

基于辐射传输模型的 TDI CCD 遥感相机信噪比分析

万 志^{1,2}, 任建伟¹, 李宪圣¹, 赵贵军^{1,2}, 任建岳¹

(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.中国科学院研究生院,北京 100039)

摘 要:信噪比是定量评价遥感相机成像质量和辐射性能的一项关键指标,信噪比的估算和测试对于遥感相机的研制至关重要。针对 TDI CCD 相机从辐射传输和能量转换的角度推导了信噪比计算公式,基于大气辐射传输模型 MODTRAN 4.0 从理论上估算了某遥感相机在各种观测条件下的信噪比,结果表明:在典型观测条件下相机的信噪比不低于 20 dB。作为试验验证,利用积分球光源对相机进行了各种照明条件下的信噪比测试,测试结果证实了理论模型的正确性。

关键词:TDI CCD 相机; 辐射传输模型; 成像性能; 信噪比

中图分类号:V443.5 文献标识码:A 文章编号:1007-2276(2008)03-0497-04

Analysis of signal-to-noise ratio for remote sensing TDI CCD camera based on radiative transfer model

WAN Zhi^{1,2}, REN Jian-wei¹, LI Xian-sheng¹, ZHAO Gui-jun^{1,2}, REN Jian-yue¹

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033,China;
2.Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039,China)

Abstract: Signal-to-noise ratio (SNR) is one of the key parameters to quantitatively evaluate the image quality and radiometric performance of a remote sensing camera. The estimation and testing of SNR are very important for developing a remote sensing camera. From the perspectives of radiative transmission and energy conversion, the SNR equation of TDI CCD camera was derived, SNR values under several observing conditions for some type of camera were theoretically evaluated based on atmospheric radiative transfer model - MODTRAN 4.0. The results show that the SNR under typical viewing geometry is not less than 20 dB. As experimental validation, SNR testing under every illuminative condition was performed using integrating sphere, and the experimental results have proved the correctness of this theoretical model.

Key words: TDI CCD camera; Radiative transfer model; Imaging performance; SNR

0 引 言

遥感相机广泛应用于军事测绘、农业估产、资源勘探、环境监测等领域。随着遥感信息定量化应用需求和水平的不断提高,对于相机成像性能的要求也越来越高,而相机的空间或光谱分辨率的提高都是以牺

牲部分辐射探测能力为代价的。为了解决这一矛盾,越来越多的高分辨率相机采用 TDI CCD 作为焦平面探测器,采用这种成像器件的相机可以通过时间延迟积分的方法实现对同一个目标多次曝光,从而在一定程度上改善由于相机相对孔径小、焦距长引起的曝光量不足的问题,因而有利于提高信噪比。

收稿日期:2007-08-20; 修订日期:2007-10-25

作者简介:万志(1973-),男,吉林长春人,助理研究员,博士生,主要研究方向为光学遥感器的辐射定标和像质评价。

Email: wz7307@yahoo.com.cn

导师简介:任建岳(1952-),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,863 专家组成员,主要研究方向为光学遥感器的研制和性能评价。

Email: renjy@ciomp.ac.cn

相机成像性能的评估分为论证阶段的性能指标估算以及研制完成初期在地面进行的性能参数检测和标定。地面像元分辨率 (GSD) 作为衡量相机几何分辨本领的指标, 仅仅从几何光学的角度给出相机可能分辨的最小地面目标尺寸。实际上, 目标能否被探测还取决于目标与背景之间的反差 (或对比度)。另外, 相机在轨运行时对地面目标成像会受到很多因素的影响, 如目标辐射在大气中的散射和衰减、卫星的姿态变化 (俯仰、横滚、偏航等) 引起的像移失配等都会导致目标图像对比度下降; 此外, 图像的存储、压缩、传输以及地面的接收和处理也都不可避免地造成一定程度的像质下降。所以, 真实观测条件下往往达不到理论分辨率。为了定量地分析成像过程中各个环节造成的目标图像对比度下降, 引入了调制传递函数 (MTF) 这一指标, 旨在从空间频率域的角度来评价相机的分辨能力。

