畸变对 TDI 成像相机的像移影响研究

任秉文[1,2,3]，金　光[1]，张　元[1]，钟　兴[1]，孔　林[1]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 小卫星技术国家地方联合工程研究中心，
吉林 长春 130033；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 上海卫星工程研究所，上海 200240)

摘　要：随着时间延迟积分技术(Time Delayed and Integration，TDI)的不断成熟，具有 TDI 功能的电荷耦合器件(Charge Coupled Devices，CCD)已经广泛应用到高分辨率对地成像系统。然而，采用 TDI 功能的成像系统在推扫成像过程中必然会受到像移的影响，导致最终成像模糊。主要分析了 TDI 成像过程中光学系统畸变引起像移的原因，推导了畸变产生像移的数值计算公式，分析了光学系统畸变对 TDI 成像相机调制传递函数的影响，研究了畸变和像移导致的 TDI 成像相机图像退化的关系，针对焦距为 9 000 mm、积分级次 96 级、地面像元分辨率 GSD=0.6 m，$\lambda F/p$=1、信噪比为 50:1 的 TDI 成像相机，计算了在畸变产生的像移影响下导致的 NIIRS(National Imagery Interpretability Rating Scale，美国国家图像解译度分级标准）的变化值 $\Delta NIIRS$，计算结果表明在畸变导数值 $D'(\theta)$=6.493 时引起的 $\Delta NIIRS$ 达到−0.162 4 将影响图像的解译需求，最后分析给出了对于该空间相机不影响解译需求的 $D'(\theta)$ 限制条件。可为光学遥感 TDI 成像系统的设计提供参考。

关键词：光学系统；　时间延迟积分；　畸变；　像移；　调制传递函数；　NIIRS

中图分类号：TH703　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1007-2276(2014)12-3951-07

Influence of image motion on TDI imaging camera by distortion effect

Ren Bingwen[1,2,3], Jin Guang[1], Zhang Yuan[1], Zhong Xing[1], Kong Lin[1]

(1. National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Insititute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the Time Delayed and Integration (TDI) technology continues to evolve, Charge Coupled Devices (CCD) with TDI feature has been widely applied to high-resolution earth imaging system. However, in the push-broom imaging process, imaging system using TDI technology would inevitably be affected by the image motion, finally leading to blur image. The reason of image motion caused by optical system distortion in the process of TDI imaging was analyzed, formula of the image motion value was derived, the influence of optical system distortion on Modulation Transfer Function was analyzed, and the relationship between image quality deterioration caused by image motion and distortion was studied. Degradation of National Imagery Interpretability Rating Scale (NIIRS) parameters $\Delta NIIRS$ caused by image motion that generated by distortion was calculated for the TDI imaging system of which focal

收稿日期：2014-04-11；　**修订日期**：2014-05-12

基金项目：国家 863 计划(2012AA121102)；国家 863 计划军口部分(2011AA7026051)

作者简介：任秉文(1987-)，男，博士生，主要从事空间光学系统设计方面的研究。Email:renbingw@gmail.com

导师简介：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。Email:jing@ciomp.ac.cn

length was 9 000 mm, integral stage was 96, grounding sample distance was 0.6 m, $\lambda F/p$ was 1, SNR was 50:1. The results showed when the derivative value of distortion was 6.493, $\Delta NIIRS$ would reach −0.162 4, and would affect the image interpretation requirements. Finally, for this space camera, the restriction value of $D'(\theta)$ without affecting interpretation requirements was given. This research could provide a reference for optical TDI remote sensing system design.

