

航天相机环扫成像模式设计

宋明珠^{1,2}, 曲宏松¹, 张贵祥¹, 金光¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 小卫星技术国家地方联合工程研究中心,
吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了满足敏捷卫星广域搜索需求, 设计了航天相机环扫成像模式。建立环扫成像模型, 通过对环扫成像原理的分析, 设计了成像的最优地面轨迹, 并分析了此时临界卫星旋转速度与轨道速度、环扫临界系数、帧间重叠率的关系; 同时基于地面轨迹设计了确定曝光时间、帧频等成像参数解算方案。通过 Satellite Tool Kit(STK)软件对成像模型进行仿真, 并对成像几何参数进行分析, 结果表明: 在轨道高度 H 为 500 km, 像素尺寸 a 为 $4\ \mu\text{m}$, 焦距 f 为 1 m, 轴向像元数 M 为 50 000 时, 随着相机倾角 ζ 的增加, 地面像元分辨率与幅宽逐渐增大; ζ 等于 10° 、 20° 、 30° 、 40° 时, 地面幅宽分别提升为星下点成像时的 1.96、3.10、4.58、6.85 倍。

关键词: 成像模式; 环扫; 几何参数; 地面轨迹

中图分类号: TP701 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0718001

Design of aerospace camera circular scanning imaging model

Song Mingzhu^{1,2}, Qu Hongsong¹, Zhang Guixiang¹, Jin Guang¹

(1. National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to meet the needs of wide area search using agile satellite, the aerospace camera circular scanning imaging model was designed. Based on analyzing the principle of the circular scanning imaging, the optimal ground track was designed and the relationship between the critical spin speed of the satellite and the orbital velocity, the critical circular scanning coefficient, the overlap rate was analyzed, the circular scanning model was established. At the same time, the exposure time, frame rate and other imaging parameters were determined based on the ground track design. The imaging model by STK software was simulated, and the imaging geometric parameters were analyzed. The result shows that when the orbital height H is 500 km, the pixel size a is $4\ \mu\text{m}$, the focal length f is 1 m and the axial pixel number M is 50 000, the ground sample distance and swath width increase gradually with the increase of the camera inclination ζ , when ζ equals to 10° , 20° , 30° , 40° , the swath width raises to 1.96, 3.10, 4.58, 6.85 times compared with nadir imaging.

Key words: imaging model; circular scanning; geometric parameters; ground track

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-03-10

基金项目: 科技部重点专项(2016YFB0501202); 吉林省科技发展计划(20170101164JC)

作者简介: 宋明珠(1992-), 女, 博士生, 主要从事光电成像方面的研究。Email: songmingzhu14@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 金光(1958-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事空间光学传感器总体方面的研究。Email: jing@ciomp.ac.cn

0 引言

航天遥感具有观测范围大、重访周期短、不受领土限制等优点,在军事侦察、资源勘查、国土普查、环境监测、农业调查等方面得到了广泛应用^[1]。近年来,敏捷卫星发展迅速,其灵活机动性为拓展多种灵巧成像模式提供了可能。目前,针对不同的应用需求,设计特殊的成像模式成为敏捷卫星的一个重要特色。杨秀彬^[2]等为实现凝视卫星跟踪成像,设计了数字域时间延迟积分时间 CMOS 相机高分凝视成像模式,并在此基础上进行高分 CMOS 相机垂轨引导式凝视搜索成像设计^[3];章登义^[4]为满足敏捷卫星应急观测强时效性需求设计了面向目标区域的单轨调度方法;余婧^[5]等针对长宽明显大于相机幅宽的区域目标进行成像规划,设计了同轨多条带拼图成像模式;王亚敏^[6]等为实现卫星大区域面积一轨侦察成像,设计了高分 CMOS 相机沿轨长条带钟摆式搜索成像模式;Nadoushan^[7]等基于数论设计了重复地面轨迹的方法,提升了有效载荷的性能;Yang^[8]等基于特定步长搜索设计了敏捷卫星多条带成像模式的最优调度方法;Kim^[9]等设计了幅宽逐行扫描对地观测成像模式,以克服合成孔径雷达扫描模式引起的扇贝局限性。

