

星载线阵电荷耦合器件错位成像的调制传递函数评估

李亚鹏^{1,2} 何斌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 为了定量研究线阵电荷耦合器件(CCD)错位成像技术的不同错位模式的调制传递函数(MTF),提出了基于MTF的评估方法,避免了以往方法表征图像质量不全面等缺点。推导了线阵CCD错位成像模式的MTF。分析表明,相比于线阵CCD的传统成像模式,利用多个线阵CCD实现错位1/2、1/3、1/4个CCD像元的错位成像模式的极限分辨率分别提高了86.2%、88.78%、89.54%,归一化空间频率0.5处MTF值分别提高了0.1679(41.43%)、0.2026(49.99%)、0.2151(53.07%),空间频率范围(0,0.5)内调制传递函数面积(MTFA)分别提高了10.09%、12.08%、12.77%。在Matlab平台上进行了仿真实验,并用灰度平均梯度和拉普拉斯能量从客观上评估了几种错位成像模式的图像质量,实验结果验证了MTF定量分析的有效性。提出的方法为后期星载遥感相机错位成像系统的设计提供了参考。

关键词 成像系统;遥感;线阵电荷耦合器件错位成像;调制传递函数;极限分辨率;灰度平均梯度;拉普拉斯能量
中图分类号 TN386.5 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.121102

Modulation Transfer Function Assessment of Spaceborne Linear Charge-Coupled Device Subpixel Imaging

Li Yapeng^{1,2} He Bin¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to evaluate the modulation transfer function (MTF) of different subpixel imaging modes of spaceborne linear charge-coupled device (CCD), a quantitative assessment method based on MTF which can better characterize image quality is proposed. The MTF of subpixel imaging modes of linear CCD is derived. Compared with conventional imaging mode by a single linear CCD, analysis shows that, theoretical limiting resolution values of 1/2, 1/3, 1/4 CCD-pixels staggered subpixel imaging modes by simultaneously using multiple uniform linear CCDs are improved by 86.2%, 88.78%, 89.54%, respectively, MTF values at normalized spatial frequency of 0.5 are increased by 0.1679 (41.43%), 0.2026 (49.99%), 0.2151 (53.07%) respectively, and modulation transfer function areas (MTFAs) in the normalized spatial frequency range of (0, 0.5) are enhanced by 10.09%, 12.08%, 12.77%, respectively. Simulation experiment on Matlab platform is performed. Gray mean gradient (GMG) and energy of Laplacian (EOL) are utilized to evaluate the image quality performance of three subpixel imaging modes objectively and the results demonstrate the validity of this method. The proposed method has some reference value to the design of linear CCD subpixel imaging system in remote sensing.

Key words imaging systems; remote sensing; linear charge-coupled device subpixel imaging; modulation transfer function; limiting resolution; gray mean gradient; energy of Laplacian

OCIS codes 110.4100; 110.4155; 120.0280; 040.1250; 100.6640

收稿日期: 2013-08-27; 收到修改稿日期: 2013-09-02; 网络出版日期: 2013-11-15

基金项目: 国家 863 计划(86325113B)

