

双线阵 CCD 错位采样高分辨成像

徐少雄^{1,2} 陈长征¹ 孙 斌¹ 张星祥¹ 任建岳¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了克服遥感相机分辨力受电荷耦合器件(CCD)像元尺寸的限制,利用系统超过奈奎斯特频率地物信息的成像能力,研制了在线阵方向和推扫方向同时错位半个像元的双线阵 CCD 相机高分辨成像系统,给出了该系统提高分辨力的原理。高分辨模式下,为避免均值法插值造成的拉链效应,提出了一种基于综合梯度因子判断插值方向的单向插值法;超分辨模式下,利用现场可编程阵列(FPGA)片上随机存取存储器(RAM)对图像进行交错重组实时输出高分辨率图像。利用 Wiener 滤波的方法对高分辨率图像进行复原,使两种成像模式输出图像的灰度平均梯度(GMG)分别提升 62.5%和 78.3%。实验表明,所提出插值算法使图像边缘清晰完整,插值效果优于均值法,且易于硬件实现;两种成像模式均可降低图像频率混叠现象,分别提高 1.16 倍和 1.6 倍系统分辨力,错位采样技术实现了系统高频信息成像能力的有效利用及高分辨成像。

关键词 成像系统;高分辨;亚像元;线阵 CCD;图像复原

中图分类号 TN386.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0908002

High-Resolution Imaging by Bi-Linear CCD Shifting Sampling

Xu Shaoxiong^{1,2} Chen Changzheng¹ Sun Bin¹ Zhang Xingxiang¹ Ren Jianyue¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The resolution of remote sensing camera is restricted by the charge coupled device (CCD) pixel size. To solve the problem, imaging capability of optical system in frequency bandwidth exceeding Nyquist frequency is used to develop a camera which consists of two linear CCDs. These two CCDs are stitched together with a half-pixel width displacement in both directions along and perpendicular to the CCD axis. The principle of improving the resolution of the proposed system is presented. In hipermode, one way interpolation algorithm based on integrated gradients to determine the direction of interpolation is proposed to avoid zipper effect caused by average method. In supermode, high resolution image is acquired in real time by using random access memory (RAM) blocks inside field programmable gate array (FPGA) to regroup image stagger. Gray mean gradients (GMG) of the two high resolution images are increased by factors of 62.5% and 78.3% respectively after using Wiener filter. Results show that the proposed algorithm can make image edge clear and intact. The effect of the algorithm is better than average method and the hardware implementation is easy. The resolution is 1.16 and 1.6 times greater than that of conventional system. Two imaging method can also reduce the image frequency aliasing. Sampling phase staggered technology can take advantage of imaging capability of optical system in high-frequency bandwidth and perform high-resolution imaging.

Key words imaging systems; high-resolution; sub-pixel; linear CCD; deconvolution

OCIS codes 110.4155; 120.0280; 040.1520; 100.6640

收稿日期: 2015-03-11; 收到修改稿日期: 2015-04-16

基金项目: 国家 863 计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 徐少雄(1987—)男,博士研究生,主要从事光学成像方面的研究。E-mail: hitxsx@163.com

导师简介: 任建岳(1952—)男,研究员,博士生导师,主要从事光学传感器的研制和性能评价方面的研究。

E-mail: renjy@sohu.com

1 引 言

遥感相机的地面像元分辨率(GSD)由焦距、物距和成像器件像元尺寸三个成像参数决定。传统遥感相机为单电荷耦合器件(CCD)成像系统,未能有效地利用其对奈奎斯特频率(f_n)至截止频率(f_c)地物信息的成像能力^[1]。如何在成像参数固定的情况下,提高遥感相机成像分辨率及成像质量,是当今较为热门的研究课题之一^[2-9]。