信噪比是决定目标能否被探测的一个重要因素, 也是衡量相机成像质量和辐射性能的重要指标。在低照度条件下, 如果目标信号弱到和噪声处于同一个数量级时, 即使 MTF 和目标几何尺寸再大也不能被探测到。文中首先从辐射传输和光电转换的角度分析了影响 TDI CCD 相机成像质量的各种因素, 推导出普遍适用的 TDI CCD 相机信噪比计算公式, 为相机系统的设计和评价提供依据; 然后利用大气辐射传输模型估算了某遥感相机在典型观测条件下的信噪比; 最后作为对理论模型的试验验证, 在实验室利用积分球扩展光源对相机进行了典型照明条件下的信噪比测试。

1 相机成像性能的评价和测试

目前, 国内普遍采用的相机成像性能评价指标是奈奎斯特频率下的调制传递函数和信噪比, 一般认为, 只有当奈奎斯特频率下的静态调制传递函数满足 $MTF_{static} > 0.2$ 时, 才能达到接近衍射极限的地面像元分辨率。西安光机所的陈荣利等人建议用 $MTF \times SNR > 9$ 作为判断成像质量能否达到几何分辨要求的标准^[1]。美国遥感界采用 National Imagery Interpretability Rating Scales (NIIRS) 图像分级解译标准和图像质量方程综合评价遥感相机的成像质量^[2-3]:

$$NIIRS = 10.251 - \lg GSD_{GM} + \lg RER_{GM} - 0.656 H_{GM} - 0.344 \frac{G}{SNR}$$

该标准按照 NIIRS 值从 0~9 把图像的解译度分为 10 个等级, 通过测试相机系统对应于图像质量方程

的各个参数得到 NIIRS 值, 从而确定该相机所获取的遥感图像具有何种解译能力。这种评价方法综合考虑了地面像元分辨率、边缘响应、信噪比和增益等对成像质量的影响, 因此相比国内的评价方法有了很大改进。

相机的地面性能测试主要是相机研制完成初期在实验室内进行的静态调制传递函数、信噪比测试以及响应的线性、均匀性、动态范围和绝对响应度的标定, 另外还可以结合室外靶标的动态成像实验来测试相机的动态成像性能^[4]。

文中拟将大气辐射传输模型应用于 TDI CCD 相机的信噪比分析和估算, 试图使信噪比分析和评价达到直接为相机系统设计服务的实用化程度。另外, 在实验室内利用积分球扩展光源模拟典型照明条件对相机进行了信噪比测试和验证, 其原理是用积分球光源充满相机的口径和视场, 通过调整积分球输出辐亮度来实现不同照明条件和图像灰度等级下的信噪比测试。

2 入瞳辐亮度的辐射传输模型

遥感 CCD 相机对地面景物成像的过程实际上是景物反射的太阳辐射经过大气和光学系统作用后到达 CCD 探测器并被接收、处理以及量化的辐射传输和光电转换的过程。图 1 比较直观地表示从遥感平台观测地面景物时的典型观测几何关系和大气辐射传输机理。如图所示, 到达相机入瞳处的辐亮度除了包含目标景物反射的太阳直射和天空散射辐射外, 还包括大气程辐射以及交叉辐射 (地气耦合) 的贡献^[5], 这些构成了背景辐亮度。背景辐亮度可以看作是叠加在目标景物图像上的直流分量, 其作用是抬升了信号幅度但却降低了像的对比度, 使得目标/背景反差小的区域不易分辨, 因而不利于目标的探测和识别。

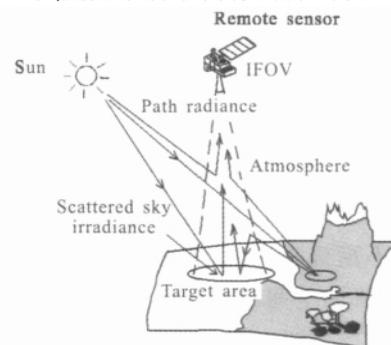


图 1 光学遥感典型观测几何关系和辐射传输模型
Fig.1 Typical viewing geometry and radiative transfer model for optical remote sensing

