

# 实现超分辨率的微变焦法

张海涛<sup>1)</sup> 巩马理<sup>1)</sup> 赵达尊<sup>2)</sup> 闫平<sup>1)</sup> 崔瑞祯<sup>1)</sup> 贾维溥<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>清华大学精密仪器与机械学系,北京 100084)

<sup>2)</sup>北京理工大学光电工程系颜色科学与工程国家重点实验室,北京 100081)

(2001 年 2 月 25 日收到)

光电成像系统对目标欠抽样成像时,高频细节不但无法分辨,还将混淆低频成分.介绍一种新的实现光电成像系统超分辨率的方法——微变焦法,即利用放大率可变光学系统,获得多帧不同抽样频率下的混淆图象,然后重建成一帧混淆减少、分辨率提高的图象.计算机模拟和实验结果都表明了微变焦方法能够简便、有效地提高光电成像系统的分辨率.

关键词:超分辨率,微变焦法,混淆,光电成像系统,焦平面阵列

PACC:4230,4280Q

## 1 引 言

电荷耦合器件(CCD)等焦平面阵列(FPA)光电成像系统对目标成像时,若目标在奈奎斯特带宽(不大于二分之一抽样频率的通带,简称 NBW)外仍有重要的高频成分,则高频将叠加到低频上,产生混淆<sup>[1,2]</sup>.混淆不仅使高频所对应的图象精细结构无法辨认,还会干扰低频,引起对目标图象的误解.减少混淆的根本途径是提高抽样系统的分辨率,即增加抽样频率.若直接减小 FPA 象素间隔,即使不考虑材料处理的工艺难度,光敏单元(象元)也要受电磁辐射波长的物理限制,小到一定程度,辐射能量就无法通过该材料转换成电信号.增大光学系统的放大率可以间接增加抽样频率,但以视场为代价.将多帧经过亚象素位移的图象重建成一帧图象的微扫描法<sup>[3,4]</sup>,能够在保持视场的同时,提高等效抽样频率.但微扫描实施的前提是必须保证足够高的位移精度,而该精度还会随着所需微扫描级数,即亚象素位移的减小而成倍上升,使实施高频振动小位移的机械装置变得更为复杂.成本的昂贵正是微扫描至今都得不到普及的重要原因.

这里介绍一种新的简单可行的方法——微变焦法,即通过改变光学放大率,得到同一目标在不同抽样频率下的图象样本值,利用这些样本值能够重构出一帧混淆减少的超分辨率图象.改变光学放大率只需控制光轴方向上的位移,通过变焦镜头即可实现,避免了微扫描中控制水平、垂直两个方向位移的

高精度机械装置,精度要求也不会随所需微变焦级数和实际象素尺寸的减少而增加.

## 2 微变焦原理

为了节约篇幅,着重分析一维情形,二维可类似拓展.

设目标经过放大率为  $\Gamma$  的光学系统后,在物面上的反向投影函数为  $g(x)$ ,若 FPA 的象元距为  $\Delta x$ ,忽略象元的积分作用,则抽样后的离散样本函数  $s(x)$  可以表示为

$$s(x) = g(x) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(x - m\Delta x/T), \quad (1)$$

对(1)式进行傅里叶变换,得到

$$S(\xi) = \xi_s \sum_{m=-\infty}^{+\infty} G(\xi - \xi_s), \quad (2)$$

其中  $\xi_s = \Gamma/\Delta x$ ,  $G(\xi)$ ,  $S(\xi)$  分别表示  $g(x)$ ,  $s(x)$  的傅里叶变换.  $g(x)$  在空域上以  $\Delta x$  为间隔的均匀抽样,在频域上则表现为  $G(\xi)$  以抽样频率  $\xi_s (= 1/\Delta x)$  为间隔的周期性铺排.设  $G(\xi)$  是带限函数,  $\xi_c$  为其“截止频率”,即当  $|\xi| > \xi_c$  时,  $G(\xi) = 0$ . 根据香浓抽样定理,  $\xi_s \leq 2\xi_c$  时,只要对抽样信号频谱进行与 NBW 匹配的矩形低通滤波,即可完全恢复出原目标频谱  $G(\xi)$ ,准确重建出  $g(x)$ . 但  $\xi_s < 2\xi_c$  时,重建带宽内将混入其他级次频谱.这时即使低通滤波也不能从单帧混淆的频谱恢复出  $G(\xi)$ ,除非获得更多的有关目标频谱的信息.

