

文章编号 1004-924X(2012)07-1611-08

基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 调制传递函数

杨永明*, 李清军, 李文明, 陈浠惠

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:介绍了基于 Bayer 滤波获取彩色图像的方法。根据 CCD 离散采样的工作特点, 构建了采用 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 的调制传递函数(MTF)。通过数值计算和实验对基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 和单色面阵 CCD 的 MTF 值进行了对比分析。结果表明, 基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 的 MTF 值显著低于单色面阵 CCD 的 MTF 值。当像元边长与对应中心距相等时, 基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 在 Nyquist 频率处的 MTF 为 0.067 6, 单色面阵 CCD 在 Nyquist 频率处的 MTF 值为 0.405 3; 分辨率板成像实验表明, 相同成像条件下, 前者的分辨率比后者的分辨率降低约 40%, 基本符合 MTF 对比分析结论。

关键词:调制传递函数; Bayer 滤波; 彩色面阵 CCD; 分辨率

中图分类号: TP75; TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122007.1611

Modulation transfer function for color area CCD based on Bayer filtering

YANG Yong-ming*, LI Qing-jun, LI Wen-ming, CHEN Xi-hui

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yongmingyang@sohu.com

Abstract: A method based on Bayer filtering to obtain color images was introduced, then the Modulation Transfer Function (MTF) of a color area Charge Coupled Device (CCD) which uses the Bayer filtering to obtain color images was established based on the discrete sampling characteristic of CCD. The MTF values for the color area CCD using Bayer filtering were compared with those of a monochrome area CCD. Obtained results indicate that the MTF value for color area CCD using Bayer filtering is notably lower than that for the monochrome area CCD. When the side length of a pixel is equal to the corresponding center distance, the MTF value at Nyquist frequency is 0.067 6 for the color area CCD using Bayer filtering while that is 0.405 3 for the monochrome area CCD. Moreover, in an imaging experiment using a resolution card, the resolution of the former is lower about 40% than that of the latter in the same imaging condition. These results are coincident with comparative analysis results of MTFs in general.

Key words: modulation transfer function; Bayer filtering; color area CCD; resolution

收稿日期: 2012-01-29; 修订日期: 2012-02-27.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA121309)

1 引言

随着航空遥感、侦察及测绘等领域的迅速发展,对彩色图像的需求日益增加。目前利用电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)获取彩色图像主要有两种方式。第一种方式采用 3 片 CCD,先利用分光棱镜对入射光线进行基色分离,然后对分离得到的各基色分别进行感光。这种获取彩色图像的方式占据的存储空间大,费用昂贵,装调难度高,在实际成像系统中较少采用。第二种方式采用单片面阵 CCD,通过在 CCD 像元表面增加按 Bayer 规律排列的基色滤光片实现基色分离;每个像元只能对一种基色进行感光,通过插值得到其他 2 种基色。目前,采用单片面阵 CCD 获取彩色图像的方式广泛应用于民用数码相机及遥感成像设备。

调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)具有理论严谨、便于总体成像质量评价等优点,是光电系统成像质量分析的重要方法。CCD 的 MTF^[1-3]已得到较为深入的研究,文献[4-5]对亚像元成像的 MTF 进行了分析,文献[6-7]利用 MTF 分析了时间延迟积分(TDI)CCD 的成像质量。本文首先论述了基于 Bayer 滤波的彩色图像获取方法;然后从 MTF 的定义出发,构建了基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 的 MTF,并推导了 Nyquist 频率处的 MTF 值;最后通过数值计算与实验,对基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 与单色面阵 CCD 的 MTF 进行了对比分析。

2 Bayer 滤波彩色获取

基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD,像元表面按照 Bayer 规律增加红色(R)、绿色(G)或蓝色(B)滤光片(图 1),每个像元能够敏感一种基色灰度。对于基于 RGB 的彩色图像,每个像素均需具有 R、G 及 B 灰度值。各像素其他两种基色灰度值是根据与之相邻像元所敏感的基色灰度值,通过插值计算得到的。在双线性插值基色计算方法^[8]中,各像素根据式(1)、式(2)及式(3)分别计算 R、G、B 灰度值。为便于论述,后文将“基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD”简称为“彩色面阵 CCD”。

