

文章编号:1007-2780(2017)08-0628-07

数字域斜模态时间延迟积分技术

金 光^{1,2}, 宋明珠^{2,3*}, 张贵祥², 曲宏松², 陶淑苹²

(1.首都师范大学 北京成像技术高精尖创新中心, 北京 100048;

2.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了实现遥感图像超分辨目的, 提出数字域斜模态时间延迟积分(Digital Domain Tilting Model Time Delayed and Integration, DT-TDI)技术。对技术过程所涉及的数字域 TDI 技术、倾斜采样成像理论、数字域斜模态 TDI 技术等分别进行分析与研究。首先, 构建通用的数字域 TDI 模型。之后, 利用倾斜采样成像思想, 构建适用于不同倾斜角度下的 DT-TDI 模型。然后, 以 45° 倾角对模型进行实验验证, 获取该角度一定姿轨条件下的序列低分辨率图像。最后, 通过超分辨算法对具有亚像素位移的低分辨率图像序列进行超分辨重构, 获取高分辨率图像。实验结果表明, DT-TDI 技术可在不同倾斜模态下进行稳定成像, 45° 倾角时获取的低分辨率图像亚像素位移误差约 15%, 基本满足超分辨重构需求。重构后图像分辨率明显提升。

关 键 词:数字域 TDI; 斜模态; 亚像素

中图分类号:TP722.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173208.0628

Digital domain tilting model time delayed and integration technology

JIN Guang^{1,2}, SONG Ming-zhu^{2,3*}, ZHANG Gui-xiang², QU Hong-song², TAO Shu-ping²

(1. *Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Technology, Capital Normal University, Beijing 100048, China*; 2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*;

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to realize super-resolution of remote sensing picture, an digital domain tilting model time delayed and integration(DT-TDI) technology is proposed, and its relevant technologies such as digital domain TDI technology, tilting sampling imaging theory, DT-TDI technology and etc are analysed and investigated. First, we establish general digital TDI model; then establish DT-TDI model applied to different tilt angle by utilizing tilting sampling imaging theory, then we choose tilt angle of 45° and prove the accuracy of DT-TDI by experiment, and obtain a series of low resolution images of a certain attitude and orbit in this angle. Finally, we reconstruct the low resolution images of subpixel

收稿日期:2016-12-29; 修订日期:2017-04-10.

* 通信联系人, E-mail: songmingzhu14@mails.ucas.ac.cn

shifting via super-resolution algorithm and obtain high resolution image. Experimental results indicate that the DT-TDI technology has a stable imaging capability, and the subpixel shifting error of low resolution images is about 15% in 45°, and the DT-TDI technology is satisfied with the demand of super-resolution. The resolution ratio of image is raised obviously after reconstruction.

Key words: digital domain TDI; tilting model; subpixel

1 引言

航天遥感成像领域通常采用 TDI-CCD 作为成像器件,其主要优势在于 TDI 技术通过行转移时间与推扫速度的匹配实现同一区域分时多次曝光,信号在模拟域累加输出达到大幅提高成像系统灵敏度及信噪比的目的。然而,TDI CCD 在应用中不断暴露出诸多缺陷,诸如造价高、体量大、功耗大、积分级数不可连续调整、在轨自主调焦困难、依赖复杂的机械调偏流机构等^[1]。为弥补上述缺陷,有学者提出数字域 TDI 技术。

数字域 TDI 技术主要利用 CMOS 图像传感器,在数字域实现像素的时间延迟积分,与 TDI-CCD 相比,具有价格优势及灵活特性。数字域 TDI 技术的研究始于 2009 年,G.Lepage 等^[2]首次分析了数字域 TDI 相对于模拟域 TDI 的巨大优势,预言数字域 TDI 为未来的发展趋势。曲宏松^[3]论证了数字域 TDI 的现场可编程门阵列实现方案;陶淑苹^[4-5]基于卷帘快门 CMOS 图像传感器实现了数字 TDI 功能并制作了原理样机,成功应用于星载成像系统。

在航天遥感成像领域,高分辨率需求与载荷轻量化的矛盾一直是亟需解决的问题,分辨率的提升必然带来成像系统焦距、质量等一系列指标的增大。超分辨重构是在原有载荷量级基础上提升图像分辨率的一种有效手段,重构过程主要利用具有一定空间亚像素位移的系列图像通过重构算法达到提升分辨率的目的。为突破数字域 TDI 技术的瓶颈,本文以超分辨重构为目的,对数字域斜模态 TDI 技术进行研究,利用数字域 TDI 成像过程信号同地分时累加的特点,结合倾斜模态^[6]成像方式,提出一种数字域斜模态时间延迟积分技术,应用该技术的成像系统可生产用于超分辨的具备特定亚像素位移的序列图像。