微变焦法即是通过改变光学放大率  $\Gamma$ ,使 FPA

(象面)上固定尺寸的象元距在物面上的反向投影  $\Delta x/\Gamma$  大小改变, 抽样频率  $\xi_s$  随之改变. 使得目标在不同抽样频率下成象, 从而得到更多位置上的信息, 为  $\alpha(\xi)$  从混淆谱中分离出来提供了可能. 当然, 光学放大率的变化应足够小, 使得光学系统的点扩散函数的差异可以忽略. 最大放大率与最小放大率的比值最好不超过 1.5.

原则上  $(L-1)\xi_c \leq \xi_s < L\xi_c$  ( $L$  为整数) 时, 至少需要  $L$  级微变焦才能得到  $\alpha(\xi)$  的全部信息, 亦即需要摄取  $L$  帧(二维是  $L^2$  帧)相近抽样频率下的图象, 才能将等效抽样频率提高到  $L$  倍, 从而减少混淆. 目前的光电成象系统,  $\xi_c \leq \xi_s < 2\xi_c$  时的一级混淆最为明显, 所以常用二级维变焦实现超分辨率. 下面将介绍具体的处理方法, 更高级次的微变焦方法可以类推.

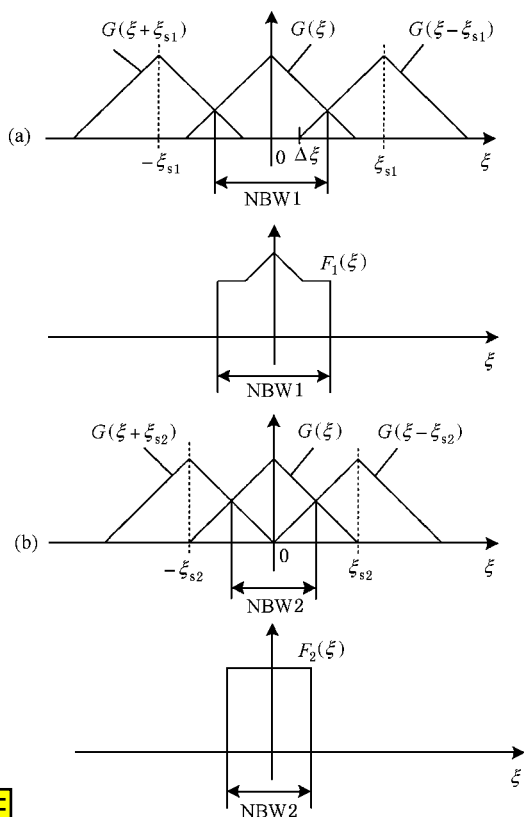


图1 不同抽样频率下的频谱混淆 (a)为第一次抽样 (b)为第二次抽样

如图1所示, 图1(a)和(b)分别是  $\alpha(\xi)$  在抽样频率  $\xi_{s1}$  和  $\xi_{s2}$  下的一级频谱混叠示意图:  $\xi_c \leq \xi_{s2} < \xi_{s1} < 2\xi_c$ ,  $\Delta\xi = \xi_{s1} - \xi_{s2}$ . 设  $F_1(\xi)$  和  $F_2(\xi)$  分别是按奈奎斯特带宽 NBW1 和 NBW2 进行低通滤波的重建频谱(系数按抽样频率作了处理), 可表示为

$$F_i(\xi) = \frac{S_i(\xi)}{\xi_{si}} \text{rect}(\xi/\xi_{si}) \\ = \text{rect}(\xi/\xi_{si}) \left[ \alpha(\xi + \xi_{si}) + \alpha(\xi) + \alpha(\xi - \xi_{si}) \right], \quad (3)$$