文中针对卫星广域搜索成像需求,考虑现有成像模式下传感器靶面大小及像素尺寸对成像幅宽、分辨率造成的制约,设计航天相机的环扫成像模式。该模下载荷光轴与平台天顶指向成一定角度,充分利用平台机动能力实现动中成像,进而在不扩大探测器靶面、不影响成像分辨率的前提下实现成像视场的拓展。

1 环扫成像模型

1.1 坐标系定义

航天相机环扫成像模式设计过程涉及卫星轨迹、相机参数设置、地面坐标点标定等一系列模型的建立,首先需要定义满足一定映射关系的参考坐标系,如图 1 所示。

(1) 地球惯性坐标系 I

地球惯性坐标系以地心为原点, I_3 轴指向轨道面与赤道面交点, I_2 轴指向北极, $I_1=I_2 \wedge I_3$ 。

(2) 地球坐标系 E

原点与 I 系原点重合, E_2 指向北极,整体绕 E_2 在 I 系内以角速度 ω 逆时针旋转。

(3) 轨道坐标系 B

原点为卫星质心, B_1 指向轨道前向, B_3 过 I 系原点指向天顶, $B_2=B_3 \wedge B_1$ 。

(4) 地理坐标系 G

原点为相机视轴与地表交点, $G_1 // B_1$, G_3 过 I 系原点指向天顶, $G_2=G_3 \wedge G_1$ 。

(5) 卫星坐标系 S

原点为卫星质心,以三轴姿态角(横滚 φ 、俯仰 θ 、偏航 ψ)分别绕 B_1 、 B_2 、 B_3 旋转。

(6) 相机坐标系 C

以相机物镜主点为原点,当相机无角度倾斜时,与卫星坐标系重合。

(7) 像面坐标系 P

以像面中心为原点,相机坐标系沿 C_3 平移焦距 f 即可获得。

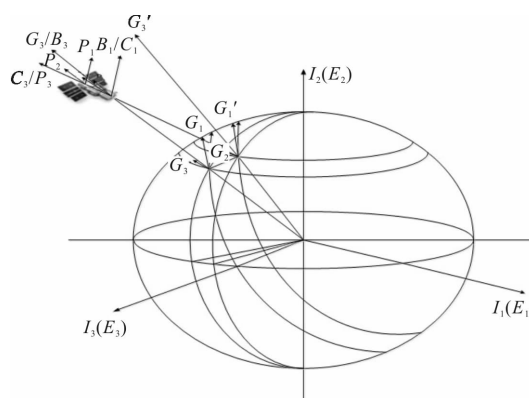


图 1 各参考坐标系图示

Fig.1 Diagram of reference coordinate system

1.2 环扫成像原理

航天相机环扫成像主要解决传统成像模式视野受限问题。传统成像过程中,相机与卫星坐标系重合,相机光轴指向与卫星坐标轴 S_3 平行;环扫成像通过设置相机光轴与 S_3 轴间成一定倾角实现视场的外向拓展,同时结合平台绕天顶方向的旋转运动实现成像区域的快速环扫。

相机与平台安装关系如图 2 所示,相机采用面阵 CMOS 传感器进行成像。从图中可知,在倾角 ζ 作用下,成像区域由原来的 $ABCD$ 变为 $EFGH$ 。结合卫

星旋转后,成像区域地面轨迹由原来如图 3(a)所示的直线式条带变为如图 3(b)所示的类地面螺旋线式条带,成像幅宽由 SW_0 拓宽为 SW 。

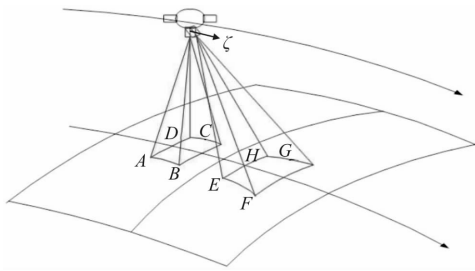
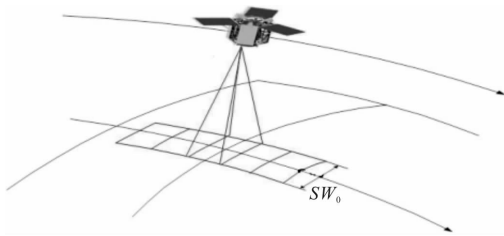


