

白光光源光谱对白光干涉信号的影响

胡艳敏 程思晗 聂 平 马 龙 秦 哲

(中国民航大学 中欧航空工程师学院 天津 300300)

摘要:传统白光光源一般由一个纯高斯函数来进行模拟,通过改变中心波长和带宽来调节干涉信号.本文分别利用高斯模型和洛伦兹模型来讨论白光干涉信号,得出中心波长与相干长度的比值越大,零级条纹可见性越高,以及高斯模型的可靠范围.鉴于现代白光光源与传统光源不同,以发光二极管(LED)为例,模拟研究现代白光光源对白光干涉信号的影响.利用洛伦兹模型模拟白色 LED 光源时干涉信号存在凹陷,通过合理调整 LED 拟合光峰值间的距离降低凹陷对零级条纹的影响,以期得到在实际应用中干涉特性较优的白光光源光谱.

关键词:白光干涉;白光光源光谱;发光二极管;相干长度;零级条纹可见性

中图分类号:O 4-1

文献标识码:A

文章编号:1000-0712(2018)05-0044-05

【DOI】10.16854/j.cnki.1000-0712.170578

近年来,随着微纳米技术的快速发展,各类高精密度器件得到了广泛的应用.而这些元器件在微结构上越来越小,其几何测量也给人们提出了更高的要求^[1].传统的测量方法已经无法满足这类新器件的检测需求,于是在 20 世纪 90 年代光学显微干涉术,尤其是单色光相移干涉术以其速度快、非接触、场式测量和纳米级分辨力等优势被越来越广泛地应用于微结构形貌检测中.然而,单色光相移干涉术检测方法在处理测量数据的过程中有一个特别影响结果的步骤叫做“相位解包裹”.直接从测量图像读出相位值分布,它的范围在 $-\pi$ 到 π 之间,我们将之称为包裹相位图^[2,3].相位解包裹将包裹相位图连成连续相位图,其中各个数据点间的相位差就表示出了一些被检测表面的高度差.由于在相位分布上存在周期性,相位解包裹的过程中不能对之间的周期数进行评估,所以只能假设相位差在一个周期内,产生“相位模糊”^[4].于是白光扫描干涉术应运而生,它利用相干长度很短的白光作为照明光源,有效地克服了相位模糊的问题,从而很大程度地扩展了测量范围^[5].

与单色光干涉信号的形式不同,白光干涉信号通常被表示为一个包络受高斯函数调制的余弦信号.因此,其可见性不恒定,随不同的扫描位置而变

化.白光光源包含一定波长范围的多色光,将对干涉信号产生一定的影响^[6,7].当参考光与测量光之间光程差为零时,干涉信号有最大值出现,即零级条纹的强度,我们称之为相干峰.在研究白光干涉信号的过程中我们通过定位相干峰的位置来测得样品表面的相对高度,所以精确定相干峰位置就能提高测量精度.相干峰相对于其它次级条纹的强度差值的大小,对确定相干峰的位置有决定性的意义,而白光光源的光谱函数的分布决定了其干涉信号的包络函数,因此,白光光源光谱对白光干涉信号的影响有重要意义.

本文分别利用高斯模型和洛伦兹模型来模拟白光光谱,通过分析和对比两种模型的白光干涉零级条纹的可见性,讨论了白光光谱对白光干涉信号的影响.鉴于现代白光光源与传统光源不同,以白色 LED 为例模拟研究现代白光光源对白光干涉信号的影响,希望在实际应用中得到干涉特性较优的白光光源光谱.

1 高斯模型

利用一个纯高斯函数来模拟传统白光光源光谱,通过调节中心波长和带宽即可调节干涉信号.在光学中,针对一个准单色光,能够发生干涉的最大

收稿日期:2017-10-21;修回日期:2017-12-23

基金项目:国家自然科学基金项目(11404396)、中国民航大学科研启动项目(2012QD13X)、中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122014H004)资助

作者简介:胡艳敏(1984—),女,河南濮阳人,中国民航大学中欧航空工程师学院讲师、博士,主要从事理论物理研究工作.

