

室内模拟环境下动态调制传递函数检测方法

张维光¹, 于 洵², 韩 峰², 张发强¹, 吴银花¹, 陈玉娇²

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021;
2. 西安工业大学 兵器科学与技术学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 针对车载视觉智能感知、低空区域防务等光电成像系统远距离观测动态性能测评需求, 研制了室内运动目标模拟系统。基于线性移不变系统模型, 分析了“三杆靶”、“四杆靶”靶标 MTF 测量原理, 提出了一种基于变频栅条靶标的动态 MTF 检测方法, 给出了变频靶标设计方案和 MTF 解算方法。完成了“三杆靶”和变频靶标测量方法的静态和动态 MTF 对比测试实验。实验结果表明: 提出的变频靶标动态 MTF 检测方法, 在静态 MTF 检测时测量数据的相对最大偏差比率为 1.9%, 动态 MTF 检测时测量数据相对最大偏差比率为 2.8%, 是一种高精度数字化动态 MTF 检测方法。该方法可以从一幅靶标图像中解算出 MTF 曲线, 在动态 MTF 检测技术领域比“刀口法”、“三杆靶”、“四杆靶”等方法更具优势。

关键词: 光电成像系统; 动态调制传递函数; 变频栅条靶标; 模拟运动目标系统
中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210756

Test method of the dynamic modulation transfer function in an indoor analog environment

Zhang Weiguang¹, Yu Xun², Han Feng², Zhang Faqiang¹, Wu Yinhua¹, Chen Yujiao²

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;
2. School of Weapon Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Aimed at the requirements of remote observation dynamic performance evaluation of photoelectric imaging systems such as vehicle visual intelligent perception and low altitude regional defense, an indoor simulated moving target system was developed. Based on the linear space shift invariant system model, the MTF measurement principles with "three-bar target" and "four-bar target" were analysed. A measurement method of the dynamic modulation transfer function (MTF) was proposed for an optoelectronic imaging system based on a variable frequency target. A design scheme of a variable frequency target was introduced, the solution method of MTF value was proposed, and the static and dynamic MTF comparative test experiments were conducted for "three-bar target" and variable frequency target. The experimental results show that compared with the "three bar target" measurement method, the proposed frequency conversion target dynamic MTF measurement method has a relative maximum deviation ratio of 1.9% for static MTF measurement and 2.8% for dynamic MTF measurement. The method can solve the MTF curve from one target image and has more advantages than "knife edge method", "three-bar target", "four-bar target" and other methods in the field of dynamic MTF measurement technology.

Key words: photoelectric imaging system; dynamic modulation transfer function; variable frequency grating target; simulated moving target system

收稿日期: 2022-01-25; 修订日期: 2022-02-20

基金项目: 国家自然科学基金 (618051910); 航空科学基金 (202000190U1002)

作者简介: 张维光, 男, 副教授, 博士, 主要从事光电测试技术与系统、光电信息处理、嵌入式图像处理技术等方面的研究。

0 引言

在车载视觉智能感知、低空区域防务及星载机载遥感观测等动态成像技术领域,光电成像系统对运动目标的成像性能评估经常采用室内静态性能评估与室外测试相结合的方式。通过静态测试数据推演动态成像性能,推演条件确定难度大,技术可靠性、准确性低。室外测试技术因大气条件及周围环境随机性大,目标与环境关联关系相对单一,目标运动及目标特性参数精确获取与模拟存在许多技术难题,难以获得较为全面完整测试数据,通常只能获得定性测评结果^[1-2]。近年来,基于动态调制传递函数(dynamic Modulation Transfer Function, dynamic MTF)检测的光电成像系统动态性能数字化定量评价方法已成功应用于陆地车载视觉感知系统和星载机载遥感观测等领域。在星载机载遥感观测领域,通过在地面铺设周期性靶标对空间遥感相机进行 MTF 检测^[3];选用海岸线等非理想阶跃目标对星载成像光谱仪进行 MTF 检测^[4];选用天空中星体作为点光源对航空相机进行 MTF 检测^[5]。这些方法可以用于遥感相机等光电成像系统的超远距离动态成像性能评价。在车载视觉智能感知、低空区域防务等光电成像系统的远距离动态成像性能评估方面,经常采用等效距离下自然目标进行观测,获得定性评价结果。此外,基于模拟场景目标的动态 MTF 检测技术成为一个重要技术途径。这种技术因具有观测目标定制和易于实现数字化定量测量等优点,已取得许多研究成果。典型技术有通过研究低频正弦振动对光电成像系统的 MTF 影响,为光机电一体化系统设计提供系统误差分配的依据,实现系统的最优设计^[6-8]。应用辐射状靶标进行 4、8 K 高清成像系统 MTF 实时测量^[9]。这些动态 MTF 测量方法均是基于以上静态 MTF 测量方法提出的,增加了运动状态模拟系统及环境。由于测试条件发生重大变化,静态 MTF 测量方法应用于动态 MTF 检测,存在测量精度低、适应性不强等问题。倾斜刀口法在静态 MTF 检测领域获得了广泛应用,并有 ISO12233 国标进行规范^[10]。但其应用于动态 MTF 检测时,由于运动刀口的倾斜角度出现了较大的随机性、数据处理过程中需要克服这种随机因素,测量重复精度

