

模板方法消除 FY-2 辐射计可见杂散光

原育凯^{1,2}, 李欣耀^{1,2}, 裴云天¹, 栾炳辉¹

(1 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:风云二号辐射计的可见光通道图像受到由折镜进入的一级漏射杂散光的影响, 仅仅依靠光机设计已经无法完全消除. 为改善图像质量提出采用图像处理方法消除杂散光. 在光机建模的基础上, 确定出辐射计不同工作状态的直射漏光区域分布, 并变换到图像坐标系. 通过理论计算确定了单像元信杂比, 作为漏光模板能量系数的依据. 以卷积的方法来模拟一级杂散光的叠加过程, 据此原理处理了正午时刻的卫星图像. 结果表明, 图像主观视觉效果明显改善, 检查处理前后的对比度、熵值和 MTF, 发现此消杂过程在改善图像质量的同时不会对有用信号产生副作用.

关键词:杂散光; 消除; 模板; 卷积

中图分类号: P414.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)08-1538-5

0 引言

风云二号(FY-2)是我国自行研制的地球同步轨道自旋稳定气象卫星, 其获取的各通道原始图像质量与国外同类卫星相当. 但就目前其在轨运行情况来看, 其观测图像中存在着较为明显的杂散光, 成为制约其数据量化应用的瓶颈^[1].

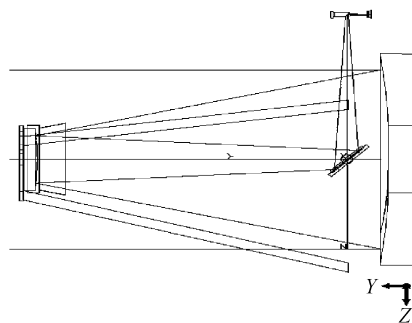
FY-2 多通道扫描辐射计的可见通道杂散光依据其来源, 主要有两类: 一是地球漫射经折镜直接反射漏光形成的一级杂散光, 二是午夜前后由于太阳直射到望远镜筒和次镜支撑结构发生漫射和散射等形成的杂散光^[2-3]. 从杂散光分布范围来看, 云图中的杂散光主要出现在地球圆盘外的冷空间、地球阴影内和太阳的镜面反射点周围.

相对于午夜时分的图像中地球大部分呈现阴影状态而没有过多的量化应用价值, 地球漫射引起的冷空间非零信号分布范围很大, 在西北和西南方向非常醒目, 从计数值来看需要引起足够重视. 而且随着四季更替, 其分布范围和强度也在变化, 明显与太阳直射点的变动有关. 考虑到杂散光的分布呈现低频特性, 很自然地推断出地球圆盘图的内部也存在不可忽略的杂散光分布. 本文通过光机建模确定了直射漏光区的分布, 并变换到图像坐标系, 确定了单元信号杂光比, 以卷积方法模拟一级杂光的叠加过程, 并对正午时刻卫星图像进行处理, 大大改善了图像的视觉效果.

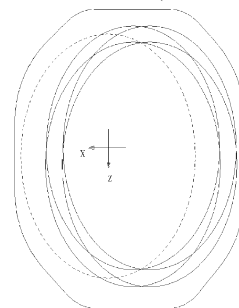
1 漏光模板的生成和坐标变换

扫描辐射计是一个 R-C 结构、南北向步进、东

西向自旋的二维扫描遥感仪器, 由于采用了视场方式进行分光, 在提高光学效率的同时, 带来了折镜处视场扩大而引入杂散光的弊端. 位于卫星坐标系原点处的折镜需要同时容纳所有可见和红外通道的光线, 其光阑设计为该处所有通道光阑的并集而且保留了适当的装配余量如图 1(b), 此处光机设计的不完善引入了直射折镜面的杂散光, 扫描辐射计光机结构如图 1(a).



(a) The structure of VISSR (visible channel only)



(b) Dash circle is the aperture of visible, four solid circles are infrared channels, the outer circle is the aperture of folding mirror

图 1 风云二号扫描辐射计的光机结构图和折镜光阑
Fig. 1 The structure of FY-2 VISSR and aperture of folding mirror

这部分杂散光形成机理清晰而且能量很强, 属于较强的确定性信号, 需要首先考虑处理. 为此在对其光机结构简化和建模的基础上, 使用以光轴指

向为天顶的球面坐标,得出了其不同步进位置的漏光模板如图 2. 卫星的南北步进一共产生 2500 条扫描线,模板在其间的变化非常缓慢,实际使用中为了

减少计算量,根据漏光立体角的变化程度,以 1° 为间隔选取了 21 个模板.

