

超大幅宽低畸变成像系统设计与分析

张宗存^{1,2}, 丁学专¹, 杨波¹, 张莹¹, 彭俊^{1,2}, 刘银年^{1,2,3*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院上海技术物理研究所 启东光电遥感中心, 江苏 启东 226200)

摘要: 针对光机扫描式超大幅宽对地观测面临的成像畸变导致的分辨率随扫描视场增大而急剧降低的问题, 提出了一种变焦距扫描配合可调狭缝光阑成像的方法, 推导了其在超大幅宽成像过程中需满足的变焦扫描与光阑控制关系式. 理论分析表明: 当系统光轴倾斜角度和狭缝大小与瞬时焦距满足对应关系时, 可有效消除地面成像畸变, 解决边缘分辨率急剧降低的问题, 实现大幅宽扫描成像过程中地面分辨率始终与星下点分辨率保持一致. 此外, 设计了一套变焦扫描成像系统, 分析证明了该方法具有较大可行性, 这对未来超大幅宽、高分辨率对地成像观测具有重要指导意义.

关键词: 成像系统; 超大幅宽; 低畸变; 变焦距

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Design and analysis of super large width and low distortion imaging system

ZHANG Zong-Cun^{1,2}, DING Xue-Zhuan¹, YANG Bo¹, ZHANG-Ying¹, PENG Jun^{1,2}, LIU Yin-Nian^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Qidong Optoelectronic Remote Sensing Center, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Qidong 226200, China)

Abstract: In the way of pursuing large width and high resolution imaging, ground imaging distortion is an important factor that needs to be eliminated, therefore, a zoom scanning combine with adjustable slit diaphragm imaging method was proposed in this paper. The corresponding control formula of zoom scanning and slit were deduced. Results show that, under appropriate controlling, this method could effectively reduce the ground distortion brought by the increase of the scanning angle and can maintain the ground resolution to be unchanged (same as the resolution under sub-satellite point) during a wide scan imaging process. Besides, a zoom swing scanning imaging system was designed to verify the feasibility of our method in large width and high resolution imaging applications. This is of great significance for the development of large width and high resolution imaging observation.

Key words: imaging system, super large width, low distortion zoom

PACS: 95.55Fw

引言

超大幅宽可实现对地大范围观测, 降低对地观

测重访周期, 增大探测信息的时效性; 高分辨率成像可获取目标更为精细的几何特征信息, 大幅提高目标识别力度; 二者结合, 将会是未来红外对地遥感发

收稿日期: 2017-02-14, 修回日期: 2017-09-11

Received date: 2017-02-14, revised date: 2017-09-11

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFB0500400), 国家 863 计划(2014AA123202), 国家高分辨率对地观测系统重大专项(A0106/1112)

Foundation items: Supported by National Key R&D Program of China (2016YFB0500400), National High Technology Research and Development Program of China (863 Program; 2014AA123202), Major Project of National High Resolution Earth Observation System of China (A0106/1112)

作者简介 (Biography): 张宗存 (1987-), 男, 山东沂水人, 博士研究生, 研究方向为光学系统设计. E-mail: zongcunzhang2015@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: ynliu@mail.sitp.ac.cn

展的重要方向^[1-2].

目前超大幅宽对地成像方式主要有多载荷视场拼接、高轨成像和扫描镜摆扫成像. 其中,扫描镜摆扫成像方式具有机动、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,如 OMIS^[3]、MODIS^[4]、HJ-1B^[5]等. 但超大幅宽成像时,扫描镜摆扫成像容易受地面成像畸变影响,使得地面分辨率随扫描角度增大而急剧降低,导致成像幅宽边缘目标亚像元化,降低边缘目标可探性的同时带来了沿轨方向成像数据冗余^[6],这种现象主要由系统成像光轴与地面夹角发生变化引起^[7]. 因此,探求一种超大幅宽低畸变成像方法是实现超大幅宽高分辨率探测的前提条件.

本文提出了一种变焦摆扫配合可调狭缝光阑的成像方法,旨在解决超大幅宽摆扫成像过程中地面成像畸变导致的边缘目标可探性急剧降低的问题;推导了大幅宽扫描成像过程中,地面分辨率始终保持与星下点分辨率一致时需满足的变焦摆扫及可调狭缝光阑成像的关系式,设计了一套机载超大幅宽低畸变变焦摆扫成像系统,并对其可行性进行了分析,这为超大幅宽高分辨率探测提供了一种新的解决途径,对推动超大幅宽高分辨率遥感探测的发展具有重要意义.

