

# 干涉型光纤传感器阵列的偏振态 反馈叠加控制\*

周效东 汤伟中 周文

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

**摘 要** 提出了在干涉型光纤传感器阵列中将各传感器的最佳输入偏振态反馈控制信号叠加用于阵列最佳输入偏振态控制的方案, 并对阵列各单元最佳输入偏振态的较差分布时的控制效果进行了理论分析。对达到这一较差分布的概率也进行了计算。分析表明, 该方案简单易行。经过信号处理能使各个光纤传感器在降低信噪比的情况下使可见度均达到最大值 1, 从而消除了阵列中各单元的偏振态衰落。

**关键词** 光纤, 干涉仪, 阵列, 光学偏振态。

## 1 引 言

普通单模光纤构成的低成本干涉型光纤传感器及其阵列无法避免光纤干涉仪两臂光波偏振态(State of Polarization, SOP)随机变化引起检测信号可见度的衰落, 使得消偏振衰落技术日渐成为阵列研究急待解决的关键问题<sup>[1, 2]</sup>。

在单元光纤传感器中进行最佳输入偏振态的反馈控制可以使传感器的可见度保持为 1<sup>[3]</sup>, 对于其阵列人们也设想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达到尽可能大<sup>[4]</sup>, 但未能找到具体的实现方案。本文提出了在干涉型光纤传感器阵列中通过对各传感器的偏振态反馈信号叠加进行输入偏振态控制的方案并进行了分析。该控制方式的特点是简单、易于实现。采用这种阵列的反馈方式, 使各个光纤传感器的可见度均不为零, 将各传感器的干涉信号输出除以其可见度即得到可见度为 1 的输出信号。

## 2 理论分析

本文提出的阵列的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>[3]</sup>类似的直流和交流微调制, 在检测端将各个传感器的反馈信号相加后用于阵列的输入偏振态控制。由于各个传感器的反馈控制信号都使阵列的输入偏振态在邦加球上朝其最佳输入偏振态的点移动, 最终达到一种平衡状态, 即对于所有的传感器其反馈电压相加为零的状态, 这就是阵列的最佳输入偏振态。

\* 国家自然科学基金资助项目(69702003)。

收稿日期: 1997-07-14; 收到修改稿日期: 1997-10-15

单元光纤干涉仪的最佳输入偏振态的方向是与其两臂双折射差的延迟算子  $\mathcal{R}_s$  或其反方向重合的方向<sup>[3]</sup>。其反馈控制信号  $V'_{f1}$ <sup>[5]</sup> 为:

$$V'_{f1} = \frac{|\cos \alpha|}{\cos \alpha} \sin^2(\Omega_{r-s}/2) b \theta \cos \theta \cos \delta \left| \frac{2 \sin(\theta/2)}{\theta} \right|^2 \quad (1)$$

式中  $\omega$  为微调制信号的频率,  $\Omega_{r-s}$  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  $V'_{f1} = 0$ , 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。这要求在调节初始电压时避免  $\theta \approx 90^\circ$ 。

为了研究叠加反馈信号用于控制阵列的输入偏振态的可行性, 对阵列中各传感器最佳输入偏振态分布的最差情况进行研究, 并推算此时系统输入偏振态在反馈信号叠加达到平衡时的系统最小可见度。

对于光纤传感器总数为  $N + 1$  的复用系统, 其最差分布是  $N$  个传感器均匀地分布在一个平面上, 而 1 个传感器与该平面垂直的情况。这种状态对于最佳偏振态与平面垂直的那个传感器来说已无法控制, 因为  $C_i$  落在平面上时该传感器的反馈也为零。但在这种情形下可以调节光纤的偏振状态从而改变各个传感器输入偏振态的初始值。因此分析当  $N$  个传感器均分一个平面, 1 个传感器与这一平面有较大夹角时的较差情况。

