

·光电系统·

## 航天遥感光学系统设计与研究

赵亮<sup>1</sup>, 李朝荣<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000; 2. 空军驻锦州地区军事代表室, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:**根据航天遥感系统设计的要求,以及航天遥感光学的常用结构分析,最终选用离轴三镜反射镜光学系统结构。使用MATLAB软件编程计算光学系统的初始结构。并对光学系统全视场成像量进行分析,分别用MTF和点列图两种衡量标准对光学系统成像质量分析。

**关键词:**航天遥感;离轴;三镜反射光学系统;MTF;像质

中图分类号:TN216 文献标识码:A 文章编号:1673-1255(2015)-05-0022-04

## Design and Research on Aerospace Remote Sensing Optical System

ZHAO Liang<sup>1</sup>, LI Chao-rong<sup>2</sup>

(1. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China;

2. Military Representative Office of Air Force in Jinzhou, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** According to the design requirements and common structure analysis of aerospace remote sensing system, the off-axis three reflective optical system structure is chosen. MATLAB software is used to calculate the initial structure of the optical system. And the imaging quality in full field of view of the optical system is analyzed. Two measurement standards such as modulation transfer function (MTF) and spot diagram are used respectively to analyze the imaging quality of the optical system.

**Key words:** aerospace remote sensing; off-axis; three reflective optical system; modulation transfer function (MTF); imaging quality

航天遥感是指从大气层之外对地面进行观测,一般观测平台离地80 km以上。从日常生活到国家安全等方面都离不开航天遥感。光学遥感主要用于环境监测、资源管理、城市规划土地利用和信息服务等方面,还用于国防监测、情报搜集、变化检测、精确测图和目标指引等方面<sup>[1]</sup>。航天遥感光学系统工作波段为可见光和短波红外波段,其波长约为0.4~2.5  $\mu\text{m}$ ,部分还包括紫外波段,其波长约为0.2~2.5  $\mu\text{m}$ 之间。随着遥感光学技术的发展和空间分辨率要求,不断提高的实际需要,遥感光学应具有长焦距、大口径、大视场、高分辨率等特点。

### 1 航天遥感光学系统设计

#### 1.1 航天遥感光学系统结构型式分析

光学系统是多种多样的,有折射式、折反式和全反射式。各种形式对比表如表1。首先对于长焦距、大视场光学系统的设计,应采用折射式三片镜系统,这一结构能很好地校正球差、彗差、像散和场曲<sup>[2]</sup>。但折射系统可能产生二级光谱。从光学系统质量上考虑,折射系统采用的是实心镜,其质量最大,折反式系统次之,全反射光学系统质量最轻,且

收稿日期:2015-10-14

作者简介:赵亮(1983-),男,河北蛟河人,本科,主要研究方向为光电工程。

发展了多种大型反射镜轻量化技术,可以进一步减轻全反射光学系统的质量。

表1 各种形式对比表

性能	类型		
	折射式	折反射式	全反射式
大视场	最好	较差	较好
低温灵敏度	最差	中等	最好
气压变化对性能影响	最差	中等	最好
耐辐射能力	最差	中等	最好
消杂光特性	最差	中等	最好
宽波段范围	最差	中等	最好
轻量化程度	最差	中等	最好

## 1.2 航天遥感光学系统分类

### 1.2.1 共轴三镜反射光学系统

同轴三镜反射系统的优点是结构紧凑、装调难度小,但有中心遮拦,降低了入瞳能量,在理论上像质比同样的无遮拦系统低一些。如图1所示。

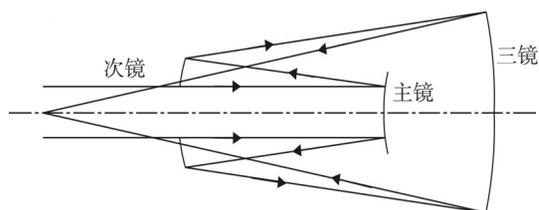


图1 共轴三镜反射系统

### 1.2.2 离轴三镜反射光学系统

离轴三镜反射系统由于没有中心遮拦,提高了焦面照度水平,在理论上MTF较高,可以实现较大视场(包括线视场和面视场),获得接近理想的成像性能和效果,是空间光学遥感器光学系统的发展方向之一<sup>[3]</sup>。本设计决定采用离轴三镜反射式光学系统。如图2所示。

