

# 在轨光学遥感仪器探测灵敏度的建模分析与应用\*

郭强<sup>1,2</sup>, 杨昌军<sup>2,3</sup>, 林维夏<sup>2</sup>

(1 中国气象局 国家遥感卫星辐射测量与定标重点开放实验室, 北京 100081)

(2 国家卫星气象中心, 北京 100081)

(3 南京信息工程大学, 南京 210044)

**摘 要:**在分析光学遥感仪器探测信息中主要噪音源的基础上,提出了一种改进空间结构函数分析的仪器探测灵敏度在轨评价方法,包括:基于多项式递推分解的整体噪音估计模型,以及减小系统误差及修正模数转换噪音影响等基本技术途径.仿真结果证实,该改进算法的噪音估计准确度优于传统的高斯估计和基于外推的结构函数分析方法.针对实际观测数据,在去除模数转换噪音影响后,仪器噪音等效温度差指标的在轨评价准确度可达 $\pm 0.05$  K.该评价方法已在 FY-2D 静止气象卫星在轨测试中得到成功应用.

**关键词:**探测灵敏度;在轨分析;噪音估计;多项式递推分解

**中图分类号:** P407.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)07-1378-6

## 0 引言

光学遥感仪器的探测灵敏度可用两种不同的形式来表示:对于可见光和短波红外通道而言,一般采用信噪比(SNR);而对于中波及长波红外通道而言,则使用噪音等效温度差(NE $\Delta$ T)来描述<sup>[1-5]</sup>.在实际应用中,探测灵敏度被认为是影响观测资料地面定量化应用性能的重要因素之一,因而在卫星发射后的在轨测试中需要对其进行精确的在轨评价.很显然,准确的噪音评估是探测灵敏度分析过程中的主要内容.在通常情况下,噪音可视为一种随机的持续扰动,它会在一定程度上降低信号的清晰度,且对于成像型光学遥感仪器而言,整体噪音的贡献来自于热效应噪音、探测器暗电流、量化噪音以及传输噪音等,而他们在统计意义上是满足近似叠加特性的<sup>[6-8]</sup>.

在过去的数十年内,许多研究人员开始关注如何从获取的图像数据中得到对噪音的有效估计. Meer 等人利用 1~4 阶中心矩得到了对白噪音的盲协方差估计,但该方法在分析图像具有较多细节的情况下,性能急剧恶化<sup>[1]</sup>. Cornrer 等人提出了一种可估计遥感图像中噪音水平的模板卷积技术<sup>[2]</sup>.由于该方法采用了诸如 Sobel 边缘检测以及 Laplacian 算子等经典数据模板,因而无法得到实际应用中噪音精确的统计特性,这也许正是该算法结果会随分析图像尺寸改变而变化的原因之一.需要指出的是,上述两种方法仅仅分析了噪音在能量域的分布特性,很显然,在精确评价的前提下,噪音空

间分布特性是需要给予足够关注的重要环节. Hillger 等人给出了空间结构函数(Spatial-Structure Function, SSF)分析方法的基本原理及其在卫星红外垂直探测数据噪音估计中的实际应用<sup>[3-4]</sup>.遗憾的是,该方法对白噪音的均方根反演结果将随拟合阶数的不同而出现剧烈变化.分析表明,该现象主要是由于将含有观测噪音的结构函数值外推至并无确切定义的“零距离”位置所致,这在很大程度上限制了上述分析方法的应用范围.

本文在分析光学遥感仪器探测信息中主要噪音源的基础上,提出了一种改进空间结构函数(Improved Spatial-Structure Function, ISSF)分析的仪器探测灵敏度在轨评价方法,包括:基于多项式递推分解的整体噪音估计方法,以及减小系统误差及修正模数转换噪音影响等方面的基本技术途径.仿真结果证实,该改进算法的噪音估计准确度优于传统的高斯估计和基于外推的结构函数分析方法.此外,针对实际观测数据,在去除模数转换噪音影响后,仪器噪音等效温度差指标的在轨评价准确度可达 $\pm 0.05$  K.该评价方法已经在 FY-2D 静止气象卫星在轨测试中得到成功应用.

