

文章编号: 0253-2239(2008)09-1710-07

电子倍增电荷耦合器件的调制传递函数测量

冯志伟^{1,2} 程灏波³ 宋 谦¹ 尚媛园^{1,4}

(¹ 中国科学院国家天文台, 北京 100012; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039
³ 北京理工大学光电工程系, 北京 100081; ⁴ 首都师范大学信息工程学院, 北京 100037)

摘要 基于傅里叶功率谱理论, 提出应用随机白噪声图案透射靶标的测量方法分析倍增过程对系统调制传递函数的影响。通过建立系统综合模型, 给出了倍增调制传递函数的分析方法, 并利用实验测量获得了不同倍增增益时的倍增调制传递函数。实验结果表明, 与无倍增时相比, 倍增对系统调制传递函数的影响很大, 尤其是在高倍增增益时, 在 Nyquist 频率处, 调制传递函数平均下降达 30%。对实验中辅助成像光学系统的调制传递函数、混叠噪声和对焦判断的方法等也进行了讨论。

关键词 光学测量; 电子倍增电荷耦合器件; 调制传递函数; 随机白噪声靶标

中图分类号 TH741.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1710

Modulation Transfer Function Measurement of Electron Multiplying CCD

Feng Zhiwei^{1,2} Cheng Haobo³ Song Qian¹ Shang Yuanyuan^{1,4}

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
⁴ College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 1000379, China

Abstract Based on the Fourier power spectrum theory, a measurement method by means of a random white-noise pattern transparent target was presented to analyze the effect of electron multiplication (EM) on the modulation transfer function (MTF) of electron multiplying charge-coupled device (EMCCD). By building an integrated system model of EMCCD, the multiplication MTFs at different multiplication gain were measured and discussed in experiments. The experimental results show that the electron multiplication process significantly influences the system MTF, compared with non-EM, especially at high EM gain. MTF declines by an average of about 30% at Nyquist frequency. The MTF and noise of auxiliary imaging optical system and the method of focusing judgment in experiment were also discussed.

Key words optical measurement; electron multiplying CCD; modulation transfer function; random white-noise target

1 引 言

电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)采用片上增益技术,克服了读出放大器噪声对信号的影响,大大提高了信噪比。与传统的微光成像系统 ICCD 相比,电子倍增电荷耦合器件成像环节的减少有利于成像质量的提高,已对其光电特性和应用前景开展了大量的研究^[1-7],但对成像性能及评价方法的研究却未见相关报道。调制传递函数(MTF)可定量

描述各空间频率处成像质量的信息,是评价光学成像系统成像性能的一个重要指标。由于 EMCCD 采用在电荷域撞击离子化获得高倍增增益的技术,因此信号电荷在系统的传递过程中,不仅要受电荷扩散、离散采样和电荷转移等因素的影响,还要受电荷倍增带来的影响。影响 MTF 的机制比较复杂,从理论上给出其解析式还存在一定的困难,而建立 EMCCD 的系统综合模型,利用实验的方法分析

收稿日期: 2008-01-07; 收到修改稿日期: 2008-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(10603009)资助课题。

作者简介: 冯志伟(1968—),男,博士研究生,主要从事天文探测器性能测试及评估等方面的研究。

E-mail: zhwf@bao.ac.cn

导师简介: 宋 谦(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事天文探测器方面的研究。E-mail: sq@bao.ac.cn

MTF 不失为一种有效的研究手段。

焦平面阵列成像器件 MTF 测量的方法有很多,常用的有狭缝法、刃边法(亦称刀口法)和图形靶法^[8,9]等,这些方法都是以确定性函数信号为靶标信号,通过比较输出与输入信号的频谱,获得成像系统的 MTF,即基于傅里叶(Fourier)频谱的方法。然而,频谱法测量得到的 MTF 结果只是从几个像元的频谱获得,受噪声影响较大,并且固定图案靶标还存在靶像与采样阵列(像元)相位匹配的问题。由于 EMCCD 的电荷倍增是一个随机过程,导致显著的噪声方差^[10],而在信号电荷的倍增转移过程中,系统的 MTF 也将因电荷包中电荷密度的随机涨落而产生随机扰动,输出图像受到严重“污染”。这种通过输出图像中几个像元的频谱获得系统 MTF 的方法将受到限制。为此,本文针对 EMCCD 的特点,基于傅里叶功率谱技术,采用随机白噪声图案透射靶标完成了 EMCCD 的 MTF 测量的实验研究。