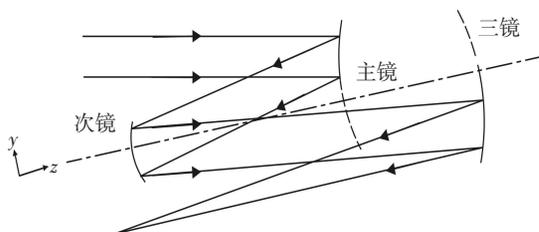


图2 离轴三镜反射系统

## 1.3 光学系统参数确定

### 1.3.1 光学系统焦距的确定

光学系统的焦距值是根据规定的卫星轨道高度 $H$ 、要求的地面像元分辨率 $a$ 及选定的CCD像元尺寸 $b$ 确定的<sup>[4]</sup>,有下式

$$f' = H \frac{b}{a} \quad (1)$$

式中, $H$ 为卫星轨道高度; $b$ 为CCD像元尺寸; $a$ 为地面像元分辨率。

### 1.3.2 光学系统视场角的确定

光学系统实际使用视场角 $2\omega$ 是根据式(1)中确定的焦距值 $f'$ 、选定的焦面接收器件尺寸 $b$ 与像元数 $n$ 按公式确定的<sup>[5]</sup>,为

$$2\omega \geq 2 \arctan \frac{nb}{2f'} \quad (2)$$

### 1.3.3 光学系统相对孔径的确定

光学系统相对孔径 $D/f'$ 的确定,主要依据焦平面接收器件所需的能量及系统要求达到的调制传递函数值这两方面因素。在保证上述两方面要求时,尽量减小光学系统相对孔径,从而达到小与轻的目的<sup>[6]</sup>。

首先根据光学系统是否能达到衍射限初步确定光学系统的相对孔径 $D/f'$ ,当光学系统达到衍射限时,有下式

$$\delta = 2.44\lambda F \quad (3)$$

式中, $\delta$ 为系统达到衍射限时艾里斑直径; $\lambda$ 为谱段范围; $F$ 为光学系统的相对孔径的倒数,即 $F = f'/D$ 。

## 2 航天遥感光学系统初始结构计算

### 2.1 航天遥感光学系统结构计算

光学设计从数学角度上来看就是建立和求解像差方程组,求得的解是结构参数<sup>[7]</sup>。

根据初级像差理论和已有结构分析来求解系统的初始结构<sup>[8]</sup>,如图3。由三级球差系数 $S_I=0$ 得

$$e_1^2 = 1 + \frac{1}{\beta_1^3 \beta_2^3} [\alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 - \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 + e_2^2 \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)^3 - e_3^2 \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)^3] \quad (4)$$

由三级彗差系数  $S_{II}=0$  得

$$e_2^2(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 - e_3^2\alpha_1\alpha_2[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)(1 + \beta_2)^3] = (\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - [\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)] \times (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 - 2\beta_1\beta_2 \quad (5)$$

由三级像散系数  $S_{III}=0$  得

$$\frac{e_2^2\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 + \beta_1)^3}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{e_3^2[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} = \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} - \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)}{\alpha_1\beta_1} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)(1 - \beta_2)}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2} - \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1\alpha_2} \quad (6)$$

由三级场曲系数  $S_{IV}=0$  得

$$\beta_1\beta_2 = \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{(1 + \beta_2)}{\alpha_1\alpha_2} \quad (7)$$

式中,  $\alpha_1 = l_2/f_1 \approx h_2/h_1$  为副镜对主镜的遮拦比;  $\alpha_2 = l_3/l_2 \approx h_3/h_2$  为三镜对副镜的遮拦比;  $\beta_1 = l_2/l_1 = u_2/u_1$  为副镜的放大率;  $\beta_2 = l_3/l_2 = u_3/u_2$  为三镜的放大率;  $e_1^2$  为主镜的二次曲面系数;  $e_2^2$  为次镜的二次曲面系数;  $e_3^2$  为三镜的二次曲面系数。

现在自由变量共有 7 个, 即  $e_1^2, e_2^2, e_3^2, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 。从上面对参数的定义可知,  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  是与轮廓有关的变量, 要消除球差、彗差、像散、场曲, 其中有三个是自由值。可以根据预定值, 之后剩下的变量可以通过 MATLAB 编程来求出。利用程序不断调整, 试算不同的  $\alpha_2, \beta_1, \beta_2$  值, 使解出的系统结构更加合理。