Key words: optical system; TDI; distortion; image motion; MTF; NIIRS

0 引 言

随着时间延迟积分(Time Delayed and Integration, TDI)技术的不断成熟，具有 TDI 功能的电荷耦合器件(Charge Coupled Devices, CCD)已广泛应用于高分辨率对地成像系统[1]，而具备 TDI 功能的互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)也已经成为当前国内外研究的热点[2]。通过采用 TDI 技术延长曝光时间可以大幅提高成像信噪比，因此 TDI 成像已经成为高分辨率、大 F 数、轻小型空间相机的首选成像形式。但是采用 TDI 成像的空间相机在推扫成像过程中必然会受到像移的影响，如果不对像移量进行控制或者补偿将最终导致成像模糊[3-5]。同时，由于光学系统的轴外视场必然存在畸变，对于 TDI 成像系统，在积分成像的前后位置，畸变的不一致将会产生像移，而目前使用较多的长焦距三反射光学系统并不能对畸变进行很好的限制[6]，因此，研究畸变对 TDI 成像系统产生的像移是十分必要的。文中主要研究了光学系统畸变产生像移的原因，及其导致的 TDI 成像系统图像质量退化，分析了光学系统畸变对图像调制传递函数(MTF)的影响，研究了光学系统畸变导致的图像 NIIRS (National Imagery Interpretability Rating Scale，美国国家图像解译度分级标准)的退化。

1 畸变产生像移原理

对于 TDI 成像光学系统，在积分时间内，当光学系统在像面上所成的像和探测器存在相对运动时即会产生像移。对于空间对地遥感光学系统产生像移的因素包含地球自转引起的像移、卫星飞行姿态变化引起的像移、以及光学系统畸变产生的像移，其中对前两者的研究较多并有相应的补偿方法，而对于后者的研究还较少。

1.1 畸变产生像移原理及特性

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[7-8]。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 TDI 成像光学系统，由于成像器件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，如图 1 所示[9]。由畸变引起的像移根据光学系统畸变的类型，按其像移矢量的方向可分为指向像面中心及背向像面中心。

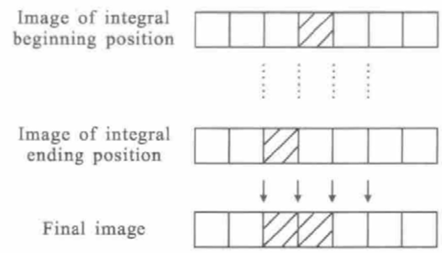

图 1 光学系统畸变引起的 TDI 成像像移示意图

Fig.1 Optical system distortion caused TDICCD integral image motion

1.2 畸变产生像移量计算

假设空间相机的推扫方向为沿 Y 方向，TDI 成像光学系统积分前视场位置为(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：

$$S=|D(\theta_x, \theta_y')-D(\theta_x, \theta_y)| \tag{1}$$

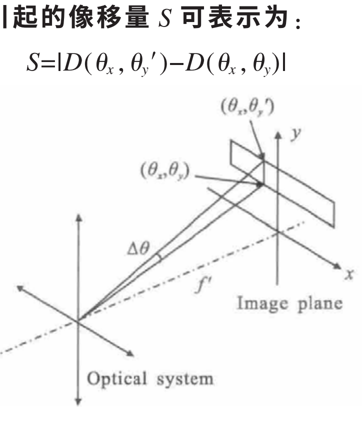

图 2 光学系统积分成像初始位置及结束位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of optical system integral imaging beginning position and ending position

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,令 $\theta=\sqrt{\theta_x^2+\theta_y^2}$。

此时可将公式(1)做泰勒展开并忽略高次项,得到:

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

其中 $\Delta\theta$ 可以表示为:

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

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 为探测器件的像元中心距;n_i 为积分级次。

进一步对公式(3)做泰勒展开并忽略高次项,带入公式(2)化简整理后,可得到 X 方向及 Y 方向上的像移量:

$$S_x=\left|D'(\theta)\cdot\frac{n_i\cdot p}{f'}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\tan\theta_x}{\tan\theta_y}\right)^2}}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\theta_y}{\theta_x}\right)^2}}\right| \quad (4)$$

$$S_y=\left|D'(\theta)\cdot\frac{n_i\cdot p}{f'}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\tan\theta_x}{\tan\theta_y}\right)^2}}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\theta_x}{\theta_y}\right)^2}}\right| \quad (5)$$

