遥感图像分辨率提升与数据处理

刘秀[1*], 刘咏[2**], 张翠[1], 金伟其[3]

[1]北京空间机电研究所, 北京 100094;

[2]中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001;

[3]北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 光电成像系统通常为典型的光学-离散采样成像系统,可通过增加成像系统物镜的焦距,增加探测器阵列的规模,减小探测器单元的几何尺寸并提高探测器的占空比等技术途径来提高系统的分辨能力。在现有的探测器和光学系统下,有效的图像数据处理可提高成像系统的分辨率。主要介绍了近年来备受国内外关注的基于离散面阵 CCD/CMOS 探测器的亚像元成像技术以及超分辨率图像处理技术。

关键词 图像处理; 数据处理; 超分辨率; 亚像元成像

中图分类号 V19; TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP56.081002

Resolution Improvement and Data Processing of Remote Sensing Images

Liu Xiu[1*], Liu Yong[2**], Zhang Cui[1], Jin Weiqi[3]

[1] *Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing* 100094, *China*;

[2] *Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng, Jilin* 137001, *China*;

[3] *School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*

Abstract An electro-optical imaging system is a typical optical-discrete sampling system. Usually, the spatial resolution of the electro-optical imaging system can be improved by means of the technical routes such as the increase of objective lens focal length, the increase of detector array consumption, the size reduction of detector elements, and the increase of detector filling rate. Due to the restriction of device level, the effective data processing method can be used to improve the resolution of an imaging system. The sub-pixel imaging technique and the super-resolution image processing technique based on the discrete CCD/CMOS plane array detectors are mainly introduced, which are widely concerned at home and abroad.

Key words image processing; data processing; super-resolution; sub-pixel imaging

OCIS codes 100.2000; 100.6640; 120.0280

1 引 言

提高有效载荷的空间分辨率对于航天光学遥感具有重要的意义,故一直是科研工作者们不断努力的方向。光电成像系统通常为典型的光学-离散采样成像系统,为了提高分辨率,在设计上可通过增加成像系统物镜的焦距,增加探测器阵列的规模,减小探测器单元的几何尺寸并提高探测器的占空比等技术途径实现。光电成像系统分辨率的提高主要受体积、质量以及探测器水平等因素的限制,结合现代图像处理与光学成像的技术已成为国际上突破以上限制的主要技术途径,是国内外研究的重要方向和热点之一。

亚像元成像技术通过光学微扫描或探测器错位拼接等方法以及后续信号处理,获得小于探测器几何尺寸的空间分辨能力。而超分辨率成像则是利用图像的先验知识,提高图像信息的高频信息。亚像元处理和超分辨率图像处理技术已被证明是在探测

收稿日期: 2018-09-19; **修回日期**: 2018-11-01; **录用日期**: 2018-11-16

基金项目: 国家高分重大专项(民用部分)航空系统项目(50-H31D01-0508-13/15)

* **E-mail**: liuxiu0725@163.com; ** **E-mail**: llset8@163.com

器和光学系统限制下提高成像系统分辨率的有效方法，已在国外的一些遥感和军用成像系统中得到成功的应用。遥感卫星的抖动使遥感光电成像系统相对地面景物产生相对抖动或位移，一方面会造成图像的模糊，降低系统的空间分辨率，另一方面会产生错位的亚像元序列图像，为多帧图像高分辨率重建提供了必要的冗余信息。本文介绍了面阵遥感图像分辨率提升数据处理技术，希望在探测器和光学系统等主要硬件条件限制下，为新的高分辨率对地遥感成像技术方案提供有益的借鉴。

2 基于亚像元成像的图像分辨率提升技术

2.1 亚像元成像

亚像元成像技术是实现空间光学遥感系统小型化的有效途径，可以获得高于普通采样成像系统的高分辨率图像。由于探测器的几何尺寸以及空间走线布局等因素，大多数探测器阵列难以达到 100% 的占空比，在空间上是欠采样成像的[1-2]。通过亚像元成像技术提高采样率，获得过采样图像，继而通过亚像元处理可提高成像系统的成像分辨率和传递特性。通常单探测器通过可控过程方式实现亚像素位移，多探测器通过分光拼接或机械拼接方式产生亚像素位移以实现空间的过采样成像。以下分别对两种方式进行介绍。

2.1.1 可控过程方式

光电成像系统成像主要有扫描型和凝视型两种，通过可控过程方式实现亚像素位移的亚像元成像方式主要应用在凝视型光电成像系统中。在不增加探测器像素尺寸和规模的条件下增大成像系统的空间采样频率，通过对同一场景微扫描获取过采样图像，结合数字图像信号亚像元处理减少图像的频率混叠效应，提高成像系统的分辨率并获得高性价比。这种方式通过对成像系统的精确微扫描获取 0.5 pixel亚像素位移的同一场景图像，采样和成像过程中要求场景和视场静止或移动很小，因此在航天光学遥感应用中限制较大。这种方式的实施途径主要有 3 种[3]：1）机械平移法，通过压电陶瓷等机械驱动的方法使光学系统与探测器之间形成可控的位移，或者直接驱动探测器形成可控的位移，实现微扫描，常用的微扫描模式有 2×2、3×3、4×4 等，平移透镜微扫描工作原理如图 1 所示，图中 I 和 I' 表示光轴，d 表示位移；2）摆镜法，摆镜法实现微扫描示意图如图 2 所示[4]，在光路中放置反射摆镜实现一个或两个正交方向的微扫描；3）平板旋转法，在探测器和光学物镜之间加入一块或多块倾斜的平板，或采用螺旋线形状的平板光学元件，平板与光轴成某种角度进行旋转扫描，使成像偏离原成像位置一个微小位移以实现微扫描[5-6]，平板旋转法微扫描成像工作原理如图 3 所示。