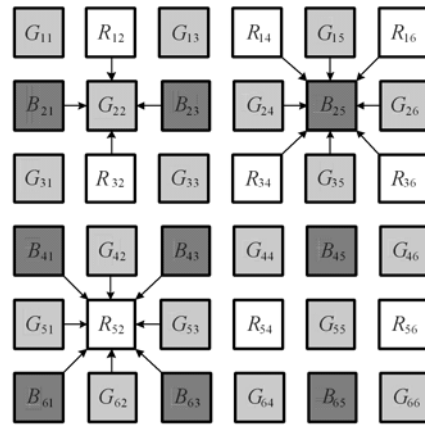


图 1 基于 Bayer 规律的基色滤光片排列

Fig. 1 Arrangement of base color filters according to Bayer rule

1) 可敏感 R 灰度像元(以 R_{52} 为例):

$$\begin{cases} R = R_{52} \\ G = (G_{51} + G_{42} + G_{53} + G_{62})/4. \\ B = (B_{41} + B_{43} + B_{61} + B_{63}) \end{cases} \quad (1)$$

2) 可敏感 G 灰度像元(以 G_{22} 为例):

$$\begin{cases} R = (R_{12} + R_{32})/2 \\ G = G_{22} \\ B = (B_{21} + B_{23})/2 \end{cases} \quad (2)$$

3) 可敏感 B 灰度像元(以 B_{25} 为例):

$$\begin{cases} R = (R_{14} + R_{16} + R_{34} + R_{36})/4 \\ G = (G_{24} + G_{15} + G_{35} + G_{26})/4. \\ B = B_{25} \end{cases} \quad (3)$$

3 调制传递函数

3.1 光学系统的 MTF^[9]

光学系统的 MTF 是指光学系统对亮强呈正弦分布物体的成像响应。设物的亮度 $I(x)$ 分布如式(4)所示,其中: i_0 为物平均亮度; i_m 为物亮度变化强度, f 为空间频率。

$$I(x) = i_0 + i_m \cos(2\pi f x), \quad (4)$$

该物经光学系统成像后得到像的光强分布 $I'(x)$ 如式(5)所示,其中: i_0' 为像平均亮度; i_m' 为像亮度变化强度, φ 为物与像之间的相位差。

$$I'(x) = i_0' + i_m' \cos(2\pi f x - \varphi). \quad (5)$$

调制度 M 定义为: $M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$, 则物的调制度 $M_0 = i_m / i_0$, 像的调制度 $M_0' = i_m' / i_0'$ 。光学系统

的 MTF 为像的调制度与物的调制度之比,即:

$$MTF = \frac{M_0'}{M_0} \quad (6)$$

3.2 彩色面阵 CCD 的 MTF

光电成像系统主要由光学系统及探测器组成。如果能够将光学系统的 MTF 应用于探测器,则可以利用 MTF 来评价整个光电系统的成像质量。将光学系统的 MTF 理论应用于某一系统时,要求该系统具有线性、时间不变性及空间不变性^[2]。CCD 属于离散采样器件,不满足空间不变性。K. M. Hock 提出将探测器成像调制度定义为像元光敏区域在采样间距内成像调制度的均值^[10],调制度的均值满足空间不变性,实现了 MTF 向探测器领域的扩展。

通常彩色面阵 CCD 3 种基色的量子效率是不同的,图 2 说明了 DALSA 公司生产的 FTF5066C^[11] 彩色面阵 CCD 各基色量子效率的差异。为了真实还原被拍摄景物的色彩,需要对彩色面阵 CCD 获取的图像进行白平衡调节。可以认为经白平衡调节后,各基色具有相同的量子效率。在分析单色 CCD 的 MTF 过程中,将像素灰度作为像光强度量^[1-2],本文将经白平衡调节后各基色灰度作为彩色面阵 CCD 的像光强度量。为便于分析,彩色面阵 CCD 各像素灰度值定义为三基色灰度值的均值。