当  $N + 1$  为奇数时, 平面上的点  $N$  为偶数, 此时各传感器较差分布的情况如图 1(a) 所示, 为了方便起见, 图中仅画了  $N = 6$  的情形, 1, 2, ...,  $N$  代表平面上  $N$  个传感器的最佳输入偏振态点的位置。这时可见度最小的传感器代表的点  $M$  在球面三角形  $\widehat{P}3Q$  中,  $Q$  为均分  $03$  和  $04$  夹角的点。假设  $C_i$  点和  $M$  点的坐标分别为  $\theta_i, \epsilon_i$  和  $\theta_M, \epsilon_M$ , 由于  $M$  点的存在, 使  $C_i$  平衡到圆弧  $\widehat{PQ}$  上, 设  $\widehat{QQ'} = x$ , 为了确定  $C_i$  的位置并进一步求取最佳偏振态位于  $M$  点的传感器的可见度, 可以根据(1)式和平衡条件列出方程组求解  $\epsilon_i$  和  $x$ 。

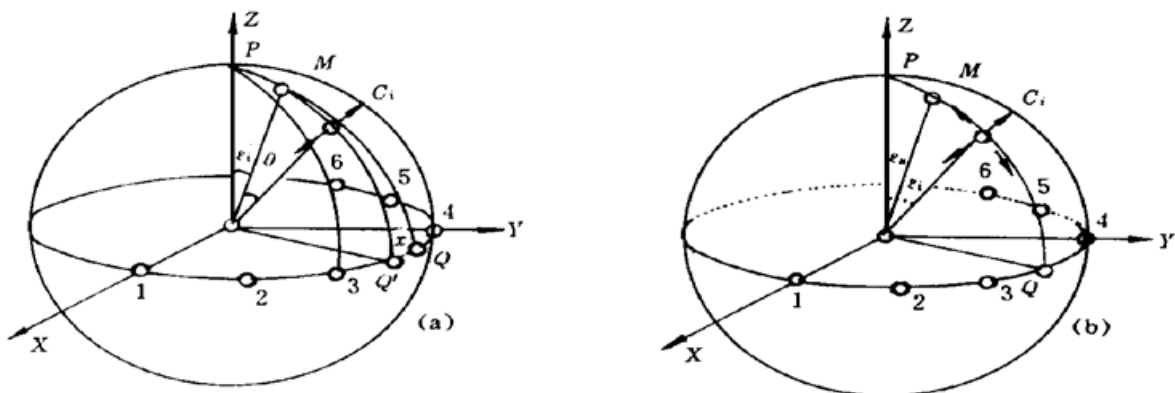


Fig. 1 Poincaré sphere representation of the worst-case alignment of elements' optimum state of polarization when the multiplexing number is odd (a)  $M$  is not on the arc  $\widehat{PQ}$ , (b)  $M$  is on the arc  $\widehat{PQ}$

由于  $\sin^2(\Omega_{r-s}/2)$  越大时反馈电压越大, 分析时设平面上各点的  $\Omega_m$  均为  $180^\circ$ , 这时平面上点的反馈电压达到最大, 对  $M$  点的可见度最为不利。设  $M$  点的旋转角大小为  $\Omega$ , 得到图 1 (a) 中两个正交方向的平衡方程组如下:

$$\left. \begin{aligned} & \sin^2(\Omega/2) \cos \theta (\epsilon_i - \epsilon_M) \frac{1 - \cos \theta}{\theta^2} = \\ & \left[ \frac{\pi}{2} - \epsilon_i \right] \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} \left[ \cos \theta_{k-} \frac{(1 - \cos \theta_{k-})}{\theta_{k-}^2} + \cos \theta_{k+} \frac{(1 - \cos \theta_{k+})}{\theta_{k+}^2} \right] \\ & \sin^2(\Omega/2) \cos \theta \left[ \frac{(N-1)\pi}{2N} - x - \theta_M \right] \frac{(1 - \cos \theta)}{\theta^2} = \\ & \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} \left[ \frac{\pi}{2N} + \frac{k\pi}{N} + x \right] \sin \left[ \frac{\pi}{2N} + \frac{k\pi}{N} - x \right] \frac{(1 - \cos \theta_{k-})}{\theta_{k-}^2} - \\ & \left[ \frac{\pi}{2N} + \frac{k\pi}{N} - x \right] \sin \left[ \frac{\pi}{2N} + \frac{k\pi}{N} + x \right] \frac{(1 - \cos \theta_{k+})}{\theta_{k+}^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中

