



星载斜视等距扫描成像

王浩 石志城 宫辉 王军 唐绍凡

Spaceborne squint isometric scanning imaging

Wang Hao, Shi Zhicheng, Gong Hui, Wang Jun, Tang Shaofan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210390>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单根多模光纤数字扫描成像方法

Single multi-mode fiber digital scanning imaging method

红外与激光工程. 2017, 46(4): 422002–0422002(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0422002>

采空区三维激光扫描空间分辨率增强方法

Spatial resolution enhancement method of cavity 3D laser scanning

红外与激光工程. 2017, 46(10): 1006002–1006002(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201760.1006002>

激光内送粉变宽扫描成形变壁厚扭曲叶片

Variable width scanning of variable wall thickness twisted blade with laser inside-beam powder feeding

红外与激光工程. 2019, 48(8): 805002–0805002(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0805002>

无扫描宽范围多波长成像测温技术

Non-scanning wide range multi-wavelength imaging temperature measurement technology

红外与激光工程. 2021, 50(5): 20200394–1–20200394–7 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200394>

激光三维成像中双光楔扫描参数的确定及优化

Determination and optimization of Risley prisms scanning parameters in laser 3D imaging

红外与激光工程. 2020, 49(8): 20190508–1–20190508–7 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190508>

基于像素复用的SPAD阵列连续扫描三维成像

Continuous scanning 3D imaging with SPAD array based on pixel multiplexing

红外与激光工程. 2020, 49(S2): 20200375–20200375 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200375>

星载斜视等距扫描成像

王浩^{1,2}, 石志城^{1,2}, 宫辉^{1,2}, 王军¹, 唐绍凡¹

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;

2. 中国空间技术研究院天基空间目标监视技术核心专业实验室, 北京 100094)

摘要: 针对传统穿轨扫描成像方式存在的随扫描角度增大分辨率退化严重、大气程辐射差异大影响定量化应用等问题, 提出了一种基于斜视等距扫描的成像方法。首先, 介绍了该成像方法的原理, 根据几何光学理论建立了几何成像模型。然后, 基于几何成像模型, 给出了大幅宽斜视等距扫描成像过程中扫描方向与垂直扫描方向空间分辨率随扫描角度的关系式, 以及幅宽与扫描角度的关系式; 进一步给出了该成像体制, 通过卫星平台俯仰机动, 实现多角度观测时分辨率、幅宽等关系式。最后, 结合某预研星载相机进行了仿真分析。结果表明: 分辨率退化大幅减小, 在扫描角度 60° 时边缘分辨率退化相比穿轨扫描成像体制的 9.3 倍降低为 2.5 倍。为大幅宽成像边缘视场分辨率退化严重的问题提供了一种新的解决途径, 对推动超大幅宽、高分辨率、多角度星载遥感的发展具有一定参考意义。

关键词: 大幅宽; 低分辨率退化; 斜视等距扫描; 穿轨扫描

中图分类号: TP732.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210390

Spaceborne squint isometric scanning imaging

Wang Hao^{1,2}, Shi Zhicheng^{1,2}, Gong Hui^{1,2}, Wang Jun¹, Tang Shaofan¹

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory for Space-Based Target Monitoring Technology of CAST, Beijing 100094, China)

Abstract: A new spaceborne imaging method based on squint isometric scanning was presented to overcome the problems of resolution degradation and atmospheric radiation difference with scanning angle in traditional cross-track scanning imaging method. Firstly, the principle of this imaging method was introduced, and the geometric imaging model was established according to the theory of geometric optics. Then, based on the geometric imaging model, the relationship between the scanning direction spatial resolution, vertical scanning direction spatial resolution and width with the scanning angle were given. Furthermore, the expressions of resolution and width for multi-angle observation via satellite pitch were derived. Finally, the simulation results of one pre-research spaceborne imager show that the resolution degradation is greatly reduced. When scanning angle is 60°, the edge view resolution is 2.5 times of central field of view far lower than traditional cross-track scanning imaging method 9.5 times. It provides a new solution for wide width imaging and has a certain reference significance for promoting the development of super wide width, high resolution and multi-angle spaceborne remote sensing.

