

减少光电成像系统周期目标 莫尔赝像的双倍率法

张海涛 赵达尊

(北京理工大学光电工程系颜色科学与工程实验室, 北京 100081)

摘 要 光电成像系统对周期目标欠抽样成像时, 由于频谱混淆将产生莫尔条纹式的赝像。介绍了利用两帧不同抽样频率下的混淆图像以减少莫尔赝像恢复原周期目标的双倍率方法, 并给出了计算机模拟结果。

关键词 双倍率, 莫尔赝像, 混淆, 欠抽样, 光电成像系统。

1 引 言

用光电成像系统获取图像信息时, 由于用光电扫描机制或探测器阵列对图像进行抽样, 当被抽样物体含有超过系统的奈奎斯特(Nyquist)频率(二分之一抽样频率)的空间频率成分时, 所获图像将产生周期谱交叠, 即混淆^[1]。由于复杂自然景物的空间频谱一般呈连续分布, 当系统无法分辨的高频成分可视为不重要时, 可以采用各种预滤波方法, 预先滤除会引起混淆的高频成分^[2]。但是对于光强分布为周期性函数的目标, 当因高频成分混入到奈奎斯特基频区内而引起明显的莫尔条纹式赝像时, 预滤波方法将不再适合。因为一旦滤除这些谐波成分, 图像恢复的机会也同时失去。减少混淆的常用方案是将 2×2 帧经过半个像素距位移的图像合成一帧奈奎斯特频率提高一倍的图像, 即微扫描方法^[3]。但微扫描对系统的机械要求很高, 如果用来减少特征不多的周期目标的莫尔赝像就显得浪费。本文针对周期目标莫尔赝像的减少提出一种较简单的双倍率方法: 利用两帧光学放大倍率不同的抽样阵列还原出相当于奈奎斯特频率提高一倍或更多的图像, 从而减少莫尔赝像。

2 光电成像系统的理论分析

通常, 实际的光电成像系统是对经光学成像系统缩放后的投影图像进行抽样成像。设光学系统放大率为 α , $\mathbf{r} = (x, y)$ 为目标平面的位置矢量。若目标经光学系统模糊影响和像元积分作用后, 其抽样前连续函数为 $g(\mathbf{r})$, 则抽样后的离散函数可表示为

$$g_s(\mathbf{r}) = g(\mathbf{r}) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{mn}), \quad (1)$$

其中, \mathbf{r}_{mn} 表示探测器阵列的抽样栅格投影到目标平面上的位置矢量, $\mathbf{r}_{mn} = (ma/\alpha, nb/\alpha)(m,$

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), a, b 为探测器阵列的实际像素距。

对(1)式进行傅里叶变换, 得

$$G_s(\mathbf{R}) = \xi_s \eta_s \sum_{M=-\infty}^{+\infty} \sum_{N=-\infty}^{+\infty} G(\mathbf{R} - \mathbf{R}_{MN}), \quad (2)$$

式中 $G_s(\mathbf{R})$ 代表 $g_s(\mathbf{r})$ 的傅里叶变换; \mathbf{R} 表示目标平面频谱面上的矢量; 而 $\mathbf{R}_{MN} = M\mathbf{R}_{1,0} + N\mathbf{R}_{0,1}$ ($M, N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), $\mathbf{R}_{1,0}, \mathbf{R}_{0,1}$ 分别表示物谱面频率轴 ξ, η 方向上的抽样频率矢量, 即 $\mathbf{R}_{1,0} = (\alpha/\Delta x, 0) = (\xi_s, 0)$, $\mathbf{R}_{0,1} = (0, \alpha/\Delta y) = (0, \eta_s)$, 相应的奈奎斯特频率为 $\xi_s/2$ 和 $\eta_s/2$ 。

观察(2)式, $G_s(\mathbf{R})$ 是 $G(\mathbf{R})$ 沿着 ξ, η 方向分别以 ξ_s, η_s 为周期的重复排列, 当目标频率大于奈奎斯特频率时, 即使重建目标前经过了理想低通滤波函数(奈奎斯特带宽内为 1, 其余为 0)的滤波, 但由于混淆, 将引起莫尔贗像和像质下降。

3 周期目标的莫尔贗像

周期目标的傅里叶变换是一组等距 δ 函数系列, 每个 δ 函数对应一个频率成分。所以当光电成像系统对周期目标欠抽样成像时, 高频 δ 成分混入通带区, 出现莫尔条纹样式的混淆失真。