其中  $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ ,  $i$  是下标变量,  $i = 1, 2$  分别对应第一、二次抽样情形,  $S_i(\xi)$  表示第  $i$  次抽样得到的离散样本函数  $s_i(x)$  的离散傅里叶变换. 注意  $s_i(x)$  和  $S_i(\xi)$  的物理意义分别同于(1), (2)式中的  $s(x)$  和  $S(\xi)$ , 只是多了下标变量  $i$ , 专指第  $i$  次抽样情形. 如图1所示,  $F_1(\xi)$  和  $F_2(\xi)$  显然都不能正确表示  $\alpha(\xi)$ . 微变焦目的即是从混淆频谱  $F_i(\xi)$  中将混淆前的  $\alpha(\xi)$  解出, 相当于将抽样频率至少提高到原最小抽样频率的 2 倍, 从而实现超分辨率.

设  $\Delta\xi = \xi_{s1} - \xi_{s2}$ , 根据  $\xi_c \leq \xi_{s2} < \xi_{s1} < 2\xi_c$  的前提条件, 或者从图1(a)所示的第一次抽样时的频谱混叠示意图中, 都能推断出  $F_1(\xi)$  在  $\xi_0 \in [0, \Delta\xi]$  时, 没有混淆发生, 即

$$\alpha(\xi_0) = F_1(\xi_0), \quad (4)$$

利用(4)式和图1(b)又可求得

$$\alpha(\xi_0 - \xi_{s2}) = F_2(\xi_0) - \alpha(\xi_0). \quad (5)$$

再从图1(a)得到

$$\alpha(\xi_0 + \Delta\xi) = F_1(\xi_0 + \Delta\xi) - \alpha(\xi_0 + \Delta\xi - \xi_{s1}) \\ = F_1(\xi_0 + \Delta\xi) - \alpha(\xi_0 - \xi_{s2}). \quad (6)$$

同样, 回到图1(b), 得到

$$\alpha(\xi_0 + \Delta\xi - \xi_{s2}) = F_2(\xi_0 + \Delta\xi) - \alpha(\xi_0 + \Delta\xi), \quad (7)$$

.....

如此递推, 得到

$$\alpha(\xi_0 + n\Delta\xi) = F_1(\xi_0 + n\Delta\xi) \\ - \alpha(\xi_0 + (n-1)\Delta\xi - \xi_{s1}), \quad (8) \\ \alpha(\xi_0 + n\Delta\xi - \xi_{s2}) = F_2(\xi_0 + n\Delta\xi) \\ - \alpha(\xi_0 + n\Delta\xi), \quad (9)$$

其中  $n$  是整数, 若  $n_{\max} = \lceil \xi_c/\Delta\xi \rceil$  (表示朝负无穷大方向取整), 则  $1 \leq n < n_{\max}$ . 最后, 在  $[n_{\max}\Delta\xi, \xi_c]$  区间, 即  $\xi = \xi'_0 + n_{\max}\Delta\xi$ ,  $\xi'_0 \in [0, \xi_c - n_{\max}\Delta\xi]$  时,

$$\alpha(\xi'_0 + n_{\max}\Delta\xi) = F_1(\xi'_0 + n_{\max}\Delta\xi) - \alpha(\xi'_0 \\ + (n_{\max} - 1)\Delta\xi - \xi_{s2}), \quad (10)$$

$$\alpha(\xi'_0 + n_{\max}\Delta\xi - \xi_{s2}) = F_2(\xi'_0 + n_{\max}\Delta\xi) \\ - \alpha(\xi'_0 + n_{\max}\Delta\xi), \quad (11)$$

由上述递推方法就能确定出  $G(\xi)$  的所有值, 相当于成象带宽扩展到了  $2NBW2$ . 由于  $g(x)$  为实函数,  $G(\xi)$  具有厄密对称性, 即  $G(\xi) = G^*(-\xi)$ . 递推次数还可减少二分之一.

