

畸变对 TDI-CCD 空间相机的影响分析及抑制方法研究

金 光^{1,3} 任秉文^{1,2,3*} 钟 兴^{1,3}

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
² 中国科学院大学, 北京 100049
³ 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033

摘要 随着电荷耦合器件(CCD)的不断发展,时间延迟积分电荷耦合器件(TDI-CCD)已成为高分辨率、大 F 数、轻小型空间相机器件的首选。但受到光学系统畸变的影响,在 TDI-CCD 积分成像过程中,将不可避免地存在像移,并最终导致成像模糊,使图像调制传递函数(MTF)下降。分析了光学系统畸变引起像移的原因,并给出受畸变影响产生的 MTF 下降系数 $f_{\text{MT,D}}$ 关于光学系统畸变的表达式。从光学系统设计角度研究了限制 $f_{\text{MT,D}}$ 的方法,给出了光学系统设计结果。设计了焦距 $f' = 9000$ mm, F 数为 13.33, 成像谱段为 400~700 nm 的偏视场同轴四反射低畸变、大视场光学系统。设计结果表明,在使用视场角 $2\omega = 2^\circ$ 范围内,波像差优于 $\lambda/21$, 受畸变影响产生的 $f_{\text{MT,D}}$ 为 0.969, 证明该系统很好地抑制了光学系统畸变对积分成像的影响。研究可为高分辨率、宽视场、大 F 数的轻小型空间相机的设计提供参考。

关键词 光学设计; 时间延迟积分电荷耦合器件; 畸变; 像移; 调制传递函数; 反射系统; 空间相机

中图分类号 TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1022001

Influence of Distortion on TDI-CCD Space Camera and Its Suppression Method

Jin Guang^{1,3} Ren Bingwen^{1,2,3} Zhong Xing^{1,3}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ National and Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract With the continuous development of the charge coupled device (CCD), the time delay integration charge coupled device (TDI-CCD) has become the first choice for high-resolution, large F number, compact space camera. However, due to the distortion of the optical system, in the process of TDI-CCD integral imaging, the image motion is inevitable, and eventually leads to the blurred image, and then image modulation transfer function (MTF) decreases. This paper analyzes the reason of the image motion caused by optical system distortion, and gives the expression of the MTF declined coefficient $f_{\text{MT,D}}$ by the distortion effects. From the point of view of optical system design, the method of restricting $f_{\text{MT,D}}$ is researched, and the results of the optical system design are given. Low distortion, wide field coaxial bias field fourth reflective optical system, with the focal length $f' = 9000$ mm, F number of 13.33, and imaging spectral range of 400~700 nm, is designed. The design results demonstrate that the wavefront error is better than $\lambda/21$ and the $f_{\text{MT,D}}$ generated by the distortion is 0.969 in the using field angle $2\omega = 2^\circ$.

收稿日期: 2013-02-04; 收到修改稿日期: 2013-03-07

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121102)

作者简介: 金 光(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感相机光机设计方面的研究。

E-mail: jing@ciomp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: renbw@aliyun.com

It is proved that the system well suppresses the impact of distortion on integral imaging optical system. This study could provide the reference for high-resolution, wide field, large F number, and compact space camera design.

Key words optical design; time delay integration charge coupled device; distortion; image motion; modulation transfer function; reflective system; space camera

OCIS codes 220.2740; 080.4035; 110.6770; 350.1260

1 引 言

随着电荷耦合器件(CCD)的不断发展, CCD 器件已被广泛应用于对地观测卫星。与普通的线阵 CCD 器件相比, 时间延迟积分电荷耦合器件(TDI-CCD)是一种特殊的线阵 CCD 器件, 由于其具有多级结构, 通过时间延迟积分技术来延长曝光时间以提高分辨率, 成为高分辨率、大 F 数、轻小型空间相机的首选器件^[1]。但是采用 TDI-CCD 的空间相机在推扫成像过程中, 受到像移及行频匹配等影响最终将导致成像模糊^[2-4]。本文主要分析了光学系统畸变对 TDI-CCD 积分成像的影响, 重点分析了光学系统畸变对图像调制传递函数(MTF)的影响, 并从光学系统设计的角度研究了抑制其影响的方法, 进行了低畸变、大视场空间相机光学系统的设计。

