

文章编号:1001-9014(2009)05-0335-07

# FY-2 卫星热红外波段 MTF 在轨评价及其在改进图像质量中的应用

郭强<sup>1</sup>, 李欣耀<sup>2</sup>, 陈桂林<sup>2</sup>

(1. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;  
2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**提出了基于理想斜坡模型及目标延拓空间卷积变换的采样成像系统热红外波段 MTF 在轨评价方法。仿真结果表明,该方法对性能良好的成像系统而言,系统特征 MTF 值的绝对评价误差约 0.05。同时,利用 2006~2008 年间的观测数据,定量评价了 FY-2C 卫星热红外通道的系统 MTF 特性,与卫星发射前地面测试结果基本一致。采用在轨评价得到的系统点源扩展函数(PSF),对 FY-2C 卫星热红外通道图像进行了复原处理,得到了清晰度更高的图像产品,并给出了对典型台风监测结果的改进。传统在轨 MTF 评价方法中采用的理想阶跃模型,可视为理想斜坡模型中参数  $N_{slope}$  为 0 时的特例。因此,该方法同样适用于可见光、近红外波段的在轨 MTF 评价。

**关键词:**调制传递函数;在轨评价;斜坡模型;热红外;图像复原

**中图分类号:** O438.2 **文献标识码:** A

## ON-ORBIT MTF EVALUATION FOR THERMAL INFRARED BAND OF FY-2 SATELLITE AND ITS APPLICATION IN IMAGE QUALITY IMPROVEMENTS

GUO Qiang<sup>1</sup>, LI Xin-Yao<sup>2</sup>, CHEN Gui-Lin<sup>2</sup>

(1. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;  
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Based on an ideal slope-profile model as well as spatial convolution transform with target extension, a MTF approach was proposed to solve on-orbit evaluation for thermal infrared band of sampled imaging system. Simulation results show that the absolute evaluation error of the system MTF at half normalized spatial frequency is about 0.05 for an ordinary system with good performance. Meanwhile, the system MTF characteristics of FY-2C satellite thermal infrared band (IR1) were quantitatively evaluated with observed data from 2006 to 2008, which is consistent with those measured by on ground testing. By using the derived system point spread function (PSF), the images of FY-2C IR1 were recovered with more detailed textures. It improves the monitoring performance for some typical typhoon. The ideal step-profile model used in the traditional on-orbit MTF evaluation can be regarded as a special case of the proposed ideal slope-profile one where the parameter  $N_{slope}$  equals zero. Therefore, the proposed method is also suitable for on-orbit MTF evaluation of visible and near-infrared bands.

**Key words:** modulation transfer function (MTF); on-orbit evaluation; slope-profile model; thermal infrared; image recovery

### 引言

热红外 (Thermal Infrared, TIR, 10~12 $\mu\text{m}$ ) 是光学遥感探测的重要窗区波段,可实现对陆地、海洋以及云等目标的昼夜监测。量化应用需要准确了解遥感仪器在该波段上性能指标的在轨实际情况。调

制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 是定量描述遥感仪器空间特性的重要指标之一,它不仅表征了遥感仪器对观测目标在空间尺度上的分辨能力,而且其中包含的邻近效应将直接影响辐射测量精度、多波段反演等方面的性能<sup>[1,2]</sup>。例如对 GOES-8 卫星成像仪通道 4 (10.2~11.2 $\mu\text{m}$ ) 而言,

收稿日期:2008-10-28,修回日期:2009-03-06

基金项目:国家自然科学基金项目资助(40401040)

作者简介:郭强(1975-),男,福建福州人,研究员,主要研究方向:气象卫星资料预处理和定量遥感。

Received date: 2008-10-28, revised date: 2009-03-06

测试表明:由系统 MTF 引入的亮温探测误差,在观测 300K 目标时最大可达 1.1K<sup>[3]</sup>. 显然,在轨系统 MTF 的实际性能是高精度热红外定量遥感必须考虑的重要因素. 与可见光、近红外波段不同,一方面,热红外波段内观测辐射量主要由目标亮温决定,且在无云条件下,不存在自然的边缘突变目标;另一方面,在多波段共用光学系统条件下,热红外通道的空间分辨率相对较低(一般在  $10^2 \sim 10^3$  m 量级),在地面很难布设有显著对比的特定目标. 因此,针对热红外波段的 MTF 在轨评价,一直是该领域尚未解决的难题.

对于采样成像系统而言,考虑到空间采样中相位的随机特性,由观测图像导出的 MTF (image-derived MTF, IDMTF),可理解为遥感仪器系统的 MTF,即包括光学系统、探测器、电子学等部分传递函数的整体效应,进行观测相位平均后的综合结果,一般用平均系统 MTF (average system MTF, ASMTF) 来表示<sup>[4]</sup>. 从原理上讲,如果已知观测目标及其观测结果,则 ASMTF 可近似由二者傅里叶变换后的比值完全确定. 显然,在轨 MTF 测试的关键是如何选择待观测的目标.

