

基于地面周期靶标的光学遥感相机 在轨调制传递函数测量方法

吴泽鹏*, 曲耀斌**, 赵庆广, 扈宗鑫

上海卫星工程研究所, 上海 201109

摘要 为了克服传统的基于周期靶标的在轨调制传递函数测量方法中测量精度过分依赖靶标组数的问题, 通过对传统方法的原理进行深入剖析, 提出了一种新的测量方法。在获得多组具有一定相位差异的地面周期靶标图像数据后, 充分利用所有采样数据及相应相位关系, 进行参数拟合, 得到地面靶标经成像系统后的调制度, 对比输入调制度计算调制传递函数。仿真及实际光学遥感相机的实验结果表明: 仅利用两组靶标, 理论上所提方法的测量精度可优于 0.5%; 测试图像噪声、靶标周期匹配偏差、测量角度匹配偏差等因素对测量误差的影响均在 4% 以内, 该测量方法的适应性较高。所提方法的计算结果与倾斜刃边法具有良好的 consistency, 可以应用于高分辨率光学遥感相机的在轨调制传递函数测量。

关键词 遥感; 采样成像系统; 调制传递函数; 周期靶标; 拟合

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0728006

On-Orbit Measurement of Modulation Transfer Function for Optical Remote Sensing Cameras Based on Periodic Ground Targets

Wu Zepeng*, Qu Yaobin**, Zhao Qingguang, Hu Zongxin

Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China

Abstract In traditional on-orbit modulation transfer function (MTF) measurements based on periodic targets, there is a known overdependence of the achieved accuracy on the number of target groups. The method introduced in this study aims to overcome such reliance, through a thorough analysis of the principle of the traditional method. We first collect the imaging data of multiple groups of ground periodic targets with certain phase differences and then calculate the output modulation of the imaging system by parametric fitting using all the sampling data as well as the relative phase relations. Subsequently, we compare the input and output modulations to obtain the MTF. We also perform a simulation and a series of experiments of real remote sensing cameras to assess the effectiveness of our method. The results theoretically reveal a small measurement error of less than 0.5% using only two groups of targets, whereas the errors caused by image noise and target-periodic- and measuring-angle matching deviations are less than 4%. This method has good adaptability, and is consistent with the slanted-edge method; therefore, it can be easily applied to on-orbit MTF measurements of high-resolution optical remote sensing cameras.

Key words remote sensing; sampled-imaging system; modulation transfer function; periodic targets; fitting

OCIS codes 280.4788; 110.2960; 110.3000; 120.0280

1 引 言

在描述光学遥感相机成像质量时, 通常使用调制传递函数(MTF)来表征成像系统对各空间频率输入信号的响应。MTF 是反映成像系统性能的重要指标^[1]。在发射之前, 光学遥感相机的 MTF 会在实验室中进行测量^[2]。然而在发射过程中受恶劣

的力学环境、大气、相机在轨的空间环境等因素的影响, 实际的在轨 MTF 会发生一定的变化^[3], 为了更好地掌握相机的在轨工作性能, 需要测量光学遥感相机的在轨 MTF^[4-6]。

目前, 常用的在轨 MTF 测量方法均为基于地面特定形状场景的方法, 通常选取地面上建筑物顶部、海岸线等自然场景^[7]或人工铺设的靶标。由于

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-02-12; 录用日期: 2019-03-22

基金项目: 上海市自然科学基金(18ZR1437200)

* E-mail: zpw@outlook.com; ** E-mail: qu1122@163.com

自然场景通常具有较大的不确定因素,因此 MTF 测量精度会受到一定影响。更多的 MTF 测量场合依然采用人工靶标,主要包含点源靶标^[8]、倾斜刃边靶标^[9-10]和周期靶标^[11-14]等。

周期靶标也称为三线靶标,最早用于航空遥感领域,是一种较为直接的 MTF 测量方法,着重关注 Nyquist 频率处的 MTF 值。高分辨率光学遥感相机采用该类靶标进行在轨 MTF 测量,通过对比度传递函数(CTF)与 MTF 的换算关系,可以计算得到对应 Nyquist 频率的 MTF 值。

由于采样成像系统的采样值与采样相位相关,因此在传统的基于周期靶标的 MTF 测量方法中,均会铺设多组具有一定相位差异的靶标,以减小采样相位对测算精度的影响。为了克服传统方法中测算精度对靶标组数的严重依赖性,本文在地面周期靶标的基础上,提出一种新的光学遥感相机在轨 MTF 测量方法。通过对所有具有相位差异的采样数据联合拟合,充分利用所有的靶标测试数据,根据参数拟合结果计算得到调制度的衰减情况,从而得到 MTF 值。该方法不仅可以提高 MTF 测算精度,还可以减小靶标铺设代价,具有良好的应用前景。

2 测试原理和方法

2.1 MTF 和 CTF

根据光学遥感相机的成像过程,可以将采样成像系统建模为

$$z(i, j) = D[z(x, y)] = D[o(x, y) * h(x, y)], \quad (1)$$

式中: (x, y) 为连续空间域上的位置坐标;连续函数 $z(x, y)$ 为光学系统的输出; $*$ 为卷积运算符;连续函数 $o(x, y)$ 为成像系统的输入; $h(x, y)$ 为成像系统的点扩展函数(PSF); $D[\cdot]$ 表示采样过程; $z(i, j)$ 为输出的数字图像。该模型中未考虑几何扭曲形变及噪声。