在任一扫描线上,漏光模板并不随仪器的自身

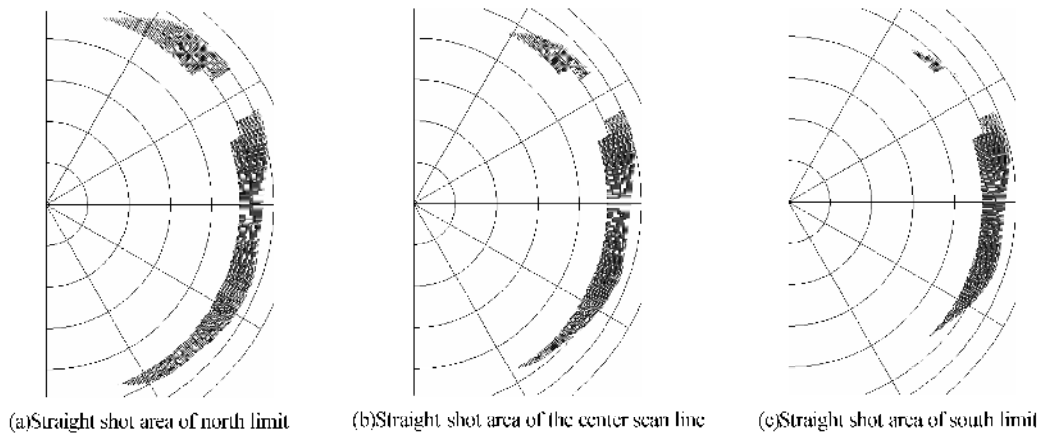


图 2 关键状态的漏光区域
Fig. 2 Straight shot area of some key status

旋转发生变化,但由于其实际作用在云图上,而云图各像素满足以卫星坐标系的 Z 向为天顶的球面坐标系,这里就需要进行不同球面坐标系的变换. 云图上的每行像素对应着相同的天顶角和不同的方位角,每列像素恰恰相反,模板采用的是以光轴指向为天顶的球面坐标,二者的叠加首先要对模板坐标进行天顶角的正交分解,以便可以直接与图像坐标相加减. 设光轴的球面坐标为 (φ_A, θ_A) , 模板上点的相对光轴坐标为 (φ'_T, θ'_T) , 则其绝对坐标 (φ_T, θ_T) 为

$$\begin{cases} \varphi_T = \varphi_A + \tan^{-1}(\tan \varphi'_T \sin \theta'_T) \\ \theta_T = \theta_A + \tan^{-1}(\tan \varphi'_T \cos \theta'_T) \end{cases} \quad (1)$$

φ'_T 约 5.7° , $\theta'_T \in [0, 360^\circ)$, $\varphi_A \in [-10^\circ, +10^\circ]$

事实上,由于成像工作的角度不大, φ'_T 在 5.7° 左右变化,因此这里的差别并不显著,只有在边缘处才略微看到歧变发生.

2 单像元的信杂比

对模板的定量使用首先需要计算单个像元的信杂比,这里定义为地球表面被扫描辐射计以瞬时视场接收的光线,通过主光路到达探测器和通过漏光途径到达探测器的光通量之比,即特定方向的点源透过率. 由于信号光与杂散光在漏射进入后的光路完全相同,仅需要考虑漏射发生前两者光路的差异. 由主、次镜反射进入光路的光能计算需要考虑主光路通光孔径和主次镜光学效率,而杂散光仅仅是来自地面的漫射,需要考虑探测器光敏面积和入射角度.

主光路进入的光通量 Φ_M 为

$$\Phi_M = \frac{L dS_1 \tau}{r^2} dS_2 \quad (2)$$

式中, L 为面积为 dS_1 的发光面元的亮度, τ 为光学

效率, dS_2 为光学系统通光面积, $\frac{dS_1}{r^2}$ 则为瞬时视场.

杂散光的进入途径的计算: 在距离发光面元 dS_1 为 r 处的面元 dS'_2 上形成光通量 Φ_s 为

$$\begin{aligned} \Phi_s &= \frac{L dS_1 \cos \theta_1}{dS'_2} \frac{dS'_2 \cos \theta_2}{r^2} S_s = \\ &= \frac{L dS_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} S_s \end{aligned} \quad (3)$$

式中 θ_1 为发光面元法向与两面元连线的夹角, 当假设卫星是位于球心对该球面成像时, 这里应当取零, θ_2 为杂散光与主光轴夹角, S_s 为探测器光敏面积.