$$\cos \theta = \sin \epsilon_M \sin \epsilon_i \cos \left[ \frac{(N-1)\pi}{2N} - x - \theta_M \right] + \cos \epsilon_M \cos \epsilon_i$$

$$\cos \theta_{k\pm} = \sin \epsilon_i \sin \left[ \frac{\pi}{2N} + \frac{k\pi}{N} \pm x \right]$$

根据(2)式，可以计算出  $x$  和  $\epsilon_i$  角度的大小，从而得到在不同的  $\theta_M$ 、 $\epsilon_M$  和  $\Omega$  条件下阵列的最小可见度的取值。最小可见度的计算与文献[3]相同。

由于  $x$  的值明显很小(不超过  $\pi/2N$ )，在分析时还可以假设  $M$  位于平分  $03$  和  $04$  的弧线  $\widehat{PQ}$  上，即简化为图 1(b) 所示的情形。这时只要求出一个参量  $\epsilon_i$ 。由于  $(1 - \cos \theta_k)/\theta_k^2$  在 0.4 与 0.5 之间，将此项简化为 0.5，得到简化后的公式为：

$$\sin^2(\Omega/2) \cos(\epsilon_i - \epsilon_M) \frac{[1 - \cos(\epsilon_i - \epsilon_M)]}{\epsilon_i - \epsilon_M} = 2 \sin \epsilon_i \left[ \frac{\pi}{2} - \epsilon_i \right] \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} \sin \left[ \frac{\pi}{2N} + \frac{k\pi}{N} \right] \quad (3)$$

同样对于  $N + 1$  为偶数的情况，相应平面上的点数  $N$  为奇数，其较差分布如图 2(a) 所示，图中为  $N = 5$  时的情况。 $Q$  为平分  $02$  与  $03$  夹角的点， $M$  的变化范围在球面三角形  $\widehat{\Delta P3Q}$  中。其简化图为 2(b)，这时  $M$  落在圆弧  $\widehat{P3}$  上。

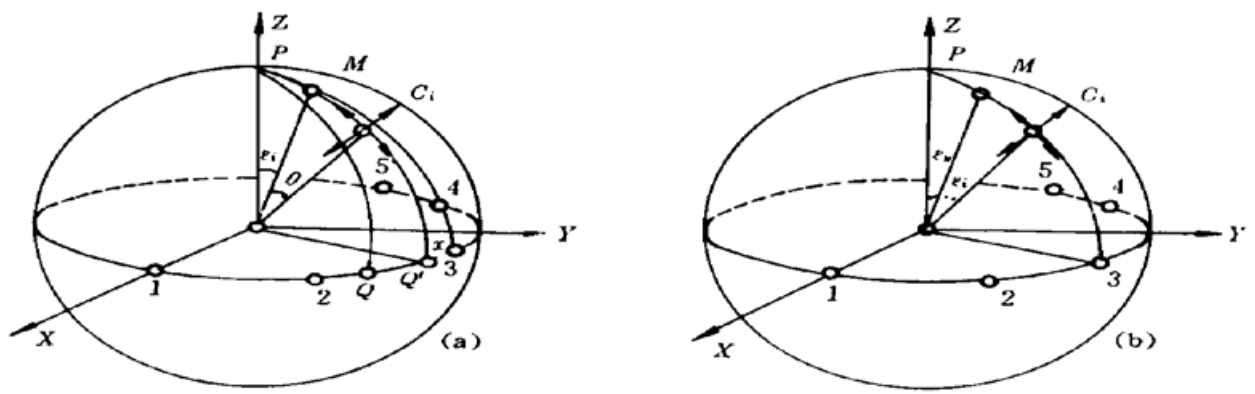


Fig. 2 Poincaré sphere representation of the worse-case alignment of elements' optimum state of polarization when the multiplexing number is even (a)  $M$  is not on the arc  $\widehat{P3}$ , (b)  $M$  is on the arc  $\widehat{P3}$

