

文章编号: 0253-2239(2001)04-463-05

多光源白光干涉仪的最佳波长组合*

宋桂菊 方祖捷 王向朝

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 使用多个宽带光源构成的组合光源的白光干涉仪,其干涉信号为单个光源干涉信号的叠加,从而使干涉信号强度重新分布。通过理论分析和计算机模拟,发现一个最佳波长组合,使干涉信号零级条纹与次级极大条纹的强度差变大,且由于它的使用可以更精确地确定零级中心条纹的位置,提高系统分辨率,降低对系统信噪比的要求。并提出了选择最佳波长组合的方法

关键词: 白光干涉仪; 宽带光源; 组合光源

中图分类号: O436 文献标识码: A

1 引 言

近年来,干涉术在高精密测量中的应用^[1~4]越来越广泛。用于位置或位移的较高分辨率测量^[5],以及其它可转化为位移的如温度、应力、压强等物理量的测量也成为一个活跃的研究领域。选择不同的干涉装置,测量结果还可避免光源波长漂移、功率振荡等因素的影响。另外,利用其光源的宽光谱带宽还可测量样品光谱方面的信息^[6]。然而,在测量过程中,信号的处理总要求精确地确定干涉信号包络的零级条纹^[7],这样,在噪声存在的情况下,可能由于中心零级条纹和次级极大条纹强度差别很小,在确定零级条纹位置时存在误差。以前的解决方法一般是通过复杂的信号处理和大量的计算机计算。最近提出了另一种简单、有效的解决方法,即在干涉仪系统中选用多个低相干光源^[8~10]构成的组合光源替代单一光源。组合光源的使用使干涉信号成为幅度受高斯函数和慢变余弦函数双重调制的余弦波,可使确定零级条纹位置的最小误差低于所使用光源的波长。虽然多光源的使用增加了系统复杂性,提高了成本,但却有效地提高了分辨率,降低了对系统信噪比的要求。

在使用多个波长组合光源时,干涉信号中心条纹位置的确定比起使用单个光源已容易得多。但仍然存在如何选择最佳光源波长组合使效果最佳的问题。本文针对两个和三个光源的组合问题,提出了一种寻找最佳波长组合的方法。

2 原 理

普通的干涉仪系统,当使用波长 λ 、相干长度 L_c 的低相干光源作为输入时,只考虑干涉信号中心一套条纹包络,归一化的干涉信号强度交流分量为

$$I_{ac} = \exp\left[-\left(\frac{2x}{L_c}\right)^2\right] \cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda}\right], \quad (1)$$

其中, x 是干涉仪两臂的光程差。

对两个或三个波长的组合光源,各光源互不相干,组合光源干涉仪输出信号强度可简单地作为单光源干涉信号强度之和。下面就从两波长组合光源着手讨论波长选择的问题,再延伸到三波长组合的情况。

两光源组合白光干涉仪输出信号强度为

$$I = I_1 \exp\left[-\left(\frac{2x}{L_{c1}}\right)^2\right] \cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda_1}\right] + I_2 \exp\left[-\left(\frac{2x}{L_{c2}}\right)^2\right] \cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda_2}\right], \quad (2)$$

其中 I_1 、 I_2 分别是两个光源的入射光强度,并假设 I_1 和 I_2 相等, λ_1 、 λ_2 和 L_{c1} 、 L_{c2} 分别是各低相干光源的中心波长和相干长度。假定两光源相干长度相同,即 $L_c = L_{c1} = L_{c2}$, 则

$$I = \exp\left[-\left(\frac{2x}{L_c}\right)^2\right] \cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda_a}\right] \cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda_m}\right], \quad (3)$$

式中 λ_a 、 λ_m 为波长 λ_1 、 λ_2 的组合理,

$$\lambda_a = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2},$$

$$\lambda_m = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$

假设两光源波长相差 $\Delta\lambda$, 分 $\lambda_1 > \lambda_2$ 和 $\lambda_1 < \lambda_2$ 两

* 国家自然科学基金(69978024)资助项目。

收稿日期: 1999-09-03; 收到修改日期: 2000-03-20

种情况考虑。首先考虑 $\lambda_1 < \lambda_2$ 的情况, 即 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, 则

$$\lambda_a = 2\lambda_1 \left[1 - \frac{\lambda_1}{2\lambda_1 + \Delta\lambda} \right], \quad (4)$$

$$\lambda_m = 2\lambda_1 \left[1 + \frac{\lambda_1}{\Delta\lambda} \right], \quad (5)$$

