

doi: 10.3788/gzxb20124106.0642

遥感相机中时间延时积分电荷耦合器件 积分级数的最优选择

吕恒毅¹, 刘杨², 薛旭成¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 哈尔滨 150001)

摘 要:针对时间延时积分电荷耦合器件积分级数对成像质量的影响,提出了一种航天遥感相机中时间延时积分电荷耦合器件积分级数的最优选择方法.构造了典型成像系统的信噪比与积分级数关系模型和调制传递函数与卫星姿态角和积分级数的函数模型;以信噪比和调制传递函数的容许值为约束条件,推导出了任意条件下时间延时积分电荷耦合器件的可选积分级数区间并给出了最优的积分级数解,给出了对应的增益设置指导函数.运用仿真实验对该方法进行验证,并与传统方法进行比较,结果表明:该方法能够选取最优的积分级数,从而获得满足信噪比和调制传递函数指标的最佳成像质量;若该值不存在,依然能获取相对最佳的折中值和视觉效果;同时,本文成像效果优于传统方法.

关键词:遥感相机; 时间延时积分电荷耦合器件; 积分级数; 成像质量

中图分类号: V443+.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)06-0642-7

0 引言

在遥感相机成像质量评价中,信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)^[1]和调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)^[2-3]是两个重要的指标,它们共同决定了成像的分辨力.对于高分辨力遥感相机,CCD的曝光时间非常短,难以实现高信噪比.因此,TDI CCD^[4](时间延时积分电荷耦合器件)应运而生.TDI CCD是一种面阵结构,线阵工作模式的CCD.在推扫方向上,它通过对同一景物的多次曝光来提高信噪比,这一过程也被称作时间延时积分,且积分级数越高,信噪比越大.但由于卫星姿态控制误差^[5-9]和行转移频率误差的存在,MTF损失较大.同时,MTF的损失随积分级数增加而增大.因此存在一个由SNR和MTF指标约束的积分级数最优选择问题.

在传统的遥感相机应用中,积分级数的选择仅仅考虑信噪比,即是说使CCD不饱和的最大积分级数将被选择.在传统的低分辨力遥感相机中,这是一种不合理但却可以容忍的选择方法.但对于高分辨力相机,由于MTF随着积分级数的增加而剧烈下降,这种方法便无法满足要求.因此,薛旭成等给出

了一种基于SNR与MTF乘积的图像质量评价指标,并以此指导积分级数选取^[10].但是没有给出这种评价指标的合理性说明.同时,该方法由于没有约束条件,可能造成CCD输出饱和,从而带来图像局部分辨率损失.

本文构造了典型成像电子学系统的信噪比模型.在推导像移与卫星姿态误差和行转移频率误差数学关系的基础上,得到了像移与TDI CCD积分级数的数学关系,并以此为依据提出了一种新的积分级数选取方法.该方法中,在任意一组误差参量下,首先推导出符合SNR和MTF指标要求的积分级数范围,然后得到最优的积分级数.最后,设计实验验证了该方法.

1 SNR和MTF模型推导

1.1 信噪比模型推导

图1为一个典型遥感相机成像系统的组成结构,包括光学系统、焦面及TDI CCD阵列、前置放大器、相关双采样(CDS)、主放大器、AD转换器和图像处理模块等.每个组成部分都会引入噪音.因此,遥感相机的噪音模型可由图2表示.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61036015)资助

第一作者:吕恒毅(1984-),男,助理研究员,硕士,主要研究方向为航天光学遥感技术. Email: lv_hengyi@163.com

收稿日期:2011-09-22; **修回日期:**2011-12-22

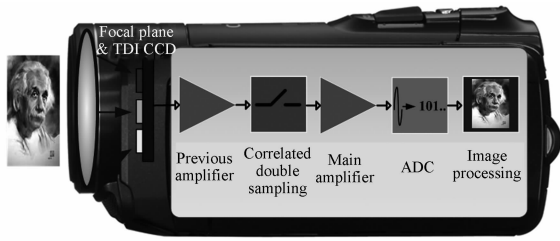


图 1 典型遥感相机内部组成图
Fig. 1 Constitution of a typical remote sensing system

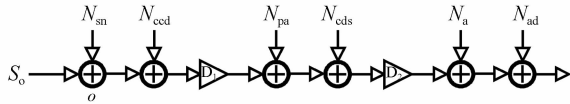


图 2 遥感相机的噪音模型
Fig. 2 Noise model of a remote sensing camera

图 2 中 O 点处的等效噪音为

$$N_o = \left\{ N_{sn}^2 + N_{ccd}^2 + \frac{1}{D_1^2} \left[N_{pa}^2 + N_{cds}^2 + \frac{1}{D_2^2} (N_a^2 + N_{ad}^2) \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