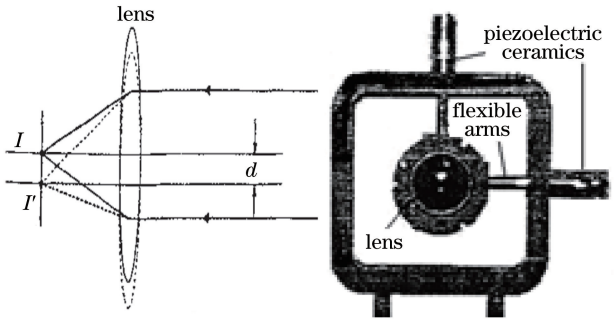

图 1 平移透镜微扫描工作原理图

Fig. 1 Principle diagram of micro-scanning by lens translation

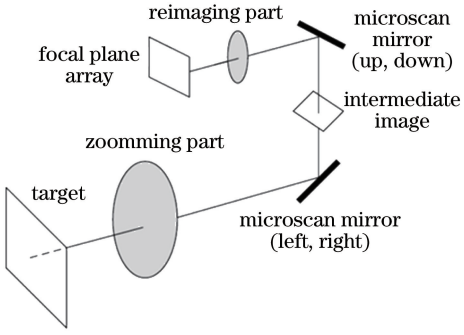

图 2 摆镜法实现微扫描示意图

Fig. 2 Schematic of micro-scanning realized by mirror-tilting

2.1.2 分光拼接或机械拼接方式

基于线阵器件的亚像元成像，在遥感领域已被成功应用于 SPOT5 卫星[7]及德国宇航中心研制的红外遥感器 HSRS（Hot Spot Recognition Sensors）[8]等设备中。其中，SPOT5 卫星两排 CCD 在探测器线阵方向错开 0.5 pixel，在卫星飞行方向错开 3.5 pixel，具有超采样和高采样两种模式，两种采样模式探测器的排列方式相同，飞行方向的时间采样频率不同，如图 4 所示。其中，P 表示像元尺寸。这两个线阵 CCD 传感器在同一地区同时采集两幅分辨率为5 m的图像，利用两幅同时采集的相对精确定位的5 m分辨率图像，通过图像重建处理生成了分辨率为2.5～3.0 m 的图像，从而极大地提升了系统性能。线阵器件实现亚像元成像的技术途径主要包括以下几种[9]：1）棱镜分光法，采用半反

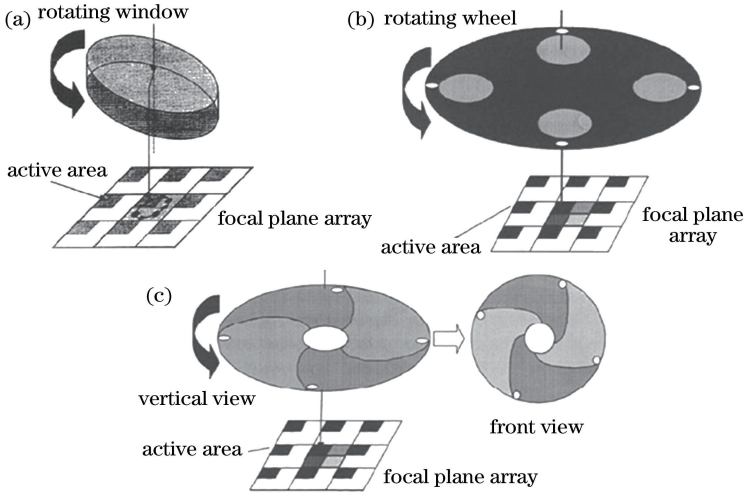

图 3 平板旋转法微扫描成像工作原理。(a)单片平板光学元件微扫描;(b)四片平板光学元件微扫描;(c)螺旋线形状平板光学元件微扫描

Fig. 3 Working principle of micro-scanning imaging by plane rotating. (a) Micro-scanning by one optical plane element; (b) micro-scanning by four optical plane elements; (c) micro-scanning by helix optical plane element

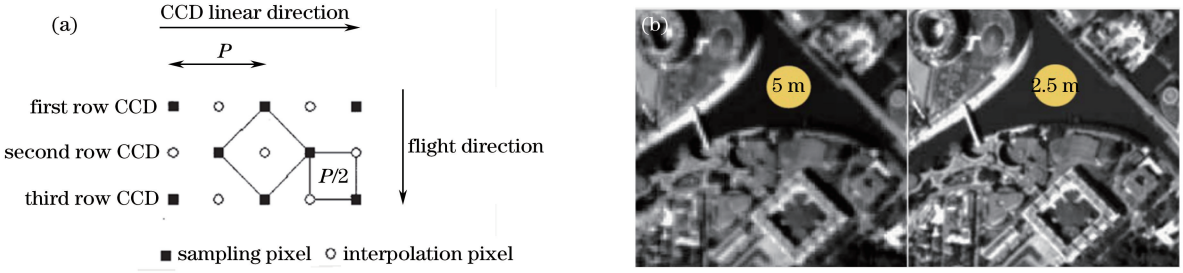

图 4 SPOT5 卫星亚像元成像技术。(a)超采样和高采样探测器排列;(b)分辨率提升数据处理

Fig. 4 Sub-pixel imaging technique used in SPOT5 satellite. (a) Super-sampling and hyper-sampling detector array; (b) data processing for resolution improvement

半透棱镜把光分成两路,两线阵成像器件在焦面处错开放置;2) 焦面集成法,把两排错位的线阵器件集成在一个芯片上,即通过半导体工艺在器件研制中实现焦面集成;3) 机械拼接法,在安装基板上将两线阵成像器件通过机械拼接方式实现错位排列,两线阵亚像元成像技术示意图如图 5 所示。其中,N 为像元数量。

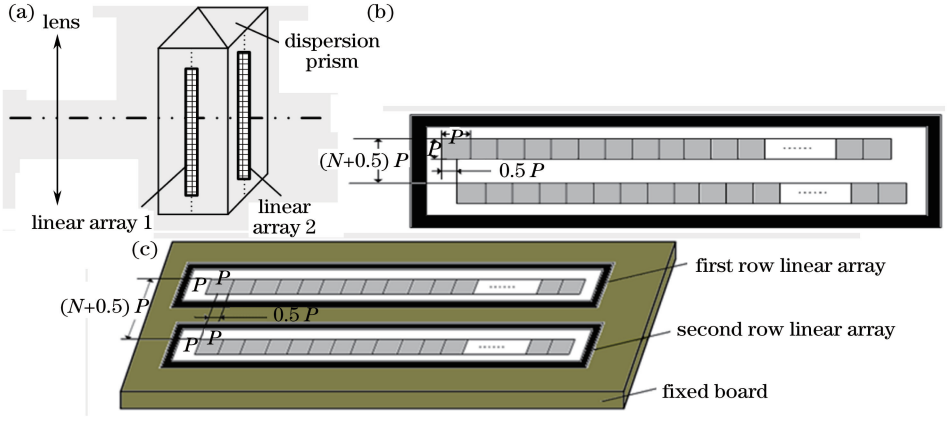

图 5 两线阵亚像元成像技术示意图。(a)棱镜分光两线阵探测器亚像元成像;(b)集成芯片;(c)双线阵器件机械拼接

Fig. 5 Schematic of sub-pixel imaging technology by two linear arrays. (a) Two-linear-array detector for sub-pixel imaging based on prismatic decomposition; (b) integrated chip; (c) mechanical assembly of two-linear-array detector