设 $\delta(\mathbf{R} - \mathbf{R}_i)$ 为周期目标谱面上的一个 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_i = (\xi_i, \eta_i)$ 的成分, 该成分在通带内的频率将变为^[4]

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_a = \mathbf{R}_i + \mathbf{R}_{MN}, \quad (3)$$

其中 $M = -[\frac{\xi_i}{\xi_s} + \frac{1}{2} - \epsilon]$, $N = -[\frac{\eta_i}{\eta_s} + \frac{1}{2} - \epsilon]$, 这里 ϵ 为大于 0 的无限小量, $[\]$ 表示朝负无穷方向取整运算。

当 \mathbf{R}_i 本身在奈奎斯特通带内, 即 $M = N = 0$ 时, $\mathbf{R}_a = \mathbf{R}_i$, 该成分可被如实重建。否则, \mathbf{R}_a 为混淆矢量; 矢量 \mathbf{R}_a 的模比原目标矢量 \mathbf{R}_i 小, 而且除非 $(\xi_i + M\xi_s)/(\eta_i + N\eta_s) = \xi_i/\eta_i$, 矢量方向也有所不同; \mathbf{R}_a 不能正确反映原物周期特征, 故称之为莫尔贗像。

4 双倍率法

由(1)式可见, 当 α 变化足够小, 所引起的目标成像受系统模糊因素(如衍射、像元积分等)影响的差异可以忽略时, 可使同一目标获得不同抽样周期下的离散阵列。本文提出的双倍率法, 即是通过改变放大倍率, 得到一个周期目标在不同抽样频率下的两帧欠抽样图像, 经计算后重建出一帧含有高于奈奎斯特频率(两倍或更多)的图像, 同时减少混淆。

首先考察目标矢量 \mathbf{R}_i 在两个欠抽样频率下的 \mathbf{R}_a : \mathbf{R}_{a1} 和 \mathbf{R}_{a2} 。图 1 所示为一个具体例子: 矩形虚框分别表示抽样频率 $\xi_{s1}(\eta_{s1})、\xi_{s2}(\eta_{s2})$ 所对应的奈奎斯特通带。因为

$$0 < \xi_i < \frac{\xi_{s1}}{2}, \quad \frac{\eta_{s1}}{2} < \eta_i < \frac{3\eta_{s1}}{2},$$

所以根据(3)式,

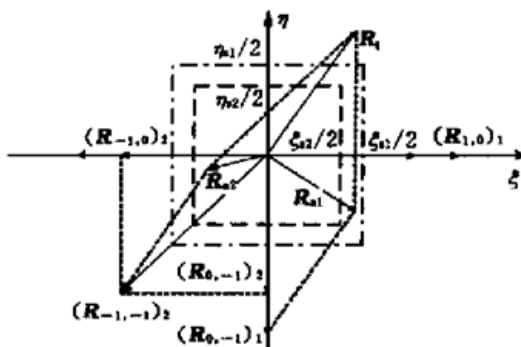


Fig. 1 Frequency vectors of aliasing in different sampling frequencies

$$M_1 = 0, \quad N_1 = -1, \quad \mathbf{R}_{a1} = \mathbf{R}_t + (\mathbf{R}_{0, -1})_1。$$

类似地, 因为

$$\frac{\xi_{s2}}{2} < \xi_t < \frac{3\xi_{s2}}{2}, \quad \frac{\eta_{s2}}{2} < \eta_t < \frac{3\eta_{s2}}{2},$$

所以

$$M_2 = -1, \quad N_2 = -1,$$

即

$$\mathbf{R}_{a2} = \mathbf{R}_t + (\mathbf{R}_{-1, -1})_2。$$

一般地, 有

$$\mathbf{R}_t = \mathbf{R}_{a1} - (\mathbf{R}_{M_1 N_1})_1 = \mathbf{R}_{a2} - (\mathbf{R}_{M_2 N_2})_2, \quad (4)$$

可见, 如果已知 \mathbf{R}_{a1} 、 \mathbf{R}_{a2} 、 $\xi_{s1}(\eta_{s1})$ 、 $\xi_{s2}(\eta_{s2})$, 若能通过上式的第二等式唯一确定出 M 、 N (M_1 、 N_1 、 M_2 、 N_2), 则可恢复 \mathbf{R}_t , 进而重建原目标的 \mathbf{R}_t 成分 (\mathbf{R}_t 可位于通带外)。