考虑到时间延时积分模式(积分级数为 M),节点 O 处的信号 S_o 可表示为

$$S_o = M\phi\sigma \quad (2)$$

式中, ϕ 表示 TDI CCD 每级的光电转换灵敏度; σ 为焦面处曝光强度. 则成像通道信噪比可表示为

$$SNR = \frac{S_o}{N_o} = M\phi\sigma / \left\{ N_{sn}^2 + N_{ccd}^2 + \frac{1}{D_1^2} \left[N_{pa}^2 + N_{cds}^2 + \frac{1}{D_2^2} (N_a^2 + N_{ad}^2) \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

式中,光子霰粒噪音 N_{sn} 与 σ 和 M 有关,且为

$$N_{sn} = \hbar n_{ne} \quad (4)$$

式中, \hbar 和 n_{ne} 分别表示电荷转换效率和噪音电子数. 考虑到信号电子数满足等式 $\sqrt{n_{se}} = n_{ne}$ 和 $S_o = n_{se}\hbar$, 因此有

$$N_{sn} = \hbar n_{se}^{1/2} = \hbar (S_o/\hbar)^{1/2} = (M\phi\sigma\hbar)^{1/2} \quad (5)$$

所以,式(3)可变形为

$$SNR(\sigma, M) = 1 / \left[\gamma_1(\sigma) \frac{1}{M} + \gamma_2(\sigma) \frac{1}{M^2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中

$$\gamma_1(\sigma) = \hbar / \phi\sigma \quad (7)$$

$$\gamma_2(\sigma) = \left\{ N_{ccd}^2 + \frac{1}{D_1^2} \left[N_{pa}^2 + N_{cds}^2 + \frac{1}{D_2^2} (N_a^2 + N_{ad}^2) \right] \right\} / \phi^2 \sigma^2 \quad (8)$$

综上所述,信噪比和积分级数 M 之间存在一个非线性函数关系,如图 3,且在某一积分级数下信噪比随 σ 单调递增.

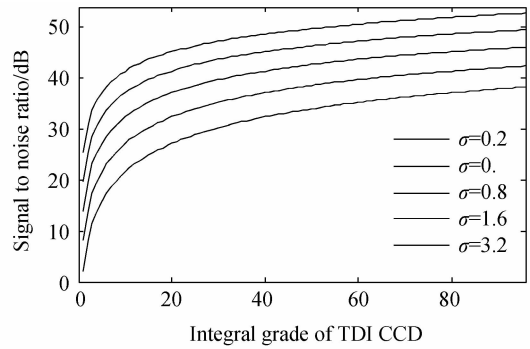


图 3 信噪比与曝光强度和积分级数关系
Fig. 3 Relationship of SNR, σ and M

1.2 调制传递函数的推导

遥感成像系统的调制传递函数通常由光学传函、电子学传函、机械加工及装校传函等部分组成,在设计阶段被设计至某一数值上. 但是在实际应用中,卫星姿态误差参量及行转移频率误差给 MTF 带来了较大损失. 而且,随着积分级数的增加,所有这些 MTF 损失都会加剧.

理论上,这些 MTF 损失是由电荷转移速度与焦面上像移动速度不一致造成的,称为像移. 假设总的像移为 s , 那么对应的 MTF 可表示为

$$MTF(f_s, s) = \frac{\sin(\pi s f_s)}{\pi s f_s} \quad (9)$$

式中, f_s 代表空间频率.

在遥感成像系统中,调制传递函数可分解为两个方向:平行方向(TDI 方向)和垂直方向(TDICCD 的像元阵列方向),分别记为 $MTF_{//}$ 和 MTF_{\perp} . 每个分量都受到上述因素的影响.

1.2.1 行频准确度

假设理想的行转移周期和频率分别为 T 和 F , 实际误差分别为 ΔT 和 ΔF , 像元尺寸为 $a \times a$. 那么电荷转移速度和像移动速度的失配量可表示为

$$\Delta_{//} v_1 = v_e - v_{//p} = \frac{a}{T - \Delta T} - \frac{a}{T} = a(F + \Delta F) - aF = a \cdot \Delta F \quad (10)$$

所以,每一级下的像移为

$$\Delta_{//} x_1 = \Delta_{//} v_1 \cdot T = a(\Delta F/F) \quad (11)$$

则 M 级下的总像移可表示为

$$\widetilde{\Delta_{//} x_1} = M \cdot \Delta_{//} x_1 = \left(a \frac{\Delta F}{F} \right) M \quad (12)$$

同时,垂直方向不存在像移,即 $\widetilde{\Delta_{\perp} x_1} = 0$.

1.2.2 偏流角

理想情况下,卫星飞行方向与 TDI CCD 像元阵列方向垂直,从而确保电荷转移方向与卫星飞行方

向严格平行.但在实际中,由于偏流角、俯仰角和滚动角等卫星姿态控制误差的存在,像移不可避免地引入.图 4 描述了一个以偏流角 θ_1 向前推扫成像的 TDI CCD.

