

文章编号 1004-924X(2012)08-1754-05

离轴三反航天测绘相机焦距的计算

郭 疆, 孙继明*, 邵明东, 胡海飞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了精确计算离轴三反相机的焦距以保证其测绘精度,对经典测绘模型和相关公式进行了必要的修正。首先,重新定义了离轴三反测绘相机的交会角,并对经典焦距计算公式做了修正;其次,分析了地球曲率对离轴三反测绘相机焦距计算的影响,进一步修正了焦距计算公式。实例计算表明:当要求地面像元分辨率为2 m,在CCD像元尺寸为 $8\ \mu\text{m}$,轨道高度为700 km,离轴角为 7° 条件下,应用经典计算公式得出的斜视相机焦距与应用修正后的计算公式所得出的斜视相机焦距相对偏差达到2.6%,说明对测绘精度影响很大。因此,在采用离轴三反相机进行摄影测量时,斜视相机焦距的计算应考虑离轴角后对经典公式进行必要的修正,而正视相机的焦距计算可以沿用经典计算公式。

关键词:离轴三反相机;航天测绘;焦距测量;地球曲率

中图分类号:V447.3 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20122008.1754

Calculation of focal length for off-axis TMA aerospace mapping camera

GUO Jiang, SUN Ji-ming*, SHAO Ming-dong, HU Hai-fei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: mingjisum@163.com

Abstract: To calculate the focal length of an off-axis Three Mirror Anastigmat(TMA) camera precisely and to guarantee its mapping precision, this paper researches and amends the classic mapping model and related formulas. First, the intersection angle of the off-axis TMA camera is re-defined, and the classic calculating formula for the focal length is modified. Then, the effect of earth curvature on the calculating focal length is analyzed, and the formula is further corrected. Examples indicate that when GSD is set to be 2 m, and the size of CCD, orbital altitude and the off-axis angle are $8\ \mu\text{m}$, 700 km and 7° , respectively, the relative error of the focal length of a tilt-looking camera calculated by the classic formula and that calculated by the modified formula can reach to 2.6%, which will effect significantly on the mapping precision. Therefore, it suggests that the calculating formula for focal length of tilt-looking camera should take the off-axis angle into account when a off-axis TMA camera is used in photography. Furthermore, the classic calculating formula is still applicable for the ortho-looking camera.

收稿日期:2012-04-17;修订日期:2012-06-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

Key words: off-axis Three Mirror Anastigmat(TMA) camera; aerospace mapping; focal length measurement; earth curvature

1 引 言

随着科技的发展,对航天遥感测绘相机的分辨率要求越来越高,并且也希望其视场尽可能的宽。例如印度 2005 年发射的 Cartosat-1 两线阵测绘相机地面像元分辨率达到 2.5 m,视场角为 $\pm 1.08^\circ$ 。世界上公开报导的较先进的三线阵 CCD 摄影测量相机是日本研制的 PRISM,是于 2006 年成功发射的 ALOS 的有效载荷之一,其地面像元分辨率为 2.5 m,视场角 $\geq 7.6^\circ$ 。在航天遥感测量中,当在轨道高度和 CCD 像元尺寸确定后,增长相机的焦距是提高相机分辨率的方法之一^[1-6]。另外,宽视场有利于图像的整合处理和缩短重访周期,增强卫星的实时性,减少后期数据处理量,也是航天测绘相机的需求之一。离轴三反光学系统易于设计成长焦距兼大视场,并且无中心遮拦,因此成为航天遥感测绘相机的发展热点和趋势,如前文提及的 PRISM 相机和 Cartosat-1 相机采用的就是离轴三反式的光学系统。但在经典测绘数学模型中,相机模型均是以同轴系统进行处理的,而离轴三反光学系统有别于同轴光学系统,因此在采用离轴三反相机进行航天遥感测绘的应用时,需对测绘模型和公式进行必要的修正,以保证测绘的高精度。本文就其中相机焦距问题进行了讨论。