对于面阵器件的亚像元成像，在遥感领域，由于卫星平台存在在轨抖动或沿轨运动，上述微扫描方式难以适用。与线阵器件方法相同，可以采用半反半透镜分光方式实现两个面阵器件的亚像元成像，再通过插值方法获取像素倍增的过采样图像，两面阵探测器亚像元成像及过采样图像获取示意图如图 6 所示。此外，也可通过多个半反半透镜两次分光实现 4 个面阵器件亚像元成像，直接获取像素倍增的过采样图像，四面阵探测器亚像元成像及过采样图像如图 7 所示[10]，最后通过亚像元处理获得高分辨率图像。

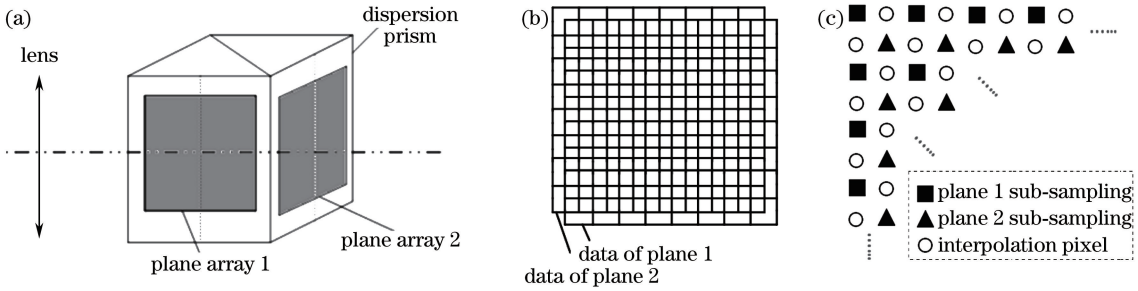

图 6 两面阵探测器亚像元成像及过采样图像。(a)棱镜分光亚像元成像；(b)两面阵图像错位关系；(c)过采样图像

Fig. 6 Sub-pixel imaging by two-plane-array detector and over-sampling image. (a) Sub-pixel imaging based on prismatic decomposition; (b) dislocation relationship of two plane arrays; (c) over-sampling image

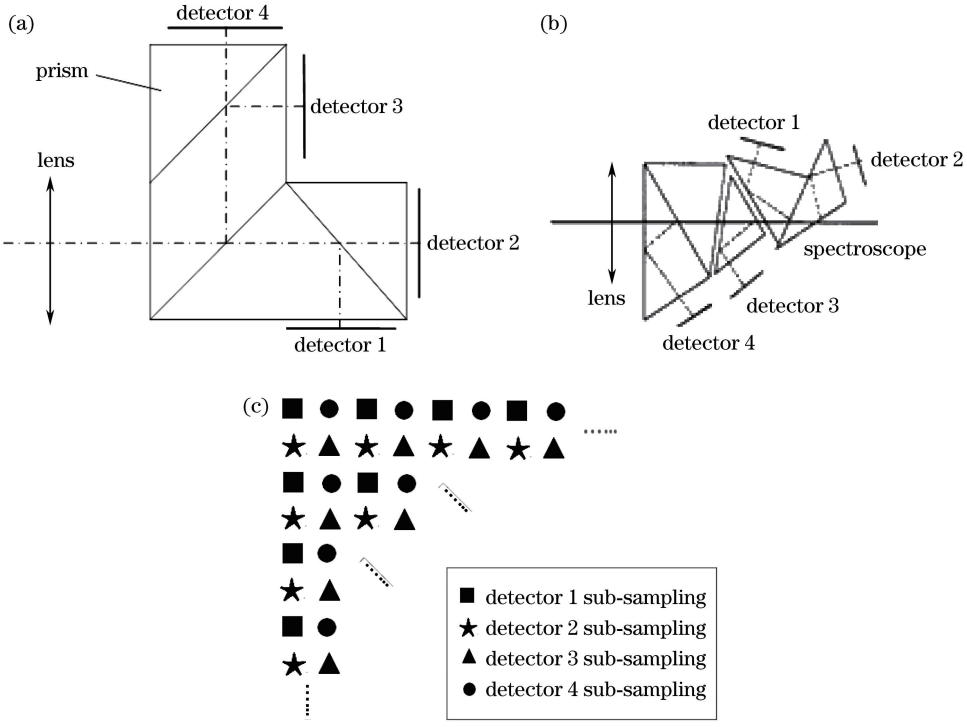

图 7 四面阵探测器亚像元成像及过采样图像。(a)亚像元成像示例 1；(b)亚像元成像示例 2；(c)过采样图像

Fig. 7 Sub-pixel imaging by four-plane-array detector and over-sampling image. (a) Example 1 for sub-pixel imaging; (b) example 2 for sub-pixel imaging; (c) over-sampling image

2.2 亚像元处理

按照线性成像系统理论，单纯的过采样成像过程可提高图像空间的采样率，减小图像重构时的频率混淆效应，提高成像的空间分辨率，但若想进一步减小图像混淆和模糊的可能性，需使用特定的亚像元算法进行处理或重构。国内外相关学者对亚像元成像数据处理的研究主要集中在高分辨率网格重建和多帧图像超分辨率处理上，其中前者包括图像插值合并和基于代数递推运算退化反演重建，后者是在假设原始图像或者退化过程服从某一先验模型前提下进行超分辨率重建。对于固定位移亚像元图像，多帧图像超分辨率处理与以往超分辨率重建不同之处在于确定了低分辨率图像数量(如 4 幅)，且图像之间相对位移确定(如 0.5 pixel)。本节主要介

绍基于代数递推运算或插值的面阵图像亚像元处理方法，在工程应用中，基于代数递推运算或插值的亚像元处理算法突破后可实现星上实时处理，基于迭代运算的超分辨率处理算法完善后可在星地结合处理中应用。