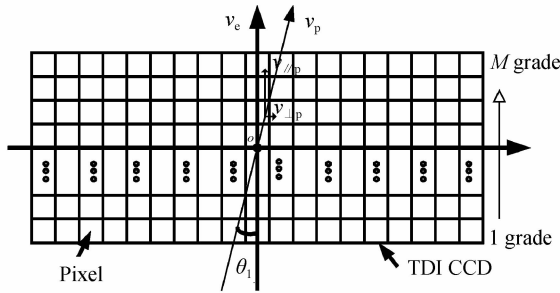


图 4 以 θ_1 偏航角工作的 TDI CCD 示意图
Fig. 4 TDI CCD works with an azimuth θ_1

由图 4,电荷转移速度和像移动速度的失配为

$$\Delta_{//} v_2 = v_e - v_{//p} = \frac{a}{T} (1 - \cos \theta_1) \quad (13)$$

则 M 级下的总像移为

$$\widetilde{\Delta_{//} x_2} = M \cdot \Delta_{//} x_2 = M \cdot \Delta_{//} v_2 \cdot T = a(1 - \cos \theta_1)M \quad (14)$$

同时,垂直方向上的像移为

$$\widetilde{\Delta_{\perp} x_2} = M \cdot \Delta_{\perp} x_2 = M \cdot \Delta_{\perp} v_2 \cdot T = -a \sin \theta_1 M \quad (15)$$

1.2.3 俯仰角

作为卫星姿态控制误差之一,俯仰角也会带来像移.假设卫星以俯仰角 θ_2 向前飞行,则该过程可由图 5 描述.

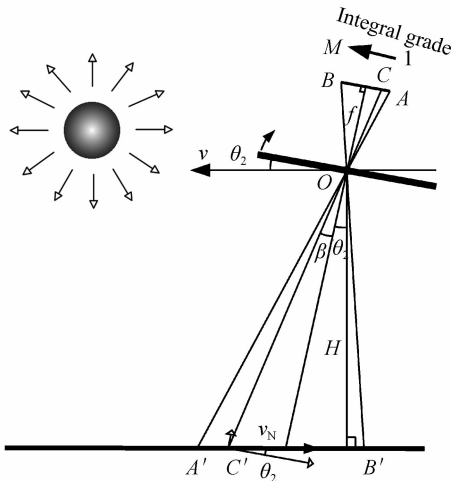


图 5 以俯仰角 θ_2 工作的 TDI CCD 示意图
Fig. 5 TDI CCD works with a pitching angle θ_2

在 TDI CCD 的每一级中,CCD 表面的像移动速度是一样的.但由于 OC/OC' 随积分级数变化,使得不同级上的像移动速度存在差异.进一步推导可以得到二者之间存在一种非线性函数关系.

如图 5 所示,TDI CCD 表面 C 点处的像移动速度(第 j 级积分级数中)可表示为

$$v_{//pj} = \frac{OC}{OC'} v_N \cos \theta_2 = \frac{f / \cos \beta}{H / \cos(\beta + \theta_2)} \cdot v_N \cos \theta_2 \quad (16)$$

因此, j 级中每个像元的像移量为

$$\Delta_{//} x_3(j) = \Delta_{//} v_3(j) T = (v_e - v_{//pj}) T = (a/T - v_{//pj}) T = a - \frac{f}{H} v_N T \cdot \frac{\cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \beta)}{\cos \beta} = a \left(1 - \frac{\cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \beta)}{\cos \beta} \right) \quad (17)$$

式中

$$\beta = \arctan \{ [(M_{\max}/2 - j)a + a/2] / f \} \quad (18)$$

那么, $\Delta_{//} x_3(j)$ 可变形为

$$\Delta_{//} x_3(j) = a \left(1 - \frac{\cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \beta)}{\cos \beta} \right) = a(\sin^2 \theta_2 + \sin \theta_2 \cos \theta_2 \tan \beta) = a(\sin^2 \theta_2 + \sin \theta_2 \cos \theta_2 ((M_{\max}/2 - j) \cdot a + a/2) / f) \quad (19)$$

则 M 级积分级数下 TDI 方向上的总像移量为

$$\widetilde{\Delta_{//} x_3} = \sum_{j=1}^M \Delta_{//} x_3(j) = a \sum_{j=1}^M \left(\sin^2 \theta_2 + \sin \theta_2 \cos \theta_2 \cdot \frac{(M_{\max}/2 - j)a + a/2}{f} \right) = \left(-\frac{a}{2f} \cdot \sin \theta_2 \cos \theta_2 \right) M^2 + \left(a \sin^2 \theta_2 + \frac{a^2}{2f} \cdot \sin \theta_2 \cos \theta_2 M_{\max} \right) M \quad (20)$$

于是得到 TDI 方向上的总像移与积分级数之间的非线性关系为二次函数关系.同时,由于在垂直方向上没有速度失配,因此有 $\widetilde{\Delta_{\perp} x_3} = 0$.

1.2.4 滚动角

滚动角的产生直接造成同一积分级数内的各像元表面的像移动速度不同.在平行方向上,各级的像移动速度均不同,这一情况可由图 6 表示.