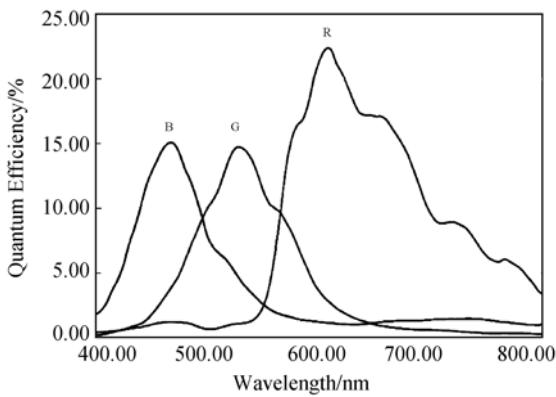


图 2 FTF5066C 量子效率随波长变化情况

Fig. 2 Quantum efficiency versus wavelength for FTF5066C

设彩色面阵 CCD 沿 x 方向像元宽度为 R_a , 像元中心距为 R_b ; 沿 y 方向像元宽度为 C_a , 像元中心距为 C_b , 如图 3 所示。设输入信号的光强分布为式(7), 其中 x 为信号空间坐标, f 为信号空

间频率, 可见输入信号的调制度为 1。取输入信号某一周期峰值位置为坐标原点 O , 设距 O 点最近像元的中心在 x 轴上的坐标为 s , 建立图 4 所示坐标系。本文针对面阵 CCD x 方向的 MTF 进行了建模分析, 相应的方法及性质同样适用于 y 方向的 MTF。

$$I(x) = \frac{1}{2} [1 + \cos(2\pi f x)] \quad (7)$$

根据双线性插值基色计算方法可知, 当像元可直接获取 G 灰度时, 该像元的颜色由与之相邻的 4 个像元决定, 如图 5(a) 中像元 5 所示; 当像元可直接获 R 灰度或 B 灰度时, 该像元的颜色由与之相邻的 9 个像元决定, 如图 5(b) 中像元 5 所示。对输入信号 $I(x)$, 像元 1、像元 4 及像元 7 输出灰度值相同, 像元 2、像元 5 及像元 8 输出灰度值相同, 像元 3、像元 6 及像元 9 输出灰度值相同; 从而可以得出下式。

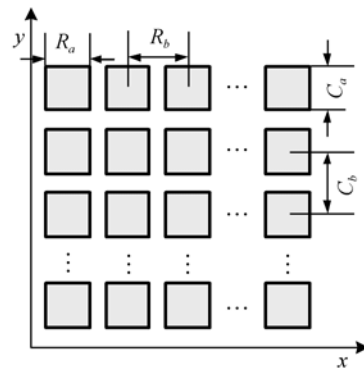


图 3 面阵 CCD 像元排列参数

Fig. 3 Arrangement parameters for area CCD

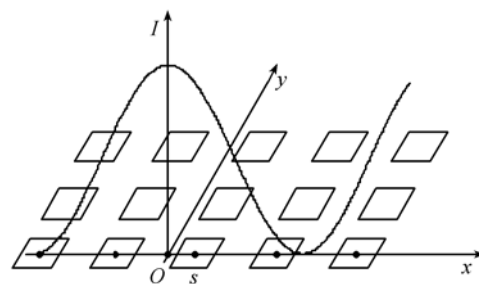
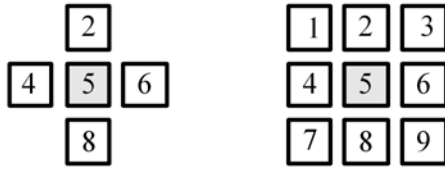


图 4 输入信号坐标及参数定义

Fig. 4 Coordinate and parameters for input signal

G 像元输出最大灰度 $I_{\max}^G(f)$ 为:

$$I_{\max}^G(f) = \frac{1}{6} I_{\max}^4(f) + \frac{2}{3} I_{\max}^5(f) + \frac{1}{6} I_{\max}^6(f) \quad (8)$$



