

超分辨重建技术及其研究进展

刘妍妍^{1,2}, 张新¹, 张建萍¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 光学系统先进制造技术
重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:超高分辨成像技术一直是航天、遥感、目标识别等领域的研究热点。随着光学成像到光电数字成像的转变,如何提高 CCD 的几何分辨率,已成为研制高分辨光电成像系统亟待解决的问题。本文从理论和工程实现的角度介绍了超分辨成像的技术原理,分析了实现超分辨重建技术的几种方法,主要描述了微扫描和亚像素两种重建技术的实现方式,指出了目前超分辨技术存在的缺陷。最后,针对超分辨技术中无混淆重建带宽较窄的问题,提出了一种新的技术方案。该方案将光学编码技术与目前的亚像素技术相结合,可将重建带宽拓展 3 倍。研究结论指出:融合了光学,光电子学和信号处理的成像系统的综合设计,将是未来成像领域的一个重要研究方向。

关键词:超分辨重建;频谱混淆;微扫描;亚像素技术;光学编码

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

Super-resolved reconstruction technologies and recent evolution

LIU Yan-Yan^{1,2}, ZHANG Xin¹, ZHANG Jian-ping¹

- (1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: High resolved imaging and super-resolved imaging technologies are the hot topics in the electronic-optical tracking, optical remote sensing and the aerospace industry. With transforming an optical imaging system into an electronic-optical imaging one, how to improve the geometric resolution of CCD has become an important problem to develop the high resolution electronic-optical imaging system. In this paper, several methods to realize high resolved constructions are introduced based on theoretical analysis and engineering practice. Then, two kinds of image construction technologies, micro scanning and sub-pixel, are described, and their shortcomings are discussed in detail. Furthermore, to improve the band width by reconstruction without the spectral alias in super-resolution technologies, a new coding technology combining a optical encoding and the sub-pixel method is proposed. With the method, the bandwidth has been amplified by three times as compared with that of traditional methods. From what has been discussed above, it comes a conclusion that an optical

imaging system combined optical, electronic-optical and signal processing technologies will be an important developing trend. .

Key words: super-resolved reconstruction; spectrum aliasing; microscanning; sub-pixel technology; optical coding

1 引言

实现数字成像系统的超高分辨率是光电探测中重要的研究和探索方向,尤其在航天、遥感、目标识别等领域。经典的超分辨技术主要是提高光学系统相对孔径所限制的衍射极限的空间分辨率的问题。然而,随着光学成像到光电数字成像的转变,融合了光学、光电子学和信号处理的成像系统倍受关注。大多数光电成像系统的整体分辨率主要受制于 CCD,所以如何提高 CCD 的几何分辨率,成为研制高分辨光电成像系统中亟待解决的问题。本文从理论上和工程实现的角度介绍并分析了实现超分辨重建技术的几种方法,最后针对目前超分辨技术中的无混淆重建涉及的带宽较窄问题,提出了一种新的技术方案,该方案将光学编码技术与目前的亚像元技术相结合,可将重建带宽拓展了 3 倍,即空间分解率提高 3 倍。

2 光电成像系统简介

成像系统的分辨率是指图像通过系统后可分辨的最小细节。这里所提到的“系统”,定义为将光学信号转化为探测器输出的电信号的媒介,也

就是光学系统和 CCD,如图 1。那么对于一个理想系统来说,影响系统分辨率的物理因素主要有成像透镜的孔径尺寸和 CCD 阵列的几何参数(单元像素的尺寸和填充因子),它们相应的分辨率也被称为衍射分辨率 δx_{diff} 和几何分辨率 δx_g 。根据瑞利分辨极限可知光学系统的分辨率 $\delta x_{\text{diff}} = 1.22 \frac{\lambda R}{D}$,其中 λ 是输入的光波波长, R 是目标到成像透镜的距离, D 是透镜的光瞳直径;而根据抽样定理可知 CCD 的分辨率为 $\delta x_g = \frac{\Delta x \cdot R}{f'}$,其中 Δx 是像元中感光区的尺寸, f' 是透镜的焦距。这里需要注意的是,由于 CCD 的离散性,所以光学系统可分辨的最小细节需要两个像元才能够分辨。

在被动毫米波系统这样波长较长的成像系统,当 $\delta x_{\text{diff}} > 2\delta x_g$ 时,系统的调制传递函数(MTF)主要受光学系统限制,那么主要任务是提高超过光学截止频率(衍射极限)的分辨率,这种处理技术称为超分辨修复;但大多数情况光学系统的 $\Delta x > 0.61 \frac{\lambda f'}{D}$,即 $\delta x_g > \delta x_{\text{diff}}$,即系统的分辨率严格受控于 CCD。提高 CCD 子系统分辨率的技术被统称为超分辨重建^[1]。本文研究的是后者即超分辨重建。