低^[11-13]。经典的周期栅条法一次只能测量一个或几个数据点,采用更换不同频率测量靶标的方法测量动态 MTF 曲线,存在测量过程运动状态同一性难以保证等难题^[13]。

针对车载视觉智能感知、低空区域防务等光电成像系统远距离观测动态性能测评需求和现有技术动态 MTF 检测方面的缺陷与不足,文中设计了室内运动目标模拟系统,提出了基于变频栅条靶标的动态 MTF 检测方法,给出了变频靶标设计方案和 MTF 曲线解算方法,并完成了对比实验分析。

1 室内运动目标模拟系统

光电成像系统动态性能评估室外测试因易受大气条件及周围环境影响,观测目标有限,目标运动及目标特性参数精确获取难度大,全面完整测试数据获取困难,且费时费资金。开发室内运动模拟系统,可以实现运动目标与背景对比度、目标大小、形状、速度等特性参数设定功能,获得更全面的动态目标测量数据,可以在较大范围替代光电成像系统室外测试环节,实现测试的数字化定量化,提高测试效率并节约测试成本。室内运动目标模拟系统设计技术指标:模拟动态目标运动速度 0~120 km/h;动态目标最远模拟距离不小于 6 km;目标模拟光谱范围:0.4~1.7 μm ;平行光管口径: $\geq \Phi 150 \text{ mm}$;平行光管焦距: $\geq 1350 \text{ mm}$ 。

为了实现远距离(不小于 6 km)运动目标的模拟,系统采用平行光管焦平面运动目标模拟远距离目标。被测光电成像系统采集平行光管出射光束成像,分析其对远距离目标的分辨能力。研制完成的运动目标模拟系统见图 1。系统选用溴钨灯光源,光源可通过控制模块实现光强连续可调,积分球内选用反射材料,其在 0.4~1.7 μm 光谱范围内反射比接近 99%,积分球光出口处光照均匀性大于 98%。经检测,研制完成的平行光管焦距: $f=1492 \text{ mm}$,口径: $\Phi 180.2 \text{ mm}$;视场角: 1° ,反射式平行光管次镜与主镜波像差优于 $\lambda/15(\lambda=0.56 \mu\text{m})$,整机装配平行光管波像差优于 $\lambda/12$ 。焦平面运动目标最高速度为 10 mm/s(可以模拟 6 km 处 144.7 km/h)。运动目标分实物靶标和电子靶标两种。电子靶标应用振幅调制型透射式空间光调制器,可以通过程序控制模拟不同大小、形状和姿态的观测

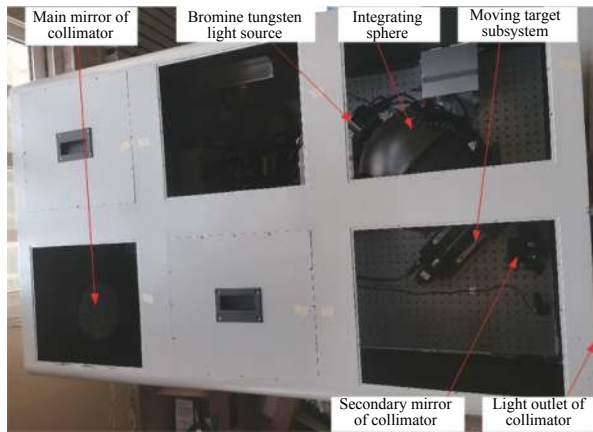


图 1 室内运动目标模拟系统

Fig.1 Indoor moving target simulation system

目标。实物靶标应用镀锌板等光学材料加工成“三杆靶”、“四杆靶”、“刀口靶”以及“周期栅条靶”等。

2 基于变频栅条靶标的 MTF 检测方法

由于经典的“三杆靶”、“四杆靶”、“周期栅条”靶标每次只能测量一个频率点的 MTF 值。对于动态 MTF 检测,需要更换不同频率的靶标,才能获得多个频率点的 MTF 值。这种更换靶标的方法在动态 MTF 检测过程中,不能确保数据采集过程中目标速率、光照条件等测试环境条件完全相同,影响了测量数据的可靠性。这一技术缺陷在目标和被测系统同时处于运动状态时更加突显。为了克服该类缺陷,在分析“三杆靶”、“四杆靶”定量测量 MTF 的理论基础上,提出了基于变频栅条靶标的动态 MTF 检测方法,完成了变频栅条靶标设计和基于变频栅条靶标的 MTF 解算方法研究。

