

# 干涉型光纤传感器复用系统的 消偏振衰落技术\*

周效东<sup>1</sup> 赵长春<sup>2</sup> 汤伟中<sup>1</sup> 周文<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 浙江大学信息与电子工程学系 <sup>2</sup> 浙江大学机械工程系 杭州 310027)

**提要** 提出了在干涉型光纤传感器的复用系统中将各个传感器的输入偏振态反馈信号加权叠加用于复用系统输入偏振态控制的方案。经分析,该方案可达到的最小可见度与文献分析的复用系统输入偏振态控制的理想效果相接近。经过信号处理能使各个光纤传感器的可见度均达到其最大值 1,从而消除了复用系统中各单元的偏振态衰落。

**关键词** 光纤干涉仪,复用系统,光学偏振态

## 1 引言

随着近年来光纤传感器复用技术及应用技术研究的兴起,干涉型光纤传感器复用系统的偏振态衰落日益成为困扰干涉型光纤传感器实用化的一大难题,其解决难度远大于单元干涉型传感器的偏振态衰落问题和复用技术本身。

单元光纤干涉仪输入偏振态的反馈控制可使光纤传感器的可见度稳定为 1<sup>[1]</sup>,对于复用系统而言,也存在一个最佳输入偏振态使每一个传感器的可见度最小值尽可能大。目前只有文献提出了复用系统在理想的最佳输入偏振态时可能存在的最小可见度<sup>[2,3]</sup>,而没有进行控制的方案。本文提出了将各个传感器的反馈信号分别除以各自的可见度进行加权叠加,将叠加后的信号作为复用系统的反馈信号进行复用系统输入偏振态反馈控制。该方案可达到的最小可见度理论分析结果与文献[2,3]中的预计相接近,通过将各传感器的输出信号除以各自的可见度,可以在牺牲部分信噪比的情况下使各传感器的可见度均达到 1,较好地消除复用系统中各传感器的偏振态衰落。

## 2 复用系统输入偏振态控制的叠加消偏振衰落分析

复用系统输入偏振态控制方案是在复用系统的输入光纤端加一个偏振控制器并加上与单元控制时<sup>[1]</sup>类似的直流和交流微调制,在信号检测端将各个传感器的反馈信号除以各自的可见度后进行叠加,以叠加后的信号作为复用系统输入偏振态的反馈信号。

单元光纤干涉仪中的偏振态情况可以用干涉仪两臂双折射差的延迟算子  $\mathcal{R}_s(\Omega-s)$  来表

\* 国家自然科学基金资助项目(69702003)。

示。在代表偏振态的邦加球上, 光纤干涉仪输入偏振态  $C_i$  与其绕  $\mathcal{R}_s$  旋转  $\Omega_s$  (为简化起见, 文中记为  $\Omega$ ) 后的点  $C_i'$  之间的夹角为  $2\eta$ ,  $\cos\eta$  即为干涉仪的可见度<sup>[1]</sup>。因此对单元光纤干涉仪而言, 其输入偏振态的负反馈就是使其输入偏振态  $C_i$  与  $\mathcal{R}_s$  或其反方向重合(即该光纤干涉仪的最佳输入偏振态), 从而使光纤干涉仪的可见度保持为 1。

由于复用系统的最小可见度是与各传感器的最佳输入偏振态分布有关的, 为了研究叠加反馈信号用于控制复用系统的最佳输入偏振态的可行性, 本文对复用系统中的各传感器最佳输入偏振态分布的最差情况进行研究, 并推算此时进行输入偏振态控制时系统中传感器可能达到的最小可见度。

根据理论分析, 单元光纤干涉仪中用于反馈控制的信号  $V_f^{[4]}$  为

$$V_f' = \frac{|\cos\omega t|}{\cos\omega t} \sin^2(\Omega/2) b\theta\cos\theta\cos\delta \left[ \frac{2\sin(\theta/2)}{\theta} \right]^2 \quad (1)$$

其中,  $\omega$  为微调制信号的频率;  $\Omega$  为光纤干涉仪两臂双折射差的延迟算子  $\mathcal{R}_s$  的旋转角;  $b$  为微调制电压在邦加球上导致的变化幅度;  $\theta$  为输入偏振态  $C_i$  与  $\mathcal{R}_s$  在邦加球球心的夹角;  $\delta$  为邦加球球面上以  $C_i$  为中心的微扰后的输入偏振态与  $\mathcal{R}_s$  的夹角。

