

·信号与信息处理·

基于空间带宽积分析的高分辨率快速数字全息重构

刘胜德, 吕晓旭, 钟丽云

(华南师范大学 信息光电子科技学院, 广州 510006)

摘要: 为了提高显微数字全息系统的分辨率和重构速度, 从空间带宽积的角度出发, 分析了菲涅尔再现算法的使用范围。结果显示, 记录系统只要满足空间带宽积的条件, 使用菲涅尔再现算法可以同时接近极限分辨率和快速再现; 同时, 短记录距离无透镜傅里叶变换光路是一种能满足此空间带宽积条件的系统配置。重要的是, 在短记录距离, 也能用菲涅尔再现算法重构待测物体复振幅。此外, 通过对比细分菲涅尔再现算法和细分卷积算法, 两者的重构分辨率都可以得到提升, 而细分菲涅尔再现算法在大数值孔径的重构中, 所使用的内存和计算时间远远小于细分卷积再现算法。

关键词: 数字全息; 空间带宽积; 快速算法; 分辨率

中图分类号: TN911.73; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)02-0057-05

High Resolution and Fast Digital Holography Reconstruction Based on Space Bandwidth Product Analysis

LIU Sheng-de, LV Xiao-xu, ZHONG Li-yun

(School of Information Photoelectric Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To improve the resolution and the speed of digital holography reconstruction, the space bandwidth product is used to analyze the application range of Fresnel reconstruction algorithm. Analysis results show that once the recording system satisfies the requirements of space bandwidth product, limiting resolution and rapid reconstruction can be obtained by Fresnel reconstruction algorithm. Meanwhile, short recording distance lens-less Fourier transform optical path is one of the configurations satisfying the requirements of space bandwidth product. Importantly, Fresnel reconstruction algorithm still can be used to reconstruct the complex amplitude of the object to be tested at short recording distance. Moreover, through comparing with Fresnel reconstruction algorithm and convolution algorithm, both reconstruction resolutions are improved, and during large value aperture reconstruction, the memory and calculation time required by Fresnel reconstruction algorithm is far lower than that of convolution algorithm.

Key words: digital holography; space bandwidth product; fast algorithm; resolution

数字全息使用 ccd 或者 cmos 图像传感器来记录全息图, 通过计算机来数字重构物体复振幅, 可以用来显示透明的物体, 如细胞形状等。由于 ccd 或者 cmos 图像传感器的像素尺寸大且数量少, 分辨率和大小都远远不如传统的全息干板。为了能够同时实现高分辨率和高重构速度, 研究重构算法是非常重要的, 特别在一些需要实时动态测量的领域, 如活体细胞的观察测量。

从空间带宽积的角度出发, 得到了可以使用傅

里叶快速再现待测物体复振幅的系统配置。还有, 为了快速高分辨再现物体, 分别比较了细分菲涅尔再现算法和细分卷积再现算法在同等条件下的重构质量和速度。具体来说, 无论记录距离长短, 只要满足待测物体的空间带宽积不大于图像传感器的空间带宽积的条件, 就可以用快速傅里叶算法来重构待测物体的全息图。重要的是, 文中研究结果拓展了快速傅里叶算法的使用范围, 为数字全息的再现提供了一个实用的方法。