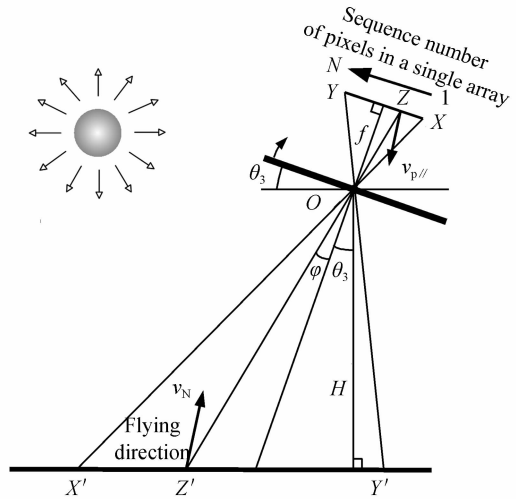


图 6 以 θ_3 滚动角工作的 TDI CCD 示意图
Fig. 6 TDI CCD works with a scrolling angle θ_3

如图 6 所示,TDI CCD 表面 Z 点(第 i 个像元)处的像移动速度可表示为

$$v_{//pi} = \frac{OZ}{OZ'} \cdot v_N = \frac{f/\cos\varphi}{H/\cos(\varphi+\theta_3)} \cdot v_N \quad (21)$$

因此每个积分级数内的第 i 像元的像移为

$$\begin{aligned} \Delta_{//x_4}(i) &= \Delta_{//v_4}(i) \cdot T = (v_e - v_{//pi}) \cdot T = \\ &a \left(1 - \frac{\cos(\theta_3 + \varphi)}{\cos\varphi} \right) = a(1 - \cos\theta_3 + \\ &\sin\theta_3 \tan\varphi) \end{aligned} \quad (22)$$

式中

$$\varphi = \arctan \left\{ [(N/2 - i) \cdot a + a/2] / f \right\} \quad (23)$$

由于同一级内各像元的像移不同,因此得到每一级的平均像移量为

$$\begin{aligned} \overline{\Delta_{//x_4}} &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta_{//x_4}(i) = a/N \cdot \sum_{i=1}^N (1 - \cos\theta_3 + \\ &\sin\theta_3 \cdot [(N/2 - i) \cdot a + a/2] / f) = \\ &a \cdot (1 - \cos\theta_3) \end{aligned} \quad (24)$$

所以,平行方向上的总像移量为

$$\widetilde{\Delta_{//x_4}} = M \cdot \overline{\Delta_{//x_4}} = a \cdot (1 - \cos\theta_3) \cdot M \quad (25)$$

与此同时, $\widetilde{\Delta_{\perp x_4}} = 0$.

1.2.5 总的 MTF 模型

经过上述分析,平行方向上的像移量与 ΔF , θ_1 , θ_2 和 θ_3 有关,且关系式为

$$\begin{aligned} \Delta_{//x} &= \sum_{k=1}^4 \widetilde{\Delta_{//x_k}} = \gamma_3(\theta_2) \cdot M^2 + \\ &\gamma_4(\Delta F, \theta_1, \theta_2, \theta_3) \cdot M \end{aligned} \quad (26)$$

式中

$$\gamma_3(\theta_2) = -\frac{a}{2f} \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_2 \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \gamma_4(\Delta F, \theta_1, \theta_2, \theta_3) &= a \left(2 + \frac{\Delta F}{F} - \cos\theta_1 - \right. \\ &\left. \cos\theta_3 + \sin^2\theta_2 + \frac{a}{2f} \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_2 \cdot M_{\max} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

同理,垂直方向上的总像移量为

$$\Delta_{\perp x} = \sum_{k=1}^4 \widetilde{\Delta_{\perp x_k}} = \gamma_5(\theta_1) \cdot M \quad (29)$$

式中

$$\gamma_5(\theta_1) = -a \cdot \sin\theta_1 \quad (30)$$

基于式(9),有

$$\begin{aligned} \text{MTF}_{//}(f_s, \Delta_{//x}) &= \frac{\sin(\pi \cdot \Delta_{//x} \cdot f_s)}{\pi \cdot \Delta_{//x} \cdot f_s} = \\ \frac{\sin(\pi \cdot (\gamma_3(\theta_2) \cdot M^2 + \gamma_4(\Delta F, \theta_1, \theta_2, \theta_3) \cdot M) \cdot f_s)}{\pi \cdot (\gamma_3(\theta_2) \cdot M^2 + \gamma_4(\Delta F, \theta_1, \theta_2, \theta_3) \cdot M) \cdot f_s} \end{aligned} \quad (31)$$

并且

$$\begin{aligned} \text{MTF}_{\perp}(f_s, \Delta_{\perp x}) &= [\sin(\pi \cdot (\gamma_5(\theta_1) \cdot M) \cdot \\ &f_s)] / [\pi \cdot (\gamma_5(\theta_1) \cdot M) \cdot f_s] \end{aligned} \quad (32)$$