## 1 探测灵敏度评价数学模型

### 1.1 含有噪音的基本观测方程建立

在轨光学仪器所获取的图像中整体噪音由如下五个部分组成:1)光学系统噪音,主要来自于背景的杂散辐射;2)探测器阵列噪音,主要由探测器的暗电流和热噪音构成;3)模拟放大器噪音,主要由电子器件的热噪音和散粒噪音组成;4)星载处理单元噪音,主要由 ADC 噪音、热噪音及散粒噪音组成;5)传输信道噪音,该类噪音近似服从高斯或者瑞利

\*国家自然科学基金(40401040)和中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室开放研究基金(A0716)资助  
Tel:010-68406074 Email:qiang\_g@nsmc.cma.gov.cn  
收稿日期:2007-04-10

分布.

在实际应用中,影响探测灵敏度的噪音仅仅来自于上述噪音源的前三项,且传输信道噪音可以通过数字化的编码和解码技术得到很好抑制.因此,当需要精确评价在轨光学仪器探测灵敏度时,图像整体噪音中的 ADC 噪音影响必须被有效去除.考虑到这里分析的光学遥感仪器噪音满足叠加特性,则对于一幅数字化后的图像,第  $i$  行、第  $j$  列的像素可表示为

$$\hat{S}(i,j) = S(i,j) + n_a(i,j) \quad (1)$$

式中,  $\hat{S}(i,j)$  是用计数值表示的实际目标测量值,  $S(i,j)$  是真实目标信号,  $n_a(i,j)$  是一个加性随机噪音过程.

## 1.2 基于外推方法的空间结构函数分析方法及其局限性

为了直接将 SSF 方法用于由在轨光学仪器测量数据构成的图像中噪音分析问题,SSF 可用相隔一定距离的所有可能观测数据的平均值,来代替固定位置上不同观测时间数据的平均值.需要说明的是,这一替代过程的前提是分析区域的均值必须稳定,且不随分析区域的大小而改变.因此,由真实目标信号构成的 SSF 可表示为<sup>[4]</sup>

$$\text{SSF}(\rho) = \frac{\sum_{|r_i - r_j| = \rho} [S(r_i) - S(r_j)]^2}{N} \quad (2)$$

式中,  $r_i$  和  $r_j$  代表两个不同的观测位置,二者的距离为  $\rho$ ,且这里的求和过程并不考虑两个观测位置间相对指向.在假定观测目标与噪音不相关的前提下,可进一步得到 SSF 与图像中噪音均方值(即功率)的定量关系

$$\hat{\text{SSF}}(\rho) = \text{SSF}(\rho) + 2\sigma^2 \quad (3)$$

式中,  $\hat{\text{SSF}}(\rho)$  是由实际观测数据得到的 SSF 值,  $\sigma^2$  则是本文所要求解的整体噪音均方值. Curran 在假定观测目标高度自相关的前提下,对式(3)取极限后得到噪音估计关系式<sup>[5]</sup>

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 0} \hat{\text{SSF}}(\rho) \approx \frac{1}{2} \cdot \hat{\text{SSF}}(0) \quad (4)$$

式(4)中,  $\hat{\text{SSF}}(0)$  为通过对  $\hat{\text{SSF}}(1) \cdots \hat{\text{SSF}}(\rho_{\max})$  序列进行拟合并外推得到“零距离”位置,即  $\rho=0$  时的 SSF 值.需要指出的是,上述分析方法存在两个方面的局限性:一方面,由于 SSF 表征了观测信息在不同空间位置上的相关特性,而“零位置”已无该特性可言.虽然这在数学上是近似成立的,但物理意义并不明确;另一方面,式(4)的近似过程掩盖了目标自身变化对最终噪音估计准确度的影响,且随不

同拟合多项式的选取将产生不同的估计结果,不利于实际业务应用.

## 1.3 基于多项式递推分解的改进空间结构函数噪音估计模型

由式(3)的基本关系式可知,对于任意给定的空间距离  $\rho_0, 1 \leq \rho_0 \leq \rho_{\max}$ ,显然,  $\hat{\text{SSF}}(\rho_0)$  是可以计算获得的,因此,如果用  $\hat{\text{SSF}}(1) \cdots \hat{\text{SSF}}(\rho_{\max})$  序列信息来估计  $\text{SSF}(\rho_0)$ ,则可求得整体噪音方差  $\sigma^2$ .为此,这里假定由真实目标信息构成的  $\text{SSF}(\rho)$ ,在包含  $\rho_0$  的开区间  $(a,b)$  内有  $(L+1)$  阶导数,则  $\text{SSF}(\rho)$  的泰勒展开式可表示为

$$\begin{aligned} \text{SSF}(\rho) = & \text{SSF}(\rho_0) + \text{SSF}'(\rho_0)(\rho - \rho_0) + \\ & \frac{\text{SSF}''(\rho_0)}{2!}(\rho - \rho_0)^2 + \cdots + \frac{\text{SSF}^{(L)}(\rho_0)}{L!} \cdot \\ & (\rho - \rho_0)^L + R_L(\rho) \end{aligned} \quad (5)$$

