

文章编号: 1001-4322(2006)01-0051-04

条纹法实现高分辨率成像*

王艳平¹, 彭仁军¹, 吴健¹, 邓蓉²

(1. 电子科技大学 光电信息学院 激光雷达实验室, 成都 610054;

2. 目标与环境光学特征国防科技重点实验室, 北京 100854)

摘要: 研究了一种高分辨率成像的方法,该方法利用余弦条纹照射目标以获取目标更宽的频谱。条纹对目标的照射起到了对目标频谱的搬移作用,使光学系统截止频率外的一部分高频分量通过系统。利用多幅条纹照射目标并分别成像,各条纹空间频率相同而相位按照一定规律变化,综合处理照射条纹后获得的图像将叠加在一起的频谱分量分离并恢复到相应的位置,经过反变换获得高分辨率的图像。通过计算机仿真验证了这种方法的可行性。

关键词: 余弦条纹; 频谱; 高分辨率; 截止频率

中图分类号: O439

文献标识码: A

光学成像系统的带宽限制了图像的分辨率,为了获得高分辨率的图像研究者们进行了各种研究^[1]。通过巧妙设计光路,提取更多的目标频谱信息是获得高分辨率图像的一种方法。Luckosz 早在 1966 年就提出了空时编码^[2]的概念,通过物平面和像平面处的一对周期性光栅作同步运动将时间和空间频率联系起来,使更多的目标频谱信息通过孔径。M. A. Grimm 在 Luckosz 的基础上尝试了使两光栅的位置保持不变,仅仅绕光轴旋转一个固定的角度的方法,其目的也是对目标的频谱进行搬移^[3]。E. N. Leith 探讨了将散射体作为光源,通过散射体的旋转产生相位函数 $\exp[j\theta(f_x, t)]$ 来调制空间频谱分量 $S(f_x)$ 的方法^[4-5]。近年来,综合孔径成像技术受到了广泛的关注。傅里叶望远镜^[6-10]就是一种利用综合孔径对远距离目标成高分辨率图像的技术,这一技术利用时域的相位调制完成直线条纹的扫描,条纹照射目标达到频谱信息抽取的目的。本文尽管同样采用照射条纹的方法,但与傅里叶望远镜有本质的不同,条纹对目标的频谱信息进行搬移而不是抽取。频谱搬移后利用算法将通过系统并重叠在一起的频谱分量分离开来并恢复到相应位置,经过傅里叶反变换获得高分辨率图像。

1 基本思想

对于一个有限大小的物体,其空间频谱是无限延伸的,通过带宽有限的光学系统后,像频谱只获得了一部分低频分量。图 1(a)中只有截止频率内(阴影部分)的一部分低频信息可以通过成像系统,其中 f_c 是系统的截止频率, $H(f_x)$ 是系统的光学传递函数, $S(f_x)$ 是物体的频谱。为了更准确地再现目标,需要获得目标的高频信息,我们采用照射余弦条纹的方法,通过照射余弦条纹来实现目标频谱的搬移。图 1(b)中 f_0 为照射条纹后频谱的搬移量, $S(f_x - f_0)$ 和 $S(f_x + f_0)$ 分别为搬移后的频谱分量。频谱搬移后一部分高频分量落在了系统截止频率内,像频谱中会包含一部分高频分量。问题是这些高频分量和低频分量重叠在一起,为了将其分

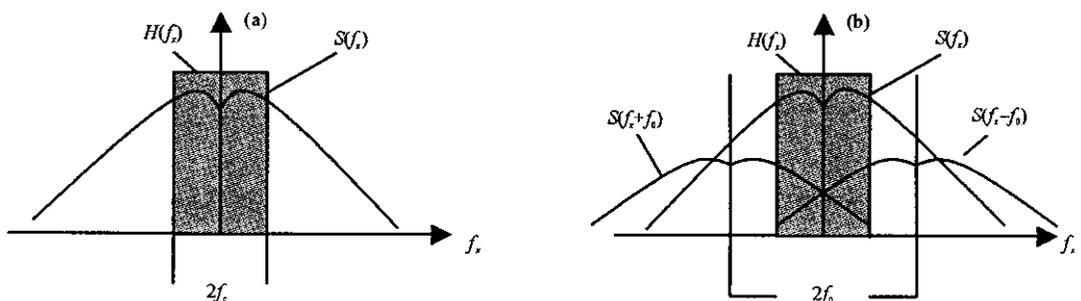


Fig. 1 Spatial frequency spectrum distribution without illuminating(a) and with illuminating(b) by the fringe

