

# 一种星载红外多光谱扫描相机成象仿真分析

郭兆曾 赵 阳

(北京卫星信息工程研究所 北京 100080)

**摘 要** 该文建立了一种星载红外多光谱扫描相机的成象模型, 该模型描述了卫星在轨飞行过程中, 红外相机的成象过程, 同时包括了卫星姿态、轨道运动、地球自传、地球曲率和高斯投影的影响。利用该模型编制了仿真程序, 制作了仿真图象, 进行了仿真计算, 对红外遥感图象的几何质量和配准精度进行了仿真分析。

**关键词** 仿真, 图象质量, 红外相机

## 1 前 言

一些应用卫星安装了红外多光谱扫描相机(以下简称红外相机)。红外相机装有一个摆镜, 其摆动轴平行于  $X$  轴, 红外探测器亦平行于  $X$  轴, 在卫星飞行过程中, 摆镜作周期性摆动, 以使红外相机成象。

该文建立了一种星载红外相机的成象模型, 用数学方法描述了成象过程中目标和图象的几何关系, 利用该模型可以分析姿态振动、轨道运动、地球自转、地球曲率、地图投影等对象质的影响<sup>[1]</sup>。

利用该模型编制了仿真程序, 制作了仿真图象, 进行了仿真计算, 对红外遥感图象的几何质量和配准精度进行了仿真分析。

## 2 成象模型

建立成象模型, 就是用数学方法描述成象过程中目标和图象之间的几何关系, 分析、预测遥感图象的几何质量, 本模型由姿态运动、轨道运动、地球运动和地球投影等几部分组成。

### 2.1 使用的坐标系

(1) 混合坐标系  $X_{30}$

原点在地球质量中心,  $Z_{30}$  轴指向  $t$  时刻真极,  $X_{30}$  轴指向假想春分点,  $Y_{30}$  在其赤道面上, 向东组成右手系。

(2) 瞬时地心坐标系  $X_G$

原点在地球中心,  $X_G$  轴指向经度 0,  $Z_G$  轴指向

瞬时北极,  $0_G X_G Y_G Z_G$  构成右手系。

(3) 轨道坐标系  $X_0$

原点  $0_0$  在卫星质心,  $Z_0$  轴指向地心,  $X_0$  轴指向飞行方向,  $0_0 X_0 Y_0 Z_0$  构成右手系。

(4) 本体坐标系  $X_b$

原点  $0_b$  在卫星质心,  $X_b$ 、 $Y_b$ 、 $Z_b$  轴分别取卫星的三个主惯量轴。

(5) 瞬时摄影坐标系  $X_p$

原点取在投影中心(为方便起见, 取于卫星质心),  $Z_p$  轴为透视中心轴,  $X_p$  轴与成象线阵垂直,  $Y_p$  轴平行于成象线阵。

### 2.2 成象模型

为了方便描述, 红外相机成象可以视为柱面成象, 如图 1, 假定

(1) 投视中心与卫星质心重合;

(2) 象元在焦平面内, 且与  $O_b$ 、 $X_b$  轴平行;

(3) 象元投影中心坐标为  $(0, 0, -f)$ ,  $f$  为相机焦距。

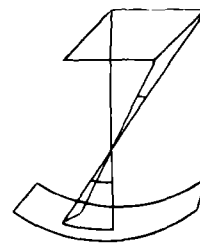


图 1 成象原理图

任取一象元  $a$ (见图 1), 其在卫星摄影坐标系中的坐标为  $(x_a, y_a, -f)$ , 对应的扫描角为:

$$\alpha = -y_a / f,$$

$$\beta = \text{tg}^{-1}(x_a / f)$$

则在地心坐标中的投影为:

$$Z = \begin{bmatrix} p_a^G \\ q_a^G \\ r_a^G \end{bmatrix} = [M_3][M_1][M_2] \begin{bmatrix} p_a^b \\ q_a^b \\ r_a^b \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,

$$[M_1] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos U & \sin U & 0 \\ -\sin U & \cos U & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos I & \sin I \\ 0 & -\sin I & \cos I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega & 0 \\ -\sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[M_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[M_3] = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

式中,

$I$  为倾角;  $U$  为幅角;  $\Omega$  为升交点和  $O_a$ 、 $X_a$  轴的夹角;