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_a} = 1 + \frac{2\lambda_1}{\Delta\lambda}. \quad (6)$$

干涉信号的处理要求找出零级极大条纹的位置, 所以只须比较零级条纹和一级极大条纹的强度。(3) 式表述了周期为 λ_a 的余弦波, 其振幅受周期为 λ_m 的慢变余弦波调制, 整个输出强度再受高斯函数 $\exp[-(2x/L_c)^2]$ 调制。 λ_a 、 λ_m 分别称做振动波长和调制波长。组合光源干涉信号的极大条纹应由快变

$$I_{01n} = \frac{I_{01}}{I_{00}} = \frac{\exp[-(2\lambda_a/L_c)^2] \cos(2\pi\lambda_a/\lambda_m) + \exp[-(2\lambda_a/L_c)^2] \cos(\pi\lambda_a/\lambda_m)}{1 + \exp[-(\lambda_a/L_c)^2] \cos(\pi\lambda_a/\lambda_m)}, \quad (8)$$

I_{01n} 是 $\Delta\lambda$ 的单调递减函数。归一化的中心条纹强度与第一次极强之差为

$$\Delta I_{01n} = \frac{I_{00} - I_{01}}{I_{00}} = 1 - I_{01n}. \quad (9)$$

在白光干涉仪中, 为了精确确认零级条纹位置, ΔI_{01n} 的值必须大于系统噪声, 换言之, 最小信噪比为

$$\text{SN}_{\min}(\text{dB}) = -10 \lg(\Delta I_{01n}) = -10 \lg(1 - I_{01n}). \quad (10)$$

它是 $\Delta\lambda$ 的递减函数。

另外, 当信号慢变调制的一级包络的极大条纹大于零级包络的一级极大条纹时, 中心条纹将与其相混淆, 从而提高对系统信噪比的要求, 所以此时应加以考虑。

$$I_{10n} = \frac{I_{10}}{I_{00}} = \frac{\exp[-(n\lambda_a/L_c)^2] \cos[\delta\pi/(n+\delta)] + \exp[-((n+1)\lambda_a/L_c)^2] \cos[(1-\delta)\pi/(n+\delta)]}{1 + \exp[-(\lambda_a/L_c)^2] \cos(\pi\lambda_a/\lambda_m)} \quad (12)$$

相应地与零级条纹之差为

$$\Delta I_{10n} = \frac{I_{00} - I_{10}}{I_{00}} = 1 - I_{10n}. \quad (13)$$

最小信噪比为

$$\text{SN}_{\min}(\text{dB}) = -10 \lg(\Delta I_{10n}) = -10 \lg(1 - I_{10n}). \quad (14)$$

可见, I_{10n} 也是 $\Delta\lambda$ 的函数。从(8)式和(12)式可推得 $I_{10n}(\Delta\lambda)$ 与 $I_{01n}(\Delta\lambda)$ 仅有一个交点, 交点对应的 $\Delta\lambda$ 就是达到最佳分辨效果时两光源的最佳波长差 $\Delta\lambda_{\text{opt}}$ 。也就是说, 当波长为 λ_1 和 $\lambda_1 + \Delta\lambda_{\text{opt}}$ 的光源同

余弦函数的极大值决定。

考虑条纹的峰—峰值, 零级包络的零级条纹强度为

$$I_{00} = I(0) - I\left[\frac{\lambda_a}{2}\right] = 1 + \exp\left[-\left[\frac{\lambda_a}{L_c}\right]^2\right] \cos\left[\frac{\pi\lambda_a}{\lambda_m}\right]. \quad (7)$$

零级包络的一级条纹强度为

$$I_{01} = I(\lambda_a) - I\left[\frac{\lambda_a}{2}\right] = \exp\left[-\left[\frac{2\lambda_a}{L_c}\right]^2\right] \cos\left[\frac{2\pi\lambda_a}{\lambda_m}\right] + \exp\left[-\left[\frac{\lambda_a}{L_c}\right]^2\right] \cos\left[\frac{\pi\lambda_a}{\lambda_m}\right].$$

归一化的一级极强为

假定 $\lambda_m/\lambda_a = n + \delta$, n 是整数, δ 是介于 0 与 1 之间的实数, 一般情况下 n 总是大于 3, (3) 式成为

$$I(x) = \exp\left[-\left[\frac{2x}{L_c}\right]^2\right] \times \cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda_a}\right] \cos\left[\frac{2\pi x}{(n+\delta)\lambda_a}\right]. \quad (11)$$