MTF 即为成像系统 PSF 经傅里叶变换后的模值,即:

$$F_{\text{MTF}}(\xi, \zeta) = |H(\xi, \zeta)|, \quad (2)$$

式中: (ξ, ζ) 为空间频率域上的坐标; $H(\xi, \zeta)$ 为 PSF 的傅里叶变换,即光学传递函数; $F_{\text{MTF}}(\xi, \zeta)$ 为 MTF。MTF 表征了线性系统对不同空间频率输入信号的幅度衰减情况。光学遥感相机通常需要考虑沿轨和垂轨两个方向的 MTF 值,即 $F_{\text{MTF}}(\xi, 0)$ 与 $F_{\text{MTF}}(0, \zeta)$ 。为了不失一般性,以下均以一维函数为例进行分析。

对于单一空间频率为 f 的信号输入 $o_1(x) = a \cos(2\pi fx)$,其线性系统的输出为

$$z_1(x) = F_{\text{MTF}}(f)o_1(x). \quad (3)$$

由(3)式可知,设置不同空间频率的余弦信号输入,对比系统的输出相对输入的强度衰减,即可测得不同空间频率处的 MTF 值。然而,由于实际操作中,余弦形式的靶标很难实现,因此通常采用方便实施的方波形式的靶标,即常用的地面周期靶标都是黑白相间的方波形式。

当输入周期 $T = 1/f$ 的方波信号 $o_1(x)$ 、线性系统的输出为 $z_1(x)$ 时,CTF 为

$$F_{\text{CTF}}(f) = \frac{M(z_1)}{M(o_1)} = \frac{\max(z_1) - \min(z_1)}{\max(z_1) + \min(z_1)} \bigg/ \frac{\max(o_1) - \min(o_1)}{\max(o_1) + \min(o_1)}, \quad (4)$$

式中: $M(z_1)$ 、 $M(o_1)$ 分别为输出和输入信号的调制度; $\max(\cdot)$ 、 $\min(\cdot)$ 分别为取最大值、最小值运算。结合(3)式可得到 F_{CTF} 与 MTF 的换算关系为

$$F_{\text{CTF}}(f) = \frac{4}{\pi} \left[F_{\text{MTF}}(f) - \frac{1}{3}F_{\text{MTF}}(3f) + \frac{1}{5}F_{\text{MTF}}(5f) - \dots \right]. \quad (5)$$

由于一般的光学遥感相机的 MTF 曲线均随空间频率的增大而呈下降的趋势,因此通常只以 Nyquist 采样频率 f_N 处的 MTF 值 $F_{\text{MTF}}(f_N)$ 作为系统性能的考核指标之一。光学遥感相机在大于 2 倍 Nyquist 频率后的系统响应衰减极大,一般认为 $F_{\text{MTF}}(3f_N) \approx 0$, $F_{\text{MTF}}(5f_N) \approx 0$,由此,MTF 与 CTF 的换算关系可近似为

$$F_{\text{CTF}}(f_N) \approx \frac{4}{\pi}F_{\text{MTF}}(f_N). \quad (6)$$

(5)式和(6)式构建了采用方波形式的周期靶标测量 MTF 的理论基础。

2.2 地面周期靶标的铺设

根据(6)式,在地面沿轨方向和垂轨方向分别铺设一组周期靶标,令其周期 T 满足

$$T = \frac{1}{f_N} = 2f_{\text{GSD}}, \quad (7)$$

式中: f_{GSD} 为地面像元的间隔。由(7)式即可得出成像系统在 Nyquist 频率处的 MTF 值。

由于实际的光学遥感相机为采样成像系统,采样相位不能保证与地面周期靶标刚好对齐,即采样位置有可能不在线性系统的输出 $z_1(x)$ 的最大值、最小值位置。为了减小采样相位的影响,在实际的地面周期靶标铺设过程中,需要铺设多组(一般

5组)具有相位差异的靶标,从而尽量减小采样相位对测量精度的影响。一种典型的靶标铺设示例如图1所示,共5组周期靶标,相邻两组靶标间错开0.2个像元。

2.3 数据分析方法

2.3.1 传统方法

传统的基于地面周期靶标的MTF测量方法的数据处理流程如图2所示。该处理方法的局限性在于受采样相位的影响,测算精度的提高完全依靠增加靶标组数,显著增加了靶标铺设的难度和代价。

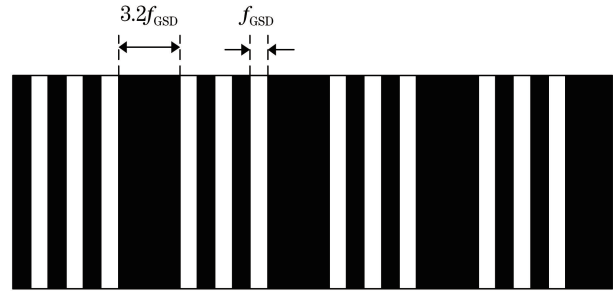


图1 一种典型的周期靶标铺设方式
Fig. 1 Typical layout of periodic targets

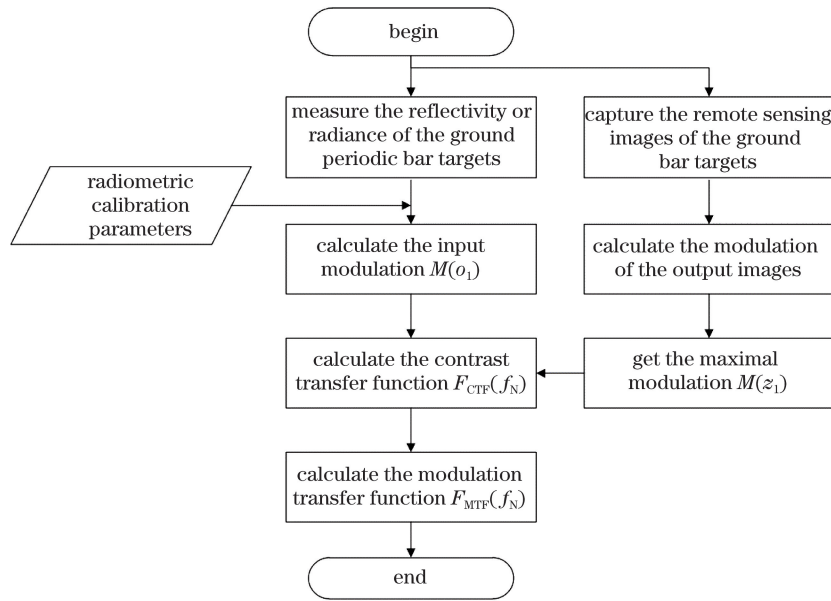


图2 传统的基于周期靶标的MTF测量方法的数据处理流程

Fig. 2 Data processing flow of traditional MTF measurement based on periodic targets