1 成像系统变焦摆扫方法

1.1 定焦摆扫边缘成像畸变问题分析

光机扫描成像是实现地面超大幅宽成像的重要方式,对于焦距固定的系统,随着光轴倾斜增大,地面成像畸变急剧增大造成地面成像分辨率急剧降低,引起边缘目标可探性大幅降低. 图 1 为定焦成像系统大幅宽摆扫成像示意图及对应的地面成像效果图,绿色部分为地面分辨率 (Ground Sample Distance, GSD);从成像效果图可以看出:沿轨与穿轨方向地面分辨率受地面成像畸变的影响大幅降低. 因此,为了解决这一问题,本文考虑使用变焦摆扫成像方式.

1.2 变焦摆扫必要条件

变焦成像系统需保证同一目标像面照度不随焦距变化而变化,以满足高精度辐射定标的要求. 成像系统像面照度公式为^[8]:

$$E'_0 = \frac{\Phi'_0}{d^2} = \tau_0 \cdot \tau \cdot L_0 \cdot \frac{1}{f^2} \cdot \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{1}{4F^2} \tau_0 \tau \pi L_0 \quad (1)$$

式中: E'_0 为像面照度, Φ'_0 为单个像元接收到的能

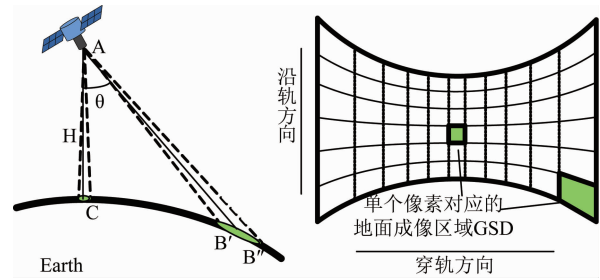


图 1 超大幅宽定焦摆扫成像效果示意图

Fig. 1 Schematic diagram of large width imaging with fixed focal length scanning

量, d 为像元大小, D 为入瞳直径, F 为系统 F 数, L_0 为目标辐射亮度, f 为系统焦距, τ_0 为大气衰减因子, τ 为系统光学效率.

从上式可以看出:在大气衰减因子、系统光学效率、目标辐射亮度一定时,像面照度是系统 F 数的函数,由此可见定 F 数是变焦距成像仪可行性的必要条件.

1.3 变焦摆扫实现分辨率不变方法探究

为了实现地面分辨率不变,设计了如图 2 所示的连续变焦摆扫成像系统,并在中间理想成像设置连续可调狭缝光阑 m . 该系统分辨能力连续可调,可实现地面分辨率 GSD 保持不变(始终与星下点分辨率保持一致). 其实现方法分为如下两步:1) 当光轴倾斜角度 (θ) 与焦距满足一定关系时,可实现沿轨方向地面分辨率保持不变,其探测器焦面 FPA 成像效果图如图 3 所示,可以看出,沿轨方向的畸变可被消除;2) 连续可调狭缝光阑 (m) 的大小与光轴倾斜角度 (θ) 满足一定关系时,可消除穿轨方向剩余地面畸变,进而实现超大幅宽摆扫成像过程中,沿轨方向与穿轨方向地面分辨率恒为定值,与星下点分辨率保持一致,最终成像效果如图 4 所示.

以上分析表明:确保超大幅宽、任意位置高分辨率成像的关键是推导出地面任意成像位置(系统光轴倾斜角度 θ , 狭缝 m 的大小 d_1) 与瞬时焦距的对应关系式. 下面对变焦摆扫关系式进行推导.

1.4 变焦摆扫关系式推导

图 5 为变焦摆扫成像分析示意图. 图中 A 代表成像仪; $\alpha = \theta/2$ 为摆镜相对于星下点位置转动的角度; BD 为扫描点 B 处地球表面切线;成像高度 AC 为 H ;地球半径为 R ; $B'B''$ 为扫描位置穿轨地面分辨率 GSD_x ; AC 与 BE 相交于地心 O ; B 为主光轴与地面的交点位置.

