

望远镜干涉阵中光程调制的研究

赵培谦^{1,2} 周必方¹ J-M Mariotti² P. Léna² F. Reynaud³

1. 中国科学院南京天文仪器研制中心, 南京 210042
2. DESPA, Observatoire de Paris-Meudon, France
3. Institute de Recherche en Communications Optique et Microondes, Limoge, France

摘 要 提出了在单模光纤联接的望远镜干涉阵中通过拉伸红外单模光纤实现光程调制的方法. 简要分析了该方法的机理及存在的问题, 如偏振效应、色散等. 用少模光纤和单模光纤分别代替马赫-陈德尔(Mach-Zehnder)干涉仪的两个臂, 并且其中一臂的光纤缠在直径为6 cm的PZT圆柱上. 给PZT圆柱施加三角波电压后, 首次得到干涉条纹, 并证明了方法的可行性.

关键词 光学干涉, 单模光纤, 光程调制.

1 引 言

1991年, 用红外单模光纤联接相距一定距离的两个独立的望远镜并用单模光纤相关器(directional coupler)实现光束之间的相干已获成功^[1], 并且称其为天文学史上的一次突破. 这是因为该技术除具有传统望远镜干涉阵无法比拟的优点外, 它还酷似射电干涉术. 另外, 如果能够通过拉伸一臂(或多臂)中的光纤实现光程调制无疑将使干涉仪的集成化向前迈进一大步, 同时也为光纤双傅里叶干涉成象提供了技术上的可行性. 本文提出了在单模光纤联接的望远镜干涉阵中, 通过拉伸光纤臂实现光程调制的方法. 在试验室, 通过拉伸光纤马赫-陈德尔干涉仪的一臂首次获得干涉条纹.

2 基本原理

单模光纤在承受外界压力时, 光波的相位变化为^[2]

$$\Delta\varphi = \beta \Delta L + L \frac{d\beta}{dn} \Delta n + L \frac{d\beta}{dD} \Delta D, \quad (1)$$

式中 β 为沿光纤轴 z 方向传播模的传播常数, L 为光纤的作用长度, n 为光纤芯的折射率, D 为光纤芯径. (1)式中各项的意义同文献[3]. 将光纤缠在PZT圆柱上, 并使光纤轴与圆柱轴尽可能正交. 给PZT圆柱施加电压后, PZT圆柱的径向膨胀和收缩导致光纤伸长和收缩. 此时, 在一定的近似条件下, 通过分析光纤内的应力分布得出光纤内的相位变化为^[3]

$$\Delta\varphi = \Delta L \frac{2\pi}{\lambda} \left[n - \frac{1}{2} n^3 [(1 - \mu)P_{12} - \mu P_{11}] - \frac{V^3 \mu \lambda^2}{8\pi^2 D^2 n} \frac{db}{dV} \right], \quad (2)$$

式中 μ 、 P_{11} 、 P_{12} 、 V 、 b 、 $\frac{db}{dV}$ 的意义见文献[3].

定义 A 为相位变化灵敏度, 即

$$A = n - \frac{1}{2} n^3 [(1 - \mu)P_{12} - \mu P_{11}] - \frac{V^3 \mu \lambda^2}{8\pi^2 D^2 n} \frac{db}{dV}, \quad (3)$$

并用 x 代替光纤长度变化 ΔL , 则(2)式变为

$$\Delta\varphi = A \frac{2\pi}{\lambda} x. \quad (4)$$

从以上几式可以看出, 由于相位变化灵敏度 A 是波长的函数, 光纤内的光程变化不仅是光纤伸长量 x 的线性函数, 也是波长的函数. 对于给定的 x , 其光程变化随波长而异. 光程变化 Ax 与波数已不再构成简单的傅里叶变换对. 图 1 是试验用红外单模光纤的相位变化灵敏度的色散特性, 是由 Le Verre Fluore 公司提供的数据通过最小二乘法拟合而得. 取观测波段 K 的带宽为 $2.0 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$, 则相对色散率为 0.09% .