2.2.1 基于插值运算的亚像元处理

多帧图像的插值合成实际上是高分辨率网格点被对应相邻像素合理填充的规则选取，这里高分辨率网格是通过对低分辨率的欠采样图像进行整数倍空间拓扑得到的。对于采用分光方式等获取的具有0.5 pixel 固定位移的亚像元图像，可以直接插值重建，但对于微扫描方式获取的亚像元图像，很难保证精确的 0.5 pixel 的扫描平移，因此直接插值重建受平移因子不同程度的干扰，一次谐波混淆加剧。常见的插值处理方法有邻域插值、双线性插值、双立方插值、三次样条插值等。严格地讲，通过平移不变插值技术，不能生成新的高频信息，钱霖等[11]对加权插值等方法进行研究，针对均匀微扫描下高分辨率网格点是两帧观测图像像素点的 2 倍且在高分辨率数据网中待插值点恰好位于 4 个精确点的中心这两个特性，考虑 4 个采样点对插值点贡献的不同，采取加权插值策略，即在由像素二阶矩与平均值偏离程度所决定的权重因子 q 作用下，进行非匀质插值，以使图像具有较大的对比度和梯度，两帧对角线扫描点网格如图 8 所示。刘洪臣等[12]采用 4 条 B 样条曲线对两幅亚像元图像进行插值，利用被插值点周围 12 个点的信息且充分考虑插值点周围临域内点的影响，取得了较佳的插值效果，两帧微扫描 B 样条插值示意图如图 9 所示。

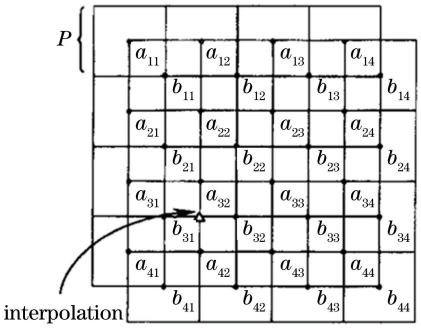

图 8 两帧对角线扫描点网格

Fig. 8 Two-frame diagonal scan point grid

这里需要指出的是，仅仅利用一幅图像实现图像插值放大是一个病态问题，因为数据量可以增加，信息量却不可能增加。采用多帧亚像元图像插值放大可以充分应用其冗余信息，处理效果优于单幅图

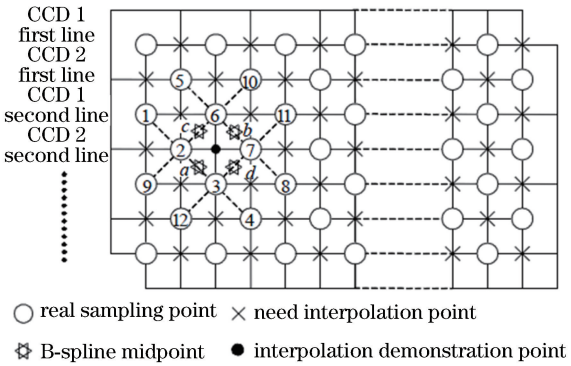

图 9 两帧微扫描 B 样条插值示意图

Fig. 9 Schematic of two-frame B-spline interpolation

像，但其处理效果相比基于代数递推运算的亚像元处理和超分辨重建较差。

2.2.2 基于代数递推运算的亚像元处理

文献[13-14]提出一种基于 2×2 微扫描的面阵图像亚像元代数递推处理方法，理论上在探测器精确标定下，该方法可推广到采用分光方式的 4 个面阵器件亚像元成像(如图 7 所示)的数据处理中。该亚像元快速算法从边界开始回代，在无噪声的理想成像下，若边界高分辨数据可知，则可实现 2 倍分辨率重建，算法处理量小，可实现快速实时处理。四面阵探测器亚像元成像如图 10 所示。实际成像中，边界高分辨数据是未知的，因此，算法要求对视场边界的信号(辐射或亮度)进行标定处理，可采用视场边界遮挡、外推近似法等近似确定视场边界。图像噪声和边界近似误差在递推迭代中不断累积和震荡，针对该问题，陈艳等[15]提出一种无边框亚像元成像处理算法，根据统计学原理对近似回代过程中引入的误差进行优化，获得与原始图像高度近似的亚像元图像，误差优化的无边框亚像元成像处理如图 11 所示。

对于红外探测器，随着工艺进步探测器尺寸进一步减小，受到光学衍射极限的影响比较明显，应用亚像元成像和处理，减小空间离散采样和积分，会引起图像降质，因此提高空间分辨率对红外图像更有意义。但红外图像存在非均匀性问题，非均匀性噪声在基于代数递推运算的亚像元处理中影响较大，对此，提出一种亚像元高分辨率重建和非均匀性校正一体化处理算法[16]，并采用反演回代边界近似处理和消除边界近似误差的方法，减少了噪声对亚像元处理算法的影响，可在对非均匀性污染严重的红外图像序列进行非均匀性校正的同时还原高分辨率图像。