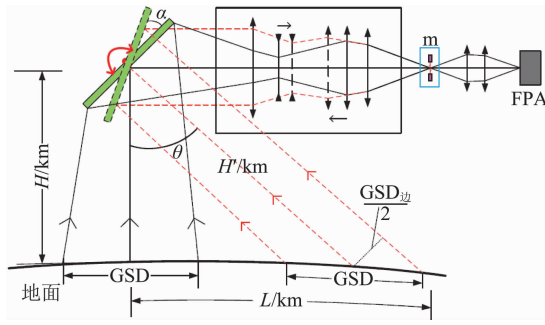


图2 超大幅宽高分辨率变焦摆扫成像示意图
Fig. 2 Sketch diagram of large width imaging with zoom scanning

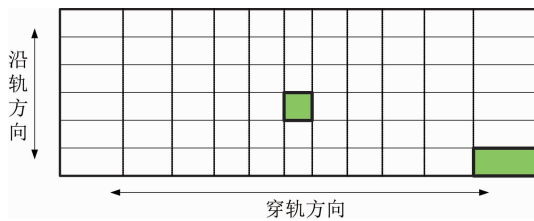


图3 沿轨方向变焦消畸变成像效果图
Fig. 3 Sketch of imaging effect with eliminated along the track direction

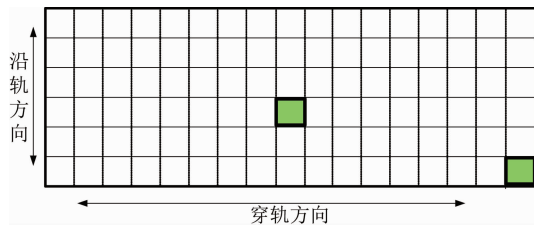


图4 穿轨方向消除剩余畸变时成像效果图
Fig. 4 Sketch of imaging effect with distortion residual eliminated across the track direction

假设成像仪某时刻扫描到 B 位置, 此时的焦距为 f , 系统扫描角度为

$$\angle OAB = \theta \quad (2)$$

$$OA = H + R \quad (3)$$

在三角形 AOB 中, 由正弦定理:

$$\frac{OA}{\sin \angle ABO} = \frac{OB}{\sin \angle OAB} \quad (4)$$

整理得

$$\sin \angle ABO = \frac{OA \sin \angle OAB}{OB} = \frac{(R + H) \sin \theta}{R} \quad (5)$$

$$\angle AOB = \pi - \angle ABO - \theta \quad (6)$$

$$BC = R - \angle AOB \quad (7)$$

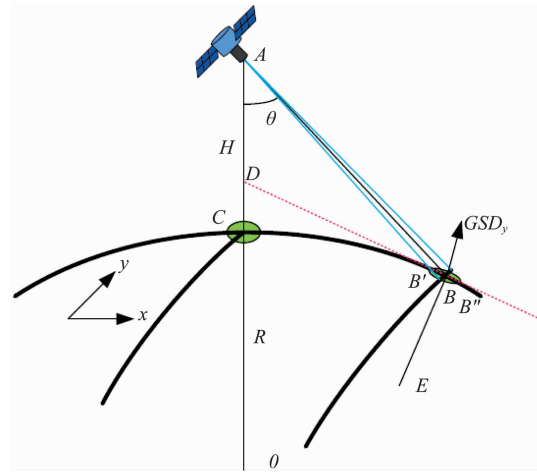


图5 变焦摆扫成像分析示意图
Fig. 5 Sketch map for zoom scanning imaging

再次运用正弦定理:

$$\frac{AB}{\sin \angle AOB} = \frac{OB}{\sin \angle OAB} \quad (8)$$

整理得

$$AB = \frac{R}{\sin \theta} \sin(\angle ABO + \theta) = (R + H) \cos \theta - \sqrt{R^2 - (R + H)^2 \sin^2 \theta} \quad (9)$$

由分析可知: 沿轨方向地面成像畸变的产生主要由成像距离增大引起. 沿轨方向地面成像分辨率可由下式求出:

$$GSD_y = \frac{d}{f} \times AB = \frac{d}{f} \times [(R + H) \cos \theta - \sqrt{R^2 - (R + H)^2 \sin^2 \theta}] \quad (10)$$

整理可求得沿轨方向地面消畸变, 即沿轨方向地面分辨率 $GSD_y = GSD$ 保持不变时, 系统焦距与系统摆镜旋转角度满足的关系式为:

$$f = \frac{d}{GSD} \times [(R + H) \cos(2\alpha) - \sqrt{R^2 - (R + H)^2 \sin^2(2\alpha)}] \quad (11)$$