地面目标反射的太阳辐射 (包括直射辐射和天空

散射辐射) 经过大气散射和衰减后到达相机的入瞳, CCD 像面的曝光量由入瞳辐亮度、光学系统的相对孔径和透过率、探测器像元光敏面面积以及积分时间等参数共同决定, 所以入瞳辐亮度的分析和估算是计算进入成像系统的能量和信噪比的前提。

根据上述分析, 对于可见光相机来说, 在朗伯地表假设 (即不考虑双向反射分布特性) 条件下, 且忽略目标自身发射的长波红外辐射, 相机入瞳处的辐射亮度可以表示为:

$$L_{\text{target}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ \tau_{\text{atm}}^{\text{targ-sat}}(\lambda) \cdot \frac{\rho_{\text{target}}(\lambda)}{\pi} \cdot [E_{\text{dir}}(\lambda) + E_{\text{skylight}}(\lambda)] + L_{\text{path}}(\lambda) \right\} d\lambda \quad (1)$$

式中: $\tau_{\text{atm}}^{\text{targ-sat}}(\lambda)$ 为目标到传感器路径的大气光谱透射比; $\rho_{\text{target}}(\lambda)$ 为目标的光谱反射率; $E_{\text{dir}}(\lambda)$ 为目标处的太阳直射光谱辐照度; $E_{\text{skylight}}(\lambda)$ 为天空散射光谱辐照度; $L_{\text{path}}(\lambda)$ 为大气程辐亮度。

根据卫星轨道高度和观测天底角、星下点地理位置、太阳高度角、地面目标反照率、大气能见度、工作波段等输入条件, 利用辐射传输模型软件可以计算出到达相机入瞳处的积分辐射亮度。表 1 是利用大气辐射传输模型 (MODTRAN 4.0) 计算的在不同太阳天顶角和地面反照率下, 包括大气程辐射在内的 CCD 相机入瞳处的积分辐射亮度。为了得到纯目标等效入瞳辐亮度, 在其他观测条件不变的情况下应用零反射地表假设能够求解大气程辐射, 从而可以将来自地面目标的反射辐射和大气背景辐射分离开, 表 1 中的 $\rho_{\text{target}}=0.0$ 对应各项数值就是应用零反射地表假设得到的大气背景辐亮度。

入瞳处的辐射经过光学系统作用后到达像面对 CCD 器件进行曝光, 然后经过光电转换、信号采集、A/D 变换以及存储、传输、处理等一系列过程, 最终输出可供目视判读的目标景物灰度图像。

表 1 相机入瞳处积分辐射亮度 (单位: $W/m^2 \cdot sr$)

Tab.1 Radiance lightness at entrance pupil of the camera ($W/m^2 \cdot sr$)

ρ_{target}	80 °	70 °	60 °	40	20 °	0 °
0.0	1.33	1.65	1.93	2.52	3.02	3.22
0.1	3.04	5.84	8.55	13.29	16.52	17.66
0.3	6.48	14.22	21.78	34.83	43.51	46.55
0.5	9.92	22.61	35.02	56.37	70.51	75.45
0.7	13.36	30.99	48.25	77.91	97.50	104.3
0.9	16.79	39.38	61.49	99.45	124.5	133.2

3 信噪比分析和估算

除了调制传递函数之外, 信噪比是评价相机成像性能的另一个重要指标^[6], 它是和相机的辐射分辨本领直接相关的物理量。信噪比的大小能够反映相机对于辐射的探测能力, 所以信噪比的分析和估算对于光学系统参数、成像器件的选择和后续电子学系统的设计有很重要的参考意义。