$\psi$  为滚动角;  $\theta$  为俯仰角;  $\varphi$  为偏航角。

### 2.3 象元对应的地面目标

上面已经求出对应象元入射线的方向余弦在地心坐标系中的坐标, 以下在相同的坐标系中求对应的地面目标的坐标, 设

(1) 摄象时刻卫星的星历位置为:

$$S = (x_s^G, y_s^G, z_s^G)^{-1}$$

(2) 象元对应的地面目标为:

$$E = (x_e^G, y_e^G, z_e^G)^{-1}$$

(3) 采用克拉索夫椭球模型, 则有

$$E = (a_e \cos \lambda_{S_e}, \cos \Phi_{S_e}, a_e \sin \lambda_{S_e}, \cos \Phi_{S_e}, c_e \sin \Phi_{S_e})^{-1} \quad (2)$$

式中,  $\Phi_{S_e}$  是地心纬度;  $\lambda_{S_e}$  是经度;

$a_e = 6378.245\text{km}$  地球长半径;

$c_e = 6356.86194\text{km}$  地球短半径;

有  $e^2 = (a_e^2 - c_e^2) / a_e^2$ 。根据共线条件, 则有

$$E = S + \mu \cdot Z \quad (3)$$

式中,  $\mu$  是待定常数, 满足以下代数方程:

$$A\mu^2 + B\mu + C = 0,$$

取  $\mu$  的最小解,  $\mu = -(B - \sqrt{B^2 - AC}) / A$ , 式中,

$$A = c_e^2[(p_a^G)^2 + (q_a^G)^2] + a_e^2(r_a^G)^2$$

$$B = c_e^2(x_s^G p_a^G + y_s^G q_a^G) + a_e^2 z_s^G r_a^G$$

$$C = c_e^2[(x_s^G)^2 + (y_s^G)^2] + a_e^2[(z_s^G)^2 - c_e^2]$$

由 (2), (3) 式得目标的地心经度、纬度:

$$\Phi_{S_e} = \arcsin(z_e^G / c_e)$$

$$\lambda_{S_e} = \arctg(y_e^G / x_e^G)$$

(当  $(y_e^G / x_e^G) < 0$  时,  $\lambda_{S_e} = \lambda_{S_e} + \pi$ )

最后, 利用下述迭代公式, 求得目标的地理纬度  $\Phi$ :

$$\Phi_{i+1} = \Phi_i + \sin^{-1}(N_i e^2 \sin \Phi_i \cos \Phi_i / R)$$

式中,  $\Phi_i$  是  $\Phi$  的第  $i$  次迭代;

$$e^2 = 0.006693421623; a_e = 6378.245\text{km}$$

$$R = (x_s^2 + y_s^2 + z_s^2)^{1/2}; N_i = a_e / (1 - e^2 \sin^2 \Phi_i)^{1/2}.$$

### 2.4 计算高斯平面坐标

我们采用高斯投影坐标, 前面计算了地面目标的地理经度、纬度, 再利用高斯投影公式, 可以将其换算成高斯平面坐标  $X, Y$ 。

## 3 仿真分析

根据成象的物理过程, 建立成象模型, 制作了仿真图象, 并分析了几何畸变、定位等误差。考虑不同谱段象元位置的差别, 对谱段配准进行了分析。

### 3.1 配准分析

**配准影响** 扫描式红外多光谱相机, 不同谱段探测器在焦面安装位置不同。因此, 同一成象时刻, 不同谱段探测器对应的目标各不相同, 相同地面目标对应不同谱段的成象时间有先有后, 当相机处于静止状态时, 无配准误差。当相机处于运动时, 由于成象时间差别, 使探测器不能完全对应相同目标, 产生配准误差。

利用上述成象模型, 考虑轨道运动、地球自转、地球曲率等因素影响, 我们计算了象元对应地面坐标, 图 2、图 3 显示了象元重叠情况。图 2 是投影中心附近的象元, 图 3 是远离投影中心的象元, 实线框出谱段 1 象元对应的地面覆盖区域, 宽虚线框为谱段 2 的, 短虚线框是谱段 3 的, 可以看出距

