

CCD 的非线性与频谱混叠的关系研究*

乔闹生, 蔡新华, 彭光含

(湖南文理学院物理与电子科学系, 湖南常德 415000)

摘 要:分析了 CCD 的非线性产生频谱混叠问题, 提出了减小频谱混叠的方法. 从理论上分析了 CCD 的非线性产生高频分量的原因, 给出了简单的物理解释和解析推导. 通过计算机仿真与实验两种方法得出了 CCD 的非线性导致频谱混叠的结果, 再通过计算机仿真方法得出结论: 在存在高级次频谱成份的情况下, 加密抽样可减少频谱混叠并明显提高 FTP 的测量准确度.

关键词:傅里叶变换轮廓术(FTP); CCD 的非线性; 频谱混叠; 抽样

中图分类号: O438.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)04-0603-6

0 引言

理想 CCD(Charge Coupled Devices) 电荷耦合器件^[1-6], 在动态范围内的输出电流与输入光强成正比. 但实际工作中的 CCD 由于存在非线性的影响, 输出信号电流与输入光强间存在非线性关系. 最普通、最常见的是存在二阶、三阶的非线性. 在傅里叶变换轮廓术(Fourier Transform Profilometry, FTP)中用这种 CCD 相机获取条纹图时, 这种非线性将导致条纹的频谱图中出现二级、三级等高级频谱成份^[6-7]. 当抽样不足时, 含有物体高度信息的基频将会与二级、三级等高级频谱发生混叠, 从而影响了 FTP 的测量准确度.

首先从理论上分析 CCD 的非线性产生高频分量的原因, 并给出了简单的物理解释和公式推导. 公式推导表明: 由于 CCD 的非线性, 频谱图中除了包含物体高度信息的基频之外, 还会产生二级、三级等高级频谱成份, 从而增加了与基频混叠的可能性.

其次, 通过计算机仿真与实验分析了由于 CCD 的非线性导致基频与二级、三级等高级频谱混叠的情况. 从模拟图中可以看出: 线性情况下频谱中没有高级频谱成份, 二级、三级非线性情况下频谱中存在二级、三级高级频谱成份; 实验中使变形条纹抽样^[6,9-10]不足, 因而频谱中多出了二级、三级频谱等高频成份, 且发生了混叠.

然后, 分析了由于实际工作中 CCD 非线性而使得频谱图的基频中混入了二级、三级等高级频谱成份, 从而影响了 FTP 的测量准确度, 而 FTP 的测量准确度是由等效波长来衡量, 等效波长由 L_0/d 与 f_0 来决定^[11]. 保证 L_0/d 不变时, 用加密光栅来增大 f_0 可提高 FTP 的测量准确度. 计算机模拟证明

了该结论的正确性.

1 CCD 的非线性导致条纹高频分量的产生

CCD 是一种将光能转换为电能的半导体集成光电器件^[1-6]. 理想 CCD 在动态范围内的输出信号电流与输入光强成正比. CCD 作为 FTP 中的图像探测器, 输出信号电流体现在输出的变形条纹上. 设 I 为理想情况下 CCD 输出的变形条纹, 即为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \phi(x, y)] = a(x, y) + c_1(x, y) \exp(i2\pi f_0 x) + c_2(x, y) \exp(-i2\pi f_0 x) \quad (1)$$

式中

$$c_1(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \quad (2)$$

$$c_2(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[-i\phi(x, y)] \quad (3)$$

但实际工作中的 CCD 由于存在非线性的影响, 输出信号电流与输入光强间存在着非线性关系. 最普通、最常见的是存在二阶、三阶的非线性, 这种非线性将导致信号中的倍频现象发生^[6-8,10]. 在 FTP 中, 即使采用标准正弦光栅投影, 由于 CCD 的非线性, 获取的条纹图像中也存在高频分量. 设 CCD 存在非线性情况下的输出变形条纹为

$$\Gamma(x, y) = e_0 + e_1 I(x, y) + e_2 I^2(x, y) + e_3 I^3(x, y) \quad (4)$$

式中, e_0, e_1, e_2, e_3 为各级的比例因子.

令上面各式中的 $I' = I'(x, y), I = I(x, y), a = a(x, y), b = b(x, y), c_1 = c_1(x, y), c_2 = c_2(x, y), \phi = \phi(x, y)$.