显然,当假定式(5)中拉格朗日型余项  $R_L(\rho)$  近似为零时,则可简化为

$$\begin{aligned} \text{SSF}(\rho) = & \text{SSF}(\rho_0) + \sum_{k=1}^L \frac{1}{k!} [\text{SSF}^{(k)}(\rho_0)] \cdot \\ & (\rho - \rho_0)^k \end{aligned} \quad (6)$$

不失一般性,这里令  $\rho_0 = \rho - 1$ ,且  $\rho \geq 2$ ,则由式(6)可得

$$\begin{cases} \text{SSF}(\rho) = \text{SSF}(\rho - 1) + \sum_{k=1}^L \frac{1}{k!} \text{SSF}^{(k)}(\rho - 1) \\ \text{SSF}(\rho - 1) = \text{SSF}(\rho - 2) + \sum_{k=1}^L \frac{1}{k!} \text{SSF}^{(k)}(\rho - 2) \\ \vdots \\ \text{SSF}(2) = \text{SSF}(1) + \sum_{k=1}^L \frac{1}{k!} \text{SSF}^{(k)}(1) \end{cases} \quad (7)$$

对式(7)所示方程组,等式两边相加后可得

$$\begin{aligned} \text{SSF}(\rho) = & \text{SSF}(1) + \sum_{k=1}^L \frac{1}{k!} \sum_{i=1}^{\rho-1} \text{SSF}^{(k)}(i) \\ & (\rho \geq 2) \end{aligned} \quad (8)$$

另一方面,对方程(3)两边取  $k$  阶导数后可得

$$\hat{\text{SSF}}^{(k)}(\rho) = \text{SSF}^{(k)}(\rho) \quad (k \in [1, L], \rho \geq 1) \quad (9)$$

同时,由于相邻像元观测目标辐射值非常接近且有  $\epsilon = \text{SSF}(1) \geq 0$

式中,  $\epsilon$  为一与目标相关的足够小常量.将式(9)、(10)带入式(8)后可得

$$\begin{aligned} \sigma^2 = & \frac{1}{2} \left[ \hat{\text{SSF}}(\rho) - \sum_{k=1}^L \frac{1}{k!} \sum_{i=1}^{\rho-1} [\hat{\text{SSF}}^{(k)}(i)] - \epsilon \right] \\ & (\rho \geq 2) \end{aligned} \quad (11)$$

进一步,对于尺寸为  $M \times M$  的图像分析区域,由 SSF 的定义可知,  $\rho \in [1, M-1]$ ,且此时  $\hat{\text{SSF}}(\rho)$  的最大多项式拟合阶数满足:  $L_{\max} \leq M-2$ .为此,这里假定按式(2)计算得到的  $M-1$  个  $\hat{\text{SSF}}(\rho)$  值可由  $L$

( $L$  为可选常量, 且  $L \leq L_{\max}$ ) 阶多项式拟合, 即

$$\hat{\text{SSF}}(\rho) = a_0 + a_1\rho + a_2\rho^2 + \dots + a_L\rho^L \quad (12)$$

将式(12)带入式(11)中可得

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} \left[ \hat{\text{SSF}}(\rho) - \sum_{k=1}^L \frac{1}{k!} \sum_{i=1}^{L-k} \sum_{j=k}^L \left[ a_j \frac{j!}{(j-k)!} \cdot (i)^{j-k} \right] - \epsilon \right] \quad (\rho \geq 2) \quad (13)$$

式(13)给出了基于多项式递推分解的改进空间结构函数噪音估计模型。

实际中, 考虑到不同拟合阶数将导致一定的噪音估计值差异(见后文数值仿真结果)往往大于  $\epsilon$ 。因此, 当观测目标足够均匀时, 可将式(13)中  $\epsilon$  置为零, 且噪音均方值的最佳估计 ( $\sigma_{\text{optimal}}^2$ ) 由可不同阶数估计值 ( $\sigma_i^2$ ) 的算术平均来给出, 即

$$\sigma_{\text{optimal}}^2 = \frac{1}{L_{\max}} \sum_{i=1}^{L_{\max}} \sigma_i^2 \quad (14)$$