2.1 “三杆靶”、“四杆靶”MTF 检测经典理论分析

当光学系统满足“等晕”条件时,经过理论分析光学系统具有线性和空间移不变特性。经典 MTF 检测理论是基于线性空间移不变系统模型和信号频域分析的理论发展形成的。经过推理,可以证明线性空间移不变系统具有信号同频传输性质,即单频信号经过线性空间移不变系统,信号的幅值可能发生变化,但其频率保持不变。

基于上述系统模型,可以对光电成像系统空间频率、带宽及分辨率等基本问题开展研究工作。以正弦波为输入信号,完成了 MTF 检测时,物方调制度、像

方调制度及 MTF 值的定义,形成了以正弦输入信号测量 MTF 的理论。另一种是以方波信号为输入信号,由于薄透镜成像的傅里叶变换性质,其像方是方波信号的傅里叶变换,应用线性空间移不变系统信号的叠加性和平移不变性,形成了“三杆靶”、“四杆靶”(见图 2)以及“周期栅条靶”MTF 检测理论^[14]。“三杆靶”MTF 值可以认为是同一方波信号通过平移,在空间三个不同位置的输出信号的叠加。“四杆靶”是同一方波在空间四个不同位置输出信号的叠加。“周期栅条靶”是同一方波信号在空间 N 个不同位置输出信号的叠加。由于“三杆靶”、“四杆靶”只包括单一频率的信号,其经常用于测量光学系统在 Nyquist 频率处 MTF 值。

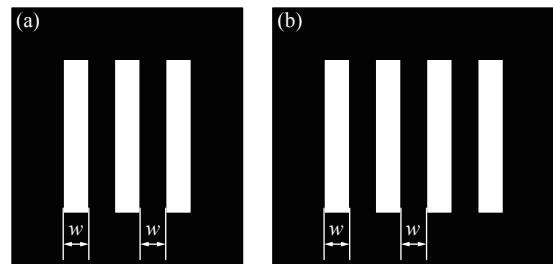


图 2 (a) “三杆靶”图案; (b) “四杆靶”图案

Fig.2 (a) "Three-bar target" pattern; (b) "Four-bar target" pattern

经过对方波及其空间平移信号傅里叶变换结果进行分析,“三杆靶”截面曲线傅里叶变换可表示为^[15]:

$$|F(f)| = \left| X \operatorname{sinc}\left(\frac{X}{2}f\right) \left[\cos(2\pi x f) + \frac{1}{2} \right] \right| \quad (1)$$

式中: X 表示栅条周期,即 $X = 2W$; $|F(f)|$ 如图 3 所示。

沿 $|F(f)|$ 曲线横轴从 $f = 0$ 开始,第一个 $|F(f)| = 0$ 处的频率为 $f/3$, f 为“三杆靶”靶标的频率,其对应的调制度 $|F(f)|$ 计算如公式 (2) 所示:

$$|M(f)| = |F(f)| / |F(0)| \quad (2)$$

“四杆靶”截面曲线傅里叶变换可用公式 (3) 表示:

$$|F(f)| = \left| X \operatorname{sinc}\left(\frac{X}{2}f\right) \cos(3\pi x f) + \cos(\pi x f) \right| \quad (3)$$

沿 $|F(f)|$ 曲线横轴从 $f = 0$ 开始,第一个 $|F(f)| = 0$ 处的频率为 $f/4$, f 为“四杆靶”靶标的频率,确定频率 f 处 $|F(f)|$ 值,用公式 (2) 可得“四杆靶”调制度值。

