

利用相位共轭实现单根光纤直接传输图象

孙远坤 王晓春 张以谟

(天津大学精密系)

提要: 利用相位共轭介质——光折变晶体掺铁铌酸锂 ($\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$) 产生的简并四波混频的波前反转性质, 补偿了多模光纤由于模色散引起传输图象的畸变, 实现单根多模光纤直接传输图象; 研究了相位共轭对传输图象光场偏振态的影响。

**Direct image transmission through a single optical fiber
by optical phase conjugation**

Sun Yuankun, Wang Xiaochun, Zhang Yimo

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin)

Abstract. We demonstrated direct image transmission through a single multimode fiber by using the wavefront reversal properties of degenerate four-wave mixing in a photo-refractive crystal of $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ to compensate the image distortion caused by modal dispersion in a fiber. The effect of phase conjugation on the state of polarization of the transmission image field is discussed.

一、引言

低损耗石英光纤的问世, 不仅使光纤通信日趋实用化, 也激起了人们对光纤直接传输图象(无需电-光与光-电的调制转换)的兴趣。为提高数据传输率和降低成本, 有必要研究新的光纤传输途径——单根光纤直接传输图象。

运用单根多模光纤直接传输图象的技术关键是如何补偿多模光纤的模色散, 以恢复由这种模色散导致的图象畸变。国外目前已做的工作大致可分两类, 一类是光学相位共

轭方法^[1~3], 另一类是全息滤波方法^[4,5]。

本文给出以氩-氟激光器为光源, 掺铁铌酸锂为相位共轭介质的简并四波混频技术来补偿多模光纤的模色散, 实现单根多模光纤直接传输单色图象的实验装置和结果。

二、相位共轭补偿多模光纤
模色散原理

1. 单根多模光纤传输图象方程

假定没有模式衰减和模式的混合, 以 $E_i(x, y, z=l, t)$ 代表光纤输出端的光场, 那

收稿日期: 1986年5月26日。

么, 各扩展象元通过长度为 l 的多模光纤传输, 最后合成的结果就可表示为:

$$E_i(x, y, z=l, t) = \sum_{m,n=0}^{M,N} A_{mn} E_{mn}(x, y) \times \exp[i(\omega t - \beta_{mn}l)] \quad (1)$$

式中 β_{mn} 是光纤模式 m, n 对应的传播常数。由式(1)可见, 如果要在光纤输出端得到输入图象的非畸变光场, 也就是说, 使光纤的输出与输入光场仅有振幅衰减(当然这种衰减, 必然引起象的分辨率降低), 那么必须满足下列条件:

$$\beta_{m,n}l = 2\pi I_{m,n} \quad (2)$$

式中 $I_{m,n}$ 为任意整数。

显然对任意给定的光纤长度 l , 方程式(2)不可能同时满足光纤中所有传播模式, 也就是说通过一根任意长度的多模光纤后的单色图象光场被完全破坏了, 输出的光场不是输入的图象, 而是强度均匀的散斑。

2. 相位共轭补偿原理

依据简并四波混频产生相位共轭波原理^[6], 入射到相位共轭介质掺铁铌酸锂晶体上的两泵浦波 E_1 和 E_2 以及探测波(光纤 $z=l$ 端的输出光场) E_i 分别写成(标量形式):

$$E_1(r, t) = A_1 \exp[i(\omega t - Kr)] \quad (3)$$

$$E_2(r, t) = A_2 \exp[i(\omega t + Kr)] \quad (4)$$

$$E_i(x, y, z=l, t) = \sum_{m,n=0}^{M,N} A_{mn} E_{mn}(x, y) \cdot \exp[i(\omega t - \beta_{mn}l)] \quad (5)$$

在掺铁铌酸锂中混频的结果产生出 E'_i 的共轭波前:

$$E'_i = \sum_{m,n=0}^{M,N} A'_{mn} E_{mn}(x, y) \cdot \exp[i(\omega t + \beta_{mn}l)] \quad (6)$$

式中 $A'_{mn} \propto A_1 A_2 A_{mn}^*$

让共轭波 E'_i 反向通过原来的多模光纤(或通过另一根色散特性相同的光纤), 那么在该光纤输入端($z=0$ 处)得到的光场输出为:

$$E'_0(x, y, z=0, t) = \sum_{m,n=0}^{M,N} A'_{mn} E_{mn}(x, y) \cdot \exp(i\omega t) \quad (7)$$