各式联立可得

$$I' = k_0 + k_1 \exp(i2\pi f_0 x) + k_2 \exp(i4\pi f_0 x) + k_3 \exp(i6\pi f_0 x) + k_1^* \exp(-i2\pi f_0 x) + k_2^* \exp(-i4\pi f_0 x) + k_3^* \exp(-i6\pi f_0 x) \quad (5)$$

* 湖南省“十一五”重点建设科学—光学基金资助

Tel: 0736-7186121 Email: naoshengqiao@163.com

收稿日期: 2005-11-01

式(5)中, $k_0, k_1, k_2, k_3, k_1^*, k_2^*, k_3^*$ 是与比例因子、相位等有关的系数. 分别为

$$k_0 = e_0 + e_1 a + e_2 a^2 + e_3 a^3 + \frac{1}{2} e_2 b^2 + \frac{3}{2} e_3 a b^2$$

$$k_1 = \frac{1}{2} [e_1 b + 2e_2 a b + 3e_3 a^2 b + \frac{3}{4} e_3 b^3] \exp [i\phi]$$

$$k_1^* = \frac{1}{2} [e_1 b + 2e_2 a b + 3e_3 a^2 b + \frac{3}{4} e_3 b^3] \exp [-i\phi]$$

$$k_2 = \frac{1}{4} [e_2 b^2 + 3e_3 a b^2] \exp [i2\phi]$$

$$k_2^* = \frac{1}{4} [e_2 b^2 + 3e_3 a b^2] \exp [-i2\phi]$$

$$k_3 = \frac{1}{8} [e_3 b^3] \exp [i3\phi]$$

$$k_3^* = \frac{1}{8} [e_3 b^3] \exp [-i3\phi]$$

对式(5)进行傅里叶变换可得

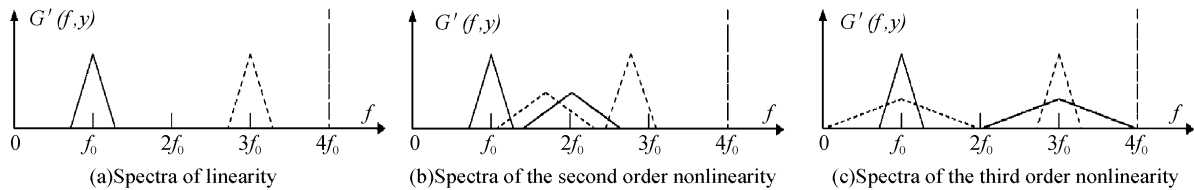


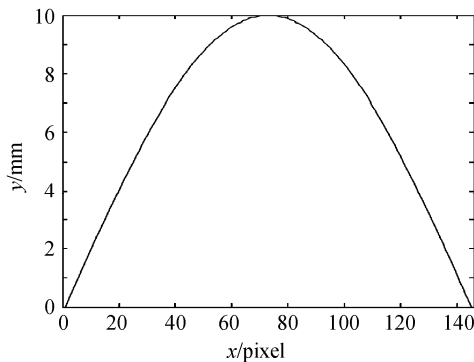
图 1 频谱图
Fig. 1 Spectra

2 CCD 的非线性导致频谱混叠的计算机模拟与实验

现在用计算机模拟与实验来证明 CCD 的非线性导致了频谱的混叠.

2.1 计算机模拟

假定测量系统的几何参量为 $L_0 = 600 \text{ mm}$, $d = 200 \text{ mm}$, 则 $\theta = \arctan (d/L_0) = 0.3218$. 在基准面上光栅像的周期 $T_0 = 10 \text{ mm}$, 基频为 $f_0 = 1/T_0 = 0.1 \text{ mm}$. 设理想探测器输出的变形条纹为 $I(x, y) = 0.5 + 0.5 \cos(2\pi f_0 x + \phi(x, y))$. 式中 $\phi(x, y) = -2\pi f_0 d h/L_0$. 模拟物体是 $h = 10 \sin \frac{x}{100}$, x 的取值