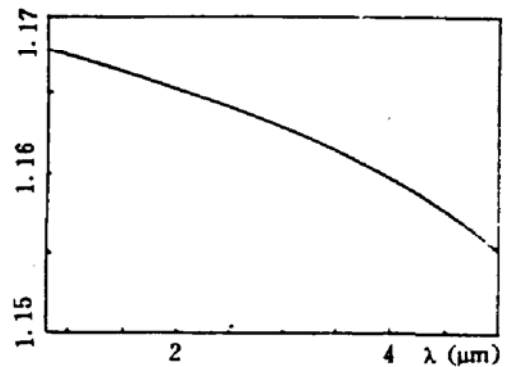


Fig. 1 Dispersion of the phase change sensitivity

干涉仪两臂的光纤同时缠在相同直径的圆柱上时, 对于等长的标准光纤而言, 由于弯曲产生的双折射相同^[4], 偏振效应不影响干涉条纹的对比度. 但是当其中一臂的光纤被拉伸时, 该光纤产生额外的线性双折射^[5]

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n^3}{2} (P_{11} - P_{12}) (1 + \mu) \frac{(2 - 3\mu) D'}{1 - \mu} \frac{x}{R L}, \quad (5)$$

式中 D' 为光纤包层直径, R 为光纤弯曲半径. 其它参数同前. 此式表明, 拉伸弯曲光纤产生的双折射不仅是光纤伸长量的线性函数, 同时也是波长的函数. 为克服拉伸弯曲光纤引起的双折射, 一种办法就是采用高保偏振光纤, 并且分别探测寻常光之间以及非寻常光之间的干涉, 然后对非寻常光之间的干涉进行校正.

3 试验装置、试验结果及讨论

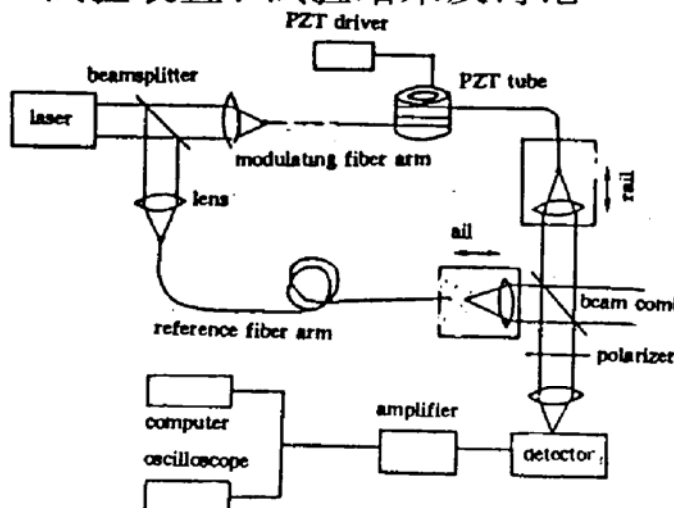


Fig. 2 Experimental fiber-optic Mach-Zehnder setup

为了探讨拉伸光纤实现光程调制这一方法应用于光纤双傅里叶干涉成象的可行性. 我们进行了如下试验. 如图 2 所示, 在用 He-Ne 激光做光源的马赫-陈德尔干涉仪的基础上, 用两根四米长的单模光纤代替两个臂. 其中参考臂的光纤为单模石英光纤(对 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 而言), 并缠在直径为 6 cm 的圆柱上. 另一调制臂的光纤是红外玻璃单模光纤, 截止波长为 $1.9 \mu\text{m}$. 通过一种特殊装置将其缠在直径

为 6 cm、宽 2 cm、壁厚 2 mm 的 PZT 圆柱上, 并使其产生均匀的轴向应力. 共缠 20 圈. 在试验方案中, 作者采用 He-Ne 激光做光源是出于两方面考虑. 1) 被拉伸的光纤仍是玻璃光纤; 2) 调制臂处于少模状态, 可以初步探讨少模与单模光纤的干涉, 因为用少模光纤联接望远镜时将会提高望远镜与光纤之间的耦合效率. 当 PZT 驱动器给 PZT 圆柱施加三角波电压后, 即可探测到干涉条纹. 由探测器输出的信号经放大后一部分在示波器上显示, 另一部分存贮于计算机. 另外, 试验中没有将寻常光之间的干涉和非寻常光之间的干涉分开探测.

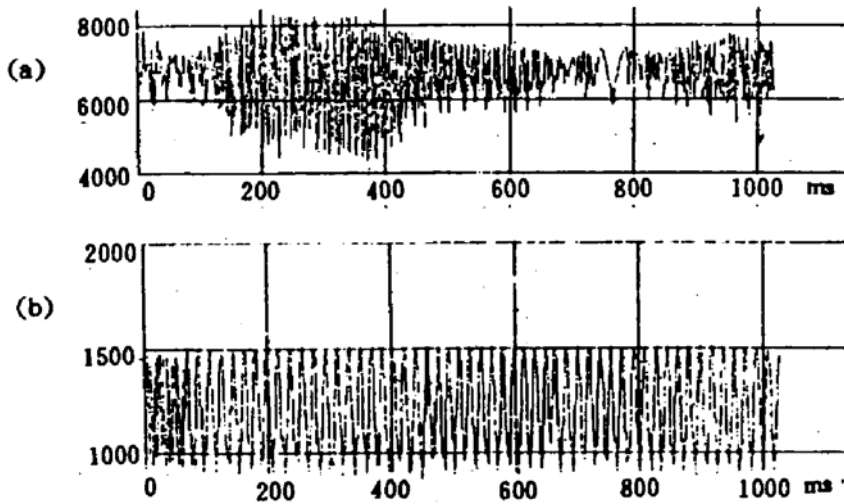


Fig. 3 Interferogram obtained by stretching a fiber. Triangular wave in the figure represents the applied voltage.

