

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.11.006

## 基于成像过程的航空相机成像仿真系统

范鹏飞, 范秀英, 梁勇, 杨必军

(空军航空大学 特种专业系, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 航空相机成像仿真是改进相机设计、系统性能优化需要解决的重要问题。阐述了航空相机的成像过程, 建立了成像过程模型, 包括目标生成模型、大气传输模型、航空相机模型、成像平台模型, 最后构建了航空相机成像仿真系统的结构体系, 提出了系统的仿真方案。根据实际的任务需求, 利用编制的仿真软件确定相机的参数, 实践表明该系统对相机初始设计阶段的参数选择和综合性能评价有一定的参考意义。

**关键词:** 航空相机; 成像过程; 成像仿真

**中图分类号:** TP391.9; TN911.74 **文献标识码:** A

## Imaging Simulation System for Aerial Camera Based on Imaging Process

Fan Pengfei, Fan Xiuying, Liang Yong, Yang Bijun

(Dept. of Special Information, Air Force Aviation University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The simulation of aerial camera was an important problem to optimize the design and improve system capability. Imaging process of aerial camera was described. Imaging process models were established, including objective generation model, atmospheric transmission model, aerial camera model and imaging platform model. At last, the architecture of simulation system for aerial camera was constructed and the simulation scheme was proposed. According to the practical task requirements, the parameters of camera are identified by the emulation software. The practice shows that the system has some reference value for the parameters selection and comprehensive performance evaluation of aerial camera in the period of initial design.

**Keywords:** aerial camera; imaging process; imaging simulation

### 0 引言

在航空相机的预研阶段, 相机各组成部分参数的选取将直接影响到相机的整体性能。通过系统仿真, 研制人员可以方便快捷地得到不同参数配置、不同使用环境条件下的设计结果, 能在相机投产前对其整体性能进行预估, 以确定系统的成像品质是否满足要求、系统是否优化, 及早发现设计中存在的不足, 减少了设计反复, 缩短了研制周期, 降低了研制成本<sup>[1]</sup>。因考虑因素不全面, 目前建立的航空相机成像模型不完备, 仿真结果的可靠性不高。故针对以上不足, 建立基于成像过程的航空相机成像模型, 并提出航空相机成像的仿真方案。

### 1 航空相机成像仿真

航空相机只是整个遥感成像系统中的一个环节, 只包含航空相机自身的模型, 不能准确地预测整个遥感系统的最终成像结果, 因此, 航空相机成像仿真不仅要考虑相机本身的各个环节, 还要考虑成像过程中的其它因素。航空相机的组成及成像过程<sup>[2]</sup>如图 1, 目标和背景自身辐射以及反射的能量经过大气的吸收、散射和扰动等影响进入光学系统; 光学系统将入射的辐射能量聚焦到成像器件的焦平

面上; 成像器件将焦平面上的光信号转换成电信号; 经信号处理最终转换为显示器上的灰度图像, 并通过人眼进行判读, 在成像过程中还要受到相机振动和成像平台姿态变化的影响。