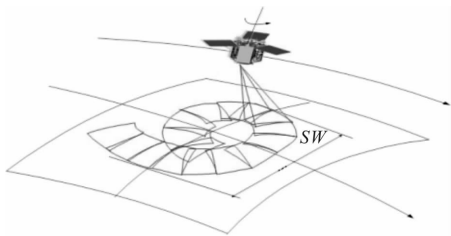
图 2 相机与卫星平台以倾角 ζ 安装

Fig.2 Camera and satellite platform are installed at an inclination angle ζ



(a) 传统推扫成像

(a) Classical push broom imaging



(b) 环扫成像

(b) Circular scanning imaging

图 3 地面轨迹

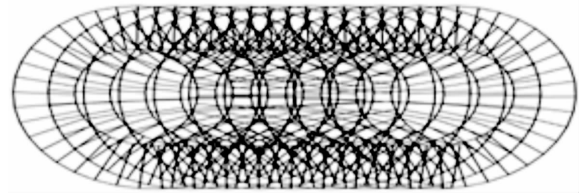
Fig.3 Ground track

环扫成像过程中,通过合理选取相机倾角及平台机动速度的设置,可完成目标区域的完全覆盖;通过合理的采集时间控制,可实现无遗漏区域摄影情况下的数据量最小化;通过合理的曝光控制,可保证成像质量不受像移的影响。利用环扫成像模式,可将成像区域范围由数十千米拓宽为数百千米,这是传统成像模式无法企及的特点,在许多特定场合,尤其是广域视场侦察搜索等方面可发挥重要作用。

1.3 最优地面轨迹设计

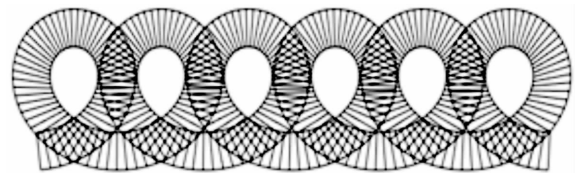
环扫成像过程中,一旦相机与卫星间的安装倾

角 ζ 固定,传感器的地面覆盖模型的变化主要由卫星旋转速度决定。如卫星运动旋转速度无法与倾角 ζ 匹配,则会出现过拍摄(某些区域重复拍摄)或欠拍摄(某些区域漏拍)的情况,如图 4 所示。



(a) 过拍摄

(a) Over-imaging



(b) 欠拍摄

(b) Lacking-imaging

图 4 环扫成像

Fig.4 Circular scanning imaging

为保障环扫地面覆盖的合理性,需进行地面轨迹最优化模型的设计。在数百千米成像幅宽范围可将地球视为球体,假设此时的轨道高度为 H ,相机固定倾角 ζ (该角度与地面和光轴间夹角互余),环扫成像初始状态如图 5 所示。该模式下的临界卫星旋转速度与轨道速度的关系如公式(1)。

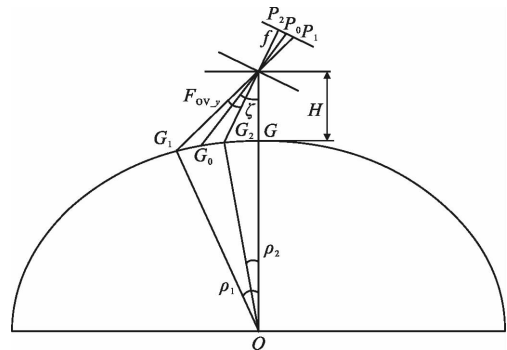


图 5 环扫初始状态模型

Fig.5 Model of circular scanning initial status

$$\omega_s = K \cdot (1 + \eta) \cdot 360 \cdot V_s / r \quad (1)$$

式中: V_s 为卫星轨道速度; ω_s 为卫星旋转角速度; r 根据实际情况有 r_1 、 r_2 两种选择, r_1 代表卫星初始状态下远视场点到星下点的弧长(如图 5 GG_1), r_2 代