对图 2(a) 的分析中，同上假设  $C_i$  点和  $M$  点的坐标分别为  $\theta_i$ 、 $\epsilon_i$  和  $\theta_M$ 、 $\epsilon_M$ ，由于  $M$  点的存在，使  $C_i$  平衡到圆弧  $\widehat{PQ'}$  上，设  $\widehat{3Q'} = x$ ，求解  $\epsilon_i$  和  $x$  以确定  $C_i$  的位置。列出方程组如下：

$$\left. \begin{aligned}
 & \sin^2(\Omega/2) \cos \theta (\epsilon_i - \epsilon_M) \frac{1 - \cos \theta}{\theta^2} = \\
 & \left[ \frac{\pi}{2} - \epsilon_i \right] \left[ \cos \theta_1 \frac{(1 - \cos \theta_1)}{\theta_1^2} + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} \left[ \cos \theta_{k-} \frac{(1 - \cos \theta_{k-})}{\theta_{k-}^2} + \cos \theta_{k+} \frac{(1 - \cos \theta_{k+})}{\theta_{k+}^2} \right] \right] \\
 & \sin^2(\Omega/2) \cos \theta \left[ \frac{(N-1)\pi}{2N} - x - \theta_M \right] \frac{(1 - \cos \theta)}{\theta^2} = \\
 & x \cos x \frac{(1 - \cos \theta_1)}{\theta_1^2} + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} \left[ \left[ \frac{k\pi}{N} + x \right] \cos \left[ \frac{k\pi}{N} + x \right] \frac{(1 - \cos \theta_{k+})}{\theta_{k+}^2} - \right. \\
 & \left. \left[ \frac{k\pi}{N} - x \right] \cos \left[ \frac{k\pi}{N} - x \right] \frac{(1 - \cos \theta_{k-})}{\theta_{k-}^2} \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned}
 \cos \theta &= \sin \epsilon_M \sin \epsilon_i \cos \left[ \frac{(N-1)\pi}{2N} - x - \theta_M \right] + \cos \epsilon_M \cos \epsilon_i \\
 \cos \theta_1 &= \sin \epsilon_i \cos x \\
 \cos \theta_{k\pm} &= \sin \epsilon_i \cos \left[ \frac{k\pi}{N} \pm x \right]
 \end{aligned}$$

[N/2] 表示不大于 N/2 的最大整数。

对 N 为奇数的情况进行图 2(b) 所示的简化, 并取  $(1 - \cos \theta_k)/\theta_k^2 = 0.5$ , 得到:

$$\sin^2(\Omega/2) \cos(\epsilon_i - \epsilon_M) \frac{2[1 - \cos(\epsilon_i - \epsilon_M)]}{\epsilon_i - \epsilon_M} = \sin \epsilon_i \left[ \frac{\pi}{2} - \epsilon_i \right] \left[ 1 + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} \cos \left[ \frac{k\pi}{N} \right] \right] \quad (5)$$

在不同 N 取值的条件下, 本文根据(3) 式和(5) 式, 在最佳输入偏振态位于 M 点的传感器的旋转角 Ω 和 M 点位置 ε<sub>M</sub> 变化时邦加球上阵列反馈的平衡点位置和 M 点的可见度(也即系统的最小可见度)进行了计算, 结果表明, 当 N 越大、ε<sub>M</sub> 越小、Ω 越接近于 180° 时, 系统的最小可见度越小。根据计算结果得到 Ω = 180° 时 V<sub>min</sub> 与 N 的关系随 ε<sub>M</sub> 变化的函数曲线如图 3 所示。图中的曲线 5 是根据参考文献[4, 5] 计算而得的理想情况时的最小可见度, 其计算式为 sin [π/2(N + 1)]。