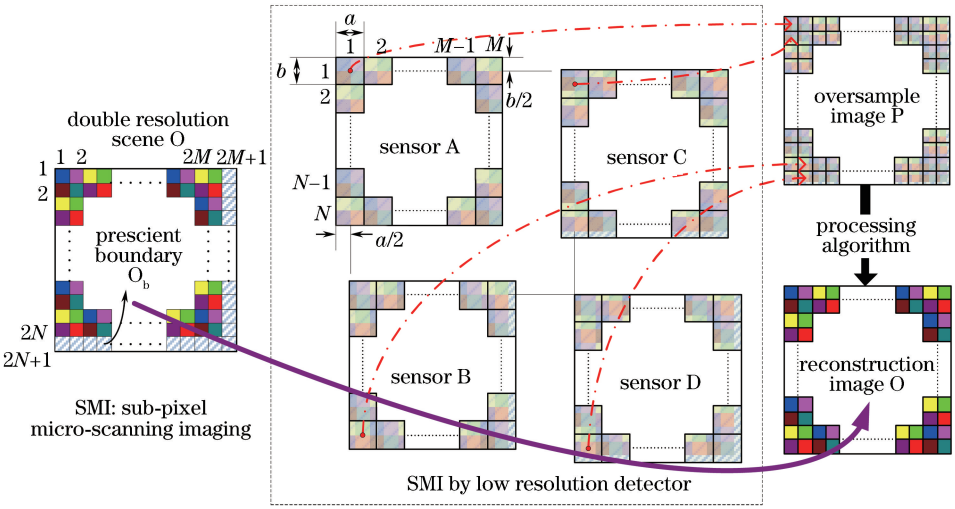

图 10 四面阵探测器亚像元成像

Fig. 10 Sub-pixel imaging by four-plane-array detector

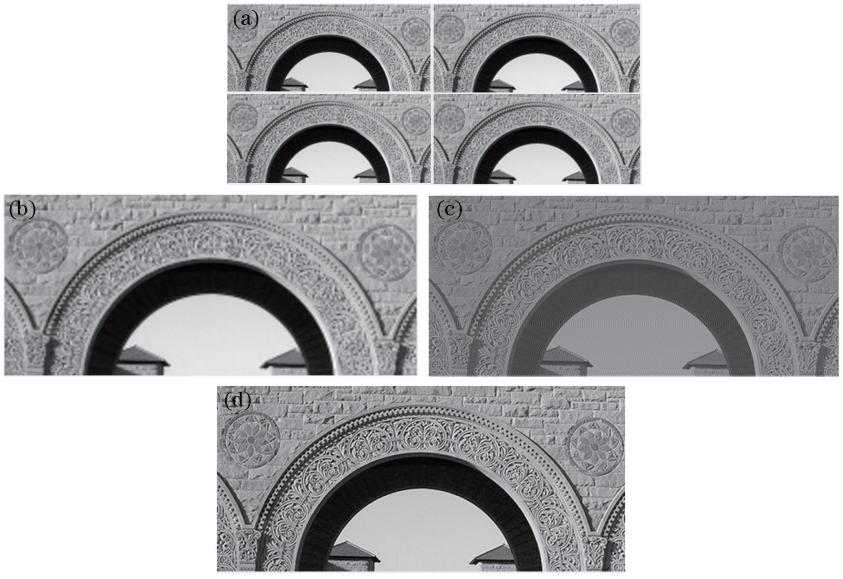

图 11 误差优化的无边框亚像元成像处理。(a)欠采样图像序列;(b)过采样图像;(c)无边框近似回代处理;(d)误差优化处理结果

Fig. 11 Non-boundary sub-pixel imaging processing based on error optimization. (a) Sub-sampling image sequence; (b) oversampling image; (c) non-boundary reconstruction processing; (d) result after error optimization

3 基于超分辨率重建的图像分辨率提升技术

3.1 超分辨率处理技术

图像超分辨率处理包含两个方面的意义:一方面是对于过采样成像恢复截止频率以上的高频信息,使图像获得更多的细节和信息,从而提高图像的分辨率;另一方面是指对欠采样成像增加图像的采样率,消除图像的高低频混淆,同时恢复高频信息,从而提高图像的分辨率。最初的研究集中在单帧图像超分辨率复原方面,随着研究深入,多帧图像超分辨率重建逐渐成为国内外的研究热点。有关超分辨率处理技术的研究,可以充分发掘现有遥感影像数据的潜力,在尽量减少硬件变化的前提下,提高遥感影像分辨率以更好地服务于遥感领域。

3.2 单帧图像超分辨率复原

超分辨率复原的概念和方法最早由 Harris[17] 和 Goodman[18] 分别于 1964 年和 1968 年提出,他们提出的方法被称为 Harris-Goodman 频谱外推

法。此后，许多人对其进行了研究，并相继提出了各种复原方法。超分辨率复原算法主要有频域法和空域法，空域算法不仅能够处理复杂的退化模型，而且能够有效地引入多种先验正则约束，更具灵活性。典型空域超分辨率复原算法包括文献[19]中提出的正则化递推复原算法，文献[20]中提出的凸集投影(POCS)图像复原算法，以及文献[21]中提出的 ML/MLP/POCS 综合复原方法等。文献[22]中提出的基于 Bayesian 理论的最大后验概率(MAP)算法是最常用的空域算法之一；文献[23-24]提出了基于 Markov 约束的 Poisson 最大似然法(MPML)和 Poisson 最大后验概率法(MPMAP)；文献[25-26]采用了基于深度学习的图像超分辨率重建。上述算法具有较强的单帧图像超分辨率复原处理能力。文献[27]提出了一种通过图像微分自相关方法，在获取点扩展函数后，以其为先验知识采用正则 MAP 法、MPMAP 法对单帧遥感图像进行复原，可有效提高遥感图像像质，增强图像的高频部分，单帧遥感图像复原过程如图 12 所示。

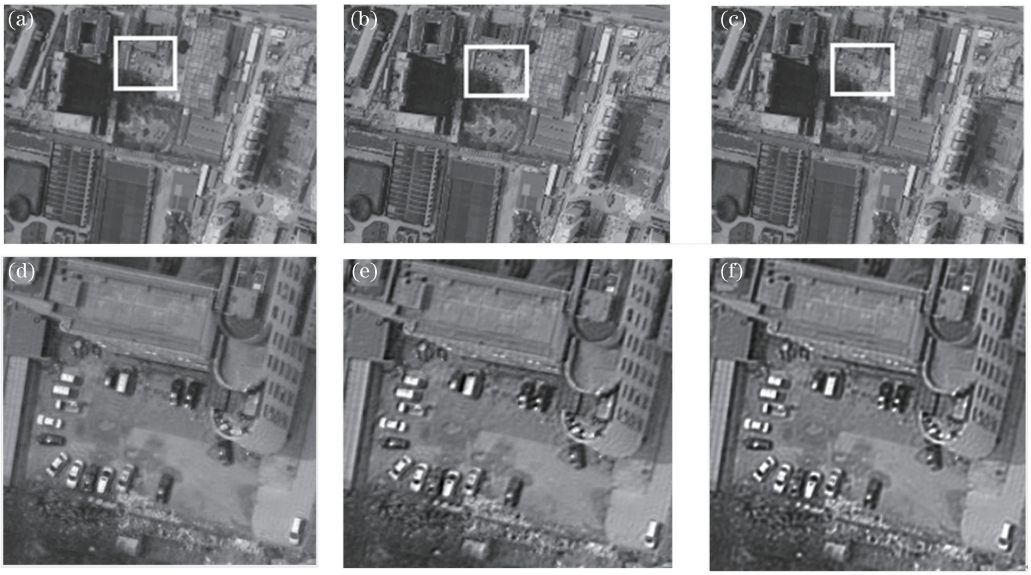

图 12 单帧遥感图像复原过程。(a)处理前原始图像；(b)正则 MAP 法复原结果；(c) MPMAP 法复原结果；(d)图(a)局部放大；(e)图(b)局部放大；(f)图(c)局部放大

Fig. 12 Reconstruction process of single frame remote sensing image. (a) Original image before processing; (b) reconstruction result by regularized MAP method; (c) reconstruction result by MPMAP method; (d) local amplification of (a); (e) local amplification of (b); (f) local amplification of (c)