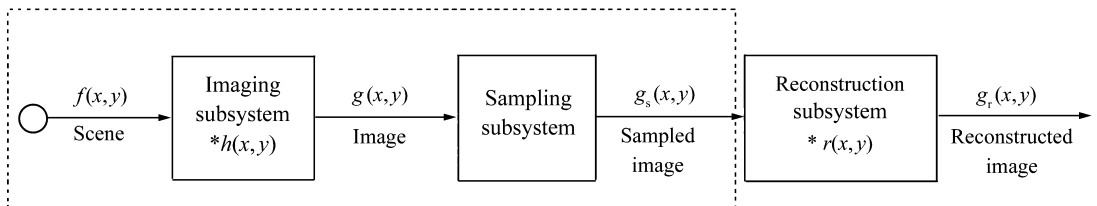


图 1 系统概图

Fig. 1 General system

3 超分辨重建的技术原理

CCD 芯片是由一定数量的单元像素组成的阵列。受 CCD 的工艺水平限制,集成度较低,另外其自身的内部构造也决定了单个像素大。目前的技术(尤其是长波 IR)仅允许阵列中集成有限单元像素,每个单元像素又可分为探测器感光有效区域和非感光区(像素的剩余区域),填充因子(感光探测面积和像素的整个面积比值)远不足 100%。图 2 是一维 CCD 的结构示意图,其中 d 是单元像素的尺寸(由于 CCD 利用单元像素的位置进行采样,所以 d 也是采样间距), p 是探测器尺寸。

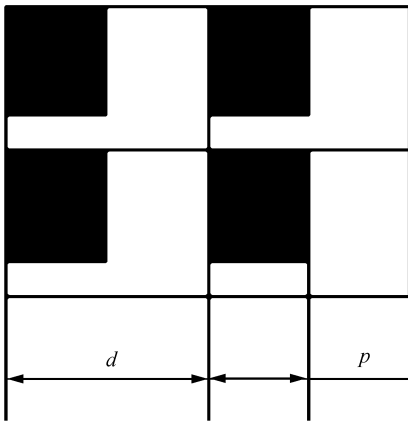


图 2 CCD 示意图
Fig.2 Diagram of CCD

通常用 OTF 来评价连续光学设备的成像质量,它反映物体不同频率成分的传递能力,其中的模量部分是 MTF^[2]。OTF 应用的前提条件是系统满足线性空间不变的特性。本文试图将这一函数的概念由光学系统引入到 CCD 中,但实际上用其评价 CCD 的性能还存在一定的困难,这是因为采样系统具有离散特性,即连续输入离散输出,无法满足空间不变性,即非等晕。有关 CCD 的 MTF 具体理论证明,这里不做赘述,可参见文献[3]。这里直接采用结论展开讨论,(为了简便,以一维

CCD 为例):

$$\begin{aligned} \text{MTF}_{\text{CCD}}(f_{\text{in}}) &= \text{sinc}(d \cdot f_{\text{in}}) \cdot \text{sinc}(p \cdot f_{\text{in}}) = \\ &= \text{sinc}(d \cdot f_{\text{in}}) \cdot \text{sinc}(d \cdot F_{\text{full}} \cdot f_{\text{in}}) = \\ &= \text{sinc}(f_{\text{d}} \cdot f_{\text{in}}) \cdot \text{sinc}(f_{\text{d}} \cdot F_{\text{full}} \cdot f_{\text{in}}), \end{aligned} \quad (1)$$

$$F_{\text{full}} = p/d, \quad (2)$$

式中 f_{in} 为输入的信号频率, d 为像素的尺寸(相邻探测器间的间距), p 为光感尺寸, F_{full} 为填充因子, f_{d} 为采样频率,而 f_{N} 为 Nyquist 频率。

由于填充因子不足 100%,所以相对而言,CCD 由于欠采样引起的低分辨率对整个系统的成像质量影响更大, d 值的大小决定了 MTF 的截止频率,也决定了 CCD 的高频响应情况。图 3 中一维 CCD 的 MTF 模拟图说明了这一点。

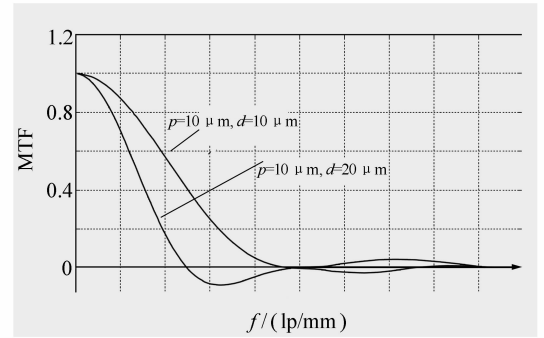


图 3 $p = 10 \mu\text{m}, d = 10 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 的 MTF 曲线
Fig.3 MTF curves when $p = 10 \mu\text{m}, d = 10 \mu\text{m}$ and $d = 20 \mu\text{m}$