当 Ω 变化时最小可见度 V<sub>min</sub> 与 Ω 的关系曲线如图 4 所示。图中所示的 Ω 取值范围 120°~180°, 曲线的取值为 ε<sub>M</sub> = 5°, N = 10 时的计算值。从图中可以看到 V<sub>min</sub> 与 Ω 近似为直线关系。

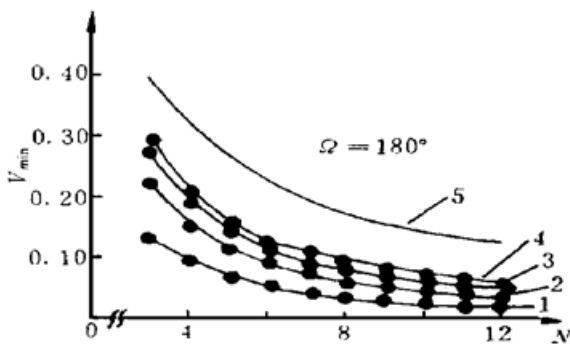


Fig. 3 The calculated relationship between  $V_{\min}$  and  $N$  under control. 1:  $\epsilon_M = 5^\circ$ , 2:  $\epsilon_M = 10^\circ$ , 3:  $\epsilon_M = 15^\circ$ , 4:  $\epsilon_M = 20^\circ$ , 5: the ideal value when  $\Omega = 180^\circ$

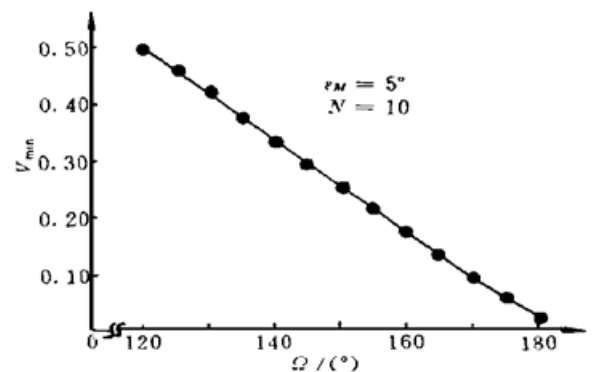


Fig. 4 The calculated relationship between  $V_{\min}$  and  $\Omega$  under control

### 3 讨 论

对于计算的范围来说, 最小可见度在  $N = 12$ 、 $\epsilon_M = 5^\circ$ 、 $\Omega = 180^\circ$  时达到, 这时系统的最小可见度近似等于 0.02, 也即只有最大可见度的 1/50。通过除以可见度的方式尽管可以使可见度提高到 1, 但引起的信噪比降低较大。对阵列的各单元最佳可见度达到较差分布的概率计算如下。

在邦加球上, 假设以  $A$  为中心的圆半径与邦加球球心的夹角为  $\Delta\theta$ , 某传感器的偏振态落在该圆中的概率为:

$$P_A = \frac{2\pi R^2(1 - \cos \Delta\theta)}{4\pi R^2} = \frac{1 - \cos \Delta\theta}{2} \quad (6)$$

对于中心为  $B$  的环带, 假设其中心圆与球心的夹角为  $\theta$ , 环带两边的圆与球心的夹角分别为  $\theta + \Delta\theta$  和  $\theta - \Delta\theta$ , 某传感器落在该环带中的概率为:

$$P_B = \frac{4\pi R^2 \sin \theta \sin \Delta\theta}{4\pi R^2} = \sin \theta \sin \Delta\theta \quad (7)$$