2 数字域斜模态时间延迟积分技术

2.1 数字域 TDI 技术

基于数字域 TDI 技术的成像系统以面阵 CMOS 传感器作为基本成像器件,利用 CMOS 传感器局部开窗能力,实现特定级次成像,具体像素积分过程如图 1 所示。

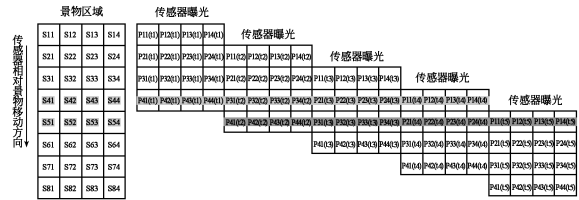


图 1 数字域 TDI 像素积分过程

Fig.1 Digital domain TDI integration process

图 1 过程为典型的 4 级数字域 TDI 过程,从图中可知,目标区域映射至面阵 CMOS 传感器可视为一 8×4 矩阵表示,数字域 TDI 过程面阵传感器采取 4×4 局部开窗模式。以目标区域第四行为例,传感器第一次曝光时间内,第四行 S41、S42、S43、S44 四个像素成像在窗口第四行 P41(t_1)、P42(t_1)、P43(t_1)、P44(t_1)处;控制传感器与目标相对运动速度与行转移时间同步,在第二次曝光 t_2 时间内,目标区域第四行像素恰好在传感器窗口第三行成像,所成像素为 P31(t_2)、P32(t_2)、P33(t_2)、P34(t_2);第三次、第四次曝光同理。在经历 4 次曝光后,目标区域第四行成像结果为 4 次分时成像效果的数字域累加和,即:

$$\begin{cases} S41 = P41(t_1) + P31(t_2) + P21(t_3) + P11(t_4) \\ S42 = P42(t_1) + P32(t_2) + P22(t_3) + P12(t_4) \\ S43 = P43(t_1) + P33(t_2) + P23(t_3) + P13(t_4) \\ S44 = P44(t_1) + P34(t_2) + P24(t_3) + P14(t_4) \end{cases} \quad (1)$$

其余目标区域矩阵行成像同理。

基于以上分析,数字域 TDI 成像模型可简化如公式(2)所示。其中 i 与 j 分别代表目标区域矩阵的行与列; M 表示积分级数; S 为输出目标

区域各像素位置信号, S 中参数依次为: 目标区域行、列; P 为传感器输出像素信号, P 中参数依次为: 传感器窗口行、列、曝光时间。

$$S(i, j) = P(M, j, t(1+i-M)) + P(M-1, j, t(2+i-M)) + \dots + P(1, j, t(i)). \quad (2)$$

2.2 倾斜采样模型

成像过程采用倾斜采样模式主要应用的是一种亚像元成像的思想, 周春平等^[7]在该领域进行了比较深入的研究。倾斜采样基本模型如图 2 所示。

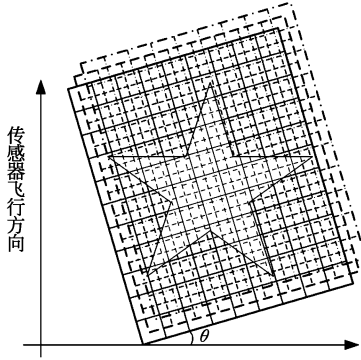


图 2 倾斜采样模型

Fig.2 Tilting sampling model

从图中可以看出, 当传感器以倾斜模式安置且随卫星运动成像时, 本应一次采样成像的目标区域会进行多次采样成像, 且每次采样间隔小于传感器像元尺寸。倾斜模式下采样步长 d_s 随倾角 θ 的变化而改变, 从而导致倾斜采样分辨率提升倍数 f 随之改变, 如公式 (3)、公式 (4) 所示, 式中 d 为倾角为 0 即传统采样模式下的采样步长。

$$d_s = d / \sqrt{1 + (1/\tan\theta)^2}, \quad (3)$$

$$f = \sqrt{1 + (1/\tan\theta)^2}. \quad (4)$$

由于采样步长变化为 $d / \sqrt{1 + (1/\tan\theta)^2}$, 相对传统采样频率提高 $\sqrt{1 + (1/\tan\theta)^2}$ 倍, 以 $1 + (1/\tan\theta)^2$ 次为一个周期, 则所得到的图像序列在卫星飞行方向及其垂直方向的采样密度提升为传统采样密度的 $\sqrt{1 + (1/\tan\theta)^2}$ 倍。