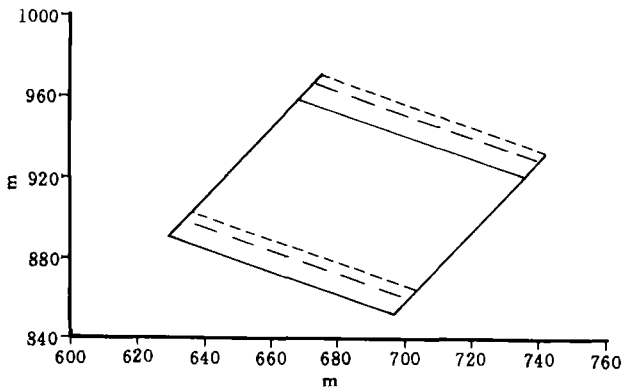


图 2 象元(0, 0)的 3 谱段重叠情况

Fig.2 The registration accuracy of band 1,2,3, pixel (0,0)

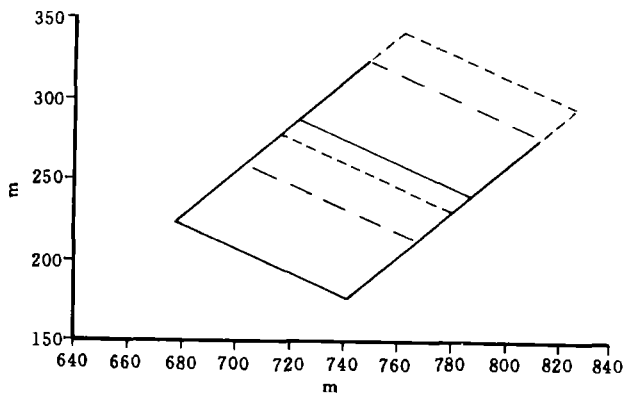


图 3 象元(1000, 1000)的 3 谱段重叠情况

Fig.3 The registration accuracy of band 1,2,3, pixel (1000, 1000)

离投影中心越近, 象元重叠率越高。重叠率在图 2 中, 谱段 1、2 间 88%, 谱段 2、3 间 93%, 谱段 1、3 间 80%; 在图 3 中, 谱段 1、2 间 50%, 谱段 2、3 间 70%, 谱段 1、3 间 35%。

**仿真图象** 模拟红外相机的成象过程, 进行仿真, 根据原始图象图版 I 图 4, 用计算机仿真制作了图版 I 图 5。

### 3.2 几何质量

利用成象模型和摆镜摆动影响下卫星姿态角数

据, 做出仿真图象; 再用 0 姿态角做出一幅仿真图象(无摆镜摆动情况), 作为基准图象。其象幅均为  $5400 \times 5400$  象元, 行、列各间隔 600 象元取一点, 作为精度检验用的控制点。

**计算两幅图象对应点的均方差**

$$RMS = \{[\Sigma(X_i - X_0)^2 + \Sigma(Y_i - Y_0)^2] / n\}^{1/2}$$

式中,  $(X_i, Y_i)$  为有摆镜摆动的仿真图象点

$(X_0, Y_0)$  为无摆镜摆动的仿真图象点。

此数据表示姿态影响下的绝对定位误差, 计算结果  $RMS$  偏差值为 0.1832m。

**计算内部畸变误差**

误差平均值

$$DELTX = 1 / n \Sigma(X_i - X_0)$$

$$DELTY = 1 / n \Sigma(Y_i - Y_0)$$

单方向误差的标准偏差

$$DELTMX = (1 / n - 1 \Sigma[(X_i - X_0)^2 - (DELTX)^2])^{1/2}$$

$$DELTMX = (1 / n - 1 \Sigma[(Y_i - Y_0)^2 - (DELTY)^2])^{1/2}$$

误差的标准偏差

$$DDTM = ((DELTMX)^2 + (DELTMX)^2)^{1/2}$$

$DDTM$  表示由于参数误差引起的相对定位误差, 反映了图象的内部畸变, 计算结果  $DDTM$  偏差值为 0.1821m。

该文根据红外相机成象物理过程, 建立了成象的仿真模型, 分析了成象的几何质量和配准精度。所得结果, 可为总体方案设计和红外相机研制提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] 郭光曾等. 国土卫星成象过程的数学模拟与几何失真恢复. 环境遥感, 1989, 4(3).