3.3 多帧图像超分辨率重建

Tsai 等[28]首先提出使用多幅欠采样图像提高图像的空间分辨率的设想。基于序列多帧图像的超分辨率重建是指由一系列互有位移的低分辨率图像重构一幅高分辨率图像。多帧图像超分辨率重建技术可以克服图像采集设备的分辨率限制，充分利用多帧图像之间的互补信息，实现亚像素级的图像信息融合。在航天遥感领域，静止轨道卫星的抖动可使凝视型遥感光电成像系统相对地面景物产生相对抖动或位移，产生错位的序列图像是相互之间具有亚像素偏移的欠采样混叠图像，冗余图像所包含的新的信息可用来重建高分辨率图像。

吴琼等[29]对于超分辨率处理的发展历程和方法进行了详细阐述，多帧图像超分辨率重建方法延续单帧图像超分辨率复原的研究，除插值、小波变换、神经网络等方法外，主要可分为空域迭代和频域解混淆两大类方法，这里不再赘述。需要指出，根据目前进展和已发表的文献，空域迭代类算法研究较多，也表现出较强的多帧图像超分辨率重建能力。这里采用 MPMAP 法对 6 帧序列航天遥感影像进行 2 倍像素倍增超分辨率重建，遥感图像序列超分辨率重建过程如图 13 所示。图 13(a)为处理前的 6 帧序列原始图像(10240 pixel×10240 pixel)，图 13(b)为超分辨率重建结果(20480 pixel×20480 pixel)，图 13(c)为图 13(a)局部 100 pixel×100 pixel 区域双线性插值 2 倍放大图像，图 13(d)为图 12(b)对应局部200 pixel×200 pixel 区域图像。由图 13(d)可见图像细节复原明显，图像分辨率得到有效提升。

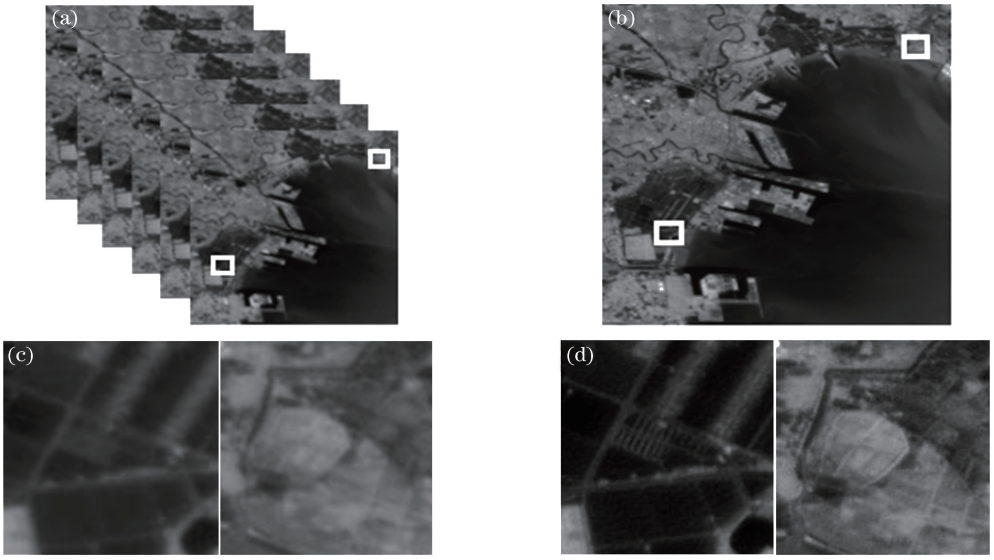

图 13 遥感图像序列超分辨率重建过程。(a)处理前序列原始图像(10240 pixel×10240 pixel);(b)超分辨率重建结果(20480 pixel×20480 pixel);(c)图(a)局部插值放大(200 pixel×200 pixel);(d)图(b)局部图像(200 pixel×200 pixel)

Fig. 13 Super-resolution reconstruction process of remote sensing image sequence. (a) Original image sequence before processing (10240 pixel×10240 pixel); (b) super-resolution reconstruction result (20480 pixel×20480 pixel); (c) local interpolation amplification of (a) (200 pixel×200 pixel); (d) local image of (b) (200 pixel×200 pixel)

多帧图像超分辨率重建在对序列红外图像处理中,受红外图像随时间变化缓慢漂移的固定模式噪声影响,其处理效果弱于可见光图像。针对红外序列图像超分辨率重建,提出了高分辨率图像重建和非均匀性校正一体化处理(MPMAP-HR&NUC)算法[30],红外遥感图像序列超分辨率重建过程如图 14 所示。采用15帧低分辨率红外图像序列,进行3倍像素倍增超分辨率重建。原始低分辨率图像尺寸为 128 pixel×128 pixel[图 14(a)为其中 5 帧],超分辨率重建图像尺寸为 384 pixel×384 pixel,如图 14(c)所示。图 14(b)为图(a)第一帧的双线性插值图像,由图可见,原低分辨率图像的网格状非均匀性得到明显消除,图中门、窗和电线杆等目标细节得到较好的复原。

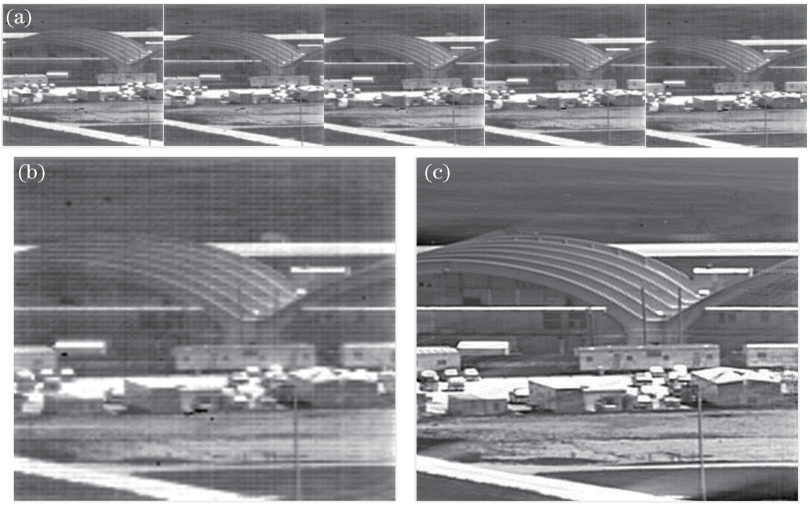

图 14 红外遥感图像序列超分辨率重建过程。(a)原始低分辨率 15 帧图像序列中的 5 帧(128 pixel×128 pixel);(b)图(a)第一帧双线性插值结果(384 pixel×384 pixel);(c)多帧重建处理结果(384 pixel×384 pixel)