2 畸变引起的 TDI-CCD 成像像移分析

光学系统的畸变是指像面上所成像的像高和理想像高的不一致, 通常畸变用来衡量成像的变形^[5]。对于一般的成像光学系统, 畸变并不影响成像的清晰度, 只影响成像的位置; 但对于使用 TDI-CCD 的成像光学系统, TDI-CCD 积分前后位置的畸变不一致将引起像移, 并最终导致成像模糊。光学系统畸变引起的像移可分解为沿积分方向的像移和垂直积分方向的像移, 两者都会引起成像的模糊, 以垂直积分方向的像移为例进行分析, 如图 1 所示。

假设空间相机的推扫方向为沿 Y 方向, TDI-CCD 积分前视场位置为 (θ_x, θ_y) , 积分后的视场位置为 (θ_x, θ'_y) , 如图 2 所示, 则在积分时间内受光学系统畸变引起的像移量 S 可表示为

$$S = |D(\theta_x, \theta'_y) - D(\theta_x, \theta_y)|. \quad (1)$$

$$\Delta\theta = \frac{h_2 - h_1}{f'} = \frac{\sqrt{(f' \tan \theta_y + n_i p)^2 + (f' \tan \theta_x)^2} - \sqrt{(f' \tan \theta_y)^2 + (f' \tan \theta_x)^2}}{f'}, \quad (3)$$

式中 h_1 为积分前的理想像高; h_2 为积分后的理想像高; f' 为光学系统像方焦距; p 为像元中心距; n_i 为 TDI-CCD 积分级次。

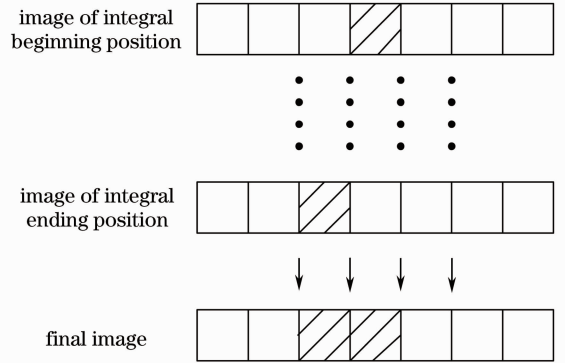


图 1 光学系统畸变引起的 TDI-CCD 积分像移示意图
Fig. 1 TDI-CCD integral image motion caused by optical system distortion

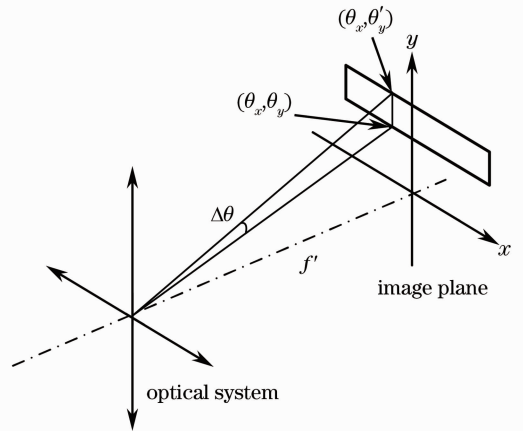


图 2 光学系统积分成像初始位置及结束位置示意图
Fig. 2 Beginning position and ending position of optical system integral imaging

当光学系统为共轴系统时, 系统的畸变 $D(\theta_x, \theta_y)$ 为相对光轴对称的函数, 此时可将(1)式做泰勒展开并忽略高次项得到

$$S = |D'(\theta) \Delta\theta|, \quad (2)$$

式中 $\theta' = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}$, $\Delta\theta$ 可以表示为

由(2)式可知, 因为光学系统存在畸变, 在 TDI-CCD 积分成像过程中产生的像移量 S 是无法避免的, 所以对于轴外点在推扫过程中必然将导致像质

下降、图像模糊。下面主要从 MTF 的角度研究光学系统畸变对 TDI-CCD 积分成像的影响并提出抑制其影响的方法。

3 畸变对成像 MTF 的影响及抑制方法

由前所述,空间相机像面上积分前后位置畸变的不一将引起像移,并最终导致像质下降,由于光学系统的畸变是必然存在的,因此必定会对像质产生影响,其对像质的影响可用图像 MTF 的下降来表示。