### 作 者 简 介

郭兆曾, 男, 出生于 1937 年 11 月, 研究员, 1961 年毕业于南开大学数学力学系, 现在主要研究方向是卫星遥感图象质量评价和处理, 已在《环境遥感》、《宇航学报》、《自动化学报》、《应用数学》等发表论文 30 余篇。

## The Simulation and Analysis of IR-MSS Image

Guo Zhaozeng    Zhao Yang

*(Beijing Institute of Satellite Information Engineering)*

**Abstract** In this paper, the photograph model of IR-MSS is presented. The model describes the scanner photograph, and includes the effect of the attitude of satellite, the orbit motion, the earth rotation, the earth shape and the Gauss map. The model is used to analyse and estimate the geometry quality and registration of the satellite IR-MSS image.

**Key words** Image quality, Simulation, IR-MSS

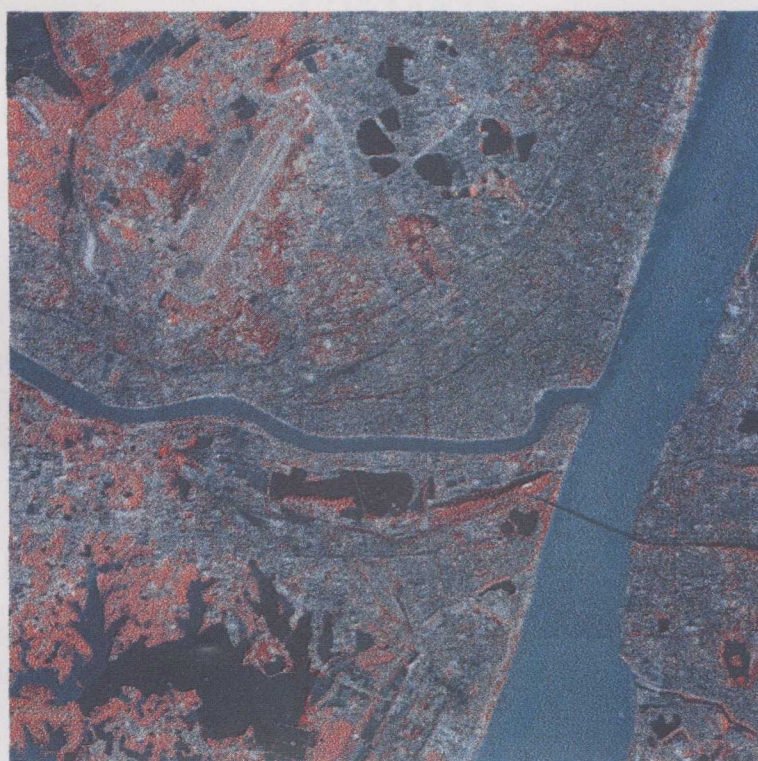


图4 原始图象

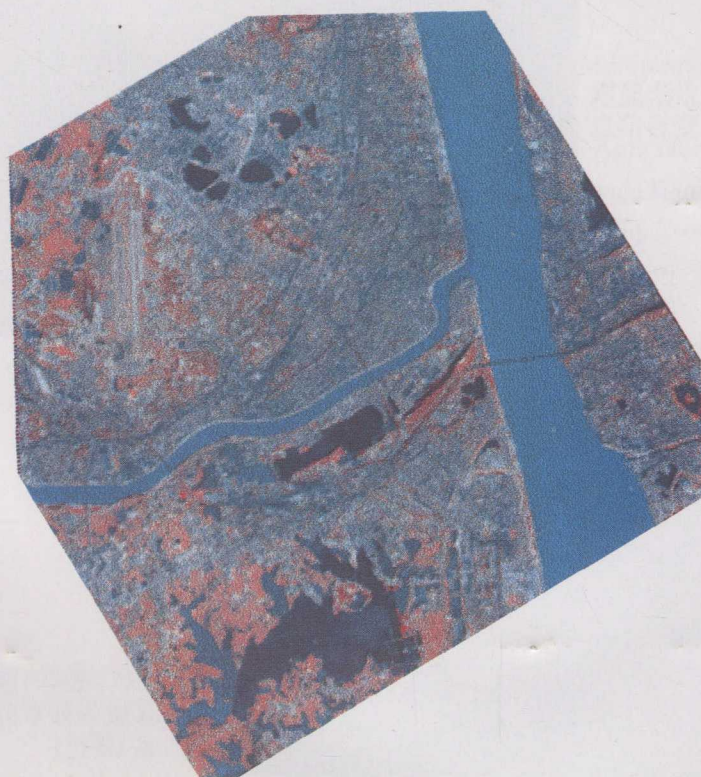


图5 仿真图象