反馈信号叠加积分使信号稳定在邦加球上离最初输入偏振态最近的一个最佳输入偏振态, 使光纤干涉仪的干涉信号保持最佳可见度 1。

在(1)式中, 当  $\theta = \pi/2$  时也使反馈信号  $V_f' = 0$ , 因此信号也有可能稳定在与最佳偏振态的两个对应方向垂直的大圆上, 从而使光纤干涉仪可见度为最小。这就要求在调节初始电压时必须避免  $\theta \approx 90^\circ$ 。

根据以上分析, 对于光纤传感器总数为  $N+1$  的复用系统, 其最差分布是  $N$  个传感器的最佳输入偏振态均匀地分布在一个平面上, 而 1 个传感器的最佳输入偏振态与该平面垂直的情况。因为这时平面上的  $N$  个传感器都使复用系统的输入偏振态接近该平面, 使垂直于平面的点所对应传感器的可见度在系统中最小。以下分别分析  $N+1$  为奇数和偶数时的情况。

当  $N+1$  为奇数时, 平面上的  $N$  为偶数, 此时各传感器的最佳输入偏振态的最差分布情况如图 1(a) 所示。为了方便起见, 图中仅画出了  $N=6$  时的情况。由于叠加各传感器的信号进行反馈控制, 复用系统的最佳输入偏振态  $C_i$  最终将平衡到圆弧  $MQ$  上,  $Q$  为平分平面上两个相

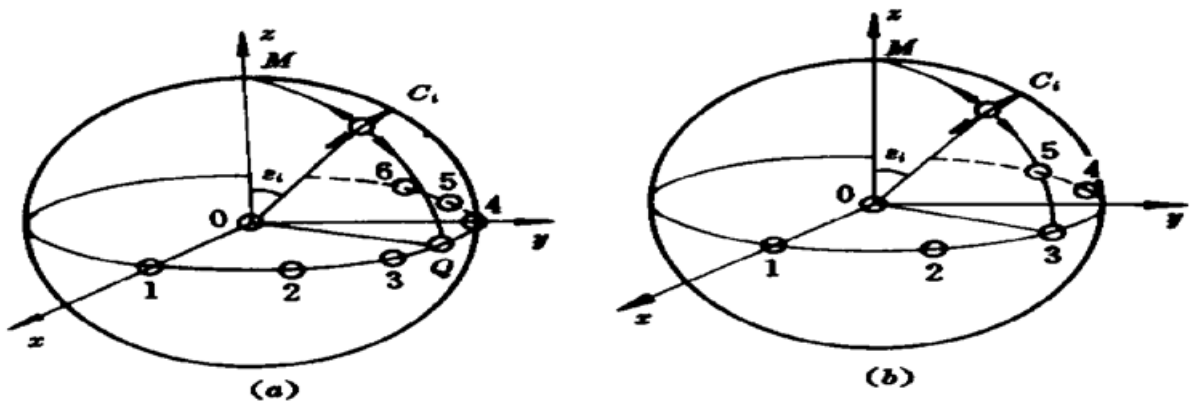


图 1 复用系统中各传感器单元最佳输入偏振态的最差分布

(a) 复用数  $N+1$  为奇数时; (b) 复用数  $N+1$  为偶数时

Fig. 1 The worst arrangement of the sensors' optimum input polarization states

(a) sensor number  $N+1$  is odd; (b) sensor number  $N+1$  is even

邻传感器的最佳输入偏振态的点。为了求最佳输入偏振态位于  $M$  的传感器的可见度, 要确定  $C_i$  与  $z$  轴的夹角  $\epsilon_i$ 。设最佳输入偏振态位于  $M$  点的干涉仪延迟算子的旋转角为  $\Omega$ , 其它各传感器延迟算子的旋转角分别为  $\Omega_{k1}$  和  $\Omega_{k2}$  ( $k$  为整数)。由于平衡时沿圆弧  $MQ$  方向  $M$  点对应传感器的反馈信号与平面  $N$  个传感器的反馈信号之和相等, 根据各传感器的反馈信号可见度倒数加权叠加的条件, 得到以下方程式

$$\frac{2\cos\epsilon_i(1-\cos\epsilon_i)\sin^2(\Omega/2)}{\epsilon_i\sqrt{1-\sin^2\epsilon_i\sin^2(\Omega/2)}} = \left[\frac{\pi}{2}-\epsilon_i\right]\sin\epsilon_i\sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1}\sum_{j=1}^2\frac{\sin\left[\frac{\pi}{2N}+\frac{k\pi}{N}\right]\sin^2(\Omega_{kj}/2)}{\sqrt{\cos^2(\Omega_{kj}/2)+\sin^2\epsilon_i\sin^2\left[\frac{\pi}{2N}+\frac{k\pi}{N}\right]\sin^2(\Omega_{kj}/2)}} \quad (2)$$