图 1 未照射条纹时(a)和照射条纹后(b)目标的频谱分布图

* 收稿日期:2005-06-10; 修订日期:2005-10-17

基金项目:目标与环境光学特征国防科技重点实验室资助课题(51476030304DZ0201)

作者简介:王艳平(1980—),女,硕士生,主要从事高分辨率成像的研究;yanping0131@163.com。

离,采用多幅条纹照射并分别成像的方法。各条纹的空间频率相同,相位按一定规律变化,综合处理所得图像将系统截止频率内的频谱分量分离开,然后恢复到相应位置上。

为了方便地说明问题,以 1 维目标来分析。目标的强度分布函数为 $s(x)$,其频谱为 $S(f_x)$ 。假定条纹的对比度为 1,条纹场可以描述为

$$t(x) = 1 + \cos(2\pi f_0 x + \varphi_0) \quad (1)$$

式中: f_0 为条纹的空间频率; φ_0 为条纹的初始相位值。若系统的截止频率为 f_c ,为了得到尽可能宽的频谱分量可以令

$$f_0 = 2f_c \quad (2)$$

假定余弦条纹的光照度大到可以忽略其他光照的影响,照射条纹后目标强度分布函数为

$$r(x) = s(x)t(x) = s(x)[1 + \cos(2\pi f_0 x + \varphi_0)] \quad (3)$$

目标强度分布函数的频谱可表示为

$$R(f_x) = S(f_x) + \frac{1}{2}S(f_x - f_0)e^{j\varphi_0} + \frac{1}{2}S(f_x + f_0)e^{-j\varphi_0} \quad (4)$$

从(4)式可以看出余弦条纹对目标频谱的搬移作用,目标频谱的中心位置被左右搬移了 f_0 。理论上通过选用不同空间频率的条纹,可以将目标频谱搬移到任意位置。

用强度点扩展函数为 $h(x)$ 的成像系统对照射后的目标成像,系统像平面处的强度分布函数可用 $g(x)$ 描述为

$$g(x) = \hat{r}(x) * h(x) \quad (5)$$

式中: $*$ 表示卷积; $\hat{r}(x)$ 为目标的理想像, $\hat{r}(x) = \frac{1}{M}r(x/M)$, M 为理想像的放大率,理想像的频谱 $\hat{R}(f_x)$,输出像函数的频谱为

$$G(f_x) = \hat{R}(f_x)H(f_x) = \left[S(Mf_x) + \frac{1}{2}S(Mf_x - f_0)e^{j\varphi_0} + \frac{1}{2}S(Mf_x + f_0)e^{-j\varphi_0} \right] H(f_x) \quad (6)$$

令 $S_1(f_x) = S(Mf_x)$,则

$$G_1(f_x) = \left[S_1(f_x) + \frac{1}{2}S_1(f_x - f_0)e^{j\varphi_0} + \frac{1}{2}S_1(f_x + f_0)e^{-j\varphi_0} \right] H(f_x) \quad (7)$$

令 $\varphi_0 = 2m\pi/N$, $m=1,2,\dots,N$,则

$$G_m(f_x) = \left[S_1(f_x) + \frac{1}{2}S_1(f_x - f_0)e^{j\frac{2m\pi}{N}} + \frac{1}{2}S_1(f_x + f_0)e^{-j\frac{2m\pi}{N}} \right] H(f_x) \quad (8)$$

将每次平移后得到的像函数频谱直接求平均

$$\begin{aligned} S_2(f_x) &= \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N G_m(f_x) = \\ &= \frac{1}{N} \left[NS_1(f_x) + \frac{1}{2}S_1(f_x - f_0) \cdot 0 + \frac{1}{2}S_1(f_x + f_0) \cdot 0 \right] H(f_x) = S_1(f_x)H(f_x) \end{aligned} \quad (9)$$

将每次条纹平移后所得到的像函数频谱对应乘上一个相位因子 $e^{j\frac{2m\pi}{N}}$,然后求平均

$$\begin{aligned} S_2(f_x) &= \frac{2}{N} \sum_{m=1}^N G_m(f_x) e^{j\frac{2m\pi}{N}} = \\ &= \frac{2}{N} \left[NS_1(f_x) \cdot 0 + \frac{N}{2}S_1(f_x + f_0) + \frac{1}{2}S_1(f_x - f_0) \cdot 0 \right] H(f_x) = S_1(f_x + f_0)H(f_x) \end{aligned} \quad (10)$$