2 功率谱方法的原理和实现

2.1 基本原理

假设输入信号是一平稳随机过程,对于满足线性和时间空间不变性的成像系统,根据功率谱密度定义和 Pasval 定理^[11],在傅里叶域有

$$E[|I(u,v)|^2] = E[|O(u,v)|^2] \cdot |H(u,v)|^2, \quad (1)$$

式中 $H(u,v)$ 为系统响应函数的傅里叶变换,即系统的光学传递函数,其模 $|H(u,v)|$ 称为调制传递函数,表示了被系统传递谐波成分调制度衰减的程度。而 $E[|I(u,v)|^2]$ 、 $E[|O(u,v)|^2]$ 分别为输出和输入信号的功率谱密度,并设输出功率谱密度 $D_{\text{out}}(u,v) = E[|I(u,v)|^2]$ 和输入功率谱密度 $D_{\text{in}}(u,v) = E[|O(u,v)|^2]$,则

$$D_{\text{out}}(u,v) = D_{\text{in}}(u,v) \cdot |H(u,v)|^2, \quad (2)$$

$$\text{有 } |H(u,v)| = \sqrt{D_{\text{out}}(u,v)/D_{\text{in}}(u,v)}. \quad (3)$$

(3)式表明,如果已知输入信号的功率谱,就可以通过计算输出信号的功率谱获得系统的 MTF,基于该原理的 MTF 测量方法统称为傅里叶功率谱方法。

对于阵列成像器件, $D_{\text{out}}(u,v)$ 可通过对输出图像中各行或各列分别进行傅里叶变换并取模平方,然后计算行或列的均值获得,因此,基于傅里叶功率谱的方法可以获得整个阵列的统计 MTF。

2.2 方法的实现

傅里叶功率谱方法的关键是已知功率谱密度分布的随机信号靶标的获得。G. Boreman 等^[12,13]发展

了激光散斑法。虽然可以获得整个阵列的统计 MTF,且不需要高质量的辅助成像光学系统,但由于相干光的单色性,测量得到的仅是单一波长下的 MTF。对于光电探测器件,不同波长光子在半导体材料中的扩散长度不同,因此激光散斑法测量的结果不具有普遍意义,且激光散斑法还存在相干噪声高、对狭缝孔径尺寸及测试系统单元的相对位置的精度要求高和数据处理复杂等缺点。为了克服激光散斑法的不足,A. D. Ducharme 等^[14,15]提出了随机白噪声图案透射靶标的方法,获得一具有均匀限带白噪声分布、不相关二维随机图案数据集,然后将该数据集转录复制在照相底片上,制作完成白噪声随机图案透射靶标。当用均匀非相干光源照射该靶标一端时,在靶标的另一端将产生均匀分布的随机白噪声图案。

基于功率谱方法,张旭升等^[16]提出了利用液晶显示器生成随机条纹靶标的方法,但生成的随机信号是一维的,无法通过一次测量获得阵列器件二维 MTF,另外还存在探测器阵列与随机条纹方向对准的问题,并且产生误差的因素多,数据处理难度大,显示器也无法实现单色光下的 MTF 测量。

随机白噪声定义为均值为零、功率谱密度为常数的平稳随机过程。若输入随机信号是限带白噪声,即在有限空间频率内,其功率谱为常数,由(2)式有

$$D_{\text{out}}(u,v) = A |H(u,v)|^2. \quad (4)$$

式中 A 为常数。则归化后的 MTF 为

$$|H(u,v)| = \sqrt{D_{\text{out}}(u,v)}. \quad (5)$$

从(5)式可见,随机白噪声图案透射靶标方法只需计算输出信号的功率谱。

根据靶标设计不同,随机白噪声图案靶标分为连续谱和离散谱两类。本文实验中采用的靶标是连续谱图案透射靶标。

3 系统综合模型

典型帧转移 EMCCD 的成像区、存储区、读出(转移)寄存器和片上读出放大器采用传统 CCD 的设计,只是在读出寄存器与放大器之间延伸出一个称为倍增寄存器的串行寄存器,用于倍增信号电荷。当信号电荷包顺序通过每个倍增单元时,由于高的电势差,信号电荷要经历一个撞击离子化雪崩倍增的过程,电荷包内的电子数目增加,即获得倍增增益(EMG)。