3.1 信噪比分析及公式推导

信噪比定义为目标辐射在 CCD 探测器上产生的信号电子数和噪声电子数之比, 通常以 dB 为单位表示:

$$SNR = 20 \lg \frac{S_e}{N_e} \quad (2)$$

式中: S_e 为信号电子数; N_e 为噪声电子数。

在辐射传输和光电转换过程中不可避免地受到各种随机因素的干扰, 这些干扰表现为各种类型的噪声^[7-8], 主要包括: 光子散粒噪声、暗电流散粒噪声、读出噪声、热噪声、放大器噪声以及量化噪声等。这些噪声成为限制辐射探测精度的主要原因, 所以人们习惯采用信噪比作为衡量相机辐射探测能力的重要指标。上述噪声中除了放大器噪声和量化噪声外, 其他都属于探测器噪声, 而探测器噪声是噪声的主要来源, 在这里仅就探测器噪声对信噪比的影响加以分析和估算。

光子散粒噪声电子数的统计平均标准偏差 σ_{photon} 是信号电子数 S_e 的开平方, 即:

$$\sigma_{\text{photon}} = \sqrt{S_e}$$

同理, 暗电流散粒噪声的标准偏差是暗信号电子数 D_e 的开平方, 另外需要注意的是暗电流电子数随着积分级数 M 的增大而线性增大, 所以有:

$$\sigma_{\text{dark}} = \sqrt{MD_e}$$

CCD 读出噪声的均方根值 σ_R 可以从器件参数列表中得到, 上述 3 种噪声是独立不相关的量, 因此噪声的迭加遵循独立误差合成原理, 总的噪声电子数为:

$$N_e = \sqrt{\sigma_{\text{photon}}^2 + \sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_R^2} \quad (3)$$

于是信噪比计算公式可以写成:

$$SNR = 20 \lg \frac{S_e}{\sqrt{S_e + \sigma_R^2 + MD_e}} \quad (4)$$

如图 2 所示, CCD 单个像元接收的目标辐射来自像元面积 A_d 对入瞳中心所张的立体角内的辐射通

量,在 $\lambda \sim \lambda + \Delta\lambda$ 光谱范围内,此辐射通量为:

$$\Delta\Phi = L(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \Omega \cdot \Delta\lambda \quad (5)$$

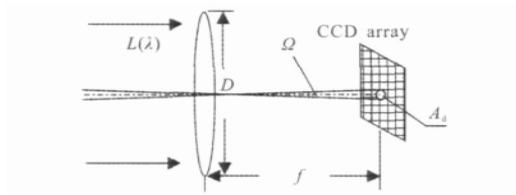


图 2 CCD 单个像元接收的辐射通量示意图
Fig.2 Schematic diagram of the radiant flux received by a single CCD pixel

若 CCD 的积分时间为 t_{int} , 则目标辐射在单个 CCD 像元上产生的曝光量为:

$$\Delta E = \Delta\Phi \cdot t_{int} = \frac{\pi A_d t_{int}}{4(f/D)^2} L(\lambda) \tau_o(\lambda) \Delta\lambda \quad (6)$$

这个能量换算成光子数为:

$$\Delta N_o = \frac{L \cdot \Delta E}{hc}$$

若 CCD 在波长 λ 处的量子效率为 $\eta(\lambda)$, 并考虑到积分级数 M 相当于增加了有效积分时间, 所以此能量产生的信号电子数为:

$$\Delta S_e = \Delta N_o \cdot \eta(\lambda) = \frac{\pi A_d M t_{int}}{4(F^\#)^2 hc} \lambda L(\lambda) \eta(\lambda) \tau_o(\lambda) \Delta\lambda \quad (7)$$

把公式 (7) 在相机的工作波段内积分, 并考虑共轴光学系统可能存在的中心遮拦将降低有效通光孔径。设遮拦比为 ε , 则最终得到的信号电子数为:

$$S_e = \frac{\pi(1-\varepsilon)A_d M t_{int}}{4(F^\#)^2 hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda L(\lambda) \eta(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