表 1 不同拟合阶数条件下不同噪音估计方法结果的稳定性对比(图像尺寸:  $8 \times 8$ ; 目标: 常量)

噪音特性		$\sigma=0.5$							$\sigma=1.0$								
拟合阶数		1	2	3	4	5	6	Mean	SRD	1	2	3	4	5	6	Mean	SRD
ISSF		0.55	0.57	0.59	0.59	0.61	0.58	0.58	0.02	1.10	1.19	1.08	1.07	1.10	1.07	1.10	0.04
SSF		0.55	0.62	0.62	0.62	1.34	--	0.75	0.30	1.07	1.07	0.75	0.99	1.44	--	1.07	0.22
高斯统计		0.54							1.10								
噪音特性		$\sigma=1.5$							$\sigma=2.0$								
拟合阶数		1	2	3	4	5	6	Mean	SRD	1	2	3	4	5	6	Mean	SRD
ISSF		1.52	1.60	1.59	1.57	1.63	1.59	1.58	0.03	2.01	2.18	2.20	2.11	2.19	2.14	2.14	0.07
SSF		1.55	1.67	1.67	1.04	2.16	--	1.62	0.36	2.06	2.25	2.25	1.13	2.61	--	2.06	0.49
高斯统计		1.55							2.08								

显然, 采用 ISSF 方法估计得到的噪音均方根值随拟合阶数变化较小, 相对变化量在 2%~4% 之间, 而基于外推的 SSF 方法的估计结果随拟合阶数变化明显(特别是在拟合阶数较高时), 且相对变化量在 22%~60% 之间, 二者的性能差异明显。同时, 就整体性能而言, ISSF 方法的估计结果, 其均值也更接近于真实值。

### 2.2 噪音估计准确度数值仿真

考虑到实际应用中, 目标特性总是存在一定的小幅变化, 这里选择典型的斜坡函数(图1)和正弦

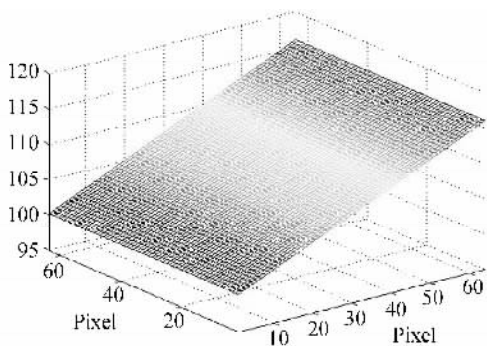


图 1 斜坡函数图像  
Fig. 1 Slope signal image

## 2 数值仿真与验证

利用数值仿真手段, 分析高斯统计法、外推空间结构函数法以及本文所提出的改进空间结构函数法等三种方法对含有已知噪音图像的实际估计性能, 包括估计值的稳定性和估计准确度等两个方面。

### 2.1 噪音估计值的稳定性数值仿真

虽然 Hillger 等人提出的外推 SSF 法与本文所给出的 ISSF 方法都采用了多项式拟合, 但前者将其外推至并无具体物理意义的“零距离”位置, 而后者则在定义区间内得到了稳定的估计值, 因此, 在理论上, 后者的估计结果(采用式(13))应该随拟合阶数变化相对较小。为此, 这里选择在均匀区域内叠加已知统计分布的白噪音, 图像尺寸为  $8 \times 8$ , 分析结果如表 1。

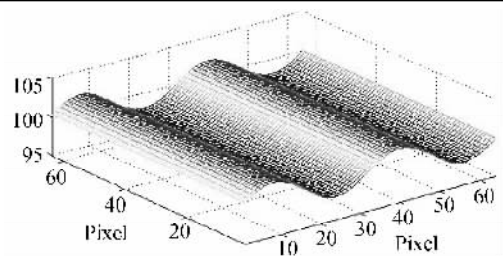


图 2 正弦函数图像  
Fig. 2 Sine signal image

函数(图 2)目标图像, 在其中叠加不同的已知分布白噪音(注: 噪音均方根(SRD)值从 0.1 变化至 2.0), 且图像尺寸分别取  $8 \times 8 \sim 64 \times 64$ , 仿真结果如图 3。