按照 EMCCD 的结构特点,可将其看成是由传统 CCD 和倍增寄存器两部分组成的系统。图 1 为 EMCCD 系统信号传递模型框图。系统总的 MTF

等于各子系统 MTF 的乘积^[17],故 EMCCD 的系统模型可表示为

$$MTF_{EMCCD} = MTF_{CCD} MTF_{EM}, \quad (6)$$

式中 MTF_{EM} 为倍增寄存器的综合 MTF, MTF_{CCD} 为传统 CCD 的综合 MTF^[18~21]。

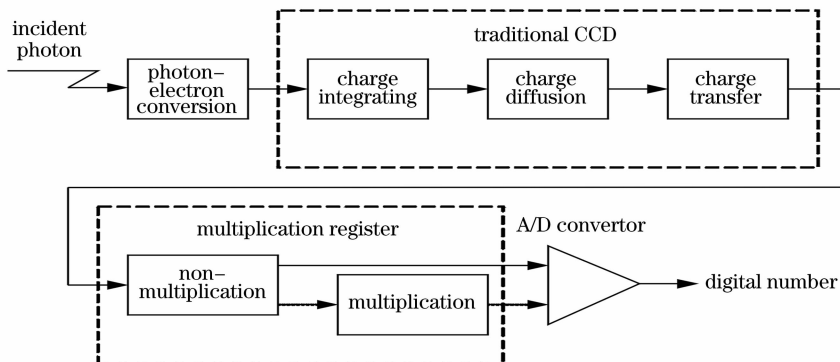


图 1 EMCCD 系统信号传递模型框图

Fig. 1 Block diagram of the signal transfer model for EMCCD system

为了研究倍增过程对系统 MTF 的影响,将 MTF_{EM} 按无倍增和有倍增两种情况分别讨论。无倍增时,增益寄存器只起到转移寄存器的作用, $MTF_{EM} = MTF'_{EMG}$, MTF'_{EMG} 为无电子倍增时的 MTF,有倍增时,增益寄存器既起到转移寄存器的作用,也起到倍增的作用,而倍增过程影响 MTF 的因素较为复杂,既有电荷的扩散,也有转移效率的变化,在理论上建立其解析模型还存在一定的困难,故用 MTF_{EMG} 表示倍增过程对系统 MTF 的综合影响,简称为倍增 MTF。有倍增时, MTF_{EM} 可看作是 MTF'_{EMG} 和 MTF_{EMG} 共同作用的结果,即

$$MTF_{EM} = MTF'_{EMG} MTF_{EMG}. \quad (7)$$

为了与有倍增时相区别,令 MTF'_{EMCCD} 表示无倍增时 EMCCD 的系统 MTF:

$$MTF'_{EMCCD} = MTF_{CCD} MTF'_{EMG}. \quad (8)$$

而有倍增时系统的综合模型为

$$MTF_{EMCCD} = MTF_{CCD} MTF'_{EMG} MTF_{EMG}. \quad (9)$$

由(8)式和(9)式,可以得到

$$MTF_{EMG} = MTF_{EMCCD} / MTF'_{EMCCD}. \quad (10)$$

根据(10)式,实验中通过改变倍增寄存器的增益设置,可获得不同倍增增益时的 MTF_{EMG} ,进而分析倍增过程对 MTF_{EMCCD} 的影响。倍增寄存器设置为 0,即无倍增增益时,测量得到的就是 MTF'_{EMCCD} 。

4 实 验

4.1 实验装置

实验选用的 EMCCD 为 Cascade 650,该相机的

单放大器设计的 EMCCD,无论有无倍增,信号电荷包均须顺序通过倍增寄存器,只是在无倍增时,倍增寄存器只起到移位寄存器的作用,但转移单元的增加将导致信号电荷转移效率的下降,最终影响系统的 MTF。