采样是所有电子成像系统的本质特性。根据 Whittaker-Shannon 采样定理,如果初始信号的最高频率是 ε ,采样频率 f_s (采样间距的倒数)等于 2ε ,那么就可以理想地重建被数字化的模拟信号,否则高于系统的 Nyquist 频率(采样频率一半)的任何输入信号都将沿其对折混入低频当中,即欠采样的信号在重建后将作为更低的频率出现,混淆后的初始信号将无法被正确恢复。一般情况下输入的自然景物都不是带限函数的,所谓的带限函数是指这类函数的傅里叶变换只在频率空间的有限区域 R 上不为零^[4]。所以对于数字成像系统来说,这种混淆现象是极其普遍的,而且是降低系统空间分辨率的最主要因素。

4 超分辨重建技术

4.1 目前的超分辨重建技术

提高采样频率,即减小采样间距,最直接的方法就是提高 CCD 的集成度和填充因子,这对制作工艺的要求很高,成本很昂贵,实现起来也很困难。目前的超分辨重建技术包括微扫描和亚像元技术两种实现方式。总体说来都是将 CCD 连续采集到的互相错位不足一个像元距离的一序列离散图像,通过之后的数字软件融合技术合成成为一张高分辨率的图像。

4.1.1 微扫描

微扫描可以看作是一个过采样过程,它利用微扫描装置将光学系统所成的图像在 X, Y 方向进行 $1/N(N$ 为整数)像素距的位移,得到 $N \times N$ 帧欠抽样图像,并运用数字图像处理器将经过亚

像素位移得到的多帧图像按照获得图像的方式和顺序进行交叉重建成一帧图像,从而达到最终实现提高分辨率的目的。

国外从 70 年代开始进行微扫描技术的理论研究,到了 90 年代,已经成功地研制成了带有微扫描装置的红外成像系统^[5~10]。在我国,红外成像技术起步较晚,对于微扫描技术的研究目前还处在理论研究、计算机建模和用简单的试验装置来验证微扫描技术的阶段^[11~15]。2002 年,浙江大学计算机软件研究所的首山雄、陈进勇将微扫描用于 CMOS 图像传感器,由于可采用大规模集成电路生产工艺和设备,具有价格低、功耗小及外围电路简单的优点,但目前在信噪比、灵敏度和动态范围等方面还远赶不上 CCD^[16]。

以二级微扫描技术为例,用四幅欠采样子图像合成一幅高分辨率图像,如图 4 所示,最终结果所含的像素增加了 4 倍。由于 CCD 的采样间距

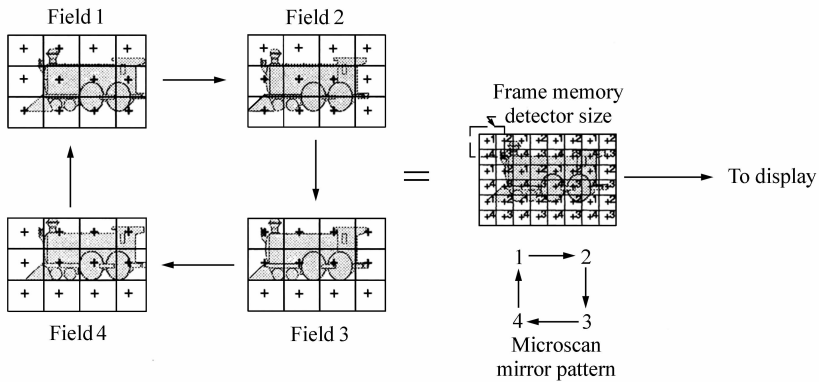


图 4 二级微扫描概念图

Fig. 4 2 × 2 microscanning concept plot

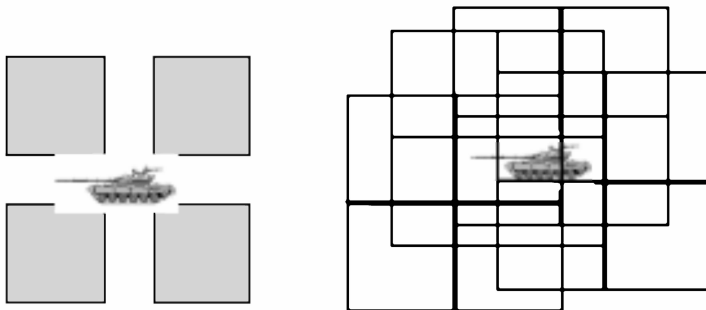


图 5 利用微扫描技术探测小目标

Fig. 5 Illustration of small objective detection with microscanning

过大,很容易使小目标所成的像落入非感光区内,从而无法探测到,而采用微扫描技术就可以大大地减少这种情况的发生几率(图 5)。

但是,微扫描技术的实现,还存在着一定的困难:例如,机械部件的加工,微位移控制,后续算法的实时性。另外,微扫描技术相当于牺牲时间分辨率来提高系统的空间分辨率,所以它对 CCD 的灵敏度要求也非常高。