图 3 仿真结果表明, 高斯统计法的噪音估计结果明显大于外推 SSF 以及 ISSF 方法的估计结果, 且随分析图像尺寸的增大而加大, 这主要是由于该方法无法适应观测目标小幅变化的情况。另一方面, 在相同图像尺寸的仿真条件下, ISS 方法的估计性能总是优于基于外推的 SSF 方法, 特别是在图像尺寸较小时, 如  $8 \times 8$ 。显然, 这一特性使得该方法在实际应用中更易于实现。

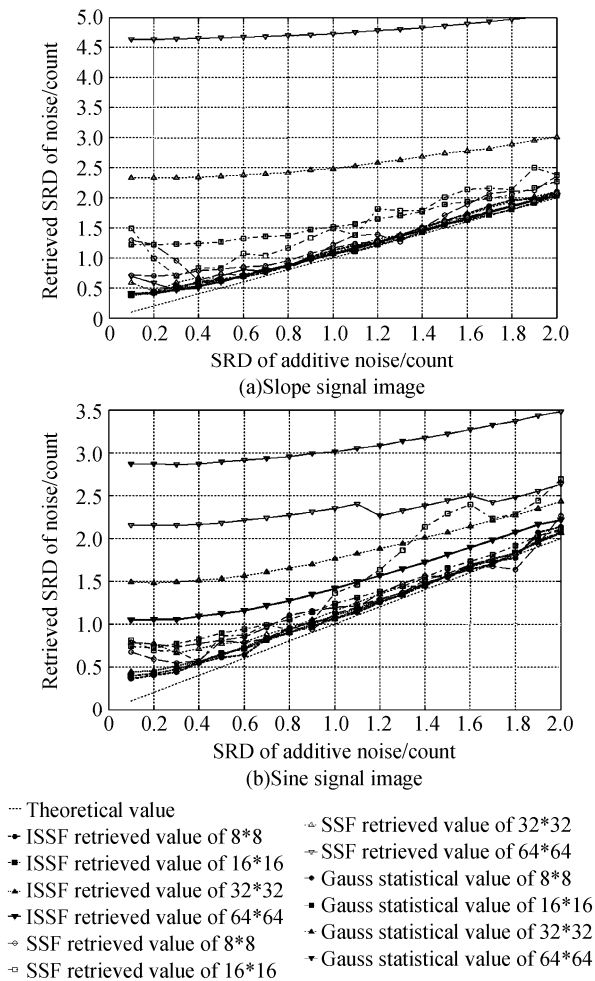
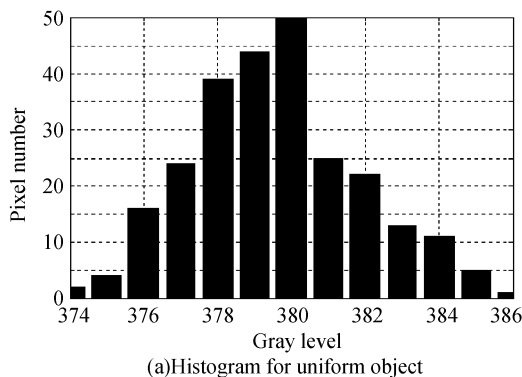


图3 不同噪音估计方法性能对比  
Fig. 3 Performance comparison using different signal

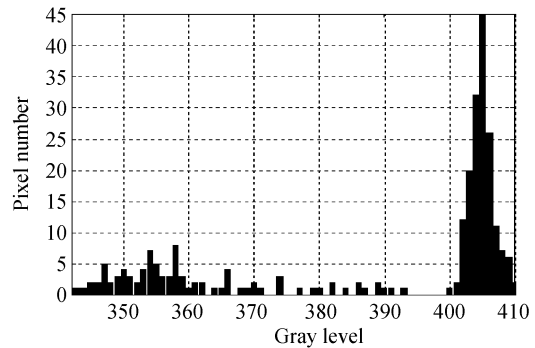
### 3 系统误差及 ADC 噪音影响分析

正如前文所指出的,既然在大多数情况下系统误差( $\epsilon$ )是无法预知的,为了减小其对最终评价结果的影响,一种折中的方法就是在分析图像中选择尽可能均匀的区域来进行.事实上,当考虑到这里所要估计的噪音近似满足高斯分布特性时,用于分析的区域图像直方图特性可作为目标均匀性的重要判据.