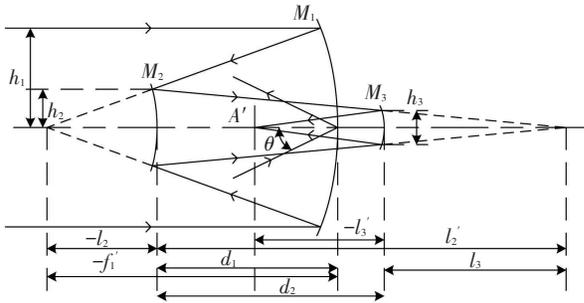


图3 系统结构图

## 2.2 航天遥感光学系统程序设计流程

在三镜系统三级像差理论中, 共有 7 个自由变量,  $\alpha_1$  为次镜对主镜遮拦比,  $\alpha_2$  为三镜对次镜遮拦比,  $\beta_1, \beta_2$  为次镜和三镜的放大率,  $e_1^2, e_2^2, e_3^2$  为三个反

射面的非球面的系数,  $D_1, D_2$  为主镜与次镜、次镜与三镜的间距<sup>[9]</sup>, 系统设计流程图 4 所示。

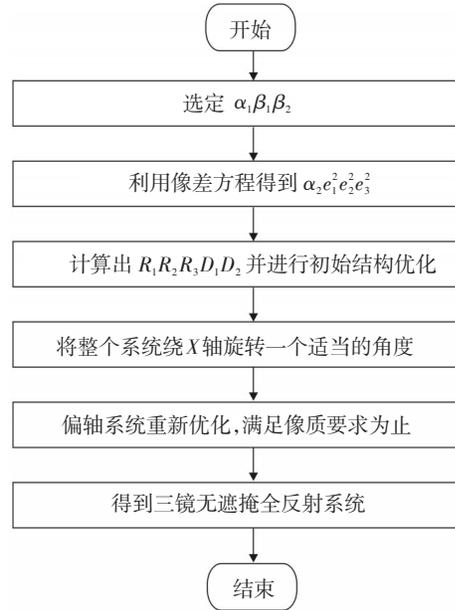


图4 系统设计流程图

## 3 航天遥感光学系统像质评价分析

### 3.1 航天遥感光学系统像的调制度分析

对于高质量光学系统的像质评价, 国内外通用的标准式调制传递函数。系统的传递函数由各个环节的调制传递函数相乘求得。根据调制理论与光学原理, 像的调制度等于目标调制度与光学系统动态传递函数的乘积, 即

$$M_{\text{像}} = M_{\text{目标}} \times MTF_{\text{动态}} \quad (8)$$

式中,  $M_{\text{像}}$  为像的调制度;  $M_{\text{目标}}$  为目标调制度;  $MTF_{\text{动态}}$  为光学系统的动态传递函数。

根据调制原理, 在 Nyquist 频率下, 目标的调制度与对比度关系如下<sup>[10]</sup>

$$M_{\text{目标}} = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \quad (9)$$

式中,  $I_2$  为暗条灰度值;  $I_1$  为明条灰度值。

设目标对比度分别为 2.5:1、10:1、50:1、500:1、1 000:1 经上述公式计算得出调制度分别为 0.429、0.818、0.961、0.996、0.998, 由此得到的像的调制度与光学设计函数的关系如表 2。

人眼能分辨的调制度一般取  $M \geq 0.03$ , 因此要求像的调制度  $M_{\text{像}} \geq 0.03$ 。在对比度低于 2.5:1 时, 即要求  $0.091 M_{\text{设计}} \geq 0.03$ , 还应考虑其他干扰, 因此光学系统设计传递函数应大于 0.4。

表2 像的调制度与光学设计函数的关系

目标对比度	像的调制度	
	飞行方向	垂直方向
2.5:1	0.091MTF 设计	0.101MTF 设计
10:1	0.174MTF 设计	0.193MTF 设计
50:1	0.205MTF 设计	0.227MTF 设计
500:1	0.212 1MTF 设计	0.235MTF 设计
1 000:1	0.213MTF 设计	0.236MTF 设计