同样地,每次条纹平移后所得到的像函数频谱对应乘上一个相位因子 $e^{-j\frac{2m\pi}{N}}$,然后求平均

$$\begin{aligned} S_2(f_x) &= \frac{2}{N} \sum_{m=1}^N G_m(f_x) e^{-j\frac{2m\pi}{N}} = \\ &= \frac{2}{N} \left[NS_1(f_x) \cdot 0 + \frac{N}{2}S_1(f_x - f_0) + \frac{1}{2}S_1(f_x + f_0) \cdot 0 \right] H(f_x) = S_1(f_x - f_0)H(f_x) \end{aligned} \quad (11)$$

从(9~11)式可以看出, $S_2(f_x)$, $S_2(f_x + f_0)$, $S_2(f_x - f_0)$ 被分离开,将其恢复到相应位置进行傅里叶逆变换,得到处理后的图像为

$$s(x) = \int_{-3f_c}^{-f_c} S_2(f_x + f_0) e^{-j2\pi f_x x} df_x + \int_{-f_c}^{f_c} S_2(f_x) e^{-j2\pi f_x x} df_x + \int_{f_c}^{3f_c} S_2(f_x - f_0) e^{-j2\pi f_x x} df_x \quad (12)$$

2 仿真结果及分析

利用上述方法分别对两幅 90×120 像素的图像进行计算机处理,照射条纹为 x 方向,其空间频率为 6 个像素/条纹,条纹的移动次数取为 10。光学系统的归一化传递函数如图 2 所示。图 3(a)为明暗相间的点阵图,作为没经过受限成像系统的原始目标;(b)为加一带限孔径后的图像;(c)为利用上述原理处理后的图像。比较(b)和(c)两图可以看出图像的横向分辨率提高了,横向的明暗条是可以区分开的。

图 4(a)是一幅高分辨率的原始图像,假定其获得了物体的全部原始频谱;(b)是光学系统物理孔径受限得到的图像;(c)为对多幅图像处理后的结果。可以看出,图像的横向分辨率得到了提高。通过两幅图像的处理结果,验证了上述理论是可行的。

理论上条纹空间频率 $f_0 = 2f_c$,可以获得 $0 \sim 3f_c$ 频段连续的目标频谱。当 $f_0 > 2f_c$ 时,得到的目标频谱不连续,影响成像分辨率的提高。当 $f_0 < 2f_c$ 时获得的目标频谱信息不充分。如果照射多个空间频率多个方向的条纹,利用上述方法可以得到目标更宽的频谱,形成更高分辨率的图像。

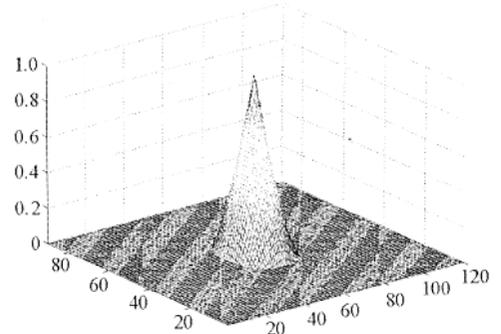


Fig. 2 Optical transfer function

图 2 光学系统的传递函数

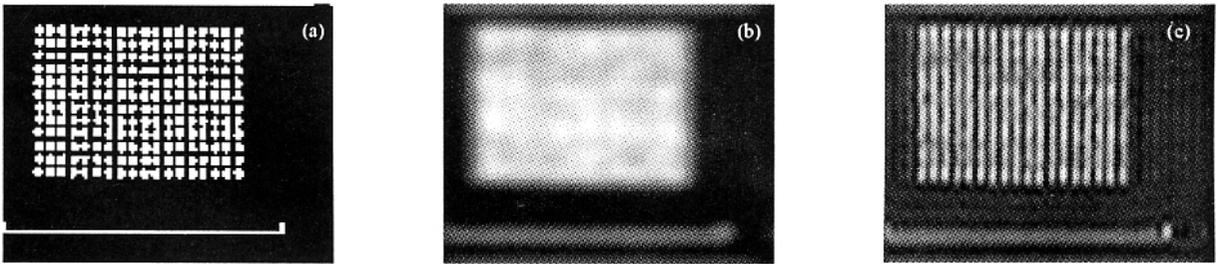


Fig. 3 Picture of point-lattice as the original objects(a), bandwidth limited image(b) and processed image(c)