在过去的数十年中,国外在遥感仪器系统 MTF 在轨测试方面开展了大量的研究工作. 按测量目标来分,常见的系统 MTF 在轨测量方法包括:点目标法、边缘目标法及线性目标法等. 点目标法是一种直接的点源扩展函数 (Point-Spread-Function, PSF) 测量方法,它需要在地面布设或寻找与遥感仪器标称瞬时视场角可比的目标,且通常仅适用于地面米量级的高空间分辨率情况. 边缘目标法是一种间接的 PSF 测量方法,该方法要求所选取的边缘目标必须在主平面附近沿扫描或垂直于扫描方向分布,且需要与主平面有一个很小的夹角及足够的边缘长度<sup>[5]</sup>. 线性目标法也是一种间接的 PSF 测量法,在实际应用中,选择与观测波段空间分辨率相当的线状目标为观测对象,并假定观测结果就是 LSF (Line Spread Function),这已在 Landsat-5 TM 的 MTF 在轨测试中得到了应用<sup>[6]</sup>. 在国内,主要采用边缘目标法分别在 CBERS-1、DMC、北京一号、CBERS-2 CCD 相机、FY-2 辐射计等在轨 MTF 测试与图像复原中开展了研究,获得了良好的效果. 其中,郭强还结合理想光学系统轻微离焦模型,定量评价了 FY-2 卫星可见光通道的空间分辨率指标<sup>[7]</sup>.

本文将针对热红外波段实际观测中广泛存在的斜坡边缘,建立目标渐变特性提取及其各向异性的

ASMTF 在轨评价方法. 同时,在数值仿真和验证的基础上,定量评价 FY-2 卫星热红外通道 (10.3 ~ 11.3  $\mu\text{m}$ , IR1) 在轨的 ASMTF 性能,并开展基于维纳滤波技术的图像复原以及在改进图像质量中的应用研究,为提高我国静止轨道热红外探测的定量化应用提供重要的技术支撑.

## 1 热红外波段 MTF 在轨评价方法

### 1.1 采样成像系统基本观测模型及 ASMTF 的二维分解

由 Park 等人<sup>[4]</sup>对采样成像系统观测过程建模结果可知,ASMTF 与平均系统 PSF (average system PSF, ASPSF) 满足如下关系式:

$$\text{ASMTF}(u, v) = |F\{\text{ASPSF}(x, y)\}| \quad (1)$$

其中,  $F\{\cdot\}$  表示傅里叶变换,  $|\cdot|$  表示取模. 显然,二维 ASMTF 可由系统的二维响应函数 (ASPSF) 完全确定. 同时,由线性移不变系统理论可知,ASPSF 与系统的输入 ( $s_{in}$ )、输出 ( $s_{obs}$ ) 以及观测噪声 ( $n_e$ ) 满足如下观测方程

$$\begin{aligned} s_{obs}(x, y) &= s_{in}(x, y) * \text{ASPSF}(x, y) + n_e(x, y) \\ &= s_{in}(x, y) * \text{IDPSF}(x, y) + n_e(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $*$  表示空间卷积, IDPSF 代表由观测图像导出的 PSF,在数值上与 ASPSF 相等. 另一方面,考虑到实际遥感仪器中 IDPSF 的非完全对称特性,并假定其在两个垂直方向上不相关,则二维 IDPSF 可表示为

$$\begin{aligned} \text{IDPSF}(x, y) &= \text{IDPSF}_H(x) \otimes \text{IDPSF}_V(y) \\ &\hat{=} \text{IDLFSF}_H(x) \otimes \text{IDLFSF}_V(y) \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\otimes$  表示矢量积, IDLSF 表示由图像导出的线扩展函数, H 和 V 分别表示水平和垂直方向. 综合式(1)~(3),采样成像系统的在轨 ASMTF 特性可由如下关系式给出

$$\text{ASMTF}_{H/V} = |F\{\text{IDLFSF}_{H/V}\}| \quad (4-1)$$

$$s_{obs, H/V} = s_{in, H/V} * \text{IDLFSF}_{H/V} + (n_e)_{H/V} \quad (4-2)$$

显然,ASMTF 在轨评价的关键是如何从观测图像中获得水平和垂直方向上的 LSF.

### 1.2 热红外观测资料中斜坡目标的过渡特性提取方法

图 1(a) 给出了两类在热红外观测资料中广泛存在的具有典型过渡、渐变特性的观测目标. 考虑到该波段内观测目标亮温的连续变化特性,这里假定图 1(a) 中的观测是由图 1(b) 中两类理想的斜坡模型目标分别通过采样成像系统后得到的结果. 显然,如何从观测目标中提取理想斜坡模型参数,包括渐