应用“三杆靶”“四杆靶”进行 MTF 检测时,则:

$$MTF(f) = M_{像}(f) / M_{物}(f) \quad (4)$$

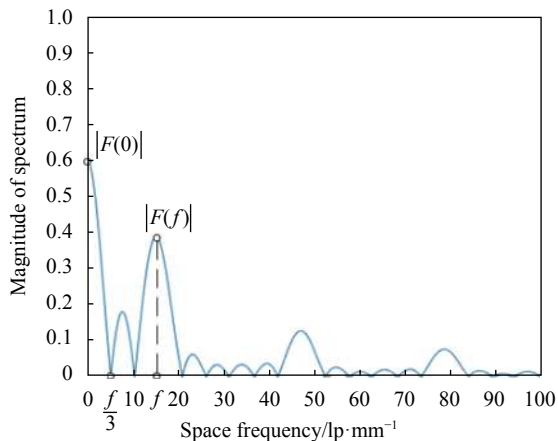


图 3 “三杆靶”频率及调制度解算原理图

Fig.3 Schematic diagram of frequency and modulation computing for "three-bar target"

2.2 变频栅条靶标设计方案及 MTF 值解算原理

在动态 MTF 检测时,为了确保 MTF 不同频率点数据采集的动态环境的一致性,提出基于变频靶标的动态 MTF 检测方法,给出了变频靶标设计方案。这种方法可以从动态模拟环境所采集的一幅图像中解算出 MTF 曲线上多组采样点的值,完成在动态环境中光电成像系统 MTF 曲线的测量。

2.2.1 变频栅条靶标设计方案

图 4 中,变频靶标采用空间频率逐渐增大或逐渐减少的栅条。图中 A 区域可截取形成近似“四杆靶”图案,B 区域截取形成近似“三杆靶”图案。A 区域相邻四条栅条图案如图 5(a) 所示,中间两个栅条的宽度相等均为 w 。左边栅条的宽度为 $w-\Delta$,与左边栅条相邻的非栅条区域宽度为 w 。右边栅条的宽度为 $w+\Delta$,与右边栅条相邻的非栅条区域宽度为 $w+\Delta$ 。 Δ 为栅条周期宽度变化增量。B 区域相邻三条栅条图案构成近似三杆靶如图 5(b) 所示,“三杆靶”(频率递增)图案的右边两个栅条的宽度相等,均为 w ,左边两栅条间的非栅条区域的宽度为 w ,左边栅条的宽度为 $w-\Delta$ 。

栅条周期宽度变化增量 Δ 决定了靶标各区域内空间频率变化量。在工程测试过程中,可以根据 MTF

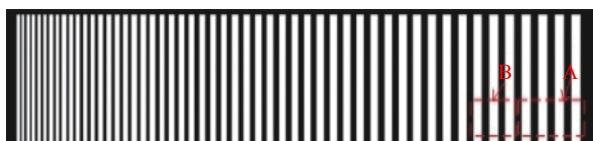


图 4 变频栅条靶标图案

Fig.4 Variable frequency grating target pattern

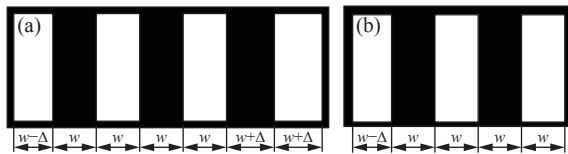


图 5 (a) 截取的近似“四杆靶”; (b) 截取的近似“三杆靶”

Fig.5 (a) Approximate "four-bar target"; (b) Approximate "three-bar target"

测试要求,选择不同的栅条宽度 w 和变化增量 Δ 组合,制作各种变化频率的栅条靶标。

对图 5(b) 中近似“三杆靶”截面曲线进行傅里叶变换后取模,如图 6 所示。

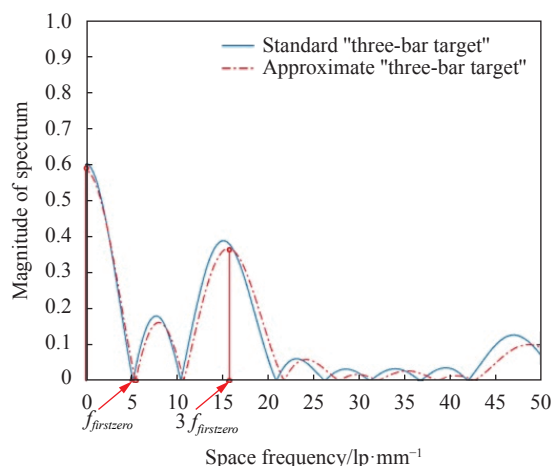


图 6 近似“三杆靶”频率及调制度解算原理图

Fig.6 Schematic diagram of frequency and modulation computing for approximate "three-bar target"