目前提高成像分辨率的方法主要有增加 CCD 个数法^[3-6]、CCD 像元排列重组法^[7-8]及 CCD 像元形状重设法^[9]。2002 年发射的 SPOT5 地球观测卫星首次通过在焦平面上集成第二个线阵 CCD 的方法,使等效地面像元分辨率从单个 CCD 成像的 5 m 提高至 3 m^[4]。中国科学院西安光学精密机械研究所使用棱镜分光法,分别研制了多面阵 CCD 拼接相机及双线阵 CCD 拼接相机,提高了系统分辨率^[5-6]。德国 BIRD 卫星的 HSRS 传感器及 Leica 公司的 ADS40 相机使用 CCD 像元排列重组法实现了图像分辨率的提高^[7-8]。通过重新设计 CCD 像元形状并设计特殊算法也可以提高图像分辨率^[9]。CCD 像元排列重组法及形状重设法需要研制特定排列或者特定形状的 CCD,结构复杂,制作困难,研制周期长。

CCD 的拼接主要有棱镜分光法及焦平面集成法,其中 CCD 种类可分为面阵 CCD 及线阵 CCD,前者不适用于遥感相机推扫成像模式^[10]。若采用焦平面集成拼接的方法,要求光学系统在推扫方向上的视场至少增加一倍,这增加了微重力环境下遥感相机,特别是大口径、大视场遥感相机光学系统及镜面的设计、支撑及控制难度,棱镜分光法则不需要增加额外的视场要求。

文献[6]研制了基于棱镜分光的双线阵 CCD 拼接成像系统,只通过两个线阵 CCD 在线阵方向上错位半个像元的拼接方法实现了高分辨率成像。在此基础上,本文分析了 CCD 错位采样技术原理,提出了可以实现错位拼接高分辨率成像的途径,并以此研制了在线阵方向和推扫方向上均错位半个像元的焦平面系统。这种成像系统的研制尚未有相关报道。系统通过可直接移植至航天相机的高分辨模式或分辨本领更高的超分辨模式实现高分辨率成像。利用图像复原的方法对输出的高分辨率图像进行复原(反卷积),得到清晰的高分辨率图像。同时,利用客观评价参数对比分析了两种成像模式下图像复原的效果及系统成像分辨率的提升。

2 线阵 CCD 错位采样成像原理

CCD 成像过程是一个离散采样过程,设 CCD 像元中用于成像的面积为 $a \times b$,像元间距为 P ,如图 1(a)所示,其采样过程表示为

$$f'(x, y) = t \int_{a/2+x}^{a/2+x} \int_{-b/2+y}^{b/2+y} f(x', y') * h'(x', y') dx' dy', \quad (1)$$

式中 t 为 CCD 像元积分时间, $f(x', y')$ 为物平面, $h'(x', y')$ 为光学系统的(PSF)点扩散函数, $*$ 表示卷积,则被积函数 $f(x, y) * h(x, y)$ 为光学系统所成的像。两个 CCD 间的 a, b 相同。点 (x, y) 为像面上的像元采样中心,如图 1(b)的 A' 和 B' 点所示。所有像元采样中心所组成的网格称为采样网格。

设 CCD2 相对于 CCD1 的错位参数为 (m, n) , 其中只需要考察 $0 \leq m \leq P/2, 0 \leq n \leq P/2$ 的情况。CCD1 和 CCD2 输出的第 q 行图像可表示为

$$I_1(q, k) = \langle f_1'(qP, 0), \dots, f_1'(qP, kP), \dots, f_1'(qP, cP) \rangle, \quad (2)$$

$$I_2(m, n, q, k) = \langle f_2'(m + qP, n), \dots, f_2'(m + qP, kP + n), \dots, f_2'(m + qP, cP + n) \rangle, \quad (3)$$

式中 k 为 CCD 像元序列号, $c+1$ 为 CCD 像元总数。定义 I_1 和 I_2 的非相关性程度函数为

$$g(m, n) = \sum_{k=0}^c |I_1(k) - I_2(m, n, k)|. \quad (4)$$

当 $g(m, n)$ 不为零时,均可通过 I_1 和 I_2 的数据处理以提高系统分辨率。 $g(m, n)$ 越大,说明 I_1 和 I_2 的相关性越小,则系统获得额外的像面信息越多,越容易实现系统的高分辨率成像。因此,CCD2 最佳的错位参数 (m, n) 可表示为

$$(m, n) = \arg \max [g(m, n)]. \quad (5)$$

可以看出,当 $m=0$ 且 $n=0$ 时, I_1 和 I_2 相同, $g(m, n)=0$ 达到最小值。因为 $f(x', y')$ 和 $h'(x', y')$ 的变化, (5) 式不