利用倾斜模式采样获取的一系列具有亚像素位移的序列图像, 通过图像超分辨率重构算法^[8-11], 即可获得高分辨率图像。

2.3 DT-TDI 技术

为解决数字域 TDI 技术存在的低空间分辨率问题, 本文对数字域斜模态时间延迟积分技术 (即

DT-TDI 技术) 进行研究。DT-TDI 技术主要将倾斜采样理论引入数字域 TDI 成像过程, 仍然采用传感器倾斜放置的模式, TDI 过程配合推扫过程进行, 由于倾角 θ 的存在, 此时的数字域积分已经不是常规情况下的对位累加模式, 而变成了如图 3 所示的情况。

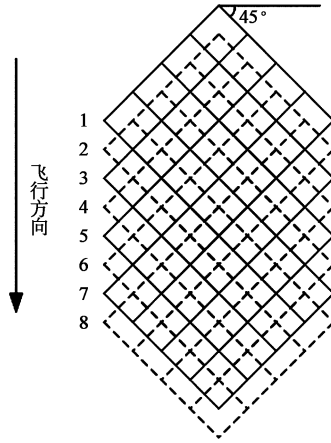


图 3 DT-TDI 过程示意图

Fig.3 DT-TDI process diagram

图 3 以 45° 倾角为例进行 DT-TDI 过程的说明, 假设正常采样模式下采样步长等于传感器像元尺寸 α , 倾斜后采样步长变为 $\alpha/\sqrt{2}$, 此时, 每次采样与前次相比横纵方向均偏移 0.5 个像素值, 即采样像素每隔一步实现一次数据横纵一个像元的错位重叠, 我们将其视为一个成像周期。将图中实线与虚线网格区域分别视为奇数 (1, 3, 5, 7) TDI 区域与偶数 (2, 4, 6, 8) TDI 区域, 两个 TDI 区域推扫过程可分别视为两组具有亚像素位移的成像模型相同的 DT-TDI 成像过程。

DT-TDI 与常规数字域 TDI 的差异在于其是非对位积分, 相邻曝光时间内存在大小为像素尺寸的像移。此时的行转移时间由无倾角情况下的 t 变为 $t/\sqrt{1 + (1/\tan\theta)^2}$ 。以其中任意一组 TDI 过程为例, 将图 3 斜模式 TDI 过程进行 45° 旋转并按照图 2 方法进行积分表达, 如图 4 所示。

与图 2 数字域 TDI 的差异在于图 2 所示过程仅有行向像移, 而图 4 过程同时还存在列向像移, 此时, 通过对成像过程像移失配进行补偿可实现奇数 TDI 区域与偶数 TDI 区域的时间延迟积分, 以图 4S41 为例, 该像素点补偿像移失配的 TDI