TDI-CCD 空间相机成像的动态传递函数可以表示为 $f_{MT,d} = f_{MT,s} \cdot f_{MT,p} \cdot f_{MT,e}$,其中 $f_{MT,s}$ 表示静态传递函数,它主要由光学系统的传递函数及 CCD 的性能决定^[6], $f_{MT,e}$ 主要是由相机所受的环境因素如大气、温度、振动等产生的影响决定, $f_{MT,p}$ 为推扫过程中产生的 MTF 下降值,包含像移 $f_{MT,sh}$ 及延迟引起的 MTF 下降值 $f_{MT,de}$,其中 $f_{MT,sh}$ 为 TDI-CCD 空间相机在推扫成像过程中,像相对于 CCD 接收器移动引起的调制传递函数下降值。本文讨论的畸变引起的像移即是其中的一种,由其导致的像质下降可表示为 $f_{MT,D}$ 。

根据图 1,受到畸变影响的 TDI-CCD 成像系统可以看成是一个宽度为 a 的有限孔径采样一定空间频率 f 的静止波。因此,光学系统的点扩展函数可以表示为

$$h(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right). \quad (4)$$

对其作傅里叶变换并相对零频归一化可得到此时光学系统的 MTF 为^[7]

$$f_{MT,D}(f) = \left| \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \exp(-j2\pi fx) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) dx} \right| = \frac{\sin(\pi fa)}{\pi fa}. \quad (5)$$

将系统奈奎斯特频率 $f_n = \frac{1}{2p}$ 代入(5)式可得

$$f_{MT,D}(f) = \frac{\sin\left(\pi \frac{f}{2f_n} \frac{a}{p}\right)}{\pi \frac{f}{2f_n} \frac{a}{p}}. \quad (6)$$

综合(2)式和(6)式可知光学系统畸变引起的 MTF 下降系数 $f_{MT,D}$ 与光学系统畸变曲线斜率 $D'(\theta)$ 、系统焦距 f' 、积分级次 n_i 、像元中心距 p 及积分位置视场 (θ_x, θ_y) 相关。

以焦距为 $f' = 9000 \text{ mm}$,像元尺寸为 $p = 8 \mu\text{m}$,视场为 X 方向 $-0.8^\circ \sim 0.8^\circ$ 、Y 方向 $0.4^\circ \sim 0.6^\circ$ 的空间相机光学系统为例,分析光学系统畸变曲线斜率 $D'(\theta)$ 对 TDI-CCD 积分成像产生的影响。在积分级次为 $n_i = 16, 64$ 及 96 时,边缘视场不同的畸变曲线斜率引起的 $f_{MT,D}$ 如图 3~5 所示,奈奎斯特频率处的 $f_{MT,D}$ 数值如表 1 所示。