(a) Simulating object

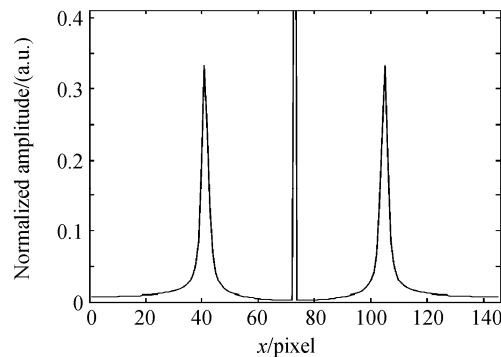
$$G'(f, y) = k'_0(f, y) + k'_1(f - f_0, y) + (k_1^*)'(f + f_0, y) + k'_2(f - 2f_0, y) + (k_2^*)'(f + 2f_0, y) + k'_3(f - 3f_0, y) + (k_3^*)'(f + 3f_0, y) \quad (6)$$

由式(6)可明显看出, 当 CCD 不存在非线性时, 频谱中没有高频成分, $G'(f, y)$ 取前三项之和 $k'_0(f, y) + k'_1(f - f_0, y) + (k_1^*)'(f + f_0, y)$, 基频可以被很好地分离出来, 频谱图如图 1(a). 当 CCD 存在非线性时, 频谱上则多出了 2 倍频、3 倍频的高频项. 对于一个连续函数, 倍频分量的产生并不必然导致频谱混叠. 但是, 对连续函数的空间抽样, 将使连续函数的频谱产生周期性重复(即出现多个频谱岛)^[6,12], 当抽样条件不满足时, 一个频谱岛中的 2 倍频、3 倍频就会与相邻频谱岛中的基频发生混叠, 从而影响了 FTP 的测量准确度. 2 倍频与基频混叠的频谱图如图 1(b), 3 倍频与基频混叠的频谱图如图 1(c).

范围是 $0 \leq x \leq 100\pi$ (单位: mm). 对 x 进行抽样, 抽样间隔为 $\pi/1.44 \text{ mm}$, 取 145 个像素. 模拟物体如图 2(a) (x 轴的单位为像素).

假如探测器不存在非线性, 也就是说理想探测器, 则输出的光强是线性的. 对其进行傅里叶变换, 变形条纹在 x 轴上的频谱如图 2(b). 从图上可见, 没有二级频谱、三级频谱等高级频谱成份.

若探测器存在二阶非线性, 设输出光强为 $I_1 = 0.14 + 1.12I - 0.38I^2$. 对其进行傅里叶变换, 变形条纹在 X 轴上的频谱如图 2(c). 从图上可明显看出: 频谱图中多出了二倍频, 基频与相邻周期的二级频谱发生了混叠.



(b) Spectra of deformed in x axis by linearity

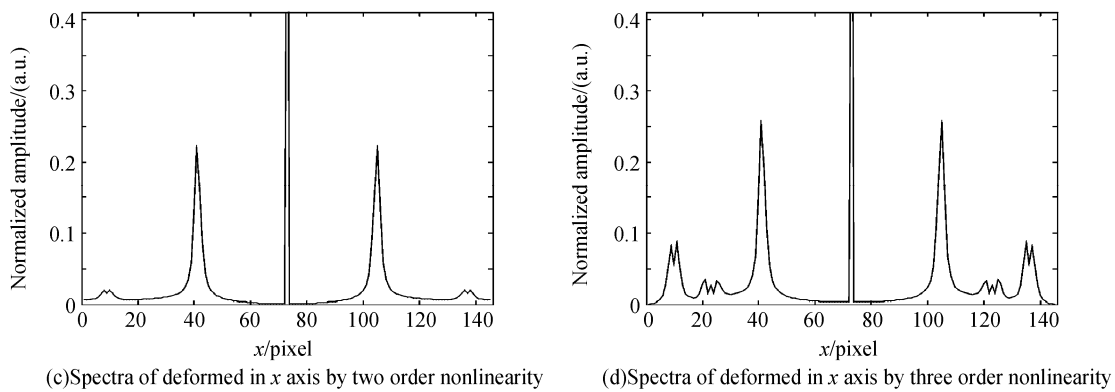


图 2 导致频谱混叠的计算机模拟结果

Fig. 2 The results of simulation of computer for overlapping spectrum

若探测器存在三阶非线性,设输出光强为 $I_1 = 0.16 + 0.58I - 1.56I^2 + 1.71I^3$. 对其进行傅里叶变换,变形条纹在 x 轴上的频谱如图 2(d). 从图上可明显看出:频谱图中多出了二倍频、三倍频,基频与相邻周期的三级频谱发生了混叠.