4.1.2 亚像元拼接技术

目前,由于受工艺制作水平及机械控制精度等条件的限制,在我国多采用亚像元拼接技术来实现超分辨重建。亚像元技术是通过把采样式成像系统常规焦平面上的一排探测器线阵列改成在线阵方向错开 0.5 个像元、在垂直线阵方向上错开 $(n + 0.5)$ 或 n 个像元(n 为正整数)的两排探测器线阵列,在线阵列方向上通过错位、在垂直线阵方向上通过提高或不提高时间采样频率的手段来提高物方空间分辨率的一种方法^[17]。在国外,法国 SPOT-5、德国 BIRD 卫星以及莱卡公司研制的数字航空遥感相机 ADS40 上都采用了相类似的亚像元成像技术;在国内,西安光学精密机械研

究所、总参二部技术局以及苏州大学等研究机构 and 高校在该技术领域也都做过比较深入的探讨和研究^[18-20]。

亚像元拼接技术是提高传输型航天遥感相机地面像元分辨率的一种重要技术。常见的亚像元拼接方式包括机械拼接、光学拼接和视场拼接。

机械拼接是将器件在像平面上直接机械首尾搭接,构成高像素成像面阵。由于器件光敏面以外的边缘和电路引脚影像,用该方法无法实现无缝隙拼接。

光学拼接是目前常用的方法,分为光路分光(图 6(a))和光束分光(图 6(b))两种结构形式。图 6(a)即光路分光,是在视场光阑前通过分光棱镜,产生在机械结构上相互分离而光学像面彼此共轭的若干成像平面,并在各成像平面上精确安装和校准各 CCD/CMOS 的空间位置,实现像面的无缝拼接。图 6(b)是单心球面系统 CCD 拼接,即利用光束分光来实现光学拼接。将景物成像在第一球形的像面上,通过后续转接镜头列阵将光束分光,在第二像面上安置 9 个 CCD 并使之在第九

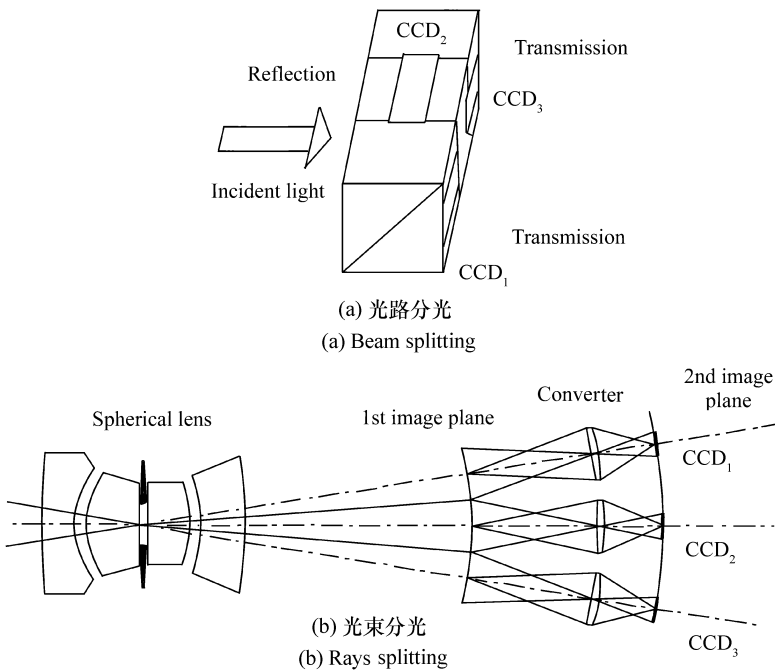


图 6 光学拼接

Fig.6 Optical assembly

一像面上的光学共轭面覆盖整个成像视场。用光学和机械方式完成拼接只是实现大视场高分辨成像的第一步,只有将各 CCD 的坐标系统经过校准、在图像读取处理中实现有机结合,才能输出高分辨的数字图像^[21]。

对于线阵输出推扫型的空间相机,视场拼接是利用电子学对接的方法,在有足够的电子学延迟的条件下,将 CCD 装配成双列交错式焦面的形式,即第二列填充由第一列形成的间隙,首尾的像元分别对齐,但在图像的运动方向上两列错开一定位置(图 7)。它的优点是,由于没有棱镜,所以没有引入附加的色差和照度不均匀等缺陷。