2 经典焦距计算公式的修正

在航天遥感测绘中三镜头三线阵测绘相机原理如图 1 所示,正视相机垂直于地面摄影成像,前后视相机分别与正视相机成一定的交会角,3 个相机镜头的 CCD 线阵方向与飞行方向垂直,飞行期间,各 CCD 线阵依据推扫原理,以同步扫描周期对地面进行推扫成像,得到同一地面不同透视中心的 3 个重叠航线影像,其中任意 2 组影像都可以构成具有航向重叠的空中立体像对^[7]。

按照经典摄影测量的数学模型^[7-8],相机各镜头的焦距按下式计算:

正视相机: $f = a \cdot H / GSD$,

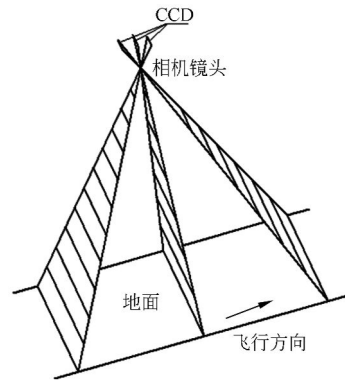


图 1 三镜头三线阵摄影测绘模型简图

Fig. 1 Diagram of three-camera three-linear array photogrammetry

斜视相机: $f' = f / \cos \alpha = a \cdot H / (GSD \cdot \cos \alpha)$, 其中: a 为 CCD 的像元尺寸, H 为轨道高度, GSD 为地面像元分辨率, α 为相机交会角。

在这个模型中,相机镜头采用同轴光学系统,传感器焦面置于轴上与光轴垂直,相机视轴与光轴重合,但离轴三反光学系统成像相当于同轴系统的轴外成像,相机光轴上并不成像,传感器的焦面置于轴外,相机视轴与光轴之间存在一个离轴角,所以在采用离轴三反相机进行测绘的数学模型中,首先需要修正相机交会角的定义。在经典测绘模型中相机交会角定义为相机光轴的夹角^[9-10],但离轴三反光学系统应用于测绘时,如果这样定义,构建的测绘模型就不符合实际的物像关系,所以在离轴三反测绘模型中相机交会角的定义修正为相机传感器焦面所对应的镜头视轴之间所夹的角。后文中所涉及交会角均以此定义。

一般情况下,在离轴三反两线阵测绘相机的成像系统中,为保证在相同相机交会角条件下整个系统的结构紧凑,布局合理,将正视与斜视相机的光轴靠中心布置,视轴靠两侧布置,简化模型图 2 所示,其中 α 为相机交会角, β 为正视相机离轴角, γ 为斜视相机离轴角, H 为轨道高度。

正视相机与斜视相机焦距计算公式推导过程如下(三线阵测绘相机焦距计算公式可由两线阵公式类推得出):

令正视相机与斜视相机 CCD 像元尺寸为 a , 地面像元分辨率为 GSD , 正视相机焦距与斜视相

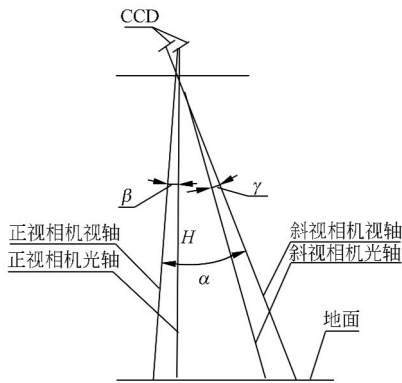


图 2 两线阵摄影测绘模型简图

Fig. 2 Diagram of two-linear array photogrammetry

机焦距分别为 f_1 、 f_2 。定义 f_1' 、 f_2' 为正视相机视距和斜视相机视距(视距即沿视轴上的满足实际物像关系的焦距),其在各自光轴上的投影即分别为前后视相机的焦距 f_1 、 f_2 ; u_1 、 u_2 为正视相机物距和斜视相机物距。