芯片为前照式、帧转移结构,像元数目 $653 \text{ pixel} \times 492 \text{ pixel}$,像元大小 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$,填充因子约为 100%,16 位模/数转换器,半导体热电制冷。读出放大器共有三个设置可供选择,读出速率为 5 MHz 和 10 MHz。倍增设置为软件控制(0~4095)。实验中选择倍增模式 3# 设置,读出速率为 5 MHz,工作温度 $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

利用随机白噪声透射靶标测量 EMCCD 的 MTF 的实验系统如图 2 所示,该系统搭建在暗室内的气浮光学平台上。

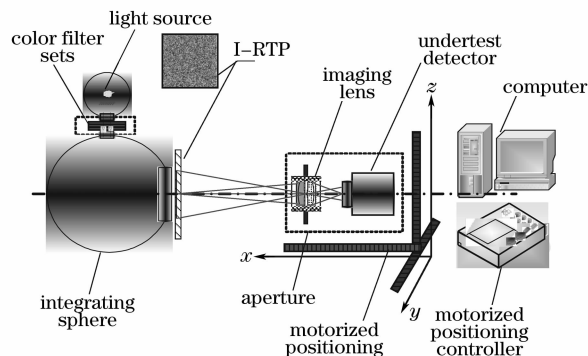


图 2 MTF 测量系统示意图

Fig. 2 Scheme of the MTF measurement system

4.2 测试方法

光源通过积分球入口进入涂布漫反射材料的积分球,在出口处输出一均匀非相干光(均匀性非常重要),照射在随机白噪声图案透射靶标上,在靶标的另一面产生随机白噪声图案。

通过与电移台控制器相连的计算机,驱动三维电

控位移台,调整 EMCCD 与靶标的相对位置,选择适当的成像放大倍率并完成对焦,靶标图案经光学系统后成像在位于像面上的 EMCCD 的光敏面上。

设置适当的曝光时间,完成 EMCCD 的曝光成像,通过图像采集卡将图像以数字形式记录下并保存在计算机里,用于下一步的数据计算和分析。曝光时间的选择必须保证输出信号在线性动态范围内,尤其是 EMCCD 在倍增状态下。

利用光源与积分球间的滤光片组,可根据测试需要,选择适当的入射光波长。由于倍增过程不受入射光波长影响,为了方便,实际测量中直接选用白光作为入射光源。

1) 混叠噪声

为了避免引入混叠噪声,影响测量结果的精度,实验中需要选择适当的放大倍率。设靶标像素的间距为 l ,且 $l=hM/N$, h 为靶标一维方向的物理尺寸, N 为靶标一维方向的像素数, M 为成像系统的放大倍率,而靶标函数像的最大频率为 $f_{\max}=1/(2l)$ 。

可见,在 h 和 N 固定不变时,可通过调整成像镜的放大倍率选择靶标函数像的最大频率,满足待测 EMCCD 对功率谱带宽的测量要求。需要注意的是,靶标函数像的最大频率要保证不大于 EMCCD 的 Nyquist 频率,否则将引入混叠噪声。实验选用 EMCCD 的 Nyquist 频率为 $F_N=1/(2d)=1/(2\times 7.4)\text{ lp/mm}\approx 67.57\text{ lp/mm}$ 。

2) 最佳对焦的判据

对焦是指 EMCCD 的光敏面是否位于成像光学系统的最佳像面上。离焦对 MTF 测量结果的影响非常大,为保证测量结果的准确性,需要寻找一个最佳对焦的判据。由于采用随机白噪声作为靶标函数,因此根据白噪声功率谱的特性,分别选择 $1/2F_N$ 、 $1/4F_N$ 和 $3/4F_N$ 频率处的功率谱作为对焦的判据。在焦点附近微调并采集多幅图像,上述几个频率处功率谱平均最大为最佳对焦像。没有选择通常采用的特征频率 F_N 处的功率谱作为对焦判据,是因为该频率处易受到混叠噪声的影响,带来对焦误差。

