

文章编号: 0258-7025(2002)07-0605-04

# 光纤耦合器的差频特性及其应用

贾 波, 钱松荣, 华中一

(复旦大学通信科学与工程系, 上海 200433)

**提要** 通过对  $2 \times 2$  光纤耦合器的差频特性分析, 设计了一种结构新型的、可用于校正干涉信号畸变分量的全光纤干涉系统, 该系统在振动特性测试和语音信号的全光纤采集、光纤的长度测量等方面具有广阔的应用前景。

**关键词** 光纤耦合器, 差频, 分光比, 干涉系统

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

## Beat Frequency Character and Its Application for Optic-fiber Couplers

JIA Bo, QIAN Song-rong, HUA Zhong-yi

(The Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

**Abstract** A new structure of all-fiber interferometer is constructed based on the analysis of beat frequency character of  $2 \times 2$  optic-fiber. The interferometer can be used for adjustment the alternate interference signal and used wide in the field of test for vibration character, length of optic-fiber and speech signal collection.

**Key words** optic-fiber couplers, beat frequency, splitting ratio, interference system

### 1 引 言

全光纤干涉系统广泛应用于瞬态速度测量, 其优点是结构简单, 调试方便, 突破了传统的对光源长相干长度的要求, 能够采用短相干长度的 LD 激光器作为系统的光源。系统采用单模光纤作为光的传输载体, 能够较好地实现光束的空间相干。这些优点, 使得全光纤干涉仪代替传统的激光速度干涉仪 (VISAR) 在瞬态速度测量领域的应用已经成为一种必然趋势<sup>[1-4]</sup>。近来, 全光纤干涉系统已经被应用于语音信号的采集<sup>[5]</sup>和光纤长度测量<sup>[6]</sup>。但是, 由于系统采用光纤准直器作为光接收器, 当测试面位移发生变化时, 接收光强度的变化会造成干涉曲线的畸变, 这个问题很少有文献报道。本文将从耦合器的差频特性出发, 具体推导全光纤干涉系统的工作原理和对因接收光强度变化造成的信号畸变问题提出解决方案。在此基础上, 提出了新的全光纤速度干涉系统, 并对该系统的信号校正功能进行了实验测试, 验证了理论分析的正确性。

### 2 耦合器的分光特性和差频特性分析

$2 \times 2$  耦合器结构示意图如图 1 所示。耦合器的耦合特性表现为两波导间的耦合系数  $K_{12}$ , 两波导内传输模式的复振幅  $a_i (i = 1, 2)$  满足下列线形微分方程

$$\frac{da_1}{dz} + jK_{12}a_2 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{da_2}{dz} + jK_{12}a_1 = 0 \quad (2)$$

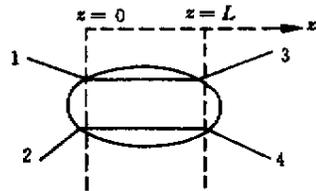


图 1  $2 \times 2$  耦合器结构示意图

Fig. 1 Structure of  $2 \times 2$  coupler

收稿日期 2001-04-28; 收到修改稿日期 2001-06-13

基金项目: 中国博士后基金和上海市博士后基金资助项目。

作者简介: 贾波 (1971—), 男, 主要从事光纤通信和光纤传感技术研究。E-mail: jib11@citiz.net

令耦合系数  $K_{12} = K$  ,在光纤耦合器的耦合区内 ( $z \leq L$ ) ,方程 (1)(2) 的解可表示为

$$\begin{pmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \end{pmatrix} = W \begin{pmatrix} a_1(0) \\ a_2(0) \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中传输矩阵  $W$  为

$$W = \begin{bmatrix} \cos Kz & -j \sin Kz \\ -j \sin Kz & \cos Kz \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设耦合器仅一端输入,即耦合器的输入条件为

$$\begin{cases} a_1(0) = a \\ a_2(0) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

在不考虑耦合器损耗的前提下,将(4)(5)式代入(3)式,可求得

$$\begin{cases} a_1(z) = a \cos Kz \\ a_2(z) = -ja \sin Kz \end{cases} \quad (6)$$