其中,  $\epsilon_i$  为复用系统的输入偏振态  $C_i$  与  $z$  轴的夹角;  $j = 1, 2$  为整数;  $N =$  复用系统的复用数  $- 1$ ;  $k = 0, \dots, \frac{N}{2} - 1$  为整数;  $\Omega_{k1}$  和  $\Omega_{k2}$  分别为其它各传感器延迟算子的旋转角。

$\Omega_{kj}$  函数明显是递增函数, 因此为了求出最差情况下的  $M$  点对应的传感器的最小可见度, 假设除  $M$  外的其它传感器的偏振态旋转角均为  $180^\circ$ , 用于计算的公式可大大简化为

$$\frac{2\cos\epsilon_i(1-\cos\epsilon_i)\sin^2(\Omega/2)}{\epsilon_i\sqrt{1-\sin^2\epsilon_i\sin^2(\Omega/2)}} = N\left[\frac{\pi}{2}-\epsilon_i\right] \quad (3)$$

同样对于  $N + 1$  为偶数的情况, 相应奇数  $N$  个传感器的最佳输入偏振态均分平面。图中仅画出了  $N = 5$  时的情况。复用系统的输入偏振态  $C_i$  最终将平衡到  $M$  点与平面上任一传感器的点连接的圆弧上。设  $C_i$  与  $z$  轴的夹角为  $\epsilon_i$ ,  $M$  点和其他各传感器延迟算子的旋转角分别为  $\Omega$ ,  $\Omega_1$ ,  $\Omega_{k1}$  和  $\Omega_{k2}$  ( $k$  为整数), 列出可见度倒数加权后的方程为

$$\frac{2\cos\epsilon_i(1-\cos\epsilon_i)\sin^2(\Omega/2)}{\epsilon_i\sqrt{1-\sin^2\epsilon_i\sin^2(\Omega/2)}} = \left[\frac{\pi}{2}-\epsilon_i\right]\sin\epsilon_i\left[\frac{\sin^2(\Omega_1/2)}{\sqrt{\cos^2(\Omega_1/2)+\sin^2\epsilon_i\sin^2(\Omega_1/2)}} + \sum_{k=1}^{[N/2]}\sum_{j=1}^2\frac{\cos[k\pi/N]\sin^2(\Omega_{kj}/2)}{\sqrt{\cos^2(\Omega_{kj}/2)+\sin^2\epsilon_i\cos^2[k\pi/N]\sin^2(\Omega_{kj}/2)}}\right] \quad (4)$$

其中,  $[N/2]$  表示不大于  $N/2$  的最大整数;  $k = 1, \dots, [N/2]$  为整数。

方程中对应于  $\Omega_1$ ,  $\Omega_{kj}$  的函数明显是递增函数, 假设除  $M$  外的其它传感器的偏振态旋转角均为  $180^\circ$ , 用于计算的公式简化为(3)式。

由此得出结论, 在以各传感器反馈信号的可见度倒数加权进行叠加用于复用系统控制的情况下, 无论  $N$  是奇数还是偶数, 其效果是完全类似的。

### 3 计算结果与分析

根据(3)式对系统的最小可见度, 即  $M$  点对应的传感器的可见度(也即复用系统的最小可见度)进行计算, 得到  $\Omega \neq 180^\circ$  和  $\Omega = 180^\circ$  时, 复用系统的输入偏振态加权叠加反馈控制最小可见度  $V_{\min}$  与  $N$  的关系曲线如图 2(a) 和(b) 所示。

对于理想状况下的输入偏振态反馈控制, 如复用数为  $N + 1$ , 则复用系统可能达到的最小可见度为  $V_{\min} = \sin\frac{\pi}{2(N+1)}$  (当  $\Omega = 180^\circ$  时)<sup>[2,3]</sup>, 即图 2(a) 和(b) 中画出的  $V_{\min}$  的曲线 5。