2.3.2 基于拟合的方法

针对传统方法的局限性,提出一种基于拟合的分析方法。对输入周期为 T 的方波信号 $o_1(x)$ 进行傅里叶级数展开:

$$o_1(x) = c + \frac{b}{2} + \frac{2b}{\pi} \left[\cos(2\pi fx) - \frac{1}{3} \cos(3 \cdot 2\pi fx) + \frac{1}{5} \cos(5 \cdot 2\pi fx) - \dots \right], \quad (8)$$

式中: c 为输入方波信号的最小值; b 为输入方波信号的幅度; f 为空间频率; x 为空间位置。

根据线性系统的性质,结合(3)式可得系统的输出响应为

$$z_1(x) = c + \frac{b}{2} + \frac{2b}{\pi} \left[F_{\text{MTF}}(f) \cos(2\pi fx) - \frac{F_{\text{MTF}}(3f)}{3} \cos(3 \cdot 2\pi fx) + \frac{F_{\text{MTF}}(5f)}{5} \cos(5 \cdot 2\pi fx) - \dots \right]. \quad (9)$$

当输入方波形式的周期靶标的周期 $T = 2f_{\text{GSD}}$ 时, $F_{\text{MTF}}(3f_{\text{N}}) \approx 0, F_{\text{MTF}}(5f_{\text{N}}) \approx 0, \dots$,系统输出 $z_1(x)$ 满足

$$z_1(x) \approx c + \frac{b}{2} + \frac{2b}{\pi} F_{\text{MTF}}(f_{\text{N}}) \cos(2\pi f_{\text{N}} x). \quad (10)$$

如图3所示,(10)式描述的是一个包含直流分量的余弦信号,其周期已知,而采样值的相位未知,通过其振幅及直流成分可计算调制度。然而,每个周期内仅包含两个相位未知的采样点,仅通过一组靶标的采样结果,无法确定其振幅。

若铺设多组(至少2组)带有一定采样相位的周期靶标,根据其相对相位的关系,可以唯一确定输出 $z_1(x)$ 的振幅。考虑到实际采样中对应同一相位具有多个采样点,采用拟合的方法来计算幅值和直流分量,对(10)式的拟合形式为

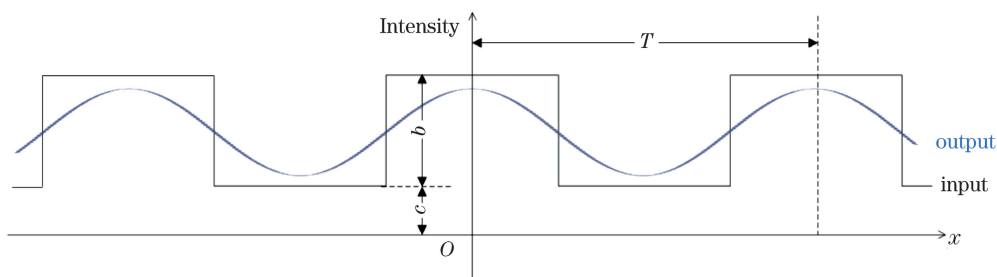


图 3 方波形式的周期信号及经成像系统后的输出示意图

Fig. 3 Schematic of square-wave periodic signal and its output from imaging system

$$z_1(x) = B + A \cos(2\pi f_N x + \varphi), \quad (11)$$

式中: B 、 A 、 φ 为拟合过程需要确定的系数。得到振幅等信息后,即可计算 MTF 值:

$$F_{\text{MTF}}(f_N) = \frac{A}{b/2} \cdot \frac{\pi}{4}. \quad (12)$$

基于拟合的方法的数据处理流程如图 4 所示,

对比图 2 可以知道该方法与传统方法的最大不同之处在于获得周期靶标所成遥感图像后的数据分析。传统方法需要铺设尽可能多的靶标来提高精度,而基于拟合的方法充分利用了所有数据,由拟合计算来获得实际的 MTF 值,其精度主要由靶标之间错开相位的测量准确性保证。