通讯作者:程思晗, E-mail: chengsihan_siae@163.com

大学物理

<http://dxw.bnu.edu.cn>

光程差被称为相干长度,它的表达式 L_c 为^[8]

$$L_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

式中 λ_0 表示中心波长, $\Delta\lambda$ 为光谱的带宽. 当光程差远大于相干长度的时候, 条纹可见度很快趋近于 0.

根据双光束的干涉理论^[9], 双光束干涉条纹强度可表示为

$$I_{ac} = 2 I_0 \exp\left[-\frac{2\pi^2}{L_c^2} z^2\right] \cos\left(4\pi \frac{z}{\lambda_0}\right) \quad (2)$$

其中 L_c 是光源的相干长度, λ_0 是光源中心波长, z 为坐标位置, I_0 是背景光强.

零级条纹相比于其它级次条纹的强度差值直接关系到相干峰感知算法^[10-13]的应用, 从而影响测量精度. 为了简便起见, 我们取零级条纹与一级条纹之间的强度差值来分析, 引入零级干涉条纹可见性系数^[9]:

$$V = \frac{I_{zero} - I_1}{I_{zero}} \quad (3)$$

式中 I_{zero} 表示零级条纹的光强值, I_1 表示一级条纹的光强值. 由式(2)可得:

$$V = 1 - \exp\left[-\frac{\pi^2}{2} \left(\frac{\lambda_0}{L_c}\right)^2\right] \quad (4)$$

由此可见, 在中心波长不变的情况下, 光源相干长度 L_c 越小, 零级干涉条纹可见性越大. 例如, 若光源的中心波长 $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$, 带宽 $\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$, 可算出 $V = 0.0123$; 若取 $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$, 带宽 $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$, 可算出 $V = 0.1281$, 零级条纹可见性显著提高. 若保持 $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$ 不变, 中心波长分别取 $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$ 和 $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$, 可算出 $V_{500 \text{ nm}} = 0.1791$, $V_{700 \text{ nm}} = 0.0958$. 可以看出, 对于给定的中心波长, 光源的相干长度越小, 零级干涉条纹可见性越大. 图 1 是 4 组参数下干涉条纹的光强分布图.