2 积分级数选择

为了保证遥感相机成像质量,必须严格满足以下三个指标:第一,当焦面曝光强度大于典型值时,信噪比值必须大于信噪比下限 SNR_{\uparrow} ;第二,奈奎斯特频率处的 MTF 值($\text{MTF}(f_N, \Delta x)$)须大于等于指标值;最后,不能使 CCD 处于过饱和状态.在式(33)的约束下,可通过选正确的参量来确保上述三个指标满足要求.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{SNR}(\sigma, M) \geq \text{SNR}_{\uparrow} \\ 1 \leq M \leq M_{\max} \end{array} \right\} \Rightarrow M \geq \vec{M} \quad (33)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{MTF}_{//}(f_N, \Delta_{//x}) \geq \text{MTF}_{\uparrow} \\ \text{MTF}_{\perp}(f_N, \Delta_{\perp x}) \geq \text{MTF}_{\uparrow} \\ \Gamma(\sigma, M) \leq \Gamma_{\max} \end{array} \right\} \Rightarrow M \leq \vec{M}$$

式中

$$\Gamma(\sigma, M) = \phi \cdot M \cdot \sigma \quad (34)$$

SNR_{\uparrow} 是 $\sigma > \sigma_{\text{typical}}$ 条件下的信噪比下限, MTF_{\uparrow} 是奈奎斯特频率下的 MTF 下限, Γ_{\max} 代表 TDI CCD 的饱和输出电压, $\Gamma(\sigma, M)$ 是 TDI CCD 的实际输出电压.

由式(33),得到一个满足所有指标的积分级数范围,记为 $[\vec{M}, \vec{M}]$. 然而,当 $M \geq \vec{M} \cap M \leq \vec{M}$ (其中 $\vec{M} > \vec{M}$) 时,该范围会是一个空集,使得不存在满足指标的积分级数 M . 在这种情况下,信噪比和 MTF 须各退一步,从而得到相对可行的积分级数范围,记为 $[\vec{M}, \vec{M}]$. 从而,可以得到通用的积分级数范围公式

$$\min(\vec{M}, \vec{M}) \leq M \leq \max(\vec{M}, \vec{M}) \quad (35)$$

在上述范围内,需选取一个最优的积分级数从而获得最好的成像效果.因此选择该范围的中值

$$M_{\text{optimal}} = [\vec{M} + \vec{M} / 2] \quad (36)$$

综合上述,得到了一个最优的积分级数 M_{optimal} . 但是,此时的 CCD 输出电压很难达到 AD 转换器的输入上限值,使得图像的灰度分布集中在底部.所以,在选定了最优的积分级数后,需要进一步设定一个主放大器的增益值来解决该问题,该值可表示为

$$\gamma = \frac{\Phi}{\Gamma(\sigma, M) \cdot D_1} \quad (37)$$

式中, Φ 表示 ADC 的输入上限值.

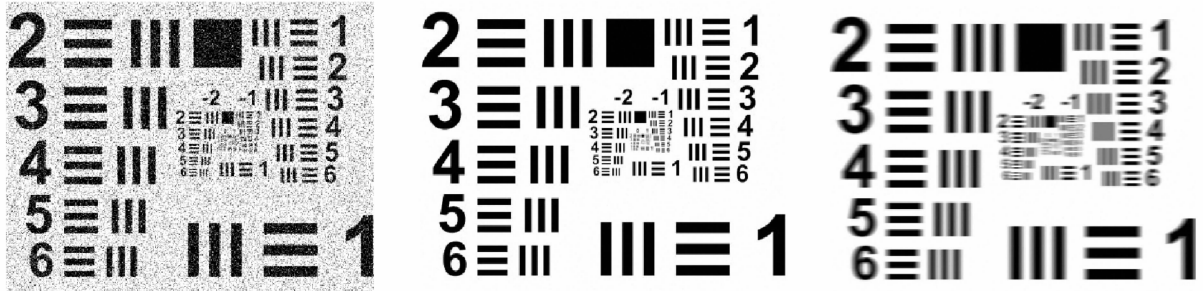
3 仿真实验

如第 2 节所述,总的积分级数范围可以被划分为三部分,记为

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_1 = [1, \min(\vec{M}, \vec{M})] \\ \Omega_2 = [\min(\vec{M}, \vec{M}), \max(\vec{M}, \vec{M})] \\ \Omega_3 = [\max(\vec{M}, \vec{M}), M_{\max}] \end{array} \right. \quad (38)$$

不同的积分级数范围会带来不同的成像效果. 在 Ω_1 中, 积分级数较小, 从而带来低信噪比和小的像移量. 获得的图像将如图 7(a) 所示. 在 Ω_3 中, 积

分级数相对较大, 使得信噪比和像移量均较大. 获得的成像效果如图 7(c) 所示. 在 Ω_2 中, 可以获得较好的折中成像效果, 如图 7(b) 所示.