另外, 实函数的谱是厄米对称的, \mathbf{R}_t 成分与 $-\mathbf{R}_t$ 成分应同时出现, 于是 \mathbf{R}_a 与 $-\mathbf{R}_a$ 也将同时出现, 且有

$$-\mathbf{R}_t = (-\mathbf{R}_{a1}) - (\mathbf{R}_{-M_1, -N_1})_1 = (-\mathbf{R}_{a2}) - (\mathbf{R}_{-M_2, -N_2})_2, \quad (5)$$

所以 $M_1(M_2)$ 、 $N_1(N_2)$ 实际上由(4)式、(5)式共同确定。

为了确定 M 、 N , 原则上只要把 \mathbf{R}_{a1} 扩展为一组频率矢量 $\mathbf{R}_{a1} - (\mathbf{R}_{M_1 N_1})_1$ ($M_1, N_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), 把 \mathbf{R}_{a2} 扩展为另一组频率矢量 $\mathbf{R}_{a2} - (\mathbf{R}_{M_2 N_2})_2$, 再在这两组矢量中找出共同矢量即为 \mathbf{R}_t , M 、 N 也随之确定。但实际上由于误差和巧合等原因, “共同矢量”可能并不唯一, 尤其当目标本身含有多个不同 \mathbf{R}_t 成分时, 将增大“不唯一”的可能性。为此, 在确定“共同矢量”时还应考虑该频率下的两个 $G_s(\mathbf{R}_a)$ 值(模和幅角)是否相等或相近, 以排除错误判断。此外, 由于像元积分给频谱带来的 sinc 函数形式的低通滤波^[1], 所以通常认为发生明显混淆的频矢主要来自一级谱, $M_1(M_2)$ 、 $N_1(N_2)$ 的绝对值一般不大于 2。这时, 当 α 变化足够小, 使得满足 $\frac{\xi_{s1}}{\xi_{s2}} < 1.5$, $\frac{\eta_{s1}}{\eta_{s2}} < 1.5$ (设 $\xi_{s1} > \xi_{s2}$, $\eta_{s1} > \eta_{s2}$), 若不考虑目标既为实对称函数 (\mathbf{R}_t 和 $-\mathbf{R}_t$ 对应的频谱相位相等) 同时又满足

$$\frac{\xi_t + M_1 \xi_{s1}}{\eta_t + N_1 \eta_{s1}} = \frac{\xi_t + M_2 \xi_{s2}}{\eta_t + N_2 \eta_{s2}} = \frac{\xi_t}{\eta_t}$$

频矢方向不变的特殊情形, 则 $M_1(M_2)$ 、 $N_1(N_2)$ 能由(4)式、(5)式唯一确定。

这样, 双倍率法的操作步骤可小结如下:

- 1) 用两种倍率分别得到 $g_{s1}(\mathbf{r})$ 和 $g_{s2}(\mathbf{r})$, 这两个函数的采样间隔不同, 但抽样区域 X 、 Y 相同;
- 2) 计算 $G_{s1}(\mathbf{R})$ 和 $G_{s2}(\mathbf{R})$, $\mathbf{R} \in$ 奈奎斯特通带;
- 3) 将 $G_{s1}(\mathbf{R})$ 、 $G_{s2}(\mathbf{R})$ 的各 δ 函数按频谱模值从大往小编号, 确定两个通带内各自的一组 $\{\mathbf{R}_{a1i}\}$ 、 $\{\mathbf{R}_{a2i}\}$, $i = 0 \sim I$ (I 为 \mathbf{R}_a 数目);
- 4) 利用次序对应的 \mathbf{R}_{a1i} 、 \mathbf{R}_{a2i} 找出满足(4)式、(5)式的 M_{1i} 、 N_{1i} 和 M_{2i} 、 N_{2i} (M 、 $N \leq 2$ 或 1), 从而确定出 \mathbf{R}_{ti} ;
- 5) 由 \mathbf{R}_{ti} ($i = 0 \sim I$) 重建图像。