二者之比即为单个像元的信杂比 R_{MS}

$$R_{MS} = \frac{\Phi_M}{\Phi_s} = \frac{L dS_1 \tau dS_2}{r^2} \frac{r^2}{L dS_1 \cos \theta_2 S_s} = \frac{\tau dS_2}{S_s \cos \theta_2} \quad (4)$$

将上述各量带入公式估算杂散光量级, 发现与实际现象存在一定误差, 这与计算中光机结构参量的理想化有关. 因为这对于杂散光的消除是个重要参量, 实际中应当在这个值的基础上, 采用与实测数据进行标定的方法进行修正.

3 对杂散光的模拟和消除

将杂散光的形成过程看作一个图像的退化过程, 则如果系统 H 是一个线性移不变的过程, 则其图像的退化过程在空间域表示为^[4]

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + \eta(x, y) \quad (5)$$

式中, $h(x, y)$ 为退化函数的空间描述, $f(x, y)$ 为真实图像, $g(x, y)$ 为可以获得的图像, $\eta(x, y)$ 为随机噪声. 等价到频域表述为

$$G(u, v) = H(u, v) F(u, v) + N(u, v) \quad (6)$$

式中的大写代表式(5)中各项的傅里叶变换. 对图像复原最简单的方法式直接逆滤波, 使用退化函数

除退化图像的傅里叶变换来计算原始图像的傅里叶变换估计

$$\hat{F}(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)} \quad (7)$$

对杂散光形成过程的模拟是再现这一现象以便采取相应的手段消除的基础. 采用上述建立的定量漏光模板, 对实际图像进行了杂散光的模拟. 首先对云图中特殊情况, 世界时 19 点的图像进行考察, 此时图中的地球仅一个细长的亮边, 信号光和杂散光没有交迭因而便于两者的分离.

手工方法将亮边以外的阴影部分全部涂黑, 作为没有漏射杂散光的真实信号, 然后依据探测器电压量化的非线性关系将数字图像中的离散计数值转换为电压值, 以各采样点的电压值与前述模板进行卷积运算, 得出的结果发现边缘锐利的弧形还无法模拟出来, 可以肯定是漏光模板的点源冲激响应, 注意到饱和点的计数值已经无法反映光能的大小, 以量化曲线带入则该处能量明显偏小, 导致模拟镜面反射点的能量的扩散过程失效. 这里饱和点的电压值可以根据当时的日、地、星三者位置关系, 考虑太阳常量、大气传输路径和探测器响应等参量进行推算, 然而无疑是非常繁琐的, 同样采用前述的实际标

定的方法来确定饱和点的电压值. 根据残余电压值推算之后, 设定适当的饱和电压值, 以此进行卷积即可获得与实际图像几乎完全一致的模拟图像. 将卷积的反运算作用于实际图像就可以实现对真实图像的消除杂散光的估计, 如图 3.

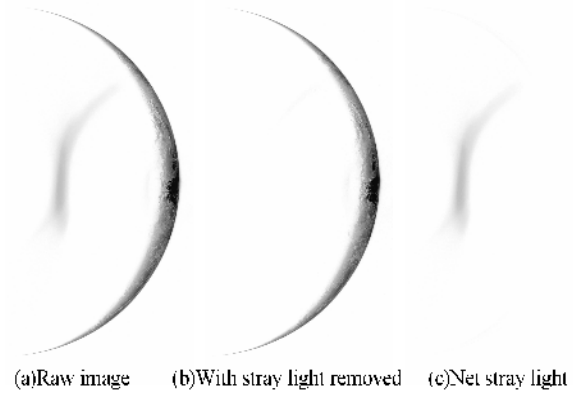


图 3 处理的凌晨时刻图像

Fig. 3 Wee hours image processed

处理可见光正午时刻在不同季节的图像, 注意到在地球以外的冷空间中, 消除的杂散光与原始图中的杂散光分布基本一致, 处理后的图像中, 印度洋海域变得更暗, 其灰度的主观感觉与对称位置的太平洋海域持平, 如图 4.