(a) G 像元 (b) R 像元/B 像元
(a) Green pixel (b) Red pixel/Blue pixel

图 5 计算基色时所涉及的像元

Fig. 5 Related pixels for calculating base color

式中数字上标为图 5 中像元编号,其中:

$$I_{\max}^4(f) = \frac{1}{R_b} \int_{s-R_b-R_a/2}^{s-R_b+R/2} I(x) dx, \quad (9)$$

$$I_{\max}^5(f) = \frac{1}{R_b} \int_{s-R_a/2}^{s+R_a/2} I(x) dx, \quad (10)$$

$$I_{\max}^6(f) = \frac{1}{R_b} \int_{s+R_b-R_a/2}^{s+R_b+R_a/2} I(x) dx. \quad (11)$$

R 像元输出最大灰度 $I_{\max}^R(f)$ 及 B 像元输出最大灰度 $I_{\max}^B(f)$ 为:

$$\begin{aligned} I_{\max}^R(f) &= I_{\max}^B(f) \\ &= \frac{1}{4} I_{\max}^4(f) + \frac{1}{2} I_{\max}^5(f) + \frac{1}{4} I_{\max}^6(f). \end{aligned} \quad (12)$$

G 像元输出最小灰度 $I_{\min}^G(f)$ 为:

$$I_{\min}^G(f) = \frac{1}{6} I_{\min}^4(f) + \frac{2}{3} I_{\min}^5(f) + \frac{1}{6} I_{\min}^6(f), \quad (13)$$

其中:

$$I_{\min}^4(f) = \frac{1}{R_b} \int_{s-R_b-\frac{R_a}{2}}^{s-R_b+\frac{R_a}{2}} I\left(x + \frac{1}{2f}\right) dx, \quad (14)$$

$$I_{\min}^5(f) = \frac{1}{R_b} \int_{s-\frac{R_a}{2}}^{s+\frac{R_a}{2}} I\left(x + \frac{1}{2f}\right) dx, \quad (15)$$

$$I_{\min}^6(f) = \frac{1}{R_b} \int_{s+R_b-\frac{R_a}{2}}^{s+R_b+\frac{R_a}{2}} I\left(x + \frac{1}{2f}\right) dx. \quad (16)$$

R 像元输出最小灰度 $I_{\min}^R(f)$ 及 B 像元输出最小灰度 $I_{\min}^B(f)$ 为:

$$\begin{aligned} I_{\min}^R(f) &= I_{\min}^B(f) = \\ &= \frac{1}{4} I_{\min}^4(f) + \frac{1}{2} I_{\min}^5(f) + \frac{1}{4} I_{\min}^6(f). \end{aligned} \quad (17)$$

根据 Bayer 排列规律可知,彩色面阵 CCD 各像元输出的最大灰度 $I_{\max}^{rgb}(f)$ 的均值及最小灰度 $I_{\min}^{rgb}(f)$ 的均值为:

$$\bar{I}_{\max}^{rgb}(f) = \frac{1}{R_b} \int_{-\frac{R_b}{2}}^{\frac{R_b}{2}} \left[\frac{5}{24} I_{\max}^4(f) + \frac{14}{24} I_{\max}^5(f) + \right.$$

$$\left. \frac{5}{24} I_{\max}^6(f) \right] ds, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\min}^{rgb}(f) &= \frac{1}{R_b} \int_{-\frac{R_b}{2}}^{\frac{R_b}{2}} \left[\frac{5}{24} I_{\min}^4(f) + \frac{14}{24} I_{\min}^5(f) + \right. \\ &\quad \left. \frac{5}{24} I_{\min}^6(f) \right] ds, \end{aligned} \quad (19)$$

彩色面阵 CCD 的 MTF $_{rgb}$ 为:

$$MTF_{rgb}(f) = \frac{1}{R_b} \int_{-\frac{R_b}{2}}^{\frac{R_b}{2}} \frac{I_{\max}^{rgb}(f) - I_{\min}^{rgb}(f)}{I_{\max}^{rgb}(f) + I_{\min}^{rgb}(f)} ds, \quad (20)$$