假设各个传感器在邦加球上达到各种偏振态的概率密度为均匀分布, 计算中允许误差的夹角为  $\Delta\theta$ 。首先从  $N + 1$  个传感器中任选一个点落在邦加球的任意位置上, 然后再从  $N$  个传感器中任选一个点落在与之成  $k\pi/N$  角度的环带上,  $k = 1, 2, \dots, N - 1$ , 在邦加球上满足这一条件的概率为  $\sin \Delta\theta \sum_{k=1}^{N-1} \sin \frac{k\pi}{N}$ 。其他传感器的位置都有两个最佳输入偏振态位置可以选择<sup>[4]</sup>, 得到平面上其他  $N - 2$  个传感器按均分平面的位置分布的概率为  $(1 - \cos \Delta\theta)^{N-2}$ 。传感器  $M$  位于与  $P$  夹角小于  $\epsilon_M$  的概率则为  $(1 - \cos \epsilon_M)$ 。因此较差分布的总概率为:

$$P = (N + 1)! \sin \Delta\theta \sum_{k=1}^{N-1} \left| \sin \frac{k\pi}{N} \right| (1 - \cos \Delta\theta)^{N-2} (1 - \cos \epsilon_M) \quad (8)$$

显然(8)所示的概率是很小的, 并且  $N$  越大, 该概率越小。根据(8)式, 对于  $N = 3$  时  $\Delta\theta = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$ ,  $\epsilon_M = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  的情况分别进行计算, 得到当  $\Delta\theta = 1^\circ$ ,  $\epsilon_M = 5^\circ$  时  $P$  最小, 为  $1.051 \times 10^{-7}$ ; 当  $\Delta\theta = 3^\circ$ ,  $\epsilon_M = 20^\circ$  时  $P$  最大为  $4.495 \times 10^{-5}$ 。

由于该概率很小,  $N$  增大时的概率将更小, 因此事实上该反馈控制方式很难使阵列中的传感器达到本文分析的这种最小可见度分布情况。即使阵列中真的达到了, 也可以对阵列中传感器的光纤偏振态进行调整(如在时分复用系统中对补偿干涉仪进行调整), 使各传感器的初始输入偏振态在邦加球上的分布改变。此外本文的计算公式中的近似总是采用比实际值更差的情况, 因此可以认为该方案是可行的。将经过控制后的各传感器输出信号除以其可见度, 能够在信噪比降低的情况下得到可见度为 1 的传感信号。

**结 论** 在干涉型单元光纤传感器输入偏振态控制分析的基础上, 本文提出了将光纤传感器的输入偏振态技术用于复用系统的方案, 并对这种方案进行了分析。由于输入偏振态控制是在光纤传感器的输入和输出端进行处理, 适合于光纤传感器阵列和无源遥测。由于目前国外对阵列消偏振态衰落方面的报道还比较少, 本文的研究对阵列的偏振态控制有较大意义和较大的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] J. T. Ahn, B. Y. Kim, Fiber-optic sensor array without polarization-induced signal fading. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(4) : 416~ 418
- [2] Shih-Chu Huang, Wu-Wen Lin, Mao-Hsiung Chen, Cross-talk analysis of time-division multiplexing of polarization-insensitive fiber-optic Michelson interferometric sensors with a  $3 \times 3$  directional coupler. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4) : 921~ 933
- [3] A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. Dandridge, Optimization and stabilization of visibility in interferometric fiber-optic sensors using input-polarization control. *IEEE, J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(10) : 1599~ 1609
- [4] A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. Dandridge, Experimental investigation of polarization-induced fading in interferometric fiber optic sensor arrays. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(8) : 562~ 563
- [5] 周效东, 干涉型光纤传感器输入偏振态反馈控制的理论分析. *光学学报*, 1997, **17**(6) : 794~ 798

**Interferometric Fiber-Optic Sensor Arrays Polarization Control by Summing**

Zhou Xiaodong      Tang Weizhong      Zhou Wen

(The Information and Electronic Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 14 July 1997; revised 15 October 1997)

**Abstract** A novel method is presented to control the optimum input-polarization of the interferometric fiber-optic sensor arrays by the sum of each sensor's feedback signal. The minimum visibility of the element in the array under control is calculated, and the probability to reach this situation is estimated. The analyses show that the method is both simple and feasible. Each sensor's visibility can approach to 1 by signal process, which eliminates the polarization-induced fading in each sensor of the array.

**Key words** optic-fiber, interferometer, array, state of polarization.