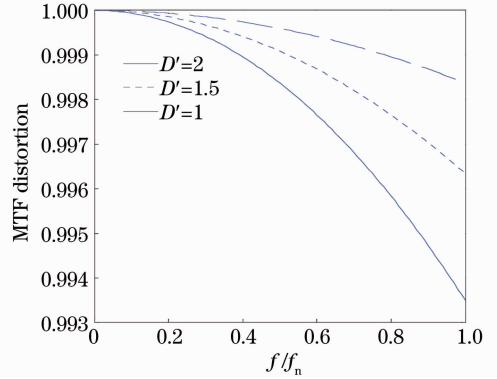


图 3 16 级积分时 $f_{MT,D}$ 曲线

Fig. 3 16 steps integral $f_{MT,D}$ curves

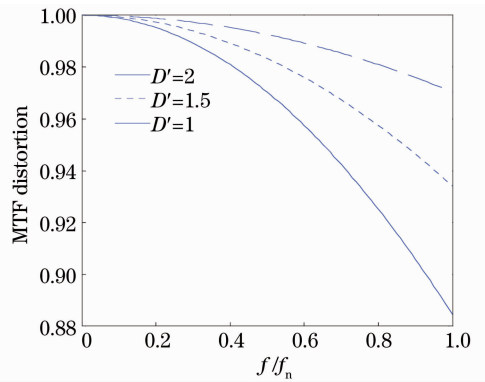


图 4 64 级积分时 $f_{MT,D}$ 曲线

Fig. 4 64 steps integral $f_{MT,D}$ curves

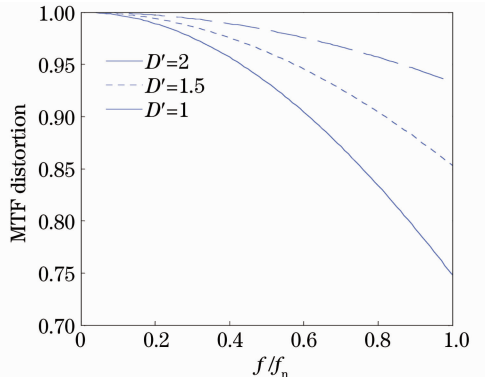


图 5 96 级积分时 $f_{MT,D}$ 曲线

Fig. 5 96 steps integral $f_{MT,D}$ curves

表 1 奈奎斯特频率处的 $f_{MT,D}$

Table 1 $f_{MT,D}$ value at Nyquist frequency

n_i	$f_{MT,D}$		
	$D'(\theta)=1$	$D'(\theta)=1.5$	$D'(\theta)=2$
16	0.998	0.996	0.993
64	0.970	0.934	0.884
96	0.933	0.853	0.748

从图 3~5 及表 1 中数据可以看出光学系统畸变对成像 MTF 的影响是不可忽略的。当积分级次较低时,由畸变引起的 TDI-CCD 成像光学系统 MTF 下降较小,但当 TDI-CCD 工作在较高的积分级次时,例如积分级次为 96 级时,由系统畸变引起的积分成像 MTF 下降是十分明显的。当光学系统的畸变斜率 $D'(\theta)=1.5$ 时,成像 MTF 的衰减即达到 $f_{MT,D}=0.853$,当 $D'(\theta)=2$ 时,MTF 的衰减更是达到了 $f_{MT,D}=0.748$ 。

进一步以实际光学系统为例,分析畸变产生的 $f_{MT,D}$ 的影响。三反射光学系统如图 6 所示。光学系统参数同样为焦距 $f'=9000$ mm,像元尺寸为 $p=8$ μm ,视场为 X 方向 $-0.8^\circ\sim 0.8^\circ$ 、Y 方向 $0.4^\circ\sim 0.6^\circ$ 。光学系统各表面参数如表 2 所示,光学系统矩形视场内的畸变如图 7 所示,由畸变引起的奈奎斯特频率处 $f_{MT,D}$ 如表 3 所示。表中 $S_{//}$ 为平行于积

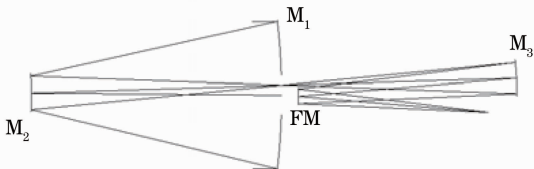


图 6 光学系统光路图

Fig. 6 Layout of optical system

分方向的像移量; $f_{MT,D//}$ 为平行于积分方向的 MTF 下降值; S_{\perp} 为垂直于积分方向的像移量; $f_{MT,D\perp}$ 为垂直于积分方向的 MTF 下降值。

表 2 光学系统各面参数

Table 2 Surfaces parameters of optical system

Surface	Radius / mm	Distance / mm	Conic constant
Primary mirror (stop)	-2991	-1158	-0.9509
Second mirror	-949	2250	-2.7792
Third mirror	-1380	-1012	-0.4322
Fold mirror (FM)	∞	881	