收稿日期: 2016-03-24

作者简介: 刘胜德(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事微纳成像检测及应用方面的研究。

1 理论

1.1 数字全息分辨率与记录光路

在数字全息中,系统的成像能力,从阿贝定律或者瑞利判据^[1]的观点来看,取决于系统的分辨率,有下式

$$\delta_x \approx \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

其中, λ 是波长; NA 是系统的数值孔径。该定律指出了系统分辨细节的能力与波长成正比,与数值孔径成反比,然而很少研究把注意力放在保证这一分辨率的同时,能对多大的物体进行成像。在数字全息记录再现系统中,一方面,作为记录全息图和数字再现载体的图像传感器,由于其固有的缺陷(如像素大,尺寸小),描述其信息容量的空间带宽积受到限制。因此,在记录和再现的过程中,如何充分利用这个有限的空间带宽积来记录待测物体的信息是关键。另一方面,在再现过程中,由于菲涅尔全息再现算法的数学描述跟傅里叶变换有形式相似的性质,可以借助 FFT 算法来快速重构物体,解决数字全息再现速度的问题,然而菲涅尔全息再现算法需要满足记录距离比较大的条件,因而阻碍了系统分辨率的提高。在图像传感器不能大幅度提高像素高分辨率的情况下,如果需要提高记录系统的分辨率,通常可以采用增加数值孔径的方法来实现:近距离记录^[2]和合成孔径^[3],然而这种情况下,菲涅尔近似的条件不再满足,所得的全息图只能用卷积再现算法来重构,如基尔霍夫-菲涅尔积分公式^[4]或者索末菲积分公式^[5]来重构物体复振幅。然而,这种方法会消耗大量的内存,使运算量大大增加,运算速度减慢。因此,如何提高系统分辨率和再现速度,成为研究的热点问题^[4,6,7]。

空间带宽积一方面可以用来度量待测物体的信息量,另一方面,对于记录系统来说,也可以衡量系统接收信息量的能力,具体到显微数字全息中,可以用来衡量系统成像能力,即系统可以测量物体的大小和细节的能力。为简单化,仅考虑空间坐标一维的情况,待测物体的空间带宽积 N_l 可以表示为

$$N_l = x_o \Delta v_o \quad (2)$$

其中, x_o 表示待测物体的大小; Δv_o 为物体最小分辨距离 Δx_o 对应的带宽。在一定程度上表示了需要获取的信息容量。同样,在显微数字全息系统中,

对获取信息的图像传感器而言,代表空间带宽积的像素数可以表示为

$$N_y = x_H \Delta v_H \quad (3)$$

其中, x_H 是图像传感器的尺寸大小; Δv_H 是像素大小 Δx_H 对应的带宽。上述空间带宽积用魏格纳表(wigner chart)来描述,它们的 wigner chart 是具有一定大小的矩形^[8],然而物光经过各种干涉光路与参考光干涉作用后,从原来的长方形变为与干涉光路有关的各种形状^[8-9],使得其不再是规则的矩形。因此,干涉图的非矩形 wigner chart 通过矩形的 wigner chart 时,超出矩形 wigner chart 部分的信息将被丢失,不能被测量系统所获取。为了最大限度地利用测量系统的空间带宽积,可以通过配置不同的记录光路,来最大限度地匹配图像传感器的空间带宽积。当采用同轴无透镜傅里叶变换光路来记录时,物体的 wigner chart 可以保持长方形的形状^[10],对图像传感器的空间带宽积要求最低^[11],也就是说,对于空间带宽积一定的图像传感器,使用此光路能获得最多的信息量,此时,有下式

$$N_y = N_l = x_o \Delta v_o \quad (4)$$

从得知 x_o 与 Δv_o 成反比,利用图像传感器上获得的 N_y 来重构物体复振幅时,可以通过减小记录物体尺寸来提高分辨率,即减小系统对于记录物体的有效视场范围(FOV)来满足 wigner chart 的大小不超过图像传感器的 wigner chart。当满足采样定理的条件,并且图像传感器像素尺寸一定时,由文献[11]得知,同轴记录光路的 FOV(即待测物体大小范围)为

$$x_o = \frac{Z_{OH} \lambda}{\Delta x_H} \quad (5)$$

其中, Z_{OH} 为待测物体到图像传感器之间的记录距离; λ 为测量使用的激光波长。为了获得较小的 FOV,必须减小记录距离 Z_{OH} 。

假设要求系统能够分辨的细节为 Δx ,根据信号与系统,其对应的带宽为 $\pi/\Delta x$,在已知图像传感器的空间带宽积为 N_y 的情况下,根据式(4),在能最大利用图像传感器的空间带宽积的条件下,待测物体最大范围为

$$x_o = N_y \Delta x / \pi \quad (6)$$

在此条件,图像传感器记录到的衍射光场表示为

$$U_o = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} U_o(x_o, y_o) \frac{\exp(jkr_{OH})}{r_{OH}} dx_o dy_o \quad (7)$$