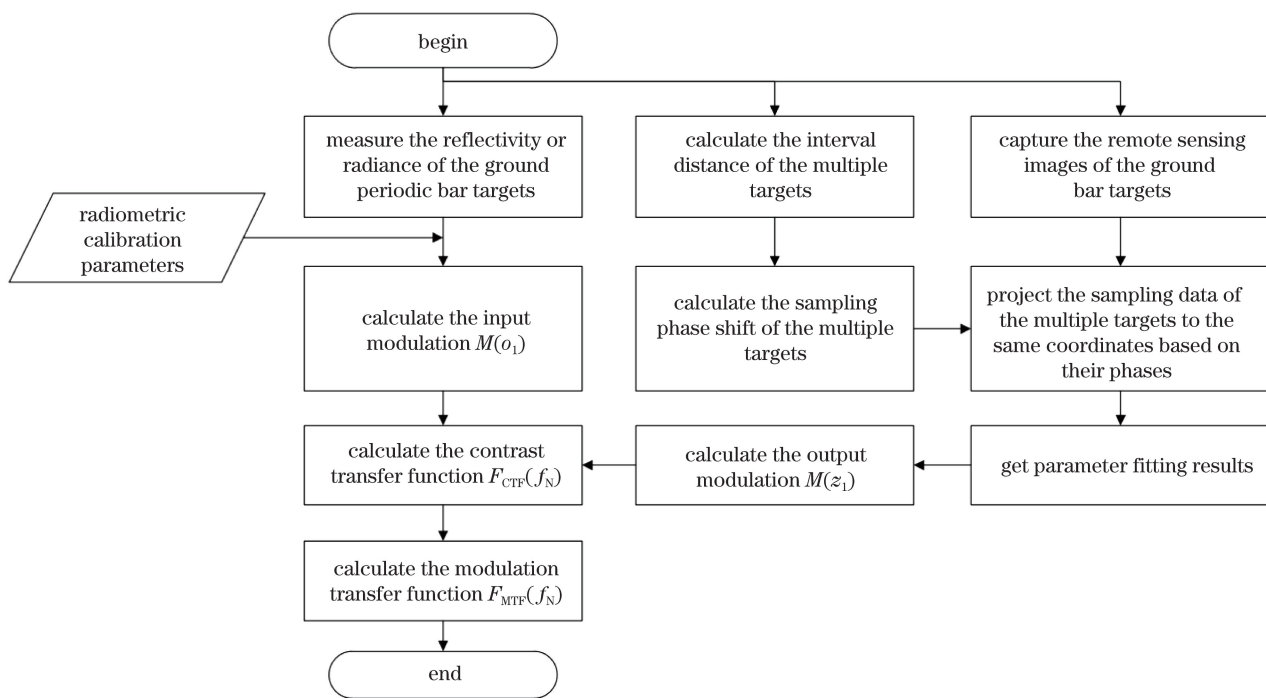


图 4 采用拟合的 MTF 测量方法的数据处理流程

Fig. 4 Data processing flow of MTF measurement based on parametric fitting

3 实验仿真与数据分析

3.1 理论测量精度的仿真与分析

不同的光学成像系统可能对应不同形式的系统函数,为了验证所提方法对成像系统实际的 PSF 形状不存在依赖性,本节在不考虑图像噪声等成像影响因素的情况下,分别以高斯型、 sinc^2 型以及某型相机在实验室实测的 PSF 为例,仿真了不同情况下的 MTF 测量过程,并将本文所提的基于拟合的数

据分析方法与传统方法的理论测量精度进行对比。

仿真中设置了 2 组具有相位差异的周期靶标,图 5(a)、(c)、(e)所示为仿真线性系统使用的不同形状的 PSF,图 5(b)、(d)、(f)为对应的靶标采样数据及参数拟合结果。

根据参数拟合结果计算输出信号的调制度,并由 CTF 计算得到系统 MTF 值,结果如表 1 所列。同时,表 1 还给出了在使用 2 组周期靶标的情况下,本文所提方法与传统方法的误差比较。

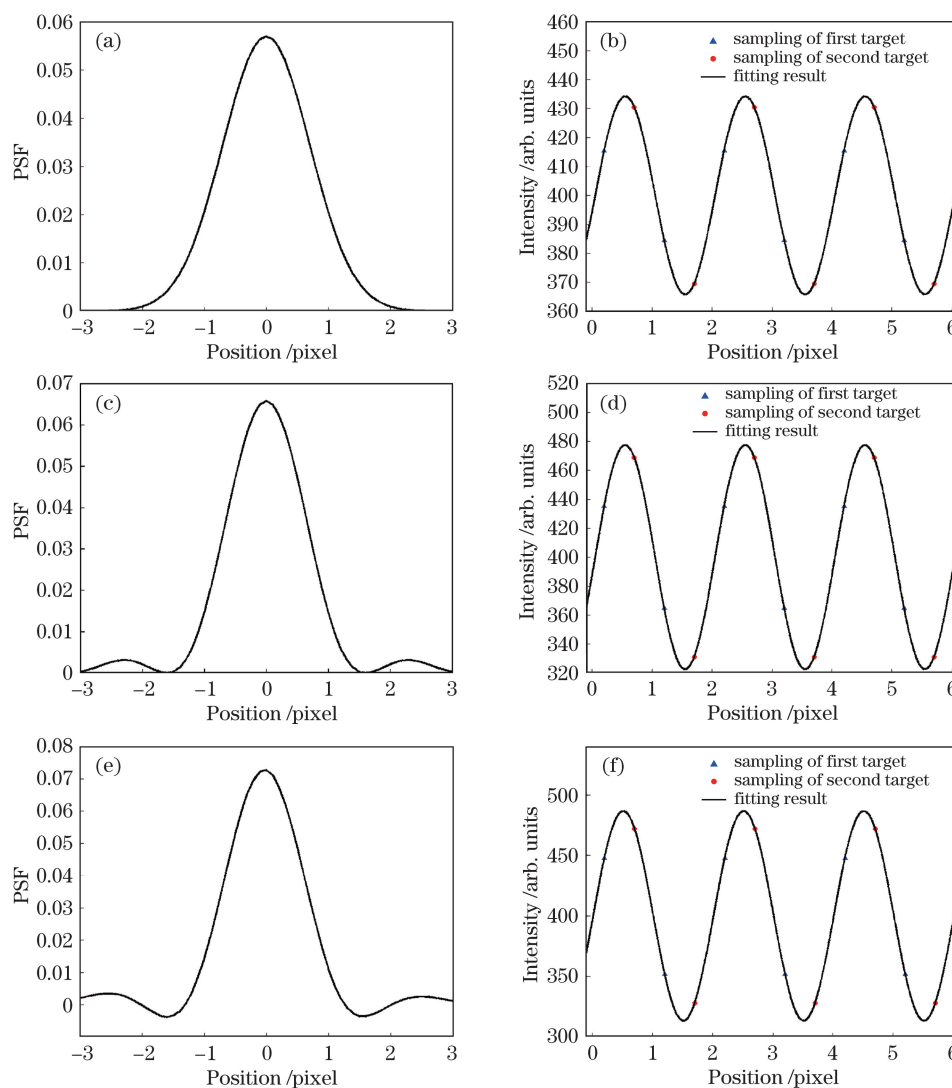


图5 MTF 仿真测试结果。(a) 高斯型 PSF;(b) 周期靶标采样数据及拟合结果;(c) sinc²型 PSF;
(d) 周期靶标采样数据及拟合结果;(e) 特定形状 PSF;(f) 周期靶标采样数据及拟合结果