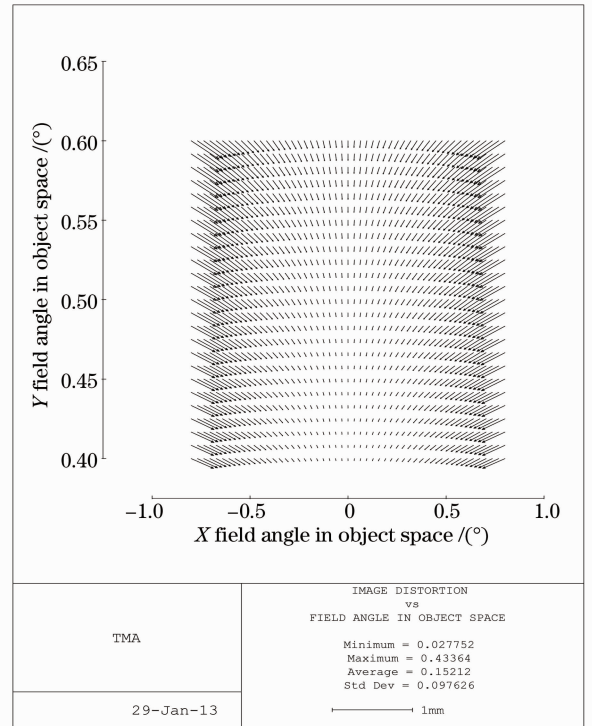


图 7 光学系统畸变图

Fig. 7 Diagram of optical sytem distortion

表 3 96 级积分时奈奎斯特频率处的 $f_{MT,D}$

Table 3 96 steps integral $f_{MT,D}$ value at Nyquist frequency

Field position	$D'(\theta)$	$S_{//}/\mu\text{m}$	$S_{\perp}/\mu\text{m}$	$f_{MT,D//}$	$f_{MT,D\perp}$
$\theta_x=0^\circ, \theta_y=0.5^\circ$	0.333	1.713	0	0.981	1.000
$\theta_x=-0.56^\circ, \theta_y=0.4^\circ$	0.626	1.821	1.061	0.979	0.993
$\theta_x=-0.56^\circ, \theta_y=0.5^\circ$	0.744	2.461	1.328	0.961	0.989
$\theta_x=-0.56^\circ, \theta_y=0.6^\circ$	0.888	3.244	1.595	0.934	0.984
$\theta_x=-0.8^\circ, \theta_y=0.4^\circ$	1.053	2.600	1.516	0.957	0.985
$\theta_x=-0.8^\circ, \theta_y=0.5^\circ$	1.172	3.240	1.897	0.934	0.977
$\theta_x=-0.8^\circ, \theta_y=0.6^\circ$	1.318	4.023	2.279	0.899	0.967

设计结果表明,该系统的波像差为 $\lambda/27$,斯特雷尔比为 0.95,通过图 7 可知最大畸变值为 0.4336 mm,由表 3 可知光学系统在 96 级积分成像时,畸变引起的 $f_{MT,D}$ 值为 0.899。

根据表 3 中 $D'(\theta)$ 的变化趋势可知,随着使用视场角的增大, $D'(\theta)$ 同时增大, $f_{MT,D}$ 下降,将导致

像质的不断下降,因此对于大视场空间相机光学系统设计,光学系统畸变对 TDI-CCD 积分成像产生的影响是不可忽略的,必须予以抑制。

目前,抑制 $f_{MT,D}$ 的主要方法为限制光学系统的使用视场角、降低 TDI-CCD 的积分级次或者通过焦面位置处 TDI-CCD 器件环形排布的方法^[8],前

两种方法在抑制 $f_{MT,D}$ 的同时也限制了光学系统的使用性能,采用 TDI-CCD 环形排布的方法能够在一定程度上减小光学系统畸变引起的像移进而抑制 $f_{MT,D}$,但也增加了加工装调的复杂度。本文从光学系统设计的角度,研究通过对 $D'(\theta)$ 进行限制进而抑制 $f_{MT,D}$ 影响的方法。

根据光学系统像差理论可知,光学系统的畸变包括初级畸变及高级畸变^[5],初级畸变是视场的三次函数,高级畸变目前的研究较少,通过已有的文献可知高级畸变包括五次畸变^[9],此外还包含更高级次的畸变。这里只分析初级畸变及高级畸变中五次畸变对系统的影响。此时,光学系统的畸变表达式可以表示为^[10]

$$D(\theta) = k_1\theta^3 + k_2\theta^5, \quad (7)$$

求其相对于视场角 θ 的导数可以得到

$$D'(\theta) = 3k_1\theta^2 + 5k_2\theta^4. \quad (8)$$

从(8)式可知光学系统畸变曲线的斜率 $D'(\theta)$ 与初级畸变系数 k_1 、五次畸变系数 k_2 及视场角 θ 有关。

目前空间相机普遍使用的三反射系统由于受到自身结构的限制,在三片反射镜的面型均为二次曲面的条件下,只能消除初级像差中的球差、彗差、像散、场曲,并不能对畸变进行校正^[11],在有效视场内一般不能使整个系统的畸变降低至 0.5% 以下^[12-14]。并且,对于面形均为二次曲面的三反射光学系统,由于不能很好地校正初级畸变,初级畸变系数远大于高级畸变中的五次畸变系数,因此由(8)式可知,当视场角增大时, $|D'(\theta)|$ 必然增大,导致像质下降,并且当视场增大到某一视场 θ_v 时将导致像质下降至 MTF 无法满足成像需求的程度。因此,为了增大空间相机的可使用视场角 θ_v ,必须对 $D'(\theta)$ 进行限制,根据(8)式可知,要直接对 $D'(\theta)$ 进行约束较难实现,因此,可分别对畸变系数 k_1 及 k_2 进行限制。