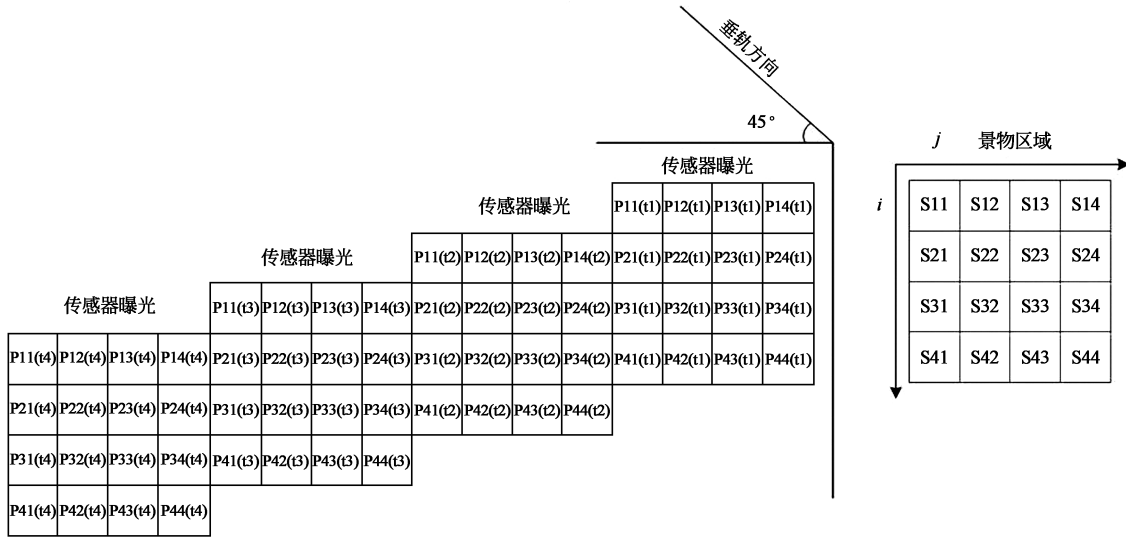


图 4 DT-TDI 像素积分过程

Fig.4 DT-TDI pixel integration process

过程可通过公式(5)实现。

$$S_{41} = P_{41}(t_1) + P_{32}(t_2) + P_{23}(t_3) + P_{14}(t_4). \quad (5)$$

以上以传感器 45° 倾斜角度为例进行了 DT-TDI 的说明,此时一个像素尺寸的像移跨度内一共采了两幅图像,因此在 DT-TDI 后获取了两幅

0.5 像素位移的可用于超分辨率的图像。当选择任意倾角时,单位像素尺度跨度内采集图像为 k , k 与 θ 的关系如公式(6)所示:

$$k = 1 + (1/\tan\theta)^2, \quad (6)$$

此时可形成 k 组具有 $1/k$ 亚像素位移的图像,每组的 DT-TDI 可整理为公式(7)所属关系模型:

$$S(i, j) = P(i, j, t(\text{int}(i \cdot \tan\theta) - M + 1)) + P(i - 1/\tan\theta, j + 1, t(\text{int}(i \cdot \tan\theta) - M + 2)) + \dots + P(i - (M - 1)/\tan\theta, j + M - 1, t(\text{int}(i \cdot \tan\theta))) = \sum_{z \in [1, M]} P(i - (z - 1)/\tan\theta, j + z - 1, t(\text{int}(i \cdot \tan\theta) - M + z)), \quad (7)$$

其中: $s(i, j)$ 代表目标观测区域像素测量值, $\text{int}()$ 表示上取整, P 代表传感器输出像素值, P 中的三个参数依次为传感器窗口的行、列、成像时刻,数字域斜模态时间延迟积分过程中,将组序列图像生成总曝光时间视为一个周期,成像公式中的时间项指的是以周期为单位的成像时刻。

根据步骤 4 确定的积分级数 M 及步骤 2 确定的倾斜角度 θ 确定面阵 CMOS 传感器沿轨方向开窗尺寸 s :

$$s = M/\tan\theta, \quad (8)$$

此模型下,若数字域 TDI 积分级数,则倾斜角度 θ 确定面阵 CMOS 传感器开窗尺寸 s ,每组之间的横向像移 Δx 与纵向像移 Δy 分别为:

$$\Delta x = a/k = a/(1 + 1/\tan^2\theta), \quad (9)$$

$$\Delta y = a/(k \cdot \tan\theta) = a \cdot \tan\theta/(1 + \tan^2\theta).$$

$$(10)$$

理论上,获取的图像组数越多,通过超分辨率重构算法重构的图像分辨率越高。

3 实验验证

为验证 DT-TDI 技术,搭建如图 5 所示的技术验证平台,实验平台主要由 DT-TDI 相机、三维调节座、图像模拟器、图像采集与处理系统构成。DT-TDI 相机安装在三维调节座上,通过三维调节座来设定相机推扫方向和飞行方向的夹角,也就是面阵 CMOS 图像传感器的倾斜角度 θ ,利用高精度图像模拟器来模拟地面测试靶标和像移速度,DT-TDI 相机对高精度图像模拟器模拟地面

测试靶标进行推扫成像,通过控制 DT-TDI 相机的采样速率来实现数字域 TDI 的像移速度匹配,DT-TDI 相机输出的图像送入图像采集与处理系统进行采集与显示,同时获取具有亚像素位移的序列图像。