从而对正视相机可得出如下 3 个等式:

$$\begin{aligned} f_1 &= f_1' \cos \beta, \\ f_1' &= a \cdot u_1 / \text{GSD}, \\ u_1 &= H / \cos \beta. \end{aligned}$$

由此可得正视相机焦距计算公式:

$$f_1 = a \cdot H / \text{GSD}. \quad (1)$$

对斜视相机可得出如下 3 式:

$$\begin{aligned} f_2 &= f_2' \cos \gamma, \\ f_2' &= a \cdot u_2 / \text{GSD}, \\ u_2 &= H / \cos(\alpha - \beta). \end{aligned}$$

由此可得斜视相机焦距计算公式:

$$f_2 = a \cdot H \cos \gamma / [\text{GSD} \cdot \cos(\alpha - \beta)]. \quad (2)$$

而按照经典测绘模型(交会角为相机光轴夹角),前后视相机焦距计算公式分别为:

$$\begin{aligned} f_1 &= a \cdot H / \text{GSD}, \\ f_2 &= f_1 / \cos(\alpha - \beta - \gamma) = a \cdot H / [\text{GSD} \cdot \cos(\alpha - \beta - \gamma)]. \end{aligned}$$

由此可以看出,当不考虑地球曲率半径时,对于正视相机,经典焦距计算公式依然适用,而对于斜视相机,经典焦距计算公式由于没有考虑到离轴角的影响而存在一定的偏差。这里对以下技术指标的离轴三反测绘相机的斜视焦距计算进行对比:

地面像元分辨率为 2 m,相机交会角为 26° , CCD 像元尺寸为 $8 \mu\text{m}$ 。

正视与斜视相机离轴角设计成相同值。

表 1 斜视相机焦距计算结果对比

Tab. 1 Comparison of focus calculations of tilt-looking camera

轨道高度/km	5°离轴角/mm			7°离轴角/mm		
	经典公式	修正公式	偏差	经典公式	修正公式	偏差
500	2 080.6	2 134.2	53.6	2 044.7	2 099.5	54.8
700	2 912.9	2 987.8	74.9	2 862.6	2 939.3	76.7

由表 1 可见,随着轨道高度的提高和离轴角的增大,由经典公式所计算的斜视相机焦距与修正后相机焦距的偏差随之增大,在 700 km 轨道高度和 7° 离轴角时,相机焦距计算的相对偏差达到 2.6%,从而造成实际地面像元分辨率 2.6% 的偏差,由公式

$$\sigma_h = \sqrt{\left(\frac{H}{B}\right)^2 \cdot [(0.43\text{pixel})^2 + 0.7^2] + (B^2 + Y^2) \cdot (0.3\sigma_\varphi)^2}$$

可知^[7],这将直接影响到测绘的高程精度,式中 σ_h 为高程精度, H 为轨道高度, B 为基线长, pixel 为地面像元分辨率, Y 为地面覆盖宽度, σ_φ 为测角误差。因此在采用离轴三反相机进行高轨道卫星摄影测量的模型中,为保证测绘精度,在斜视相机焦距的计算中要对经典计算公式进行修正,需要考虑离轴角的影响,按照式(2)进行计算。

3 地球曲率的影响

在相机交会角不大时,相机焦距的计算可以不考虑地球曲率的影响,但一般来讲为保证测绘相机的高程精度,要求相机基高比尽量大,从而交会角较大,尤其对于高轨道卫星摄影测量,覆盖的地面跨度很大,因此在进行相机焦距计算时还需要考虑地球曲率的影响。考虑地球曲率时摄影测绘模型如图 3 所示。