### 3.2 航天遥感光学系统视场的像质评价分析

光学系统的成像质量与像差的大小相关, 但任何光学系统都不可能把像差校正到零。在航天遥感光学系统中, 由于光学系统  $x$  方向视场对称, 而  $y$  方向视场为全部视场, 所以选取  $(0^\circ, 0.05^\circ)$ 、 $(0^\circ, 0.95^\circ)$ 、 $(0.4^\circ, 0.64^\circ)$ 、 $(0.75^\circ, 0.05^\circ)$ 、 $(0.75^\circ, 0.95^\circ)$  五个视场, 利用 CODEV 软件自动生成这五个视场的子午和弧矢振幅传函的曲线如图 5。

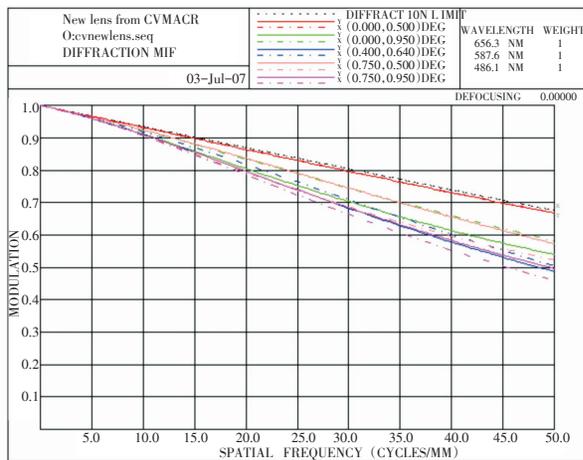


图5 系统的传递函数曲线

选择的 CCD 的像元尺寸为  $10 \mu\text{m}$ , 则系统的奈奎斯特频率为  $50 \text{ lp/mm}$ , 按照系统要求 MTF 在奈奎斯特频率处应大于 0.5。

由图 5 可以看出, 在奈奎斯特频率处, 除了  $(0.75^\circ, 0.95^\circ)$  视场的弧矢方向的 MTF 略低于 0.5, 其余各视场 MTF 值均大于等于 0.5。相机的设计达到

要求。目视分辨率为  $185 \text{ lp}$ , 符合航天相机的目视分辨率要求<sup>[11]</sup>。

图 6 中所示是不同离焦位置的各视场的弥散斑半径。可以看出, 当离焦  $-0.04 \text{ mm}$  时, 系统具有最好的像质。此时各视场弥散斑半径如表 3。

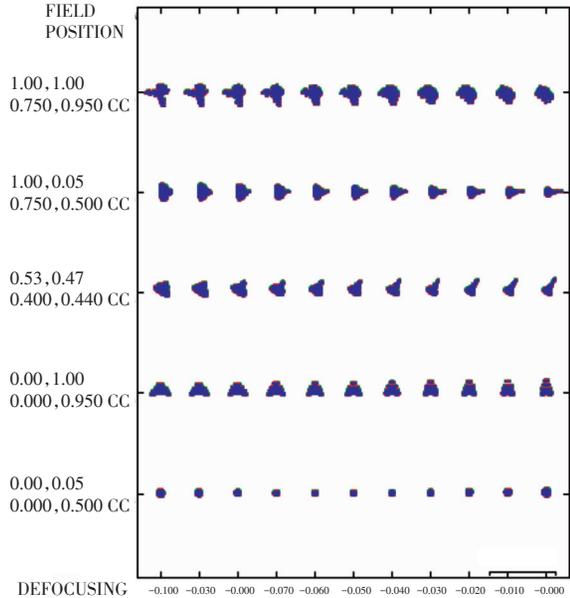


图6 不同离焦位置的各视场的弥散斑半径

表3 离焦  $-0.04 \text{ mm}$  处的各视场弥散斑半径

视场 $x, y$	$0^\circ, 0.05^\circ$	$0^\circ, 1.55^\circ$	$0.4^\circ, 0.8^\circ$
RMS/mm	0.273 59E-02	0.103 5E-01	0.103 7E-01
视场 $x, y$	$0.75^\circ, 0.05^\circ$	$0.75^\circ, 1.55^\circ$	
RMS/mm	0.104 6E-01	0.122 74E-01	

可以看出, 除了  $(0.75^\circ, 1.55^\circ)$  视场的弥散斑半径略大于 CCD 的像元尺寸以外, 而其余视场均小于 CCD 的像元尺寸, 系统 85% 的能量落在 CCD 上, 设计符合要求<sup>[12]</sup>。