一级条纹包络的极大值为

$$I_{10} = \left| I\left[\frac{n\lambda_a}{2}\right] - I\left[\frac{(n+1)\lambda_a}{2}\right] \right| = \exp\left[-\left[\frac{n\lambda_a}{L_c}\right]^2\right] \cos\left[\frac{\delta\pi}{n+\delta}\right] + \exp\left[-\left[\frac{(n+1)\lambda_a}{L_c}\right]^2\right] \cos\left[\frac{(1-\delta)\pi}{n+\delta}\right].$$

同样, 归一化的 I_{10} 可表示为

时照到干涉仪系统时, 在信号处理过程中, 分辨零级条纹将比使用单个光源以及 λ_1 与任何其它长波长的光源组合具有更高准确度, 且对检测系统信噪比的要求最低。改变初始波长 λ_1 , 同样地可得到与之对应的长波方向的最佳波长差。所以, 对任何波长的低相干光源, 都存在一个中心波长比它大的另一低相干光源, 二者组成的组合光源作为干涉仪的光源时, 能更精确地确定零级条纹的位置。

同理, 当 $\lambda_1 > \lambda_2$ 时, 令 $\Delta\lambda' = \lambda_1 - \lambda_2$, 则

$$\lambda_{l'} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = 2\lambda_1 \left[1 - \frac{\lambda_1}{2\lambda_1 - \Delta\lambda'} \right]$$

$$\lambda_{m'} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = 2\lambda_1 \left[\frac{\lambda_1}{\Delta\lambda'} - 1 \right]$$

$$\frac{\lambda_{m'}}{\lambda_{l'}} = \frac{2\lambda_1}{\Delta\lambda'} - 1$$

类似地,可推得,对任何低相干光源,都存在另一个中心波长比它短的低相干光源,二者同时照到干涉仪后能更精确地确定零级条纹位置。且通过计算机模拟发现,若对于 $\lambda_1 < \lambda_2$ 的两个光源,当 λ_2 作为 λ_1 的最佳长波长选择时,即 $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda_{\text{opt}} | \lambda_1$ 时, λ_1 同时就是 λ_2 的最佳短波长选择,即 $\lambda_1 = \lambda_2 - \Delta\lambda_{\text{opt}} | \lambda_2$ 。这样,给定某一波长 λ_1 ,找出其相应的最佳长波长光源选择 λ_{2L} 和最佳短波长光源选择 λ_{2S} ,分别由 λ_1, λ_{1L} 和 λ_{1S} 或 $\lambda_1, \lambda_{1L}, \lambda_{1L} + (\text{长}) \Delta\lambda_{\text{opt}} | \lambda_{1L}$ 或 $\lambda_1, \lambda_{1S}, \lambda_{1S} - (\text{短}) \Delta\lambda_{\text{opt}} | \lambda_{1S}$ 三个光源构成的组合光源,将使白光干涉仪系统更精确地确认零级条纹位置,且比单光源和两光源及其它任何三光源组合对系统信噪比的要求都低。

考虑条纹包络

$$I_c(x) = \exp\left[-\left(\frac{2x}{L_c}\right)^2\right] \cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda_m}\right],$$

并定义 $I_c(x)$ 下降到最大值的 $1/e$ 时的光程差 $2x_0$ 为组合光源的等效相干长度 L_{ce} ,即方程

$$\exp\left[-\left(\frac{2x_0}{L_c}\right)^2\right] \cos\left[\frac{2\pi x_0}{\lambda_m}\right] = \frac{1}{e}$$

的解 $2x_0$ 表示组合光源的等效相干长度。

3 模拟计算

为了寻找波长 λ_1 的最佳组合 λ_2 ,对一系列 $\lambda_1 < \lambda_2$ 的两光源系统进行了计算,发现随着波长差的增加,组合光源的等效相干长度 L_{ce} 逐渐下降到很小,如图 1 所示。说明中心条纹会由于组合光源的使用而更容易地确定,从而提高系统的分辨率,但由于此时信号包络被调制,据此所得的等效相干长度已不能唯一地作为分辨率的标准,所以虽然从图 2 看出 $\Delta\lambda$ 越大,等效相干长度越小,但并不说明系统分辨率将无限提高,这里存在一个最佳波长组合的问题。

图 2 描述了低相干光源单个或组合照明时干涉信号的模拟结果。其中图(a)是单光源照明的输出,图 2(b)、图 2(c)是双光源的输出,图 2(d)是三光源的输出。图 2(b)、图 2(c)表明了,在两光源系统中,