图 3 中, R 为地球曲率半径,其余参数定义与前文定义相同。

对正视相机可得:

$$f_1 = f_1' \cos \beta, \quad (3)$$

$$f_1' = a \cdot u_1 / \text{GSD}, \quad (4)$$

$$u_1^2 - 2(H+R) \cdot \cos \beta \cdot u_1 + (H+R)^2 - R^2 = 0. \quad (5)$$

由式(5)可得:

$$u_1 = (R+H) \cos \beta \pm \sqrt{(H+R)^2 \cos^2 \beta - H(H+2R)}.$$

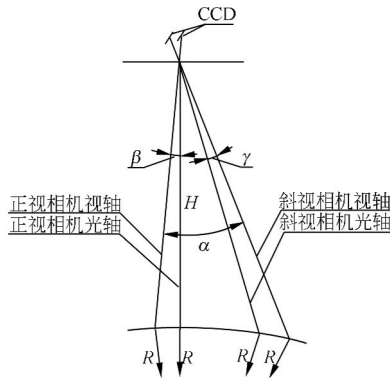


图 3 考虑地球曲率的两线阵摄影测绘模型简图

Fig. 3 Diagram of two-linear array photogrammetry considering the effect of Earth curvature

由于 $R \gg H, R \gg u_1$, 可得出:

$$u_1 = (R + H) \cos \beta - \sqrt{(H + R)^2 \cos^2 \beta - H(H + 2R)}. \quad (6)$$

由式(3)、(4)、(6)可得,

$$f_1 = a \cdot \cos \beta \cdot [(R + H) \cos \beta - \sqrt{(H + R)^2 \cos^2 \beta - H(H + 2R)}] / \text{GSD}. \quad (7)$$

对斜视相机:

$$f_2 = f_2' \cos \gamma, \quad (8)$$

$$f_2' = a \cdot u_2 / \text{GSD}, \quad (9)$$

$$u_2^2 - 2(H + R) \cdot \cos(\alpha - \beta) \cdot u_2 + (H + R)^2 - R^2 = 0, \quad (10)$$

由式(10)可得,

$$u_2 = (R + H) \cos(\alpha - \beta) \pm \sqrt{(H + R)^2 \cos^2(\alpha - \beta) - H(H + 2R)}.$$

由于 $R \gg H, R \gg u_2$ 可得出:

$$u_2 = (R + H) \cos(\alpha - \beta) - \sqrt{(H + R)^2 \cos^2(\alpha - \beta) - H(H + 2R)}, \quad (11)$$

由式(8)、(9)、(11)可得,

$$f_2 = a \cdot \cos \gamma \cdot [(R + H) \cos(\alpha - \beta) - \sqrt{(H + R)^2 \cos^2(\alpha - \beta) - H(H + 2R)}] / \text{GSD}. \quad (12)$$

我们就以下技术指标的离轴三反测绘相机的焦距计算举例进行对比,即应用式(1)、(2)与式(7)、(12)对比。

地面像元分辨率 2 m, 相机交会角为 26° , CCD 像元尺寸为 $8 \mu\text{m}$, 地球曲率半径 R 为 6 371 km, 正视与斜视相机离轴角设计成相同值。

表 2 考虑地球曲率时相机焦距计算结果对比
Tab. 2 Comparison of focus calculations considering the effect of earth curvature

	轨道高 度/km	5°离轴角/mm			7°离轴角/mm		
		忽略 R	考虑 R	偏差	忽略 R	考虑 R	偏差
正 视 相 机	500	2 000	2 000.6	0.6	2 000	2 801.2	1.2
	700	2 800	2 001.2	1.2	2 800	2 802.3	2.3
斜 视 相 机	500	2 134.2	2 146.6	12.4	2 099.5	2 109.4	9.9
	700	2 987.8	3 012.4	24.6	2 939.3	2 958.7	19.4

由表 2 可见, 当不考虑地球曲率时, 所计算出的斜视相机焦距与考虑地球曲率时的计算值有一定的偏差, 并且轨道高度越高偏差越大。在 700 km 轨道高度, 5° 离轴角时斜视相机焦距计算相对偏差达到 0.8%, 从而会对测绘的精度产生一定的影响。不考虑地球曲率时的正视相机的焦距计算值与考虑地球曲率时的计算值偏差很小, 因此正视相机的焦距计算依然可以采用经典计算公式。