由公式(2)~(5)可知,因为光学系统存在畸变,对于 TDI 成像系统的轴外点在推扫成像的过程中产生的像移量 S 是无法避免的,所以必然导致轴外点的图像质量下降,由畸变产生的像移量 S 和光学系统畸变函数的导数 $D'(\theta)$、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,文中主要探讨畸变对 TDI 成像系统 MTF 及 NIIRS 的影响。

2 畸变导致的 TDI 成像系统 MTF 退化分析

由前所述,由于光学系统的畸变是必然存在的,因此对于 TDI 成像系统必然会产生像移并对像质产生影响,成像系统像质的好坏可由图像调制传递函数 MTF 来表征。

成像光学系统最终得到的图像 MTF 可由成像链路中各环节的 MTF 相乘计算,对于 TDI 成像的空间相机系统,其 MTF 可表示为 $MTF_{动态}=MTF_{静态}\cdot MTF_{推扫}\cdot MTF_{环境}$,其中 $\mathrm{MTF}_{静态}$主要由光学系统的传递函数及探测器件的性能决定[10],$\mathrm{MTF}_{环境}$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,$\mathrm{MTF}_{推扫}$包含 $\mathrm{MTF}_{像移}$及 $\mathrm{MTF}_{延迟}$,MTF 像移为空间相机在推扫成像过程中,像相对与探测器件移动引起的传函下降,文中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 $\mathrm{MTF}_{畸变}$。

根据图 2,受到畸变影响的 TDI 成像系统可以看成一个宽度为 S 的有限孔径采样一定空间频率 f 的静止波。因此,当前光学系统的点扩散函数可以表示为:

$$h(x)=\mathrm{rect}\left(\frac{x}{S}\right) \quad (6)$$

式中:x 为一维空间坐标。

对其做傅里叶变换并相对零频归一化[11],并将系统奈奎斯特频率 $f_n=\frac{1}{2p}$ 带入,得到此时光学系统的 $\mathrm{MTF}_{畸变}$表达式:

$$MTF_{畸变}(f)=\frac{\sin\left(\pi\cdot\frac{f}{2f_n}\cdot\frac{S}{p}\right)}{\pi\cdot\frac{f}{2f_n}\cdot\frac{S}{p}} \quad (7)$$

由公式(7)可知,畸变引起的像移将导致在采样频率范围内图像 MTF 的下降,当其引起的像移量 S 达到两个像元时($S=2p$),系统在奈奎斯特频率处的传递函数 $MTF_{畸变}$将下降至 0,光学系统所成图像将无法分辨上述分辨率的目标,即光学系统的成像分辨率将降低,此时光学系统各频率处的 $\mathrm{MTF}_{畸变}$如图3 所示。

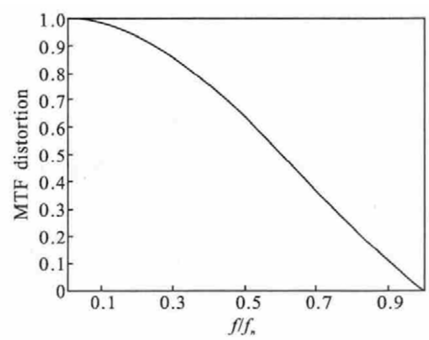

图 3 像移量为 2 个像元时 $\mathrm{MTF}_{畸变}$曲线图

Fig.3 $\mathrm{MTF}_{distortion}$ curve of 2 pixels image motion

从图中可知,像移将导致光学系统在各空间频率处的传递函数均退化,以下将特别针对光学系统的奈奎斯特频率分析畸变像差导致的调制传递函数的退化。

根据像移导致的 MTF 退化表达式(7)结合畸变像差产生的像移量计算公式(4)、(5)可知,当光学系

统的焦距、TDI 积分级次、光学系统视场的位置等因素不同时，畸变像差导致的 MTF 畸变的影响也不同，畸变像差导致的 MTF 的退化主要与畸变像差的导函数 $D'(\theta)$相关。下面以垂直推扫方向(图 1 中 X 方向)的像移为例，利用畸变像移计算表达式(4)及畸变像移调制传递函数表达式(7)对各参数条件下的畸变像差与 MTF $_{畸变}$的关系开展分析。