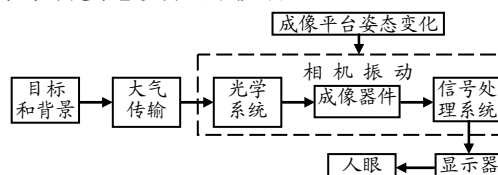


图 1 航空相机的成像过程

对航空相机成像仿真就是通过分析每个成像单元的物理过程, 考虑影响成像的各种因素, 形成一个包含各个组成单元和各种物理现象的仿真系统, 重现航空相机的成像过程。

### 2 仿真系统设计方案

#### 2.1 航空相机成像模型的建立

根据航空相机的成像过程, 可以将航空相机成像模型分成 4 个分系统模型: 目标生成模型、大气传输模型、航空相机模型、成像平台模型。

##### 2.1.1 目标生成模型

目标生成模型<sup>[3]</sup>是成像过程模型的第一环节, 模型采用在评价航空侦察相机性能时所普遍采用的

收稿日期: 2010-05-18; 修回日期: 2010-07-01

作者简介: 范鹏飞 (1987-), 男, 山西人, 硕士研究生, 从事航空侦察设备的成像仿真研究。

分辨率鉴别板图样作为目标，这与实物试验评价相机性能时所采用的目标是一致的，所获得的结果容易作为相机性能评价的一个环节而纳入其中，具有较强的实用性和普遍意义。

目标生成模型通过输入黑（白）线条的宽度及目标的光谱反射率，即可生成一幅满足一定分辨率和对比度的鉴别板仿真图像。

### 2.1.1.2 大气传输模型

大气传输模型主要用于计算光谱辐射在大气传输中的衰减、散射等效应。笔者采用美国空军地球物理实验室的 LOWTRAN 7 大气传输、辐射计算软件，模拟大部分典型气象条件下大气的传输特性，建立不同的气象模型。

图 2 为大气传输模型示意图，设置初始参数后，通过大气传输模型可以计算不同太阳高度角下、不同反射率的地物辐射经过大气散射和吸收后到达相机入瞳处的辐亮度数据，从而确定在此条件下大气对空间相机成像的影响。

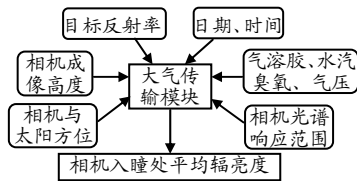


图 2 大气传输模型示意图

### 2.1.1.3 航空相机模型

调制传递函数 (MTF) 描述了航空相机对目标细节的分辨能力，通常采用 MTF 来评定其成像质量。航空相机各分系统的调制传递函数包括：光学系统的调制传递函数、成像器件的调制传递函数和信号处理电路的调制传递函数。

#### 1) 光学系统的调制传递函数 (MTF<sub>opt</sub>)

影响光学系统调制传递函数<sup>[4]</sup>的因素有：孔径衍射极限的限制、中心遮拦、光学设计残余像差、制造装配误差等。

对于圆形孔径，设光学系统孔径衍射的调制传递函数为 MTF<sub>diff</sub>，则：

$$MTF_{diff}(f_s) = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos\left(\frac{f_s}{f_c}\right) - \left(\frac{f_s}{f_c}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{f_s}{f_c}\right)^2} \right]$$

其中， $f_c$  是光学系统的空间截止频率， $f_c = D/\lambda f'$ ， $D$  是光学孔径， $\lambda$  为波长， $f'$  是焦距； $f_s = (f_x^2 + f_y^2)^{1/2}$ ， $f_x$ 、 $f_y$  分别为目标图像水平和垂直方向的空间频率。

设光学系统像差的调制传递函数为 MTF<sub>blur</sub>，则：

$$MTF_{blur}(f_s) = \exp(-2\pi^2\sigma^2 f_s^2)$$

其中， $\sigma = \sigma_r/F$ ， $\sigma_r$  是弥散圆能量分布（符合高斯分布）的标准偏差。

则光学系统的调制传递函数为：

$$MTF_{opt} = MTF_{diff} \cdot MTF_{blur} \tag{1}$$

#### 2) 成像器件的调制传递函数 (MTF<sub>detec</sub>)

设成像器件的空间滤波调制传递函数为 MTF<sub>spatial</sub>，则：

$$MTF_{spatial}(f_x, f_y) = \text{sinc}(f_x \pi dx) \cdot \text{sinc}(f_y \pi dy)$$

其中， $dx$ 、 $dy$  为单位像元的尺寸。

设成像器件推扫积分对应的调制传递函数为 MTF<sub>int</sub>，则：

$$MTF_{int}(f_x, f_y) = \text{sinc}(\pi v M T_i f_y)$$

其中， $v$  是行转移速率； $M$  是成像器件级数； $T_i$  是成像器件的积分时间。

由于机械振动以及环境压强、温度的变化，有可能引起像面离焦。设像面离焦对应的调制传递函数为 MTF<sub>defocus</sub>，则：

$$MTF_{defocus}(f_s) = 2J_1(X)/X$$

其中， $X = \frac{\pi \epsilon f_c}{2N} \left(1 - \frac{f_s}{f_c}\right)$ ， $\epsilon$  为离焦量， $N$  是光学系统的  $F$  数， $N = f'/D$ ； $J_1(X)$  是一阶 Bessel 函数。