4 结 论

在地面像元分辨率为 2 m, CCD 像元尺寸为 $8 \mu\text{m}$, 轨道高度为 700 km 和离轴角为 7° 条件下, 应用经典计算公式得出的斜视相机焦距与应用修正后的计算公式所得出的斜视相机焦距相对偏差达到 2.6%, 从而影响测绘的高程精度。因此, 在采用离轴三反相机进行摄影测量时, 为避免由于焦距计算偏差所引起的测绘精度的降低, 斜视相机焦距的计算应将离轴角考虑在内, 按照式(2)进行计算。在交会角较大, 并且轨道高度较高时还应考虑地球曲率的影响, 修正公式, 按照式(12)来计算斜视相机的焦距。正视相机的焦距计算可以沿用经典计算公式。

参考文献:

[1] 张科科, 阮宁娟, 付丹鹰. 国外空间用三反离轴相机

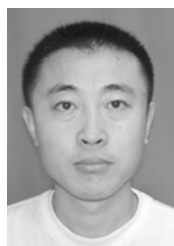
发展分析与思考[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(3): 63-70.
ZHANG K K, RUAN N J, FU D Y. Analysis and consideration of development of overseas space off -

- axis TMA system camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(3): 63-70. (in Chinese)
- [2] 陈世平. 航天遥感科学技术的发展[J]. *航天器工程*, 2009, 18(2): 2-7.
CHENG SH P. Development of space remote sensing science and technology [J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(2): 2-7. (in Chinese)
- [3] 田铁印, 王红, 古风安, 等. 三线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2693-2697.
TIAN T Y, WANG H, GU F A, *et al.*. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2693-2697. (in Chinese)
- [4] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2165-2171.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2165-2171. (in Chinese)
- [5] 常凌颖, 赵葆常, 陈立武. 用于航天立体摄影测量的光学系统设计[J]. *光子学报*, 2007, 36(3): 540-544.
CHANG L Y, ZHAO B CH, CHEN L W. Design of optical system for aerospace photogrammetry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(3): 540-544. (in Chinese)
- [6] 郭永祥, 李英才, 梁天梅, 等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2681-2683.
GUO Y X, LI Y C, LIANG T M, *et al.*. Optical design of the uncosxial three-mirror system with wide field of view [J]. *Acta Optica Ainica.*, 2010, 30(9): 2681-2683. (in Chinese)
- [7] 王任享. 三线阵 CCD 影像卫星摄影测量原理[M]. 北京: 测绘出版社, 2006.
WANG R X. *Satellite Photogrammetric Principle for Three-Line Array CCD Imagery*[M]. Beijing: Cehui Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 王之卓. 摄影测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
WANG ZH ZH. *Photogrammetric Principle*[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. (in Chinese)
- [9] 韩旭, 马军, 居波, 等. 三线阵测绘相机光学试验交会角测试系统[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12): 2960-2964.
HAN X, MA J, JU B, *et al.*. Measuring syserm of space intersection angle for three-line mapping camera in thermal-optical test [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2960-2964. (in Chinese)
- [10] 张影. 三线阵 CCD 立体测绘相机总体技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2006.
ZHANG Y. *Study on the Collectivity Technology of the Tri-linear CCD Mapping Camera* [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2006. (in Chinese)

作者简介:



郭疆(1976—),男,新疆石河子人,副研究员,2000年于吉林工业大学获学士学位,2001年于吉林大学获硕士学位,主要从事空间遥感成像技术的研究。E-mail: guojiang001@yahoo.com.cn



孙继明(1982—),男,吉林省吉林市人,助理研究员,2005年、2007年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士学位,主要从事光机结构设计的研究。E-mail: mingjisun@163.com



邵明东(1983—),男,山东曹县人,助理研究员,2004年、2007年于吉林大学分别获学士、硕士学位,主要从事空间遥感成像技术的研究。E-mail: shaomingd@tom.com



胡海飞(1984—),男,江西瑞金人,研究实习员,研究方向为空间光机结构设计、集成分析和优化。E-mail: huhf@ciomp.ac.cn