Key words: wide width; low resolution degradation; squint isometric scanning; cross-track scanning

收稿日期: 2021-06-09; 修订日期: 2021-09-28

基金项目: 科工局民用航天十四五预研项目

作者简介: 王浩, 男, 工程师, 硕士, 主要从事空间光学遥感总体设计工作。

0 引言

大幅宽成像可以缩短卫星的重访周期,提高观测的时间分辨率;高分辨遥感图像可以提供更精细的几何特征信息,提高目标识别能力^[1];多角度遥感通过地面目标多个方向的观察,使得对目标的观测信息更加丰富,为定量遥感提供了多元的信息,有利于提高遥感数据量化水平^[2];大幅宽、高分辨率、多角度三者结合,将会是未来对地遥感的重要发展方向。

目前超大幅宽对地成像方式主要有多载荷视场拼接、高轨成像和光机扫描成像。其中,光机扫描成像方式具有机动、灵活、容易实现且成本低的特点,在机载、航天大幅宽成像观测中得到广泛应用^[3],如:美国 MODIS^[4]、我国风云三号中分辨率成像光谱仪采用反射镜摆扫的光机扫描方案^[5],美国 VIIRS、我国海洋一号 C/D 星上定标光谱仪以及正在研制的新一代海洋水温水色仪采用主光学望远扫描的光机扫描方案^[6-9]。但超大幅宽成像时,传统光机扫描成像方式受观测斜距、地球曲率的影响,使得地面空间分辨率随扫描角度增大而迅速降低,降低视场边缘目标可探性的;同时带来观测天顶角逐渐增大,成像幅宽范围内大气斜程路径差异大,影响量化应用的问题。

文中提出了一种基于斜视等距扫描的成像方法,旨在解决大幅宽光机扫描成像过程中视场边缘地面空间分辨率急剧降低、不同像元大气程辐射差异大而影响量化应用的问题。推导了大幅宽斜视等距扫描成像过程中扫描方向与垂直扫描方向(线阵方向)空间分辨率随扫描角度的关系式,幅宽随扫描角度的关系式;进一步给出了该成像体制,通过卫星平台俯仰机动实现多角度观测时分辨率、幅宽的数学表达式,并进行了仿真分析。为大幅宽成像提供了一种新的解决途径,对推动超大幅宽、高分辨率、多角度遥感的发展具有一定参考意义。

1 穿轨光机扫描问题分析

由于受观测斜距、地球曲率的双重影响,穿轨光机扫描成像方式空间分辨率随扫描角度增大而迅速降低,导致地面轨迹存在明显的蝴蝶结效应^[10-11]。以卫星运行轨道高度 705 km、相机焦距 4250 mm、探测器像元尺寸 10 μm 、扫描角度范围 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 为例,

图 1 给出了中心视场像元沿轨 GSD_x 及穿轨 GSD_y 两个方向分辨率的退化情况,可以看出沿轨与穿轨方向地面分辨率从星下点 1.66 m 分别退化到扫描边缘 4.25、15.44 m,分辨率退化严重。图 2 给出了 1976 年美国标准大气、乡村可视距离 5 km 气象条件下,该相机从星下点到视场边缘成像,可见到长波红外全谱段的大气程辐射在相机入瞳总能量的占比随观测天顶角的变化趋势,星下点观测天顶角为 0° 时大气程辐射占比为 42.2%,扫描边缘观测天顶角为 60° ,大气程辐射增加到 56.32%,大气程辐射差异大。为此,文中提出了一种斜视等距扫描成像方案用以解决上述问题。

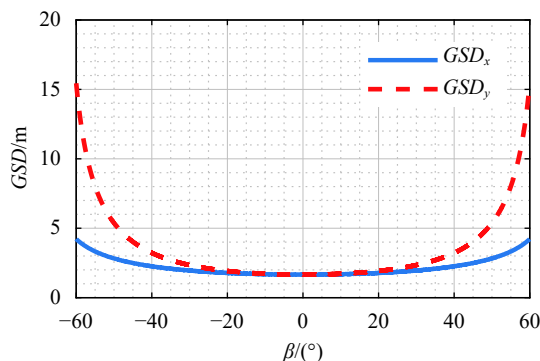


图 1 穿轨扫描分辨率

Fig.1 GSD of cross-track scanning imaging

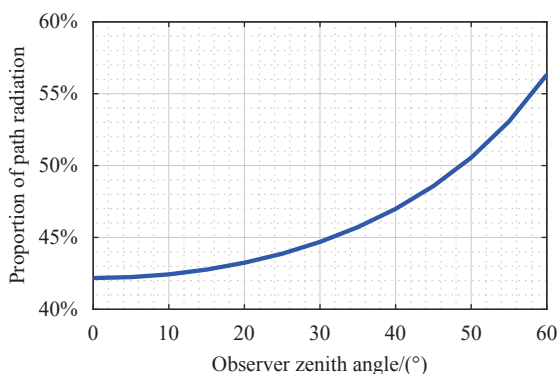


图 2 大气程辐射在相机入瞳总能量的占比

Fig.2 Proportion of atmospheric radiation in the total energy of imager entrance pupil