Fig. 5 Simulated MTF. (a) Gaussian-type PSF; (b) sampling data of periodic targets and fitting result; (c) sinc²-type PSF; (d) sampling data of periodic targets and fitting result; (e) specified-type PSF; (f) sampling data of periodic targets and fitting result

表 1 MTF 计算结果对比

Table 1 Comparison of MTF calculated results

Point spread function	Actual MTF	Input modulation	Output modulation			Measured MTF		Measuring error / %	
			First target	Second target	Fitting result	Traditional method	Proposed method	Traditional method	Proposed method
Gaussian type	0.0892	0.955	0.0388	0.0761	0.0855	0.0797	0.0895	10.66	0.34
sinc ² type	0.2021	0.955	0.0880	0.1723	0.1935	0.1804	0.2026	10.72	0.23
Specified type	0.2273	0.955	0.1200	0.1801	0.2164	0.1886	0.2266	17.02	0.29

从表 1 可以看出,无论成像系统的 PSF 形状如何,该方法均能适用,且具有较高的测算精度。同时,在仅使用 2 组周期靶标的情况下,所提方法的测量误差小于 0.5%,远高于传统方法的精度。

3.2 成像因素对测量误差的影响

3.2.1 图像信噪比的影响

在图 1 所示的靶标图像中,从同一组无相位差异的靶标获取多行采样点,这可以在一定程度上弱

化相机噪声的影响^[15]。采用高斯白噪声模拟遥感图像噪声,分别在图像信噪比 R_{SNR} 为 20 dB~45 dB 的情况下,采用基于拟合的方法得到的 MTF 计算误差。

每组靶标图像包含 5 行有效图像数据。考虑到噪声具有随机性,故统计了 100 次的计算结果。

图 6(a)所示为不同噪声条件下靶标采样数据及拟合结果,图 6(b)所示为基于采样数据的测量误差。由分析结果可知:当图像信噪比为 20 dB~45 dB 时,对测量精度的影响小于 4%(均值);当图像信噪比达到 30 dB 时,对测量精度的影响小于 2%(均值)。