从式(7)可见, $E'_0(x, y, z=0, t) \propto E_0(x, y, z=0, t)$, 即相位共轭的方法补偿了多模光纤的模色散, 恢复了由这种色散产生的畸变了单色图象。

三、实验装置及结果

1. 实验装置

实验装置的光路原理图如图1所示。

使用的多模光纤长为 25 cm, 芯径为 60 μm 的阶跃型光纤*。氦-氖激光器(632.8 nm)输出功率(TEM₀₀模)约 70 mW。图1中 S 为光开关; $\lambda/2$ 波片用来旋转激光束光矢量的振动面平行于纸面。 BS_1 为渐变可调分束器。 L_1, L_2 为透镜, 它们与针孔 P_1 一起提供透明输入片 O 的照明光束。 BS_2 为半透明半反镜, 通过它可以对两次通过光纤的输入图像 O 的光场的再现像进行观察记录。 P_2 是光阑, 用来减小透镜 L_3 的后向反射光对补偿后图像的影响。 L_3 为一显微物镜(10 \times , $NA=0.25$), 它的作用是把图像光场耦合入光纤。 L_4 和 L_5 是两个焦距分别为 $f_4=50$ mm 和 $f_5=75$ mm 的透镜, 作用在于使探测波 E_i 在晶体上的光斑直径小于泵浦光 E_1 和 E_2 的光斑直径。所用的相位共轭介质掺铁铌酸锂晶体尺寸为 $30 \times 10 \times 1$ mm, c 轴平行于纸面。 M_1, M_2, M_3 和 M_4 为全反射镜。

实验时还应当考虑到探测波 E_i 与泵浦

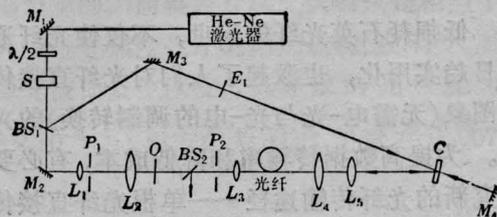


图1 实验原理图

波 E_i 之间的相干性, 这是产生共轭波 E'_i 的必要条件。因此, 要求探测波与泵浦波之间的实际光程差小于激光光源的相干长度, 两

* 该光纤由电子工业部天津 46 所提供。



图2 用相位共轭实现单根多模光纤传输高斯光束照片

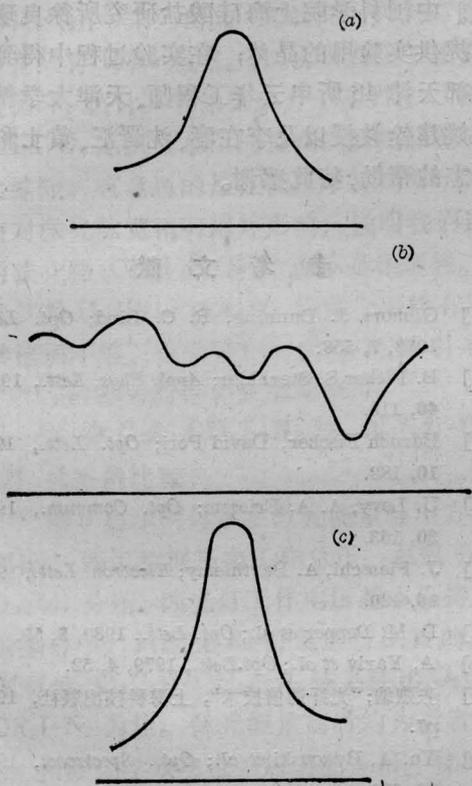


图3 与图2照片对应的光密度曲线

波之间的相干性就能满足。我们在实验时使两波之间的光程差近乎为零。

2. 实验结果

在进行二维图像传输实验之前，我们做了激光器输出的高斯光束经单根多模光纤的传播实验，即在图1中去掉透镜 L_1 、 L_2 及针孔 P_1 ，让 BS_1 分出的高斯光束直接输入多模光纤，一次通过光纤的光束做为产生四波混频的探测波，实验结果如图2所示。