目前,三反射系统对初级畸变系数 k_1 和五次畸变系数 k_2 限制的方法主要包括将反射镜非球面系数高次化及采用透镜组件校正的方法^[15]。采用非球面系数高次化的方法增加了镜片的加工及检测难度,而采用增加透射元件的方法需考虑透射元件的装配及环境适应性,降低了系统的可靠性。而采用四片二次曲面反射镜的四反射光学系统,可从初始结构计算中便得到校正初级畸变系数 k_1 的解,通过进一步优化能够对五次畸变系数 k_2 进行限制,在理论上具备抑制 $f_{MT,D}$ 的可行性。同时,四反射光学系统结构在校正初级像差的同时,外形尺寸可根据体积重量及其他特殊要求而自由设计,能够在抑制 $f_{MT,D}$,在得到大视场的同时减小光学系统的体积重

量,做到轻小型化。此外,由于相较目前使用广泛的三反射系统只增加了一个反射部件,整体结构改变较小,所以空间相机的整体结构设计、加工及装调方面相关的技术成熟度也较高。

4 光学系统设计实例

四反射光学系统结构包括主镜(M_1)、次镜(M_2)、三镜(M_3)以及四镜(M_4)。结构参数包括四个面的曲率半径 r_1, r_2, r_3, r_4 , 主镜到次镜的距离 d_1 、次镜到三镜的距离 d_2 、三镜到四镜的距离 d_3 、四镜到像面的距离 d_4 , 以及各面的二次非球面系数 $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2, -e_4^2$ ^[11,16]。

系统定义的 6 个轮廓参数为次镜对主镜遮拦比

$$\alpha_1 = \frac{l_2}{f_1'} \approx \frac{h_2}{h_1}, \quad (9)$$

三镜对次镜遮拦比

$$\alpha_2 = \frac{l_3}{l_2'} \approx \frac{h_3}{h_2}, \quad (10)$$

四镜对三镜遮拦比

$$\alpha_3 = \frac{l_4}{l_3'} \approx \frac{h_4}{h_3}, \quad (11)$$

次镜的放大率

$$\beta_1 = \frac{l_2'}{l_2} = \frac{u_2}{u_2'}, \quad (12)$$

三镜的放大率

$$\beta_2 = \frac{l_3'}{l_3} = \frac{u_3}{u_3'}, \quad (13)$$

四镜的放大率

$$\beta_3 = \frac{l_4'}{l_4} = \frac{u_4}{u_4'}, \quad (14)$$

(9)~(14)式中 $l_2(l_2'), l_3(l_3'), l_4(l_4')$ 分别为次镜、三镜和四镜的物距(像距); h_1, h_2, h_3, h_4 为第一近轴光线在各反射镜上的投射高度; $u_2(u_2'), u_3(u_3'), u_4(u_4')$ 分别为第一近轴光线在次镜、三镜和四镜上的入射角(出射角)。

系统初级像差表达式为

$$\begin{cases} S_I = \sum hP + \sum h^4 K \\ S_{II} = \sum h_2 P - J \sum W + \sum h^3 h_2 K \\ S_{III} = \frac{h_z^2 P}{h} - 2J \sum \frac{h_z}{h} W + J^2 \sum \varphi + \sum h^2 h_z^2 K \\ S_{IV} = \sum \frac{\Pi}{h} \\ S_V = \sum \frac{h_z^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{h_z}{h_2} W + \\ J^2 \sum \frac{h_z}{h} \left(3\phi + \frac{\Pi}{h} \right) - J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \frac{1}{n^2} + \sum h h_z^3 K \end{cases}, \quad (15)$$

式中

$$\begin{cases} P = \left(\frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta \frac{u}{n}; W = \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{u}{n} \\ \Pi = \Delta \frac{(nu)}{n/n}; \phi = \frac{1}{h} \Delta \frac{u}{n} \\ K = -\frac{e^2}{R^3} \Delta n \end{cases} \quad (16)$$

根据四反射系统的结构关系式(9)~(14)式及初始结构像差表达式(15)、(16)式,设计了一个焦距为 $f' = 9000$ mm、入瞳直径 $D = 675$ mm、 F 数为 13.33、工作谱段 400~700 nm 的偏视场同轴四反射光学系统,光学系统的使用视场为矩形视场, X 方向视场角为 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 、 Y 方向视场角为 $0.4^\circ \sim 0.6^\circ$,采用的 TDI-CCD 像元尺寸为 $p = 8 \mu\text{m}$ 。