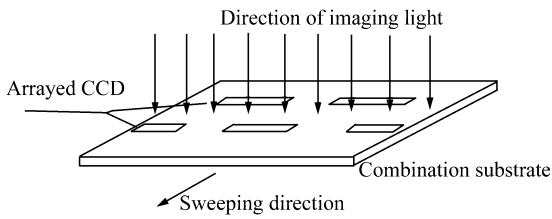


图 7 视场拼接

Fig. 7 Field stitching

4.2 超分辨重建技术存在的缺陷

目前的超分辨重建技术,都是间接地提高系统的采样率,增加最终的采样数,有效地抑制了重建输出的信号失真。但是如果一个系统不能捕获某种信息,那就没有任何处理技术有能力将其准确地恢复重建^[22]。该技术中所有的方法都没有改变 CCD 的硬件,当 CCD 对每幅子图像进行成像采样时,它仍然不满足 Shannon 定理,也就是说采样后低于 Nyquist 频率响应中仍存在着混淆,当利用软件融合成一幅图像时,虽然一定程度上提高了空间分辨率,增加了信息量,但并没有因为提高了采样频率而遏制频率混淆。

5 实现超分辨理想重建的新方法

CCD 采样物理过程的频谱混淆是由于在频域中,相当于将输入的信号频谱乘上一个光栅,其光栅常数为 f_s ,结果是输入信号带宽在采样频率的各个整数倍处进行复制。由于输入的信号带宽较大,所以基频和左右相邻的复制频谱相混淆,如图 8 所示。因此,之后数字处理系统进行重建时,

可有效利用的基频信息已经大大减少。为了解决目前的超分辨重建系统存在的问题,须遏制该过程中欠采样引起的频率混淆。现在采用的新方法是根据 Shannon 提出的优化信息传输的原理,对信号进行适当地编码来抵抗信道内的干扰^[23]。

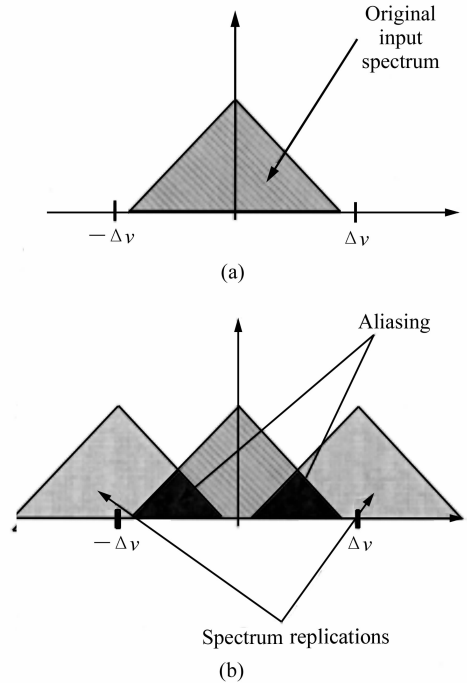


图 8 频谱复制

Fig. 8 Spectrum replications

利用光学编码技术来优化采样系统的方法是在已有亚像元拼接装置的光学系统中插入一块位相编码板,如图 9 所示,根据 CCD 的内部结构在光学系统中对输入图像信息提前编码,致使信息经过 CCD 时,不受其影响而产生混淆,之后经计算机解码重建原图像。本文采用了位相编码板,这是因为其不需调制光强分布。由于采样引起信号基频复制发生在焦平面处,所以也要在焦平面处进行编码。又由于要在信号被 CCD 采样前进行编码,所以为使编码板带宽不受光学系统衍射影响,该编码板安放在光学系统的入射光瞳处。

该编码方法具体如下:利用位相编码板将输入的信号带宽分成几个区域,并且通过该编码板后这几个区域的输出信号两两正交编码。当 CCD 对这些区域的信号进行成像采样时,虽然仍不满足采样定理,但由于高频信息和低频信息都已经乘上了不同的正交码,即使重叠也无法混淆。

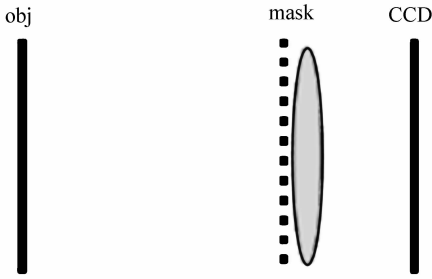


图9 光学装置图
Fig.9 Optical setup

可以表示为:

$$\begin{aligned}
 g_i(v) &= 0 \quad i = -1, 0, 1; \quad \forall v \notin (-3f_N, 3f_N) \\
 g_i(v) \times g_j(v - f_s) &= 0 \quad i \neq j \\
 g_i(v) &\geq 0 \quad \forall v,
 \end{aligned} \tag{3}$$