作者简介: 李亚鹏(1987—),男,博士研究生,主要从事 CCD 高分辨率成像技术方面的研究。E-mail: liyp1123@163.com

导师简介: 何斌(1961—),男,博士,研究员,主要从事空间遥感图像处理方面的研究。E-mail: hbemail@163.com

1 引言

线阵电荷耦合器件(CCD)是光学遥感成像系统的核心器件,具有集成度高、分辨率高、光电灵敏度高以及动态范围大等特点,已被广泛应用于遥感成像领域,在资源普查、地形测绘和军事侦察等领域发挥着至关重要的作用^[1-3]。随着遥感应用对高分辨率的迫切需求^[4],如何提高遥感相机的空间分辨率成为近年来的研究热点。由遥感 CCD 相机成像原理可知,提高其空间分辨率的最直接措施是增大光学系统焦距、减小 CCD 像元尺寸,但增大光学系统焦距会造成光学系统设计难度加大,且相机的体积、质量、成本大大增加,而由于信噪比、灵敏度和制造工艺等因素的限制,CCD 像元尺寸也不能无限地减小^[5-6]。尤其在红外探测方面,由于红外谱段的特殊性质及红外谱段感光材料的限制,相比于可见光 CCD,红外 CCD 的像元尺寸一般较大,像元间距也大,在相同光学系统下,红外谱段图像的分辨率较低,采用传统方式提高红外相机空间分辨率,将造成空间相机体积、质量成倍增长,光机结构难以实现,对卫星装载平台要求更苛刻。

线阵 CCD 错位成像技术在不改变 CCD 像元尺寸和光学系统焦距的前提下,提高遥感相机的空间分辨率,在具有相同或接近的空间分辨率的情况下,能减小遥感相机光学系统的焦距,从而降低空间相机的体积、质量和成本,有利于实现遥感器的轻量化^[7-12]。线阵 CCD 错位成像的实现方法主要有棱镜分光法、集成芯片和视场拼接法^[9]。法国 2002 年发射的 SPOT5 卫星、德国 BIRD 卫星上的红外遥感器 HSRs 以及莱卡公司数字航空遥感相机 ADS40 上都使用了线阵 CCD 错位成像技术,提高了图像分辨率^[7-9]。理论上,线阵 CCD 错位成像存在多种错位模式,定量研究线阵 CCD 不同错位成像模式相对于传统 CCD 成像模式图像质量的提高,对工程应用具有重要的指导意义。在国内,针对线阵 CCD 错位成像技术的图像质量已有很多研究成果^[10-12],前人分别从地面像元分辨率(GSD)和峰值信噪比(PSNR)的角度分析了线阵 CCD 错位成像图像质量的提高。然而,线阵 CCD 错位成像技术像元的采样区域存在重叠,直接用 GSD 提高倍数无法准确衡量图像质量的提高,PSNR 高也并不一定意味着图像质量好,采用单一数值表征图像质量并不全面^[6]。

针对这些问题,本文提出从调制传递函数(MTF)的角度来定量分析线阵 CCD 不同错位成像模式图像质量的提高。MTF 反映了光电成像系统对不同空间频率目标的调制传递特性,是评价光学相机成像质量的重要指标,可以客观、全面地描述系统分辨能力^[6,13-14]。推导了线阵 CCD 错位成像模式的 MTF,应用极限分辨率、归一化空间频率 0.5 处的 MTF 值和调制传递函数面积(MTFA)定量评估了线阵 CCD 几种错位成像模式图像质量的提高。在 Matlab 平台上进行了仿真实验,并用灰度平均梯度和拉普拉斯能量从客观上评估了仿真结果。

2 理论分析

2.1 线阵 CCD 错位成像技术

线阵 CCD 由一排离散的 CCD 像元组成。常见的 CCD 像元形状为方形,如图 1 所示。CCD 像元光敏区域大小为 $d \times d$,像元大小为 $p \times p$,像元间距为 p 。

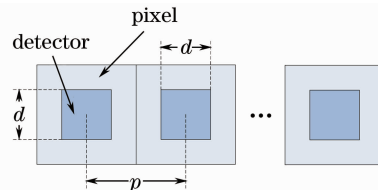


图 1 线阵 CCD 的像元示意图

Fig. 1 Sketch map of pixel of linear CCD

传统的线阵 CCD 成像模式是仅使用单排线阵 CCD 成像。而线阵 CCD 错位成像技术,如图 2 所示,是使用一定的方式将 n 排($n \geq 2$)相同的线阵 CCD 在线阵方向相互错开 p/n 的距离,在垂直线阵方向错开 $m \times p$ 的距离($m \geq 2$),沿推扫方向采样频率为普通成像模式的 n 倍,对同一视场同时成像,然后将 n 排线阵 CCD 采样得到的图像按照相互错位关系进行融合、重建,得到最终的图像。