存在唯一解。然而, (m,n) 离 $(0,0)$ 点越远时,两个 CCD 像元对应的采样像面不相关的概率越大, $g(m,n)$ 获得最大值的概率越大。双线阵 CCD 错位采样成像系统的采样网格设置为正方形时, I_1 和 I_2 的数据不需处理,即可成为高分辨率图像的数据。这种情况下,错位参数为 $g(m,n)=(P/2,0)$ 或 $g(m,n)=(P/2,P/2)$,后者离 $(0,0)$ 更远,为本文选择的错位参数。 $g(m,n)=(0,P/2)$ 与推扫方向相冲突而不能采用。当采用3个线阵 CCD 成像时, CCD2 相对于 CCD1 的错位参数可以选择 $g(m,n)=(P/3,P/3)$, CCD3 错位参数类似^[2]。值得注意的是,当(1)式中两个 CCD 的 a 和 b 值不同时, $g(m,n) \neq 0$,也可达到高分辨成像的目的。

传统单线阵 CCD 推扫成像模式下,像元的积分时间设为 t 。则双线阵 CCD 错位成像系统中, CCD 像元的积分时间为 t 的成像模式称为高分辨模式,积分时间为 $t/2$ 则称为超分辨模式,图 1(c)和图 1(d)分别为这两种成像模式下, CCD 像元采样中心所组成的采样网格。其中图 1(c)中正方形点的像元值需要通过插值求出。可以看出,两个 CCD 在线阵方向上重叠导致采样网格在推扫方向上不存在错位而不能采用高分辨模式进行成像,再一次说明 $(m,n)=(P/2,P/2)$ 的优势。

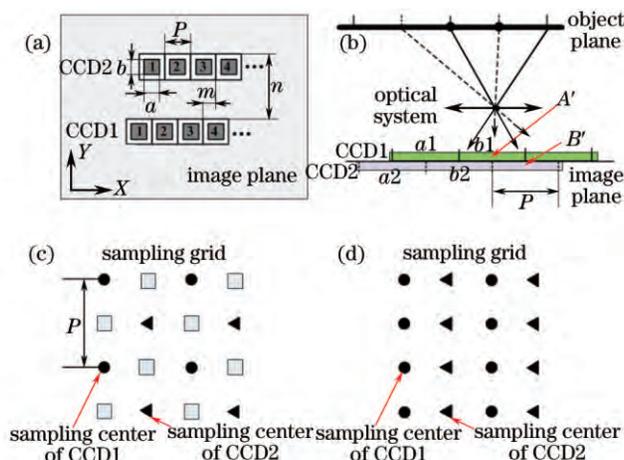


图 1 双线阵 CCD 错位成像原理。(a) 双 CCD 拼接示意图; (b) CCD 推扫成像原理; (c) 高分辨模式采样网格; (d) 超分辨模式的采样网格

Fig.1 Double linear CCD staggered imaging principle. (a) Schematic of stitching of bi-linear CCD;

(b) CCD pushbroom imaging principle; (c) sampling grid of hipermode; (d) sampling grid of supermode

由(1)式可知,光学系统是一个低通滤波器,光学成像相机能通过 CCD 对像面进行采样,输出清晰图像的一个必要前提是物平面 f_n 频率的信息能通过光学系统这个低通滤波器。CCD 采样的 f_n 为 $1/2P$,非相干衍射受限光学系统的 f_c 为 $1/\lambda F^\#$,其中 λ 为光学系统成像波长, $F^\#$ 为光学系统的 F 数^[11]。因此在采样网格空间频率加倍的超分辨模式下,光学系统的 f_c 需大于 f_n 的 2 倍,可表示为

$$\frac{2P}{\lambda F^\#} > 2. \tag{6}$$

实验采用 SONY 的 ILX751B 线阵 CCD,其像元尺寸为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$,个数为 2048。光学成像镜头 $F^\#$ 为 4,实验采用可见光成像, λ 取最大的 780 nm。将数据代入(6)式,左边的结果为 8.97,说明对于最大波长的可见光,实验系统仍然满足超分辨模式的成像条件,相应的也能满足要求较低的高分辨模式成像条件^[11]。