为消除穿轨方向剩余地面成像畸变, 需推导出相应的狭缝光阑变焦摆扫控制关系式. 假设系统相对于星下点摆扫角度为 θ 弧度, 且此时穿轨方向对应的像元尺寸为 d_1 时, 穿轨方向地面成像畸变恰好为零. 此时, 有:

$$\angle B'AB'' = \frac{d_1}{f} = \frac{d_1 \cdot GSD}{d \cdot [(R + H) \cos \theta - \sqrt{R^2 - (R + H)^2 \sin^2 \theta}]} \quad (12)$$

同理可求得 AB', AB'' 计算公式

$$AB' = (R+H)\cos\left(\theta - \frac{\angle B'AB''}{2}\right) - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \sin^2\left(\theta - \frac{\angle B'AB''}{2}\right)} \quad (13)$$

$$AB'' = (R+H)\cos\left(\theta + \frac{\angle B'AB''}{2}\right) - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \sin^2\left(\theta + \frac{\angle B'AB''}{2}\right)} \quad (14)$$

在 $\triangle AB'B''$ 中,由余弦定理:

$$B'B'' = \sqrt{AB'^2 + AB''^2 - 2AB' \cdot AB'' \cdot \cos \angle B'AB''} \quad (15)$$

穿轨方向消除地面成像剩余畸变时满足:

$$B'B'' - \text{GSD} = 0 \quad (16)$$

整理求出穿轨方向消除剩余畸变时,狭缝 m 的大小 d_1 与摆镜摆扫角度 α 满足的关系式为:

$$\left. \begin{aligned} \text{GSD} &= \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos\beta} \\ \beta &= \frac{d_1}{f} = \frac{d_1 \cdot \text{GSD}}{d[(R+H)\cos(2\alpha) - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \sin^2(2\alpha)}]} \\ a &= (R+H)\cos\left(2\alpha - \frac{\beta}{2}\right) - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \sin^2\left(2\alpha - \frac{\beta}{2}\right)} \\ b &= (R+H)\cos\left(2\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \sin^2\left(2\alpha + \frac{\beta}{2}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中 β 为变焦系统瞬时分辨角; $a = AB'$, $b = AB''$; GSD 为星下点分辨率; H 为轨道高度; R 为地球半径。

当满足上述变焦摆扫关系式时,超大幅宽摆扫成像系统可实现沿轨穿轨方向分辨率始终保持不变(与星下点的一致)。此外,为保证每帧图像具有相等的成像积分时间,系统扫描摆镜需满足变焦扫描关系式以确保获取的目标照度响应量化值与变焦扫描数据相一致。

1.5 摆镜变速扫描关系推导

定焦摆扫成像时,摆镜扫描角速度恒定即可保证积分时间恒定,但对于高分辨率变焦扫描成像而言,其地面采样间隔保持恒定,为实现帧与帧之间具有恒定的积分时间,扫描镜需进行变速扫描,根据图 5 可推导出相应的机载与星载变速扫描成像公式:

$\triangle AOB$ 中应用正弦定理有:

$$\frac{OB}{\sin \angle OAB} = \frac{OA}{\sin(\angle OAB + \angle AOB)} \quad (18)$$

整理得:

$$\angle AOB = \arcsin\left(\frac{OA \cdot \sin(\angle OAB)}{OB}\right) - \angle OAB \quad (19)$$

即地心角 δ :

$$\delta = \arcsin\left(\frac{(R+H) \cdot \sin\theta}{R}\right) - \theta \quad (20)$$

两边对时间求导可求得对应的地心扫描角速度

ω_{earth} :

$$\omega_{\text{earth}} = \frac{d\delta}{dt} = \frac{\frac{R+H}{R} \cos(\theta) \frac{d\theta}{dt}}{\sqrt{1 - \left[\frac{(R+H)\sin\theta}{R}\right]^2}} - \frac{d\theta}{dt} \quad (21)$$

整理可求得对应的地面扫描角速度 $\omega(\theta)$:

$$\omega(\theta) = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega_{\text{earth}}}{\left(\frac{\frac{R+H}{R} \cos(\theta)}{\sqrt{1 - \left[\frac{(R+H)\sin\theta}{R}\right]^2}} - 1\right)} \quad (22)$$

由万有引力计算公式可计算出沿轨扫描角速度

ω_0 :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{GM}{(1000 \times (R+H))^3}} \quad (23)$$