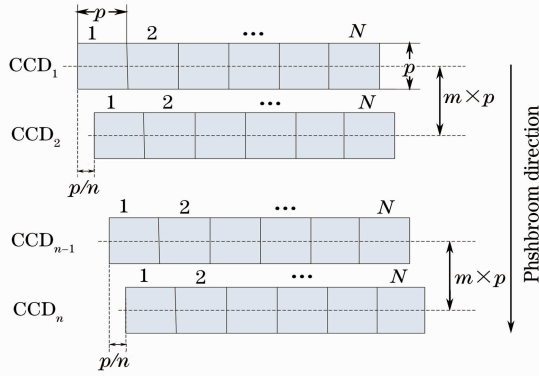


图2 线阵 CCD 错位成像示意图

Fig. 2 Subpixel imaging of linear CCDs

线阵 CCD 成像系统是探测器受限系统^[6], CCD 的采样频率是限制成像系统空间分辨率的决定因素。线阵 CCD 错位成像技术本质上是增加了采样点个数、减小了采样间隔, 即采样频率有所提高。由采样定理, 通过线阵 CCD 错位成像技术来提高空间分辨率是合理的, 尽管 CCD 像元采样有重叠区域, 也能一定程度上降低混叠、提高图像质量。

2.2 线阵 CCD 阵列 MTF

采样是光电成像系统固有的过程。线阵 CCD 成像包括两个过程, 一是 CCD 像元光敏区域积分成像过程, 二是线阵 CCD 阵列以像元中心间距为采样间隔的离散采样过程。CCD 像元光敏区域积分成像过程的 MTF 仅由其光敏区域的形状、尺寸决定, 如图 1 所示, 沿线阵方向, CCD 像元的响应 $g(x)$ 可以用景物光亮度 $f(x)$ 与矩形函数的卷积来描述:

$$g(x) = \int_{-d/2}^{d/2} f(x) dx = f(x) * \text{rect}(x/d), \quad (1)$$

式中 d 为像元光敏区域的宽度, $*$ 表示卷积运算。CCD 像元光敏区域积分成像过程的脉冲响应函数是矩形函数:

$$h_{\text{det}}(x) = \text{rect}(x/d). \quad (2)$$

作傅里叶变换可得 CCD 像元积分成像过程的传递函数:

$$F_{\text{MT-det}}(f) = |\text{sinc}(fd)| = \left| \frac{\sin(\pi fd)}{\pi fd} \right|, \quad (3)$$

式中 f 为沿线阵方向的空间频率。

如图 1 所示, 当 CCD 像元光敏区域大小 d 保持不变, 但 CCD 像元中心间距 p 发生变化时, (3) 式所描述的 MTF 保持不变。所以, 仅由 (3) 式描述 CCD 阵列的 MTF 是不完整的。实际上, CCD 阵列的 MTF 还与其离散采样过程有关, (3) 式并没有考虑到像元中心间距对 CCD 阵列 MTF 的影响。

CCD 阵列以像元中心间距为采样间隔的离散采样过程, 不仅与采样频率有关, 还与输入景物信号和 CCD 阵列相对位置有关。在景物与 CCD 阵列的相对位置是随机、等概率分布的合理假设条件下, 采样过程的平均脉冲响应也是一个矩形函数^[15], 矩形函数的宽度为采样间隔。考虑沿线阵方向:

$$h_{\text{sa}}(x) = \text{rect}(x/x_{\text{sa}}), \quad (4)$$

式中 x_{sa} 为采样间隔, 作傅里叶变换可得 CCD 阵列采样过程的传递函数:

$$F_{\text{MT-sa}}(f) = |\text{sinc}(fx_{\text{sa}})|. \quad (5)$$

线阵 CCD 阵列的 MTF 是像元光敏区域积分成像和 CCD 阵列离散采样共同作用的结果。线阵 CCD 阵列 MTF 等于像元光敏区域积分成像过程的 MTF 与 CCD 阵列离散采样过程的 MTF 的乘积:

$$F_{\text{MT}} = F_{\text{MT-det}} \times F_{\text{MT-sa}}. \quad (6)$$

将 (3) 式和 (5) 式代入 (6) 式, 可得线阵 CCD 沿线阵方向的 MTF:

$$F_{\text{MT}}(f) = |\text{sinc}(fd)\text{sinc}(fx_{\text{sa}})|. \quad (7)$$

3 基于 MTF 的线阵 CCD 错位成像的图像质量评估

3.1 线阵 CCD 错位成像的 MTF

本文仅考虑线阵 CCD 沿线阵方向的 MTF。对于线阵 CCD 传统成像模式,如图 1 所示,其 CCD 像元光敏区域宽度为 d ,采样间隔为 p ,由(7)式可得,单排线阵 CCD 传统成像模式的 MTF 为

$$F_{MT}(f) = |\text{sinc}(fd)\text{sinc}(fp)|. \quad (8)$$

对于 n 排($n \geq 2$)线阵 CCD 错位成像,由于使用的是同样的线阵 CCD,故其 CCD 像元光敏区域宽度不变,而采样间隔变为 p/n 。由(7)式可得 n 排线阵 CCD 错位成像模式的 MTF 为

$$F_{MT}^{(n)}(f) = |\text{sinc}(fd)\text{sinc}(fp/n)|. \quad (9)$$

$n=1$ 时,(9)式表示的就是单排线阵 CCD 的 MTF。 $n \geq 2$ 时,(9)式表示 n 排线阵 CCD 相互错位 p/n 成像模式的 MTF。

在实际工程应用中,使用 n 排线阵 CCD 错位成像技术,推扫方向采样频率增加,会造成积分时间减小、系统信噪比下降; n 越大,对错位精度要求越高,数据量也会成倍增长,对于较大的 n ,系统复杂,难以实现。因此,本文仅研究 $n=1 \sim 4$ 的情况。

将目标图像噪声、大气、光学系统、像移、电子学系统等其他因素对线阵 CCD 成像系统总 MTF 的影响归一化为 1,且假设线阵 CCD 错位成像模式使用的多个线阵 CCD 的性能参数是完全相同的,即仅考虑线阵 CCD 阵列 MTF。本文考虑如图 1 所示的方形像元的填充因子为 1 的情况,即 $d=p$,所以(9)式变为

$$F_{MT}^{(n)}(f) = |\text{sinc}(fd)\text{sinc}(fd/n)|. \quad (10)$$

由(10)式可知,不管 n 为何值,当 $f=1/d$ 时,MTF 都将出现第一个零点。为方便分析,将空间频率 $f=1/d$ 归一化为 1。用 Matlab 画出 $n=1 \sim 4$ 时的 MTF 曲线,如图 3 所示,其横坐标为归一化空间频率。

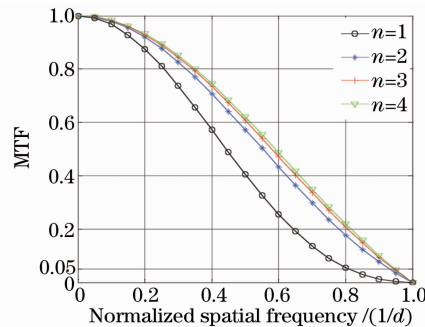


图 3 线阵 CCD 错位成像的 MTF

Fig. 3 MTF of subpixel imaging of linear CCDs

3.2 线阵 CCD 错位成像 MTF 的定量分析

由奈奎斯特定理,线阵 CCD 能够分辨的最高空间频率等于其空间采样频率的一半,即奈奎斯特频率。但对于高分辨率相机,其调制传递函数在高空间频率处的值要大于相应的人眼能够识别的最低对比度才有意义。如图 4 所示,人眼能分辨的最低对比度随着空间频率的增大而增大,是空间频率的函数,MTF 曲线和人眼能分辨的最低对比度函数曲线 $CTF_{eye}(F_{CT-eye})$ 的交汇点所对应的空间频率, f_{res} ,称为极限分辨率^[6]。