(a) Image obtained with integral grade in Ω_1 (b) Image obtained with integral grade in Ω_2 (c) Image obtained with integral grade in Ω_3

图 7 不同积分级数区间所得图像
Fig. 7 Images obtained in different M ranges

3.1 仿真实验

实验 1:

假设 $\sigma=0.5 \text{ nJ/cm}^2$, $\phi=700 \text{ V/(J/cm}^2/M_{\max})$, $\hbar=10 \mu\text{V/e}^-$, $N_{\text{ccd}}=0.6 \text{ mV}$, $N_{\text{pa}}=0.09 \text{ mV}$, $N_{\text{cds}}=0.25 \text{ mV}$, $N_a=0.08 \text{ mV}$, $N_{\text{ad}}=0.5 \text{ mV}$, 初始的增益 D_1 和 D_2 均为 1. 进一步地, 令像元尺寸 $a=9 \mu\text{m}$, 相机焦距 $f=8 \text{ m}$, $M_{\max}=96$, $f_N=1/2a$, $\Delta F=-0.1\%$, $F=15 \text{ kHz}$, $\theta_1=0.05$, $\theta_2=0.01$, $\theta_3=0.02$, $\sigma_{\text{typical}}=0.48 \text{ nJ/cm}^2$, $\text{SNR}_{\uparrow}=38 \text{ dB}$, $\text{MTF}_{\parallel\uparrow}=0.95$, $\text{MTF}_{\perp\uparrow}=0.95$, $\Phi=\Gamma_{\max}=2 \text{ V}$.

如第 2 节讨论, 得到一个可行的积分级数范围, 且为 [29, 65].

图 8 中, 下边横线表示归一化信噪比指标值, 左侧竖线代表对应于 SNR_{\uparrow} 的积分级数下限, 右侧竖线代表对应于 MTF_{\uparrow} 的积分级数上限, 最右侧竖线代表对应于 Γ_{\max} 的积分级数上限 (超过 96 级不显示). 承上, 总的积分级数范围可以被划分为三部分 [1, 28], [29, 65] 和 [66, 96]. 为作比较, 在每个范围内选取一个积分级数做成像实验, 从而得到对应的三幅图像如图 9 所示, 每幅图像大小为 3014×2048 .

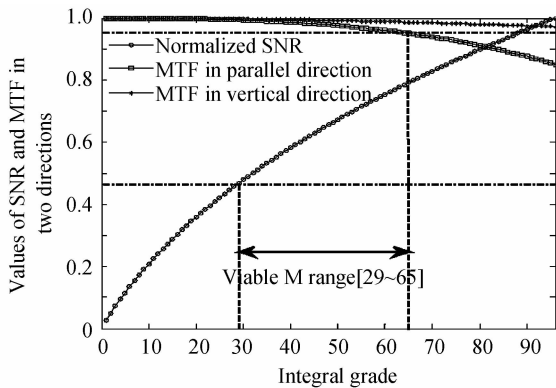
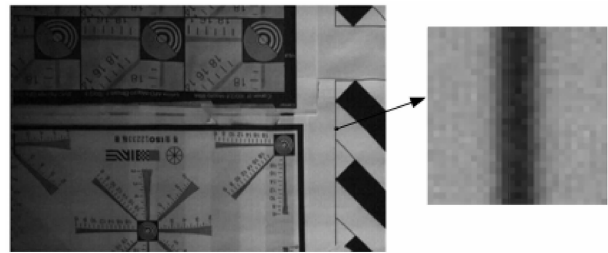
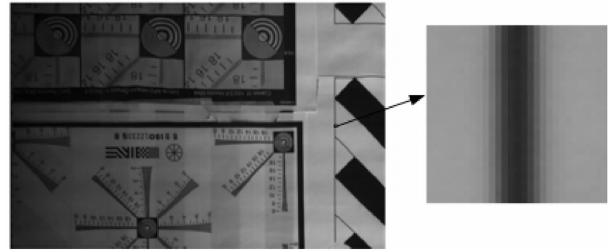


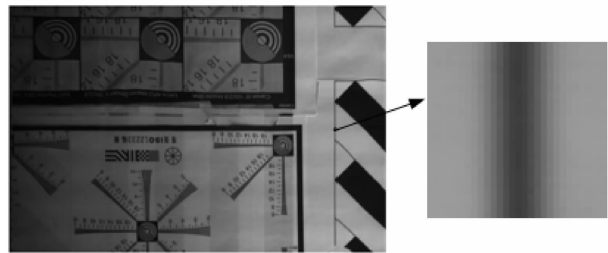
图 8 情况 1 中积分级数范围获取图
Fig. 8 Figure of obtaining viable M range for instance 1



(a) Image obtained with $M=4$ in instance 1



(b) Image obtained with $M=47$ in instance 1



(c) Image obtained with $M=96$ in instance 1

图 9 情况 1 中不同 M 区间下所获得的图像

Fig. 9 Images obtained with different M s in instance 1

从而, 得到一个最优的积分级数和对应的增益设置值, 且分别为 47 和 11.67. 最后, 成像效果如图 9(b) 所示.