纵观各图,只存在线性情况的理想 CCD 的一维频谱图中,除了零频外只含有包含物体高度信息的基频成份. 而存在非线性的 CCD 的一维频谱图中,除了零频与包含物体高度信息的基频成份外,还含有二级频谱、三级频谱等高频成份,并且基频与高级

频谱发生了混叠.

2.2 实验

为了验证以上理论的正确,现对一猴脸面具进行了实际测量,实验结果共有 38 根条纹, 480×600 个像素.

现在对条纹进行抽样,取 96×96 个像素,28 根条纹,即每个周期含有 3.428 6 个像素,使其抽样不足^[6,9,12-13]. 参考平面的变形条纹如图 3(a),物体的变形条纹如图 3(b).

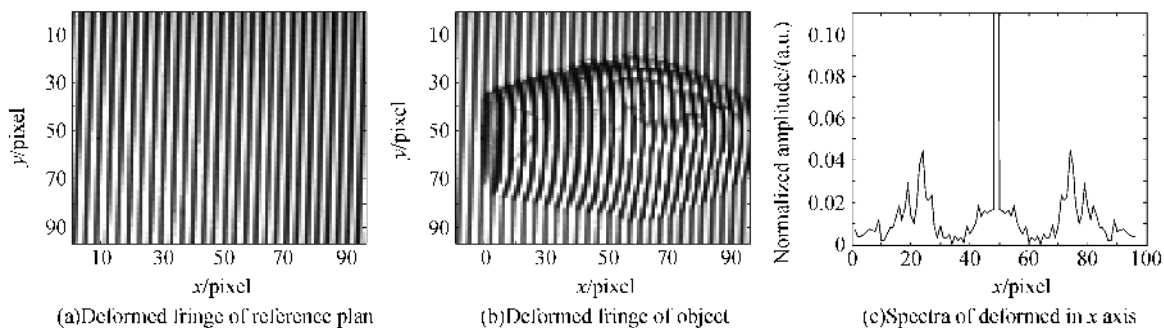


图 3 导致频谱混叠的实验结果

Fig. 3 The results of experiment for overlapping spectrum

对条纹进行傅里叶变换, x 轴上的频谱如图 3(c). 从图上可明显看出:由于实际工作中的 CCD 存在非线性效应,频谱图上的基频与相邻周期的高级频谱发生了混叠.

3 加密抽样减少频谱混叠的理论分析及计算机模拟结果

3.1 理论分析

由于 CCD 的非线性导致基频与高级频谱发生混叠,减少频谱混叠则可以增大 FTP 方法中测量准确度. 而测量准确度是由等效波长来衡量的,等效波长由 L_0/d 与 f_0 来决定^[11]. 其关系为

$$\left| \frac{\partial h(x,y)}{\partial \phi(x,y)} \right| = \frac{L_0}{2\pi f_0 d} = \frac{L_0/d}{2\pi f_0} \quad (7)$$

式中 $\left| \frac{\partial h(x,y)}{\partial \phi(x,y)} \right|$, 越小,测量准确度越大. 式(7)中,降低 L_0/d 会影响测量范围,因而在理想情况下是保持 L_0/d 不变而增大光栅的 f_0 来减小 $\left| \frac{\partial h(x,y)}{\partial \phi(x,y)} \right|$, 从而增大 FTP 的测量准确度的. 但 f_0 增大,投影光场内条纹数增加,1 个周期内的抽样点数减少. 因此,必须保证 CCD 的分辨率.

3.2 计算机模拟

为了证明结论的正确,本文做了计算机模拟. 假定投影系统是一个线性系统,光强 I 的非线性变化主要来源于 CCD 探测器的非线性^[6-8]. 对于采用 LCD(液晶)或 DMD(数字微镜)一类的数字投影机,也可以将投影系统的非线性与探测器的非线性合并考虑.

设理想探测器输出的光强为 $I(x, y) = 0.6 + 0.4 \cos(2\pi f_0 x + \phi(x, y))$, 实际工作中的探测器输出的光强为 $I' = 0.04 - 0.21I + 3.26I^2 - 2.11I^3$. 模拟物体如图 4, 放在投影光场的中心. 物体的最大高度为 8.105 4 mm, 平均高度为 0.359 9 mm.