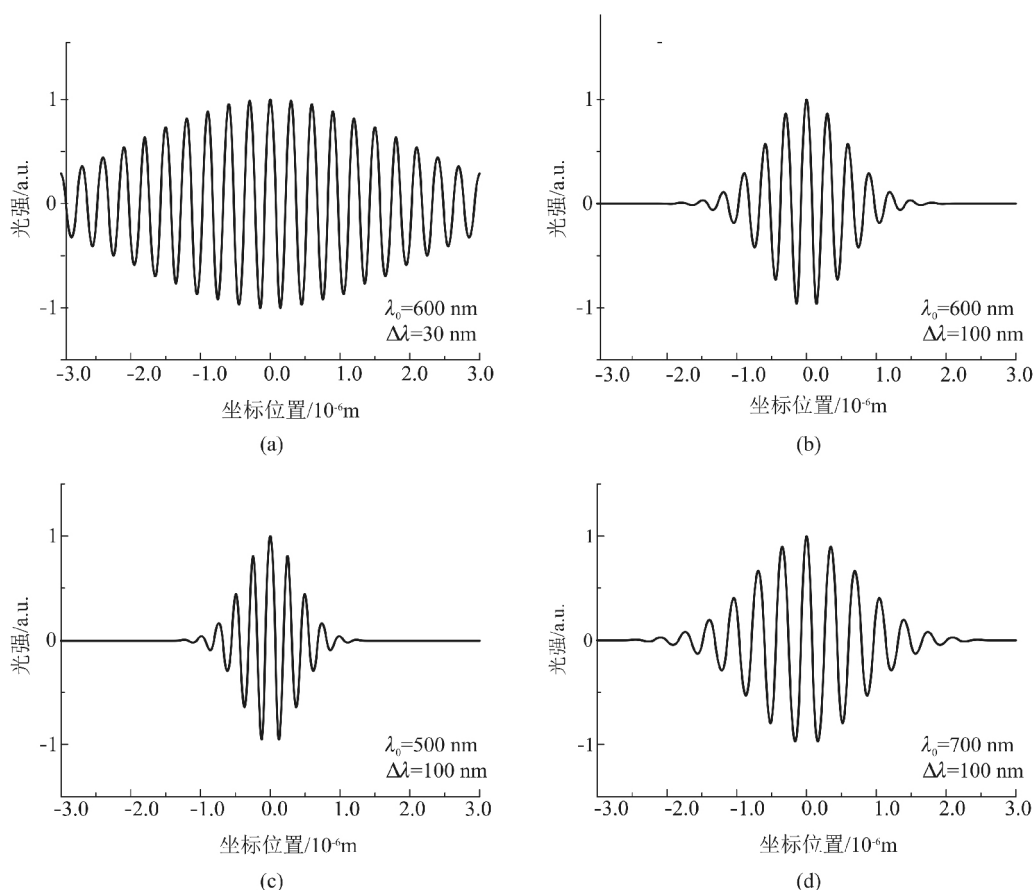


图 1 高斯模型下白光干涉信号光强分布图

2 洛伦兹模型

利用高斯模型模拟白光光源光谱的方法简单,

但是它没有考虑环境因素的影响. 在实际当中最大的局限在于干涉信号会受环境因素的影响, 如震动、噪声等. 洛伦兹模型在一定程度上可以弥补高斯模

大学物理

型的缺点,它增加了高斯模型里面没有的各种其它因素,例如物镜的数值孔径,参考光与样品表面反射光的相位偏移等.因此,在研究实际问题尤其在白色发光二极管的问题时,洛伦兹模型应用十分广泛.我们一般采取下面的经验公式^[14,15]:

$$I_{\text{int}}(z) = C_1 \int_B \int_0^{\theta_0} \{k^2 \cos[2k(z-z_0) \cos \theta + \phi] \sin \theta \cos \theta\} F(k) dk d\theta \quad (5)$$

其中 I_{int} 表示干涉信号的光强, C_1 是常数, B 为带宽, z_0 是样品表面的高度轮廓, z 是离焦位置(跟光程差有关), k 表示角波数($k = 2\pi/\lambda$), θ_0 与物镜的数值孔径 NA 有关系($NA = n \sin \theta_0$, n 是工作镜头的介质折射率), ϕ 表示相位偏移, $F(k)$ 表示光源谱强度.

为了简便,我们取 $C_1 = 1$, $n = 1$, $NA = 0.4$, $z_0 = 0$ 和 $\phi = 0$, 可得:

$$I_{\text{int}}(z) = \int_B \frac{F(k)}{-4z^2} [1.84kz \sin(1.84kz) + \cos(1.84kz) - 2kz \sin(2kz) - \cos(2kz)] dk \quad (6)$$

利用纯高斯函数对白光源模拟可得

$$F(k) = \exp\left[-\frac{(k-k_0)^2}{2\Delta k^2}\right] \quad (7)$$

根据式(6)和式(7)进行计算得出干涉条纹的可见性并与高斯模型的计算结果对比,如表1所示.可以看出,两个模型零级条纹可见性系数并不是随着相干长度的增大而减小的,而是随着带宽与中心波长比值增大而增大,如图2所示.

洛伦兹模型是与实际相符合的经验公式,故可以以洛伦兹模型为参照,来研究高斯模型的可靠范围.通过表1中的计算结果可以看出:当中心波长不同时,零级条纹可见性系数 V 的下降幅度也是不一样的;随着带宽与中心波长的增大,高斯模型与洛伦兹模型的误差也就越大.