3 CCD 错位拼接成像系统

3.1 相机框架设计

CCD 错位成像系统如图 2(a)所示,成像光线通过半反半透棱镜后,同时成像在相机后方的 CCD1 和相机上方的 CCD2。图 2(a)中圆圈标出的是调整 CCD 的螺钉,一个 CCD 座上一共有 6 个调整螺钉,可调节 CCD 三个空间自由度: X 、 Y 方向位移及 γ 转角。

3.2 CCD 错位拼接

CCD 的错位拼接在图 2(b)和图 2(c)中的 CCD 拼接仪上实现。拼接仪包括一个可提供照明的显微镜,一个调节显微镜位置的传动架和一个可调节相机位置的调整台。通过观察显微镜上 CCD 的位置,多次调整图 2(a)

中圆圈标出的螺钉,使两个 CCD 在线阵方向上错位 $7\ \mu\text{m}$,在推扫方向上错位 $7\ \mu\text{m}$ 。调整后,使用显微镜多次测量后取平均值的方法,得出像元在线阵方向的位置误差为 $0.74\ \mu\text{m}$,在推扫方向的误差为 $0.87\ \mu\text{m}$,低于 $0.1P$,满足拼接要求^[4,6]。两个 CCD 在光轴方向的位置差为 $11.2\ \mu\text{m}$,而系统的焦深为 $40.5\ \mu\text{m}$,满足焦深要求^[6]。

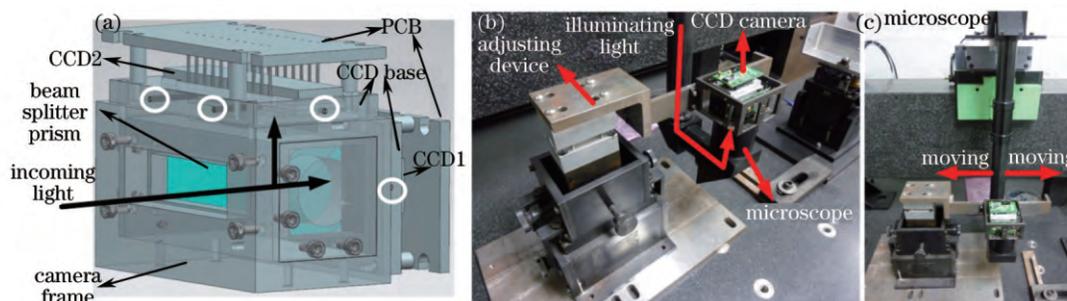


图2 CCD 错位成像系统设计。(a) CCD 错位成像系统相机框架;(b)、(c) CCD 拼接仪

Fig.2 Design of CCD staggered imaging system. (a) Camera framework of CCD staggered imaging system; (b)、(c) CCD arraying table

3.3 电路系统设计

CCD 拼接后的相机如图 3(a)所示,成像测试转台系统如图 3(b)所示,成像测试转台转动分辨率为 $9.58 \times 10^{-5}\ \text{rad}$,满足转速控制及成像要求。

超分辨模式成像输出图像,通过图 1(d)网格进行拼接即可得到高分辨率图像,因此,在现场可编程阵列(FPGA)里设计 4 个双口随机存取存储器(RAM)(RAM0~RAM3):RAM0 和 RAM1 分别以频率 f 存储 CCD1 和 CCD2 输出的第 i 行图像。当第 i 行图像存满时,以 $2f$ 的频率分别从 RAM0 和 RAM1 的低地址位向高地址位交替输出第 i 行图像,同时在 RAM2 和 RAM3 上分别开始存储 CCD1 和 CCD2 输出的第 $i+1$ 行图像。当第 $i+1$ 行图像存满时,RAM0 和 RAM1 正好读出完毕,继而开始存储第 $i+2$ 行图像,同时以 $2f$ 的频率从 RAM2 和 RAM3 输出第 $i+1$ 行图像。依此方法,以延时一行图像输出的时间,实时输出高分辨率图像。