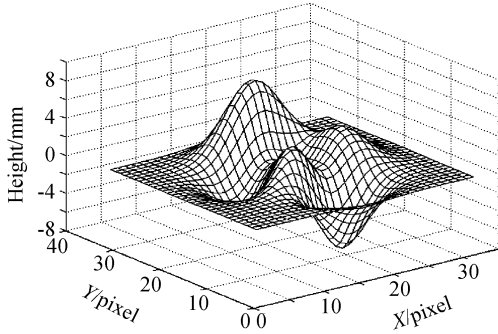


图 4 减小频谱混叠的计算机模拟物体
Fig. 4 Computer simulating object for reducing overlapping spectrum

开始时结构参量为 $d = 400$ mm, $L_0 = 900$ mm, 基准面上光栅像的周期为 12 mm. 光栅投影到物体上得到的变形条纹如图 5(a) ($n = 256$), 对它进行傅里叶变换、矩形窗口滤波、逆傅里叶变换, 得到的频谱在中心轴 X 轴上的分布如图 6(a), 误差如图 7(a). 计算得到误差的最大值为 0.064 6 mm, 误差的平均值为 0.018 0 mm.

保持系统结构参量 $d = 400$ mm, $L_0 = 900$ mm 不变, 即测量范围不改变. 改用加密光栅, 使基准面

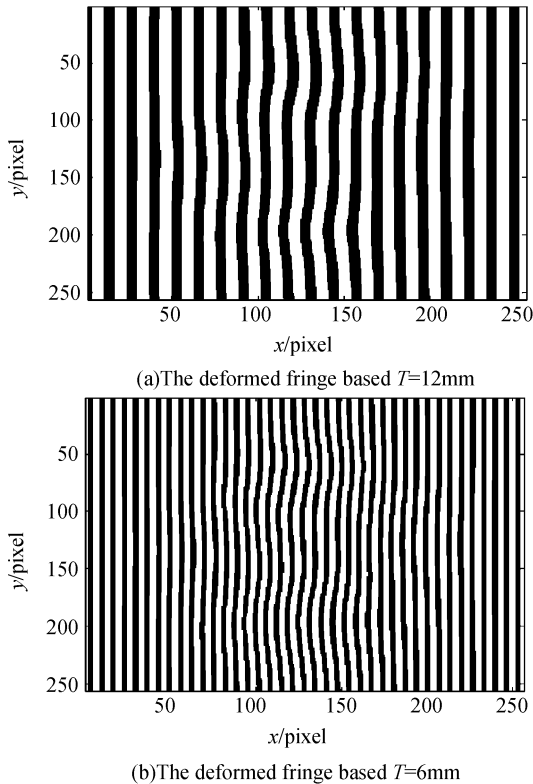


图 5 两种情况的变形条纹
Fig. 5 The result of deformed fringe

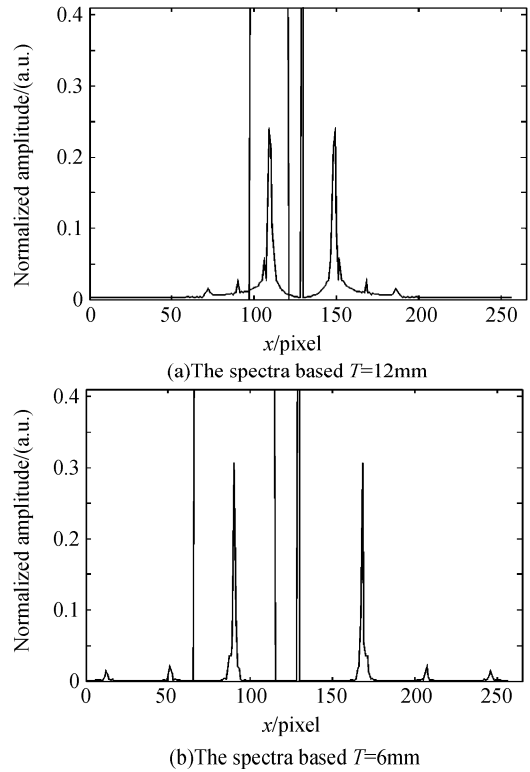


图 6 两种情况 x 轴上一维频谱图
Fig. 6 The results of spectra of deformed fringe in X axis

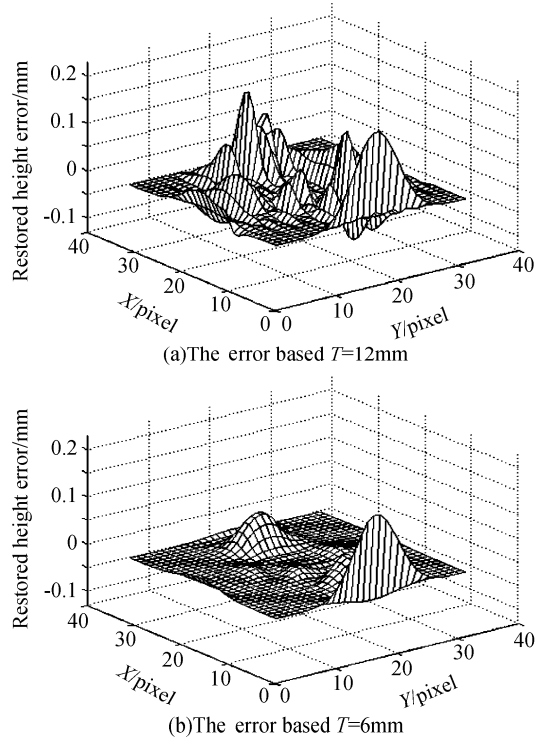


图 7 两种情况的误差结果
Fig. 7 The results of error

上光栅像的周期变为 6 mm, 从而提高光栅基频, 同时增加 CCD 的分辨率. 用同样物体放在投影光场的中心, 光栅投影到物体上得到的变形条纹如图 5 (b) ($n = 256$), 对它进行傅里叶变换、矩形窗口滤波、逆傅里叶变换, 得到的频谱在中心轴 x 轴上的分布如图 6(b), 误差如图 7(b). 计算得到误差的最大

值为 0.027 2 mm,误差的平均值为 0.007 2 mm.

上面两种情况的误差剖面比较如图 8. 图中虚线为开始测量时的误差剖面,实线为用加密光栅时的同一位置误差剖面.