则成像器件的调制传递函数：

$$MTF_{detec} = MTF_{spatial} \cdot MTF_{int} \cdot MTF_{defocus} \tag{2}$$

#### 3) 信号处理电路的调制传递函数 (MTF<sub>elec</sub>)

成像器件产生的信号通常为模拟信号，前置放大器目的是消除大的背景基准电平，它可以模拟成简单的 RC 高通滤波器。设前置放大器对应的调制传递函数为 MTF<sub>preamp</sub>，则：

$$MTF_{preamp}(f_i) = \frac{f_i / f_{on}}{[1 + (f_i / f_{on})^2]^{1/2}}$$

其中， $f_i$  是信号处理电路的工作频率， $f_i = v f_x / f'$ ；截止频率  $f_{on}$  是前置放大器响应 3dB 点的频率值。

后置放大器可模拟成 RC 低通滤波器。设后置放大器对应的调制传递函数为 MTF<sub>postamp</sub>，则：

$$MTF_{postamp}(f_i) = [1 + (f_i / f_{off})^2]^{-1/2}$$

其中，截止频率  $f_{off}$  是后置放大器响应 3dB 点的频率值。

当噪声水平相对于信号很可观时，有时常用提举电路来平滑系统的频率响应。设提举电路对应的调制传递函数为 MTF<sub>boost</sub>，则：

$$MTF_{boost}(f_i) = 1 + \frac{K-1}{2} [1 - \cos(\frac{\pi f_i}{f_{max}})]$$

其中,  $f_{\max}$  是增压最大值时的频率,  $K$  是  $f_{\max}$  处的幅值。

则信号处理电路的调制传递函数为:

$$MTF_{elec} = MTF_{preamp} \cdot MTF_{postamp} \cdot MTF_{boost} \quad (3)$$

由式 (1)、式 (2)、式 (3) 得到航空相机整个系统的调制传递函数为:

$$MTF_{sys} = MTF_{opt} \cdot MTF_{detec} \cdot MTF_{elec} \quad (4)$$

设  $Se(x', y')$  为成像器件单位像元的光注入电荷数<sup>[5]</sup>, 则:

$$S_e(x', y') = \frac{\pi a^2 M T_i}{4 N^2 h c} \int_{\Delta \lambda} \lambda \eta(\lambda) T_{opt}(\lambda) R(x, y, \lambda) * PSF_{sys}(x', y', \lambda) d\lambda \quad (5)$$

其中,  $(x, y)$  是地面目标坐标;  $(x', y')$  是地面目标在成像器件焦平面上对应的像点坐标;  $a$  是单位像元的长、宽;  $M$  为成像器件的级数;  $T_i$  为像元的积分时间;  $N$  是光学系统的  $F$  数, 即相对孔径的倒数;  $h$  是普朗克常量;  $c$  是光速;  $\eta(\lambda)$  是成像器件的材料量子效率;  $T_{opt}(\lambda)$  是光学系统的光谱透过率;  $R(x, y, \lambda)$  是目标辐射经过大气散射和吸收后的光谱辐射亮度;  $PSF_{sys}(x', y', \lambda)$  是整个相机系统的点扩散函数, 运算符  $*$  表示二维卷积运算。

$PSF_{sys}$  可由  $MTF_{sys}$  经过二维傅里叶变换得到, 由式 (5) 得到:

$$S_e(x', y') \propto \int_{\Delta \lambda} FT^{-1} \{ FT [ R(x, y, \lambda) ] MTF_{sys}(f_x, f_y, \lambda) \} d\lambda$$

将式 (4) 代入, 即可得到目标辐射经过大气、相机各系统后成像器件单位像元的光注入电荷。然后根据电荷量的大小转换为相应的图像灰度, 模拟经航空相机成像后的退化图像。

### 2.1.4 成像平台模型

通过建立成像平台模型<sup>[6-7]</sup>, 可以确定相机成像时从物点到像点的对应几何投影关系。

假定航空相机的坐标系与飞机的坐标系相重合, 建立相机的右手坐标系  $C$ , 定义  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴分别为飞机的横滚轴、俯仰轴与偏航轴, 其中  $\theta$ 、 $\rho$ 、 $\omega$  为绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴转动的角度, 规定正对坐标轴逆时针旋转为正。飞机俯仰轴与横滚轴所构成的平面作为参考平面, 在飞行过程中认为参考平面始终保持水平状态。 $z$  轴的正方向作为相机光轴的方向。