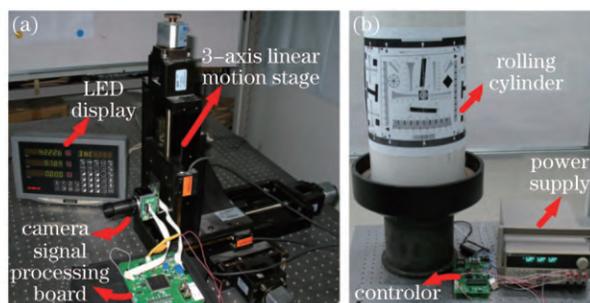


图3 CCD 相机及成像系统。(a) 相机系统;(b) 成像测试转台

Fig.3 CCD camera and imaging system. (a) Camera system; (b) imaging test turntable

3.4 成像条件

使用 ISO12233 标准分辨率测试卡及自制的分辨率测试卡进行成像,前者用于测量系统点扩展函数(PSF),后者条纹边缘更清晰,用于测试系统分辨力,分别如图 4(a)、图 4(b)所示。

图 4(b)包含 9 组条纹,每组条纹包含横竖两个方向的条纹。通过测量多条条纹宽度取平均值的方法,测

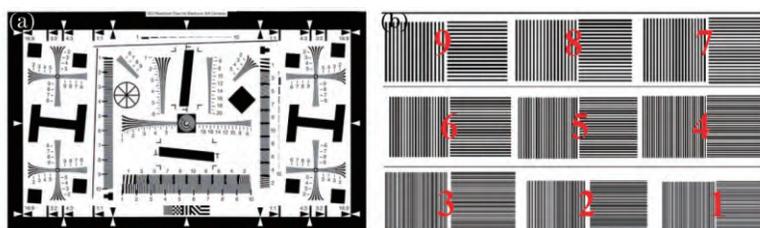


图4 分辨率测试卡。(a) ISO12233 标准分辨率测试卡;(b) 自制分辨率测试卡

Fig.4 Resolution test chart. (a) ISO12233 resolution chart; (b) self-designed resolution chart

得9组条纹的宽度 w 约为 $(0.277n + 0.831)$ mm, 其中 n 为条纹序号。第1~4组条纹空间频率分别是第5组条纹频率的2倍、1.6倍、1.33倍和1.14倍。

4 图像重建与复原

4.1 图像重建

按照图1(c)中的采样网格形式,使用高分辨模式输出的数据重建高分辨图像 $F(i,j)$,其中正方形网格点需要通过插值得出。表现优秀的插值算法可使插值后的图像边缘完整清晰,容易分辨,较差的算法则会导致图像分辨困难,甚至出现误分辨^[12]。设点 (m,n) 为所需要插值的像元坐标,则其水平梯度因子 D_h 及垂直梯度因子 D_v 可表示为

$$\begin{cases} D_h(m,n) = |F(m,n+1) - F(m,n-1)| \\ D_v(m,n) = |F(m+1,n) - F(m-1,n)| \end{cases} \quad (7)$$

式中 D_h 和 D_v 的值越大,则表示图像相应方向的边缘越陡峭,与待插值点的相关性越小。只通过 D_h 和 D_v 判断图像边缘方向的准确率并不高,因此可通过插值点周围 3×3 窗口内水平和垂直方向上的梯度因子,求出新的综合梯度因子 ω_h 和 ω_v ,

$$\begin{cases} \omega_h = \sum_{(k,l) \in \Psi} D_h(k,l) \\ \omega_v = \sum_{(k,l) \in \Psi} D_v(k,l) \end{cases} \quad (8)$$