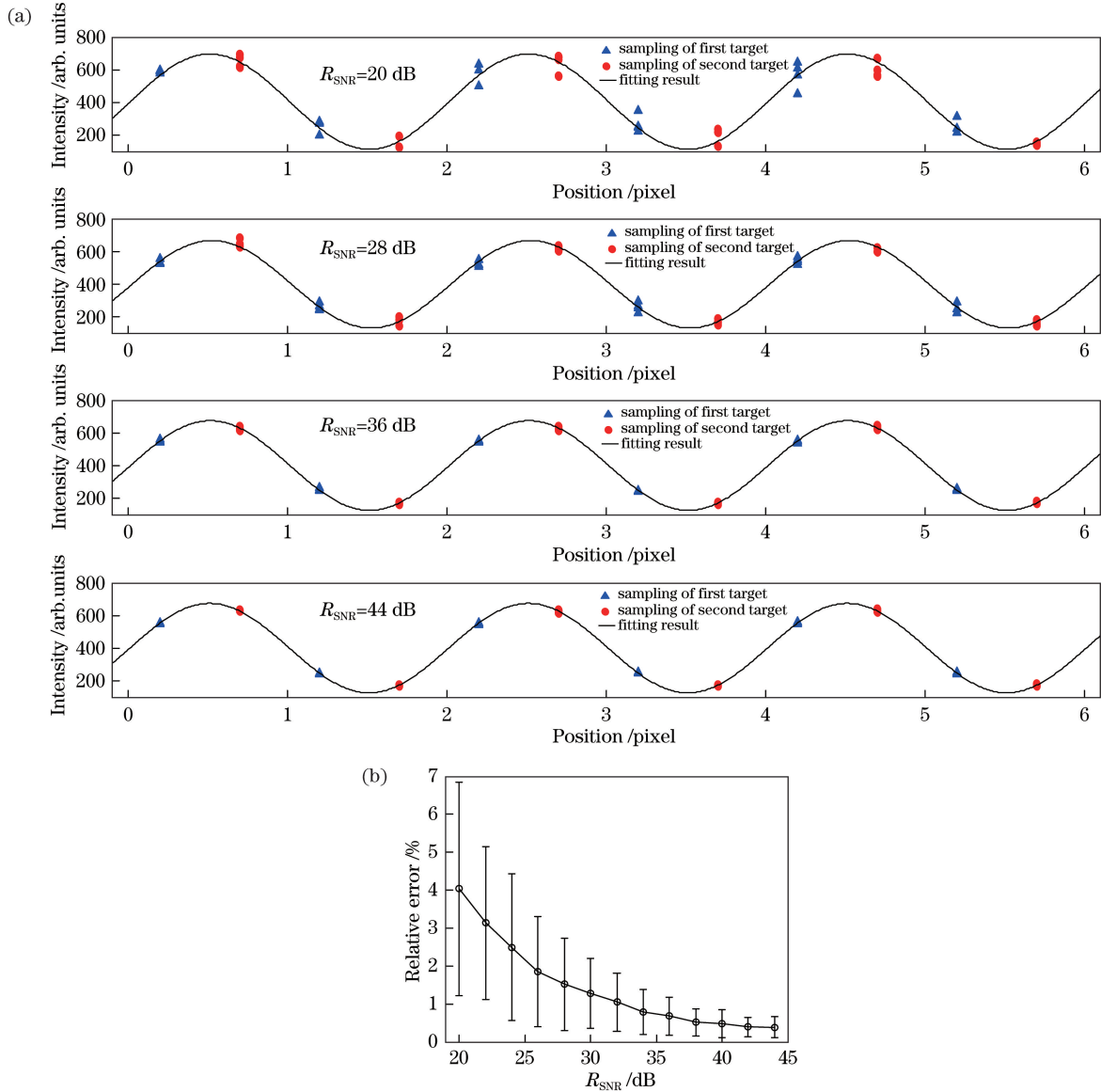


图 6 图像噪声对 MTF 测量误差的影响。(a)数据采样及拟合结果;(b) MTF 测量误差的变化
Fig. 6 Effect of imaging noise on MTF measurement error. (a) Sampling data and fitting results;
(b) variation of MTF measurement error

3.3.2 靶标周期匹配偏差的影响

考虑到成像时刻卫星轨道高度、姿态、非严格星下点成像等因素^[16],在地面沿轨方向和垂轨方向分别铺设的靶标周期 T 不能严格满足(6)式。根据卫星下传的轨道、姿态参数能够计算出实际周期 T' , (11)式的拟合形式可变为

$$z_1(x) = B + A \cdot \cos(2\pi f'x + \varphi), \quad (13)$$

式中: $f' = 1/T'$ 为实际频率。当 f' 接近 f_N 时,可以

计算得到 $F_{\text{MTF}}(f_N)$ 为

$$F_{\text{MTF}}(f_N) = F_{\text{MTF}}(f') + \frac{dF_{\text{MTF}}(f)}{df} \Delta f, \quad (14)$$

式中: $\Delta f = f_N - f'$ 为频率差。

由于 f' 接近 f_N (一般不超过 2%),由不同 MTF 形状(即 PSF 形式不同)引入的差异不大,可采用高斯形式来近似,得到补偿公式为

$$F_{\text{MTF}}(f_N) = F_{\text{MTF}}(f') \left\{ 1 + 2 \ln \left[F_{\text{MTF}}(f') \right] \frac{\Delta f}{f'} \right\}. \quad (15)$$

在图 7 所示的仿真结果中,选择 sinc^2 型 PSF, 利用(15)式进行补偿,可以得到不同周期偏差下的 MTF 测量误差。图 7(a)所示为 $T'/T=0.98$ 时得到的 2 组周期靶标采样数据及拟合结果。图 7(b)所示为 T'/T 在 0.95~1.05 变化时,拟合结果误差的变化。从分析结果可以看出,当存在 2% 的周期匹配偏差时,对 MTF 测量精度的影响小于 2%。

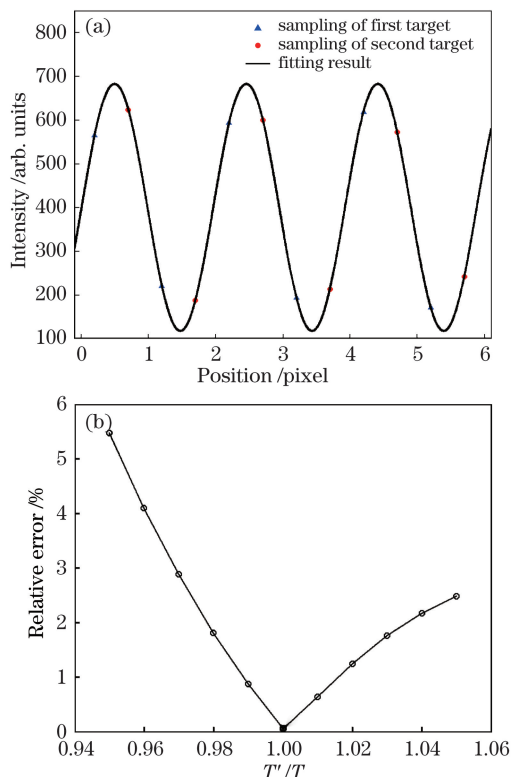


图 7 靶标条纹周期匹配偏差对 MTF 测量的影响。

(a)数据采样及拟合结果;(b) MTF 测量误差的变化

Fig. 7 Effect of target-periodic matching deviation on MTF measurement error. (a) Sampling data and fitting result; (b) variation of MTF measurement error

3.3.3 测量角度匹配偏差的影响

一般情况下,周期靶标铺设要求为沿轨方向和垂轨方向,实际成像时刻由于卫星姿态等因素的影响,存在一定的小角度偏差(小于 0.2°)。测量角度匹配偏差还会间接导致周期匹配误差,图 8 反映了它们之间的关系,可见,当角度匹配偏差较小时,周期匹配误差也很小,可以忽略。

因在拟合过程中未考虑角度匹配偏差,在利用多行采样点数据进行拟合时,认为同列数据具有相

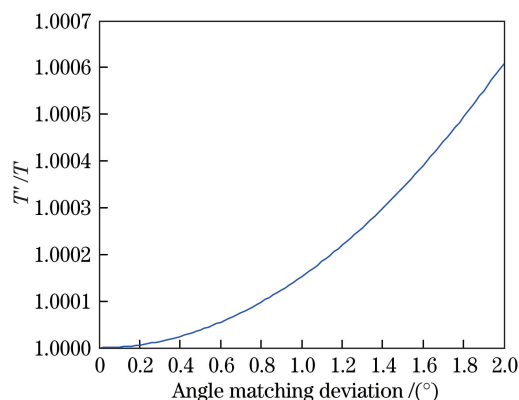


图 8 测量角度匹配偏差对周期匹配误差的影响

Fig. 8 Effect of measuring-angle matching deviation on periodic matching error

同的采样相位。图 9 所示为在不同角度匹配偏差下采用本文所提方法得到的 MTF 测量误差。图 9(a)所示为角度匹配偏差为 1° 时,2 组周期靶标采样数据及拟合结果;图 9(b)所示为角度匹配偏差为 $0.1^\circ \sim 1^\circ$ 时,MTF 测量误差的变化。由分析结果可知, 0.2° 的角度匹配偏差对 MTF 测量精度的影响小于 0.1%。