表卫星初始状态下近视场点到星下点弧长 (如图 5 GG_2); K 为环扫临界系数, K 的选择与 r 有关, $K(r=r_1) > K(r=r_2)$, 在选定 r 的情况下, ω_s 确定时, K 越小, 地面覆盖重叠率越大; η 为轨道前向帧间重叠率, 通常选取 10% 为宜。

$$V_s = \sqrt{\frac{GM}{H+R}} \times \frac{R}{H+R} \quad (2)$$

$$r_1 = \frac{\pi R}{180} \cdot \arcsin \{ [(H+R)\cos(\zeta+F_{OV_y}/2) - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \sin^2(\zeta+F_{OV_y}/2)}] \cdot \sin(\zeta+F_{OV_y}/2)/R \} \quad (3)$$

$$r_2 = \frac{\pi R}{180} \cdot \arcsin \{ [(H+R)\cos(\zeta-F_{OV_y}/2) - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \sin^2(\zeta-F_{OV_y}/2)}] \cdot \sin(\zeta-F_{OV_y}/2)/R \} \quad (4)$$

根据图 5 关系, 公式(1)中的参数表达如公式(2)~(4)所示, 式中 F_{OV_y} 为垂轨方向的视场角。环扫成像时卫星旋转速度小于 ω_s 会导致成像区域的欠拍摄, 因此, ω_s 为最小旋转速度。

1.4 成像参数解算

曝光时间与成像帧频是影响环扫成像图像质量的主要因素, 直接决定着整体搜索区域的清晰度与目标区域的可识别性。

环扫相机采用 CMOS 传感器作为成像器件, 为保障成像质量, 需令一次曝光时间内的像移量小于一个像元。假设传感器像元尺寸为 $a \times a$, 此时的曝光时间 t_{exp} 设置需满足:

$$t_{exp} \leq \min(a/V_{p1}, a/V_{p2}) \quad (5)$$

式中: V_{p1} 为延轨方向的像移速度; V_{p2} 为垂轨方向的像移速度。

根据前述参考轨道坐标系的定义, 传统星下点成像时地理坐标系下任意景物点 G 在 t 时刻的像移速度可由七次坐标变换求得^[10-11]。环扫成像的特殊之处在于, 在轨道坐标系向相机坐标系转换过程中, 由于卫星旋转运动的存在, 在原有保障对地指向的三姿角度与角速度基础上, 卫星瞬时坐标系相当于引入了实时变化的偏航角度; 由于相机倾角的存在, 卫星坐标系变换至相机坐标系还需绕 S_1 轴旋转角度 ζ 。此时, 地理坐标系到相面坐标系的变换过程如图 6 所示。

其中, R 为地球半径; H 为卫星轨道高度; h 为景物处高程; i_0 为轨道倾角; f 为相机镜头焦距; $\gamma = \gamma_0 + V_s \cdot t$, γ_0 为在摄影时刻在轨道平面卫星到降交点

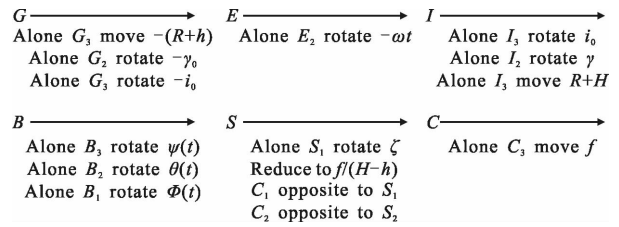


图 6 坐标变换示意图

Fig.6 Diagram of coordinate transformation

对应的中心角; $\psi(t) = \psi + \psi' \cdot t$, $\theta(t) = \theta + \theta' \cdot t$, $\phi(t) = \phi + \phi' \cdot t$, ψ 、 θ 、 ϕ 、 ψ' 、 θ' 、 ϕ' 分别为卫星坐标系相对于轨道坐标系在摄影时刻的偏航角、俯仰角、横滚角与偏航角速度、俯仰角速度、横滚角速度。此时的偏航角、偏航角速度是旋转角速度的函数, 为:

$$\phi = \phi_0 + \text{rem}(\omega_s \cdot t/360) \quad (6)$$

$$\phi' = \frac{\phi(t) - \phi(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (7)$$

式中: ϕ_0 为卫星初始时刻偏航角度; $\text{rem}()$ 表示取余; Δt 为卫星间隔姿态调整时间跨度。对像面 P 的延轨、垂轨方向像移矢量 P_1 、 P_2 进行微分后可获得延轨方向与垂轨方向的像移速度 V_{p1} 、 V_{p2} :

$$V_{p1} = \frac{dP_1}{dt} |_r, \quad V_{p2} = \frac{dP_2}{dt} |_r \quad (8)$$

面阵 CMOS 传感器单帧成像数据量较大, 为保障最小数据量条件下的地面区域全覆盖, 需对成像帧频进行规划。面阵相机单帧地面覆盖可视为球面梯形, 短时内多帧连续成像的地面覆盖近似为环形, 如图 7 所示。