式中 Ψ 为点集 $\{(m \pm 1, n \pm 1) \cup (m, n)\}$ 。图像边缘方向和梯度小的方向是一致的,若采用复杂的算法,如B样条算法,则可以使边缘更平滑,但是其算法复杂,不易于硬件实现,对于条纹分辨不具有决定意义。考虑到算法应易于硬件实现,只采用边缘方向的两个相邻值的均值作为点 (m,n) 上的估计。因此 $F(m,n)$ 的估计值可表示为

$$\begin{cases} F(m,n) = [F(m,n+1) + F(m,n-1)]/2, & \omega_h \leq \omega_v \\ F(m,n) = [F(m+1,n) + F(m-1,n)]/2, & \omega_h > \omega_v \end{cases} \quad (9)$$

综合梯度因子对图像边缘方向的判断具有较高的准确性,利用边缘方向的像元值进行插值(单向插值法),图像边缘清晰完整,更易于观察。双线性插值、在水平及垂直方向使用B样条插值再取均值等方法可归结为均值法。均值法会在图像的边缘引入与边缘无关的像元值,导致图像边缘出现拉链效应现象以及不完整的边缘,本文算法避免了这种现象。

超分辨模式成像中,每个CCD输出的数据量是高分辨模式的两倍,不需要插值,按照图1(d)的采样网格拼接即可得到高分辨率图像。

4.2 图像复原

推扫型相机从光学系统成像、采样,到最终输出 $f'(x,y)$ 是一个复杂的降晰过程,可认为是物平面 $f(x,y)$ 依次与上述过程的PSF卷积后再与噪声 $\sigma(x,y)$ 相加的结果,

$$f'(x,y) = f(x,y) * h'(x,y) * h'_1(x,y) * h'_2(x,y) + \sigma(x,y) = f(x,y) * h(x,y) + \sigma(x,y), \quad (10)$$

式中 $h'(x,y)$ 与(1)式一致,为光学系统PSF, $h'_1(x,y)$ 为像元采样的PSF, $h'_2(x,y)$ 为系统与物面相对运动的PSF, $h(x,y)$ 为系统总体的PSF。通过对(10)式傅里叶变换,有:

$$F'(u,v) = F(u,v)H(u,v) + N(u,v), \quad (11)$$

式中 $H(u,v)$ 、 $F'(u,v)$ 和 $N(u,v)$ 分别是 $h(x,y)$ 、 $f'(x,y)$ 和 $\sigma(x,y)$ 的傅里叶变换。 $h(x,y)$ 和 $\sigma(x,y)$ 可视为时不变,即成像过程可视为广义平稳过程,可选择Wiener滤波的方法对 $f'(x,y)$ 进行估计,即图像复原。复原需要从图像中估计成像系统的PSF和图像信噪比 $1/r$, 设降晰前图像的估计为 $\hat{f}(x,y)$ ^[13], 则

$$\hat{f}(x,y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{H^*(u,v)F'(u,v)}{|H(u,v)|^2 + r} \right\}, \quad (12)$$

式中 $H^*(u,v)$ 是 $H(u,v)$ 的复共轭, \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶反变换。

采用(12)式对图像进行复原的前提是PSF和 r 的准确估计。PSF的估计算法有刃边法^[14-15]、MBD法^[16]等,

本文采用文献[15]所述的方法估计PSF。卢惠民等^[17]提出的先利用三维块匹配(BM3D)算法对图像去噪,再估计图像信噪比的方法可较为准确的估计出图像的信噪比,因此使用这种方法估计图像的参数 r 。

5 实验结果分析与讨论

考虑到条纹的一般性,将图4(b)的分辨力测试卡倾斜一个任意角度后贴在成像测试转台上,图4(a)则不需要倾斜。高分辨模式输出图像,通过图1(c)的采样网格拼接并采用(7)~(9)式进行插值得到高分辨率图像。超分辨模式可直接输出高分辨率图像,如图5所示。

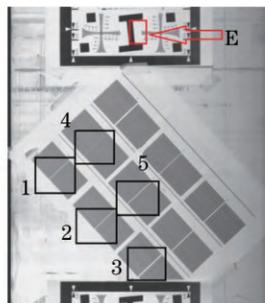


图5 超分辨模式下输出的高分辨图像

Fig.5 High resolution image acquired from supermode

通过图5中方框E内的刃边图像,高分辨模式和超分辨模式分别以4.2节描述的方法估计各自的PSF及 r ,并分别采用(12)式对相应图像进行复原,结果如图6所示。图6中第1行为传统CCD推扫成像输出的图像(放大两倍)。图6中,列编号对应的条纹和图4(b)、图5中相应编号的条纹一致。