该方法适用的条件是各 \mathbf{R}_{ti} 之间有充分的离散, 互不重叠, 或者说目标是较简单的周期目标。

5 计算机模拟结果

为了验证双倍率法的效果,对3种目标例子进行了计算机模拟,分别示于图2、图3和图4。其中前两例为周期目标,未考虑光敏元积分影响;第三例为“准”周期目标(等距同心圆环光栅),模拟了填充因子为100%的光敏元积分过程。为了比较,将它们空域中的抽样图像均用傅里叶变换法插值成同样大小;频谱都用等高线表示,坐标长度均按比例作了缩放,且抽样图像对应的频谱是傅里叶插值前的形式。

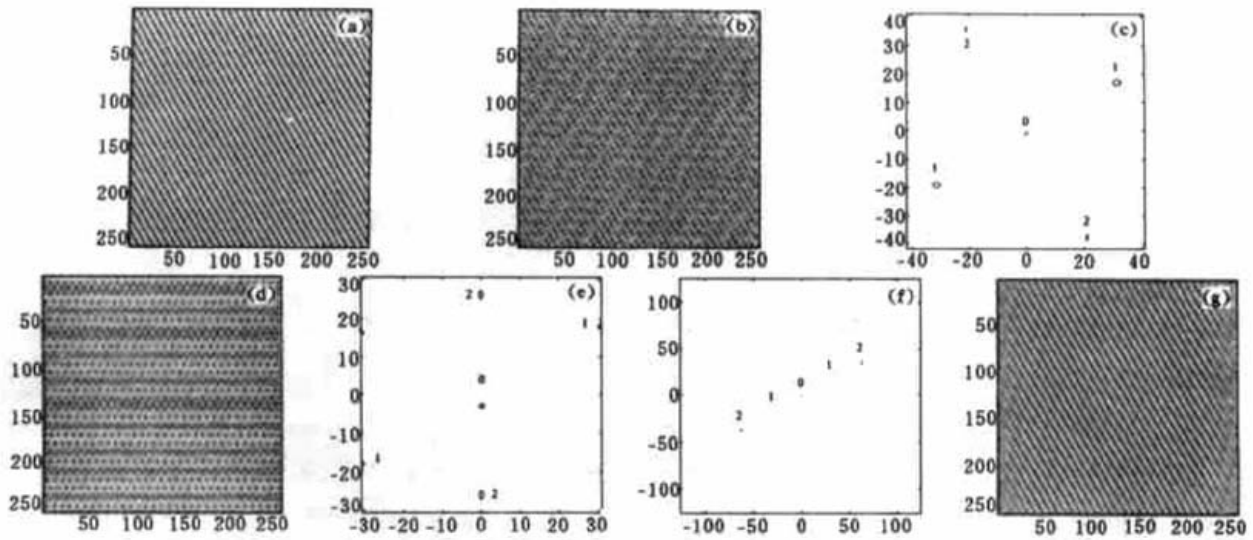


Fig. 2 (a) Grating target, (b) Image with sampling period of 3 pixels, showing significant moire artifacts, (c) Contour of modulus of spatial-frequency spectrum of image (b), (d) Image with sampling period of 4 pixels, (e) Contour of modulus of spatial-frequency spectrum of image (d), (f) Dual-magnification reconstructed spectrum, (g) Reconstructed image with obvious reduction of moire artifacts (Fourier interpolation has been applied to (b), (d) to facilitate the comparison)

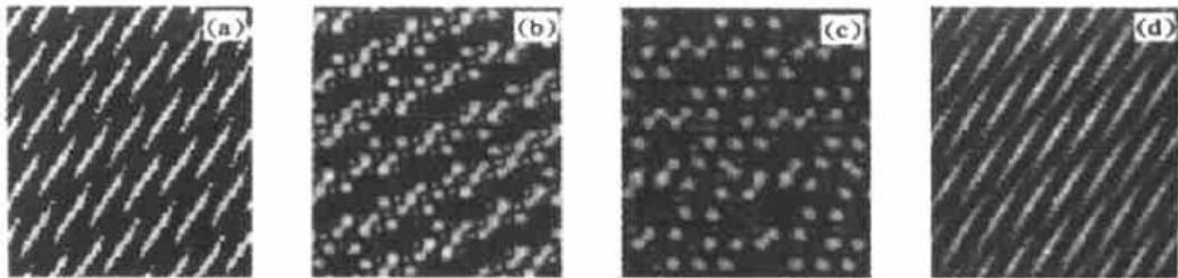


Fig. 3 (a) Periodic target, (b) First sub-sampled image, (c) Second sub-sampled image, (d) Dual-magnification reconstructed image