此时物空间到像空间的关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{-f'}{V_k^T R^T [X \ Y \ H]^T} \times R^T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ H \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\rho & 0 & -\sin\rho \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\rho & 0 & \cos\rho \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\omega & \sin\omega & 0 \\ -\sin\omega & \cos\omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $V_k = [0 \ 0 \ 1]^T$  表示光轴方向上的单位矢量;  $f'$  是焦距;  $H$  是飞行高度;  $R$  为坐标系变换矩阵。

若给定相机的姿态和位置, 由式 (6)、式 (7) 就可以确定从目标到相机成像器件的点对点的对应投影关系。

### 2.2 航空相机成像仿真方案

经过对航空相机成像过程的研究及成像过程模型的理论阐述, 可知用计算机模拟仿真航空相机的成像过程是完全可以实现的。航空相机成像仿真系统的结构体系如图 3。

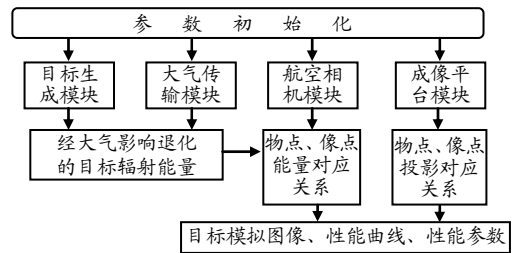


图 3 航空相机成像仿真系统结构体系

整个仿真系统的结构体系采用“黑匣子”模式, 即输入各种参数, 通过仿真得到最终模拟图像和性能曲线、参数, 为相机优化设计提供参考, 分析确定下一次模拟实验的参数。应用航空相机成像仿真系统仿真成像过程可分为 4 个部分:

- 1) 确定航空相机成像仿真系统的工作环境参数。确定目标生成模块、大气传输模块、航空相机模块、成像平台模块所需要的所有输入参数: (1) 目标生成模块: 黑(白)线条的宽度、目标的光谱反射率等; (2) 大气传输模块: 成像日期时间、相机成像高度、相机光谱响应范围、大气模式等; (3) 航空相机模块: 光学系统的光谱透过率、焦距、相对孔径、像敏单元尺寸、电荷转移效率、成像器件材料的量子效率、成像器件级数、行扫描速率等; (4) 成像平台模块: 飞机偏航角、俯仰角、横滚角、成像平台振动函数等。
- 2) 通过仿真系统确定物点和像点的能量对应关系、投影对应关系。目标生成模块生成目标, 通过大气传输模块得到相机入瞳处的辐亮度数据, 再经过相机模块得到物点和像点的能量对应关系; 成像平台模块根据飞机姿态变化数据得到物点和像点的投影对应关系。
- 3) 结合物点、像点的能量对应关系和投影对应关系, 得到最终输出结果。输出结果为目标的模拟灰度图像数据、相机各组成部分的调制传递函数曲线及相机的一些性能参数, 如地面分辨率、地面覆盖范围、侦察时间等。
- 4) 分析结果: 综合分析相机性能曲线、模拟图像数据和性能参数, 对相机的性能作出评价, 为相机的

优化设计提供依据。

### 3 结束语

建立航空相机成像仿真系统既有利于相机的优化设计、缩短研制周期，又可以降低研制成本，提高工作效率，具有重要的研究意义。实践表明，该仿真系统可以方便地对成像过程各个单元进行分析，对相机初始设计阶段的参数选择及综合性能评价有一定的参考意义。

### 参考文献：

[1] 陈世平. 空间相机设计与试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003: 68-69.

[2] JON C.LEACHTENAUER, RONALD G.DRIGGERS. 监

视与侦察成像系统[M]. 陈世平, 等 译. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.

[3] 陶家生. 基于模拟实验及计算机仿真的 CCD 航天相机影像分辨率的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.

[4] 徐中明. 光学遥感器的数字仿真研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.

[5] JEAN-LUC OLIVES, BRUNO LAMISCARRE, MARC GAZALET. Optimization of Electro-Optical Imaging System with an Image Quality Measure[J]. SPIE, 1997, 3025.