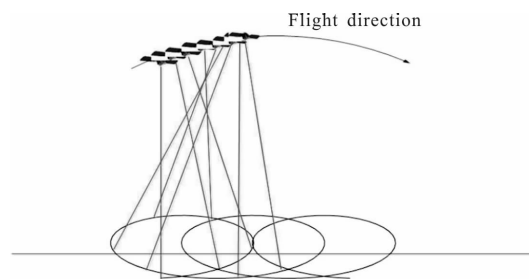


图 7 帧间覆盖关系

Fig.7 Overlap relation of frames

星载成像通常采用传感器垂轨交错拼接的方式拓宽幅宽, 因此垂轨像元数远多于延轨像元数, 此时, 远视场点像素可实现帧间搭接是近视场点实现帧间搭接的充分条件。

基于以上分析, 以远视场向为基准, 卫星旋转

360°所需的成像帧数可表达为:

$$N = \frac{(1+\lambda) \int_0^{2\pi} \sqrt{[(-r_1 \cdot \cos\alpha)']^2 + [(r_1 \cdot \sin\alpha + V_s \cdot t)']^2} d\alpha}{[(H+R)\cos\zeta - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \sin^2\zeta}] \cdot F_{OV_x}} \quad (9)$$

式中: $\alpha = \omega_s \cdot t$; F_{OV_x} 为延轨向视场角; λ 为帧间重叠率, 基于后续拼接、校正及搜索算法的需求 λ 在 0~1 之间取值, 该值至少需要满足图像几何校正后仍有 10% 左右的图像搭接可能。此时, 环扫成像帧频为:

$$F = \frac{N \cdot \omega_s}{2\pi} \quad (10)$$

2 环扫成像仿真

传统成像模式下, 条带式地面轨迹的 STK 仿真如图 8 所示。

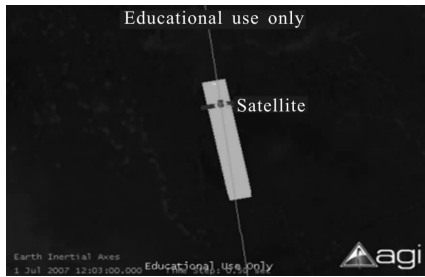
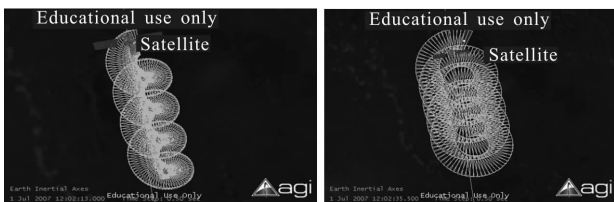


图 8 传统地面轨迹仿真图

Fig.8 Classical track simulation image

环扫成像下, 根据上文分析, 假设卫星处于 500 km 轨道高度, 此时的轨道速度近似为 7.06 km/s; 取轨道前向帧间重叠率 η 为 10%, 相机半视场角 10.5° 。环扫螺旋条带式地面轨迹的几种 STK 仿真如图 9 所示。

图 9 (a) 中相机倾角 10.5° , 此时 $r_2=0, r=r_1=193.08$ km, 环扫临界系数 K 取 0.75, 此时的旋转角速度 $10.85^\circ/s$ 。图 9(b) 中相机倾角 30° , 此时 $r=r_2=177.96$ km, 环扫临界系数 K 取 3, 此时的旋转角速度 $11.78^\circ/s$ 。图 9(c) 中相机倾角 30° , 此时 $r=r_1=440.37$ km, 环扫临界系数 K 取 1.25, 此时的旋转角速度 $7.94^\circ/s$ 。