因为 $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f) + \bar{I}_{\min}^{rgb}(f) = \frac{R_a}{R_b}$, 所以:

$$\begin{aligned} MTF_{rgb}(f) &= \frac{\bar{I}_{\max}^{rgb}(f) - \bar{I}_{\min}^{rgb}(f)}{\bar{I}_{\max}^{rgb}(f) + \bar{I}_{\min}^{rgb}(f)} = \\ &= \frac{1}{R_a R_b} \int_{-\frac{R_b}{2}}^{\frac{R_b}{2}} \left[\frac{5}{24} \int_{s-R_b-R_a/2}^{s-R_b+R_a/2} \cos(2\pi fx) dx + \right. \\ &\quad \left. \frac{14}{24} \int_{s-R_a/2}^{s+R_a/2} \cos(2\pi fx) dx + \right. \\ &\quad \left. \frac{5}{24} \int_{s+R_b-R_a/2}^{s+R_b+R_a/2} \cos(2\pi fx) ds \right], \end{aligned} \quad (21)$$

对于单色面阵 CCD 各像元输出最大灰度均值 $\bar{I}_{\max}^m(f)$ 及最小灰度均值 $\bar{I}_{\min}^m(f)$ 分别为:

$$\bar{I}_{\max}^m(f) = \frac{1}{R_b^2} \int_{-\frac{R_b}{2}}^{\frac{R_b}{2}} \int_{\frac{R_a}{2}}^{s+\frac{R_a}{2}} I(x) dx ds, \quad (22)$$

$$\bar{I}_{\min}^m(f) = \frac{1}{R_b^2} \int_{-\frac{R_b}{2}}^{\frac{R_b}{2}} \int_{\frac{R_a}{2}}^{s+\frac{R_a}{2}} I\left(x + \frac{1}{2f}\right) dx ds. \quad (23)$$

单色面阵 CCD 的 MTF $_m(f)$ 为:

$$\begin{aligned} MTF_m(f) &= \frac{1}{R_b} \int_{-\frac{R_b}{2}}^{\frac{R_b}{2}} \frac{I_{\max}^m - I_{\min}^m}{I_{\max}^m + I_{\min}^m} ds \\ &= \frac{1}{R_a R_b} \int_{-\frac{R_b}{2}}^{\frac{R_b}{2}} \int_{s-R_a/2}^{s+R_a/2} \cos(2\pi fx) dx ds. \end{aligned} \quad (24)$$

4 Nyquist 频率处的 MTF 值

Nyquist 频率处的 MTF 值说明了 CCD 在极限情况下,能否对空间频率信号进行有效分辨,对成像质量评估具有重要意义。当 $R_a \neq R_b$ 时, CCD Nyquist 频率处的 MTF 值随 R_a 与 R_b 的取值发生变化。当 $R_a = R_b$ 时, Nyquist 频率处的 MTF 值是确定的,下面分别针对单色面阵 CCD 及彩色面阵 CCD,推导 $R_a = R_b$ 时 Nyquist 频率处的 MTF 值。

4.1 单色面阵 CCD

令 $f_N = \frac{1}{2R_b}$ 表示 Nyquist 频率,根据式(22)

及式(23)可得:

$$\bar{I}_{\max}^m(f_N) = \frac{1}{R_b^2} \int_{-\frac{R_b}{2}}^{\frac{R_b}{2}} \int_{-R_a/2}^{+R_a/2} \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left\{ \frac{\pi}{R_b} x \right\} \right] dx ds = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi^2}, \quad (25)$$

$$\bar{I}_{\min}^m(f_N) = \frac{1}{R_b^2} \int_{-\frac{R_b}{2}}^{\frac{R_b}{2}} \int_{-R_a/2}^{+R_a/2} \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left\{ \frac{\pi}{R_b} x \right\} \right] dx ds = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2}, \quad (26)$$

于是有:

$$MTF_m(f_N) = \frac{\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi^2} \right) - \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi^2} \right)}{\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi^2} \right) + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi^2} \right)} = 0.4053. \quad (27)$$