式中: A_d 为 CCD 探测器单个像元的面积; ε 为光学系统的遮拦比; M 为 TDI 级数; t_{int} 为 CCD 的积分时间; $F^\#$ 为光学系统的焦比; $L(\lambda)$ 为入瞳处接收的光谱辐射亮度; $\tau_o(\lambda)$ 为光学系统的光谱透过率; $\eta(\lambda)$ 为探测器在波长 λ 处的量子效率; h 为普朗克常数, 6.626×10^{-34} J·s; c 为真空中的光速, 3×10^8 m/s。

3.2 信噪比的理论计算和测试

为了验证上述理论模型的正确性, 利用积分球光源对某 TDI CCD 遥感相机进行了信噪比测试。整个测试过程在暗室内进行, 用积分球光源充满相机的孔径和视场, 从低到高调整积分球输出辐亮度, 相机在一定行频和级数下分别采集相应亮度下的图像, 最后利用图像灰度直方图统计求出每个像元灰度的列平均作为信号值, 而对应像元灰度随时间随机涨落的均

方根值作为噪声, 二者相除并对所有像元取平均就得到该测试条件下的平均信噪比。

整个测试过程可以用如图 3 所示的流程来表示。

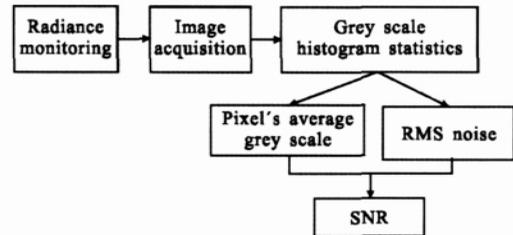


图 3 信噪比测试流程图

Fig.3 Flow diagram for SNR test

另外, 根据上面的理论分析, 把各种观测条件下的目标等效入瞳辐亮度、探测器量子效率、光学系统 F 数等参数代入公式 (8) 可得到信号电子数, 再代入公式 (2) 即得到相机在该观测条件下的理论信噪比, 几种观测条件下, 相机采用 4 级积分级数时的信噪比理论计算和实验验证结果见表 2。表中 $SNR=20lg(S/N)$, 单位为 dB。

表 2 信噪比理论估算和测试结果

Tab.2 SNR values of theoretical calculation and experimental result

Solar altitude θ Reflec- tance ρ	Radiance/ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	Theoreti- cal SNR/dB	Practical SNR/dB	Pixel's average DN	RMS noise
$\theta=20^\circ$, $\rho=0.1$	4.1	8.3	10.9	6.0	1.7
$\theta=30^\circ$, $\rho=0.1$	6.6	17.2	20.8	19.7	1.8
$\theta=45^\circ$, $\rho=0.3$	26.5	40.5	43.0	296.6	2.1
$\theta=90^\circ$, $\rho=0.7$	104.5	48.7	51.8	972.6	2.5

从表 2 可见, 理论和实际信噪比都随入射辐射信号的增大而增加; 在相同照明条件下, 实际测试的信噪比基本与理论计算结果相符合; 在地面反照率 0.1、太阳高角 30° 这种亮度较低的照明条件下, TDI CCD 采用 4 级积分级数时相机的实际信噪比大于 20 dB, 能够满足目标探测的要求。

4 结 论

从辐射传输的角度分析了遥感相机的成像机理
(下转第 555 页)

由图4和表1的跟踪误差分析结果可以发现,基于多特征融合的PDA算法的跟踪误差远小于传统的PDA算法,且具有更高的跟踪精度和更稳定的跟踪轨迹。这是由于后者的关联完全依赖于目标的位置量测,当目标密集或者建立的目标运动模型不够准确时,传统PDA算法计算目标的关联概率会出现较大的误差。而多特征融合的PDA算法综合考虑了红外目标的多特征信息,因此在计算关联概率时除了考虑目标的位置量测外,还需考虑目标的灰度和面积的变化特性,因此可以得到更为准确的关联概率。与此同时,关联准确率还与各种特征的权值大小有关,需要由红外目标的不同特性来确定。通过在不同目标信噪比和不同噪声分布条件下进行的大量仿真实验结果表明:通常灰度特征的权值设置为0.1~0.2,面积特征的权值设置为0.1~0.3。目标信噪比越高,则越应选取较大的灰度特征融合权值;目标面积变化越小,则相应增加面积特征融合权值。经过外场实际目标跟踪试验结果验证,该权值范围基本满足实际跟踪情况,可以达到很好的跟踪关联效果。