随着光源波长差 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 的增加,归一化的第一次极强强度 I_{01n} 减小,但 I_{10n} 却增加,所以一定存在在一个最佳波长差 $\Delta\lambda_{\text{opt}}$ 使得组合光源输出 $I_{01n} = I_{10n}$,此时对系统信噪比要求最低。从图 2(d)还可看出,三波长组合对系统信噪比的要求低于两波长组合。

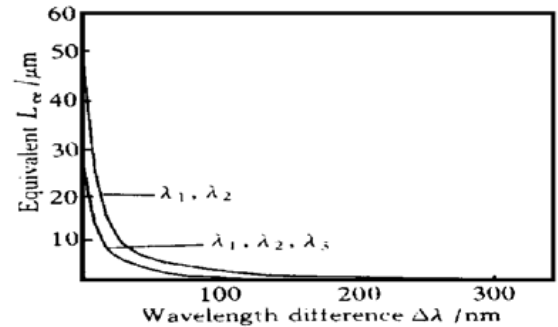


Fig. 1 The variation of equivalent coherence length L_{ce} with the wavelength difference $\Delta\lambda$

寻找最佳波长差的过程如图 3。设各低相干光源的相干长度为 $60 \mu\text{m}$,对波长 $\lambda_1 = 635 \text{ nm}$,在长波长方向, $I_{10n}(\Delta\lambda)$ 与 $I_{01n}(\Delta\lambda)$ 仅有一个交点,如图 3(a)所示。交点对应的 $\Delta\lambda | L = 80 \text{ nm}$ 就是两光源的最佳波长差。对波长 $\lambda_2 = 715 \text{ nm}$,在短波长方向, I_{10n} 与 I_{01n} 也仅有一个交点,如图 3(b)所示,交点对应的 $\Delta\lambda | S = 80 \text{ nm}$ 就是两光源的最佳波长差。从图中可看出, λ_1 在长波方向的最佳波长差,正好是 λ_2 在短波长方向的最佳波长差。

对不同的波长,找出与其有相同相干长度并组成两光源组合的最佳波长差,在假定各光源有共同的相干长度,画出最佳波长差对波长的变化,如图 4 所示。发现最佳波长差是随波长线性变化的。这样,对不同的波长,都可以方便地找出与其组合的最佳波长差。例如,对中心波长 $\lambda_1 = 635 \text{ nm}$, $L_c = 16 \mu\text{m}$ 光源,从图中可推得最佳波长差为 160 nm 。改变各光源的共同相干长度,发现同样的波长,相干长度越短的光源,其相应的最佳波长差越大。

图 5 表明系统运转于有共同相干长度的两波长组合光源时,其所需最小信噪比 SN_{min} 随波长的增加而下降,且比单波长时有所下降。三波长组合光源又比两波长组合光源优越。因此,上文提到的几种三光源组合中,由 $\lambda_1, \lambda_{1L}, \lambda_{1L} + (\text{长}) \Delta\lambda_{\text{opt}} | \lambda_{1L}$ 构成的组合光源是最佳选择。此时,比起单光源系统、两光源系统和其它任何三光源系统,都能更精确地分辨出零级条纹的位置,从而对探测系统的最小信噪比要求大大降低。另外,相干长度的增加,会导致 SN_{min} 的增加。如对 $\lambda_1 = 680 \text{ nm}$, $L_c = 16 \mu\text{m}$,单光

源时 SN_{min} 的值约为 48 dB, 两光源最佳组合时降为 10 dB, 最佳三光源的使用将使信噪比降到几个 dB.