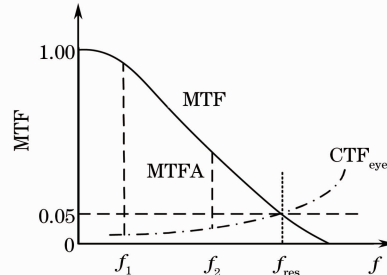


图 4 极限分辨率和 MTFA 的定义

Fig. 4 Definition of limiting resolution and MTFA

MTF 能够评估感兴趣空间频率范围 (f_1, f_2) 内的成像质量,如图 4 所示,空间频率范围 (f_1, f_2) 内 MTF 曲线和 CTF_{eye} 曲线围成的面积,称为调制传递函数面积 (MTFA),其定义为

$$A_{\text{MTF}} = \int_{f_1}^{f_2} [F_{\text{MT}}^{(n)}(f) - F_{\text{CT-eye}}(f)] df. \quad (11)$$

为计算方便,取恒定值 0.05 为人眼能分辨的最低对比度。

利用调制传递函数曲线可方便地求出系统的分辨率。线阵 CCD 各成像模式,其沿线阵方向的采样间隔为 d/n ,奈奎斯特频率为采样频率的一半,即 $f_{\text{Nyquist}} = n/2d$ 。当 $n=1$ 时,即线阵 CCD 传统成像模式的 $f_{\text{Nyquist}} = 1/2d$,由图 3 可知,对应归一化频率 0.5 处的 MTF 值为 0.4053,大于人眼能分辨的最低对比度,所以线阵 CCD 传统成像模式的分辨率为 0.5。当 $n \geq 2$ 时,其 f_{Nyquist} 均大于或等于 MTF 曲线的第一个零点,人眼已经不能分辨,用如图 4 所示的极限分辨率的定义,计算可得 $n=2 \sim 4$ 时系统的极限分辨率。另外,计算了线阵 CCD 四种成像模式在空间频率 0.5 处的 MTF 值以及空间频率范围 (0, 0.5) 内的 MTFA,结果见表 1。

表 1 线阵 CCD 四种成像模式比较

Table 1 Comparison of four imaging modes of linear CCD

Imaging mode	Limiting resolution	MTF at 0.5	MTFA in (0, 0.5)
$n=1$	0.5	0.4053	0.3618
$n=2$	0.9310	0.5732	0.3983
$n=3$	0.9439	0.6079	0.4055
$n=4$	0.9477	0.6204	0.4080

由表 1 可知,相比于单个线阵 CCD 传统成像模式 ($n=1$),线阵 CCD 错位成像模式 ($n=2 \sim 4$) 的极限分辨率、空间频率 0.5 处的 MTF 值以及 (0, 0.5) 内的 MTFA 均不断提高。表 2 列出了线阵 CCD 三种错位成像模式相对于传统成像模式各评价参数提高的百分比。为更直观地表示,图 5 画出了各错位成像模式提高的百分比。

表 2 三种错位成像模式相对于 $n=1$ 的提高百分比

Table 2 Percentage of improvement of three subpixel imaging modes compared with $n=1$

Imaging mode	Improvement in limiting resolution /%	Improvement in MTF at 0.5 /%	MTFA in (0, 0.5) /%
$n=2$	86.2	41.43	10.09
$n=3$	88.78	49.99	12.08
$n=4$	89.54	53.07	12.77

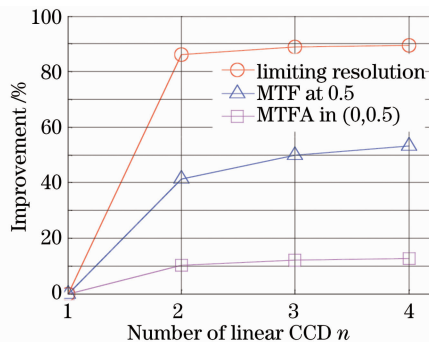


图 5 $n=2, 3, 4$ 模式提高的百分比

Fig. 5 Percentage of improvement for $n=2, 3, 4$

线阵 CCD 错位成像模式能提高系统的极限分辨率和 MTFA,从而提高图像质量。由图 5 可知,随着 n 的增加,图像质量不断提高,但由 $n=1$ 到 $n=2$,即由单排线阵 CCD 传统成像模式到两排线阵 CCD 错位 $1/2$ 像元的错位成像模式,图像质量提高幅度最大, $n \geq 2$ 后,虽然图像质量不断提高,但提高量明显减小。