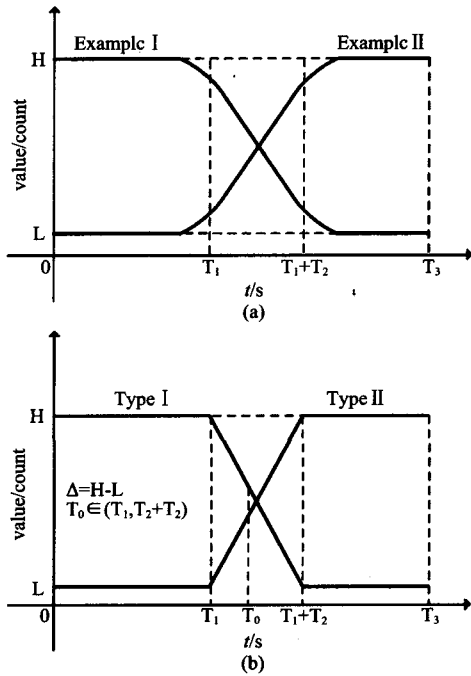


图 1 典型观测目标及其对应的理想斜坡模型 (a) 典型观测目标 (b) 理想斜坡模型

Fig. 1 Typical observed objects and the corresponding ideal slope-profile models (a) typical observed objects (b) ideal slope-profile models

变开始位置( $T_1$ )、渐变区域长度( $T_2 \geq 0$ )以及高、低目标值( $H$ 、 $L$ )是利用式(4)确定热红外波段 ASMTF 的关键问题之一。

不失一般性,这里将在连续时间域内推导由观测信号提取理想斜坡模型参数的基本方法,并将其推广到适用于采样、重构后的观测图像在一维方向上的离散时间域表达形式。为了讨论问题的方便,这里首先给出三类典型信号模型的数学表达式。

单位冲击信号:

$$\delta(t) : \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot dt = 1 \\ \delta(t) = 0 \quad t \neq 0 \end{cases} \quad (5-1)$$

单位阶跃信号:

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}, \text{且当 } t \text{ 为 } 0 \text{ 时, } u(0) \text{ 没有定义} \quad (5-2)$$

单位斜坡信号:

$$R(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & t \geq 0 \end{cases} \quad (5-3)$$

由线性系统理论可知,上述三类信号间存在如下基本关系式:

$$\frac{d}{dt}[R(t)] = u(t) \quad (6-1)$$

$$\frac{d}{dt}[u(t)] = \delta(t) \quad (6-2)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) \cdot f(t) \cdot dt = f(t_0) \quad (6-3)$$

考虑到两类理想斜坡模型(type I 和 type II)有类似的特性,因此,下面仅给出对 type I 模型的推导过程,并最终直接给出适用于两类模型的统一的过渡特性提取方法。图 1(b)中 type I 模型可表示如下:

$$s_{in-slope}(t) = \begin{cases} H & t \in [0, T_1] \\ \frac{\Delta \cdot T_1 + H \cdot T_2 - \Delta \cdot t}{T_2} & t \in [T_1, T_1 + T_2] \\ L & t \in [T_1 + T_2, T_3] \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\Delta = H - L$ 。利用式(5-3),式(7)可改写为:

$$s_{in-slope}(t) = H - \bar{s}_{in-slope}(t) \quad (8-1)$$

$$\bar{s}_{in-slope}(t) = s_1(t) + s_2(t) \quad (8-2)$$

$$\begin{cases} s_1(t) = R(t - T_1) \cdot \frac{\Delta}{T_2} & t \leq T_0 \\ s_2(t) = \Delta - R[(T_1 + T_2) - t] \cdot \frac{\Delta}{T_2} & t > T_0 \end{cases}$$

$$T_0 \in (T_1, T_1 + T_2) \quad (8-3)$$

利用式(6)和式(8),观测目标,即输入信号  $s_{in-slope}$  的一阶和二阶导数分别为:

$$s'_{in-slope} = \frac{\Delta}{T_2} \cdot \{-u[(T_1 + T_2) - t] - u(t - T_1)\} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} s''_{in-slope} &= \frac{d}{dt}[s'_{in-slope}] \\ &= \frac{\Delta}{T_2} \cdot \{\delta[t - (T_1 + T_2)] - \delta(t - T_1)\} \quad (10) \end{aligned}$$

同时,将  $s_{in-slope}$  代入式(4-2)可得

$$s_{obs-slope}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{in-slope}(t - \tau) \cdot \text{IDL SF}_{H/V}(\tau) \cdot d\tau + n_e(t) \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可以得到  $s_{obs-slope}$  的二阶导数表达式为

$$\begin{aligned} s''_{obs-slope}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} s''_{in-slope}(t - \tau) \cdot \text{IDL SF}_{H/V}(\tau) \cdot d\tau + n''_e(t) \\ &= \frac{\Delta}{T_2} \cdot \{\text{IDL SF}_{H/V}[t - (T_1 + T_2)] \\ &\quad - \text{IDL SF}_{H/V}[t - T_1]\} + n''_e(t) \quad (12) \end{aligned}$$