4.3 辅助成像光学系统的 MTF

利用图 2 所示的测量系统,MTF 测量的结果实际上是成像光学系统(光阑和成像透镜)的调制传递函数 MTF。加上 EMCCD 的 MTF,表示为

$$\text{MTF}_T = \text{MTF}_O \times \text{MTF}_{\text{EMCCD}},$$

因此,在进行 EMCCD 的 MTF 测量前,首先需要辅助成像光学系统的 MTF 定标。

辅助成像光学系统的 MTF 测量完成于北京理

工大学光学检测实验室,测量采用星点测试法。针孔置于平行光管焦面上,经由准直镜构成无限远目标,经被测物镜成像。测量时针对特征频率 50 lp/mm 寻找最佳像面。根据 EMCCD 的 MTF 测量的实际需要,在白光和光阑设置为 $F/2.8$ 时,分别测量了轴上(0°)和轴外(5°)的子午和弧矢方向的 MTF,测量结果如图 3 所示,字符 S,T 表示弧矢和子午方向。

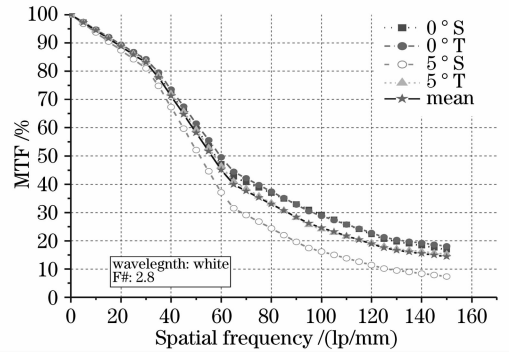


图 3 光学系统的 MTF

Fig. 3 MTF of optical system

实际应用中,EMCCD 的 MTF 测量是对输出图像整个阵列的数据求平均功率谱,因此采用成像光学系统测量结果的平均 MTF 定标,平均值 MTF 如图 3 所示。

4.4 数据处理

首先,读入 EMCCD 记录的随机靶标图像,减本底和平均像素值。然后,对每一行进行一维傅里叶变换,并取模的平方,得到每一行的功率谱密度 N_x 。最后,累加平均后开方,得到 X (水平)方向的平均功率谱密度,即为 MTF_x 。同样的方法,将行和列(X 和 Y)互换,可获得 Y (垂直)方向的 MTF_y 。

利用上述处理后的数据结果做图:以 MTF 为 y 轴;以空间频率为 x 轴,空间频率的表示方法:如对于探测器阵列 x 方向,频率为 $\xi(l)=l/(d_x N_x)$ 。这里, d_x 为探测器在水平方向上的一个探测单元的宽度, l 为阵列给定值 $0\sim(N_x/2)-1$;按最低频率项归一化 MTF;对曲线进行多项式拟合。

4.5 实验结果与分析

由于每个信号电荷包均需顺序通过倍增寄存器,倍增过程对水平和垂直方向 MTF 的影响相同,因此对 EMCCD 的研究只需考虑其中一个方向。

从分析可知,白噪声靶标方法直接测量获得的值实际上是 EMCCD 与光学系统的 MTF。图 4 为不同倍增寄存器设置值时,EMCCD 与光学系统的 MTF,可见,因离散采样成像固有的混叠噪声的影响,在大于 F_N 频率处,MTF 曲线有明显的起伏过

程,但不影响有用频率区内 MTF 的测量结果。

图 5 为 EMCCD 对靶标所成的像。

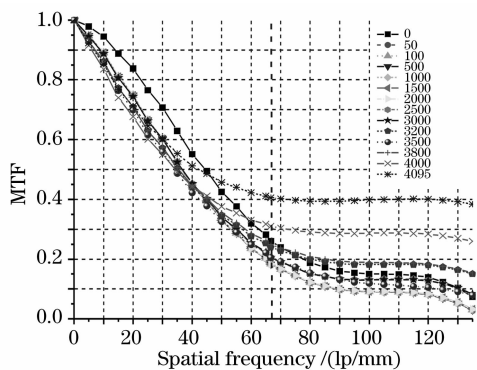


图 4 倍增寄存器不同设置值时 EMCCD 与光学系统的 MTF
Fig. 4 MTFs of EMCCD and optical system at different electron multiplication gain (EMG) setting