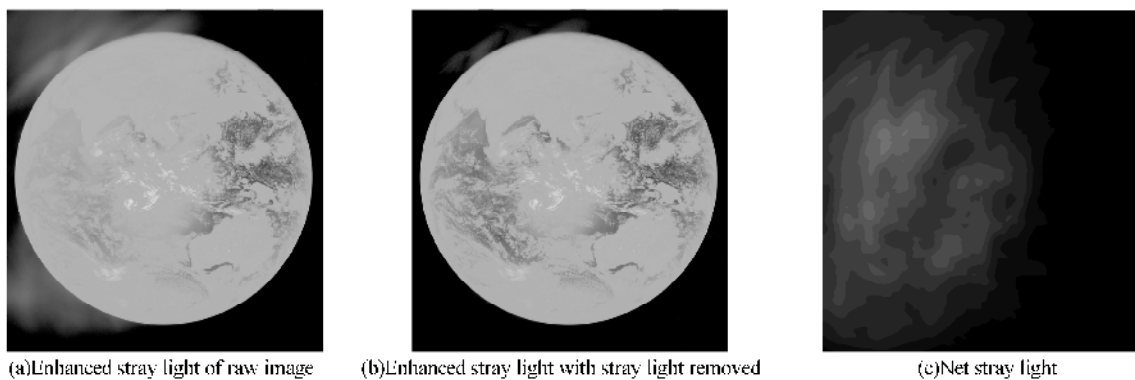


图 4 处理的正午时刻图像

Fig. 4 Noon image processed

4 处理结果评价

由于该卫星可见光通道的定标准确度较低, 暂时无法进行参照国外卫星数据的绝对辐射量的量化数据互定标. 注意图像中的孟加拉湾地区, 其大陆的高反射与附近海洋的低反射形成了自然的高反差, 可采用对比度指标来考察图像质量的改善. 从消杂前后相应区域计数值上看, 亮度都有所减少, 而其对比度却明显增大, 在其他区域也可见类似效果. 对图像整体计算熵值变化, 得出消杂处理后图像质量明显改善, 见表 1.

表 1 消除杂散光前后的熵值变化

	春季	夏季	秋季	冬季
原始图像	6.58	6.37	6.49	6.55
处理后	6.01	6.06	5.98	5.76

采用孟加拉湾的海滨作为刃边函数检查图像的 MTF, 分别考虑了使用计数值和使用电压值两种情况. 使用计数值可以发现, MTF 曲线成比例抬高; 使用电压值的 MTF 则未见明显变化, 这是由于仅去除低频电压分量对图像的调制信息影响非常小, 也表明了消杂过程不会带来信号损失的副作用, 如图 5.