沿轨方向瞬时地面视场为 L_1 ,则载荷沿轨扫过 L_1 所耗时间 t 为:

$$t = \frac{L_1}{R\omega_0} \quad (24)$$

除去摆镜启动停止时间 $t_{\text{open-off}}$ 秒,则实际有效扫描时间 t_{ef} 为:

$$t_{\text{ef}} = t - t_{\text{open-off}} \quad (25)$$

地面以恒定线速度进行扫描成像,则地心扫描角速度 ω_{earth} 为定值,则 t_{ef} 时间内扫过的地心角应该与穿轨方向最大扫描幅宽对应的最大地心角相等,如下式所示

$$R\omega_{\text{earth}} t_{\text{ef}} = L - \frac{\text{GSD}}{2} \quad (26)$$

整理得:

$$\omega_{\text{earth}} = \frac{L - 0.5 \cdot \text{GSD}}{R \cdot t_{\text{ef}}} \quad (27)$$

整理代入 $\omega(\theta)$ 可求得地面扫描角度计算公式

$$\omega(\theta) = \frac{(L - 0.5 \cdot \text{GSD}) \sqrt{1 - \left[\frac{(R+H)\sin\theta}{R}\right]^2}}{\left(L_1 \cdot \sqrt{\frac{(R+H)^3}{GM \times 10^{-9}}} - R \cdot t_{\text{open-off}}\right) \left(\frac{R+H}{R} \cdot \cos\theta - \sqrt{1 - \left[\frac{(R+H)\sin\theta}{R}\right]^2}\right)} \quad (28)$$

同理,可求得对应的机载变焦扫描公式:

$$\omega(\theta) = \frac{0.5 \cdot (L - 0.5 \cdot \text{GSD}) \sqrt{1 - \left[\frac{(R+H)\sin\theta}{R}\right]^2}}{\left(\frac{L_1 \cdot (R+H)}{v} - R \cdot t_{\text{open-off}}\right) \left(\frac{R+H}{R} \cdot \cos\theta - \sqrt{1 - \left[\frac{(R+H)\sin\theta}{R}\right]^2}\right)} \quad (29)$$

式中 $t_{open-off}$ 为摆镜启动停止时间; L 为成像幅宽; L_1 为沿轨地面视场; GM 为万有引力常数; v 为飞机飞行速度; θ 为摆镜地面扫描角度。

综上所述, 变焦距摆扫成像仪实现地面分辨率不变的应用需保证三个条件: 1) 同一物体像面照度不因焦距变化而变化, 即满足系统 F 数保持不变; 2) 确保地面分辨率不随地面扫描位置变化而变化, 即摆镜摆扫角度 (α)、狭缝 (m) 大小与焦距满足确定的关系; 3) 恒定成像积分时间, 确保获得目标像面照度与定焦相匹配, 即满足定 F 数时, 扫描镜满足相应的变速扫描公式。

2 变焦摆扫成像系统设计

基于像元大小 $30 \mu\text{m}$, 640×1 长线列探测器, 设计了一套定 F 数变焦距成像仪, 当成像距离为 1 km 时, 地面扫描成像幅宽为 2.6 km 时, 对应的摆镜摆扫角度为 $\pm 25.4^\circ$, 同时保证全视场地面分辨率恒为 0.75 m , 设计指标要求如表 1 所示。

表 1 变焦距成像系统设计指标要求
Table 1 Design index requirement of zoom system

项目	数值
光谱范围	$8.0 \sim 12.0 \mu\text{m}$
成像高度	1000 m
成像幅宽	2.6 km
全视场分辨率	0.75 m
MTF	>0.45

根据设计指标, 星下点分辨率为 0.75 m 时, 可求得此时系统最短焦距 $f_{短}$:

$$f_{短} = \frac{H \cdot d}{\text{GSD}} = \frac{1000 \times 0.03}{0.75} = 40 \text{ mm} \quad (30)$$

代入变焦摆扫公式可求得系统最长焦距 $f_{长}$:

$$f_{长} = \frac{d}{\text{GSD}} [(R + H) \cos(2\alpha) - \sqrt{R^2 - (R + H)^2 \sin^2(2\alpha)}] \approx 66 \text{ mm} \quad (31)$$

探测器作为视场光阑, 则系统像面高度相等, 可求得系统沿轨方向最小视场 FOV_{min} :

$$\text{FOV}_{min} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{320d}{1000f_{长}}\right) = 16.5^\circ \quad (32)$$

同理, 可求得最大视场 FOV_{max} 为 27° 。

结合探测器像元大小、系统衍射极限及瑞利判据可求得变焦系统设计 F 数:

$$\frac{1.22\lambda}{D} f = 1.22\lambda F \leq d \quad (33)$$

将 $\lambda = 12 \mu\text{m}$; $d = 30 \mu\text{m}$ 代入上式, 可求得系统 F 数为 2.0 。光学系统设计参数如表 2 所示。