这里假定观测噪声满足加性零均值高斯特性,且标准均方根值为  $\sigma_n$ ,这里考虑  $n''_e(t)$  小于其最大值

$(n_e'')_{\max}$  的概率满足

$$P[|n_e''(t)| \leq (n_e'')_{\max}] = 99.9\% \quad ,$$

即几乎等效于

$$P[|n_e(t)| > (n_e)_{\max}] = (4 \times 0.1\%)^{\frac{1}{3}} = 15.87\% \quad , \quad (13-1)$$

其中,  $P[\cdot]$  表示随机事件概率, 则由标准正态分布表可得

$$\begin{cases} s''_{obs-slope}|_{\max} = s''_{obs-slope}(t_{\max}) \approx \frac{\Delta \cdot \text{IDLFSF}_{H/V}|_{\max}}{\mathbf{T}_2} \\ s''_{obs-slope}|_{\min} = s''_{obs-slope}(t_{\min}) \approx -\frac{\Delta \cdot \text{IDLFSF}_{H/V}|_{\max}}{\mathbf{T}_2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t_{\max} = \mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 \\ t_{\min} = \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{T}_2 = t_{\max} - t_{\min} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)给出了 type I 型理想斜坡模型中两个重要参数  $\mathbf{T}_1$  和  $\mathbf{T}_2$  的确定方法, 这里综合考虑两类模型的情况, 则由  $s''_{obs-slope}$  得到的  $\mathbf{T}_1$  和  $\mathbf{T}_2$  统一表达式为:

$$\begin{cases} \mathbf{T}_1 = \min(t_{\max}, t_{\min}) \\ \mathbf{T}_2 = |t_{\max} - t_{\min}| \end{cases} \quad (16)$$

此外, 对于模型中的另外两个参数  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{L}$  的确定相对较为简单, 可选择高端或低端目标区间内观测值变化不大(如标准偏差接近于系统噪声方差的情况)的区间平均值来代替, 具体过程这里不再赘述. 进一步, 由于实际过程中观测信号都是经离散采样后的数据, 这里将用离散时间域内的前向差分来代替连续时间域内对变量  $x(t)$  的求导过程, 即

$$\frac{d}{dt}[x(t)] \rightarrow \Delta x(n) = x(n+1) - x(n) \quad , \quad (17)$$

则理想斜坡模型中过渡区域采样点数 ( $\mathbf{N}_{slope}$ ) 和过渡区域开始位置 ( $\mathbf{P}_{slope}$ ) 可由式(16)推广得到:

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{slope} = |n_{\max} - n_{\min}| - 1 \\ \mathbf{P}_{slope} = \min\{n_{\max}, n_{\min}\} + 2 \end{cases} \quad , \quad (18)$$

其中,  $n_{\max}$  和  $n_{\min}$  分别代表观测信号二阶前向差分最大、最小值对应的位置.

### 1.3 基于目标延拓和空间卷积变换的一维 IDLSF 估计方法

$$\begin{bmatrix} s_{obs-slope}(0) \\ \vdots \\ s_{obs-slope}(i) \\ \vdots \\ s_{obs-slope}(n_t - 1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{in-est}(\mathbf{D}) & \cdots & s_{in-est}(0) \\ \vdots & & \vdots \\ s_{in-est}(i + \mathbf{D}) & \cdots & s_{in-est}(i) \\ \vdots & & \vdots \\ s_{in-est}(n_t - 1 + \mathbf{D}) & \cdots & s_{in-est}(n_t - 1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{-\mathbf{D}} \\ \vdots \\ c_0 \\ \vdots \\ c_{\mathbf{D}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_e(0) \\ \vdots \\ n_e(i) \\ \vdots \\ n_e(n_t - 1) \end{bmatrix} \quad , \quad (20-1)$$

$$\text{IDLFSF}_{H/V} = [c_{-\mathbf{D}} \cdots c_0 \cdots c_{\mathbf{D}}]^T \quad , \quad (20-2)$$

其中,  $[\cdot]^T$  表示矩阵转置,  $n_t$  代表总采样点数. 当忽略式(20)中的噪声影响时, 在一般情况下  $n_t$  将大于  $\text{IDLFSF}_{H/V}$  的系数个数 ( $2\mathbf{D} + 1$ ), 则式(20)可视为一个包含未知矢量  $\text{IDLFSF}_{H/V}$  的超定线性方程组, 可

$$(n_e)_{\max} \approx 1.41\sigma_n \text{ 且 } (n_e'')_{\max} \cong 4 \cdot (n_e)_{\max} = 5.64\sigma_n \quad . \quad (13-2)$$