从变频靶标中截取的近似“三杆靶”,栅条周期因增量 Δ 而产生变化。图 6 中,从频率为零点开始,第一个频率过零点 $f_{firstzero}$ 相对 $f/3$ 位置减少了一定的量,也就是靶标频率发生了变化。近似“三杆靶”的调制度值可近似用公式 (5) 计算,得:

$$M(f) = |F(3f_{firstzero})|/|F(0)| \quad (5)$$

2.2.2 基于变频栅条靶标的 MTF 数据解算

根据上述变频靶标设计思想,MTF 曲线测量的各频率 f 的位置可以通过增量 Δ 进行设定。基于变频靶标的 MTF 检测数据采集与 MTF 曲线解算步骤如下:

(1) 根据对象 MTF 测试要求,设定栅条周期宽度变化增量 Δ ,控制 MTF 曲线检测点的位置,通过空间光调制器编程实现或制作实物变频栅条靶标。

(2) 在靶标沿栅条垂直方向运动情况下,采集栅

条靶标图像。

(3) 从采集图像中应用图像处理算法从左向右或从右向左连续截取形成“三杆靶”图像。

(4) 从所截取的“三杆靶”图像中沿栅条垂直方向选取一组(或多组)图像灰度值形成灰度值数组。

(5) 对每一组图像灰度值数组进行一维离散傅里叶变换,并对变换结果进行取模运算,获得图像灰度值数据的频域幅值曲线 $M_{\text{像}}$ 。

(6) 从频率为零点开始,沿频率增大的方向识别图像灰度值数据的频域幅值曲线值为零的第一个点,确定其频率为 $f/3$ 。

(7) 从图像灰度值数据的频域幅值曲线上确定频率为 f 处的 $M_{\text{像}}$ 值为 $M_{\text{像}}(f)$ 。若选取的是多组图像灰度值,则对各组图像灰度值数组所求得的 $M_{\text{像}}(f)$ 进行幅值求平均。

(8) 对物方变频靶标曲线数据,采用上述(3)至(7)相类似的过程解算各对应频率点的物方调制度 $M_{\text{物}}(f)$ 。

(9) 应用公式 $MTF(f) = \frac{M_{\text{像}}(f)}{M_{\text{物}}(f)}$ 计算出所截取的近似“三杆靶”图像代表的所有频率点的 MTF 值。

3 测试数据分析

车载视觉智能感知、低空区域防务等光电成像系统观测距离最远距离界于3~6 km之间,有的商用低空防务光电成像系统要求观测距离能达到7~8 km。选取某商用低空防务光电成像系统为测试对象,系统焦距为 300.5 mm,图像传感器的分辨率为 1080×1440,像元尺寸为 3.45 μm×3.45 μm。

对比测试“三杆靶”靶标是用镀锌板加工而成的实物靶标。经测定,镀锌板“白板”光通过率为 96%，“黑板”光通过率 0.5%。因此物方栅条对比度为 0.989,此时“三杆靶”调制度用公式(2)计算可得为 0.643。用于测试的“三杆靶”靶标频率从 1~20 lp/mm,相临两块之间频率相差 1 lp/mm,共 20 块靶标。模拟运动目标选用透射式空间光调制器,分辨率为 2048×1536,像元尺寸 26 μm,光能透过率为 55%。变频靶标最低频率为约 1 lp/mm 时,选定 $w=0.52$ mm (20 个空间光调制器像元),选定增量 $\Delta = 0.052$ mm (两个空间光调制器像元),采用图 5 中的递推方案,编程完成

变频靶标设计并将其输出在空间光调制器上。

3.1 静态 MTF 检测数据对比分析

静态 MTF 对比测试选用不同频率的“三杆靶”测试数据与文中提出的变频靶标 MTF 检测数据进行对比实验。由于运动目标模拟系统焦距为 $f_D = 1492$ mm,被测系统焦距离 $f_c = 300.5$ mm,则在光电成像系统中的栅条频率为靶标中栅条频率的 f_D/f_c 倍。实物靶标栅条频率范围为 1~20 lp/mm。对于被测光电成像系统,像平面栅条频率约为 5~100 lp/mm。由于变频靶标中“截取”的近似“三杆靶”频率点与标准“三杆靶”频率不完全相等,采用数据分析的重采样技术,以标准“三杆靶”测量数据点为插值曲线控制点,应用三次样条插值算法,获得变频靶标中各频率点的 MTF 值,然后进行对比分析。一组测量对比数据如图 7 所示。