图4给出了FY-2D卫星IR1通道的两个典型区域图像直方图.显然,相对于图4(b)而言,图4(a)



(a)Histogram for uniform object



(b)Histogram for non-uniform object

图4 FY-2D IR1 2007年1月7日典型区域直方图

Fig. 4 Histograms of FY-2D IR1 channel at Jan. 7, 2006 的直方图更接近于高斯分布,并且具有“单峰”特性,这将使其更适用于上述噪音估计过程.采用这样的分析和判决过程,ISSF分析方法中的系统误差可以在很大程度上得到抑制和减小.

此外,ADC噪音是影响探测灵敏度评价准确度若干因素中一个不可忽略的重要部分,因此,该类型噪音的功率必须被准确计算并将其从整体噪音中去除.假定仪器的模数转换共分为 $Q$ 个量化阶(在局部区域可视为均匀量化),输入信号介于 $-a$ 和 $a$ 之间,且满足均匀分布,则ADC噪音的功率( $\sigma_Q^2$ )可用如下方法计算

$$\Delta v = \frac{2a}{Q}, m_i = a + i\Delta v, q_i = \frac{m_{i-1} + m_i}{2} \quad (15)$$

$$\sigma_Q^2 = \sum_{i=1}^Q \int_{m_{i-1}}^{m_i} (x - q_i)^2 \left(\frac{1}{2a}\right) dx = \frac{(\Delta v)^2}{12} \quad (16)$$

式(15)中, $\Delta v$ 是量化间隔, $m_i$ 和 $q_i$ 分别是第 $i$ 个量化间隔的最大电平值和量化电平值,且在式(16)中,在满足局部均匀量化的前提下,ADC噪音功率由量化间隔唯一确定.此外,当假定ADC噪音与探测系统的噪音( $\sigma_D^2$ )不相关时,则由式(14)和式(16)可得

$$\sigma_D^2 \approx \sigma_{optimal}^2 - \sigma_Q^2 = \sigma_{optimal}^2 - \frac{(\Delta v)^2}{12} \quad (17)$$

相对于式(14)而言,式(17)给出了对探测系统噪音更准确的估计,并可利用对应通道的定标查找表进一步获得SNR或者 $NE\Delta T$ 等探测灵敏度指标.

### 4 应用实例

FY-2D卫星是我国自行研制的第二颗业务静止气象卫星,已于2006年12月8日成功发射.为了验证上述在轨光学仪器探测灵敏度评价模型的真实性和有效性,这里将给出利用上述方法得到的FY-2D卫星可见红外自旋扫描辐射计(VISSR)在轨测试中,各通道探测灵敏度指标的反演及评价结果.表2给出了FY-2D VISSR四个红外通道的 $NE\Delta T$ 分析结果.这里选择了该卫星2007年1月6日至7日两个不同时次,不同区域的图像数据作

为分析对象,结果显示:在去除 ADC 噪音影响后,各通道的噪音等效电压差(NE $\Delta$ V)的变化范围在 2 mV 以内,且在 300 K 或 260K 目标条件下,NE $\Delta$ T 指标介于 0.2 K 到 0.3 K 之间. 另一方面,对于 FY-2D VISSR 四个可见光通道也分别进行了类似的评价工作,结果如表 3. 同样,这里选择了 FY-2D 2006 年 12 月 24 日 06:00(UTC)时次具有不同目标特性的区域进行分析,其平均计数值分别为 7 和 25. 很显然,两个不同区域估计得到的 NE $\Delta$ V 有明显差异,这主要是由二者在量化间隔上的差异所造成的:在第 7 和第 25 量化区间内,量化间隔分别为 17 mV 和 70 mV. 为此,利用式(16)的基本结论,在

去除 ADC 量化噪音影响后,二者的噪音等效反照率差(NE $\Delta$  $\rho$ )几乎相当,约为 0.3%,如表 3. 考虑到上述方法在噪音估计过程中不可避免地存在 2~3 mV 的偏差,则 FY-2D VISSR 四个红外通道 NE $\Delta$ T 的评价相对误差约为 20%,合绝对亮温反演误差为 $\pm$ 0.05 K. 此外,表 4 还给出了该光学遥感仪器探测灵敏度(含噪音)指标发射前地面测试与在轨评价结果的对比. 显然,在分析误差范围内,反演得到的指标评价与地面测试结果相当,这一结论验证了两个事实:1)上述探测灵敏度在轨评价方法是有效的;2)FY-2D VISSR 在卫星发射入轨后的性能是稳定、可靠的.