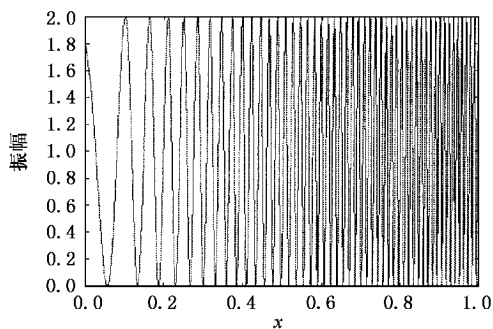
从上面的递推过程, 可以清晰地看到微变焦法的基本思路. 但对于二维微变焦, 由于需要采入的抽样图象更多, 递推公式将变得非常复杂. 所以具体处理时, 常用最小二乘法求解联立方程组. 用离散傅里叶变换分别得到  $F_1(\xi), F_2(\xi)$  的  $m_1, m_2$  个离散频谱值, 根据 (3) 式可以建立含  $2m_2$  个未知数的  $m_1 + m_2$  个方程, 该超定方程组用最小二乘法联立

求解, 可以得到  $2m_2$  个  $G(\xi)$  值, 相当于将成象系统的频谱扩展到第二次抽样时的两倍. 该方法可简单地从一维推广到二维或二级以上的微变焦情形.

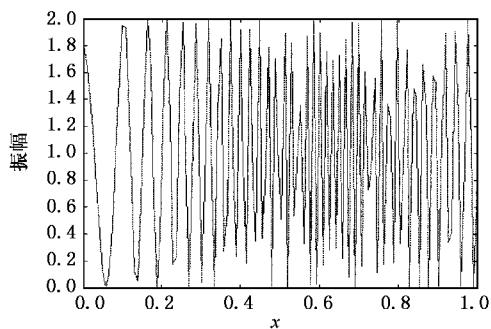
若考虑象元积分影响, 只需将 (3) 式改成下式, 再对方程组的系数矩阵做相应的修正即可,

$$F_i(\xi) = \text{rect}(\xi/\xi_{si}) \left[ W(\xi + \xi_{si})G(\xi + \xi_{si}) + W(\xi)G(\xi) + W(\xi - \xi_{il})G(\xi - \xi_{il}) \right], \quad (12)$$

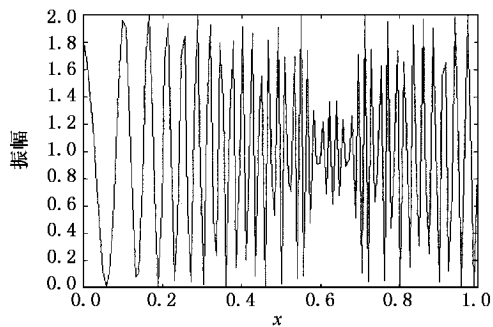
其中  $W(\xi) = \text{sinc}(\tau\xi/\xi_s)$  是象元积分调制传递函数<sup>[5]</sup>,  $\tau$  是象元填充因子, 即感光宽度与象素距的比值.



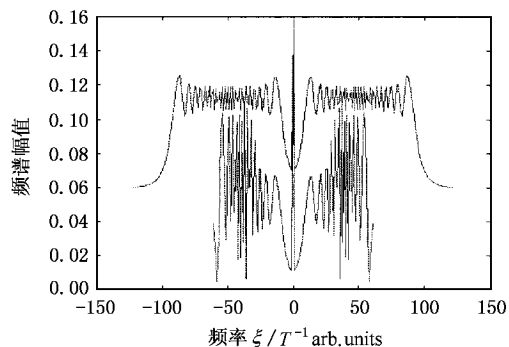
(a)



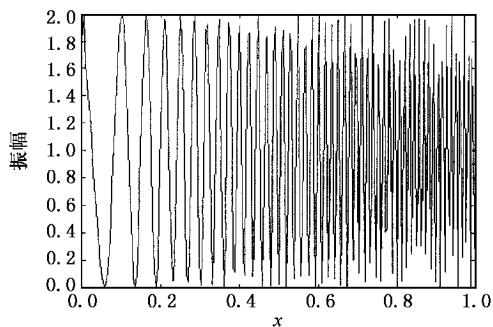
(b)