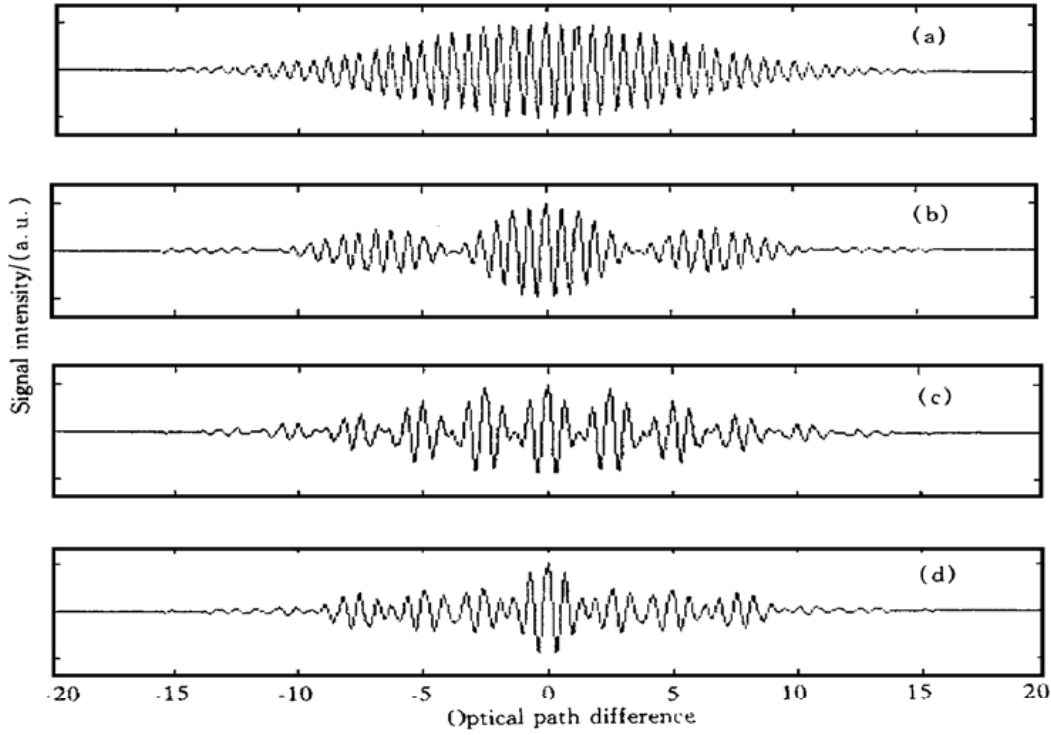


Fig. 2 Computer-simulated interferometric fringe patterns. (a): $\lambda_1 = 635 \text{ nm}$; (b) $\lambda_1 = 635 \text{ nm}, \lambda_2 = 688 \text{ nm}$; (c) $\lambda_1 = 635 \text{ nm}, \lambda_2 = 830 \text{ nm}$; (d) $\lambda_1 = 635 \text{ nm}, \lambda_2 = 688 \text{ nm}, \lambda_3 = 830 \text{ nm}$

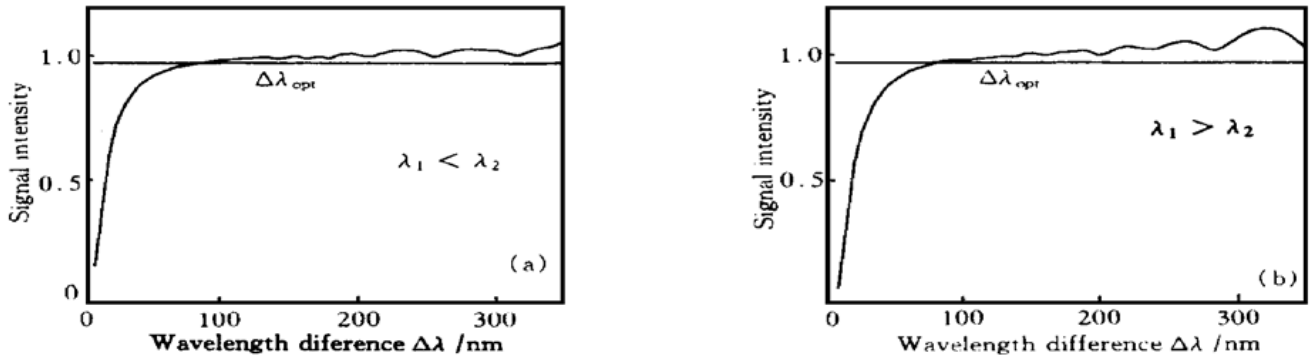


Fig. 3 The variation of normalized fringe intensity I_{01n} / J_{10n} with the wavelength difference $\Delta\lambda$

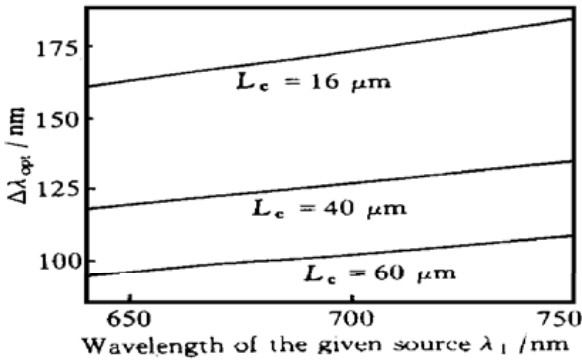


Fig. 4 The variation of optimum wavelength difference with the given laser diode wavelength