4.2 彩色面阵 CCD

根据 Nyquist 频率空间信号的特点可以得出:

$$I_{\max}^i(f_N) = \bar{I}_{\min}^i(f_N) = I_{\max}^i(f_N) = I_{\min}^i(f_N), \quad (28)$$

$$I_{\min}^i(f_N) = \bar{I}_{\max}^i(f_N) = I_{\min}^i(f_N) = I_{\max}^i(f_N). \quad (29)$$

于是有:

$$\bar{I}_{\max}^{rgb}(f_N) = \frac{10}{12} \bar{I}_{\min}^m(f_N) + \frac{14}{12} \bar{I}_{\max}^m(f_N) = 1 + \frac{1}{3\pi^2}, \quad (30)$$

$$\bar{I}_{\min}^{rgb}(f_N) = \frac{10}{12} \bar{I}_{\max}^m(f_N) + \frac{14}{12} \bar{I}_{\min}^m(f_N) = 1 + \frac{1}{3\pi^2}. \quad (31)$$

从而有:

$$MTF_{rgb}(f_N) = \frac{\bar{I}_{\max}^{rgb}(f_N) - \bar{I}_{\min}^{rgb}(f_N)}{\bar{I}_{\max}^{rgb}(f_N) + \bar{I}_{\min}^{rgb}(f_N)} = 0.0676. \quad (32)$$

由式(27)及式(32)可知, $R_a = R_b$ 时,在 Nyquist 频率处,单色面阵 CCD 的 MTF 值为 0.4053,实现了有效分辨;彩色面阵 CCD 的 MTF 值为 0.0676,难以实现对 Nyquist 频率空间信号的有效分辨。

5 数值分析与实验结果

5.1 R_a 及 R_b 对 MTF 的影响

CCD 的填充因子小于等于百分之百,因此常规采样条件下 $R_a \leq R_b$ 。图 6 给出了 $R_b = 8 \mu\text{m}$, R_a 分别取 $6 \mu\text{m}$ 及 $8 \mu\text{m}$ 时 $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ 及 $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ 随 f 的变化情况,图 7 给出了 $R_a = 8 \mu\text{m}$, R_b 分别取 $8 \mu\text{m}$ 及 $10 \mu\text{m}$ 时, $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ 及 $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ 随 f 的变化情况。通过图 6、图 7 可知, f 由 0 增至 f_N 的过程中, $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ 逐渐减小, $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ 逐渐增大。当 R_b 不变, R_a 减小时, $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ 及 $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ 均将减小。当 R_a 不变, R_a 增大时, $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ 将减小,而 $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ 呈现出先增大后减小的趋势。图 8 给出了 $R_a = 8 \mu\text{m}$, $R_b = 8 \mu\text{m}$, $R_a = 6 \mu\text{m}$, $R_b = 8 \mu\text{m}$, $R_a = 8 \mu\text{m}$, $R_b = 10 \mu\text{m}$ 时的 $MTF_{rgb}(f)$ 变化曲线。通过图 8 可知,减小像元尺寸使 $MTF_{rgb}(f)$ 增大,增加像元中心距(采样间距)将使 $MTF_{rgb}(f)$ 降低;像元中心距在 $MTF_{rgb}(f)$ 中起主导作用。

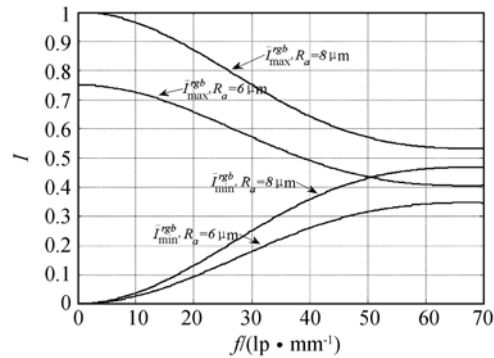


图 6 R_a 改变时 $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ 及 $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ 的变化曲线

Fig. 6 Curves for $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ and $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ when R_a changes