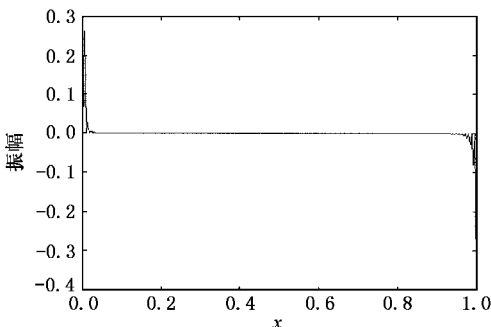
(c)



(d)



(e)



(f)

图2 脉冲抽样的微变焦模拟 (a)为目标 (b)为第一次抽样 (c)为第二次抽样 (d)为第二次抽样频谱与微变焦频谱(频率单位为  $T^{-1}$  个任意单位) (e)为微变焦重建 (f)为微变焦结果与直接抽样的差值曲线



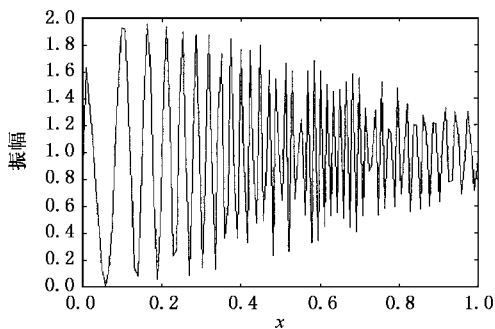
### 3 计算机模拟结果

#### 3.1 脉冲抽样

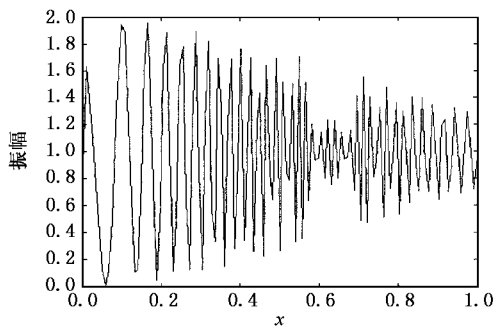
若不考虑象元积分时,如(1)式所示,抽样函数为理想的脉冲函数,微变焦的计算机模拟结果如图2所示.图 $\chi(a)$ 是频率随 $x \in [0, T], T=1$ 个任意单位长度)增加而逐渐变高的 chirp 函数;图 $\chi(b)$ , $(c)$ 分别是在该区间内等间距抽出的 124, 123 个 chirp 值连结的曲线,该区间中后段本为高频成分,而图 $\chi(b)$  $(c)$ 显示出的频率特征和幅值明显与图2 $(a)$ 不符,它们之间也存在差异,从这点也能判断出抽样不足性和混淆的存在.图 $\chi(d)$ 是第二次抽样结果的傅里叶变换频谱幅值(下)和利用图 $\chi(b)$  $(c)$ 抽样值解出的微变焦频谱幅值(上),频率单位为 $T^{-1}$ 个任意单位,为便于观察,两者的零频幅值都缩小到各自的 $1/6.2$ ,微变焦的频谱幅值抬高了0.06.图 $\chi(e)$ 是微变焦结果,由反傅里叶变换微变焦频谱得到,基本恢复出原图 $\chi(a)$ 图曲线的频率特征,其中的微小起伏是抽样点不够多的缘故,利用插值即可消除,插值后的结果与图 $\chi(a)$ 基本一样,此处略.图 $\chi(f)$ 是微变焦结果图 $\chi(e)$ 和从图 $\chi(a)$ 的 $[0, T]$ 区间中直接等间距抽出的 246 个 chirp 值的误差曲线,其值基本保持为零.只是在 0 和 1 附近时,急速增大,误差的最大绝对值可到 0.3585,这是因为函数在区间两端锐截止时引入了高频成分,使得被抽样函数变成非带限函数而不能完全利用抽样图象进行准确恢复而出现 overshoot<sup>[6]</sup>.但在抽样频率足够高时,带限函数空域上即使被锐截止也仍可近似为带限,称为“准带限”,使得基本满足抽样定理而得以还原.由此可见,用二级微变焦法恢复出来的图象质量,等同于系统提高一倍抽样频率时的成象质量.