因此,在利用高斯模型(实际当中利用传统的白光光源)时,应该选择中心波长在 600 nm 及以下,并且带宽与中心波长的比值在 0.3 及以下的纯高斯型光谱.另外,表1中的数据说明通过合理改变带宽和中心波长可以得出相同的白光.但是,对于白色 LED 来说,只有一定形状的谱线才能构成白光光源,一般情况下,其光谱上有两个峰,并且峰值大小一般不同,所以不能通过改变中心波长和带宽以获得相应优化的白光干涉信号.在这种情况下,需要使用洛伦兹模型来进行研究.

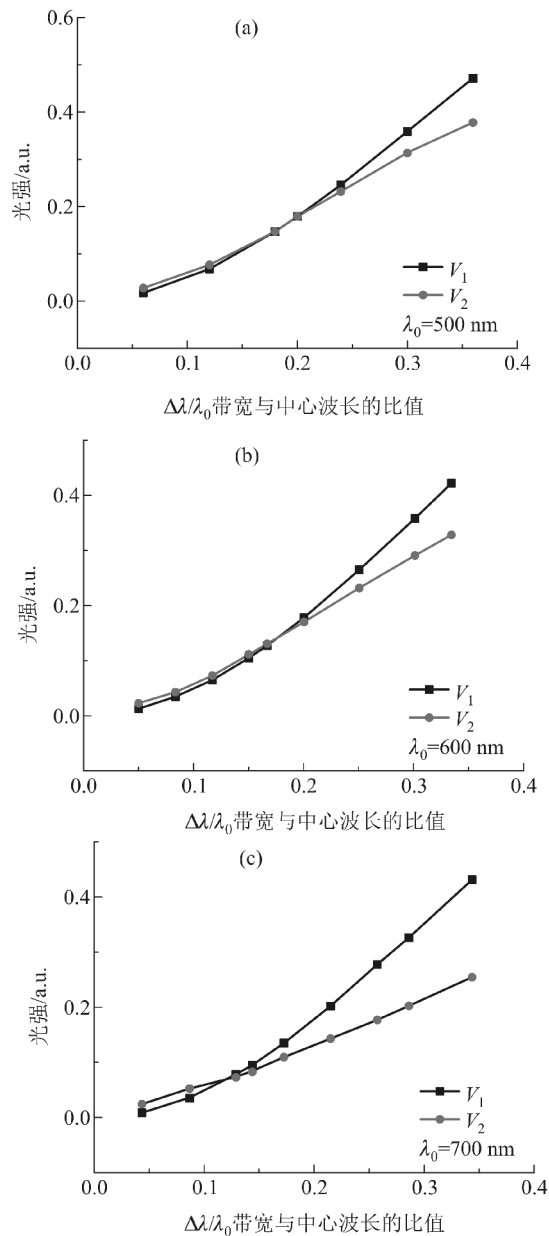


图2 零级条纹可见性 V 随 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 的变化趋势

图2中 V_1 和 V_2 分别是利用高斯模型和洛伦兹模型模拟得到的条纹可见性系数,其中不同中心波长计算的可见性见表1.

表1 高斯模型与洛伦兹模型零级条纹可见性及相关参数

λ_0 / nm	$\Delta\lambda$ / nm	$\Delta\lambda/\lambda_0$	L_c / nm	V_1	V_2
500	30	0.060 0	8 333	0.017 6	0.027 0
500	60	0.120 0	4 167	0.068 6	0.076 2
500	90	0.180 0	2 778	0.147 8	0.148 0
500	100	0.200 0	2 500	0.179 1	0.178 4