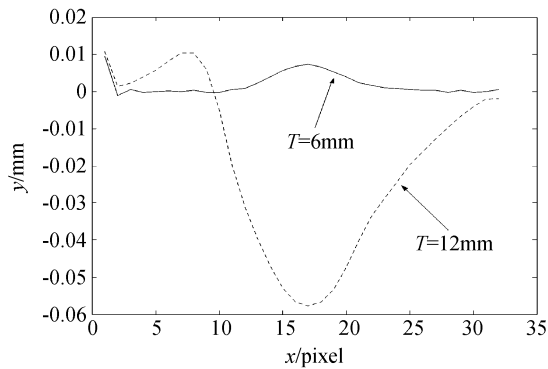


图 8 误差剖面比较

Fig. 8 Comparatively in error of siction plane

比较图 7(a)、图 7(b)及图 8 可知:测量范围不变,使光栅加密可明显减少频谱的混叠,从而使 FTP 的测量准确度明显提高.

4 结论

详细分析了 CCD 非线性产生频谱混叠的问题. 并从理论上分析 CCD 的非线性产生高频分量的原因,给出了简单的物理解释和解析推导;通过计算机仿真与实验分析了 CCD 的非线性导致频谱混叠的情况. 从计算机仿真与实验结果中可明显看出:由于实际工作中的 CCD 的非线性效应,频谱中多出了二级、三级频谱等高频成份.

分析了在 FTP 的测量中,由于实际工作中 CCD 的非线性,频谱中混入了二级、三级等高级频谱成份,增加了与基频混叠的可能,影响了 FTP 的测量准确度. 当用加密光栅时,则可明显提高 FTP 测量准确度,计算机模拟证明了结论的正确性.

参考文献

[1] LIU Guo-yuan, LI Lu-yao, ZHANG Bo-heng, *et al.* The application of device CDS in dealing with the vedio signal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(1): 82-86.
刘国媛, 李露瑶, 张伯珩, 等. CDS 器件在 TDI-CCD 视频信号处理中的应用[J]. *光子学报*, 2000, **29**(1): 82-86.

[2] MA Rong-gui, SONG Hong-xun. The application of multiple-CCD displacement transducers in the road profiling measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(3): 352-354.
马荣贵, 宋宏勋. 多路 CCD 位移传感器用于路面纵断面检测研究[J]. *光子学报*, 2001, **30**(3): 352-354.