当成像系统焦距固定为 f'=9 000 mm 时，在边缘视场位置(假设为圆视场，$\theta_x=\theta_y=0.707\omega$)、不同积分级次条件下，奈奎斯特频率处的 MTF $_{畸变}$与 $D'(\theta)$的关系如图 4 所示。

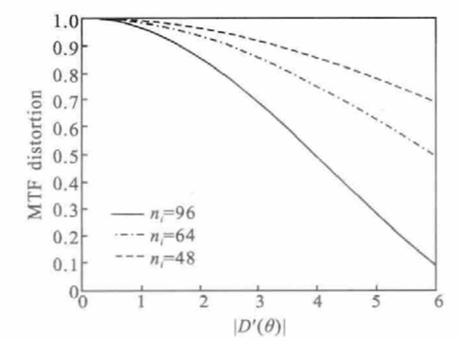

图 4 不同积分级次条件下奈奎斯特频率处 MTF $_{畸变}$与 $D'(\theta)$的关系

Fig.4 Relationship between $MTF_{distortion}$ and $D'(\theta)$ with different integral stages

根据图 4 可知，积分级次越高畸变像差导致的 MTF 的退化越严重，在成像系统焦距 f'=9 000 mm 条件下，在边缘视场位置处，当$|D'(\theta)|$=6 时，使用 48 级积分时畸变像差导致的奈奎斯特频率处的 MTF 退化 $MTF_{畸变}$将达到 0.69，而使用 96 级积分时 $MTF_{畸变}$更是达到 0.09。

当积分级次固定为 n_i=96 时，在边缘视场位置(假设为圆视场，$\theta_x=\theta_y=0.707\omega$)，不同系统焦距条件下，乃奎斯特频率处的 MTF $_{畸变}$与 $D'(\theta)$的关系如图5 所示。

根据图 5 可知，对于焦距 f'=5 000 mm 的光学系统，使用 96 级积分时，在边缘视场位置处，当$|D'(\theta)|$=3 时引起的 $MTF_{畸变}$即达到了 0.20，而相同 $D'(\theta)$条件下对于焦距 f'=9 000 mm 的光学系统，畸变像差导致的 MTF 退化 $MTF_{畸变}$为 0.69，可见对于使用 TDI 成像的空间相机，焦距越短的光学系统越需要对 $D'(\theta)$进行限制以减小畸变像差对 MTF 的影响。

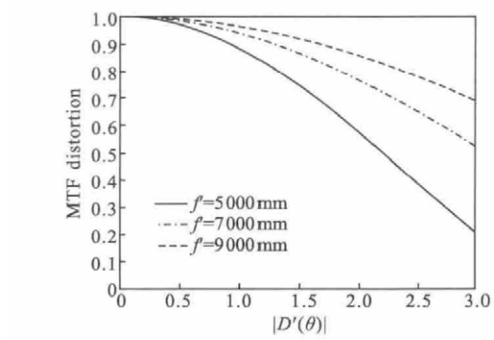

图 5 不同系统焦距条件下奈奎斯特频率处 MTF $_{畸变}$与 $D'(\theta)$的关系

Fig.5 Relationship between $MTF_{distortion}$ and $D'(\theta)$ with different focal lengths