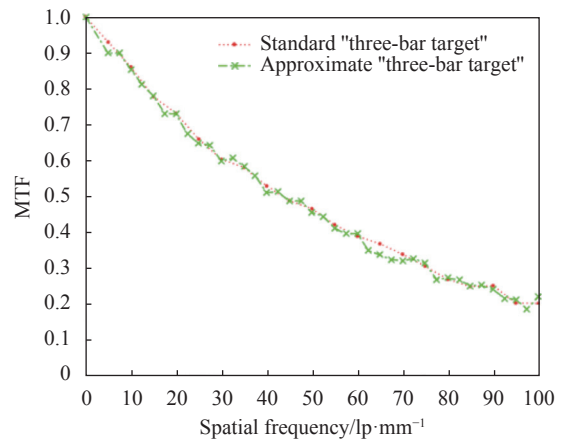


图 7 静态 MTF 曲线数据对比分析图

Fig.7 Comparative analysis of static MTF curve data

“三杆靶”靶标与变频靶标测量数据误差应用由以下公式进行评价。 $\Delta F(i)$ 为两种测量方法测量值差值的相对比率,用公式(6)计算,得:

$$\Delta F(i) = (F_i(f_i^a) - F_a(f_i^a)) / F_a(f_i^a) \quad (6)$$

式中: f_i^a 为像方应用变频靶标分割形成的近似“三杆靶”的频率; $F_a(f_i^a)$ 为应用变频靶标测得的 (f_i^a) 处 MTF 值; $F_i(f_i^a)$ 以标准“三杆靶”测量 MTF 值为插值曲线控制点,应用三次样条插值获得的 f_i^a 频率点处的 MTF 值。

$$\overline{\Delta F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta F(i) \quad (7)$$

式中: N 为数据点个数; $\overline{\Delta F}$ 为相对比率的均值。相对

比率的方差用公式 (8) 计算, 得:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta F(i) - \overline{\Delta F})^2} \quad (8)$$

应用公式 (7) 和 (8) 对图 7 中测量数据进行计算。在数据解算过程中, 每一个靶标截面数据均可解算出一个有效的 MTF 值。数据处理过程中单点 MTF 值的样本数量可以达到数百个, 选取成像系统中心视场上下各 100 行数据进行处理, 可以获得 200 个 MTF 检测样本数据, 其均值作为 $F_a(f_i^a)$ 。通过解算, MTF 曲线上 20 个采样点统计分析相对比率均值为 $\overline{\Delta F} = 0.012$, 相对比率方差 $\sigma = 0.007$, 表明在静态测试环境中, 变频靶标测试方法与“三杆靶”测试方法最大数据偏差比率为 1.9%。

3.2 动态 MTF 检测数据对比分析

动态 MTF 检测是指系统靶标在平行光管焦平面上往复运动时, 光电成像系统的 MTF。若选取 6 km 处目标以 120 km/h 速度运动, 进行空间位置等比例计算, 测量靶标在平行光管焦平面的运动速度为 8.3 mm/s。靶标在做往复运动过程中, 不断地做加速、匀速、减速运动, 在平行光管光轴附近范围内, 做匀速运动。测试设定靶标运行匀速运动速度为 8.3 mm/s, 动态 MTF 数据分析选取系统做匀速运动时的图像数据。

MTF 曲线解算过程如图 8 所示, 图 (a) 为采集到的运动电子靶标图像, 从图像数据中任取一行数据, 得到图 (b) 是对应的图像灰度值。可以看出, 栅条图像的最小灰度值不为零。通过识别极小值点后, 应用三次样条插值算法, 插值得到栅条图像最小值的包络线, 然后选取的一行图像数据与包络线做减法运算, 去除图像背景灰度, 使处理后的条纹灰度最小值为零, 见图 (c), 降低成像过程背景因素对 MTF 解算值的影响。为了消除栅条插值时的端点效应, 将选取的行图像数据两端截取一段进行周期延拓, 可以确保插值曲线在栅条图像有效数据范围内具有高精度。从低频向高频截取“三杆靶”曲线进行 FFT 运算, 计算分析出“三杆靶”频率 f 及 MTF(f)。

一组测量对比数据如图 9 所示。从图 9 可以看出, 针对动态目标系统的 MTF 值随频率加大下降非常迅速, 当像方空间频率小于 20 lp/mm 时, “三杆靶”