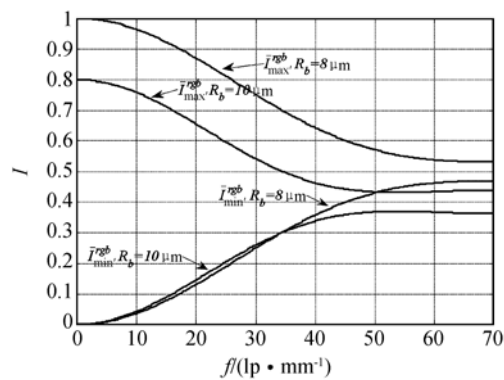
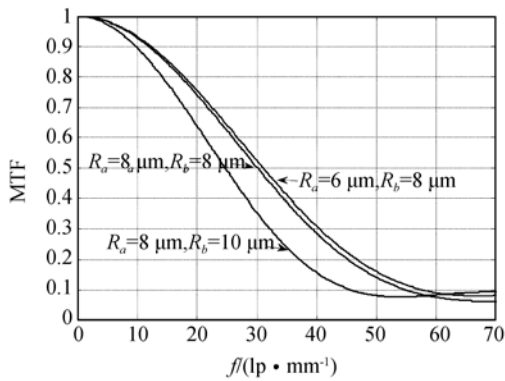


图 7 R_a 改变时 $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ 及 $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ 的变化曲线

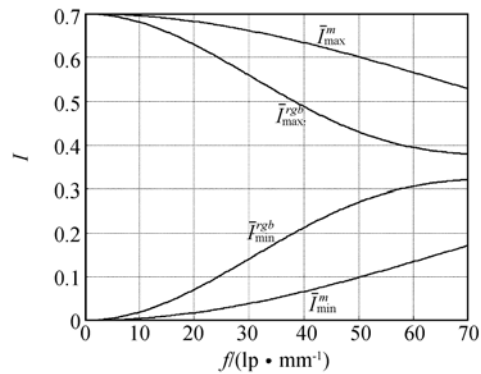
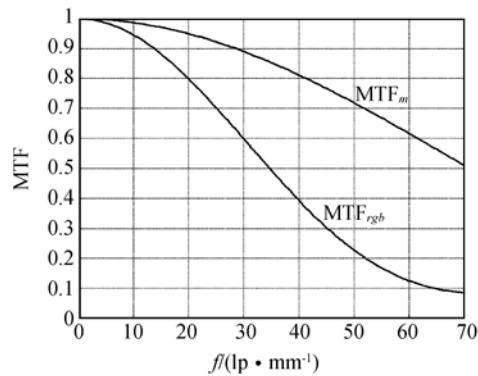
Fig. 7 Curves for $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ and $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ when R_b changes

图 8 R_a 及 R_b 改变时 $MTF_{rgb}(f)$ 的变化曲线Fig. 8 Curves for $MTF_{rgb}(f)$ when R_a and R_b change

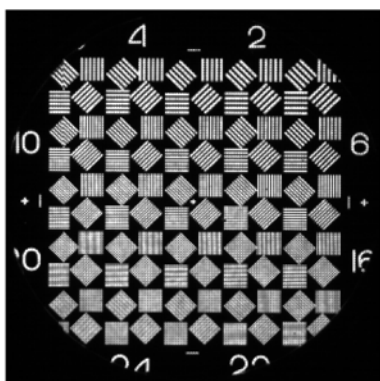
5.2 MTF 对比分析

通过与单色面阵 CCD 的 MTF 进行对比分析,可深入理解彩色面阵 CCD 的 MTF 变化规律。图 9 给出了 $R_a=5.04 \mu\text{m}$, $R_b=7.2 \mu\text{m}$ 时,彩色面阵 CCD 与单色面阵 CCD 像元输出灰度均值随 f 的变化曲线。通过图 9 可知, f 由 0 增至 f_N 的过程中, $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ 快速减小, $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ 快速增大;且有 $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f) < \bar{I}_{\max}^m(f)$, $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f) > \bar{I}_{\min}^m(f)$ 。图 10 给出了 $R_a=5.04 \mu\text{m}$, $R_b=7.2 \mu\text{m}$ 时 MTF_{rgb} 与 $MTF_m(f)$ 的对比曲线。图 10 表明 $MTF_{rgb}(f)$ 显著小于 $MTF_m(f)$,这是因为基于 Bayer 滤波的彩色提取过程中,各像元基色灰度值需根据与之相邻像元的基色灰度值进行计算,相当于增大了像元尺寸,导致 $MTF_{rgb}(f)$ 显著下降。