2 斜视等距扫描成像

2.1 成像原理

如图 3 所示,建立坐标系, X 方向为卫星平台飞行方向, Z 方向指向地心, Y 方向满足右手坐标系扫描

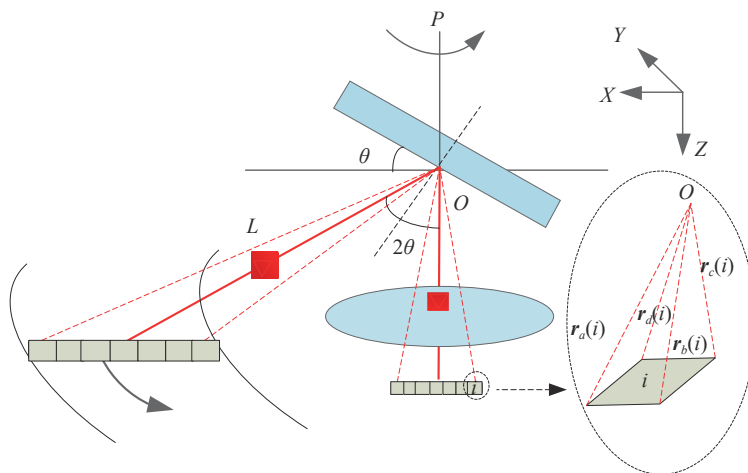


图 3 成像原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of imaging principle

镜与 XOY 平面夹角为 θ , 扫描镜旋转轴为 P , 卫星不姿态机动时, P 轴与 Z 方向平行。光学系统光轴方向与 Y 轴平行, 探测器位置固定, 线阵方向平行于 X 轴, 垂直线阵方向平行于 Y 轴。扫描成像过程中, 探测器任一像元 i 扫描的物方矢量为圆锥形, 对应的探测斜距相同, 地面投影扫描轨迹为环带, 中心视场像元对应的观测天顶角为 2θ 。因此, 可以消除传统穿轨光机扫描成像时探测斜距对分辨率的影响。此外, 采用斜视等距观测时大气路径相同, 大幅宽成像时不同视场的大气程辐射接近, 利于降低大气程辐射的影响及载荷的量化应用。

2.2 矢量模型

如图 1 所示, 任一像元 i 的像方矢量用矩形四个角点的单位化矢量表示: $\mathbf{r}_i = [\mathbf{r}_a(i), \mathbf{r}_b(i), \mathbf{r}_c(i), \mathbf{r}_d(i)]$ 。根

$$S_{P, \beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta + 2P_x^2 \sin^2 \beta / 2 & -P_z \sin \beta + 2P_x P_y \sin^2 \beta / 2 & P_y \sin \beta + 2P_x P_z \sin^2 \beta / 2 \\ P_z \sin \beta + 2P_x P_y \sin^2 \beta / 2 & \cos \beta + 2P_y^2 \sin^2 \beta / 2 & -P_x \sin \beta + 2P_y P_z \sin^2 \beta / 2 \\ -P_y \sin \beta + 2P_x P_z \sin^2 \beta / 2 & P_x \sin \beta + 2P_y P_z \sin^2 \beta / 2 & \cos \beta + 2P_z^2 \sin^2 \beta / 2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

矢量 $\mathbf{P} = [P_x, P_y, P_z]^T$ 为 P 轴的单位方向矢量。卫星不姿态机动时, P 轴与 Z 方向平行。

2.3 地面分辨率、幅宽计算模型

如图 4 所示, 相机探测器任一像元 i 的四个物方矢量 $\mathbf{r}_E(i, \beta)$ 在地面的投影点为 a', b', c', d' , 则投影点指向地心的向量 $\mathbf{s}_{a'}$ 可表示为:

$$\mathbf{s}_{a'} = L_{a'} \cdot \mathbf{r}_{a'}(i, \beta) + (R+H)[0, 0, 1]^T \quad (4)$$