图6中第2行子图像比第4行子图像更明亮,说明了高分辨模式拥有对较暗物面更强的成像能力,而且高分辨模式成像模式与航天相机推扫成像模式一致,其技术可直接移植。因此,通过实验和算法验证,其借鉴意义更大,优于文献[6]的拼接方法。从图6中第3行及第5行子图像可以看出,复原后图像的对比度增加,图像清晰度上升。拉普拉斯能量(LE)和灰度平均梯度(GMG)是评价图像清晰度较为客观的参数^[16,18],值越大说明图像清晰度越高。表1给出了复原前后,图像的LE值、GMG值和 $1/r$ 值。

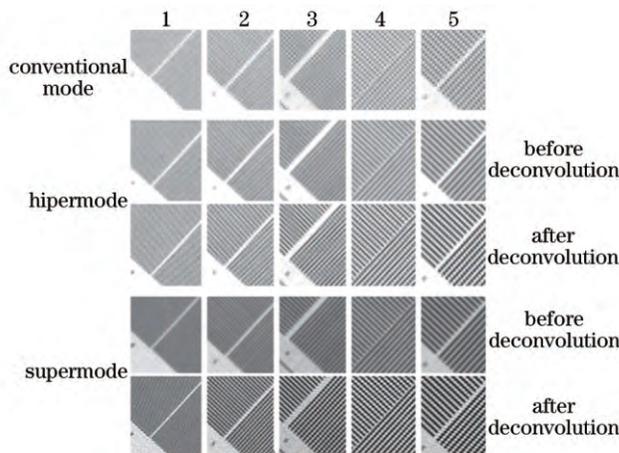


图6 实验成像的子图像

Fig.6 Subimages of experimental imaging

表1 图像复原前后的LE、GMG和 $1/r$ 对比

Table 1 LE, GMG and $1/r$ comparison before and after image restoration

	Hipermode		Supermode	
	before restor	after restor	before restor	after restor
LE	0.1341	0.2416	0.1711	0.3316
GMG	16.314	26.517	20.832	37.151
$1/r$	102.35	69.122	101.63	66.571

图像复原使高分辨模式和超分辨模式输出图像的LE值分别提升了80.1%和93.8%,GMG值分别提升了62.5%和78.3%,信噪比 $1/r$ 分别下降了32.5%和34.5%。原因在于图像复原算法在放大信号的同时,也放大了噪声。图像复原使图像条纹的清晰度上升,更容易观察,而原来无法分辨的条纹,经图像复原后,依然是无法分辨的。

传统成像模式下,超过CCD像元对应空间频率的条纹,只靠单个CCD成像是无法分辨的,如图6中第1行子图像所示。高分辨模式可分辨出第4组条纹,提高了1.16倍系统分辨力,第2组及第3组条纹中某些位置可分辨,某些位置不可分辨。通过多次成像及观测发现,这些位置是不确定的,说明系统概率性分辨更高频率条纹,且分辨概率和条纹频率成反比。超分辨模式使系统清晰分辨出第2组条纹,提高了1.6倍系统分辨力,稍优于文献[6]的成像效果(1.5~1.6倍)。CCD错位成像方法,减小了图像因为CCD像元采样造成的频率混叠现象,图像质量提升效果明显。