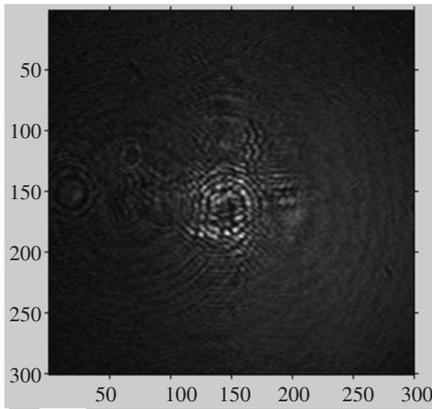


图2 干涉图

在实验中,采集了四幅相移干涉图,通过相移技术^[12]消除零级像和共轭像后的再现像如图3所示。

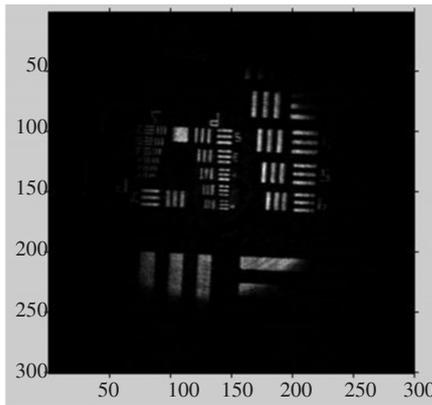


图3 使用菲涅尔再现算法再现的物体强度图

同时采用了细分再现算法^[13]来更精细地显示全息图的细节,如图4所示。

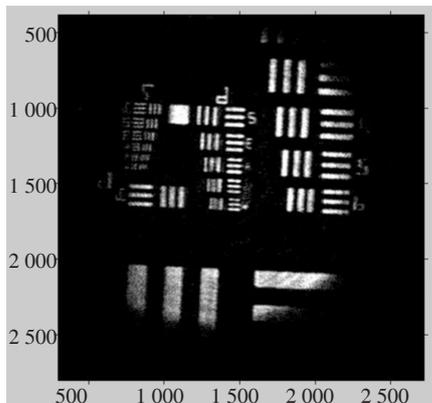


图4 在菲涅尔再现基础上使用细分再现的物体强度图

从图4可以看到,分辨率板的第七组第三个元

素已经清晰地再现出来,其分辨率为161.3 lp/mm,对应的 Δx 约为3 μm ,接近根据式(1)定义的极限分辨率。根据式(6),理论上能再现的物体大小 Δx 为0.573 mm,与实验中使用的0.5 mm直径的圆孔基本符合。

卷积算法由于没有作近似,通常被认为是在近距离记录时的无误差再现算法,因此,为了作对比,用卷积再现的算法再现了分辨率板,如图5所示。

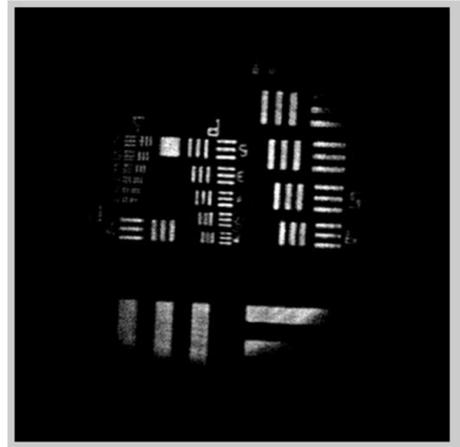


图5 在卷积算法再现基础上使用细分再现的强度图

从图4、图5的对比可知,使用FFT快速算法来再现满足空间带宽积要求的物体,其再现效果跟使用卷积再现的方法几乎是一样的。在相同条件下,从计算时间上看,前者只需要1 s,后者需要22 s,只要由于卷积算法至少需要进行4次傅里叶变换运算,直接用傅里叶变换的非涅耳再现算法则只需要进行一次傅里叶变换运算。因此卷积细分再现算法的运算量和计算机存储资源的占用量都远大于傅里叶细分再现算法。

3 结论

利用空间带宽积的概念,从信息容量的角度,指出在数字全息系统中,图像传感器规格一定的条件下,其获得的信息量由图像传感器的空间带宽积决定,能够再现的物体大小范围跟细节是成反比的,可以通过减小待测物体的范围来换取更高的分辨率。在这个基础上,指出了短记录距离下的傅里叶全息光路是一种能够高效满足图像传感器空间带宽积的光路,此光路可以通过减小待测物体范围来获得高分辨率的同时提高再现物体复振幅的速