对比式(12)、式(13), 如果观测噪声相对于目标变化可以忽略, 即

$$\frac{\Delta}{\mathbf{T}_2} \gg (n_e')_{\max} \quad , \quad (14)$$

则  $s''_{obs-slope}$  的最大、最小值及其对应的位置可表示为

由上述过渡特性提取方法可知, 实际观测信号及得到的理想斜坡目标估计值, 在一维空间内的采样点个数是相同的. 然而, 由式(4-2)可得, 满足严格空间卷积关系的  $s_{obs,H/V}$  和  $s_{in,H/V}$  在空间尺寸上是不一致的, 因而无法进一步准确估计  $\text{IDLFSF}_{H/V}$ . 这里考虑第  $i$  个位置上的观测目标, 则由式(4-2)所示的空间卷积关系可知, 当前观测值等于介于  $[i - \mathbf{D}, i + \mathbf{D}]$  位置上所有目标的加权和, 加权系数等于依次在  $\{\mathbf{D}, \mathbf{D} - 1, \dots, 0, \dots, -\mathbf{D} + 1, -\mathbf{D}\}$  位置的  $\text{IDLFSF}_{H/V}$  值, 其中,  $\mathbf{D}$  是  $\text{IDLFSF}_{H/V}$  的半径. 因此, 可将  $s_{in-est}$  分别在左、右方向上进行延拓, 延拓的采样点数为  $\mathbf{D}$ , 延拓值取  $\mathbf{H}$  或  $\mathbf{L}$ . 此外, 既然  $s_{in-est}$ ,  $s_{obs-slope}$  和  $\text{IDLFSF}_{H/V}$  在空间尺寸上不一致, 当采用经典的傅里叶分析方法时需要将它们分别进行延拓, 并将延拓区域填充 0, 这在理论上是不够精确的. 相应地, 一种精确的可行方法是将式(4-2)所示的卷积关系改写成矢量点积的形式, 即对于第  $i$  个位置上的观测目标有

$$s_{obs-slope}(i) = \sum_{j=-\mathbf{D}}^{\mathbf{D}} \text{IDLFSF}_{H/V}(j) \cdot s_{in-est}(i-j) \quad . \quad (19)$$

成立, 则对于所有观测数据, 将式(19)代入式(4-2)可得:

$$\begin{bmatrix} s_{obs-slope}(-\mathbf{D}) \\ \vdots \\ s_{obs-slope}(i - \mathbf{D}) \\ \vdots \\ s_{obs-slope}(n_t - 1 - \mathbf{D}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{-\mathbf{D}} \\ \vdots \\ c_0 \\ \vdots \\ c_{\mathbf{D}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_e(0) \\ \vdots \\ n_e(i) \\ \vdots \\ n_e(n_t - 1) \end{bmatrix} \quad , \quad (20-1)$$

用基于奇异值分解的广义逆方法来求解.

## 2 仿真与验证

为了验证上述  $\text{ASMTF}_{H/V}$  估计方法的有效性, 这里选择不同斜坡信号类型、 $\text{ASMTF}_{0.5}$ 、 $\mathbf{N}_{slope}$  以及

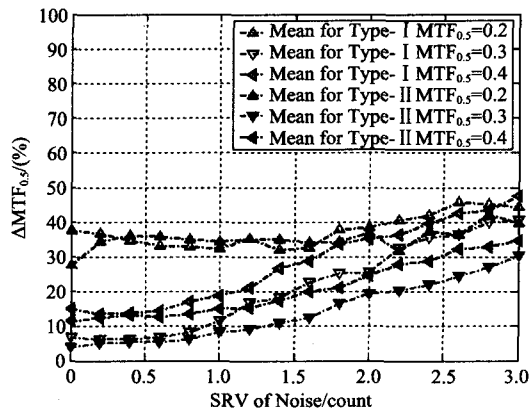


图2 不同信号类型和  $MTF_{0.5}$  条件下  $\Delta MTF_{0.5}$  随噪声方差的变化

Fig. 2  $\Delta MTF_{0.5}$  vs. SRV of noise at the condition of different signal types and  $MTF_{0.5}$

表 1 仿真样本的主要条件列表

Table 1 Main conditions list for simulated samples

斜坡信号类型	Type I			Type II			
	(H=300, L=100, Δ=200)			(H=600, L=200, Δ=400)			
$MTF_{0.5}$	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	
$N_{slope}$	1	3	1	3	2	4	2
噪声标准方差	对不同的斜坡信号类型, 特征 MTF 值以及斜坡点个数分别在观测信号中叠加标准差为 {0.0, 0.2, ..., 2.8, 3.0} 的噪声						
每组条件下样本数(组)	100						
总样本数(组)	19200						

不同观测噪声水平条件下的仿真数据共计 19200 组, 仿真条件如表 1 所示, 并通过比较  $ASMTF_{0.5}$  估计值与预置仿真值间的相对误差, 即

$$\Delta MTF_{0.5} = \frac{|ASMTF_{0.5, def} - ASMTF_{0.5, est}|}{ASMTF_{0.5, def}} \times 100\% \quad (21)$$