图2(a)示出一个斜光栅周期目标:该光栅的栅线与y轴方向成30°,占空比为0.25,图像大小为252×252(pixel);图2(b)、图2(d)是其抽样图像,抽样周期(Δx = Δy)分别为3(pixel)和4(pixel)。图2(b)与图2(a)已有很大差异,出现了明显的莫尔夤像;图2(d)的差异更大,完全失去了原目标特征。它们足以显示混淆的危害。图2(c)、图2(e)分别是图2(b)、图2(d)对应的频谱,两者具有相同频率单位(1/X, 1/Y),方框代表奈奎斯特通带区。按第3节所述双倍率法对各频率点进行编号(共轭的谱编同一个号)和求解,得到图2(c)的参量值为: $M_{10} = 0, N_{10} = 0, M_{11} = 0, N_{11} = 0; M_{12} = \pm 1, N_{12} = 0$;图2(d)的参量值为: $M_{20} = 0, N_{20} = 0, M_{21} = 0, N_{21} = 0, M_{22} = \pm 1, N_{22} = \pm 1$ 。从而确定出双倍率重建谱,如

图 2(f) 所示。反傅里叶变换得图 2(g), 莫尔夘像基本消除, 恢复了目标的主要特征。但由于原目标的更高频率成分很弱而未予恢复, 所以图 2(g) 比图 2(a) 稍显得模糊。顺便说明, 图 2(b) 和图 2(d) 实际是包含了各高频混淆成分的, 所以它们显示的信息内容较对应的谱图丰富。

图 3 目标的频谱成分更为复杂。图 3(a) 是原周期目标, 图 3(b)、图 3(c) 是欠抽样图像, 图 3(d) 是双倍率重建图像, 消除了莫尔夘像。图 3 和图 2 的共同特点是: 频谱离散性好, 欠抽样的各号混淆谱互不重叠。理论上, 无论图像复杂与否, 只要满足这个特点, 经过计算机的循环处理, 可逐一解出各号频谱, 从而提高分辨率, 减少莫尔夘像。

图 4 所示是目标为一个等距圆环光栅的例子, 图 4(a)、图 4(c) 为该目标的两个欠抽样图像, 它们混淆严重, 两次抽样频率比值为 1.1, 图 4(b)、图 4(d) 分别为其频谱等高线图(小强度频谱忽略不计)。图 4(f) 是仅用图 4(b)、图 4(d) 的共同频率成分——图 4(e) ($M = N = 0$) 所重建的图像, 效果类似预滤波处理结果^[5]: 混淆已被消除, 但通带之外的成分也同时消失。观察图 4(b)、图 4(d), 频谱在整个区域非连续分布, 但局部呈连续曲线分布, 双倍率法条件不完全满足, 编号困难, 所以这里双倍率法的实施步骤略有不同。具体如下: 首先将图 4(b)、图 4(d) 经周期性铺排扩展成原阵列的 3×3 倍, 再中心对齐并相乘, 得到图 4(g) (注意这 3 个图的坐标比例不同)。因为只有满足(4)式、(5)式时, 频谱的乘积接近原物谱的平方, 否则很小或为零, 所以虽然图 4(g) 不直接等于原物谱, 但能表明频矢位置分布形状。回到图 4(b) 或图 4(d) 铺排后的频谱阵列, 根据图 4(g), 将图 4(b) 或图 4(d) 对等位置的频谱值提取出来, 作反傅里叶变换, 便可得到图 4(h)。从图 4(h) 可见, 莫尔夘像明显减少, 原目标圆环光栅的特征基本显示, 但仍存在少许夘像。这是由于两帧欠抽样的频谱没有完全满足频谱互不交叠的条件。这也证明了该条件对于双倍率法实施的重要性, 当然也限制了其适用范围。