续表					
λ_0/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$\Delta\lambda/\lambda_0$	L_c/nm	V_1	V_2
500	120	0.240 0	2 083	0.247 4	0.232 9
500	150	0.300 0	1 667	0.358 6	0.314 3
500	180	0.360 0	1 389	0.472 5	0.378 4
600	30	0.050 0	12 000	0.012 3	0.022 6
600	50	0.083 3	7 200	0.033 7	0.042 7
600	70	0.116 7	5 143	0.065 0	0.072 7
600	90	0.150 0	4 000	0.105 1	0.111 7
600	100	0.166 7	3 600	0.128 1	0.130 6
600	120	0.200 0	3 000	0.179 1	0.171 2
600	150	0.250 0	2 400	0.265 4	0.232 8
600	180	0.300 0	2 000	0.358 6	0.291 4
600	200	0.333 3	1 800	0.422 1	0.329 9
700	30	0.042 9	16 333	0.009 0	0.025 3
700	60	0.085 7	8 167	0.035 6	0.052 9
700	90	0.128 6	5 444	0.078 3	0.074 4
700	100	0.142 9	4 900	0.095 8	0.084 8
700	120	0.171 4	4 083	0.135 0	0.109 3
700	150	0.214 3	3 267	0.202 8	0.144 1
700	180	0.257 1	2 722	0.278 4	0.177 8
700	200	0.285 7	2 450	0.326 2	0.203 5
700	240	0.342 9	2 041	0.430 9	0.253 7

3 现代白光光源

白色 LED 的光谱一般由两个波峰构成,这两种

波峰分别代表各自不同颜色的波,例如黄色发光二极管与蓝色发光二极管的组合就能够得到白光 LED。这里,我们选用如下函数对白色发光二极管的光谱形状进行模拟^[9]:

$$F(k) = A_1 \exp \left[- \left(\frac{k - k_1}{\alpha_1} \right)^2 \right] + A_2 \exp \left[- \left(\frac{k - k_2}{\alpha_2} \right)^2 \right] \quad (8)$$

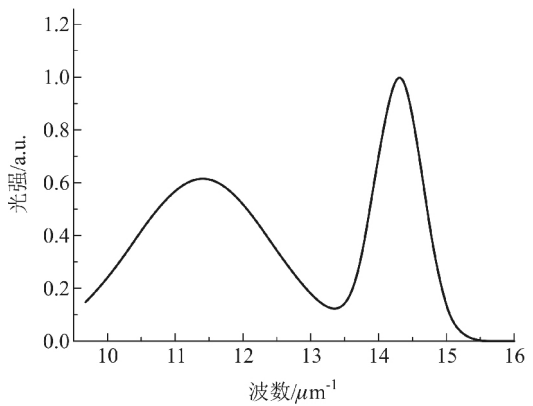
式中 A_1 和 A_2 是比例因子, α_1 和 α_2 是每种颜色的光在谱域中的宽度, k_1 和 k_2 分别是每束光各自波峰的波数。

我们采用两种方法模拟白色发光二极管的光谱,分别是荧光体白色发光二极管的光谱(简称荧光体光谱)和由蓝色(LXHL-LB5C)与绿色(LXHL-LM5C)LED 构成的混合光源的光谱^[16](简称蓝绿混合光谱)。表 2 是两种光谱的具体参数,图 3 是两种光谱的光谱图。

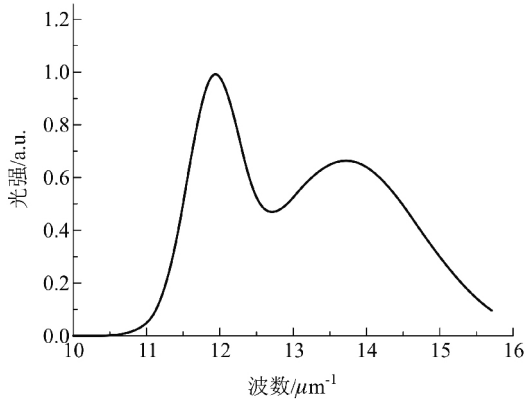
表 2 两个现代白光光源模型的参数

	A_1/A_2	$k_1 / (\text{rad}/\mu\text{m})$	$k_2 / (\text{rad}/\mu\text{m})$	$\alpha_1 / (\text{rad}/\mu\text{m})$	$\alpha_2 / (\text{rad}/\mu\text{m})$
荧光体光谱	1.60	14.3	11.4	0.494 1	1.439
蓝绿混合光谱	1.28	11.9	13.7	0.494 1	1.439