7 结论

讨论了基于多特征的红外目标概率数据关联算法。与传统PDA算法相比,该算法采用不同的关联策略计算出各特征关联概率,以融合方式进行状态更新,解决了传统PDA算法在图像处理算法提取目标部位不同或者提取位置精度不高的情况下进行关联的跟踪不稳定问题。

(上接第500页)

及影响成像质量的各种因素,利用大气辐射传输模型MODTRAN 4.0计算了相机在其工作波段内的入瞳等效积分辐亮度,并应用零地表反射假设估算了大气背景辐亮度。通过分析相机成像过程中的辐射传输和光电转换的关系,推导出TDI CCD遥感相机信噪比的通用计算公式,信噪比估算和测试结果表明:理论模型和实际情况基本符合,相机在4级积分级数下能够对从反射率0.1、太阳高角20°到反射率0.7、太阳高角90°的目标辐射范围清晰成像。

参考文献:

- [1] LU Rong-li, LI Ying-cai, FAN Xue-wu. Investigation on synthetically evaluating image quality of TDI-CCD cameras[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2003, 24(4):10-13. (in Chinese)
- [2] FIETE R D, TANTALO T. Comparison of SNR image quality

通过仿真试验对红外目标跟踪的关联结果进行了比较。试验结果表明,基于多特征融合的红外目标概率关联算法可以充分利用红外目标跟踪的特点,提高跟踪关联概率的准确性,其关联性能明显高于传统PDA算法。

参考文献:

- [1] ZHOU Hong-ren, JING Zhong-liang, WANG Pei-de. Tracking of Maneuvering Targets[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991. (in Chinese)
- [2] KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y. Probabilistic data association techniques for target tracking in clutter[C]//Proceedings of the IEEE, Digital Object Identifier, 2004, 92(3):536-557.
- [3] CHENG Hong-wei, ZHOU Yi-yu, SUN Zhong-kang. Multiple feature data fusion method in multitarget association and tracking[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(3):136-139. (in Chinese)
- [4] WANG Jie-gui, LUO Jing-qing, JIN Xue-ming. Probabilistic data association algorithm of passive tracking based on information fusion with gray correlation analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3):391-395. (in Chinese)
- [5] HUANG Chang-qing, ZHENG Lian, SONG Cheng-tian. Infrared multitarget tracking algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(2):188-191. (in Chinese)
- [6] DIANI M, BALDACCI A, CORSINI G. Joint striping noise removal and background clutter cancellation in IR surveillance systems[C]//Proceedings of the IEEE, 2001, 148(6):407-412.
- [7] CONTE E, MAIO A D, GALDI C. Statistical analysis of real clutter at different range resolutions[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(3):903-918.
- [8] metrics for remote sensing systems[J]. Opt Eng, 2001, 40(4):574-585.
- [3] LU Rong-li, FAN Xue-wu, LI Ying-cai. Study on synthetically evaluating image quality of aero-cameras[J]. Optical Technique, 2004, 30(4):434-436. (in Chinese)
- [4] ZHAO Gui-jun, CHEN Chang-zheng, 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. (in Chinese)
- [5] JIANG Jing-shan. Space Science and Application[M]. Beijing: Science Press, 2001:38-53. (in Chinese)
- [6] YANG Bing-xin. Study on the SNR of TDI CCD camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2005, 26(2):22-24. (in Chinese)
- [7] XU Xiu-zhen, LI Zi-tian, XUE Li-jun. Analysis and processing of CCD noise[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(4):343-357. (in Chinese)
- [8] ZHANG Hui, YUAN Jia-hu, LIU En-hai. CCD noise effects on position accuracy of star sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5):629-642. (in Chinese)