4 实验结果及分析

为了验证提出的 MTF 分析方法的有效性,在 Matlab 软件上进行了仿真模拟实验。用现有图像来模拟光学成像系统的输出,要求输入图像的分辨率至少是光学成像系统输出图像分辨率的 4 倍,且输入图像要有很高的信噪比^[16]。选取 ISO12233 标准分辨率测试卡子图像为原始高分辨率图像,如图 6(a)所示,其分辨率为 $1536 \text{ pixel} \times 1536 \text{ pixel}$ 。由 CCD 成像原理,CCD 像元的输出与对应的景物像素灰度值成正比,本文用原始高分辨率图像 $12 \text{ pixel} \times 12 \text{ pixel}$ 的平均值来模拟一个 CCD 像元的输出,采样间隔为 12 pixel ,即模拟了填充因子为 1 的 CCD 成像过程,且假设线阵 CCD 推扫方向的采样频率与线阵方向的采样频率相同。图 6(b)为 $n=1$ 即单个线阵 CCD 传统成像模式的成像结果,其大小为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 。对于 $n=2$ 的线阵 CCD 错位成像模式,错位 $1/2$ 像元的距离,即错位 6 pixel ,对原始高分辨率图像错位采样,得到 2 幅 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 图像分别来模拟两个错位的线阵 CCD 成像,然后按照相互之间的错位关系对 2 幅图像交织重组,得到最终的图像,如图 6(c)所示,其大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。用同样的方法可得 $n=3, 4$ 的线阵 CCD 错位成像模式的图像,分别如图 6(d)和(e)所示,大小分别为 $384 \text{ pixel} \times 384 \text{ pixel}$, $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。为方便比较,图 6(b)~(d)用双线性插值放大到 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 显示,且将方框内图像细节放大显示。

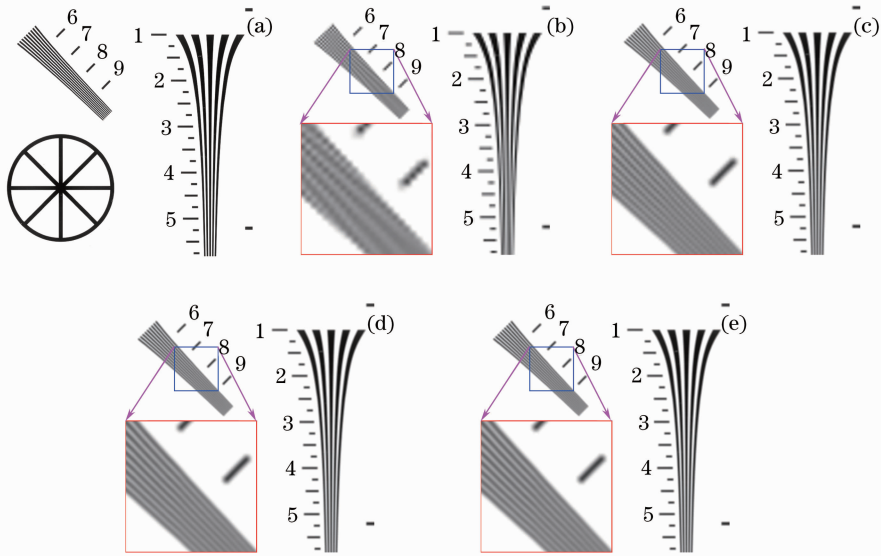


图 6 实验仿真图像。(a) 原始高分辨率图像;(b) $n=1$ 时得到的最终图像;(c) $n=2$ 时得到的最终图像;
(d) $n=3$ 时得到的最终图像;(e) $n=4$ 时得到的最终图像