a: The amplitude of the applied voltage is 150 V, b: The amplitude of the applied voltage is 300 V

图 3 是 1993 年 2 月份首次获得的干涉条纹, 图 3(a)和(b)分别对应于电压幅值为 150 V 和 300 V. 就 3.7 m 工作长度的光纤而言, 施加电压幅值为 300 V 时, 由条纹计数推出最大光程差为 0.17 mm. 为获得更大的光程差, 一方面可以提高电压幅值(但是它受 PZT 的限制). 另一方面可以增长光纤的工作长度. 比如串联几个 PZT 圆柱或在每个 PZT 圆柱上缠多层光纤等. 如果近似地按线性计算, 50 m 长的光纤, 电压幅值 800 V, 则最大光程差约 4.82 mm, 对应的光谱分辨率为 4820(对 $\lambda = 2 \mu\text{m}$ 而言). 由此看出, 在中低光谱分辨率情况下, 在光纤双傅里叶干涉成象中, 通过拉伸光纤实现光程调制是可行的. 同时, 通过比较图 3(a)和图 3(b), 发现有许多问题有待于进一步研究. 在图 3(a)中, 施加的电压幅值小, 光纤伸长量小, 偏振效应对干涉条纹对比度影响很小, 同时处于少模状态的光纤中只有基模参与相干, 因此干涉条纹的振幅比较稳定. 而图 3(b)的情况相反. 一方面拉伸引起的偏振效应增强, 另一方面, 当光纤伸长量增大时调制臂中处于几个模态的波都将参与相干. 因此, 干涉条纹的振幅及频率稳定性都很差. 至于单模光纤与少模光纤的干涉机理需要进一步研究.

参 考 文 献

- [1] V. Coude du Foresto, S. Ridqway, FLUOR: A stellar interferometer using single-mode infrared fibers. ESO Conference on High Resolution Imaging by Interferometry II, ed. by J. M. Beckers, F. Merkle, 1991, 15~18, Oct. Garching, Germany, 731~740
- [2] V. S. Sudarshanam, Srinivasan K, Static phase change in a fiber optic coil hydrophone. *Appl. Opt.*, 1990, 29 (6): 855~863

- [3] Zhao Peiqian, J. M. Mariotti, P. Léna, V. Coudé du Foresto, IR single-mode fiber optics for double Fourier interferometry. *Proceedings of the ESA Colloquium on Targets for Space-Based Interferometry*, Beaulieu, France, 1992, 13~16 Oct. (ESA SP-354, Dec. 1992), 225~230
- [4] R. Ulrich, S. C. Rashleigh, W. Eickhoff, Bending-induced birefringence in single-mode fiber. *Opt. Lett.*, 1980, 5(6): 273~275
- [5] S. C. Rashleigh, R. Ulrich, High birefringence in tension-coiled single-mode fiber. *Opt. Lett.*, 1980, 5(8): 354~356

Method Study of Optical Path Modulation in Coherent Optical Telescope Array

Zhao Peiqian^{1,2} Zhou Bifang¹ J. -M. Mariotti²
P. Léna² F. Reynaud³

1. *Nanjing Astronomical Instruments Research Center, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042*
2. *DESPA, Observatoire de Paris, France*
3. *Institute de Recherche en Communications Optiques et Microondes, France*

(Received 14 May 1993; revised 28 July 1993)

Abstract In this paper, a method is proposed, in which the optical path modulations in a fiber-linked telescope array can be generated by stretching fiber arms. The mechanism of this method and the problems introduced by stretching fibers, such as polarization effects, dispersion effects, are analysed. To demonstrate this method, an experimental setup is established in which the two arms of a Mach-Zehnder interferometer are replaced by two pieces of fibers. One IR glass fiber arm is wrapped onto a piezoelectric tube. Another silicon fiber arm is wrapped freely. Experiments have been done. Experimental results are briefly discussed.

Key words optical interference, single mode fiber, optical path modulation.