相较图 6 所示的三反射光学系统,四反射系统将最后一块折叠镜替换为有曲率的四镜,此外,通过分析四反射系统的结构形式可知,将中间像面设置在次镜和三镜之间,可在一次像面位置增加折转反射镜,缩短系统筒长,优化后得到光学系统外包装尺寸为 $900 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm}$,可满足小型化的应用需求。最终得到的四反射光学系统各表面参数如表 4 所示。

设计结果表明光学系统波像差达到 $\lambda/21$,斯特雷尔比达到 0.91,光学系统矩形视场内的畸变如图 9 所示,当系统采用 96 级积分时光学系统畸变引起的各视场位置奈奎斯特频率处的 $f_{\text{MT,D}}$ 如表 5 所示。

表 4 设计的光学系统各面参数

Table 4 Surfaces parameters of designed optical system

Surface	Radius / mm	Distance / mm	Conic constant
Primary mirror (stop)	-2069	-878	-1.0049
Second mirror	-358	1181	-1.7404
Fold mirror	∞	-506	
Third mirror	810	914	-0.5539
Fourth mirror	-887	-337	-3.0000

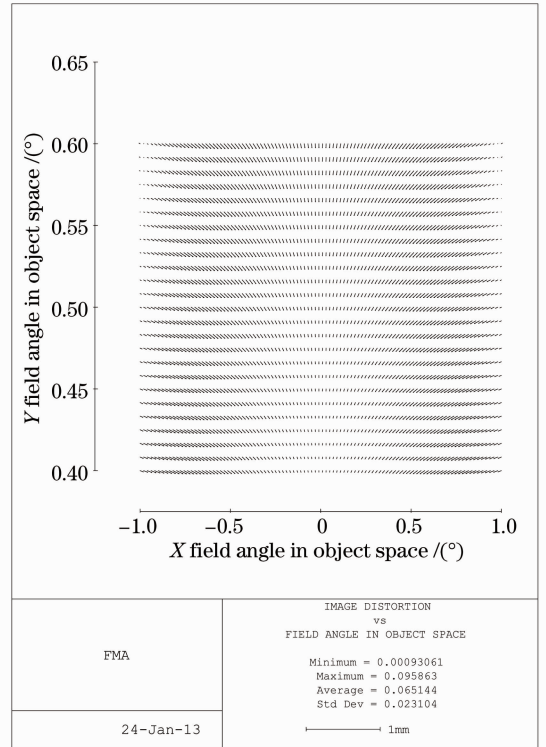


图 8 设计的光学系统畸变图

Fig. 8 Diagram of designed optical sytem distortion

表 5 设计的系统 96 级积分时奈奎斯特频率处的 $f_{\text{MT,D}}$

Table 5 96 steps integral $f_{\text{MT,D}}$ value at Nyquist frequency for the designed system

Field position	$D'(\theta)$	$S_{//} / \mu\text{m}$	$S_{\perp} / \mu\text{m}$	$f_{\text{MT,D} //}$	$f_{\text{MT,D} \perp}$
$\theta_x = 0^\circ, \theta_y = 0.5^\circ$	0.185	1.073	0	0.993	1.000
$\theta_x = -0.7^\circ, \theta_y = 0.4^\circ$	0.102	0.692	0.018	0.997	0.999
$\theta_x = -0.7^\circ, \theta_y = 0.5^\circ$	0.026	0.546	0.200	0.998	0.999
$\theta_x = -0.7^\circ, \theta_y = 0.6^\circ$	-0.094	0.222	0.491	0.999	0.998
$\theta_x = -1^\circ, \theta_y = 0.4^\circ$	-0.557	0.101	1.093	0.999	0.992
$\theta_x = -1^\circ, \theta_y = 0.5^\circ$	-0.682	0.584	1.577	0.998	0.984
$\theta_x = -1^\circ, \theta_y = 0.6^\circ$	-0.894	1.296	2.191	0.989	0.969

通过系统畸变图 8 可知,在使用视场内最大畸变为 0.0959 mm,换算成相对畸变为 0.083%,较好地限制了光学系统的畸变;由 $f_{\text{MT,D}}$ 数值可知,在全视场范围内受到畸变引起的下降后的 MTF 仍优于 0.969。通过对比表 3 和表 5 的数据可知,通过采用四反射镜组合设计的光学系统,在扩大了使用视场