表 2 变焦距主光学系统设计参数
Table 2 Design parameters for zoom imaging system

项目	数值
光谱范围	$8.0 \sim 12.0 \mu\text{m}$
$F/\#$	2.0
焦距	$40 \sim 66 \text{ mm}$
沿轨视场	$16.5^\circ \sim 27^\circ$

将设计参数代入 Zemax 进行设计, 系统主光学光路、变焦控制曲线及像质评价结果如图 6 所示。

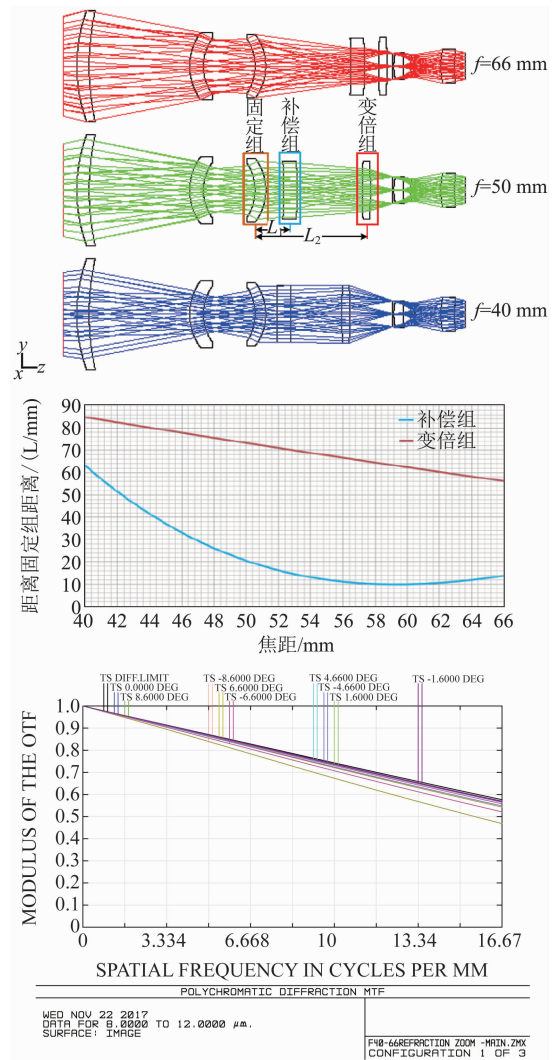


图 6 变焦距主光学光路、变焦曲线及像质评价
Fig. 6 Optical path zoom curve and image quality of zoom imaging system

为简化分析难度, 前置变焦成像光学与后接二次中继成像系统应独立理想成像, 主光学像方远心, 中继成像系统放大倍率为 -1 。图 7 为超大幅宽变焦摆扫成像系统集成光路图, 表 3 为相应的像质评价结果。

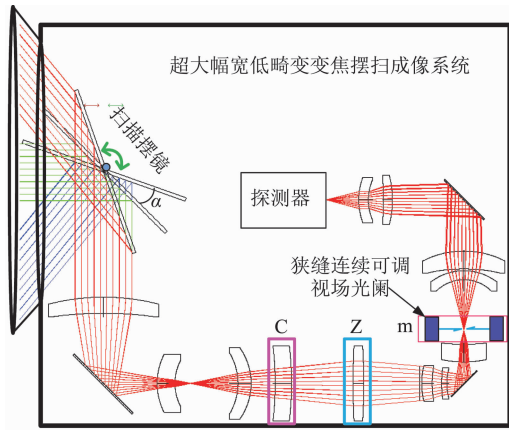


图7 超大幅宽变焦摆扫成像系统集成光路图
Fig.7 Super wide zoom whiskbroom integrated optical system

表3 不同焦段系统像质评价结果
Table 3 Image quality evaluation of different focal length

焦距 f /mm	最大 RMS / μm	最小 MTF 值 @ 16.67lp/mm	最小能量 集中度	畸变
40 mm	6.725	0.51	>98%	<2.6%
50 mm	5.669	0.50	>98%	<0.95%
66 mm	6.769	0.48	>98%	<2.46%

由像质评价结果可知:变焦距成像仪最大弥散斑半径小于 1/4 像元,最小 MTF@ 16.67lp/mm 大于 0.48,各焦段光学畸变小于像元大小的 2.6%,整体设计结果满足设计指标要求。