Fig. 6 Simulation images. (a) Original high resolution image; (b) imaging result for $n=1$; (c) imaging result for $n=2$;
(d) imaging result for $n=3$; (e) imaging result for $n=4$

由图 6 的仿真图像,从主观上可以看出, $n=2 \sim 4$ 时均好于 $n=1$ 时的图像质量,能分辨的空间频率越来越大,图像质量逐渐提高。且由 $n=1$ 到 $n=2$ 图像质量提高幅度最大, $n \geq 2$ 的图像质量改善幅度则降低。灰度平均梯度^[17] (GMG)和拉普拉斯能量^[18] (EOL)是客观的无参考图像评价函数,其值越大表示图像层次越多、图像越清晰,图像质量就越好。计算图 6(b)~(e)的 GMG 和 EOL,结果见表 3。计算图 6(c)~(e)相对于图 6(b)GMG 和 EOL 的提高百分比,结果见表 4。为更直观地显示,图 7 画出了各模式错位成像的提高百分比。

表 3 图 6(b)~(e)的 GMG 和 EOL

Table 3 GMG and EOL of Figs. 6(b)~(e)

Parameter	Fig. 6(b)	Fig. 6(c)	Fig. 6(d)	Fig. 6(e)
GMG	5.1054	5.8209	6.0360	6.1030
EOL	0.0443	0.0906	0.1024	0.1154

表4 图6(c)~(e)相对于图6(b)提高的百分比

Table 4 Percentage of improvement of Figs. 6(c)~(e) compared with Fig. 6 (b)

Parameter	Improvement of Fig. 6(c) /%	Improvement of Fig. 6(d) /%	Improvement of Fig. 6(e) /%
GMG	14.01	18.23	19.54
EOL	104.8	131.2	160.4

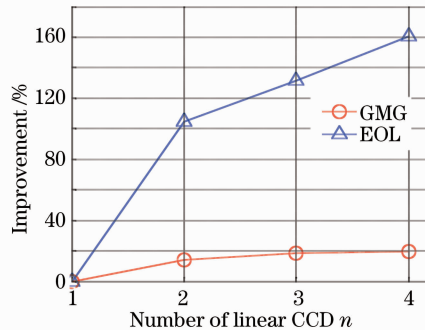


图7 图6(c)~(e)相对于图6(b)提高的百分比

Fig. 7 Percentage of improvement amount of Figs. 6(c)~(e) compared with Fig. 6(b)

图7客观地表明了线阵CCD错位成像能提高图像质量,且随着 n 的增加,图像质量不断提升,但由 $n=1$ 到 $n=2$ 图像质量的提高量最大,最明显,与基于MTF的分析结果相吻合。