Fig. 14 Super-resolution reconstruction process of infrared remote sensing image sequence. (a) Five frames of original low-resolution fifteen-frame images (128 pixel×128 pixel); (b) result after bilinear interpolation of first frame in (a) (384 pixel×384 pixel); (c) reconstruction result of multiple-frame image (384 pixel×384 pixel)

4 存在的问题

随着民用和军用遥感图像对空间分辨率需求的不断提高，如何提高光学遥感器空间分辨率是航天遥感领域的热点研究问题。常规方法包括从硬件上增加探测器阵列的规模，减小探测器单元的几何尺寸，加大光学系统口径等；非常规方法包括软硬件结合的方式或纯软件处理的方式。软硬件结合方式除文中介绍的双线阵亚像元成像、面阵亚像元成像外，还有三线阵亚像元成像方式[31-32]、斜采样方式[33-34]、光学相位编码和亚像元技术相结合方式[35]等；而纯软件处理方式一般采用超分辨率图像处理方式。

对于航天光学遥感载荷的研制，主流思路还是从硬件上不断突破以获取遥感卫星的高空间分辨率。软硬件结合的亚像元成像模式、线阵亚像元成像在航天遥感中已被成功应用，但面阵亚像元成像在航天遥感中尚存在一些问题：1）目前红外单面阵探测器微扫描亚像元成像研究较多，但对于采用半反半透镜分光方式实现多面阵器件亚像元成像的研究较少，需经过地面或航空验证后，才有望在航天遥感领域得到应用；2）采用分光方式实现多面阵器件亚像元成像，对光学系统设计约束较大，且由于探测器增多，系统体积、质量和稳定性等需综合考虑；3）系统数据量增大，若要实现在轨处理，对电子学硬件的要求很高；4）亚像元处理算法还需进一步完善。虽然存在诸多问题，但亚像元成像技术可有效提升系统分辨率，并且代数处理运算可进行硬件实时处理，随着技术发展有望成为新一代遥感卫星的高分辨率光学遥感成像系统在轨处理分辨率提升技术。

纯软件的超分辨率图像处理在理论、算法上都取得了重要的研究成果，超分辨率图像处理效果较佳，但算法一般计算复杂，难以用于在轨处理。在下传的遥感图像地面处理中，应用问题主要体现在两个方面。一是算法效能方面，多帧图像配准算法直接关系到重建效果，配准算法精度及其对不同位移/形变的红外、可见光图像的普适性需进一步提高；算法稳定的收敛性方面需不断完善。二是工程化应用方面，处理过程中需尽量减少或去除人工干预；不同遥感载荷获取到的同一区域图像序列帧数不同，多帧超分辨率重建算法在图像帧数自动选取和判断上需进一步改进。

5 结　　论

亚像元成像以及超分辨率图像处理技术近年来备受国内外关注的技术，其他遥感图像分辨率提升技术的研究也仍在进行。亚像元成像以及超分辨率图像处理技术已被证明是在探测器和光学系统限制下提高成像系统分辨率的有效方法，在航天航空遥感光电成像系统、高性能热成像系统中得到成功的应用。超分辨率图像处理对由于载荷平台抖动和大气散射、光学像差等所引起的序列图像模糊进行处理或重建，算法一般可针对现有在轨卫星下传序列图像进行。亚像元成像技术注重图像分辨率提升，同时注重算法的代数运算和算法硬件实时处理的可实现性，有望进一步提升遥感卫星的高分辨率光学遥感成像系统在轨处理分辨率。

参 考 文 献

[1] Chen Y N, Jin W Q, Wang X, *et al*. Contrast MTF between sub-pixel arithmetic and over-sampling imaging considering filling rate[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(2): 148-152.
陈翼男，金伟其，王霞，等. 考虑填充率下亚像元与过采样成像 MTF 对比[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(2): 148-152.

[2] Jin W Q, Chen Y N, Wang X, *et al*. Scanning type sub-pixel thermal imaging algorithm taking account of detector filling rate and micro-scanning contraposition bias [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(4): 308-312.
金伟其，陈翼男，王霞，等. 考虑探测器填充率及微扫描对位偏差的扫描型亚像元热成像算法[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(4): 308-312.

[3] Xu C, Jin W Q, Li Y Q. Optical microscanner technique and realization[J]. Infrared Technology, 2006, 28(6): 338-342.
徐超，金伟其，李雅琼. 光学微扫描器技术及其实现方式[J]. 红外技术, 2006, 28(6): 338-342.

[4] Wang Y F, Hou H, Feng X Y. Development of microscan techniques in infrared focal plane array[J]. Infrared Technology, 2013, 35(12): 751-758.
王忆锋，侯辉，冯雪艳. 红外焦平面器件微扫描技术的发展[J]. 红外技术, 2013, 35(12): 751-758.

[5] Qu H M, Chen Q. Comparison of microscanning schemes in infrared focal plane array imaging[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(3): 161-164.
屈惠明，陈钱. 红外焦平面阵列微扫描成像方案比较[J]. 激光与红外, 2006, 36(3): 161-164.

[6] Wu X S, Fan N H, Li L, *et al*. Chopper design for ferroelectric un-cooled FPA [J]. Infrared

Technology, 2007, 29(6): 333-336.
吴新社, 范乃华, 李龙, 等. 铁电型非制冷红外焦平面探测器的调制器设计[J]. 红外技术, 2007, 29(6): 333-336.

[7] Tan B, Xing S, Xu Q, *et al*. A research on SPOT5 supermode image processing[J]. Remote Sensing Technology & Application, 2004, 19(4): 249-252.
谭兵, 邢帅, 徐青, 等. SPOT5 超模式数据处理技术研究[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(4): 249-252.

[8] Skrbek W, Lorenz E. HSRS: an infrared sensor for hot spot detection[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3437: 167-176.

[9] Zhou F, Wang S T, Wang H Y. 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] Liu X P, Gao Z, Deng N M, *et al*. Sub-pixel imaging method and experiment based on area array CCD sensor[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(15): 1603-1605.
刘新平, 高瞻, 邓年茂, 等. 面阵 CCD 作探测器的"亚像元"成像方法及实验(编者注)[J]. 科学通报, 1999, 44(15): 1603-1605

[11] Qian L. Study on interpolation models for "subpixel" technology of composing two images[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 308-311.
钱霖. 基于两帧图像"亚像元"技术的插值方法研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 308-311.