3 超大幅宽低畸变成像仪实例分析

变焦摆扫成像仪,通过扫描镜穿轨摆扫实现地面大幅宽成像,同时,借助于飞机等平台实现沿轨推扫成像;根据设计实例,可求得实现地面 2.6 km 幅宽成像时,地面扫描角度为 101.52°,星下点分辨率为 0.75 m,定焦摆扫成像系统边缘分辨率达到 2.02 m,分辨率降低了 3 倍,下面对超大幅宽变焦扫描成像进行实例分析。

将已知量 $d = 30 \mu\text{m}$, $R = 6378.14 \text{ km}$, $H = 1 \text{ km}$, $GSD = 0.75 \text{ m}$ 代入式变焦摆扫公式得到满足全视场地面分辨率恒为 0.75 m 时,系统满足的关系式:

$$f = 40 \times [6379.14 \cos(2\alpha) - \sqrt{6378.14^2 - (6379.14)^2 \sin^2(2\alpha)}] \quad (34)$$

利用 Matlab 软件进行仿真,得到关系曲线如下图 8 所示。

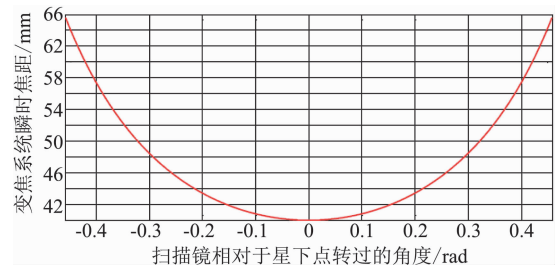


图8 变焦距成像仪摆扫成像瞬时焦距随摆镜旋转角度匹配关系曲线
Fig.8 The relationship curve for instantaneous focal length with the angle of the scanning mirror

同理,可作出相应的狭缝光阑控制曲线如图 9 所示。

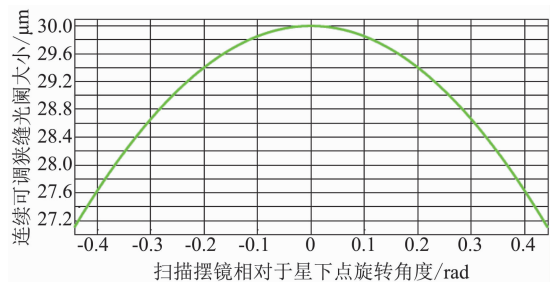


图9 狭缝光阑控制曲线
Fig.9 The control curve for slit diaphragm

变焦距摆扫成像仪机载平台应用时,需考虑成像帧频能否达到应用要求.假定飞机飞行速度 $v = 120 \text{ km/h}$ 时,代入变角速度扫描公式,利用 Matlab 作出摆镜变速扫描关系曲线,如图 10 所示。

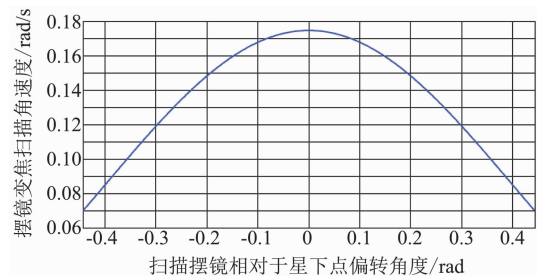


图10 摆镜变速摆扫曲线
Fig.10 Variable speed scanning curve for scanning mirror

由表 1 可求得沿轨方向地面视场为 480 m,因此,摆镜穿轨扫描成像时间为 14.4 s,除去 2 s 启动停止及回摆时间,可求得扫描成像帧频为 280 Hz,满足现阶段使用要求。

综上所述可知:定 F 数成像仪满足变焦摆扫成

像关系及摆镜变速扫描成像关系,同时配合连续可调狭缝视场光阑时,变焦距摆扫成像方法可保证超大幅宽对地成像时,任意位置地面分辨率保持恒定,消除地面成像畸变。

4 结论

提出了一种变焦距摆扫配合可调狭缝视场光阑的成像方法,通过控制 1) 系统 F 数保持不变;2) 摆镜摆扫角度(α)、狭缝(m)大小与焦距满足确定的关系;3) 扫描镜满足相应的变速扫描公式,可有效消除地面成像畸变,实现全视场地面分辨率保持恒定(与星下点一致)。此外,将此方法应用于所设计的机载变焦扫描成像系统中,边缘分辨率从 2.02 m 提高到 0.75 m,提高了三倍。验证了超大幅宽变焦距成像探测技术应用具有较大可行性,为对地成像探测朝着超大幅宽高分辨率方向发展提供了重要的理论依据。