5 结 论

推导了线阵CCD不同错位成像模式的MTF。从MTF的角度出发,定量评估了线阵CCD错位成像模式的图像质量。研究表明:相对于单个线阵CCD传统成像模式,错位 $1/2, 1/3, 1/4$ 个CCD像元的线阵CCD错位成像模式的极限分辨率分别提高86.2%、88.78%、89.54%,归一化空间频率0.5处的MTF值分别提高了41.43%、49.99%、53.07%,空间频率范围(0, 0.5)内的MTFA分别提高了10.09%、12.08%、12.77%;从单排线阵CCD传统成像模式到两排线阵CCD错位 $1/2$ 像元错位成像模式,提高幅度最大,之后再增加错位成像使用的线阵CCD的个数、减小错位距离,提高幅度变小。利用Matlab进行了仿真实验,采用无参考图像质量评价函数GMG和EOL客观地评价了各线阵CCD成像模式的图像质量,与MTF分析结果吻合,验证了MTF分析方法的有效性。综合考虑光学遥感成像系统的图像质量、数据量、信噪比及系统复杂度等因素,由两排线阵CCD错位 $1/2$ 像元的错位成像模式性价比最高。提出的分析方法为星载线阵CCD错位成像系统的设计提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Wang Shengchun, Huang Yaping, Luo Siwei, *et al.*. Design of high-resolution imaging system based on doglegged sampling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0911003.
王胜春, 黄雅平, 罗四维, 等. 基于折线采样的高分辨率成像系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0911003.
- 2 Xu Wenhai, Wu Houde. Design of ultra-high resolution CCD imaging systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1603-1610.
许文海, 吴厚德. 超高分辨率CCD成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1603-1610.
- 3 Lü Hengyi, Liu Yang, Guo Yongfei. Computation of overlapping pixels of mechanical assembly CCD focal planes in remote sensing cameras[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(5): 1041-1047.
吕恒毅, 刘杨, 郭永飞. 遥感相机焦面CCD机械拼接中重叠像元数的确定[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1041-1047.
- 4 Lu Zhenhua, Guo Yongfei, Li Yunfei, *et al.*. Realization of auto-focus on APRC using CCD stitching[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1559-1565.
卢振华, 郭永飞, 李云飞, 等. 利用CCD拼接实现推扫式遥感相机的自动调焦[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1559-1565.
- 5 S C Park, M K Park, M G Kang, *et al.*. Super-resolution image reconstruction: a technical overview[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2003, 20(30): 21-36.

- 6 G C Holst, T S Lomheim. CMOS/CCD Sensors and Camera Systems[M]. Bellingham; SPIE Press, 2007. 305—337.
- 7 C Latry, B Rouge. In flight commissioning of SPOT5 THR quincunx sampling mode[C]. SPIE, 2003, 4881: 189—199.
- 8 W Skrbek, E Lorenz. HSRS; an infrared sensor for hot-spot-detection[C]. SPIE, 1998, 3437: 167—199.
- 9 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.
- 10 Wang Ling, Zhang Ping, Feng HuaJun, *et al.*. An inversion analysis method based on multi-shift imaging for improvement of CCD imaging resolution[J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(3): 62—65.
王 凌, 张 平, 冯华君, 等. 用多次移位成像提高 CCD 成像分辨力的反演解析法[J]. 光电工程, 2003, 30(3): 62—65.
- 11 Zhuo Ning, Sun Huayan, Zhang Haijiang. A new approach for improvement of CCD imaging resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 777—780.
卓 宁, 孙华燕, 张海江. 一种新的提高 CCD 成像分辨率的方法[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 777—780.
- 12 Zhao Xiuying, Wang Hongyu, Cong Fuzhong. Sub-pixel geometry image super-resolution algorithm[J]. Optical Technique, 2010, 36(5): 795—798.
赵秀影, 王洪玉, 丛福仲. 亚像元几何图像成像与超分辨恢复算法[J]. 光学技术, 2010, 36(5): 795—798.
- 13 Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong, *et al.*. On-orbit MTF measurement of high resolution satellite optical camera using periodic targets[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0711001.
徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于周期靶标的高分辨率光学卫星相机在轨 MTF 检测方法[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0711001.
- 14 Yang Yongming, Li Qingjun, Li Wenming, *et al.*. Modulation transfer function for color area CCD based on Bayer filtering [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1611—1618.
杨永明, 李清军, 李文明, 等. 基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 调制传递函数[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1611—1618.
- 15 O Hadar, A Dogariu, G D Boreman. Angular dependence of sampling modulation transfer function[J]. Appl Opt, 1997, 36(28): 7210—7216.
- 16 Robert D Fiete. Modeling the Imaging Chain of Digital Cameras[M]. Bellingham; SPIE Press, 2010. 189—203.
- 17 Li Yongle, Wang Wei, Lou Jingtao, *et al.*. Defocus deblurring for catadioptric omnidirectional imaging based on coded aperture[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0511004.
李永乐, 王 炜, 娄静涛, 等. 基于编码孔径的折反射全向成像去散焦模糊技术[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0511004.
- 18 W Huang, Z Jing. Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion[J]. Pattern Recognition Lett, 2007, 28(4): 493—500.