据光学反射矢量基本理论, 对应的单位化物方矢量 $\mathbf{r}_E(i, \beta) = [\mathbf{r}_{a'}(i, \beta), \mathbf{r}_{b'}(i, \beta), \mathbf{r}_{c'}(i, \beta), \mathbf{r}_{d'}(i, \beta)]$ 可以由像方矢量 \mathbf{r}_i 及法线向量 $\mathbf{N}_\beta = [N_{\beta,x}, N_{\beta,y}, N_{\beta,z}]^T$ 决定的反射矩阵 $\mathbf{R}_N(\beta)$ 线性表示^[12]:

$$\mathbf{r}_E(i, \beta) = \mathbf{R}_N(\beta) \mathbf{r}_i(i) = \begin{bmatrix} 1 - 2N_{\beta,x}^2 & -2N_{\beta,x}N_{\beta,y} & -2N_{\beta,x}N_{\beta,z} \\ -2N_{\beta,x}N_{\beta,y} & 1 - 2N_{\beta,y}^2 & -2N_{\beta,y}N_{\beta,z} \\ -2N_{\beta,x}N_{\beta,z} & -2N_{\beta,y}N_{\beta,z} & 1 - 2N_{\beta,z}^2 \end{bmatrix} \mathbf{r}_i(i) \quad (1)$$

当扫描角度 $\beta = 0^\circ$ 时, 扫描镜法线与 X 轴、 Z 轴、探测器线阵在同一平面内, 初始法线矢量为 $\mathbf{N}_0 = [\sin \theta, 0, \cos \theta]^T$ 。当扫描镜绕 P 轴转动时, 法线矢量为^[13]:

$$\mathbf{N}_\beta = S_{P, \beta} [\sin \theta, 0, \cos \theta]^T \quad (2)$$

式中: $S_{P, \beta}$ 为转动矩阵。

式中: $L_{a'}$ 为视线斜距。

$$L_{a'} = (R+H) \cos \beta_{a'} - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \sin^2 \beta_{a'}} \quad (5)$$

式中: R 为地球半径; H 为轨道高度; $\beta_{a'}$ 为物方视线矢量 $\mathbf{r}_{a'}$ 与星下点 Z 方向的夹角。需要说明的是: 只有中心视场对应像元的 $\beta_{a'}$ 等于扫描角度 β , 其他像元取值虽然与扫描角度 β 相关, 但并不等同。

同理可得 $\mathbf{s}_b, \mathbf{s}_c, \mathbf{s}_d$, 则相机探测器线阵方向分辨

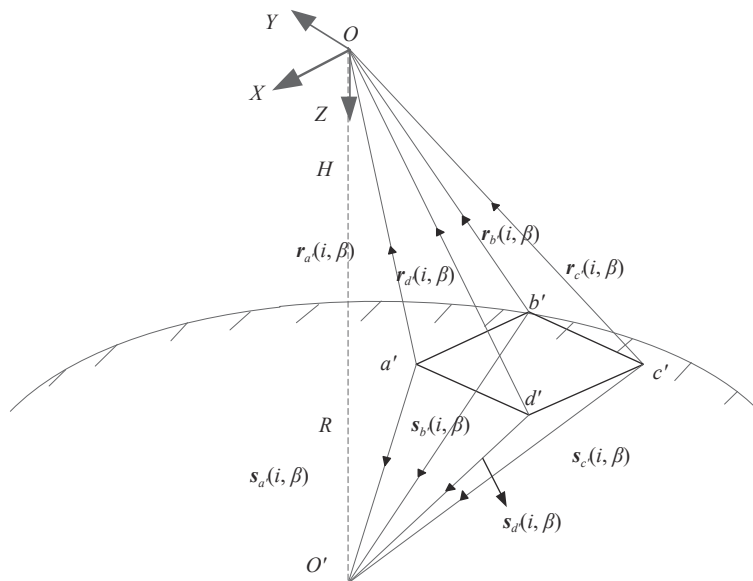


图 4 分辨率计算示意图

Fig.4 Schematic diagram of resolution calculation

率及垂直线阵方向分辨率分别为:

$$GSD_x = R \cdot \arccos\left(\frac{s_{a'}(i, \beta) \cdot s_{b'}(i, \beta)}{|s_{a'}(i, \beta)| \cdot |s_{b'}(i, \beta)|}\right) \quad (6)$$

$$GSD_y = R \cdot \arccos\left(\frac{s_{a'}(i, \beta) \cdot s_{d'}(i, \beta)}{|s_{a'}(i, \beta)| \cdot |s_{d'}(i, \beta)|}\right)$$