图2(a)为输入的高斯光束光斑；图2(b)为一次通过光纤的光斑；图2(c)为相位共轭

补偿后第二次通过光纤的高斯光束光斑。图3给出了与图2光斑中心线相对应的光密度曲线。

这一结果表明，利用相位共轭技术可以实现单根多模光纤无畸变传输高斯光束。既然相位共轭技术能够抑制光纤波导中传播的光束的空间扩展，那么也同样可以用来压缩光纤波导中传播的信号的时间脉冲展宽^[7]。

图像传输实验中的二维物体是中文字透明片，位于图1中 O 处。实验结果如图4所示。图4(a)为输入图像；图4(b)是一次通过光纤的输出光场；图4(c)为相位共轭补偿后第二次通过光纤的输出图像。为提高象的亮度，避免 L_3 反射光的影响，图4(c)是将 BS_2 换成全反镜拍照的。后面的图5也是这样拍照的。



图4 单根光纤传输图像照片

如图4所示，我们利用了相位共轭的方法实现了单根多模光纤直接传输图像。但比较图4(a)和图4(c)可见，输出图像与输入图像还存在差异，这主要有两点：

(i) 输出图像的背景噪声大。主要是相干光照明的斑点噪声、多模光纤的模式噪声和散射噪声所引起的。

(ii) 输出图像存在一定的失真，即输出图像有信息损失。这主要是由于光纤波导的本征函数并不构成任一输入光场的完备系，所以任一输入光场在对光纤的本征函数展开时，还应包括其他辐射模式，这些辐射模式在传播过程中大部分损耗掉了^[8]，因此在共轭波中就不包含这些信息，恢复的图像也就不是输入图像的精确再现。其次，输入图像光场与光纤之间的耦合效率、光纤的吸收和散射损耗以及相位共轭介质(晶体)本身的缺陷

等,都是影响图像保真度的因素。

3. 相位共轭对传输图像光场偏振态的影响

我们使用一检偏器对经相位补偿后的光纤输出图像光场的偏振态进行研究,发现输出图像的信息光场与输入图像的信息光场有相同的偏振态。结果如图5所示。



图5 相位共轭对传输图像光场偏振态的影响

图5(a)为未加检偏器时光纤输出图像;图5(b)是检偏器的透光轴与输入图像光场的光矢量平行时透过检偏器的图像;图5(c)为检偏器的透光轴与输入光场的光矢量垂直时透过检偏器的部分背景噪声。

对图5所示可作如下解释:实验中所用的多模光纤是非保偏光纤^[9],输入图像光场一次通过光纤后,其偏振态被打乱,由原来的线偏振光变成部分偏振光。在实验中我们采用了水平偏振泵浦方式,以便获得大的共轭波输出^[10]。因此,可将共轭波看成两光矢量相互垂直线偏振光的组合,光矢量平行于探测波偏振方向的分量,将在光纤中重新激励出原来的本征模式组合,最后在又一次通过

光纤之后,就又恢复了信息的水平偏振态;光矢量垂直于探测波偏振方向的分量,将重新激励出新的本征模式组合,在输出图像上产生散斑背景噪声。这些散斑的偏振方向是随机分布的。实验中我们用一检偏器进行水平检偏,消除了一部分噪声,突出了输出图像信息,结果如图5所示。

中国科学院上海硅酸盐研究所徐良瑛同志提供实验用的晶体;在实验过程中得到电子部天津46所申云华工程师、天津大学精仪系姚建铨教授以及李在春、沈晋汇、黄土科等同志的帮助,特此感谢。

参 考 文 献

- [1] Gilmors J. Dunning, R. C. Lind; *Opt. Lett.*, 1982, **7**, 558.
- [2] B. Ficher, S. Sternkler; *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**, 113.
- [3] Baruch Fischer, David Peri; *Opt. Lett.*, 1985, **10**, 182.
- [4] U. Levy, A. A. Friese; *Opt. Commun.*, 1979, **30**, 163.
- [5] J. Piasechi, A. Barthlemy; *Electron. Lett.*, 1980, **16**, 420.
- [6] D. M. Pepper *et al.*; *Opt. Lett.*, 1980, **5**, 59.
- [7] A. Yariv *et al.*; *Opt. Lett.*, 1979, **4**, 52.
- [8] 张煦编;“光纤通信技术”,上海科技出版社,1985, p7.
- [9] Yu. A. Bykovski *et al.*; *Opt. Spectrosc.*, 1975, **38**, 689.
- [10] D. L. Staebler, W. Phillips; *Appl. Opt.*, 1974, **4**, 788.