耦合器两输出端对应的光功率分别为

$$\begin{cases} P_1 = |a|^2 \cos^2 KL \\ P_2 = |a|^2 \sin^2 KL \end{cases} \quad (7)$$

从(7)式可以看出,耦合器的两输出信号的功率与输入信号的功率成正比,两输出信号的功率不存在相位的变化。选择不同的耦合长度  $L$  ,可以实现光功率的任意分配。这正是耦合器分光特性的具体体现。在光通信中,人们主要利用的也是耦合器的光功率分配特性,所以,光纤耦合器也称为光功率分路器。

在耦合器 1 2 端,假设输入光信号为  $A_1$  和  $A_2$

$$\begin{cases} A_1(0) = a_1 + b_1 \\ A_2(0) = a_2 e^{j\phi} + b_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $a_1$  和  $a_2 e^{j\phi}$  为相干光信号,  $b_1$  和  $b_2$  为非相干光

信号,且  $b_1, b_2$  与  $a_1$  和  $a_2 e^{j\phi}$  也不相干。

将(8)式代入(3)(4)式,求得耦合器的输出振幅为

$$\begin{cases} A_1(L) = (a_1 + b_1) \cos Kz - j(a_2 e^{j\phi} + b_2) \sin Kz \\ A_2(L) = -j(a_1 + b_1) \sin Kz + (a_2 e^{j\phi} + b_2) \cos KL \end{cases} \quad (9)$$

耦合器输出端的光功率为

$$\begin{aligned} P_1 &= A_1(L) * A_1^*(L) = (|a_1|^2 + |b_1|^2) \cos^2 KL + \\ &\quad (|a_2|^2 + |b_2|^2) \sin^2 KL + a_1 a_2^* \sin 2KL \sin \phi \\ P_2 &= A_2(L) * A_2^*(L) = (|a_1|^2 + |b_1|^2) \sin^2 KL + \\ &\quad (|a_2|^2 + |b_2|^2) \cos^2 KL - a_1 a_2^* \sin 2KL \sin \phi \end{aligned} \quad (10)$$

式中利用了非相干光束在时间上积分平均值为 0。

从(10)式可以看出,反映差频特性的交流信号在不同的输出端具有不同的相位关系,它们间存在反相关系,而其他与差频特性无关的直流信号,在不同的输出端完全相同。利用这一特点,将两输出信号相减,可以消除直流分量对信号的影响,提高差频信号的分辨。这正是本文提出的新型结构全光纤干涉系统的工作机理。

### 3 新型结构的全光纤干涉系统

在以上对  $2 \times 2$  耦合器的差频特性分析基础上,利用光纤耦合器、单模光纤、光纤准直器等光纤无源器件,以及稳定光源和光电探测器等有源器件,构造了一种新型的、可减小因系统接收光强度变化造成的差频信号畸变的全光纤干涉系统。系统结构如图 2 所示。

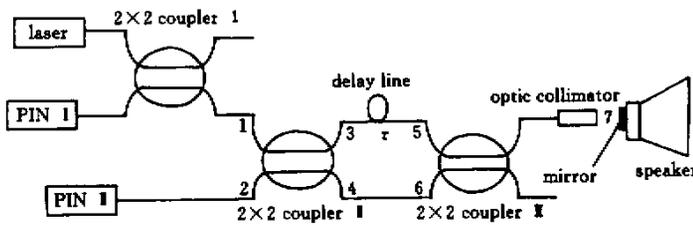


图 2 全光纤干涉系统

Fig.2 A novel all-fiber interferometer system

为了考察系统的重复性和便于在普通示波器下观察干涉信号,在实验中,以周期性正弦电流驱动下的喇叭作为差频信号产生源。

图 2 中,光纤耦合器 II 为核心器件,稳定光源发出的激光经过耦合器 I 分光后由 1 端进入耦合器

II,经过耦合器 III 后,被喇叭上的反射镜所反射,重新被耦合器 III 分光,在 3 4 端注入耦合器 II,从而在 1 2 端形成干涉信号,被探测器 I, II 所检测。