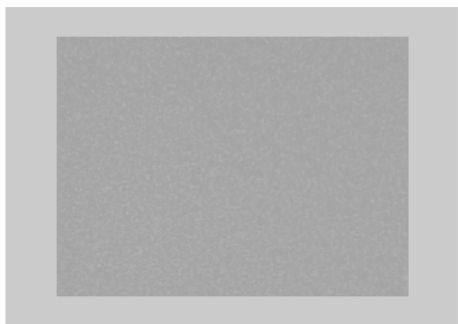


图 5 EMCCD 所成的靶标像

Fig. 5 Image of targets recorded by EMCCD

利用图 3 中辅助光学系统测量标定的平均 MTF 数据,分别计算得到了不同倍增寄存器设置值时 EMCCD 的 MTF,如图 6 所示。由于在实际应用中很少用到大于 3500 的设置值,此时信号极易饱和,呈严重的非线性,且噪声因素的影响也很大,MTF 没有意义,不再给出。又由于大于 F_N 频率时,混叠噪声的存在,其 MTF 也没有意义,也不再给出。

由图 6 可见,倍增寄存器设置值大于 0 时,与设

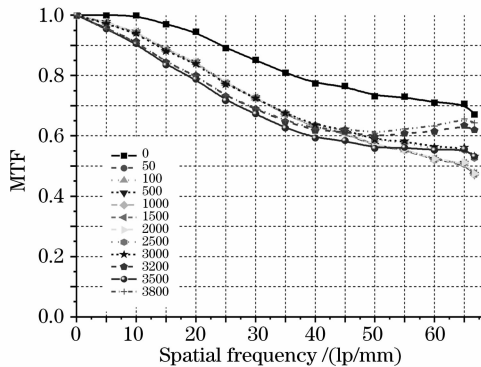


图 6 倍增寄存器不同设置值时 EMCCD 的 MTF
Fig. 6 MTFs of EMCCD at different EMG setting

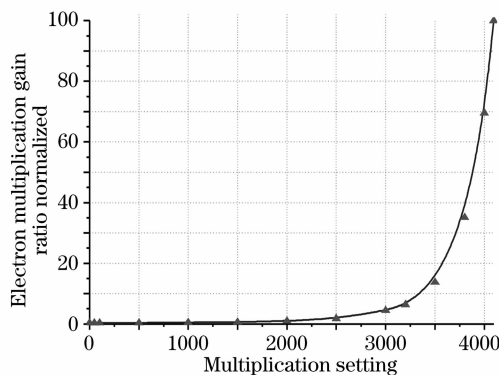


图 7 倍增寄存器不同设置值时 EMCCD 的倍增增益

Fig. 7 EM gain of EMCCD at different EMG setting

置值为 0,即无倍增增益时相比,EMCCD 的 MTF 曲线显著下降,在 F_N 频率处平均下降达 30%,说明倍增过程对系统 MTF 具有显著影响;倍增设置值在大于 0,而小于 2000 区间内,EMCCD 的 MTF 曲线几乎没有变化。这是因为在此设置值区间倍增增益值变化不大,即时钟驱动电压变化的幅度很小,从而影响系统 MTF 的各种因素的变化也很小;倍增设置值在大于 2000 后,随着设置值的逐渐增大,EMCCD 的 MTF 曲线总体呈逐渐下降的趋势。这是因此区间内随着设置值的逐渐增大,倍增增益迅速增大,且增加幅度很大,导致电荷扩散更加严重,转移效率下降也更加严重,而此时器件的线性也变差。但此区间内, F_N 处附近的 MTF 曲线却随设置值的增大而略有上扬,这是因高倍增增益时高频段附加噪声的幅度谱显著提高。为了进一步说明,测量了 EMCCD 的倍增寄存器设置值与倍增增益的关系,如图 7 所示。

利用(10)式,计算得到了倍增寄存器不同设置值时的倍增 MTF,即 MTF_{EMG} ,计算结果如表 1 所示。为便于分析,图 8 为根据表 1 数据所作的图。