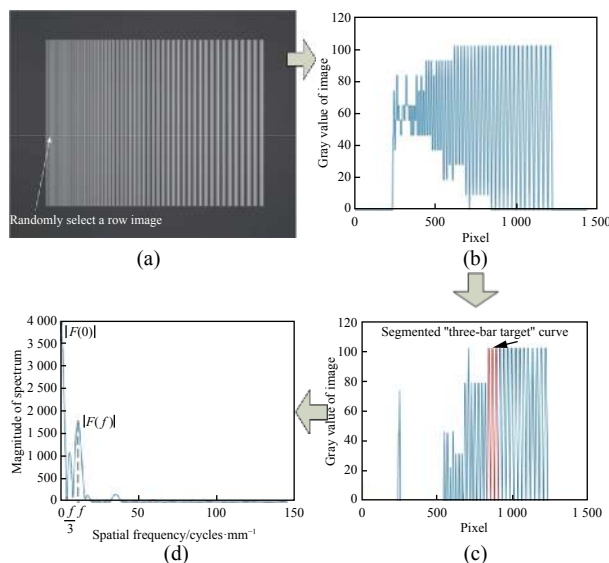


图 8 (a) 测试图像数据; (b) 任意一行图像数据; (c) 对行数据去背景处理后并截取任一近似“三杆靶”; (d) 对截取的“三杆靶”进行 FFT 运算

Fig. 8 (a) Test image data; (b) Randomly select a row image; (c) Segmented any approximate "three-bar target" curve after removed background gray; (d) FFT operation for "three-bar target"

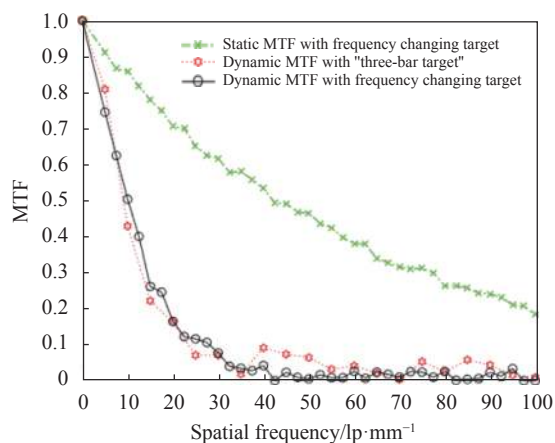


图 9 动态 MTF 曲线数据对比分析图

Fig.9 Comparative analysis of dynamic MTF curve data

测量方法与变频靶标方法测量数据一致性较好, 应用公式 (7) 和 (8) 计算小于 20 lp/mm 频率范围“三杆靶”和变频靶标两种方法的相对比率均值为 $\overline{\Delta F} = 0.015$, 相对比率方差 $\sigma = 0.013$, 低频段变频靶标测试方法与“三杆靶”测试方法最大偏差比率为 2.8%。当像方空间频率大于 20 lp/mm 时, “三杆靶”方法 MTF 值测量均值趋于稳定, 但变化幅度增大, 这主要是由于靶标运动, 成像过程空间目标与图像传感器像元之间相位

关系随机性成为主要影响因素,这时 MTF 值作为光电成像系统动态成像性能评价的参考价值大幅度下降。

应用动态 MTF 估计被测系统对目标的作用距离实例如下:测量系统在目标模拟运动速度 $V_1=60$ km/h (靶标运动速度 4.15 mm/s), $V_2=100$ km/h (靶标运动速度 6.92 mm/s), $V_3=120$ km/h (靶标运动速度 8.3 mm/s) 三种情况下的测试的动态 MTF 如图 10 所示,目标不同运动速度下的动态 MTF 曲线均有一个单调下降区间。以系统噪声引起测试数据方差大小为判据,判定 MTF 曲线单调下降末端的系统能够识别目标的截止频率分别为 f_1 、 f_2 、 f_3 ,大于截止频率的 MTF 曲线数据用于估计系统噪声所引起的测试数据方差。

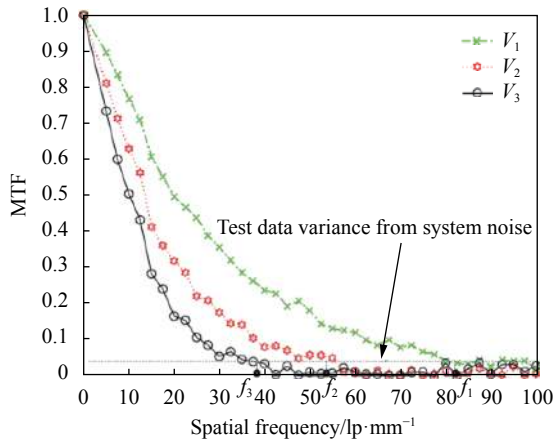


图 10 目标三种运动速度下测量的动态 MTF 曲线

Fig.10 Dynamic MTF curve measured at three moving speeds of the target

基于上述过程可以准确地判定应用栅条表征被识别目标最高频率及调制度,进一步计算出被测系统对运动目标的最小可分辨对比度 (Minimum Resolvable Contrast, MRC),应用光电成像系统目标作用距离模型^[16],选择能见度约 10 km(晴天,地平天空亮度与背景亮度比 $k=5$) 时,识别概率为 50% 时,系统的作用距离如表 1 所示。