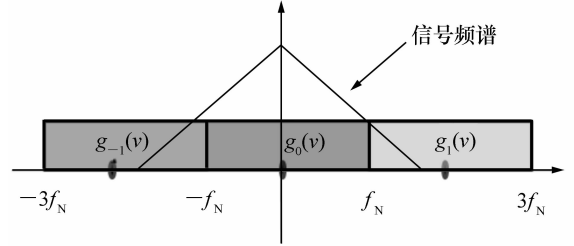
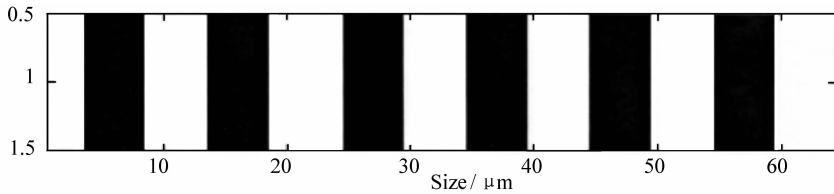


图10 编码示意图
Fig.10 Coding sketch map

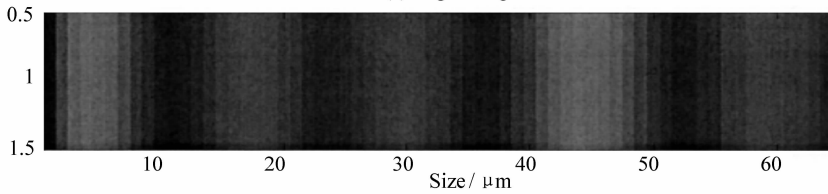
根据采样定理,可以知道 Nyquist 频率(f_N)是一个临界点,高于 f_N 的频率会对折混入低频,所以本文以 f_N 为界,将位相编码板的带宽设计为 $(-nf_N, nf_N)$,此处的正负号仅表示其对称性,不含其它的物理含义。将该频谱分成 n 块两两正交区域,考虑到该编码板的透过率,分的块数 n 值越大,光能透过率就越低,所以这里暂定 $n = 3$,如图10所示。该位相板的带宽为 $(-3f_N, 3f_N)$,然后分成3部分:分别为 $(-3f_N, -f_N)$, $(-f_N, f_N)$, $(f_N, 3f_N)$ 。为了便于理解,该物理过程在数学上

$g(v)$ 要满足公式(3)的条件: $g_i(v)$ 是非负实数;且对于任何不属于 $(-3f_N, 3f_N)$ 范围内的频率,当 $i = 0, \pm 1$ 时,函数 $g(v) = 0$;当 $i \neq j$ 时,函数之间保持正交。

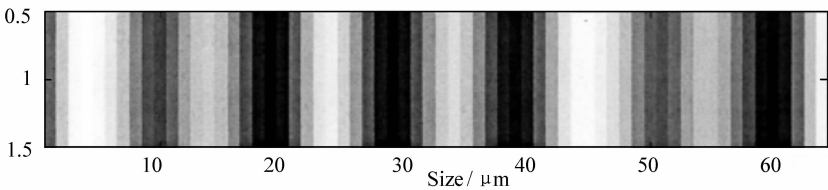
没有采取编码技术的光电成像系统,不考虑其它因素,仅由于欠采样现象,可正确重建的信号频谱带宽减少至不足 f_N ;可是采用光学编码技术



(a) 输入原图
(a)Original input



(b) 没有利用编码技术重建得到的输出
(b)Reconstructed output without coding technology



(c) 利用编码技术重建得到的输出
(c) Reconstructed output with coding technology

图11 模拟图像

Fig.11 Simulation images

后,若采用 $n=3$ 的编码板,至少可将非混淆的输出信号带宽拓宽至 $3f_N$,输入到系统的 $3f_N$ 以内的信号频谱信息都可以通过编码及之后的数字解码技术而完全不丢失。当 CCD 对编码的信号进行采样时,就会大大增加非折叠带宽,减少子图像中的频率混淆。图 11 为该方法的模拟图像,其中(a)为输入的原图像,假设其为黑白条纹;(b)是常规光电系统重建得到的图像,黑白条纹混叠在一起,根本无法识别,但通过位相编码技术和亚像元技术相结合就能使原图像得到基本恢复,如(c)。

6 结束语

要有效地提高整个光电成像系统的空间分辨率,不能仅仅依赖于电子学,也不能将各个子系统分割开进行设计优化。从上述关于微扫描和亚像元技术的分析可以看出,目前已实现的技术方法都存在着一定的局限性和伪分辨性。如果一个成像系统不能捕获某种信息,那就没有任何处理方式能将其修复。目前在成像方向的趋势表明,充分实现各个子系统之间的最优匹配及兼容互补来