[6] 陈晓丽, 冯勇, 龙夫年. TDI 线扫相机光学通道建模与仿真[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 766-767.

[7] 许永森, 丁亚林, 田海英, 等. 航空遥感器姿态像移仿真分析[J]. 激光与红外, 2007, 37(12): 1303-1304.

[8] 黄秋, 陈亦庆, 高志峰, 等. 红外导引头成像系统无热化设计及试验验证[J]. 四川兵工学报, 2009(3): 78-80.

(上接第 7 页)

像素密度 (像素/m<sup>2</sup>) 作为覆盖区内传感器从每个具体的点返回质量的定量指标, 见方程式 (14), 区域内每一点 Q 的单向像素密度依赖于传感器的位置 P<sub>s</sub><sup>e</sup> 和传感器的像素角度 γ。像素角度的计算见方程 (15), 像素角的计算依赖于传感器焦距 (δ, 通过像素测量), 像素角的变化依赖于图 4 所示的从坐标中心到 Q 点的偏移角度。角 α 是从传感器单位矢量到 Q 点和到地平面的法线形成的夹角, H 是传感器在地面以上的垂直高度。

$$\sigma = \frac{1}{H \sec^2(\alpha) \gamma} \tag{14}$$

$$\gamma = \frac{1}{\delta \sec^2 \beta} \tag{15}$$

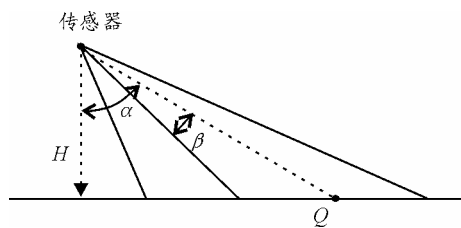


图 4 Q 点沿着传感器覆盖区一个方向计算像素密度所需的角

以上计算的是二维空间的像素密度, 在三维空间中, 可利用同样的方程计算每个点水平和垂直方向的像素密度, 并将两者相乘可得到像素密度的值。

计算格子中每个点的像素密度, 通过在覆盖区内划分最大像素密度, 可以获取相关的质量指标。相应的像素密度分布见图 5。在仿真中可以利用同样的过程来计算地面确切地貌区域的像素密度。

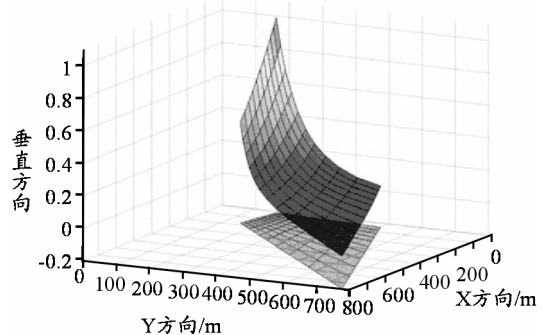


图 5 传感器覆盖区下每个点的相关像素密度

### 2 结论

该模型充分利用给定的传感器观察具体的区域或地貌, 有利于设计飞行模拟器的轨迹, 为通过调查、探测地貌并对其进行分类的方案设计轨迹类型提供了参考。但理想情况下地面是平坦的, 局限性很大且不真实, 将做进一步的研究。

### 参考文献：

[1] 张燕燕, 黄其涛, 等. 飞行模拟器视景系统的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2009(6): 3662-3667.

[2] 谢广辉, 魏少宁. 飞行模拟器视景系统发展现状和趋势[J]. 航天医学与医学工程, 2003(6): 223-226.

[3] 李京伟, 张利萍. 基于虚拟现实技术的飞行视景仿真[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(7): 1935-1937.

[4] 吴晓君, 王昌金. 基于Creator/Vega的战场飞行视景系统的实时仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(9): 2297-2300.

[5] Nettleton, E., Ridley, M., Sukkarieh, S., Göktoğan, A.H., Durrant-Whyte, H.,(2004), Implementation of a Decentralised Sensing Network aboard Multiple UAVs”, Telecommunication Systems Special Issue: Wireless Sensor Networks, (26:2-4), 253-284.

[6] 程明文, 刘勇志, 包小林. 基于FFOM的某型导弹模拟器设计方案评价模型[J]. 四川兵工学报, 2009(1): 88-90.