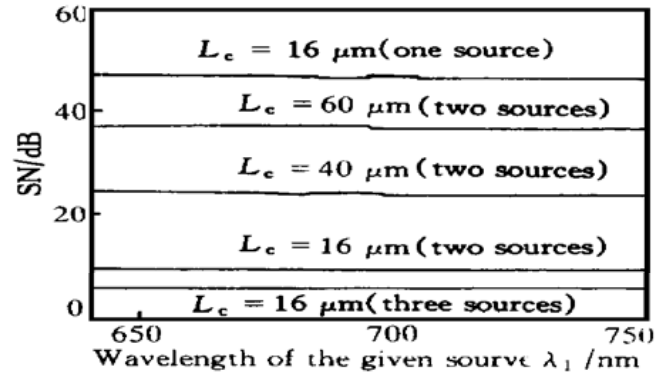


Fig. 5 The variation of SN_{min} with the given laser diode wavelength is the optimum combination

讨论 讨论了在使用组合光源的干涉仪系统中, 干涉条纹随各个光源波长差别而不同的情况。理论上提出了寻找最佳波长差的方法, 并通过模拟计算发

现, 使用最佳波长差, 系统分辨零级条纹所需的最小信噪比将大大减小。然而, 由于多光源的使用, 给干涉仪系统的准直带来困难, 且比起单光源系统成本

也会增加。但它在提高零级条纹位置确定的准确性上,大大优越于单光源系统。在白光光纤传感器等白光干涉仪系统中,它能有效地提高系统的分辨率。

参 考 文 献

- [1] 王向朝, 佐佐木修己, 菊地崇朗 等. 使用相位共轭光精密测量粗糙面物体的振动振幅. 光学学报, 2000, **20**(4): 525~ 528
- [2] 宋桂菊, 任宏武, 张莲英 等. 光学相干层析成像的实验研究. 光学学报, 2000, **20**(4): 509~ 513
- [3] Wang X Z, Sasaki O, Suzuki T *et al.*. Response characteristics of a self-pumped phase-conjugate mirror to spatially nonuniform phase changes of an incident wave and their applications. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(4): 1184~ 1190
- [4] Wang X Z, Sasaki O, Suzuki T *et al.*. Measurement of small vibration amplitudes of a rough surface using an interferometer with a self-pumped phase-conjugate mirror. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25): 4593~ 4597
- [5] Koch A, Ulrich R. Fiber-optic displacement sensor with 0.02 μm resolution by white-light interferometer. *Sensors and Actuators A*, 1991, **25**(27): 201~ 207
- [6] Diddams S, Diels J C. Dispersion measurements with white-light interferometry. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1996, **13**(6): 1120~ 1129
- [7] Gerges A S, Newson T P, Jackson D A. Coherence tuned fiber optical sensing system with self-initialization based on a multimode laser diode. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(30): 4473~ 4480
- [8] Chen S, Grattan K T V, Meggitt B T *et al.*. Instantaneous fringe-order identification using dual broadband sources with widely spaced wavelengths. *Electron. Lett.*, 1995, **29**(4): 334~ 335
- [9] Yao Y J, Ning Y N, Jackson D A. Synthesized source for white-light sensing system. *Opt. Lett.*, **18**(6): 462~ 464
- [10] Wang D N, Ning Y N, Grattan K T V *et al.*. Three-wavelength combination source for white-light interferometry. *IEEE. Photon. Tech. Lett.*, **5**(11): 1350~ 1352

The Optimum Wavelength Combination in Multi-Light-Source White-Light Interferometer

Song Guiju Fang Zujie Wang Xiangzhao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 30 September 1999; revised 20 March 2000)

Abstract: The interference signal of white-light interferometer with several broadband light sources is the superposition of those only with one broadband light source. Then the signal intensity is redistributed. An optimum wavelength combination that makes the intensity difference between zero-order and first-order fringe increase is found by theoretical analysis and computer simulations. The use of the optimum wavelength combination results in the more accurate determination of zero-order fringe, the enhancement of the system resolution, and the decrease of the needed signal-noise-ratio for identifying zero-order fringe. The method to select the optimum wavelength combination is also presented.

Key words: white-light interferometer; broadband light source; combination light source