表 2 FY-2D 卫星红外通道探测灵敏度分析卫星时间

卫星	时间(UTC)	通道	分析区域左上角行列号	不同尺寸分析区域噪音计数值					NE $\Delta$ V ** /mV	目标平均计数值	NE $\Delta$ T ** /K
				8 $\times$ 8	16 $\times$ 16	32 $\times$ 32	64 $\times$ 64	平均值			
FY-2D	UTC05:30 Jan. 6, 2007	IR1 (10.3~11.3 $\mu$ m)	(1810,1365)	1.84	1.72	1.98	1.96	1.88	9.3	500	0.2@300K
			(675,1470)	1.78	1.90	1.73	1.67	1.80	8.9	619	
		IR2 (11.5~12.5 $\mu$ m)	(1810,1365)	2.27	2.04	2.14	2.27	2.18	11.0	467	0.3@300K
			(675,1470)	2.24	2.30	2.29	2.22	2.26	11.2	562	
		IR3 (6.3~7.6 $\mu$ m)	(870,1800)	1.88	1.72	1.78	1.90	1.82	9.0	636	0.2@260K
			(630,1550)	1.77	1.81	1.90	1.92	1.85	9.2	735	
		IR4 (3.5~4.0 $\mu$ m)	(840,1220)	2.17	2.13	2.76	3.27	2.58	12.8	748	0.3@300K
			(1710,510)	2.85	2.88	2.74	2.81	2.82	14.0	750	
FY-2D	UTC06:00 Jan. 7, 2007	IR1 (10.3~11.3 $\mu$ m)	(1190,1000)	1.30 *	1.57	1.45	2.56 *	1.51	7.4	362	0.2@300K
			(780,740)	1.73	1.45	1.57	1.85	1.65	8.1	365	
		IR2 (11.5~12.5 $\mu$ m)	(1190,1000)	2.42	2.10	2.08	2.49	2.27	11.3	344	0.3@300K
			(780,740)	2.04	2.06	2.09	2.35	2.14	1.06	324	
		IR3 (6.3~7.6 $\mu$ m)	(1137,968)	1.87	1.78	1.78	1.82	1.81	8.9	676	0.2@260K
			(1839,602)	1.57	1.50	1.71	2.12	1.73	8.5	713	
		IR4 (3.5~4.0 $\mu$ m)	(1727,533)	3.06	3.30	3.37	3.81	3.39	16.9	741	0.3@300K
			(1151,1441)	2.56	2.29	2.41	2.94	2.55	12.7	975	

\*:需要剔除的异常量据; \*\*:去除 ADC 噪音影响后,由定标查找表得到的反演结果.

表 3 FY-2D 卫星可见光通道探测灵敏度分析卫星时间

卫星	时间(UTC)	分析区域左上角行列号	通道	不同尺寸分析区域噪音计数值					NE $\Delta$ V /mV	目标平均计数值	NE $\Delta$ $\rho$ ** /%	SNR **
				8 $\times$ 8	16 $\times$ 16	32 $\times$ 32	64 $\times$ 64	平均值				
FY-2D	UTC06:00 Dec. 24, 2006	(1625,6800)	VIS1	0.90	0.92	1.01	0.97	0.95	16.4	6	0.3	SNR=1.7 ( $\rho$ =0.5%)
			VIS2	0.87	0.87	0.93	0.92	0.90	17.8	7		
			VIS3	0.77 *	0.92	0.96	0.97	0.95	18.8	7		
			VIS4	0.82	0.79	0.79	0.78	0.80	16.0	7		
		(670,3960)	VIS1	0.31	0.38	0.38	0.36	0.36	21.2	25	0.3	SNR=336 ( $\rho$ =95%)
			VIS2	0.20 *	0.39	0.39	0.36	0.38	22.2	25		
			VIS3	0.41	0.39	0.37	0.35	0.38	22.7	25		
			VIS4	0.27 *	0.35	0.36	0.34	0.35	19.9	25		

表 4 FY-2D 各通道地面测试结果与在轨评价结果对比

指标名称	通道	地面测试结果	在轨评价结果
等效噪音 (辐射制冷温 度:93.6K)	IR1:10.3~11.3 $\mu$ m	8.3~8.6 mV	7.4~9.3 mV
	IR2:11.5~12.5 $\mu$ m	13.2~13.6 mV	10.6~11.3 mV
	IR3:6.3~7.6 $\mu$ m	10.7~11.5 mV	8.6~9.2 mV
	IR4:3.5~4.0 $\mu$ m	15.5~16.3 mV	12.7~16.9 mV
信噪比	VIS:0.55~0.90 $\mu$ m	1.8~2.0@ $\rho$ =0.5%	1.7@ $\rho$ =0.5%
		305~324@ $\rho$ =95%	336@ $\rho$ =95%

## 5 结论

在分析光学遥感仪器探测信息中主要噪音源的基础上,提出了一种改进空间结构函数分析的仪器探测灵敏度在轨评价方法,这其中包括:基于多项式递推分解的整体噪音估计模型,以及减小系统误差及修正模数转换噪音影响等方面的基本技术途径.