角的同时,很好地抑制了光学系统畸变产生的像移对成像 MTF 的影响。

5 结 论

通过分析 TDI-CCD 积分成像过程中光学系统畸变产生像移的原因及其对成像 MTF 的影响,给

出了畸变引起的像移对成像 MTF 影响的表达式 $f_{MT,D}$, 进而研究了抑制光学系统畸变对成像 MTF 影响的方法, 并通过设计实例得出以下结论:

1) 光学系统畸变对 TDI-CCD 积分成像的影响是必然存在的, 在设计宽视场空间相机时必须考虑畸变对 TDI-CCD 积分成像的影响。

2) 畸变对积分成像的影响 $f_{MT,D}$ 与光学系统畸变对视场的导数 $D'(\theta)$ 成正比, 在较难限制 $D'(\theta)$ 的情况下通过校正光学系统的初级畸变, 能够有效地限制畸变引起的像移, 进而抑制 $f_{MT,D}$ 的影响。

3) 采用四反射光学系统结构形式设计的空间相机, 能够在获得大视场的同时, 很好地抑制光学系统畸变对成像 MTF 的影响, 同时能够做到结构上的轻小型化。

参 考 文 献

- 1 Zhao Guijun, Chen Changzheng, Wan Zhi, *et al.*. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 291-296.
赵贵军, 陈长征, 王志, 等. 推扫型 TDI-CCD 光学遥感器动态成像研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 291-296.
- 2 Steven L Smith, James Mooney, Theodore A Tantalò, *et al.*. Understanding image quality losses due to smear in high-resolution remote sensing imaging systems [J]. *Opt Eng*, 1999, 38(5): 821-826.
- 3 Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1585-1589.
王家骥, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1585-1589.
- 4 Yu Chunfeng, Ding Yalin, Hui Shouwen, *et al.*. Analysis of image rotation for aerial remote sensor with three-mirror reflective optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0823002.
于春风, 丁亚林, 惠守文, 等. 三反射系统航空遥感器像旋转分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0823002.
- 5 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Optical Engineering* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 120-121.
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 120-121.
- 6 Jin Guang, Zhang Liang, Hu Fusheng. Investigation on space

- optical system of high F number and high resolution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(2): 155-159.
金光, 张亮, 胡福生. 大 F 数高分辨率空间望远镜光学系统 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 155-159.
- 7 Lü Naiguang. *Fourier Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 5-37.
吕乃光. *傅里叶光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 5-37.
- 8 S Baillarin, C Panem, L Lebegue, *et al.*. Pleiades-HR imaging system: ground processing and products performances few months before launch [C]. *ISPRS TC VII Symposium-100 Years ISPRS*, 2010, XXXVIII (Part 7B): 51-55.
- 9 José Sasián. Theory of sixth-order wave aberrations [J]. *Appl Opt*, 2010, 46(16): D69-D95.
- 10 N Univ. A Method of Computational Correction for Optical Distortion in Head-Mounted Displays [R]. Hillsborough: Chapel Hill Tech, 1993. <http://www.cs.unc.edu>.
- 11 Pan Junhua. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces* [M]. Suzhou: Sochoow University Press, 2004. 131-134.
潘君骅. *光学非球面的设计、加工、检验*[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 131-134.
- 12 Chen Yang, Wang Yueming. Design and distortion characteristics analysis of the large-image-field off-axis three-mirror telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0222003.
陈杨, 王跃明. 大像场离轴三反望远镜畸变特性分析与设计 [J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0222003.
- 13 Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0416002.
韦晓孝, 许峰, 余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计 [J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0416002.
- 14 Zhong Xing, Jin Guang. Design of extra wide short wave infrared spectral imager's fore-optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022004.
钟兴, 金光. 超广角短波红外成像光谱仪前置光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1022004.
- 15 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen, *et al.*. Optical system design of space camera with long focal length and correction of image distortion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2657-2660.
李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 消畸变、长焦距相机光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2657-2660.
- 16 Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin, *et al.*. Aberration analysis and design of four-mirror reflective optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3300-3305.
梁士通, 杨建峰, 薛彬, 等. 四反射镜光学系统像差分析与设计 [J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3300-3305.

栏目编辑: 张 腾