将两种光谱的光谱函数代到式(6)中,可得到二者干涉信号的光强分布图,如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,荧光体光谱白光干涉信号具有较高的零级条纹可见性 $V=0.269 5$,与纯高斯白光光谱(谱中只有一个峰)的图不同的是在 $z=0.483 5 \mu\text{m}$ 的时候出现了一个凹陷。



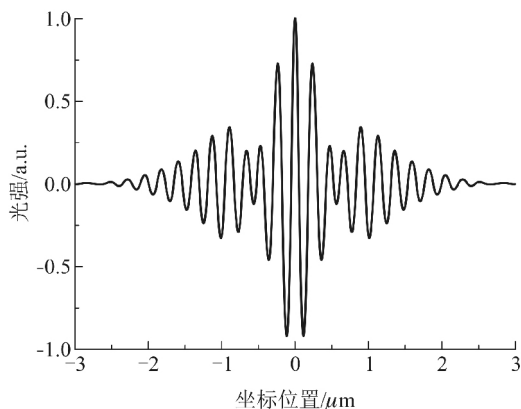
(a) 荧光体白色 LED 光谱



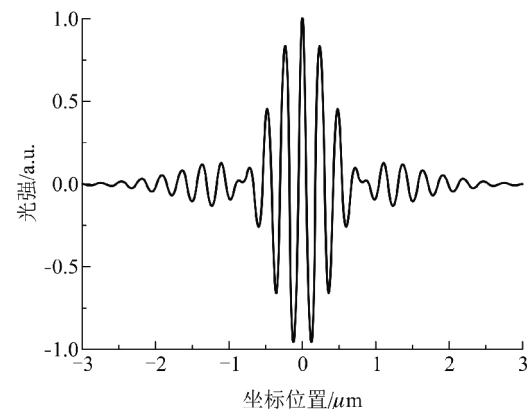
(b) 蓝绿 LED 混合光源光谱

图 3 两个现代白光光源模型的光谱图

由于在实际的干涉图中位于 $z=0.5\text{ }\mu\text{m}$ 处也存在凹陷,故该模型是可行的.凹陷的存在会对白光扫描干涉术中相干峰的提取造成影响,且凹陷离零级条纹位置越近影响越大.因此,我们需要对荧光体光谱进行修正,找到一种白色 LED 光谱使得其凹陷的位置更加远离零级条纹.



(a) 荧光体白色 LED 干涉信号光强分布图



(b) LED 混合光源干涉信号光强分布图

图 4 两个现代白光光源模型的干涉信号光强分布图

4 结论

白光干涉信号中零级条纹的可见性直接影响其位置的提取,从而影响白光干涉测量技术的精度.本文利用高斯模型和洛伦兹模型分别模拟了不同白光光谱下白光干涉信号强度,计算了零级条纹的可见性并进行比较,主要得到的结论如下:

1) 利用高斯模型进行干涉强度分析时,中心波长与光源相干长度的比值越大,零级条纹可见性越大.零级条纹可见性决定了实际中白光扫描干涉术的精度,实际应用中应选择中心波长在 600 nm 及以下,并且带宽与中心波长的比值在 0.3 及以下的纯高斯型光谱,超过该范围时高斯模型不再适用,需要使用洛伦兹模型.

2) 利用洛伦兹模型模拟白色 LED 光谱时,干涉信号存在凹陷,两种颜色拟合光的峰值靠得越近,凹陷距零级条纹距离越大,对白光扫描干涉术的影响越小.

在实际应用中,我们需要减小 LED 光谱的两个主峰之间的距离,使得其凹陷的位置远离零级条纹,降低凹陷对白光扫描干涉术中相干峰的提取精度造成的影响.因此,能够制造出凹陷可控且零级条纹可见性足够好的白色 LED 成为未来的研究方向.