6 结 论

通过分析CCD错位采样的原理,研制了一套基于双线阵CCD拼接的成像系统,该系统通过两个线阵CCD在线阵和推扫方向上同时错位半个像元的成像方法,实现高分辨模式和超分辨模式两种成像模式的高分辨成像,使用Wiener滤波提升高分辨率图像的对比度。实验结果表明,高分辨模式对暗物体成像能力更强,在图像边缘完整性及清晰度上,所提出的图像插值算法优于均值插值法,易于硬件实现,成像模式可提高1.16倍系统分辨力;通过FPGA片上RAM的设计,可实现超分辨模式高分辨率图像的实时输出,成像模式可提高1.6倍系统分辨力。两种成像模式均可减小图像频率混叠现象,提高系统成像质量,使图像边缘更清晰,条纹更容易分辨。CCD错位拼接成像方法使光学系统对高于奈奎斯特频率物面信息的成像能力得到有效利用,对在遥感相机上实现多CCD错位拼接高分辨成像技术具有重要的借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 Zhou Feng, Wang Shitao, Wang Huaiyi. Study of several points about subpixel imaging technology[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, 23(4): 26-33.
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): 26-33.
- 2 Qian Yixian, Hong Xueting, Jin Weimen. Motion measurement of dual-CCD imaging system based on optical correlator[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0708002.
钱义先,洪雪婷,金伟民. 光学相关的双CCD成像系统图像运动位移测量[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0708002.
- 3 Yang Wenbo, Zhu Ming, Liu Zhiming, *et al.*. Super-resolution reconstruction of sub-pixel imaging achieved by three linear array detectors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2247-2258.
杨文波,朱 明,刘志明,等. 基于3线阵探测器的亚像元成像超分辨率重构[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2247-2258.
- 4 Latry C, Rouge B. SPOT5 THR mode[C]. *SPIE*, 1998, 3439: 480-491.
- 5 Liu X P, Gao Z, Deng N. Novel imaging system with superresolution[C]. *SPIE*, 1998, 3005: 102-107.
- 6 Wen D S, Liu X P, Qiao W, *et al.*. Novel subpixel imaging system with linear CCD sensors[C]. *SPIE*, 2001, 4563: 116-122.
- 7 Tempelmann U, Börner A, Chaplin B, *et al.*. Photogrammetric software for the LH Systems ADS40 airborne digital sensor[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(B2; PART 2): 552-559.
- 8 Skrbek W, Lorenz E. HRSR: An infrared sensor for hot spot detection[C]. *SPIE*, 1998, 3437: 167-175.
- 9 Liu Yanyan, Zhang Xin, Xu Zhengping, *et al.*. Application of special-shape-pixel detectors in super resolution reconstruction[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 971-976.
刘妍妍,张 新,徐正平,等. 赋形像元探测器在超分辨重建中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 971-976.
- 10 Zhang X X, Ren J Y. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane for space camera[C]. *Proc SPIE*, 2005, 6024: 60241R.
- 11 Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics*[M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- 12 Yang Xuqiang, Liu Hongchen, Feng Yong, *et al.*. Research on subpixel dynamic imaging technique based on B_spline curve[J]. *Optical Technique*, 2006, 31(5): 691-694.
杨旭强,刘洪臣,冯 勇,等. 基于B样条插值算法的亚像元技术的研究[J]. *光学技术*, 2006, 31(5): 691-694.

- 13 Zou Mouyan. Deconvolution and Signal Recovery[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
邹谋炎. 反卷积与信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- 14 Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun, *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2891-2897.
李铁成, 陶小平, 冯华君, 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2891-2897.
- 15 Hwang H, Choi Y W, Kwak S, *et al.*. MTF assessment of high resolution satellite images using ISO 12233 slanted-edge method[C]. Proc SPIE, 2008, 7109: 710905.
- 16 Guo Lingling, Wu Zepeng, Zhang Liguu, *et al.*. Multichannel blind deconvolution-based on-orbit estimation of point spread function for space optical remote sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0428001.
郭玲玲, 吴泽鹏, 张立国, 等. 基于多通道盲反卷积的空间光学遥感器在轨点扩展函数估算[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0428001.
- 17 Lu Huimin, Xu Ming, Li Xun. Image deblurring with adaptive signal-noise ratio estimation computational image system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0810002.
卢惠民, 徐 明, 李 迅. 用于计算成像系统的基于信噪比自适应估计的图像去模糊研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0810002.
- 18 Gutman I. The energy of a graph: Old and new results[J]. Algebraic Combinatorics and Applications, 2011: 196-211.

栏目编辑: 苏 岑