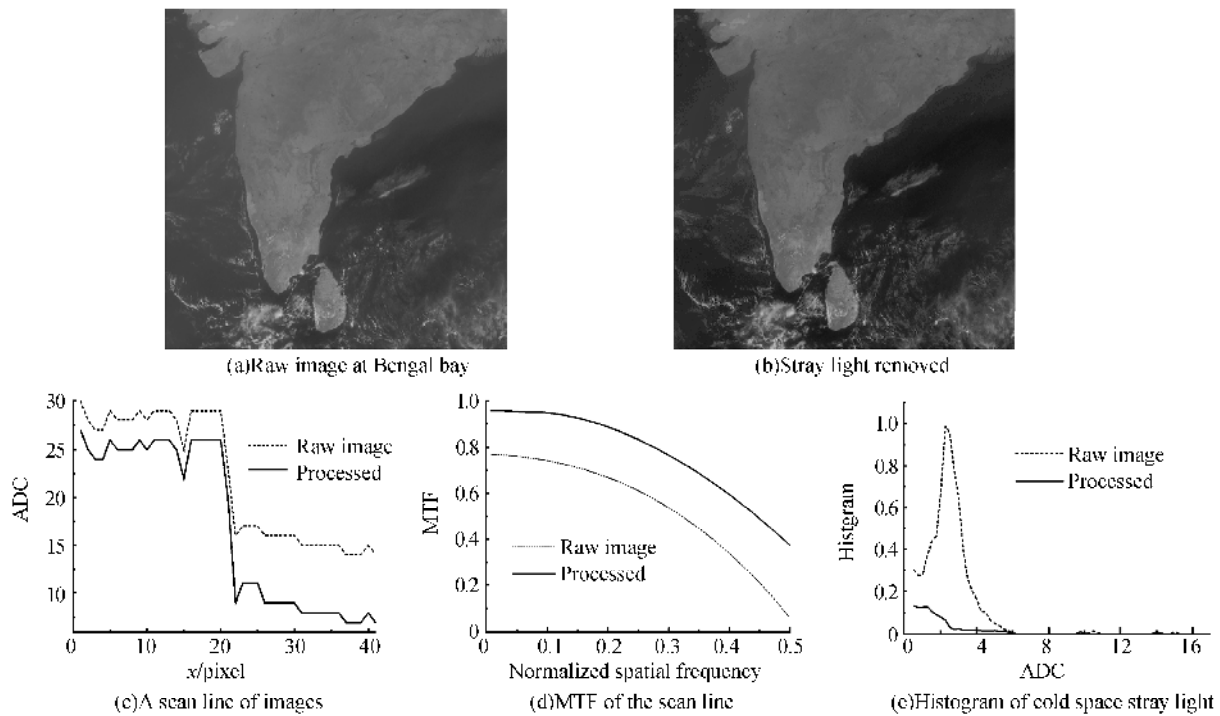


图 5 对处理效果的评价

Fig. 5 The evaluation of processing

注意到目前的消除处理还无法完全消除地球圆盘外的所有杂散光,通过对冷空间的杂散光以直方图进行累加,得出了此消杂光过程可以消除约 89% 的冷空间杂散光,如图 5(e).

5 结论

对于风云二号扫描辐射计的确定性一级漏光,采取确定性的反卷积方法进行处理,得出了较为理想的效果,从直观视觉效果和统计特性方面都得到了明显的改善.

分析残余的杂散光,认为其原因在于模板准确度、光机结构表面的多级漫射、散射或者噪音等因素.此外,卷积过程形成的杂散光大大超出了辐射计总视场,其成像视场以外一定范围内也会有杂散光的分布,这些无法获取的信息对反卷积运算的准确度必然来影响,其次,与地球同步的卫星在工作中跟随着地球的自转,获取全盘图需要 25 min,而这期间太阳高度角的变化和地物目标的漂移也会给云图的处理带来误差.

致谢 作者感谢国家卫星气象中心的郭强博士在卫星数据提供和处理方法方面的帮助和有益探讨.

参考文献

- [1] RONG Zhi-guo, ZHANG Yu-xiang, QIU Kang-mu, *et al.* Radiometric calibration on orbit for FY-2B meteorological satellite's visible channels with the radiometric calibration site of dunhuang[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, **15**(3):266-272.
戎志国,张玉香,邱康睦,等.利用敦煌辐射校正场对 FY-2B 静止气象卫星进行可见光通道的在轨辐射定标[J]. *应用气象学报*, 2004, **15**(3):266-272.
- [2] GUO Qiang, XU Jian-min, ZHANG Wen-jian. Full-field-of-view stray light estimation for FY-2 meteorological satellite based on the high-order statistical eigenvalues [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(6):748-752.
郭强,许建民,张文建.基于高阶统计特征的 FY-2 气象卫星全视场杂散光估计[J]. *光学技术*, 2004, **30**(6):748-752.
- [3] FAN Xue-wu, MA Zhen, CHEN Rong-li, *et al.* Study on stray-light of the three-mirror optical system used in field bias[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):960-963.
樊学武,马臻,陈荣利,等.偏视场用三反射系统的一次杂光问题研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8):960-963.
- [4] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. 2nd ed. RUAN Qiu-qi, RUAN Yu-zhi, *et al.*, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003:175, 207.

Suppressing FY-2 Radiometer Visible Channel Stray Light by Templates

YUAN Yu-kai^{1,2}, LI Xin-yao^{1,2}, PEI Yun-tian¹, LUAN Bing-hui¹

(1 *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Received date: 2006-05-29

Abstract: The visible channel image of FY-2 Radiometer has suffered from straight shot of stray light entered from the folding mirror, which can not be entirely removed by the improve of instrument design. To suppressing this contamination, a digital image processing has been proposed. The pathway of that stray light has been analytically established at any working status based on the structural parameter of this instrument, and then those straight shot region, called templates, have been transformed to the image coordinates. The single pixel signal stray ratio (SSR) has been calculated by theory and then calibrated to suit for the real phenomenon. Convolution of the real image and those templates has been proposed to simulate the contamination of straight shot stray light. So the deconvolution of acquired image and templates at noon has been processed then the visual effect, contrast, entropy and MTF of those processed images have greatly improved while the signal will not be degraded.

Key words: Stray light; Suppressing; Template; Convolution



YUAN Yu-kai was born in 1979. He received the B. S. degree from Hefei University of Technology in 2000. Now he is working towards the Ph. D. degree in Shanghai Institute of Technical Physics on circuit and system. His interested field is remote sensing image processing.