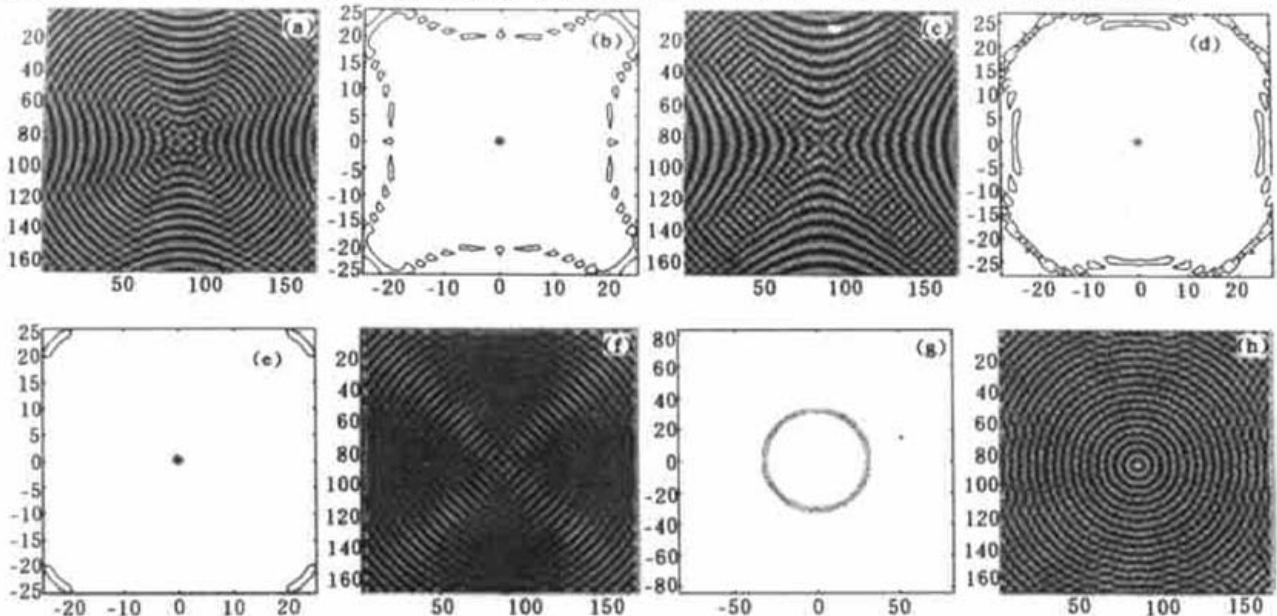


Fig. 4 (a) First sub-sampled image, (b) Contour of modulus of spectrum of image (a), (c) Second sub-sampled image, (d) Contour of modulus of spectrum of image (c), (e) Contour of modulus of common contents of spectrum (b) and (d), (f) Reconstructed image from spectrum (e), (g) Dual-magnification reconstructed spectrum, (h) Reconstructed image with obvious reduction of moiré artifacts (Fourier interpolation has been applied to (a), (c), (f) to facilitate the comparison)

结 论 双倍率法能够有效地减少光电成像系统对周期目标所产生的莫尔厩像, 提高系统等效奈奎斯特带宽, 而且简单可行。

参 考 文 献

- [1] 加斯基尔 J D. 线性光学, 傅里叶变换, 光学. 北京: 人民教育出版社, 1981. 270~ 289
- [2] 张海涛, 赵达尊. 用瞳函数控制减小离散成像系统中的频谱混淆. 光学学报, 1999, **19**(3): 289~ 294
- [3] Friedenber A. Microscan in infrared staring systems. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(6): 1745~ 1749
- [4] 张海涛, 赵达尊. 光电成像系统混淆效应的定量分析. 光学学报, 1999, **19**(12): 1649~ 1654
- [5] Zhang H, Zhang Y, Zhao D. Comparison of microscan model and optical prefiltering model for aliasing artifacts reduction in discrete imaging systems. *Proc. SPIE*, 1998, **3553**: 222~ 230

Dual-Magnification Technique for Reducing Moire Artifacts of Periodic Targets in Opto-Electric Imaging Systems

Zhang Haitao Zhao Dazun

(*Color Science and Engineering Laboratory, Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*)

(Received 8 February 1999; revised 5 July 1999)

Abstract In opto-electric systems, moire artifacts will occur when viewing periodic targets containing spatial frequencies exceeding half of the sampling frequency. The dual-magnification technique which can reduce moire artifacts by using two aliased frames produced in different sampling frequencies is proposed and discussed. Three computer simulation examples for qualitatively verifying the effects of the present moire artifacts reduction technique are presented.

Key words dual-magnification technique, moire artifacts, aliasing, sub-sampling, opto-electric imaging system.