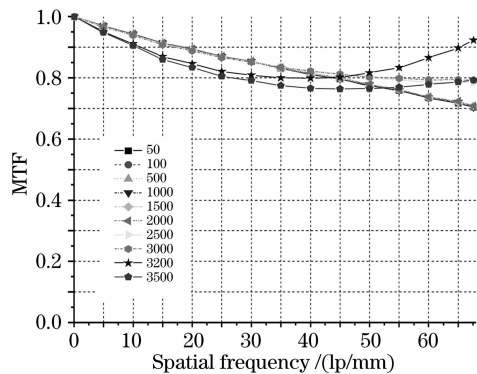


图 8 根据表 1 数据作的倍增寄存器不同设置值时的倍增 MTF

Fig. 8 Multiplication MTF at different EMG setting according to the data in Table 1

表 1 倍增寄存器不同设置值时的倍增 MTF
Table 1 Multiplication MTF at different EMG setting

Spatial frequency/ (lp/mm)	Multiplication setting									
	50	100	500	1000	1500	2000	2500	3000	3200	3500
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5	0.9693	0.9693	0.9693	0.9693	0.9693	0.9693	0.9693	0.9673	0.9663	0.9509
10	0.9429	0.9429	0.9429	0.9429	0.9429	0.9429	0.9439	0.9397	0.9386	0.9111
15	0.9133	0.9133	0.9133	0.9133	0.9133	0.9133	0.9144	0.9099	0.9077	0.8694
20	0.8938	0.8926	0.8938	0.8920	0.8938	0.8950	0.8902	0.8878	0.8878	0.8461
25	0.8693	0.8693	0.8693	0.8693	0.8693	0.8706	0.8667	0.8654	0.8209	0.8052
30	0.8529	0.8529	0.8529	0.8529	0.8529	0.8543	0.8529	0.8515	0.8091	0.7907
35	0.8315	0.8315	0.8315	0.8315	0.8315	0.8331	0.8347	0.8347	0.7997	0.7743
40	0.8113	0.8113	0.8131	0.8113	0.8131	0.8149	0.8203	0.8221	0.7986	0.7659
45	0.7960	0.7960	0.7980	0.7960	0.7980	0.8000	0.8101	0.8121	0.8020	0.7636
50	0.7741	0.7765	0.7765	0.7765	0.7765	0.7788	0.8000	0.8024	0.8165	0.7647
55	0.7586	0.7586	0.7586	0.7586	0.7613	0.7613	0.7931	0.7984	0.8329	0.7692
60	0.7344	0.7375	0.7344	0.7344	0.7375	0.7375	0.7844	0.7938	0.8656	0.7781
65	0.7163	0.7199	0.7199	0.7199	0.7199	0.7234	0.7837	0.7943	0.8972	0.7872
67.6	0.7039	0.7077	0.7039	0.7039	0.7077	0.7077	0.7846	0.7923	0.9231	0.7923

5 结 论

从傅里叶功率谱理论出发,利用随机白噪声图案透射靶标实现了 EMCCD 的 MTF 测量。以随机白噪声作为靶标函数,不仅可获得被测成像系统的统计 MTF,而且避免了传统的基于傅里叶频谱的测试方法存在的相位问题,数据处理也非常简单。

对测量系统中的辅助成像光学系统的调制传递函数进行了定标测量,并根据焦平面阵列器件统计调制传递函数测量的特点,提出了利用辅助成像光学系统平均调制传递函数的方法。为减小离焦对测量结果的影响,根据随机白噪声靶标的功率谱密度是一个常数的特性,选择输出图像的 $1/2F_N$ 、 $1/4F_N$ 和 $3/4F_N$ 频率处的平均功率谱最大作为最佳对焦的判据。

为分析倍增过程对系统 MTF 的影响,建立了 EMCCD 的系统模型,理论上给出了倍增 MTF 的分析方法。利用实验测量获得了 EMCCD 的倍增 MTF。实验结果表明,与无倍增时相比,倍增对系统调制传递函数的影响很大,尤其是在较高倍增增益时。