当成像系统设计为偏视场成像时，在焦距 f'=9 000 mm、积分级次 n_i=96 的条件下，不同成像视场位置时，奈奎斯特频率处 MTF $_{畸变}$与 $D'(\theta)$的关系如图 6 所示。

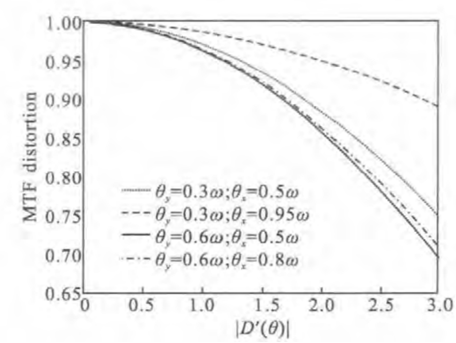

图 6 不同成像视场位置时奈奎斯特频率处 MTF $_{畸变}$与 $D'(\theta)$的关系

Fig.6 Relationship between $MTF_{distortion}$ and $D'(\theta)$ with different field positions

根据图 6 可知，对于使用偏视场成像的空间相机，当全视场角相同、偏视场角为全视场角的 0.3 倍时，边缘视场位置处($\theta_y=0.3\omega$；$\theta_x=0.95\omega$)的 $MTF_{畸变}$为 0.89，偏视场角为全视场角的 0.6 倍时，边缘视场位置处($\theta_y=0.6\omega$；$\theta_x=0.8\omega$)的 $MTF_{畸变}$为 0.7，可见使用的偏视场角度越大，边缘视场位置处由畸变像差导致的 MTF 退化越严重。同时从图中可以看出，在相同 $D'(\theta)$条件下，中间视场位置处产生的 MTF 退化比边缘视场位置更严重，因此，需要在全视场范围内对 $D'(\theta)$进行限制。

综合上述分析可知，由于畸变像差的必然存在，对于使用 TDI 成像的空间相机必然会导致成像MTF

的退化，特别是对于使用高积分级次、偏视场角度较大、焦距较短的 TDI 成像光学系统，由畸变引起的像移影响是不可忽视的，必须对畸变导数值 $D'(\theta)$ 进行严格的限制。

3 畸变导致的 TDI 成像系统 NIIRS 退化

通过之前的分析可知，由光学系统畸变产生的像移会引起图像 MTF 的退化，当 MTF 下降为零时，该频率处目标将无法被分辨，使用 MTF 分析能够在一定程度上表征图像质量衰减，但无法事先给出直观的图像质量退化情况。

现有的评价图像质量的方法及指标较多，主要包含图像信噪比、图像功率谱、相似相关性等[12]，但这些评价方法或指标并未对图像质量形成一个通用的量化评判标准。NIIRS[13]由美国政府下属的图像标准与报告标准委员会提出，是一种定量的主观图像质量评价标准，已经被西方情报机构普遍使用。图像的质量退化可用 $\Delta NIIRS$ 来表示，当 $\Delta NIIRS$ 小于 0.1 时是不容易被察觉的，并且不影响图像的解译需求[3]。因此，使用 NIIRS 来评价畸变像差对 TDI 成像相机的像移图像质量影响具有一定的通用性，且能从用户需求角度事先给出合理的参数规划。

3.1 畸变像移导致的 NIIRS 退化分析方法

图像的 NIIRS 指标通过 GIQE (General Image Quality Equation，通用图像质量方程)[14-16]算法进行计算，利用 GIQE 计算 NIIRS 的表达式为：

$$NIIRS=10.251-a\cdot\log_{10}(GSD)+b\cdot\log_{10}(RER)+0.656H-0.344\cdot G/SNR \tag{8}$$

式中：GSD 为地面像元分辨率；SNR 为信噪比；RER 为边缘响应函数，并且当 $RER\geqslant 0.9$ 时，a=3.32，b=1.559，当 $RER\leqslant 0.9$ 时，a=3.16，b=2.817；G 项为图像增强算法引入的噪声增强项，当图像未使用图像增强算法时 G=1；H 项为调制传递函数补偿引起的边缘响应过冲。