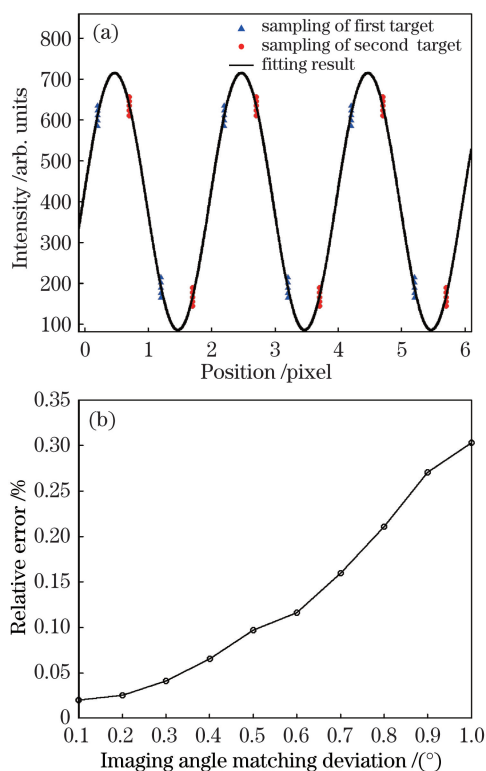


图 9 测量角度匹配偏差对 MTF 测量误差的影响。

(a)数据采样及拟合结果;(b) MTF 测量误差的变化

Fig. 9 Effect of measuring-angle matching deviation on MTF measurement error. (a) Sampling data and fitting result; (b) variation of MTF measurement error

3.3 在轨 MTF 实测分析

对某光学遥感相机进行在轨 MTF 测试^[14],在沿轨方向和垂轨方向各铺设了 5 组周期靶标,捕获的周期靶标图像如图 10 所示。



图 10 周期靶标遥感图像

Fig. 10 Remote sensing image of periodic ground targets

图 11(a)、(b)分别对沿轨方向和垂轨方向的周期靶标进行数据拟合的结果,计算得到 Nyquist 空间频率处的 MTF 值如表 2 所示。沿轨方向的 MTF 要远低于垂轨方向的 MTF 测试结果,这是因为在测试图像生成过程中叠加了线阵探测器存在的

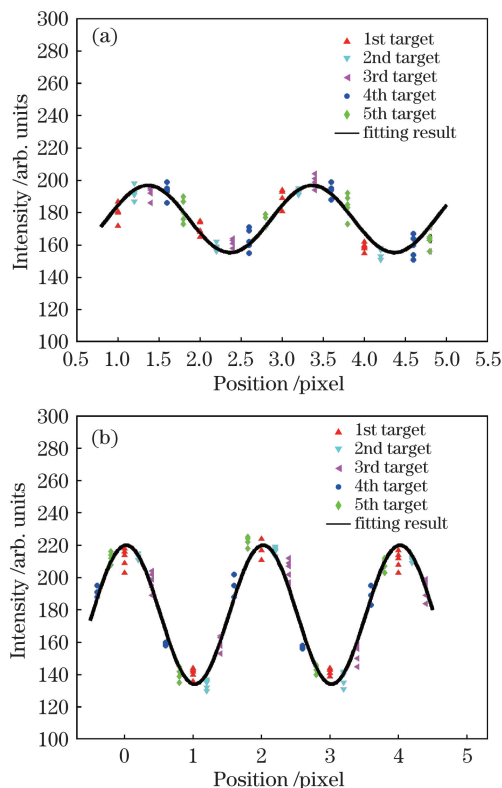


图 11 周期靶标采样数据及拟合结果。

(a) 沿轨方向;(b) 垂轨方向

Fig. 11 Sampling data of periodic targets and its fitting result.

(a) Along-track direction; (b) cross-track direction

表 2 不同种类靶标的 MTF 测试结果

Table 2 Results of MTF measurement using different types of ground targets

Types of ground targets	MTF	
	Proposed method	Slanted-edge method
Along-track	0.1031	0.1096
Cross-track	0.2175	0.2218

沿轨推扫成像积分转移 MTF 因子。

在图 10 所示的地面场景中,同时铺设有一组倾斜刃边靶标,通过倾斜刃边法计算得到的 MTF 曲线如图 12 所示。表 2 中分别将 2 种方法得到的 Nyquist 频率处的 MTF 值进行了比较,发现两者具有良好的一致性。该结果也进一步证明了所提方法的有效性。