仿真结果证实,该改进算法的噪音估计准确度优于传统的高斯估计和基于外推的结构函数分析方法。此外,针对实际观测数据,在去除模数转换噪音影响后,仪器噪音等效温度差指标的在轨评价准确度可达 $\pm 0.05\text{K}$ 。该评价方法已在 FY-2D 静止气象卫星在轨测试中得到成功应用。

**致谢** 该项研究工作得到国家卫星气象中心许健民研究员的大力支持,这里表示衷心地感谢。

#### 参考文献

- [1] MEER P, JOLION J M, ROSENFELD A. A fast parallel algorithm for blind estimation of noise variance [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, **12**(2):216-223.
- [2] CORNER B R, NARAYANAN R M, REICHENBACH S E. Noise estimation in remote sensing imagery using data masking [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(4): 689-702.
- [3] HILLGER D W, HAAR T H V. An analysis of satellite infrared soundings at the mesoscale using statistical structure and correlation functions [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1979, **36**(2):287-305.
- [4] HILLGER D W, HAAR T H V. Estimating noise levels of remotely sensed measurements from satellites using spatial structure analysis [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1988, **5**(4):206-214.
- [5] CURRAN P J, DUNGAN J L. Estimation of signal-to-noise ratio: a new procedure applied to AVIRIS data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, **27**(5): 620-628.
- [6] ZHANG Xu-sheng, ZHOU Tao-geng, SHA Ding-guo. Method and statistic model for digital image noise estimation [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5):719-722.  
张旭升,周桃庚,沙定国.数字图像噪音估计的方法及数学模型[J]. *光学技术*, 2005, **31**(5):719-722.
- [7] BAO Jun-lin, ZHUANG Yi-qi, DU Lei, et al. Investigation of mechanisms on  $1/f$  noise and  $g-r$  noise in optoelectronic coupled devices [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 857-860.  
包军林,庄奕琪,杜磊,等.光电耦合器件  $1/f$  噪音和  $g-r$  噪音的机理研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(6):857-860.
- [8] WU Dong-mei. Noisy image estimation with translation invariant wavelet thresholding [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):306-309.  
吴冬梅.基于平移不变小波阈值算法的噪音图象估计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2):306-309.

## Detection Sensitivity of On-Orbit Optical Remotely-Sensed Instrument: Modeling, Analysis and Application

GUO Qiang<sup>1,2</sup>, YANG Chang-Jun<sup>2,3</sup>, LIN Wei-Xia<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellite, China Meteorological Administration, Beijing, 100081, China)

(2 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

(3 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Received date: 2007-04-10

**Abstract:** Based on the analysis of noise sources for optical remotely-sensed instrument, an improved spatial-structure function (ISSF) approach for detection sensitivity evaluation of on-orbit instrument is proposed, which includes the model of noise estimation with polynomial iterative decomposition and the decrease and modification way for both systematic error and analog-to-digital conversion (ADC) noise. It is shown from simulation results that the accuracy of noise estimation is better than that of both Gauss statistics and spatial-structure based on extrapolation. Further, by analyzing some real observed data with the effects of ADC noise removed, the accuracy of the evaluated noise equivalent different temperature (NE $\Delta$ T) is about  $\pm 0.05\text{K}$ . This approach has been applied in the on-orbit ground testing of FY-2D geostationary meteorological satellite successfully.

**Key words:** Detection sensitivity; On-orbit analysis; Noise estimation; Polynomial iterative decomposition



**GUO Qiang** He was born in Jiangsu Province. He graduated from Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, obtained his Ph. D. degree in electronic engineering. Now he works at National Satellite Meteorological Center, Chinese Meteorological Administration as an associate professor. His major research fields include geo-location, calibration and validation for the next generation geostationary meteorological satellite in China.