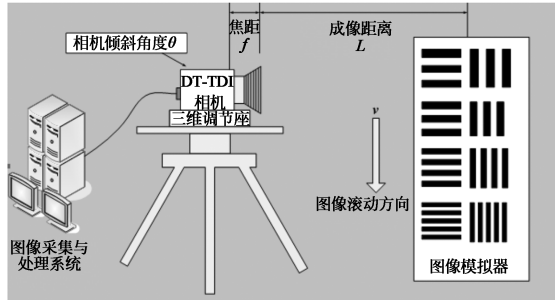


图 5 DT-TDI 技术验证平台

Fig.5 DT-TDI technical identification platform

平台的 DT-TDI 相机在数字域 TDI 相机基础上进行成像算法改进,为实现倾斜采样环境,将相机在三维调节座上倾斜一定角度进行成像。相机像元尺寸 $a = 5.5 \times 5.5 \mu\text{m}$, 焦距 $f = 8 \text{ mm}$, 成像距离 $L = 8000 \text{ mm}$, 图像模拟器模拟靶标移动速度 $v = 203.25 \text{ mm/s}$, 工作系统实物如图 6 所示。



图 6 DT-TDI 技术验证平台实物图

Fig.6 Practicality of DT-TDI technical identification platform

根据上述成像方案及成像参数,在常规成像模式($\theta = 0^\circ$)时,DT-TDI 相机成像分辨率为 $GSD = (L/f) \cdot a = 5.5 \text{ mm}$, 行转移时间为 $t = GSD/v = 27.06 \text{ ms}$, 由此可知,常规成像模式下的成像帧频 $f_1 = 1/t = 36.9 \text{ f/s}$ 。为了简化实验方案,以倾角 $\theta = 45^\circ$ 进行实验,由公式(4)可知,在斜采样帧频 $f_2 = f_1 \cdot \sqrt{1 + (1/\tan\theta)^2} = 52.26 \text{ f/s}$, 经 DT-TDI 过程后采集的两组低分辨率图像如图 7 所示。

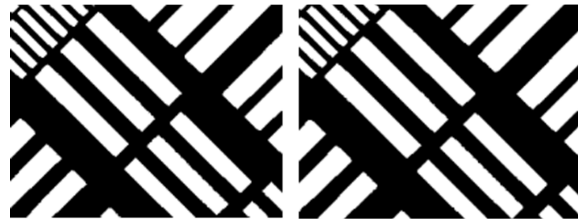


图 7 两组低分辨率图像

Fig.7 Two groups of low resolution images

利用文献[10]算法对两组低分辨率图像间的亚像素位移进行计算,计算结果表明横向像移 0.422637 , 纵向像移 0.427293 , 与理论值 0.5 之间存在误差分别为 0.1547 与 0.1454 , 误差主要源于相机倾斜摆放角度误差。利用 DT-TDI 技术获取的两组具备亚像素位移的低分辨率图像可满足用于超分辨重构的需求。

利用超分辨率重构算法(算法详见参考文献[11])对前述两幅低分辨率图像进行重构,获取的高分辨率图像如图 8 所示。将重构前的边缘像素与重构后的边缘像素进行对比,如图 9 所示,重构后边缘像素刃边均匀性及过渡性明显提升。



图 8 重构的高分辨率图像

Fig.8 High resolution image byreconstruction

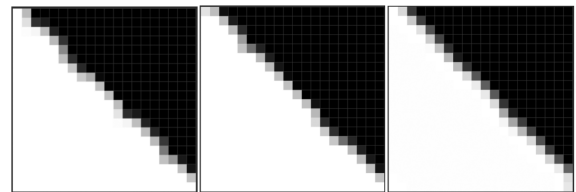


图 9 边缘像素对比(左/中:重构前;右:重构后)

Fig.9 Contrast of edge pixel(left/middle: before reconstruction; right: after reconstruction)

在以上实验平台,利用超分辨算法对带有分辨率鉴别板的靶标图像进行成像实验,获取的两组低

分辨率靶标图像如图10左、中所示,重构后的高分辨率图像如图10右所示。靶标设计过程中,数字标注的不同代表条纹间隔的差异,序号3、2、1处分别代表12 mm、8 mm、4 mm分辨率,此时DT-TDI相机成像分辨率为5.5 mm。从图10可以看出,重构前的图像在序号1处边缘模糊,而重构后的图像在序号1处边缘清晰可辨,经DT-TDI获取的图像具备用于超分辨重构的能力。

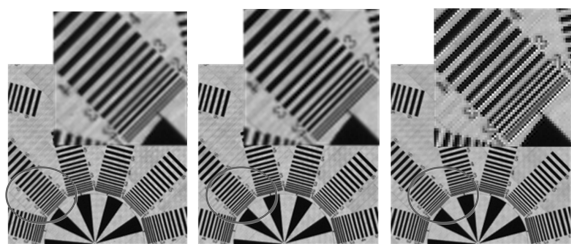


图10 靶标图像对比(左/中:重构前;右:重构后)