References

- [1] WANG Yi-Kun. Study of wide array scanning imaging technology [D]. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (王义坤. 面阵摆扫宽幅成像技术研究,上海:中国科学院上海技术物理研究所),2015.
- [2] LIN You-Quan. Analysis of high-resolution wide-swath technology for the space borne SAR[J]. *Modern Radar* (林幼权. 星载高分辨率宽幅成像技术分析. 现代雷达), 2011, **33**(1): 1-4.
- [3] LIU Yin-Nian, XUE Yong-Qi, WANG Jian-Yu, et al. Operational modular imaging spectrometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘银年,薛永祺,王建宇,等. 实用型模块化成像光谱仪. 红外与毫米波学报),2002,**21**(1):9-14.
- [4] LIU Chuang, GE Cheng-Hui. The United States earth observation system (EOS) moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on the characteristics and application of remote sensing data [J]. *Remote Sensing Information* (刘闯,葛成辉. 美国对地观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用,遥感信息), 2000, **3**: 45-48.
- [5] LIU Yin-Nian, WANG Jian-Yu, XUE Yong-Qi. Infrared scanner of HJ-1B Satellite[J]. *Spacecraft Engineering* (刘银年,王建宇,薛永祺. 环境减灾-1B 卫星红外相机的研制. 航天器工程),2009,**18**(6)50-55.
- [6] Nishihama M, Wolfe R E, Solomon D, et al. MODIS level 1A earth location: Algorithm theoretical basis document version 3.0[Z]. 1997. <http://modis.gsfc.nasa.gov>.
- [7] CHENG Shao-Yuan, ZHANG Li, GAO Wei-Jun, et al. Geometric parameters analysis of large FOV space camera when rolling [J]. *Infrared & Laser Engineering* (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. 红外与激光工程),2015, **44**(6): 1873-1876.
- [8] ZHOU Shi-Chun. *Introduction to advanced infrared optoelectronic engineering*[M]. Beijing: Science Press (周世椿. 高级红外光电工程导论. 北京:科学出版社),2014.
- [9] Eraerds P. Photon counting OTDR: Advantages and limitations[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**:952-964.
- [10] Healey P, Hensel P. Optical time domain reflectometry by photon counting[J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(16): 631-633.
- [11] Shentu, G L, Sun Q C, Jiang X, et al. 217 km long distance photon-counting optical time-domain reflectometry based on ultra-low noise up-conversion single photon detector [J]. *Opt. Express*,2013, **21**:24674-24679.
- [12] Diamanti E, Langrock C, Fejer M M, et al. 1.5 m photon-counting optical time-domain reflectometry with a single-photon detector based on upconversion in a periodically poled lithium niobate waveguide[J]. *Opt. Lett.*, 2006,**31**(6): 727-730.
- [13] Ma L, Slattery O, Tang X. Single photon frequency up-conversion and its applications [J]. *Phys. Rep.* 2012, **521**:69-94.
- [14] Legré M, Thew R, Zbinden H. et al. High resolution optical time domain reflectometer based on 1.55 μm up-conversion photon-counting module[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**, 8237-42.
- [15] Chen S J, Liu D K, Zhang W X, et al. Time-of-flight laser ranging and imaging at 1550 nm using low-jitter superconducting nanowire single-photon detection system [J]. *Appl. Opt.* 2013, **52**:3241-5.
- [16] Hu J, Zhao Q, Zhang X, et al. Photon-counting optical time-domain reflectometry using a superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(16):2583-2588.
- [17] You L, Yang X, He Y, et al. Jitter analysis of a superconducting nanowire single photon detector [J]. *Aip Advances*, 2013, **3**(7):705-582.
- [18] Rosenberg D, Kerman A J, Molnar R J, et al. High-speed and high-efficiency superconducting nanowire single photon detector array [J]. *Opt. Express*, 2013, **21**(2):1440.
- [19] Schuck C, Pernice W H P, Ma X, et al. Optical time domain reflectometry with low noise waveguide-coupled superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2013,**102**(19):2112.
- [20] Liang Y, Huang J, Ren M, et al. 1550-nm time-of-flight ranging system employing laser with multiple repetition rates for reducing the range ambiguity [J]. *Optics Express*, 2014,**22**(4):4662-70.

(上接第 731 页)