#### 3.2 象元积分抽样

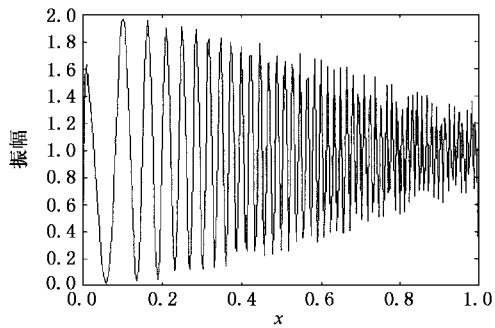
实际抽样由于象元积分作用,高频部分的对比度将有所降低,图象比脉冲抽样时要模糊一些.图3是模拟 $\tau = 100\%$ 时的象元积分影响下的微扫描.仍以图 $\chi(a)$ 为目标,两次象元积分抽样结果示于图3 $(a)$  $(b)$ ,抽样频率仍与图2一样,所以混淆分别发生在与图2相同的横坐标处,只是纵向幅度值不等,这正是象元积分对高频衰减调制的结果.图 $\chi(c)$ 是



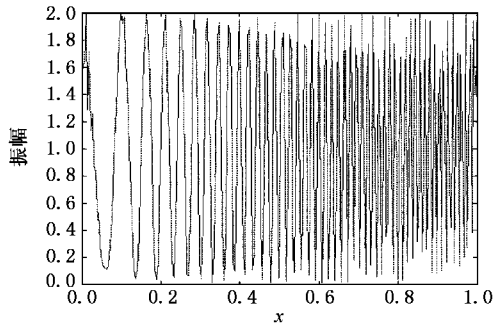
(a)



(b)



(c)



(d)



图3 象元积分抽样的微变焦模拟 (a)为第一次抽样 (b)为第二次抽样 (c)为忽略象元积分因子的微变焦结果 (d)为考虑象元积分因子的微变焦结果

系数矩阵未按象元传递函数进行修正的微变焦结果. 随着频率增加, 对比度减小, 但频率成分基本能够体现出来. 图 3(d) 是修正系数矩阵后的微变焦结果, 频率特征以及对对比度都恢复出来, 同图 2, 其中的微小起伏, 通过插值即可消除. 系数修正后的微变焦不仅减少混淆, 还能提高高频的对比度.

## 4 实验结果

微变焦法的实验结果如图 4 和图 5 所示. 图 4 的成像目标是一个非均匀光照明的“准”余弦光栅, 对于“准”的意思稍加说明: 实验用目标是余弦光栅底片的投影, 投影面是有起伏的近似平面, 且没刻意要求与 CCD 的物镜光轴垂直, 所以即使余弦光栅的制作没有误差, 目标频谱也要比理想余弦光栅的频谱稍微复杂一些. 四次抽样频率的比值是 1.0597:1.0448:1.0299:1. 图 4(a)(b) 分别是第一、四次的抽样图象, 混淆明显, 其中一些麻点是电路的噪声, 这种噪声具有“0”平均值, 可以通过帧间平均去除, 这里未加去除是因为该噪声对微变焦结果影响不大, 而且最后会如帧间平均一样被去除, 如图 4(c) 所示, 光栅的周期特征基本恢复, 噪声也被有效抑制.