在重新注入耦合器 II 3 4 端的光束中,输入光被耦合器 III 分光 and 镜面所反射后,形成了四条经过

不同传输路径的光束。

$$(1) 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 4$$

$$(2) 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 5 \rightarrow 3$$

$$(3) 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 4$$

$$(4) 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 5 \rightarrow 3$$

上面四束光中,由于光纤延迟线的长度远远大于激光器的相干长度  $L_0$ ,所以,它们间能够形成稳定干涉的仅光束(3)和(4)。

当喇叭运动时,由于光纤延迟线的存在,光束(3)(4)对应的喇叭上的反射点位移不同,使得光束(3)和(4)经历的光程不完全相等,光程差

$$\Delta L = 2[S(t) - S(t - \tau)] \quad (11)$$

其中  $S(t)$  为喇叭运动位移曲线,其方向和大小与喇叭的驱动电流有关; $\tau$  为光纤延迟线的时间延迟,与光纤延迟线长度  $L$  的关系为  $\tau = \frac{n_{\text{eff}}L}{c}$ ,  $c$  为真空中的光速,  $n_{\text{eff}}$  为光纤的等效折射率。只要满足不等式  $\Delta L \leq L_0$ , 其中  $L_0$  为激光器的相干长度,就能形成稳定的干涉条纹。而在传统的离散 VISAR 系统中,由于光路的自身限制,必须满足  $L + \Delta L \leq L_0$ , 才能得到稳定的干涉曲线。所以,全光纤速度干涉系统能够利用短相干波长的 LD 激光器作为光源,而离散 VISAR 系统不能。光程差  $\Delta L$  与两干涉光束的相位差  $\phi(t)$  的关系为

$$\phi(t) = 2\pi\Delta L/\lambda \quad (12)$$

## 4 实验研究

假设频率为  $f$  的正弦驱动电流作用下的喇叭振动位移也为与驱动电流同频率的正弦形式

$$S(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (13)$$

式中  $A$  为喇叭振动的最大位移值,单位与光波长  $\lambda$  相同。

将(13)式代入(12)式,利用和差化积公式可得

$$4A \sin\pi f\tau \cos 2\pi f(t - \tau/2) \quad (14)$$

当  $f\tau \ll 1$  时,并考虑到干涉条纹的记录时间  $t \gg \tau$ , (14)式也可写为

$$\Delta L = 4\pi Aft \cos 2\pi ft \quad (15)$$

耦合器 III 的分光比为  $\alpha:100 - \alpha$  ( $0 < \alpha < 100$ ), 图 2 中,假设耦合器 II 的注入端为 1 端,耦合器 III 的注入端为 5 端,分光比针对耦合器的 3,7 端而言,耦合器的 7 端也为反射光的注入端。设  $m^2 = \frac{\alpha}{100}$  ( $0 < m < 1$ ), 根据(7)式  $\cos^2 KL = m^2 \sin^2 KL$ ,  $= 1 - m^2$ 。同理,假设耦合器 II 的分光比为  $\beta:100 -$

$\beta$  ( $0 < \beta < 100$ ), 设  $n^2 = \frac{\beta}{100}$  ( $0 < n < 1$ ), 根据耦合器的分光特性,在假设耦合器 II 的输入光能量为  $a^2$  的前提下,可计算出

光束(1)对应的振幅为

$$b_2 = \sqrt{1 - n^2}(1 - m^2)a$$

光束(2)对应的振幅为

$$b_1 = nm^2a$$

光束(3)对应的振幅为

$$a_2 = n\sqrt{m^2(1 - m^2)}a$$

光束(4)对应的振幅为

$$a_1 = \sqrt{1 - n^2}\sqrt{m^2(1 - m^2)}a$$

将上面的关系式代入(10),并考虑到(12)(14)式,假设  $P_0 = 2|a|^2$ ,可计算出干涉信号的输出形式

$$\begin{aligned} P_1 = & [(1 - n^2)(1 - m^2) + m^2n^2] \frac{P_0}{2} + \\ & [2n^2(1 - n^2)m^2(1 - m^2)] \frac{P_0}{2} \times \\ & \sin[8\pi^2 Aft(\cos 2\pi ft)/\lambda] \\ P_2 = & [(1 - n^2)(1 - m^2) + n^2m^2] \times \\ & [m^2(1 - n^2) + n^2(1 - m^2)] \frac{P_0}{2} - \\ & [2n^2(1 - n^2)m^2(1 - m^2)] \frac{P_0}{2} \times \\ & \sin[8\pi^2 Aft(\cos 2\pi ft)/\lambda] \end{aligned} \quad (16)$$