来定量评价估计结果的性能。

由图 2、图 3 的仿真统计结果可以看出: 首先, 随着噪声水平的提高,  $\Delta MTF_{0.5}$  逐步增加, 但即使是在噪声方差达到 3 个计数值时, 相对误差仍在 50% 以下; 其次, 在相同加性噪声条件下, 斜坡目标的变化率(即  $\Delta/T_2$ ) 越大,  $\Delta MTF_{0.5}$  越小, 其主要原因在于式 (14) 条件得到更好的满足; 最后, 在系统  $MTF_{0.5}$  较小时(如 0.2),  $\Delta MTF_{0.5}$  较大, 介于 30% ~ 40%; 同时, 当系统  $MTF_{0.5}$  较高(如 0.3、0.4) 且噪声水平较低时,  $\Delta MTF_{0.5}$  较小, 小于 20%, 此时等效的  $ASMTF$  绝对估计误差介于 0.05 ~ 0.08, 性能良好。

### 3 在轨评价结果与分析

FY-2 是我国自行研制的第一代地球同步轨道

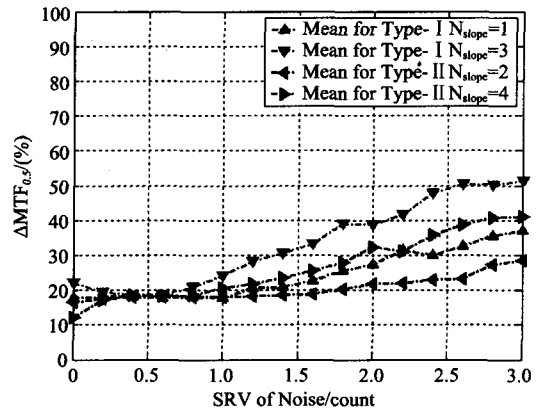


图3 不同信号类型和  $N_{slope}$  条件下  $\Delta MTF_{0.5}$  随噪声方差的变化

Fig. 3  $\Delta MTF_{0.5}$  vs. SRV of noise at the condition of different signal types and  $N_{slope}$

气象卫星。目前, 有 FY-2C/D 两颗卫星在轨业务运行, 星载的可见红外扫描辐射计 (VISSR) 具有覆盖可见光到热红外波段的 5 通道探测能力, 这其中就包括 10.3 ~ 11.3  $\mu\text{m}$  的热红外通道 (IR1)。考虑到 FY-2C 卫星定点于东经 105° 赤道上空, 经分析, 可选择每年八月间 08:00 (UTC) 时次西亚红海地区的无云海陆交界区域为目标, 进行在轨  $ASMTF$  评价分析。

这里选择 FY-2C 卫星 IR1 通道 08:00 (UTC) 时次 2006 ~ 2008 每年 8 月期间的部分可供分析的图像, 得到了图 4 所示的在轨评价结果。同时, 为了减小观测噪声对评价结果的影响, 分析结果取了 3 年的平均值。此外, 将在轨评价得到的  $IDMTF_{H/V}$  与部分卫星发射前地面测试结果进行了比对, 如表 2 所示。显然, 在水平方向(即扫描方向)上, 地面测试的结果略大于在轨评价结果, 这主要是由采样成像系统随机相位平滑效应所致。同时, 虽然探测器尺寸在两个方向上基本相当, 但水平方向的特征传递函数值却比垂直方向高 0.04, 约 10%。这其中的原因可定性解释如下: 由于 FY-2C IR1 通道单元探测器的引线从垂直扫描方向引出, 电极外包层的存在使得该方向上的实际光敏元尺寸明显减小, 这必然导致该方向上传递函数的下降。从这个意义上讲, 上述在轨测试结果的合理性得到了证实。