利用表达式(8)可以对畸变导致的 NIIRS 退化开展分析，分析流程如图 7 所示。具体步骤为：首先对给定的 TDI 成像系统在其使用视场范围内采样数个视场位置，由光学设计软件计算出该视场位置处的 $D'(\theta)$，之后通过模拟 TDI 成像过程给出受到畸变像差影响的像移图像，再利用 NIIRS 算法计算出原始图像及像移图像的 NIIRS，从而得到 NIIRS 的退化值 $\Delta NIIRS$。

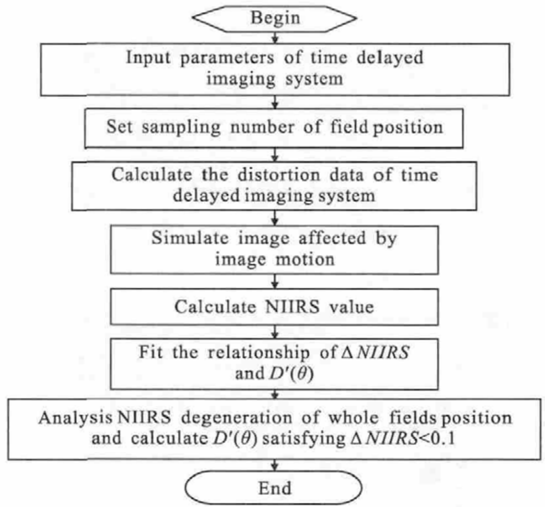

图 7 NIIRS 退化分析流程图

Fig.7 Flow chart for analyzing of NIIRS degeneration

根据计算得出的 NIIRS 的退化值 $\Delta NIIRS$ 及其对应的 $D'(\theta)$ 可以通过数值拟合的方法得出对于该 TDI 成像系统的 $\Delta NIIRS$ 与 $D'(\theta)$ 的关系表达式，从而可以预估出受到畸变影响的图像质量的退化情况，并且可以计算出满足不影响图像解译的 $D'(\theta)$。

3.2 畸变像移导致的 NIIRS 退化分析实例

根据上述 NIIRS 退化分析流程对一具体 TDI 成像系统为例进行计算，分析其畸变像差导致的图像 NIIRS 退化，计算所使用的 TDI 成像系统具体参数如表 1 所示。

表 1 计算模型参数

Tab.1 Parameters of calculated model

Parameter	Value
Focal length/mm	9 000
Integral stage	96
GSD/m	0.6
$\lambda F/P$	1
SNR	50:1

对于上述计算模型，假设光学系统为圆视场，在边缘视场位置处，结合公式(4)、(7)可计算出，$|D'(\theta)|$=6.54 时奈奎斯特频率处的 MTF 将下降为零，因此以下重点分析 $|D'(\theta)|<6.54$ 时引起的图像质量退化，并分析对于该 TDI 成像系统不影响图像解译需求的

$|D'(\theta)|<6.54$ 值。

计算 TDI 成像系统所成图像的 NIIRS 退化，首先需要得到受到畸变像移影响的图像，采样光学系统中的任一视场位置，将该视场位置设置为积分起始位置，通过模拟 TDI 成像系统 96 级积分成像过程可以得到未受到畸变像差影响的图像及受到畸变像差影响的图像，如图 8 所示，其中(a)为原始图像，(b)为受到畸变产生像移影响的图像。