致谢 感谢北京理工大学沙定国和张旭升老师在辅助成像光学系统的定标检测方面提供的帮助。

参 考 文 献

1 Craig Mackay, A. Basden, M. Bridgeland. Astronomical imaging with L3CCDs: detector performance and high-speed controller design[C]. *Proc SPIE*, 2004, **5499**: 203~209

2 David R. Smith, David M. Walton, A. D. Holland *et al.*. EMCCDs for space applications[C]. *Proc SPIE*, 2004, **6276**: 985~991

3 G. A. de Vree, A. H. Westra, I. Moody *et al.*. Photon-counting gamma camera based on an electron-multiplying CCD [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, **52**(3): 580~588

4 Colin G. Coates, Donal J. Denvir, N. G. McHale *et al.*. Ultra sensitivity, speed and resolution; optimizing low-light microscopy with the back-illuminated electron multiplying CCD [C]. *Proc SPIE*, 2003, **5139**: 56~66

5 D. R. Smith, R. Ingle, A. D. Holland. Proton irradiation of EMCCDs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2006, **53**(2): 205~210

6 Ma Xiaoyu, Rao Changhui, Zhang Xuejun. Performance comparison of photon-multiplier-tube-based and CCD-based photoelectronic devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 882~888

马晓焮, 饶长辉, 张学军. 三种光电器件用于天体光度测量时的性能比较 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 882~888

7 Paul Jerram, Peter Pool, Ray Bell *et al.*. The LLLCCD: Low light imaging without the need for an intensifier [C]. *Proc SPIE*, 2001, **4306**: 178~186

8 Lu Jin, Chen Weimin, Cen Junbo. Effect of distance on modulation transfer function of imaging sensor using rectangle template contact method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1021~1026

鲁进, 陈伟民, 岑军波. 间距对图像传感器调制传递函数矩形模板接触测量的影响 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1021~1026

9 Li Hongzhuang, Han Changyuan, Ma Dongmei. Assessment method of modulation transfer function of on-orbit space optical remote sensor using neural network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 631~637

李宏壮, 韩昌元, 马冬梅. 航天光学遥感器在轨调制传递函数神经网络评价方法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 631~637

10 M. R. Stanford, B. J. Hadwen. The noise performance of electron multiplying charge coupled devices [J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 2003, **50**(5): 1227~1232

11 Joseph W. Goodman. *Statistical Optics* [M]. New York: John

- Wiley & Sons, Inc. 1985
- 12 G. Boreman, E. L. Dereniak. Method for measuring modulation transfer function of charge-coupled devices using laser speckle [J]. *Opt. Eng.*, 1986, **25**(1): 148~150
 - 13 M. Sensiper, G. D. Boreman, A. D. Ducharme. Modulation transfer function testing of detector arrays using narrow-band laser speckle[J]. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(2): 395~400
 - 14 A. D. Ducharme, G. D. Boreman. Holographic elements for modulation transfer function testing of detector arrays[J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(8): 2455~2458
 - 15 A. Danieis, G. D. Boreman, A. D. Ducharme *et al.*. Random transparency targets for modulation transfer function measurement in the visible and infrared regions[J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(3): 860~868
 - 16 Zhang Xusheng, Sha Dingguo. Method for modulation transfer function measurement of linear sampled imaging system using random bar targets[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 918~922
 - 张旭升,沙定国. 线性离散成像系统调制传递函数的随机条纹测试法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 918~922
 - 17 Luiyide Luca, G. Cardone. Modulation transfer function cascade model for a sampled IR imaging system[J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(13): 1659~1664
 - 18 J. R. Janesick. *Scientific Charge-Coupled Devices* [M]. Washington: SPIE Press, 2001
 - 19 D. H. Seib. Carrier diffusion degradation of modulation transfer function in charge coupled imager[J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1974, **ED-21**(3): 210~217
 - 20 S. G. Chamberlain, D. H. Harper. MTF simulation including transmittance effects and experimental results of charge-coupled imagers[J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1978, **ED-25**(2): 145~153
 - 21 J. C. Feltz, M. A. Karim. Modulation transfer function of charge coupled devices[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(5): 717~722