参考文献:

- [1] Guo T, Hu C G, Chen J P, et al. Vertical scanning white light interference for dimensional characterization of micro-electromechanical system devices [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 668-672.
- [2] Servin M, Rodriguez-Vera R, Moore A J. A robust cellular processor for phase unwrapping [J]. Modern Optics, 1994, 41(1): 119-127.
- [3] Baldi A, Bertolino F, Ginesu F. On the performance of some unwrapping algorithms [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 37: 313-330.
- [4] Harasaki A, Wyant J C. Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry [J]. Applied Optics, 2000, 39(13): 2101-2106.
- [5] 何永辉, 蒋剑峰, 赵万生. 基于扫描白光干涉法的表面三维轮廓仪 [J]. 光学技术, 2001, 27(2): 150-155.
- [6] 朱凯翔, 徐平, 焦洪臣, 等. 傅里叶变换光谱仪用于白光光谱测量的实验设计 [J]. 大学物理, 2014, 33(6): 47-50.
- [7] 招倩儿, 于国萍. 光源非单色性对干涉条纹可见度影响的微机模拟 [J]. 大学物理, 1993, 12(10): 17-18.
- [8] 赵凯华, 钟锡华. 光学(上册) [M]. 北京: 北京大学出版社, 1984: 323-327.
- [9] Kino G S, Chim S S C. Mirau correlation microscope [J]. Applied Optics, 1990, 29(26): 3775-3783.

(下转 51 页)

大学物理

<http://dxw.bnu.edu.cn>

Einstein's ring of a distant star formed by the sun's gravity

ZHAO Fan², HE Feng², REN Wen-hui³

(1. Orient Science and Technology College, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. College of Physics and Electronic Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;

3. College of Science, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: When a distant star, the sun and the observer are in a line, the Einstein's ring can be viewed. Ignoring rotation of the sun, the gravitational field of solar system is described by Schwarzschild metric and then the null geodesic equation is solved exactly by elliptic integral. It must be apart from the sun at least 547.7 AU to observe the Einstein's ring. However, the diameter of Einstein's ring and the sun's edge almost overlap each other so that it is very difficult to distinguish them under current technology.

Key words: null geodesic; exact solution; Einstein's ring

(上接 48 页)

- [10] Chen S, Palmer A W, Grattan K T V. Digital signal processing techniques for electronically scanned optical fiber white-light interferometry [J]. Applied Optics, 1992, 31 (28): 6003-6010.
- [11] Deck L, Groot P D. High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry [J]. Applied Optics, 1994, 33 (31): 7334-7338.
- [12] Groot P D, Deck L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain [J]. Modern Optics, 1995, 42 (2): 389-401.
- [13] Wang D N, Ning T N, Grattan K T V. Optimized multi-wavelength combination sources for interferometric use [J]. Applied Optics, 1994, 33 (31): 7326-7333.
- [14] Sheppard C J R, Larkin K G. Effect of numerical aperture on interference fringe spacing [J]. Applied Optics, 1995, 34 (22): 4731-4734.
- [15] De G P, de Lega X C. Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy [J]. Applied Optics, 2004, 43 (25): 4821-4830.
- [16] Chong W K, Li X, Soh Y C. Spectral effects of dual wavelength low coherence light source in white light interferometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51 (6): 651-655.

Influence of white light source spectrum on interference signal

HU Yan-min, CHENG Si-han, NIE Ping, MA Long, QIN Zhe

(Sino-European Institute of Civil Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Traditional white light sources are typically modeled by a pure Gaussian function, which adjust the interference signal by changing the center wavelength and bandwidth. In this paper, the Gaussian model and the Lorentzian model are used to discuss the white light interference signals, respectively. The larger the ratio of the central wavelength to the coherence length is, the higher the visibility of the zero-order fringes. The reliable range of the Gaussian model is also obtained. In view of the difference between modern white light source and traditional light source, the white LED is used as an example to simulate the influence of modern white light source on white light interference signal. When the Lorentz model is used, the interference signal has a depression. Furthermore, by adjusting the distance between the peaks of the LED fitting light properly, the influence of the depression on the zero order fringes is reduced in order to acquire a better white light source spectrum with interference properties in practical application.

Key words: white light interference; white light source spectrum; LED; coherence length; zero order stripes visibility