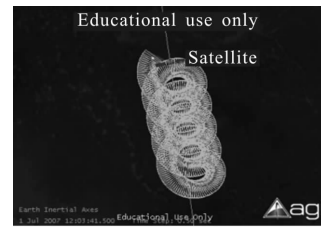


(a) 模式 1

(b) 模式 2

(a) Model 1

(b) Model 2



(c) 模式 3

(c) Model 3

图 9 环扫地面轨迹仿真图

Fig.9 Circular scanning track simulation image

从图 8、图 9 中可以明显看出, 与传统成像模式相比, 环扫成像地面幅宽更大且随着相机倾角的增加而增加。

3 环扫成像几何参数分析

地面像元分辨率与成像幅宽作为环扫成像重要的几何参数, 直接关乎针对广域搜索进行卫星成像模式设计的价值与意义。下面将对地面像元分辨率与成像幅宽进行分析, 以说明环扫成像模式的效力。

3.1 地面像元分辨率

环扫成像过程中, 由于相机倾角及平台旋转的存在, 其地面像元分辨率随着目标区域与星下点距离的变化而变化。以卫星旋转瞬时速度垂向方向构建横向坐标, 建立不同像元位置对应的地面像元分辨率表达模型。首先光轴处采样间隔对应的地面像元分辨率为:

$$G_{SD,OA} = 2\arctan \frac{a}{2f} \cdot \frac{[R(1-\cos\rho_{OA})+H]}{\cos\zeta} \cdot \sec(\rho_{OA}+\zeta) \quad (11)$$

其中, ρ_{OA} 为光轴与地面交点对应的地心角度:

$$\rho_{OA} = \arcsin \{ [(H+R)\cos\zeta - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \sin^2\zeta}] \cdot \sin\zeta / R \} \quad (12)$$

同一焦平面上不同像素的地面像元分辨率表达为:

$$G_{SD} = \frac{a}{f} \cdot \frac{[R(1-\cos\rho)+H]}{\cos(\zeta+\beta)} \cdot \cos\beta \cdot \sec(\rho+\zeta+\beta) \quad (13)$$

式中: ρ 为不同像素点视线矢量与地面交点对应的地心角度; β 为像素点视线矢量与主光轴间的夹角 (该角度与视线矢量与地面间倾角的和与相机固定倾角 ζ 互余), 向远地点方向为正, 向近地点方向为负, 其表达式中的 M 为横向像元数。

$$\rho = \arcsin \left\{ \left[(H+R) \cos(\zeta + \beta) - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \sin^2(\zeta + \beta)} \right] \cdot \sin(\zeta + \beta) / R \right\}$$

$$\beta = \begin{cases} \arctan \frac{n \cdot a}{f}, n=1, 2, \dots, M/2 & G_0 \rightarrow G_1 \\ -\arctan \frac{n \cdot a}{f}, n=1, 2, \dots, M/2 & G_0 \rightarrow G_2 \end{cases}$$

$$G_1: \beta = F_{OV}/2 \quad G_2: \beta = -F_{OV}/2 \quad (14)$$

对像面内各像素点对应的地面像元分辨率变化进行分析。此时,假设轨道高度 H 为 500 km,像素尺寸 a 为 $4 \mu\text{m}$,焦距 f 为 1 m,轴向像元数 M 为 50 000。星下点各像素位置 n 的地面像元分辨率变化曲线如图 10 所示;相机倾角 ζ 分别为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 情况下各像素位置地面像元分辨率变化曲线如图 11 所示;像素位置分别为像面中心、远视场点、近视场点时地面像元分辨率随相机倾角 ζ 的变化曲线如图 12 所示。

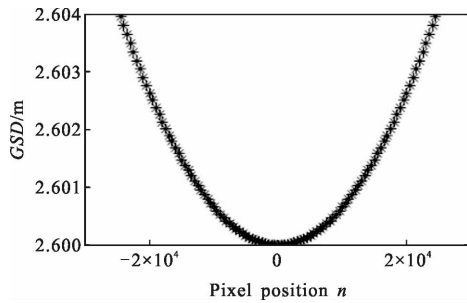


图 10 星下点各像素地面像元分辨率变化曲线
Fig.10 Curve of Ground Sample Distance (GSD) changes in the different pixel position with nadir imaging