### 4 图像质量改进应用

式 (19) 给出的描述采样成像系统输入、输出特性的离散卷积式表明: 当前观测值等于来自当前观测视场内目标及其若干临近目标辐射的加权平

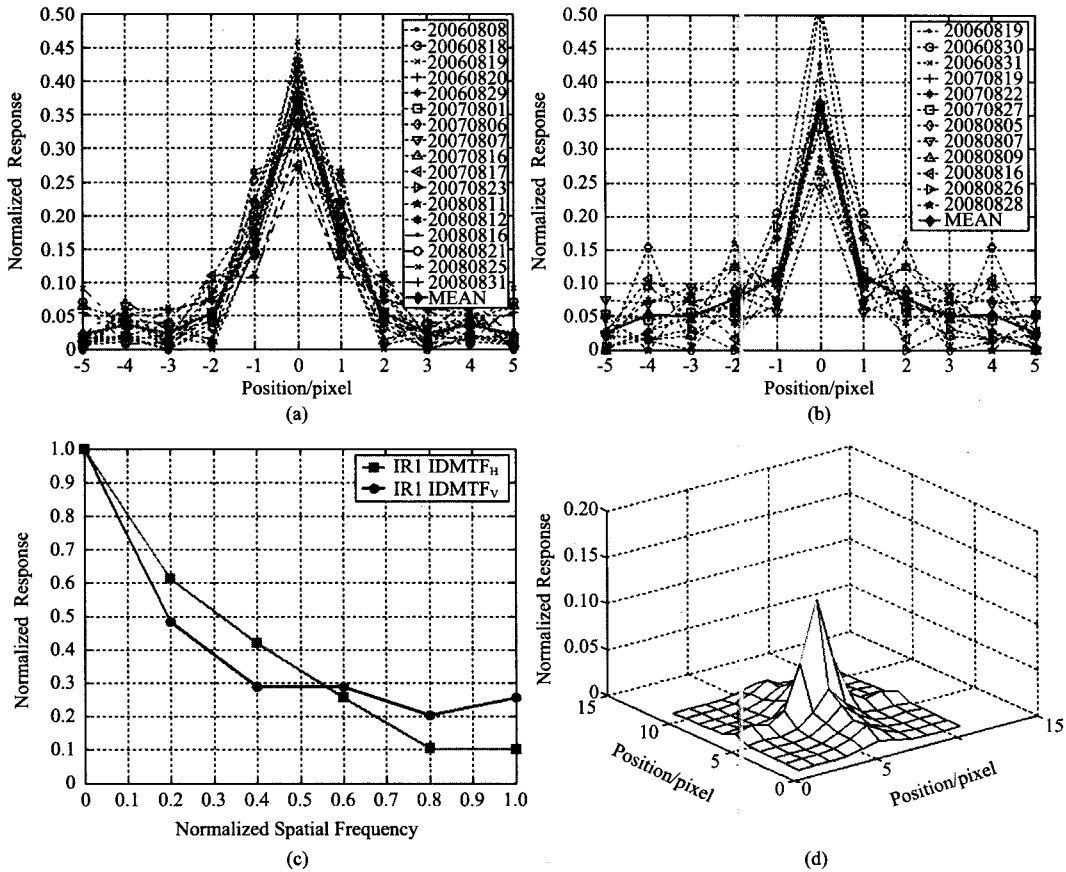


图4 2006~2008年FY-2C IR1通道IDLSF<sub>H/V</sub>、IDMTF<sub>H/V</sub>以及二维合成的IDPSF分析结果 (a)IDLSF<sub>H</sub> (b)IDLSF<sub>V</sub> (c)IDMTF<sub>H/V</sub> (d)二维合成的IDPSF

Fig.4 IDLSF<sub>H/V</sub>, IDMTF<sub>H/V</sub> and composed 2-D IDPSF for FY-2C IR1 band from 2006 to 2008 (a)IDLSF<sub>H</sub> (b)IDLSF<sub>V</sub> (c)IDMTF<sub>H/V</sub> (d) composed 2-D IDPSF

表2 FY-2C IR1通道MTF在轨测试与地面发射前相关测试结果的对比

Table 2 MTF contrast between on-orbit evaluation and on-ground testing for FY-2C IR1 band

	地面测试		在轨评价
	SMTF <sub>0.5</sub>	探测器尺寸	ASMTF <sub>0.5</sub>
水平方向	0.34 *	153 μrad	0.33
垂直方向	—	138 μrad	0.29

\*:电子学传递函数在0.5归一化频率处取0.707;—:无地面测试结果.

均<sup>[8]</sup>.从信号处理的角度看,该加权过程可视为一个典型的低通滤波器,这必然引起观测图像中高频信息的丢失,即图像变得模糊<sup>[9]</sup>.为此,这里采用经典Wiener滤波方法来实现对原始观测图像的复原,表达式如下:

$$S_{in}(\mu, v) = \frac{\overline{\text{IDPSF}}^*(\mu, v) \cdot S_{obs}(\mu, v)}{|\overline{\text{IDPSF}}(\mu, v)|^2 + \frac{P_{nn}(\mu, v)}{P_{ss}(\mu, v)}}$$

$$\hat{=} \frac{\overline{\text{IDPSF}}^*(\mu, v) \cdot S_{obs}(\mu, v)}{|\overline{\text{IDPSF}}(\mu, v)|^2 + \gamma} \quad (22)$$

其中,  $\overline{\text{IDPSF}}$ 、 $S_{in}$ 和 $S_{obs}$ 分别为IDPSF、 $s_{in}$ 以及 $s_{obs}$ 的傅里叶变换,  $P_{nn}$ 和 $P_{ss}$ 分别为噪声和信号的功率谱密度,且它们的比值定义为 $\gamma$ .在具体实现过程中,为了减小由边界截断引入的虚假信号,可以采用周期延拓的镜像填充技术来实现<sup>[10]</sup>.

图5给出了针对2008年7月27日02:00(UTC)“凤凰”台风登陆前, FY-2C IR1通道原始与复原后图像以及临近时次FY-3A卫星中分辨率光谱成像仪(MERSI)250m反射通道观测图像的对比.显然,相对于FY-2C IR1通道原始图像,复原后的图像在表征观测目标细节上有明显改善,台风眼轮廓更加清晰,这将有助于台风强度的确定和路径预报.此外,复原后图5(b)中箭头指向的3个低温云区在原始图像中无明显显示,但在高分辨率的MERSI可