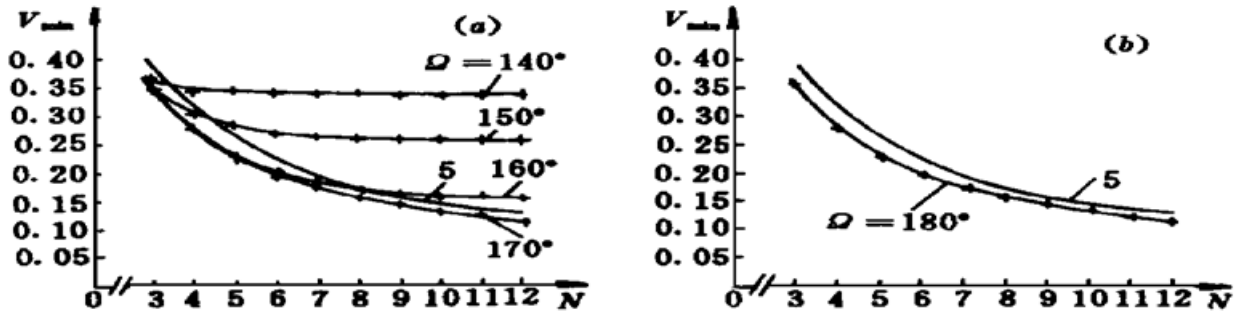


图 2 随着  $\Omega$  的变化复用系统的最小可见度  $V_{min}$  与  $N$  的关系

(a) 当  $\Omega \neq 180^\circ$  时; (b) 当  $\Omega = 180^\circ$  时; 5:  $\Omega = 180^\circ$  时理想控制状态下的最小可见度

Fig. 2 The relationship between  $V_{min}$  and  $N$  as  $\Omega$  changes

(a) when  $\Omega \neq 180^\circ$ ; (b) when  $\Omega = 180^\circ$ ; 5: the ideal value of minimum visibility when  $\Omega = 180^\circ$

图 2 的结果表示反馈控制时复用系统的最小可见度与理想状况的值比较接近。这一误差来源是因为从各个传感器的可见度中提取的输入偏振态反馈信号的大小和  $C_i$  与  $C_k$  (第  $k$  个传感器的最佳输入偏振态点) 中心夹角对应的直线与弧长之比的平方有关(即(1)式中的  $\left[ \frac{2\sin(\theta/2)}{\theta} \right]^2$ )。这一值在夹角为  $\frac{\pi}{2}$  时达到最小值 0.81, 夹角为  $0^\circ$  时达到最大值 1。如果反馈信号中不存在该项, 或将各传感器的该项均近似为 1,  $M$  的最小可见度与复用系统输入偏振态控制的最小可见度理想值完全一致。极限的情况就是将这一比值取  $\pi/2$  时的值。 $\Omega = 180^\circ$  时得到其相应的可见度为

$$V = \sin \left[ \frac{0.81\pi}{2(N + 0.81)} \right] \tag{5}$$

实际误差其实小于该值。(5) 式说明这一误差随着  $N$  的增大而增加。根据该式与理想状况时比较, 当复用单元为 11 时, 最大误差值为 21.2%; 而复用数为 1000 时, 最大误差值为 23.4%, 因此这一误差并不是很大。

以上分析表明在叠加反馈控制的条件下, 复用系统的任一单元可能达到的最小可见度与复用系统输入偏振态控制的理想分析值相接近, 说明本文提出的这一方案是可行的。在反馈控制保证各单元传感器的输出信号可见度不为零的条件下, 在检测电路中将每一路传感信号除以其可见度就能保证在牺牲一部分信噪比的条件下, 将复用系统中各单元传感器的可见度提高到 1。

### 4 结 论

根据以上分析与计算, 将复用系统中各传感器的反馈信号经可见度倒数加权后叠加进行输入偏振态控制的方式, 可以使复用系统的最小可见度接近于输入偏振态理想控制状况时的最小可见度。由于复用系统达到各个传感器的最佳输入偏振态的最差分布的概率是很小的, 而本文计算公式中的近似总是采用比实际值更差的情况, 所以有理由认为这一控制方案是可行的。

## 参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. Dandridge. Optimization and stabilization of visibility in interferometric fiber-optic sensors using input-polarization control. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(10) : 1599 ~ 1609
- 2 Y. S. Boger, M. Tur. Polarisation-induced visibility limits in interferometric fiber-optic sensor arrays. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(8) : 622~ 623
- 3 A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. Dandridge. Experimental investigation of polarisation-induced fading in interferometric fiber sensor arrays. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(7) : 562~ 563
- 4 Zhou Xiaodong. Theoretical analysis of interferometric fiber-optic sensors input polarization control. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(6) : 794~ 798 (in Chinese)

## The Polarization-induced Fading Elimination Method of Interferometric Fiber-optic Sensor Arrays

Zhou Xiaodong<sup>1</sup> Zhao Changchun<sup>2</sup> Tang Weizhong<sup>1</sup> Zhou Wen<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>The Information & Electronic Department, <sup>2</sup>The Mechanical Department,  
Zhejiang University, Hanzhou 310027)

**Abstract** This paper for the first time proposed a method by using the weighted sum of each sensor's feedback signal to control the input polarization state of the multiplexing system. The theoretical analysis shows that the control result of this method approximates to the ideal value of the array's lowest visibility. Each sensor's visibility can further reach 1 by signal processing, which eliminates the polarization-induced fading in each sensor of the array.

**Key words** fiber interferometer, array, polarization