经过测试数据分析,被测系统针对静目标,识别作用距离误差约为 1%,对于模拟运动速度 $V_3=120$ km/h 时,识别作用距离误差为 4.5%,随着目标运动速度增大,识别作用距离误差也逐渐增大,这主要是由于实测时,运动目标与测试环境两者随机因素综合影响,使测试评估误差增大。

表 1 目标不同运动速度下的识别距离

Tab.1 Recognition distance of target at different moving speeds

Target speed/km·h ⁻¹	Recognition distance/km
0	5.7
60	4.9
100	4.4
120	4.0

综上,这种基于室内运动模拟目标的动态 MTF 测试技术,在某商用低空防务光电成像系统动态成像评估过程中,在大范围内替代了产品的室外测试环节,大幅度降低了产品外场测试成本,同时对产品的作用距离进行评估,提高了产品动态成像性能评估效率。

4 结 论

针对车载视觉智能感知、低空区域防务等光电成像系统远距离观测动态性能测评需求,研制了室内运动目标模拟系统。同时提出了一种基于变频靶标的光电成像系统动态 MTF 检测方法。实验结果表明,文中提出的变频靶标动态 MTF 检测方法与“三杆靶”测量方法在静态与动态 MTF 检测方面测量数据差异均比较小,是一种高精度数字化动态 MTF 检测方法。这种方法可以从一幅靶标图像中解算出多个频率点的 MTF 值,完成 MTF 曲线数据的解算,确保 MTF 检测各频率点数据具有相同的动态测试条件,在动态 MTF 检测领域比“刀口法”、“三杆靶”、“四杆靶”等方法更具技术优势。这种基于室内模拟运动目标的动态 MTF 检测方法可以在较大范围替代光电成像系统室外测试环节,大幅度提升产品动态性能测试效率,同时有效地节约测试成本。

参考文献:

[1] Meng Wei, Jin Longxu, Li Guoning, et al. Application of MTF in remote sensing image restoration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1690-1696. (in Chinese)

[2] Chen L, Chen H L, Zhang P, et al. On-orbit modulation transfer function measurement based on lunar limb for TY-2 G [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(12): 3012-3018. (in Chinese)

[3] Wu Z P, Qu Y W, Zhao Q G. On-orbit measurement of

- modulation transfer function for optical remote sensing cameras based on periodic ground targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0728006. (in Chinese)
- [4] 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. (in Chinese)
- [5] Chen L X, Rao P, Sun Y Y, et al. On-orbit modulation transfer function measurement method of space cameras based on star points [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(16): 161102. (in Chinese)
- [6] Rudoler S, Hadar O, Fisher M, et al. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part II: Experiment [J]. *Optical Engineering*, 2016, 30(5): 577-589.
- [7] Hadar O, Dror I, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part IV: real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(2): 566-578.
- [8] Liu C, Ding Y L, Tian D P. Dynamic modulation transfer function analysis and research of image rotation for aerial camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0211001. (in Chinese)
- [9] Kenichiro Masaoka. Real-time modulation transfer function measurement system[C]//Proc of SPIE, 2019, 10943: 1094309.
- [10] Nicholas J M, Matthew P D, Bradley D D. Optical sparse aperture imaging [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(23): 5933-5943.
- [11] Li H, Yan C X, Shao J B, et al. High accuracy measurement of the MTF of electro-optical imaging system based on modified slanted-edge method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(12): 1211002. (in Chinese)
- [12] Li H, Yan C X, Yu P, et al. Measurement of modulation transfer function for IR imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 699-708. (in Chinese)
- [13] Li X S, Liu H X, Sun J X, et al. Measurement method of on-orbit modulation transfer function without atmospheric effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0711004. (in Chinese)
- [14] Kelly D H. Spatial frequency, bandwidth, and resolution [J]. *Applied Optics*, 1965, 4(4): 435-437.
- [15] Boreman G D, Yang Sidney. Modulation transfer function measurement using three- and four-bar targets [J]. *Applied Optics*, 1995, 12(1): 8050-8052.
- [16] Jin W Q, Gao S Z, Wang J H, et al. A model of predict range performance of imaging system for extended target based on minimum resolvable contrast [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(6): 1552-1556. (in Chinese)