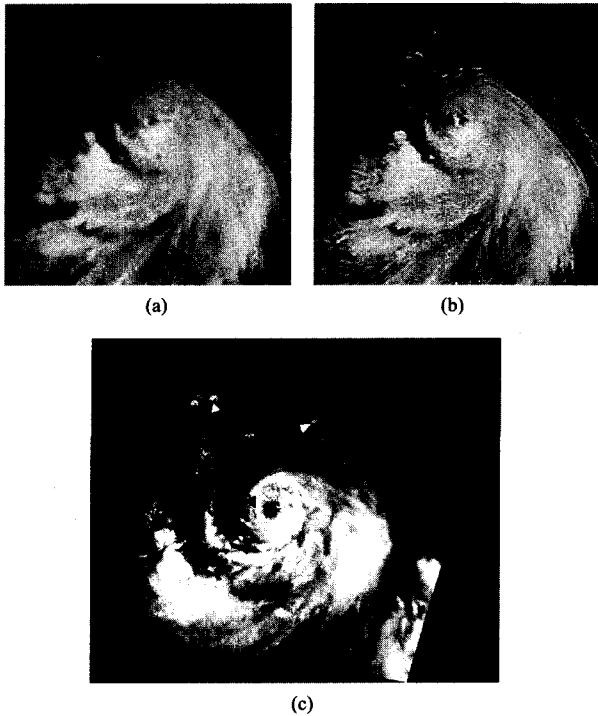


图5 2008年7月27日“凤凰”台风的FY-2C IR1通道原始和复原后图像与FY-3A卫星MERSI 250m反射通道观测图像对比 (a)FY-2C IR1原始“凤凰”台风观测图 (b)FY-2C IR1复原后“凤凰”台风观测图 (c)临近时次FY-3A MERSI 250m反射通道“凤凰”台风监视图

Fig.5 Contrast among raw image, compensated image of FY-2C IR1 band and reflection band of FY-3A MERSI with spatial resolution of 250m for Phoenix typhoon at July 27, 2008 (a) raw image of FY-2C IR1 (b) compensated image of FY-2C IR1 (c) image of FY-3A reflection band with spatial resolution of 250m

见光图像中却以高亮度形式清晰可见,这表明复原结果与实际观测是基本吻合的。

## 5 结论

本文结合FY-2卫星热红外波段图像质量在轨评价需求,提出了基于理想斜坡目标模型的采样成像系统ASMTF在轨评价方法。仿真结果表明,该方法对性能良好的系统而言,即系统特征MTF值介于0.3~0.4且观测噪声方差约1个计数值时,ASMTF的绝对评价误差约0.05。同时,利用2006~2008年间的观测数据,定量评价了FY-2C卫星IR1通道的ASMTF指标,结果表明与卫星发射前地面测试结果

基本一致。此外,利用在轨评价得到的ASPSF,对FY-2C卫星IR1通道图像进行了复原处理,得到了清晰度更高的图像产品,并给出了对典型台风监测结果的改进。传统在轨MTF评价方法中采用的理想阶跃模型,可视理想斜坡模型中参数 $N_{slope}$ 为0时的特例。因此,该方法同样适用于可见光、近红外波段的在轨MTF评价。

**致谢** 本文得到了国家卫星气象中心许健民院士、张志清研究员、赵凤生研究员等专家的大力协助与支持,在这里一并表示感谢。

## REFERENCES

- [1] Du H, Voss K J. Effects of point-spread function on calibration and radiometric accuracy of CCD camera[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(3): 665—670.
- [2] Ma J W, Li X W, Chen X, et al. Target adjacency effect estimation using ground spectrum measurement and Landsat-5 satellite data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(3): 729—735.
- [3] Wack E C, Baum J E. Radiometric error in GOES-8 Imager data due to sensor MTF[C]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3439: 155—163.
- [4] Park S K, Schowengerdt R, Kaczynski M A. Modulation-transfer-function analysis for sampled image systems[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(15): 2572—2582.
- [5] Shea J J. Lunar limb knife-edge optical transfer function measurements[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1999, 8(2): 196—208.
- [6] Schowengerdt R A, Archwamety C, Wrigley R C. Landsat thematic mapper image-derived MTF[J]. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1985, 51(9): 1395—1406.
- [7] GUO Qiang. Study on validation method of visible imagery spatial resolution of imager on geostationary platform[J]. *Chinese Optics Letter*, 2006, 4(7): 389—392.
- [8] YANG Gui-Jun, LIU Qin-Huo, LIU Qiang, et al. Adjacency effect analysis in imaging simulation of high-resolution mid-infrared (3~5 $\mu$ m) remote sensing[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(杨贵军, 柳钦火, 刘强, 等. 高分辨率中红外遥感(3~5 $\mu$ m)成像模拟中临近效应分析. *红外与毫米波学报*), 2008, 27(3): 233—240.
- [9] SUI Xiu-Bao, CHEN Qian, LU Hong-Hong. Research on improving spatial resolution of infrared image[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(隋修宝, 陈钱, 陆红红. 红外图像空间分辨率提高方法研究. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(5): 377—379.
- [10] Aghdasi F, Ward R K. Reduction of boundary artifacts in image restoration[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(4): 611—618.