获得更高的分辨率及更好的成像质量将是一个重要的研究方向。而本文在最后所提到的光学位相编码和亚像元技术相结合的方法的优势就是融合了光学、光电子学和信号处理的一个综合设计,该方法充分地运用了光电子系统的整体特性来优化成像性能,并且在不减少视场的情况下将中心视场的分辨率提高 3 倍^[25]。

据相关文献报道,目前运用综合设计的成像系统还有:日本的 TOMBO(Thin Observation Module by Bound Optics)设计,该系统利用复眼成像结构使压缩式图像获取系统可利用微透镜阵列结合眼睛系统地得到超薄光学结构,得到的多幅图像经处理再现目标像^[26,27];德国的 MOEMS(Micro-opto-electro-mechanical Multiplexer Systems),利用微棱镜和微光机电系统,可以将分辨率提高 4 倍^[28]。此外,提出的波前编码技术,结合光瞳函数编码理论和数字图像处理技术,进一步形成了扩展系统焦深的两步式成像新思想^[29,30]等等。以上这些技术的成功运用都预示了融合了光学、光电子学和信号处理的成像系统的综合设计,将是未来成像领域的一个重要研究方向。

参考文献:

- [1] HOLST G C. *Electro-Optical Imaging System Performance(Third edition)*[M]. SPIE Optical Engineering Press,2005.
- [2] PARK S K,SCHOWENGERDT R,KACZYNSKI M A. Modulation-transfer-function analysis for sampled image[J]. *Appl. Optics*,1984,23(15):2573-2582.
- [3] ZHANG X,LIU Y Y. Super-resolved imaging system with oversampling theory[A]. *Advanced Optical Manufacturing Technologies[C]*. 3rd International Symposium on Advanced Optical Manufacture and Testing Tech. Chengdu, China: *Proceedings of SPIE*,2007:672214.
- [4] 古德曼. 傅里叶光学导论(第3版)[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics(Third Edition)*[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2006. (in Chinese)
- [5] GILLETTE J C,STADTMILLER T M. Aliasing reduction in staring infrared imagers utilizing sub-pixel techniques[J]. *Opt. Eng.*,1995,34(11):3130-3137.
- [6] FRIDENBERG A. Microscan in infrared staring systems[J]. *Opt. Eng.*,1997,36(7):1745-1749.
- [7] FORTIN J,CHEVRETTE P,PLANTE R. Evaluation of the microscanning process[J]. *SPIE*,1994,2269:271-279.
- [8] FORTIN J,CHEVRETTE P. Realization of a fast microscanning device for infrared focal plane arrays[J]. *SPIE*,1996,2743:185-196.
- [9] MILLER J L,WILTSE Dr. J. Benefits of microscan for staring infrared imagers[C]. *Infrared Imaging Systems:Analysis, Modeling, and Testing*. Bellingham WA,2004:127-138.
- [10] BARNARD K J,WATSON E A,McMANAMON P F. Nonmechanical microscanning using optical space-fed phased arrays[J]. *SPIE*,1994,2224:168-179.
- [11] 李庆辉. 提高红外成像空间分辨率的方法探讨[J]. *航天返回与遥感*,2003,24(2):25-28.