Fig.10 Contrast of target image(left/middle: before reconstruction; right: after reconstruction)

4 结 论

针对数字域 TDI 成像分辨率受限问题,结合倾斜采样成像思想,对用于生产序列低分辨率图像的数字域斜模态时间延迟积分技术进行研究。设计适用于不同倾斜模式下的 DT-TDI 成像方案。依据数字域 TDI 成像特点,搭建 DT-TDI 技术验证平台并对 45° 倾斜模式下的成像情况进行实验验证。实验结果表明,DT-TDI 技术可在倾斜模态成像环境下进行较好的数字域时间延迟积分,算法模型基本符合实际需求。获取的序列低分辨率图像与理论值间的误差可控制在 15% 左右,满足 DT-TDI 技术生产的数据用于超分辨重构的需求。经超分辨算法对生产的低分辨率图像进行高分辨率重构,重构后图像分辨率明显提升。

参 考 文 献:

- [1] 陶淑苹.数字域 TDI CMOS 相机调偏流方法[J].红外与激光工程,2014,43(S1):214-218.
TAO S P. Drift angle adjusting method for CMOS cameras based on TDI in digital domain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 214-218. (in Chinese)
- [2] LEPAGE G, BOGAERTS J, MEYNANTS G. Time-delay-integration architectures in CMOS image sensors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(11): 2524-2532.
- [3] 曲宏松,张叶,金光.基于数字域 TDI 算法改进面阵 CMOS 图像传感器功能[J].光学精密工程,2010,18(8):1896-1903.
QU H S, ZHANG Y, JIN G. Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1896-1903. (in Chinese)
- [4] 陶淑苹,金光.卷帘快门对数字域 TDI 成像的影响分析[J].光学学报,2015,35(3):0311001.
TAO S P, JIN G. Influence analysis on the rolling shutter for time delay and integration in digital domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0311001. (in Chinese)
- [5] 陶淑苹,金光,曲宏松,等.实现空间高分辨成像的数字域时间延迟积分 CMOS 相机设计及分析[J].光学学报,2012,32(4):0411001.
TAO S P, JIN G, QU H S, et al. Design and analysis of CMOS camera based on time delay and integration in digital domain to realize spatial high-resolution imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0411001. (in Chinese)
- [6] 王京萌,张爱武,赵宁宁,等.斜采样的倾斜角度对采样产生混叠的影响及其与分辨率的关系[J].吉林大学学报:工学版,2013,45(3):953-960.
WANG J M, ZHANG A W, ZHAO N N, et al. Influence of tilting angle on tilting sampling aliasing and relationship between aliasing and resolution [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2013, 45(3): 953-960. (in Chinese)
- [7] 周春平,田越,季统凯,等.一种提高 CCD 成像卫星空间分辨率的方法研究[J].遥感学报,2002,6(3):179-182.
ZHOU C P, TIAN Y, JI T K, et al. The study of method for improving the spatial resolution of satellite images with CCD cameras [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(3): 179-182. (in Chinese)
- [8] 郭萌,赵岩,王世刚,等.基于区域选择的红外弱小目标超分辨率复原算法[J].液晶与显示,2016,31(4):415-420.

- GUO M, ZHAO Y, WANG S G, *et al.* Infrared dim-small target super-resolution restoration algorithm based on region selection [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(4): 415-420. (in Chinese)
- [9] 何阳, 黄玮, 王新华, 等. 稀疏阈值的超分辨率图像重建[J]. *中国光学*, 2016, 9(5): 532-539.
- HE Y, HUANG W, WANG X H, *et al.* Super-resolution image reconstruction based on sparse threshold [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(5): 532-539. (in Chinese)
- [10] KEREN D, PELEG S, BRADA R. Image sequence enhancement using sub-pixel displacements [C]//*Proceedings IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Ann Arbor, MI, USA: IEEE, 1988: 742-746.
- [11] PHAM T Q, VAN VLIET L J, SCHUTTE K. Robust fusion of irregularly sampled data using adaptive normalized convolution [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2006, 2006: 083268.

作者简介:宋明珠(1992—),女,黑龙江大庆人,博士研究生,2014年于吉林大学获理学学士学位,主要从事空间光电成像、图像处理方面的研究。E-mail:songmingzhu14@mailsucas.ac.cn