实验 2:

在该情况下, 改变一组参量为 $\Delta F=0.1\%$, $\theta_1=0.01$, $\theta_2=-0.5$, $\theta_3=0.01$. 则得到一个新的积分级数范围如图 10 所示, 且为 [13, 29]. 因此, 积分级数范围被划分为三部分 [1, 12], [13, 29], [30, 96]. 与情况 1 类似, 从各范围内各选取一个积分级数做实验, 得到的图像如图 11 所示. 进一步, 得到一

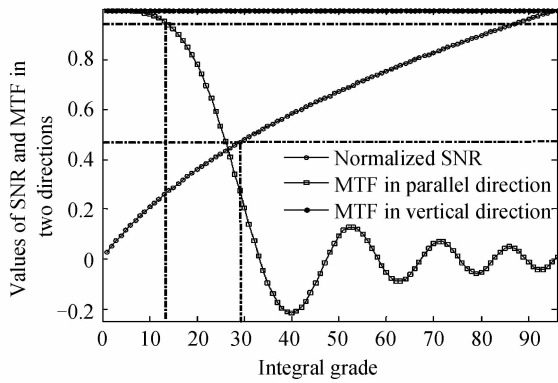


图 10 情况 2 中积分级数 M 范围获取图
 Fig. 10 Figure of obtaining viable M range for instance 2

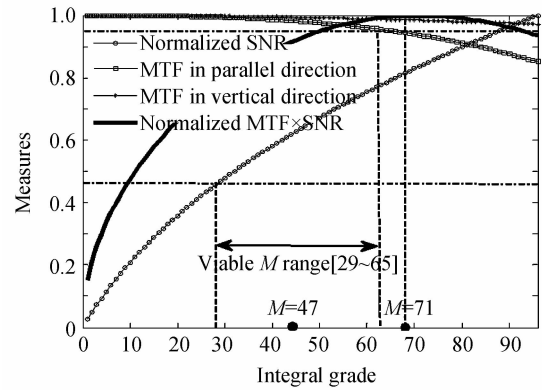


图 12 两种方法下获得的不同积分级数示意图
 Fig. 12 Figure of different optimal integral grades obtained by the two methods

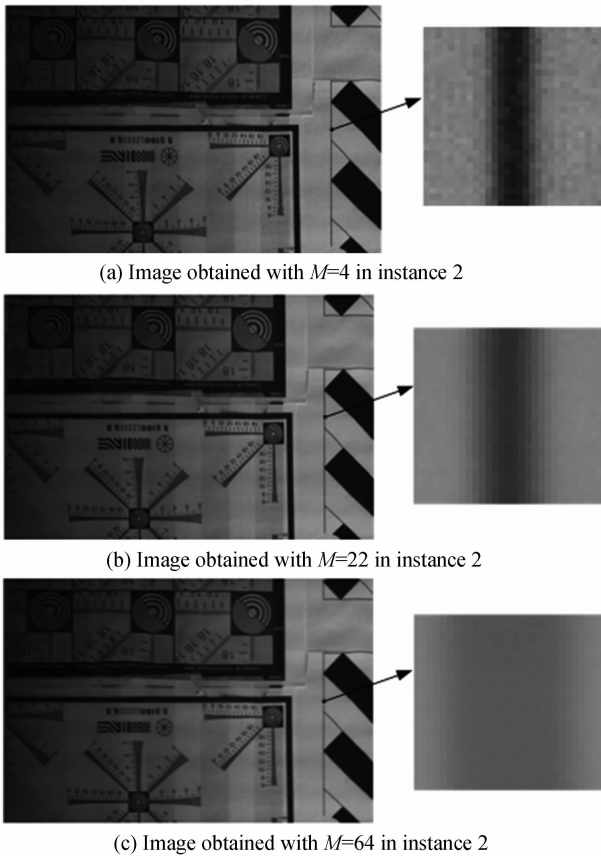


图 11 情况 2 中不同 M 区间下所获得得图像
 Fig. 11 Images obtained with different M s in instance 2
 一个新的最优积分级数和一个新的增益值,分别为 22 和 24. 94.

3.2 比较

利用实验 1 中的参量,对本方法和文献[10]中的方法作以比较.图 12 描述了两种方法得到的最优积分级数,分别为 $M=47$ (本文方法)和 $M=71$ (文献[10]中方法).从而,得到两种积分级数下获得的图像分别如图 13(a)和(b)所示.

如图 13 所示,尽管信噪比差异不明显,但图 13 (b)的 MTF 损失要大于图(a),这是因为积分级数 $M=71 > 65$ 已经超过了容许范围,使得不满足 MTF 指标所致.

