再经时分解复 (DT) 获得分离。DT 的同步信号由 SQ, 并经过时间延迟 (DL) 后提供。

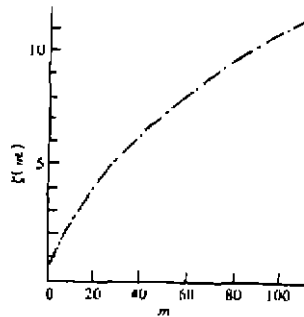
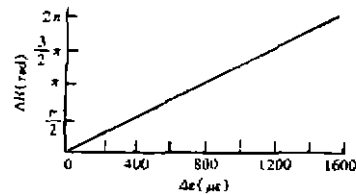
被分离的信号经带通滤波 (BP) 在鉴相器 PT 与参考信号比较, 完成应变-相位偏移检测。这里被选为参考的传感器 (本例中为 B_1) 应保持与其它传感元在同一温度环境中, 并严格控制使其不受应变场的影响。被检测出的信号最后在 PC 处进行处理。

4 数值分析

根据原理分析和典型参数, 对 BOFG 树型阵列系统进行了数值分析, 考察了阵列特性。表 1 为关于 $\beta(= Q_i/\overline{Q}_k)$ 与 m 关系的数值结果。表中取 $\alpha_1 = 0$ 和 $\alpha_1 = 0.07$ 两种情况进行比较。其它参数选择为 $M=0.91$, $G_B=0.2\text{nm}$, $G_i=20\text{nm}$ 。图 3 是关于 BOFG 灵敏度, 即最小可检测应变 $\zeta(= \epsilon_{\min})$ 与 m 的关系曲线。有关参数选择为 $\gamma=0.68\text{mm}$, $\mu = 7.6 \times 10^{-7}(\mu\epsilon)^{-1}$, $\lambda_B = \lambda_i(\text{光源波长})=0.85\mu\text{m}$, $\overline{Q}_k=0.25\text{mW}$, $b_c=0.19\text{nm}$, $\eta=0.75$, $u=0.85$, $T_0=300\text{K}$, $R_f=13\text{k}\Omega$, $A=10\text{MHz}$, $i_d=1.2\text{nA}$, $i_a = 2.5\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$, $D=75$, $g=0.3$ 。图 4 为相位应变增量 $\Delta\theta-\Delta\epsilon$ 关系曲线。

表 1 β 与 m 的关系

m	$\beta(\alpha_1 = 0)$ ($\times 10^{-3}$)	$\beta(\alpha_1 = 0.07)$ ($\times 10^{-3}$)
2	2.40	2.07
4	1.20	0.96
6	0.80	0.62
8	0.60	0.45
10	0.48	0.35
20	0.24	0.16
40	0.12	0.08
80	0.060	0.044
100	0.048	0.028
1000	0.0048	0.0022

图3 ζ 与 m 的关系图4 $\Delta\theta - \Delta\varepsilon$ 的关系

根据数值结果分析如下:

(1) 由表 1 看到, $\alpha_1=0$ 和 $\alpha_1=0.07$ 两种情况下的 β 值具有相同的变化规律, 并且随着 m 增加二者趋于重合. 这意味着, 对于大 BOFG 阵列 (m 很大), 可以用 $\alpha_1=0$ 时的理想特性来近似分析, 这是一个非常有实际意义的结论.

(2) 阵列负载能力是一个重要的性能指标. 如图 1 所示, Q_i 是由 BOFG 反射并经过一个 3dB 耦合器 (对另一路则还需经过一个光纤延迟线 d) 后送到检测器的平均光功率. 取 $\bar{Q}_k=2\text{mW}$ 为例, 对于 $\alpha_1=0.07$ 情况, 当 $m=100$ 时, $\beta=0.028\times 10^{-3}$, 可求得 $Q_i=-43\text{dBm}$, 这对于光电检测器的灵敏度要求不算高. 进一步, 取 $m=1000$, $\bar{Q}_k=5\text{mW}$, $\beta=0.0022\times 10^{-3}$, 则 $Q_i=-50\text{dBm}$, 这对于 APD 检测器来说, 灵敏度指标也是可以实现的. 目前更大光功率的 LD 也已商用化, 这就为 BOFG 树型阵列在大面积实时监测中的实用化创造了非常良好的应用环境.

(3) 从图 3 的曲线看到, 最小可检测应变 ζ 随 m 增加近似线性增加 (灵敏度变劣). 这是由于 m 的增加导致噪声增大的结果. 因此, 在实际系统设计中应兼顾考虑对传感器灵敏度的技术要求.

5 结束语

BOFG 树型分布传感阵列, 作为一种新型拓扑结构, 与当前串型阵列相比, 具有对传感元 (BOFG) 中心反射波长要求宽松 (仅需单一相同波长), 造价低, 带载能力强, 抗故障性能好等优点. 因此, 它特别适合象“3S”系统这样具大面积实时监测场合. 本文通过具体系统方案对阵列性能所做的原理分析和数值结果, 为进一步研究和实用化提供了有价值的技术依据. 文中所述方案需进一步改善的问题 (对串型结构同样存在的问题) 是当 m 比较大的情况下, 如何实现多路光信号复用和集中检测, 这是需进一步研究的课题.

参 考 文 献

- [1] Sirkis J S. Unified to approach to phase-strain-temperature models for smart structure interferometric optic fiber sensors, *Optical Engineering*, 1993, 32(4): 752-761.
- [2] Measure R M. Advances towards fiber optic based smart structure, *Optical Engineering*, 1992, 31(1): 34-47.
- [3] Weis R S, Kersey A D, Berkoff T A. A four-element fiber grating sensor array with phase-sensitive detection, *IEEE Photon, Technol. Lett.*, 1994, 6(3): 1469-1472.

- [4] Jackson D A, Kersey A D, Corke M. Pseudo-heterodyne detection scheme for optical interferometers, *Electron. Lett.*, 1982 18(5): 1081-1082.
- [5] Santos J L, Jackson D A. Coherence sensing of time addressed optical-fiber sensors illuminated by a multimode laser diode, *Appl. Opt.*, 1991 30(8): 5068-5076.

TREE TOPOLOGY BOFG DISTRIBUTION SENSING ARRAY APPLIED TO "3S" SYSTEM

Zhang Xingzhou

(Department of Electronic Engineering, Harbin Engineering University, Haerbin 150001)

Abstract The concept of tree topology Bragg Optical Fiber Grating (BOFG) distribution sensing array is introduced. Comparing with the serial topology array, this type of arrays has the following advantages. First, it is not necessary that the central reflecting wavelengths of all the BOFG sensors must be different. In general, they can be identical. Thus, the cost of producing the sensors can be cheaper and they will easily be commercialized; Secondly, for this type of arrays, it is likely that a large number of sensors can be employed and therefore it can be applied to large area real-time monitoring. Finally, because there is more than one optical path at the interface between the electronics and the monitored body the performance of anti-failure will greatly be improved. The principle of the system construction is expounded by a design example. According to the principle analysis and the typical parameters, the numerical results is presented and the performance of this array is analyzed. Meanwhile, some valuable conclusions are obtained.

Key words Bragg Optical Fiber Grating (BOFG), Tree topology, Distribution sensing array

张兴周: 男, 1947年生, 硕士, 副教授, 所长, 中国电子学会高级会员, 92-94年赴日合作研究, 参加并完成了多项重大科研任务, 多次获省部级科研成果奖, 在国内外发表了二十余篇论文, 主要研究方向: 光纤通信, 光纤传感技术, 计算机网等.