## 4 结 论

从概述性的相机需求细化了光学系统的技术指标, 总结了目前国内外各种航天遥感相机使用的光学系统结构的优缺点, 并确定了光学系统的结构和参数。通过初级像差理论推导出相应的系统初始结

(下转第 50 页)

- [4] 钟立俊,曹益平,喻睿智.一种适合在线三维检测的改进算法[J].中国激光,2009,36(6):1503-1507.
- [5] 徐永祥,张乾方,刘松松,等.基于空间频域算法的三维微观形貌的测量[J].光电工程,2014,41(8):16-21.
- [6] 刘严严,徐世伟.基于比值法图像拼接算法研究[J].电子测量技术,2008,31(7):56-58.
- [7] 魏川,张功国,吕晓萌.图像拼接技术在双摄像机监控中的应用[J].激光与红外,2014,44(4):447-450.
- [8] 杜京义,胡益民,刘宇程.基于区域分块的SIFT图像匹配技术研究及实现[J].光电工程,2013,40(8):52-57.
- [9] 杨锋涛,罗江龙,刘志强,等.相位展开的6种算法比较[J].激光技术,2008,32(3):323-326.
- [10] 郭文静,石兵华,金永.关于提高傅里叶变换轮廓术测量精度的研究[J].应用光学,2013,34(5):845-848.
- [11] 黄航,李金龙.基于傅里叶轮廓变换术的钢轨三维面形复原[J].自动化技术与应用,2014,(8):56-59.

(上接第5页)

- 提取[J].测绘与空间地理信息,2015,34(2):27-29.
- [25] 汪承义.基于航空激光雷达数据的建筑物重建技术研究[D].北京:中国科学院遥感应用研究所,2007.
- [26] 余斌.基于航空LiDAR数据提取建筑物边界的方法研究[J].北京测绘,2014(2):17-20.
- [27] 张毅,付梦印,王美玲.基于粗集的激光雷达数据聚类与识别方法[C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, Nanjing, China, 2014, 28-30:8402-8407.

(上接第25页)

构,并最终确定选用离轴三镜反射式光学系统。该系统在保证成像质量的情况下,将其离轴方向的视场角达到了 $0.95^\circ$ ,通过扫描系统可以做到对地面 $900 \times 540 \text{ km}^2$ 成像。充分发挥了反射式光学系统的优势。由于该系统是属于长焦距、大口径的系统,使用了非球面,且是离轴使用,同时对于公差限制的比较紧。因此需要重点考虑轻量化以大口径非球面的制造技术。随着大口径非球面制造技术及计算机辅助装校水平的提高,该系统将会得以广泛应用。

参考文献

- [1] 丁学专,刘银年,王欣,等.航天遥感反射式光学系统设计[J].红外技术,2007,29(5):253-254.
- [2] 巩盾.温度对遥感器光学系统成像质量的影响[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010.
- [3] 宋岩峰,邵晓鹏,徐军.离轴三反射镜光学系统研究[J].红外与激光工程,2008,37(4):707-709.
- [4] 袁旭沧.光学设计[M].北京:科学出版社,1988:111-112.
- [5] 李士贤,李林.光学设计手册[M].北京:北京理工大学,1996:338-339.
- [6] 史黎丽.航天遥感相机光学系统设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:19-21.
- [7] 叶虎勇,陈桂林.地球同步轨道三轴稳定卫星的扫描镜设计及考虑[J].红外技术,2003(11):6-8.
- [8] 萧泽新.工程光学设计[M].北京:电子工业出版社,2002:84-85.
- [9] 刘剑锋,龙夫年,张伟.大视场航天遥感器的光学系统设计[J].光学技术,2004,30(2):187-189.
- [10] 巩盾.温度对遥感器光学系统成像质量的影响[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010.
- [11] 薛鸣球,安保青.大视场三反射非共轴系统研究[J].光子学报,1997(3):35-37.
- [12] 史黎丽.航天遥感相机光学系统设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:37-41.

声明

近期发现有假冒《光电技术应用》期刊的投稿代理机构非法进行投稿代理,对此,《光电技术应用》编辑部正式声明,本刊自成立以来没有设立任何投稿代理机构且尚未开通在线投稿,一直使用的、唯一的投稿邮箱为nloe@vip.163.com,编辑部电话:0416-2835782。请作者按此邮箱投稿,如有疑问请直接通过电话或邮件与编辑部联系咨询。

特此声明。

《光电技术应用》编辑部