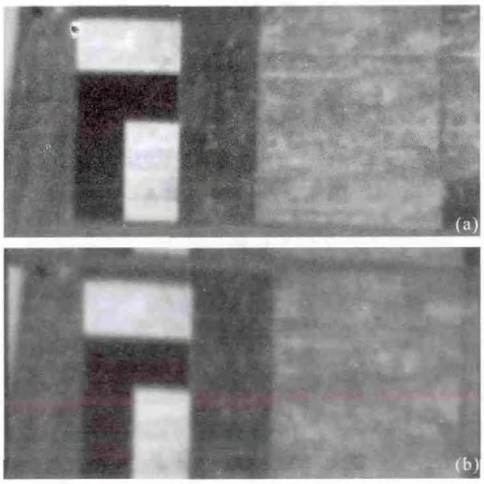

图 8 原始图像和受到畸变产生像移影响的图像

Fig.8 Origin image and simulation image affected by image motion caused by distortion

根据得到的像移图像就可以对其边缘响应函数进行计算，如图 9 所示。进一步根据 GIQE 算法计算得到 NIIRS 计算表达式中的 RER 项及 H 项，将其带入 NIIRS 计算表达式(8)就能计算出当前视场位置处所成图像的 NIIRS 指标。根据计算出的未受像移影响的图像 NIIRS 及像移图像的 NIIRS 数值，即可得出畸变像移导致的 NIIRS 退化 $\Delta NIIRS$。

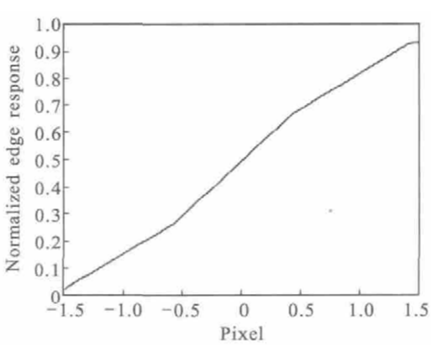

图 9 归一化的边缘响应函数

Fig.9 Normalized edge response function

对成像系统的使用视场范围内多次采样，并重复上述计算过程，可以计算得出 TDI 成像系统不同视场位置的 $D'(\theta)$、像移量 S 数值及图像质量退化参数 $\Delta NIIRS$，如表 2 所示。

表 2 $D'(\theta)$及相应的 $\Delta NIIRS$ 数值

Fig.2 Corresponding $D'(\theta)$ and $\Delta NIIRS$ values

$D'(\theta)$	S	$\Delta NIIRS$
0.405	0.124	−0.019 3
1.687	0.515	−0.042 2
2.078	0.635	−0.046 8
3.325 0	1.016	−0.068 4
3.871 0	1.183	−0.082 8
4.259 0	1.302	−0.104 6
5.540	1.693	−0.147 5
6.493	1.984	−0.162 4

通过对比表中数据与 Steven Smith 在参考文献[3]中列出的由像移引起的 NIIRS 下降数据可知，表 2 中的数据与参考文献[3]中的数据一致。因此，通过上述分析方法计算得到的 $\Delta NIIRS$ 数值具有较高的可信度。

根据表 2 数据可知，$D'(\theta)$越大图像 NIIRS 的退化越严重，当 $D'(\theta)=6.493$ 时引起的 $\Delta NIIRS$ 将达到 −0.162 4，从而影响图像解译需求。

利用表 2 数据，使用数值分析方法可得到给定的 TDI 成像系统中 $D'(\theta)$与 $\Delta NIIRS$ 的关系式，从而可以给出满足图像解译度不下降(即$|\Delta NIIRS|<0.1$)时对 $D'(\theta)$的限制条件。拟合得到的关系式如公式(9)所示，拟合表达式的均方误差为 0.007 299。

$$\Delta NIIRS=-0.001\,727|D'(\theta)|^2-0.012\,75|D'(\theta)|-0.013\,34 \quad (9)$$

令式中的$|\Delta NIIRS|<0.1$，可以求得对给定的 TDI 成像系统图像解译度不受影响时至少需将光学系统使用视场范围内的$|D'(\theta)|$限制到 4.019 以下。