[3] WANG Li, TIAN Wei-jian, WANG Yao-xiang, *et al.* Measurement method for modulation transfer Function of fiber optic taper coupled with CCD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 613-615.
汪丽, 田维坚, 王耀祥, 等. 光锥与 CCD 耦合器件调制传递函数的测试方法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 613-615.

[4] WANG Yao-xiang, TIAN Wei-jian, WANG Li, *et al.* Measurement for modulation transfer Function of CCD coupled with fiber optic taper by rectangle bar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 613-615.
王耀祥, 田维坚, 汪丽, 等. 矩形波板法测量光锥与 CCD 耦合器件的光学传递函数[J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 923-926.

[5] ZHOU Jie, QIU Sheng-gen, LIU Xu, *et al.* Measurement system of projection lens based on CCD modulation transfer Function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **24**(4): 260-263.
周杰, 邱胜根, 刘旭, 等. 应用 CCD 的投影物镜调制传递函数测量系统[J]. *光学学报*, 2005, **24**(4): 260-263.

[6] QIAO Nao-sheng, SU Xian-yu, CHEN Gui-chuan. Effect caused by nonlinearity of detector in Fourier transform profilometry [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(5): 35-37.
乔闹生, 苏显渝, 陈桂川. 探测器非线性对傅里叶变换轮廓术的影响[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(5): 35-37.

[7] ZHAO Huan-dong, ZHU Bi-jin, LI Zhi-neng. Effect on the Fourier transform profilometry due to the CCD nonlinearity [J]. *Optical Instrucment*, 2000, **22**(5): 7-13.
赵焕东, 祝必进, 李志能. CCD 的非线性效应对改进型傅里叶变换轮廓术的影响[J]. *光学仪器*, 2000, **22**(5): 7-13.

[8] ZHOU Li-bin, SU Xian-yu, WANG Li-wu. Analysis of errors introduced by detector nonlinearity in phase measuring profilometry [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(3): 19-21.
周利兵, 苏显渝, 王立无. 相位测量轮廓术中探测器非线性误差的分析[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(3): 19-21.

[9] WANG Yun-cai, WANG Xian-hua, CHEN Guo-fu. Measurement of fast electronic pulses with external electro-optic sampling [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(3): 208-213.
王云才, 王贤华, 陈国夫. 快速电信号的外光电采样测量系统 [J]. *光子学报*, 1997, **26**(3): 208-213.

[10] CHEN W J, YANG H, SU X Y, *et al.* Error caused by sampling in Fourier transform profilometry [J]. *Opt Eng*, 1999, **38**(6): 1029-1034.

[11] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes [J]. *Appl Opt*, 1983, **22**(24): 3977-3982.

[12] CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, TAN Song-xin. Basic requirement for measurement system in FTP [J]. *Optoelectronics • Laser*, 1999, **10**(6): 535-539.
陈文静, 苏显渝, 谭松新. Fourier 变换轮廓术中对测量系统的基本要求 [J]. *光电子 • 激光*, 1999, **10**(6): 535-539.

[13] SU X Y, ZHOU W S, von BALLY G, *et al.* Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of the rochi grating [J]. *Opt Commun*, 1992, **94**(6): 561-573.

Study of the Relationship Between Nonlinearity of CCD and Frequency Overlapping

QIAO Nao-sheng, CAI Xin-hua, PENG Guang-han

(Department of Physics and electronics, Hunan University of Arts and Science, Changde, Hunan 415000, China)

Received date: 2005-11-01

Abstract: The overlapping spectrum caused by the nonlinearity of CCD was analyzed, and the way of reducing overlapping spectrum was presented. The cause to high order spectrum produced by the nonlinearity of CCD was analyzed through theory. The simple physical explain and analytical deduction was given, and also results of overlapping spectrum were given through simulation of computer and experiment. The results of simulation of computer show that the measurement precision of FTP can be improved obviously by denser sampling.

Key words: Fourier Transformation Profilometry (FTP); Nonlinearity of CCD; Overlapping spectrum; Sampling



QIAO Nao-sheng was born in 1971, and in Hunan, China. He received the B. S. degree from Hunan Normal University in 2000, and received the M. S. degree in optical information processing from Sichuan University in 2005. Now he is a teacher at Department of Physics and Electronics, Hunan University of Arts and Science. His major research interests include optical information processing, digital image processing, optical 3-D sensing and so on.