从图中可以看出,地面像元分辨率自近视场点到远视场点逐渐变大,且随着相机倾角 ζ 的增加,地面像元分辨率逐渐增大。因此,在环扫成像模型中,应基于实际需求对相机倾角 ζ 进行选择,以保证其对地面像元分辨率的制约不影响成像效果;同时针

$$S_{W,0} = \frac{\pi R}{90} \cdot \arcsin \left\{ \left[\frac{(H+R) \cos \frac{F_{OV,y}}{2} - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \sin^2 \frac{F_{OV,y}}{2}}}{R} \right] \cdot \sin \frac{F_{OV,y}}{2} \right\} \quad (15)$$

当采用环扫成像模式后,地面幅宽不再由单帧幅宽决定,而是取决于平台旋转 180° 后划过的弦长,

$$S_w = \frac{\pi R}{90} \cdot \arcsin \left\{ \left[\frac{(H+R) \cos \left(\zeta + \frac{F_{OV,y}}{2} \right) - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \sin^2 \left(\zeta + \frac{F_{OV,y}}{2} \right)}}{R} \right] \cdot \sin \left(\zeta + \frac{F_{OV,y}}{2} \right) \right\} \quad (16)$$

对后期图像拼接处理的需求,沿地面轨迹方向各像素点间地面像元分辨率差异可视为不变,拼接前需要进行结合平台自运动与光线追迹的逐像素几何精校,文中成像模式获取相应参数将为地面校正提供先验知识,以保障最终图像效果。

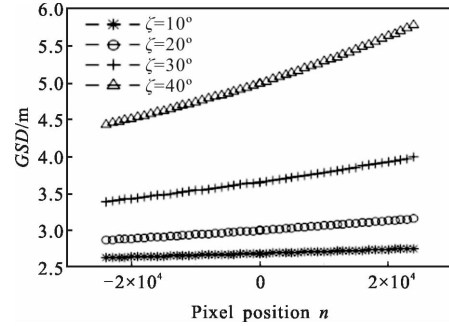


图 11 固定相机倾角时地面像元分辨率与像素位置关系曲线
Fig.11 Curve of GSD with pixel position when fixing camera inclination angle

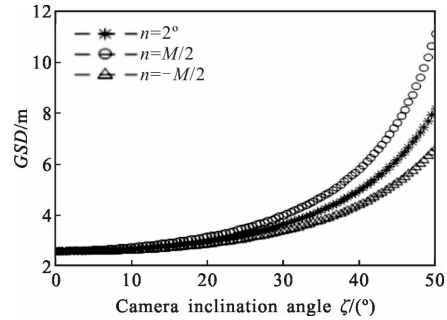


图 12 固定像素位置时地面像元分辨率与相机倾角关系曲线
Fig.12 Curve of GSD with camera inclination angle when fixing pixel position

3.2 地面幅宽

航天相机环扫成像模式的设计,主要目的是满足广域搜索情境下的大视场需求,其中最重要的几何参数指标为地面幅宽。传统的星下点成像模式下,地面幅宽为星下点单景幅宽:

沿卫星垂轨方向构建横向坐标,建立不同像元位置对应的最大地面幅宽通用表达模型如公式(16)所示。

当相机倾角 $\zeta=0$ 时, 环扫成像地面幅宽模型退化为星下点成像地面幅宽模型。以相机倾角 ζ 为自变量对通用模式下地面幅宽变化进行分析。假设轨道高度 H 为 500 km, 像素尺寸 a 为 $4 \mu\text{m}$, 焦距 f 为 1 m, 轴向像元数 M 为 50 000, 此时垂轨方向相机视场角为:

$$F_{\text{ov}_\zeta} = 2 \cdot \arctan \frac{M \cdot a}{f} \quad (17)$$

地面幅宽随相机倾角 ζ 的变化曲线如图 13 所示, 相机倾角 ζ 分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 时的地面幅宽实际值如表 1 所示。

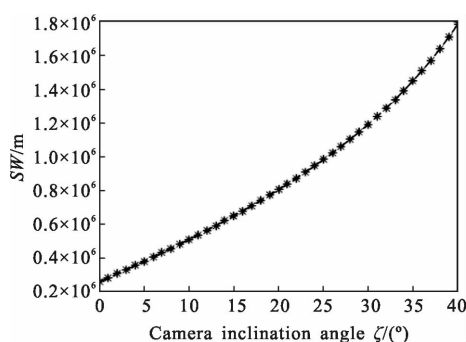


图 13 地面幅宽随相机倾角 ζ 变化曲线

Fig.13 Curve of Swath Width (SW) changes with different camera inclination angle ζ