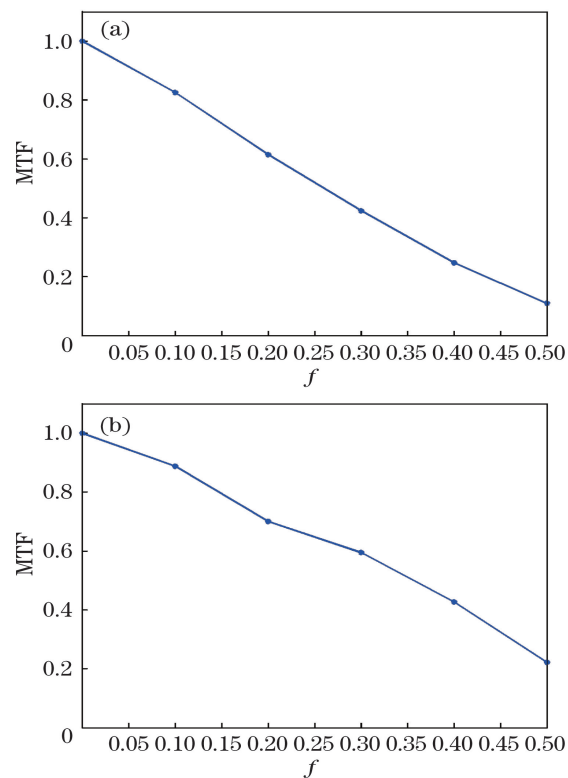


图 12 倾斜刃边法的测算结果。(a) 沿轨方向;(b) 垂轨方向

Fig. 12 Measured and calculated results from slanted-edge method. (a) Along-track direction; (b) cross-track direction

4 结 论

通过对传统的基于周期靶标的 MTF 测量方法原理进行深入剖析,提出了一种新的光学遥感相机在轨 MTF 测量方法。基于 CTF 与 MTF 的换算关

系,利用多组具有相位差异的采样数据进行参数拟合,得到了地面周期靶标经成像系统后的输出调制度,对比输入调制度即可计算 MTF。仿真结果表明:仅利用两组靶标,所提方法的理论测量误差已经小于 0.5%;当图像信噪比为 20 dB~45 dB 时,对测量精度的影响小于 4%(均值);当存在 2%的周期匹配偏差时,对测量精度的影响小于 2%;当存在 0.2°的测量角度匹配偏差时,对测量精度的影响小于 0.1%。实际光学遥感相机的实验表明,所提方法与倾斜刃边法具有良好的一致性,可以应用于高分辨率光学遥感相机的高精度在轨 MTF 测量。

参 考 文 献

- [1] Leger D, Viallefont F, Deliot P, *et al.* On-orbit MTF assessment of satellite cameras[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004: 67-76.
- [2] Liu Y Y, Li G N, Zhang Y, *et al.* Detection and record system of real time for static transfer function of the big visual field TDI CCD camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2515-2521.
刘妍妍, 李国宁, 张宇, 等. 大视场 TDI CCD 相机静态传递函数实时检测与记录系统[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2515-2521.
- [3] Guo H Z, Lü H Y, Qu L X. Relation of line transfer period error and dynamic MTF of TDI CCD in remote sensing camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 2195-2200.
郭汉洲, 吕恒毅, 曲利新. 遥感相机动态调制传递函数与时间延迟积分 CCD 行周期误差的关系[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 2195-2200.
- [4] Min M, Bai Y, Hu X Q, *et al.* Evaluation and comparison of modulation transfer function for FY-3B/C MERSI on early orbit[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1838-1844.
闵敏, 白玉, 胡秀清, 等. FY-3B/C 中分辨率光谱成像仪在轨初期传递函数的评价和比较[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1838-1844.
- [5] Xu W W, Zhang L M, Shen Z G, *et al.* On-orbit MTF estimation of high resolution satellite optical sensor[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(2): 97-111.
徐伟伟, 张黎明, 沈政国, 等. 高分辨光学卫星传感器在轨 MTF 检测[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(2): 97-111.
- [6] Guo L L, Wu Z P, Zhao Q C, *et al.* On-orbit modulation transfer function measurement of medium resolution spectral imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0428002.
郭玲玲, 吴泽鹏, 赵其昌, 等. 中分辨率光谱成像仪在轨调制传递函数测量方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0428002.
- [7] Nugent P W, Shaw J A, Kehoe M R, *et al.* Measuring the modulation transfer function of an imaging spectrometer with rooflines of opportunity[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(10): 103201.
- [8] Xu W W, Zhang L M, Si X L, *et al.* On-orbit modulation transfer function detection of high resolution optical satellite sensor based on reflected point sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0728001.
徐伟伟, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨调制传递函数检测[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0728001.
- [9] Olson J T, Espinola R L, Jacobs E L. Comparison of tilted slit and tilted edge superresolution modulation transfer function techniques[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(1): 016403.
- [10] Li T C, Tao X P, Feng H J, *et al.* Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2891-2897.
李铁成, 陶小平, 冯华君, 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2891-2897.
- [11] Liu C, Ding Y L, Tian D P, *et al.* Dynamic modulation transfer function analysis and research of image rotation for aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0211001.
刘超, 丁亚林, 田大鹏, 等. 航空相机像旋动态调制传递函数分析与研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0211001.
- [12] Xu W W, Zhang L M, Yang B Y, *et al.* On-orbit MTF measurement of high resolution satellite optical camera using periodic targets[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0711001.
徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于周期靶标的高分辨率光学卫星相机在轨 MTF 检测方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0711001.
- [13] Wang Q, Li X B, Li X H, *et al.* A research on MTF for on-orbit estimation and accuracy analysis based on three-bar method[J]. *Remote Sensing Information*, 2011, 26(1): 14-21.
王琦, 李显彬, 李晓辉, 等. 基于三线靶标法的在轨 MTF 评价方法及其精度分析研究[J]. *遥感信息*, 2011, 26(1): 14-21.
- [14] Gao Z Q, Wang X F. Measurement of resolution on-orbit of space remote sensing imaging system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(3): 28-33, 62.
高正清, 王险峰. 航天遥感成像系统像元分辨率在轨

- 检测方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(3): 28-33, 62.
- [15] He X J, Zhang G X, Zheng L L, *et al.* Testing error analysis of high resolution camera modulation transfer function[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 89-94.
贺小军, 张贵祥, 郑亮亮, 等. 高分辨相机传函测试误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(S1): 89-94.
- [16] Yang L H. Research on image restoration of space camera with wide field of view[D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 67-104.
杨利红. 大视场航天相机遥感图像复原研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2012: 67-104.