如图 5 所示,斜视等距扫描成像体制的有效成像幅宽为扫描环带在地表的弦长。设 r_{w_s}, r_{w_e} 分别为探测器线阵中心视场像元(任取一个角点)扫描对应的物方起始向量与终止向量,可用公式(1)~(3)联合求得。 r_{w_s}, r_{w_e} 对应的地面扫描环带起始点与终止点分别为 w_s, w_e , 对应的指向地心向量为 s_{w_s}, s_{w_e} , 其计算过程同

公式(4), 则幅宽公式如下:

$$W = R \cdot \arccos\left(\frac{s_{w_s} \cdot s_{w_e}}{|s_{w_s}| \cdot |s_{w_e}|}\right) \quad (7)$$

下面进行卫星运行轨道高度 705 km、相机焦距 4250 mm、探测器像元尺寸 $10 \mu\text{m}$ 、 θ 取 27.5° 进行相机斜视等距扫描成像时,分辨率和幅宽随扫描角度的变化分析。图 6 给出了线阵方向分辨率 GSD_x 及垂直线阵方向分辨率 GSD_y 的变化曲线,可见分辨率随扫描角度波动明显优于图 2 所示的穿轨扫描成像方式。为与传统穿轨扫描方式进行定量对比,采用各自扫描角度为 0° 时的分辨率进行归一化处理,结果如图 7 所示,可见线阵方向分辨率 GSD_x 两种扫描方式差距不大,但穿轨扫描方式垂直线阵方向分辨率 GSD_y 随扫