利用本文所设计的全光纤干涉系统,在喇叭驱动电压为 5 V,频率为 57.5 Hz 的正弦信号作用下,得到的干涉曲线如图 3(a)(b)所示。实验中,我们故意调整光纤准直器和反射镜面的位置,使得光纤准直器接收的光强度随喇叭振动位移变化而变化,以便检验系统对输出信号的校正功能。

## 5 结果分析

图 3 中,干涉曲线频率的变化反映了喇叭运动加速度的变化,干涉条纹数的变化反映了速度大小,曲线的拐点反映了喇叭运动加速、减速的变化<sup>[2-4]</sup>。干涉曲线振幅的变化反映了系统接收光强度变化对系统的影响。从图 3(a)可以看出,中间的曲线反映了系统对干涉信号因直流分量的变化而引起的畸变的校正效果。对比图中上、下干涉曲线,具有明显的改善。上、下曲线交流分量相位相同,是因为示波器对上面的曲线进行了倒相处理。在图 3(b)中,中间

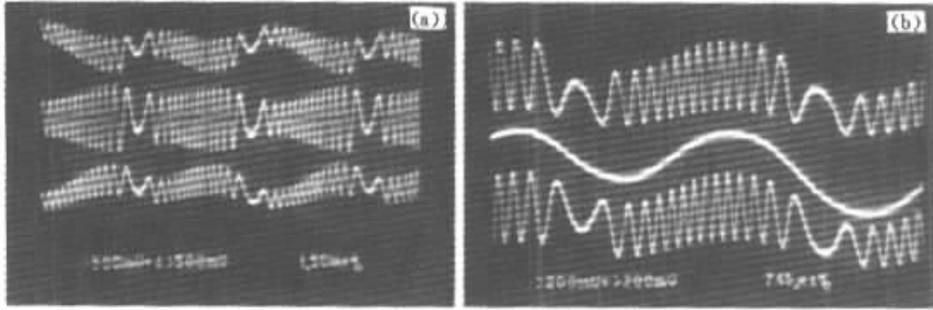


图 3 全光纤干涉仪的干涉信号

Fig.3 Graph of the interference signal for all-fiber interferometer

的曲线通过系统输出的干涉条纹相加,提取了直流分量的变化曲线,同时也验证了干涉系统的输出交流分量反相,直流分量同相的特点。通过两干涉信号相减,可以消除直流分量变化对信号的影响;同时,通过两干涉信号相加,可以提取出直流分量。如果将得到的交流分量除以直流分量,可进一步校正反映干涉信号变化相位的交流分量,减小系统因为光纤准直器接收光强随反射点位置变化而变化造成的影响。

#### 参 考 文 献

1 R. J. Clifton. Analysis of the laser velocity interferometer [ J ]. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**( 13 ) :5335 ~ 5338

2 L. Levin, D. Tzach, J. Shamir. Fiber optical velocity interferometer with very short coherence length light source [ J ]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, **67**( 4 ) :1434 ~ 1437

3 David J. Erskine, Nellis C. Holmes. White-light velocimetry [ J ]. *Nature*, 1995, **377**( 6457 ) :317 ~ 320

4 B. Jia, L. Hu, H. Tan. Fiber-optic interferometer for measuring low velocity of diffusely reflecting surface [ J ]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1999, **22**( 4 ) :231 ~ 234

5 Jia Bo, Jin Yaqiu, Zhang Wei *et al.*. The study of full light speech signal collection system [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ), 2001, **B10**( 3 ) :185 ~ 188 ( in English )

6 Jia Bo, Qian Song-rong, Hua Zhong-yi. Optic fiber length measurement using all-fiber interferometer [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ), 2002, **A29**( 1 ) :73 ~ 75 ( in Chinese )