图 3 作为原始目标的点阵图(a),经过带限系统后的图像(b)和处理后的图像(c)

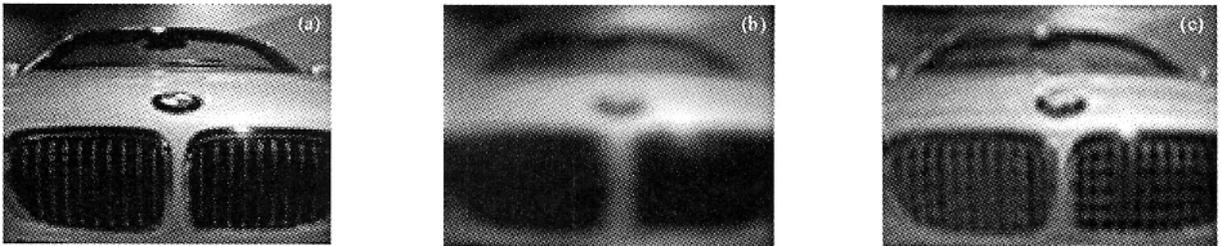


Fig. 4 A high resolution photo as the original objects(a), bandwidth limited image(b) and processed image(c)

图 4 一幅高分辨率的原始目标图像(a),经过带限系统后的图像(b)和处理后的图像(c)

3 结论

从理论上研究了一种利用照射余弦条纹提高成像分辨率的方法,对其原理进行了详细的数学推导,并在一维方向上做了计算机仿真。通过对处理前后图像的比较,分辨率有很大的提高,进一步验证了这种方法的可行性。鉴于以往光栅照射方法光路复杂、调整困难的缺点,提出了采用条纹场照射的新方法。由于只是先期性的研究,对如何形成条纹场以及如何控制条纹移动的精度将在以后的工作中研究,并对算法作进一步的完善。

参考文献:

- [1] Leiserson I, Lipson S G, Sarafits V. Superresolution in far-field imaging[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(4): 209-212.
- [2] Lusosz W. Optical system with resolving power exceeding the classical limit[J]. *J Opt Soc Am*, 1966, **56**:1463-1472.
- [3] Grimm M A, Lohmann A W. Superresolution image for one dimensional objects[J]. *J Opt Soc Am*, 1996, **56**: 1151-1156.
- [4] Leith E N. Small-aperture, high-resolution, two-channel imaging system[J]. *Opt Lett*, 1990, **15**(16): 885-887.
- [5] Sun P C, Leith E N. Superresolution by spatial temporal encoding methods[J]. *Appl Opt*, 1992, **31**(23): 4857-4862.

- [6] Campbell B F, Rubin L, Holmes R B. Synthetic aperture imaging through an aberrating medium: experimental demonstration[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(26): 5932-5937.
- [7] Holmes R B. Analysis and simulation of a synthetic aperture technique for imaging through a medium[J]. *J Opt Soc Am A*, 1996, **13**(2): 351-364.
- [8] Holmes R B, Brinkley T. Reconstruction of images of deep space objects using Fourier telescopey[C]//Proc of SPIE. 1999, **3815**: 11-22.
- [9] Baldwin J E, Haniff C A. Close phase in high resolution optical imaging[J]. *Nature*, 1986, **320**(17): 595-588.
- [10] Valery I Mandrosov. High resolution Fourier telescopey imaging in strongly inhomogeneous atmosphere under high level of additive noise [C]//Proc of SPIE. 2004, **5572**: 49-56.

Superresolution imaging by the fringes

WANG Yan-ping¹, PENG Ren-jun¹, WU Jian¹, DENG Rong²

(1. *Optoelectronic Information Department, University of*

Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. National Key Laboratory of Optical Features of Target and Environment, Beijing 100854, China)

Abstract: A method of super-resolution imaging is described, which utilizes cosine fringes to acquire more spatial frequency spectrum of the object. The spatial frequency of the object illuminated by the cosine fringes is shifted, thus a portion of high frequency components beyond the cutoff frequency could pass through the optical system. The image is achieved separately after illuminating many fringes, which has the same spatial frequency but different phase. Then the images are processed to separate the frequency components and reconstruct the original spectrum. Finally, the computer simulation demonstrates the feasibility of the new technique.

Key words: Cosine fringe; Spatial frequency spectrum; Superresolution; Cutoff frequency