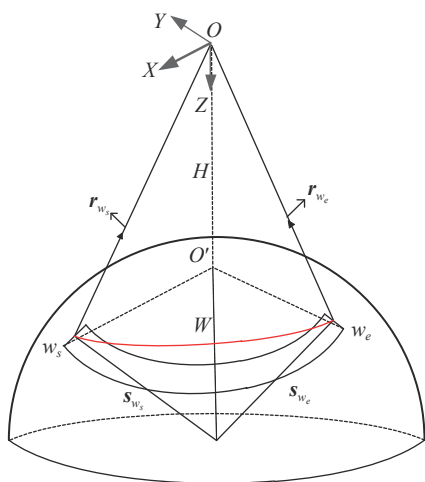


图 5 幅宽计算示意图

Fig.5 Schematic diagram of width calculation

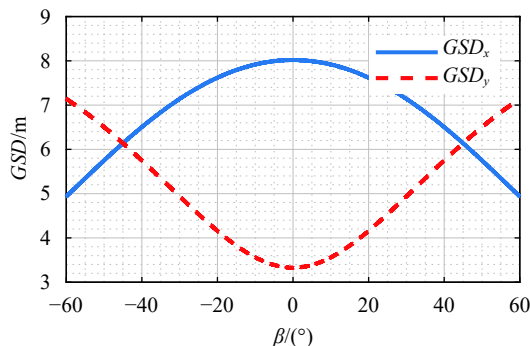


图 6 分辨率随扫描角度变化曲线

Fig.6 Curve of GSD changes with scanning angle

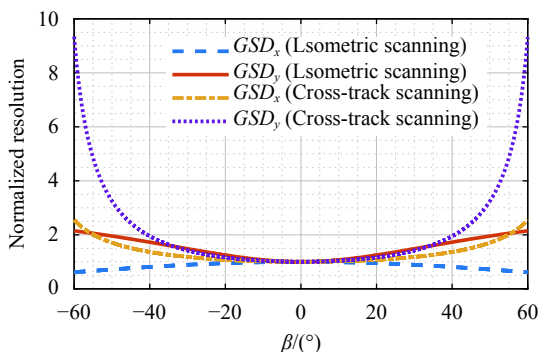


图 7 归一化分辨率随扫描角度变化曲线

Fig.7 Curve of normalized GSD changes with scanning angle

描角度增大急剧增加,扫描角度为 60°时的分辨率为星下点(扫描角度 0°)时的 9.3 倍,而文中斜视等距扫描仅为 2.5 倍。

图 8 给出了扫描幅宽随扫描角度的变化趋势,在扫描范围为 120°(β = ±60°) 时,可实现幅宽 ≥ 2000 km。

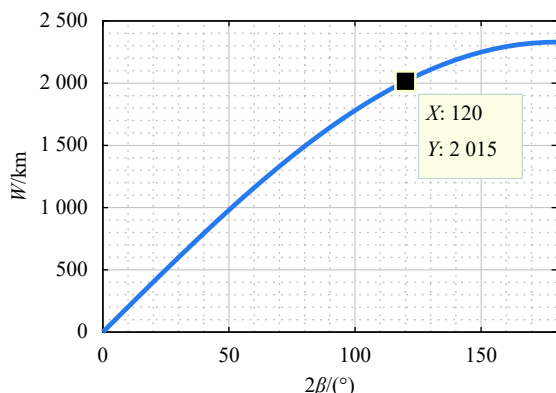


图 8 幅宽随扫描角度变化曲线

Fig.8 Curve of width changes with scanning angle

3 卫星机动多角度成像几何参数分析

相机通过卫星俯仰机动实现多角度成像,俯仰机动为绕 Y 轴逆时针旋转 γ,则探测器任一像元像方矢量、初始法线矢量、扫描镜旋转轴向量分别转化为:

$$r_{l,\rho} = R_y(\rho)r_l \quad (8)$$

$$N_{0,\rho} = R_y(\rho)N_0 \quad (9)$$

$$P_\rho = [P_{x,\rho}, P_{y,\rho}, P_{z,\rho}] = R_y(\rho)P \quad (10)$$

将公式 (10) 中 $[P_{x,\rho}, P_{y,\rho}, P_{z,\rho}]$ 代入公式 (3) 中得到转动矩阵为 $S_{P,\beta,\rho}$,进而得到卫星机动后,扫描过程中的法线矢量为 $N_{\beta,\rho} = S_{P,\beta,\rho}N_{0,\rho}$,对应的反射矩阵为

$R_N(\beta,\rho)$,结合像方矢量得到物方矢量为:

$$r_E(i, \beta, \rho) = R_N(\beta, \rho)R_y(\rho)r_l \quad (11)$$

将公式 (11) 的计算结果代入公式 (4)~(6) 中可以计算得到卫星机动后的分辨率;代入公式 (4)、(5)、(7) 中可以计算得到卫星机动后的幅宽。下面同样以卫星运行轨道高度 705 km、相机焦距 4250 mm、探测器像元尺寸 10 μm、θ = 27.5° 进行卫星俯仰机动后的分辨率、幅宽等几何参数分析。图 9 所示为卫星逆时针俯仰 55° 和卫星不机动时两个方向分辨率的对比,可见由于卫星机动导致相机视线向星下点方向移动,斜距缩短,分辨率提高。图 10、图 11 所示分别为给出相同扫描角度 β = [-60°, 60°] 时,卫星绕 Y 轴逆时针俯仰机动 ρ 角度后的地面轨迹及幅宽,可见随着卫星俯仰机动角度的增加,幅宽先减小后增大,在 ρ = -36° 时,幅宽最小为 1510 km。