度。最后,从实验上证明了记录光路采用短记录距离下的傅里叶全息光路来记录全息图,用快速傅里叶变换来再现物体复振幅,能够获得与使用传统卷积再现算法几乎一样的效果。总之,只要满足空间带宽积的要求,不论记录距离能否满足菲涅尔近似条件,都可以使用快速傅里叶变换算法来实现待测物体的高分辨率快速重构。

参考文献

- [1] Goodman J W. 傅里叶光学导论. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [2] Xu L, Peng X, Miao J, et al. Studies of digital microscopic holography with applications to microstructure testing[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(28): 5046-5051
- [3] Binet R, Colineau J, Leheureau J-C. Short-range synthetic aperture imaging at 633 nm by digital holography[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(23): 4775-4782.
- [4] Takaki Y, Ohzu H. Fast numerical reconstruction technique for high-resolution hybrid holographic microscopy[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(11): 2204-2211.
- [5] Haddad W S, Cullen D, Solem J C, et al. Fourier-transform holographic microscope[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(24): 4973-4978.
- [6] Yu L, Kim M K. Pixel resolution control in numerical reconstruction of digital holography[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(7): 897-899.
- [7] Lu X, Zhang Y, Zhong L, et al. Fourier algorithm method for reconstruction of large-aperture digital holograms based on phase compensation[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(5): 614-616.
- [8] Xu L, Peng X, Guo Z, et al. Imaging analysis of digital holography[J]. *Optics Express*, 2005, 13(7): 2444-2452.
- [9] Mendlovic D, Lohmann A W. Space-bandwidth product adaptation and its application to superresolution: fundamentals[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(3): 558-562.
- [10] Lohmann A W, Dorsch R G, Mendlovic D, et al. Space-bandwidth product of optical signals and systems[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(3): 470-473.
- [11] Claus D, Ilescu DI, Bryanston-Cross P. Quantitative space-bandwidth product analysis in digital holography[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(34): H116-H127.
- [12] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(16): 1268-1270.
- [13] Li-Ping C, Xiao-Xu L. The recording of digital hologram at short distance and reconstruction using convolution approach[J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(1): 189-194.
- [R]. ARL-TR-1463, Army Research Laboratory, 1997.
- [4] 赵纪金, 李晓霞, 豆正伟. 不同粒径膨胀石墨的制备及其微观结构[J]. *材料科学与工程学报*, 2011, 29(6): 925-928.
- [5] 传秀云. 石墨层间化合物 GICs 的形成机理探讨[J]. *新型碳材料*, 2000, 15(1): 52-56.
- [6] 关华, 潘功配, 朱晨光, 等. 膨胀石墨与常规毫米波干扰材料性能对比[J]. *弹箭与制导学报*, 2004: 76-78.
- [7] 张倩, 焦清介, 宣兆龙, 等. 碳纳米管/膨胀石墨复合材料制备及其 8 mm 波衰减性能[J]. *兵工学报*, 2011, 32(12): 1510-1513.
- [8] 潘功配, 关华, 朱晨光, 等. 可膨胀石墨用作抗红外/毫米波双模发烟剂的研究[J]. *含能材料*, 2007, 15(1): 70-72.
- [9] 王玲, 宋克敏, 张帅华, 等. 高倍率低温可膨胀石墨制备的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2009, 28(4): 844-849.
- [10] 林雪梅. 低温可膨胀石墨的结构与性能研究[J]. *火工品*, 2006(5): 1-4.
- [11] 冷静. 低温低能耗可膨胀石墨的制备及其应用[M]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [12] Chung D D L. Electro-magnetic interference shielding effectiveness of carbon materials[J]. *Carbon*, 2001, 39(2): 279-285.
- [13] 杜桂萍, 缪云坤, 刘海峰. 短切碳纤维对 3 mm 波衰减性能研究[J]. *火工品*, 2005(5): 4-7.
- [14] 沈国柱, 徐政, 李轶. 短切碳纤维复合材料对 8 mm 波吸收性能研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2006(3): 19-21.
- [15] Wilian G, Rouse. Millimeter wave screening cloud and method[P]. US 5148173. 1993.
- [16] 张大志. 多频谱干扰材料复合技术及性能研究[M]. 南京: 南京理工大学, 2012.

(上接第 42 页)