表 1 特定相机倾角下的地面幅宽

Tab.1 Swath Width (SW) with special camera inclination angle

Camera angle/ $^\circ$	0	10	20	30	40
SW/km	260.6	511.2	806.8	1 193.2	1 784.7

从图 13 及表 1 中可以看出, 地面幅宽随相机倾角 ζ 的增大而增加, ζ 等于 10° 、 20° 、 30° 、 40° 时的地面幅宽分别是星下点成像时的 1.96、3.10、4.58、6.85 倍, 环扫成像可有效满足广域视场下大地面幅宽的需求。

4 结论

传统成像模式成像视野受传感器制约, 在广域搜索等应用场合无法发挥优势, 因此文中设计了航天相机环扫成像模式, 通过分析环扫成像特点, 设计了地面轨迹最佳覆盖模型与成像参数解算模型, 并利用 STK 软件仿真, 分析了该成像模式下两个重要

的几何参数: 地面分辨率、地面幅宽的变化情况。仿真分析表明, 在一定轨道高度及成像条件下, 地面像元分辨率与幅宽随相机倾角增加而增大。文中研究目前集中于理论推导与设计阶段, 在实际应用层面, 后续工作仍需基于图像质量及后期图像处理需求对成像模式的设计进行精细修正。

参考文献:

- [1] 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): 1872-1877. (in Chinese)
程少园, 张丽, 高卫军, 等. 大视场空间相机侧摆成像时几何参数分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1872-1877.
- [2] Yang Xiubin, Jiang Li, Jin Guang. Design and analysis of CMOS camera based on TDI in digital domain to realize high-resolution staring imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0911004. (in Chinese)
杨秀彬, 姜丽, 金光. 数字域时间延迟积分时间 CMOS 相机高分凝视成像设计分析 [J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0911004.
- [3] Yang Xiubin, Jiang Li, Wang Min, et al. Design of pendulum imaging along the track with high resolution CMOS camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0711002. (in Chinese)
杨秀彬, 姜丽, 王旻, 等. 高分 CMOS 相机垂轨引导式凝视搜索成像设计[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0711002.
- [4] Zhang Dengyi, Guo Lei, Wang Qian, et al. An improved single orbit scheduling method for agile imaging satellite towards area target [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 38(8): 901-905. (in Chinese)
章登义, 郭雷, 王骞, 等. 一种面向区域目标的敏捷成像卫星单轨调度方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 38(8): 901-905.
- [5] Yu Jing, Xi Jinjun, Yu Longjiang, et al. Study of one orbit multi stripes splicing imaging for agile satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(2): 27-34. (in Chinese)
余婧, 喜进军, 于龙江, 等. 敏捷卫星同轨多条带拼幅成像模式研究[J]. 航天器工程, 2015, 24(2): 27-34.
- [6] Wang Yamin, Yang Xiubin, Jin Guang, et al. Design of pendulum type searching imaging along the track long strip with high resolution CMOS camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(3): 0311002. (in Chinese)

- 王亚敏, 杨秀彬, 金光, 等. 高分 CMOS 相机沿轨长条带钟摆式搜索成像设计[J]. 光子学报, 2017, 46(3): 0311002-1-0311002-10.
- [7] Nadoushan Mahid Jafari, Assadian Nima. Repeat ground track orbit design with desired revisit time and optimal tilt [J]. *Aerospace Science & Technology*, 2015, 40: 200-208.
- [8] Yang Bo, Wang Mi, Jin Shuying, et al. An optimal imaging scheduling algorithm for the multi strip imaging mode of the high resolution agile satellites based on certain step size search [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XXXIX-B1: 339-343.
- [9] Kim Seyoung, Sung Jinbong, Yi Dongwoo, et al. Design technique for wide swath SAR TOPS imaging mode[J]. *J of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2015, 43(5): 466-471.
- [10] Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, et al. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24 (12): 1585-1589. (in Chinese)
王家琪, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢量计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.
- [11] Yan Changxiang, Wang Jiaqi. Method of coordinate transformation for IM&IMC calculation in aerospace camera system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(3): 203-207. (in Chinese)
颜昌翔, 王家琪. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 203-207.