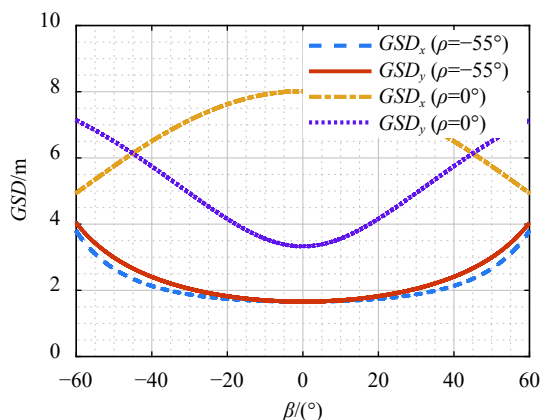


图 9 卫星机动和不机动分辨率对比

Fig.9 Comparison of GSD between satellite maneuver and non maneuver

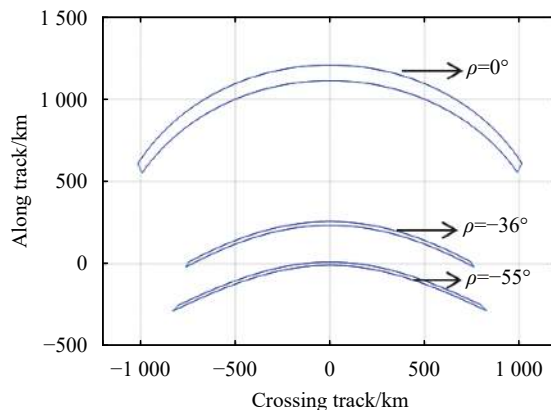


图 10 不同俯仰角度时地面轨迹

Fig.10 Ground trajectory at different pitch angles

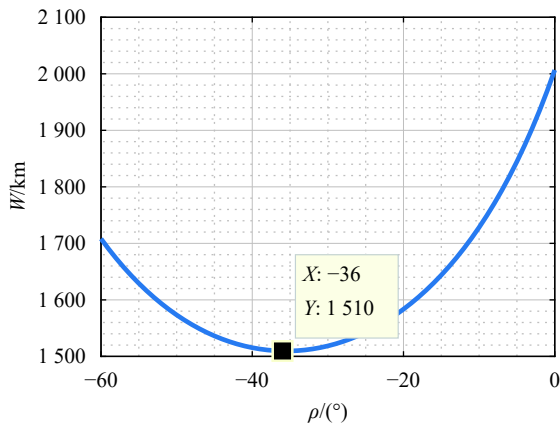


图 11 幅宽随俯仰角度变化曲线

Fig.11 Curve of width changes with pitch angle

4 结束语

大幅宽、高分辨率、多角度是未来对地遥感的重要发展方向,针对目前穿轨扫描成像体制存在的分辨率退化严重、大气程辐射差异大影响量化应用等问题,提出了一种基于斜视等距扫描的成像方法,对大幅宽、高分辨率、多角度遥感探测的发展具有参考意义。给出了:(1)大幅宽斜视等距扫描成像过程中,扫描方向与垂直扫描方向空间分辨率随扫描角度的关系式;(2)幅宽随扫描角度的关系式;(3)通过卫星平台俯仰机动,实现多角度观测时分辨率、幅宽关系式。将文中方法应用于某预研星载大视场相机,视场边缘分辨率退化相比穿轨扫描成像体制的 9.3 倍降低为 2.5 倍。

同时,注意到斜视等距扫描方式在两个方向分辨率变化规律不同,这主要是由扫描镜扫描引入像旋导致的,像旋会影响遥感图像的解译应用,如何针对这种斜视等距扫描体制进行消旋是载荷设计及影像应用的重点,后续将持续深入研究。

参考文献:

[1] Liu Xiaoyong, Cao Kaiqin, Sun Dexin, et al. Scanning control of spaceborne infrared imaging with super-swath and low distortion [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 208-217. (in Chinese)

[2] Zhao Yanhua, Zhao Limin. Analysis of advantages of multi-angle infrared observation [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(1): 30-37. (in Chinese)

[3] Zhao Zongcun, Ding Xuezhuan, Yang Bo, et al. Design and analysis of super large width and low distortion imaging system [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(6): 732-738. (in Chinese)

[4] Xiong X, Sun J, Xie X, et al. On-orbit calibration and performance of aqua MODIS reflective solar bands [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 48(1): 535-546.

[5] Yang Z, Lu N, Shi J, et al. Overview of FY-3 payload and ground application system [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4846-4853.

[6] Xiong X, Butler J, Chiang K, et al. VIIRS on-orbit calibration methodology and performance [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2014, 119(9): 5065-5078.

[7] Xiong X, Butler J, Chiang K, et al. VIIRS on-orbit calibration and performance update [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2014: 1389-1392.

[8] Zhang Keli, Zhang Yongchao, Ma Yue. Design of on orbit cross calibration method for HY-1C/D satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(2): 24-29. (in Chinese)

[9] Li Xiao, Yu Tingting, Wang Chun. Design and implementation of a new half-angle mirror steering mechanism with high accuracy [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, 40(4): 76-85.

[10] Cheng Shaoyuan, Zhang Li, Gao Weijun, et al. Geometric parameters analysis of large FOV space camera when rolling [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 198-203. (in Chinese)

[11] Shi Zhicheng. Research on scan width variation for optical mechanical scanner [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(1): 12-17. (in Chinese)

[12] Zhang Shuqing, Zhang Yuan, Zhou Chenghao, et al. Image motion model of azimuthally photography for satellite borne TDICCD camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1823-1829. (in Chinese)

[13] Liu Yinnian. Analysis of the imaging characteristics and scanning traces of the 45° rotating scanning mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(1): 110-115. (in Chinese)