- LI Q H. Study of spatial resolution improving of Infrared imaging system[J]. *Spacecraft Recov. Rem. S.*, 2003, 24(2): 25-28. (in Chinese)
- [12] 张海涛, 赵达尊. 微扫描减少光电成像系统频谱混淆的数学原理及实现[J]. *光学学报*, 1999, 19(9): 1263-1268.
ZHANG H T, ZHAO D Z. Mathematics theory and realization of aliasing reduction in opto-electric imaging system using microscanning[J]. *Acta Opt. Sinia*, 1999, 19(9): 1263-1268. (in Chinese)
- [13] 张毅, 张保民, 陈钱, 等. 微位移法消减空间抽样折叠混淆效应的相位理论分析[J]. *光电子技术*, 2003, 23(1): 229-232.
ZHANG Y, ZHANG B M, CHEN Q, *et al.*. Theoretical analysis of spatial sampling aliasing reduction through micro-shift [J]. *Optoelectronic Technol.*, 2003, 23(1): 229-232. (in Chinese)
- [14] 左月萍, 张建奇. 几种工作模式的微扫描成像系统的理论建模和仿真[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 22(2): 145-148.
ZUO Y P, ZHANG J Q. Model and simulation of microscanning imaging systems in several patterns[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2003, 22(2): 145-148. (in Chinese)
- [15] 王晓蕊, 胡方明, 张建奇, 等. 基于微扫描的焦平面阵列成像特性研究[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 32(3): 392-397.
WANG X R, HU F M, ZHANG J Q, *et al.*. Research on the FPA imaging character based on microscanning[J]. *J. Xidian University*, 2005, 32(3): 392-397. (in Chinese)
- [16] 首山雄, 陈进勇. 微扫描多帧平滑 FPN 提高 CMOS 图像传感器信噪比[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2002, 36(6): 621-624.
SHOU SH X, CHEN J Y. Improvement of the signal to noise ratio of CMOS image sensor by multi-frame-smooth FPN with microscanning[J]. *J. Zhejiang University(Engineering Science)*, 2002, 36(6): 621-624. (in Chinese)
- [17] 周峰, 王世涛, 王怀义. 关于亚像元成像技术几个问题的探讨[J]. *航天返回与遥感*, 2002, 23(4): 28.
ZHOU F, WANG SH T, WANG H Y. Study of several points about subpixel imaging technology[J]. *Spacecraft Recov. Rem. S.*, 2002, 23(4): 28. (in Chinese)
- [18] 车双良, 汶德胜. 亚像元动态成像系统空间分辨率研究[J]. *光子学报*, 2001, 30(11): 1418-1420.
CHE SH L, WEN D SH. The space resolution of dynamic subpixel imaging system[J]. *Acta Opt. Sinia*, 2001, 30(11): 1418-1420. (in Chinese)
- [19] 杨桦, 郭悦, 伏瑞敏. TDICCD 的视场拼接[J]. *光学技术*, 2003, 29(2): 226-228.
YANG H, GUO R, FU R M. Study on field buttining of TDICCD[J]. *Opt. Technique*, 2003, 29(2): 226-228. (in Chinese)
- [20] 刘新平, 王虎, 汶德胜. 亚像元线阵 CCD 焦平面的光学拼接[J]. *光子学报*, 2002, 31(6): 781-784.
LIU X P, WANG H, WEN D SH. Optical focal plane assembly of linear CCD array for subpixel imaging camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(6): 781-784. (in Chinese)
- [21] 徐之海, 冯华君. 超高分辨率光电成像技术的研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(4): 459.
XU ZH H, FENG H J. Overview of research approaches for ultrahigh-resolution optoelectronic imaging[J]. *Infrared Laser Eng.*, 2006, 35(4): 459. (in Chinese)
- [22] MAIT J N, ATHALE R, Van der GRACHT J. Evolutionary paths in imaging and recent trends[J]. *Opt. Express*, 2003, 11(18): 2095.
- [23] 杨振寰, JUTAMULIA S, YIN SH ZH, 等. *光信息技术与应用(第三版)*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
YU T S, JUTAMULIA S, YIN SH ZH. *Introduction to Information Optics(Third edition)*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
- [24] SOLOMON J, ZALEVSKY Z, MENDLOVIC D. Geometric superresolution by code division multiplexing[J]. *Appl. Optics*, 2005, 44(1): 32-40.
- [25] ZALEVSKY Z, ZLOTNIK A. Single snap-shot double field optical zoom[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(24): 9858-9868.
- [26] TANIDA J, KUMAGAI T, YAMADA K, *et al.*. Thin observation module by bound optics(TOMBO): an optoelectronic image capturing system[C]. *Optics in Computing*, 2000: 1030-1036.
- [27] CHOI K, SCHULZ Z J. Signal-processing approaches for image-resolution restoration for TOMBO imagery[J]. *Appl.*

Optics, 2008, 47(10): B104-B116.

- [28] KROGMANN D, THOLL H D. Infrared micro-optics technologies[C]. *Infrared Technology and ApplicationsXXX*. Bellingham WA, 2004: 121-132.
- [29] 杨皓明, 张新, 方志良等. 含三次位相元件照相物镜的设计[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1027-1031.
YANG H M, ZHANG X, FANG ZH L, *et al.*. Design of a photographic objective using cubic phase plate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1027-1031. (in Chinese)
- [30] 雷广智, 张新, 张建萍等. 波前编码系统设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1171-1176.
LEI G ZH, ZHANG X, ZHANG J P, *et al.*. Novel optimization method for wavefront coding system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1171-1176. (in Chinese)

作者简介: 刘妍妍(1982—), 女, 吉林长春人, 汉族, 博士研究生, 主要从事光电成像系统的超分辨重建技术方面的研究。

张新, 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事常规和非常规红外成像系统设计方面的研究。

E-mail: optlab@ciomp.ac.cn.

《光学精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备); 微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械); 信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址: 长春市东南湖大路 3888 号

邮编: 130033

电话: 0431-86176855

传真: 0431-84613409

电邮: gxjmg@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价: 50.00/册