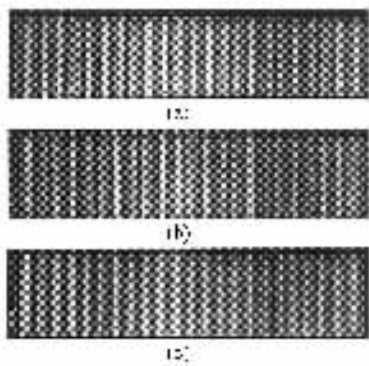


图 4 “准”余弦光栅的实验结果 (a) 为第一次抽样 (b) 为第四次抽样 (c) 为微变焦结果

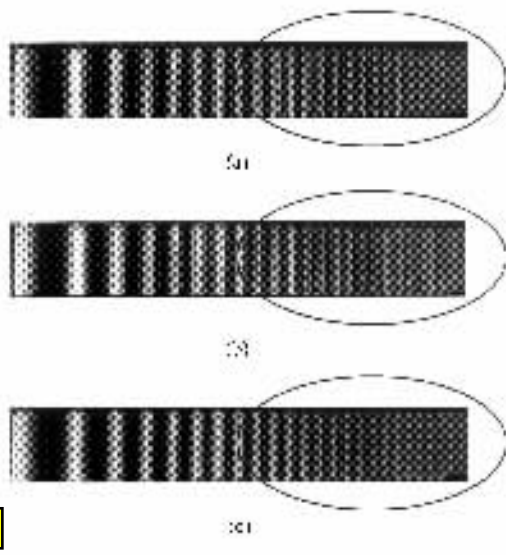


图 5 “准”chirp 光栅的实验结果 (a) 为第一次抽样 (b) 为第四次抽样 (c) 为微变焦

图 5 的成像目标是一个“准”chirp 光栅. 四次抽样频率比值是 1.0690:1.0460:1.0230:1. 图 5(a), (b) 分别是第一、四次的抽样图象, 图 5(c) 微变焦重建图象, 椭圆标出的高频部分分辨率提高, 混淆明显减少.

上述实验如果使用分辨率更高的摄象物镜, 以减少参与混淆的高频成分的衰减程度, 还会获得更好的视觉对比.

## 5 结 论

微变焦法能够将混淆频谱由消极的干扰因素转化成提取高频分量的信源, 在不改变探测器阵列物理特性和视场的条件下, 能够得到超分辨率的图象, 使混淆减少. 另外, 还可通过对象元调制因子的修正, 进一步增强高频的对比度. 若拍摄更多个放大倍率下的图象, 进行微变焦处理, 还可以进一步提高分辨率, 也不需要增加装置精度. 加之成本不高, 具有广泛的应用前景.

- [1] R. J. Dann, S. R. Carpenter, C. Seamer, *Proc. SPIE*, **685** (1986), 123.
- [2] F. O. Huck, N. Halyo, S. K. Park, *Appl. Opt.*, **19** (1980), 2174.
- [3] E. A. Watson, R. A. Muse, F. P. Blommet, *Proc. SPIE*, **1689** (1992), 242.
- [4] J. C. Gillette, T. M. Stadtmiller, R. C. Hardie, *Opt. Eng.*,

**34** (1996), 3130.

- [5] L. D. Luca, G. Cardone, *Appl. Opt.*, **30** (1991), 1659.
- [6] X. Z. Deng, Y. K. Xu, *Fast Fourier Transform Introduction* (China Electric Power Press, Beijing, 1991), p. 237 [in Chinese]. 邓贤照、徐英凯, 快速傅里叶变换浅谈 (水利电力出版社, 北京, 1991), 第 237 页.]

## SUPERRESOLUTION BY MICRO-ZOOMING TECHNIQUE

ZHANG HAI-TAO<sup>1)</sup> GONG MA-LI<sup>1)</sup> ZHAO DA-ZUN<sup>2)</sup> YAN PING<sup>1)</sup> CUI RUI-ZHEN<sup>1)</sup> JIA WEL-PU<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

<sup>2)</sup> *State Key Laboratory for Color Science and Engineering, Department of Photo-electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

( Received 25 February 2001 )

### ABSTRACT

In opto-electronic imaging systems, aliasing will occur when sampling a scene containing spatial frequencies exceeding one half of the sampling frequency. A novel superresolution technique, micro-zooming, is proposed, which can reduce aliasing and improve the resolution of the imaging systems through a series of aliased frames with different optical magnifications. Both computer simulations and experimental results are presented to verify the effectiveness and simplicity of micro-zooming technique for obtaining superresolution.

**Keywords** : superresolution, micro-zooming, aliasing, opto-electric imaging systems, FPA

**PACC** : 4230, 4280Q