[12] Liu H C, Yang X Q, Feng Y. Interpolation method for sub-pixel dynamic imaging system based on B-spline curve[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(2): 90-93,126.
刘洪臣, 杨旭强, 冯勇. 亚像元成像系统 B 样条插值方法[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 90-93,126.

[13] Jin W Q, Wang C Y, Zhang N, *et al*. Study on sub-pixel processing algorithm for scanning FPA thermal imaging system[J]. Journal Infrared Millimeter and Waves, 2005, 24(4): 261-264.
金伟其, 王春勇, 张楠, 等. 扫描型焦平面热成像系统的亚像元处理算法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 261-264.

[14] Xu C, Jin W Q, Li Y Q, *et al*. An improved sub-pixel processing algorithm based on focal plane detector[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(8): 1608-1611.
徐超, 金伟其, 李雅琼, 等. 一种改进的凝视焦平面探测器亚像元成像处理算法[J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1608-1611.

[15] Chen Y, Jin W Q, Wang L X, *et al*. Algorithm of sub-pixel thermal imaging for nonuniform micro-scanning in scanning IRFPA without boundary[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, 31(2): 122-126.
陈艳, 金伟其, 王岭雪, 等. 扫描型 IRFPA 非均匀微扫描的无边框亚像元热成像处理算法[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(2): 122-126.

[16] Liu X, Jin W Q, Liu C L, *et al*. Non-uniformity correction and sub-pixel processing algorithm based on motion controllable micro-scanning [C] // Proceedings of 2011 NCOQE conference, March 18-19, Beijing. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2011: 83-90.
刘秀, 金伟其, 刘崇亮, 等. 基于可控微扫描的亚像元成像与非均匀性校正一体化处理算法[C]//全国光电子与量子电子学技术大会论文集, 3 月 18—19 日, 北京. 北京: 中国电子学会, 2011: 83-90.

[17] Harris J L. Diffraction and resolving power[J]. Journal of the Optical Society of America, 1964, 54(7): 931.

[18] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. New York: McGraw-Hill, 1968: 142-149.

[19] Kim S P, Su W Y. Recursive high-resolution reconstruction of blurred multiframe images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1993, 2(4): 534-539.

[20] Patti A J, Sezan M I, Murat Tekalp A. Superresolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(8): 1064-1076.

[21] Elad M, Feuer A. Super-resolution reconstruction of an image[C] // Proceedings of 19th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, 5-6 November, 1996, Jerusalem, Israel. New York: IEEE, 1996: 391-394.

[22] Schultz R R, Stevenson R L. Extraction of high-resolution frames from video sequences[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(6): 996-1011.

[23] Su B H, Jin W Q, Niu L H, *et al*. Poisson-map super-resolution image restoration algorithm with Markov constraint[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(4): 492-496.

苏秉华，金伟其，牛丽红，等. 基于 Markov 约束的泊松最大后验概率超分辨率图像复原法[J]. 光子学报，2002，31(4)：492-496.

[24] Su B H，Jin W Q. MPMAP super-resolution image restoration algorithm based on multiframes or multisensors[J]. Proceedings of SPIE，2002，4925：5-10.

[25] Xiao J S，Liu E Y，Zhu L，*et al*. Improved image super-resolution algorithm based on convolutional neural network[J]. Acta Optica Sinica，2017，37(3)：0318001.
肖进胜，刘恩雨，朱力，等. 改进的基于卷积神经网络的图像超分辨率算法[J]. 光学学报，2017，37(3)：0318001.

[26] Li S M，Lei G Q，Fan R. Depth map super-resolution reconstruction based on convolutional neuralnetworks[J]. Acta Optica Sinica，2017，37(12)：1210002 .
李素梅，雷国庆，范如. 基于卷积神经网络的深度图超分辨率重建[J]. 光学学报，2017，37(12)：1210002.

[27] Liu X，Liu Y，Lin Z R. Application of maximum a posteriori algorithm in remote sensing image reconstruction[J]. Acta Optica Sinica，2013，33(B12)：206-212.
刘秀，刘咏，林招荣. 最大后验概率算法在遥感图像复原中的应用[J]. 光学学报，2013，33(B12)：206-212.

[28] Tsai R Y，Huang T S. Multiframe image restoration and registration [J]. Advances in Computer Vision and Image Processing，1984，1(2)：317-319.

[29] Wu Q，Tian Y，Zhou C P，*et al*. Review of super-resolution in remote-sensing image[J]. Science of Surveying and Mapping，2008，33(6)：66-69，15.
吴琼，田越，周春平，等. 遥感图像超分辨率研究的现状和发展[J]. 测绘科学，2008，33(6)：66-69，15.

[30] Liu X，Jin W Q，Xu C. High-resolution reconstruction and non-uniformity correction from images sequences based onpoisson-markov model MAP[J]. Acta Electronica Sinica，2011，39(9)：2103-2107.
刘秀，金伟其，徐超. 基于 MPMAP 序列红外图像高分辨力重建和非均匀性校正[J]. 电子学报，2011，39(9)：2103-2107.

[31] Yang W B，Zhu M，Ma T W，*et al*. Research on super-resolution reconstruction of sub-pixel imaging in multiple linear array CCDs [J]. Journal of Optoelectronics • Laser，2014，25(6)：1203-1212.
杨文波，朱明，马天伟，等. 多线阵 CCD 亚像元成像超分辨率重构技术研究[J]. 光电子 • 激光，2014，25(6)：1203-1212.

[32] Yang W B，Zhu M，Liu Z M，*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.

[33] Wang J，Zhou F，Pan Y，*et al*. A method for improving the effective resolution of space optical remote sensor[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing，2011，32(4)：24-29.
王静，周峰，潘瑜，等. 提高空间光学遥感器有效分辨率的方法研究[J]. 航天返回与遥感，2011，32(4)：24-29.

[34] Zhou F，Wang H Y，Ma W P，*et al*. A study on a new method for improving image spatial resolution of sampled optical imager with single array[J]. Journal of Astronautics，2006，27(2)：227-232.
周峰，王怀义，马文坡，等. 提高线阵采样式光学遥感器图像空间分辨率的新方法研究[J]. 宇航学报，2006，27(2)：227-232.

[35] Liu Y Y，Zhang X，Zhang J P. Super-resolved reconstruction technologies and recent evolution[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics，2009，2(2)：102-111.
刘妍妍，张新，张建萍. 超分辨重建技术及其研究进展[J]. 中国光学与应用光学，2009，2(2)：102-111.