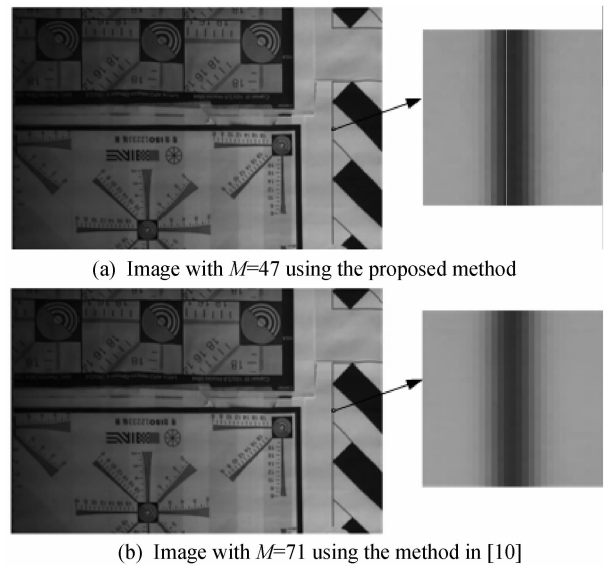


图 13 两种方法下获得的图像比较
 Fig. 13 Comparison of Images obtained by the two methods

4 结论

提出了一种新的遥感相机中 TDICCD 积分级数的选择方法.构造了两个模型,分别为信噪比与积分级数关系模型和调制传递函数与卫星姿态参量、行频准确度积分级数关系模型.从而推导出了可行的积分级数范围及最优的积分级数值.为验证本方法的正确性,进行了实物实验,结果表明本文方法能够选取最优的积分级数值,确保遥感相机的成像指标和质量.与传统方法相比,本文方法的选取结果更加准确.

参考文献

[1] CHEN Yu-heng, ZHOU Jian-kang, CHEN Xin-hua, et al. Calculation of SNR of a satellite CCD camera based on MODTRAN[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(5): 910-914.
 陈宇恒,周建康,陈新华,等.基于 MODTRAN 模型计算星载 CCD 相机信噪比[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(5): 910-914.

- [2] QIAN Yi-xian, LIANG Wei, GAO Xiao-dong. Numerical analysis of dynamic modulation transfer function for high-resolution aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 192-196.
钱义先, 梁伟, 高晓东. 高分辨率航空相机动态调制传递函数数值分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1):192-196.
- [3] LIAO Jing-yu, GAO Xiao-dong, LIANG Wei. Dynamic MTF analysis and research for aerial camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 679-683.
廖靖宇, 高晓东, 梁伟. 航空相机动态调制传递函数分析与研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(5): 679-683.
- [4] ZHENG Geng-feng, ZHANG Ke, HAN Shuang-li, et al. Design of test system for motion images of space TDICCD camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 623-629.
郑耿峰, 张柯, 韩双丽, 等. 空间 TDICCD 相机动态成像地面检测系统的设计[J]. *光学精密工程*. 2010, **18**(3): 623-629.
- [5] YU Tao, XU Shu-yan, HAN Cheng-shan, et al. Batch-type real-time adjustment for drift angle of space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 1908-1914.
于涛, 徐抒岩, 韩诚山, 等. 空间相机偏流角的间歇式实时调整[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(8): 1908-1914.
- [6] LI Xin-feng. Effect analysis of orbital and attitude parameter error on TDI_CCDs line-shift frequency and veer angle[J]. *Chin J Space Sc*, 2008, **28**(3): 254-259.
李新峰. 轨道姿态误差对 TDI_CCD 相机行周期及偏流角的影响分析[J]. *空间科学学报*, 2008, **28**(3):254-259.
- [7] FAN Chao, LIANG Yi-tao, LI Wei, et al. Study on influence of drift angle on the space camera[J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, **15**(11): 76-79 .
樊超, 梁义涛, 李伟, 等. 偏流角对空间相机影响研究[J]. *光电与控制*, 2008, **15**(11):76-79.
- [8] FAN Chao, LI Ying-cai, YI Hong-wei. Influence analysis of drift angle on image quality of TDICCD camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(9): 70-73 .
樊超, 李英才, 易红伟. 偏流角对 TDICCD 相机像质的影响分析[J]. *光电工程*, 2007, **34**(9):70-73.
- [9] YAN De-jie, XU Shu-yan, HAN Cheng-shan. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2199-2203.
闫得杰, 徐抒岩, 韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11):2199-2203.
- [10] XUE Xu-cheng, SHI Jun-xia, LÜ Heng-yi, et al. Optimal set of TDICCD integration stages and gains of space remote sensing cameras [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(4): 857-863.
薛旭成, 石俊霞, 吕恒毅, 等. 空间遥感相机 TDICCD 积分级数和增益的优化设置[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(4):857-863.

Selecting the Optimal Integral Grade for TDI CCD in Remote Sensing Cameras

LÜ Heng-yi¹, LIU Yang², XUE Xu-cheng¹

(1 *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: In order to solve the problem that integral grade affects the imaging quality, a method of integral grade selection for remote sensing cameras is proposed. Firstly, a model of signal to noise ratio and integral grade is derived and another model of modulation transfer function, satellite attitude parameters, precision of the TDICCD's line transfer frequency and integral grade is as well formulated. Then, the viable integral grade range is obtained under the restrictions of the SNR and MTF targets based on the above two models. Consequently, the gain of the imaging system versus the optimal integral grade is given. Finally, experiments and comparisons are made to validate the proposed method. The results indicate that: the optimal integral grade can be selected based on our method, and the best imaging effect can be accordingly obtained; when the optimal integral grade is nonexistent, a comparative good integral grade can be also acquired; the imaging effects obtained under the proposed method is better than that of the conventional ones.

Key words: Remote sensing camera; TDI CCD; Integral grade; Imaging quality