综上，通过使用上述分析方法可以对任意给定的 TDI 成像系统分析其畸变导致的 NIIRS 退化，得到 $D'(\theta)$和 $\Delta NIIRS$ 的关系式，从而给出不影响图像解译需求的 $D'(\theta)$的限制值，能够为光学系统设计提供参考。

4 结 论

文中通过分析 TDI 成像系统中光学系统畸变像

差产生像移的原因，给出了畸变引起的像移量数值计算公式。推导了畸变与 TDI 成像系统调制传递函数的关系表达式，对不同参数条件下畸变对图像 MTF 的影响开展分析。对畸变像差导致的图像NIIRS 退化进行了分析，提出了一种分析畸变导致 NIIRS 退化的方法，利用所提出的方法对焦距为 9 000 mm、$\lambda F/p$=1、地面像元分辨率 GSD=0.6 m、信噪比为 50:1、积分级次为 96 级的 TDI 成像系统 $D'(\theta)$与图像质量退化 ΔNIIRS 的关系进行了具体计算。计算结果表明，使用该分析方法能够有效地表征畸变像差导致的图像质量 ΔNIIRS 下降与 $D'(\theta)$的关系，并能够给出不影响图像解译需求时对$|D'(\theta)|$的限制值。

随着 TDI 技术的不断发展，TDI 成像系统将会更广泛地应用于航天航空遥感领域，文中的分析研究可为 TDI 成像系统的设计提供参考。

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]. ***Opt Precision Eng***, 2006, 14(2): 291-296. (in Chinese)

[2] Tao Shuping, Jin Guang, Qu Hongsong et al. Design of CMOS imaging system based on rolling TDI in digital domain [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(9): 2380-2385. (in Chinese)

[3] Smith S L, Mooney J, Tantalo T A, et al. Understanding image puality losses due to smear in high-resolution remote sensing imaging systems [J]. ***Opt Eng***, 1999, 38 (5): 821-826.

[4] Yao Chengkang, Li Qinghui. Motion compensation realization for satellite borne camera [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(6): 1090-1097. (in Chinese)

[5] Wang Dejiang, Dong Bin, Li Wenming, et al. Influence of TDICCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system[J]. ***Opt Precision Eng***, 2011, 19(10): 2500-2506. (in Chinese)

[6] 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. (in Chinese)

[7] Yu Daoyin, Tan Hengying. Optical Engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 120-121. (in Chinese)

[8] Zhong Xing, Jin Guang. Design of extra wide short wave infrared spectral imager's fore-optics[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2012, 32(10): 1022004. (in Chinese)

[9] Jin Guang, Ren Bingwen, Zhong Xing. Influence of distortion on TDICCD space camera and its suppression method [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2013, 33(10): 1022001. (in Chinese)

[10] Jin Guang, Zhang Liang, Hu Fusheng. Investigation on space optical system of high F number and high resolution[J]. ***Opt Precision Eng***, 2007, 15(2): 155-159. (in Chinese)

[11] Lv Naiguang. Fourier Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 5-37. (in Chinese)

[12] Irvine J M. National imagery interpretability rating scales (NIIRS): overview and methodology [C]//SPIE, 1997, 3128: 93-103.

[13] Liu Zhaojun, Zhou Feng, Man Yiyun, et al. Prediction and evaluation technology of optical sensor's image quality [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2006, 35(S): 222-226. (in Chinese)

[14] Leachtenauer J C, Malila W, Irvine J, et al. General image-quality equation: GIQE [J]. ***Applied Optics***, 1997, 36(32): 8322-8328.

[15] Cota S A, Florio C, Duvall D, et al. The use of the general image quality equation in the design and evaluation of imaging systems [C]//SPIE, 2009, 7458: 74580H.

[16] Ma Wenpo. Discussion on optimal design and image quality evaluation of satellite optical remote sensing system [J]. ***Spacera Frecovery & Remote Sensing***, 2007, 28(4): 23-27. (in Chinese)