为使光电成像系统实现设计分辨率,光电成像系统在设计分辨率所对应空间频率处的整体 MTF 值应大于 0.2^[12]。由图 10 可知,若光电成像系统除探测器外组件在 Nyquist 频率(69.4 lp/mm)处 MTF 值为 0.45,则以单色面阵 CCD 为探测器的光电成像系统在 Nyquist 频率处的整体 MTF 值为 $0.516 \times 0.45 = 0.232$,可实现有效分辨;而以彩色面阵 CCD 为探测器的光电成像系统在 Nyquist 频率处整体 MTF 值为 $0.086 \times 0.45 = 0.039$,无法分辨。根据彩色面阵 CCD MTF 变化曲线可知, $f=40 \text{ lp/mm}$ 时 MTF 值为 0.393,该空间频率下光电成像系统除探测器外组件的 MTF 值能够达到 0.6,使光电成像系统整体 MTF 值达到 0.236,实现有效分辨。可见,彩色面阵 CCD 的分辨率显著低于单色面阵 CCD 的分辨率。

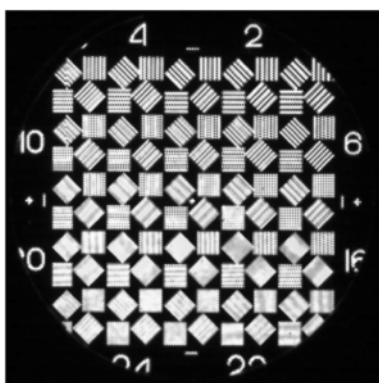
图 9 $\bar{I}_{\max}^m(f)$, $\bar{I}_{\min}^m(f)$, $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ 及 $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ 随 f 变化曲线Fig. 9 Curves for $\bar{I}_{\max}^m(f)$, $\bar{I}_{\min}^m(f)$, $\bar{I}_{\max}^{rgb}(f)$ and $\bar{I}_{\min}^{rgb}(f)$ with f 图 10 $MTF_{rgb}(f)$ 及 $MTF_m(f)$ 随 f 变化曲线Fig. 10 Curves for $MTF_{rgb}(f)$ and $MTF_m(f)$ with f

为说明彩色面阵 CCD 与单色面阵 CCD 分辨率的变化情况,利用平行光管及分辨率板作为目标发生器,进行分辨率板成像实验。实验过程中采用 FTF5066C 彩色面阵 CCD,该 CCD 像元大小为 $7.2 \mu\text{m}$,填充因子为 70%,对应于 $R_a=5.04 \mu\text{m}$, $R_b=7.2 \mu\text{m}$ 。分辨率板产生的输入信号为矩形信号, Nyquist 频率处的 MTF 值将增大 $4/\pi$ 倍^[13]。为模拟相同成像条件,将彩色面阵 CCD 在均匀白色光源下获得的灰度值作为单色图像灰度值,根据 Bayer 滤波对 raw 格式图像进行变换得到彩色图像,图 11 为实验过程中得到的分辨率板图像。图 11 中第 11 组靶标最接近于 FTF5066C 的 Nyquist 频率,对应空间频率为 66.5 lp/mm。由图 11 可知,单色图像可分辨第 11 组靶标,彩色面阵 CCD 在 Nyquist 频率附近区域 MTF 值很低,彩色图像无法分辨对应的靶标。彩色图像可分辨第 2 组靶标,对应空间频率为 39.6 lp/mm。



(a) 单色图像

(a) Monochrome image



(b) 彩色图像

(b) Color image

图 11 分辨率板图像

Fig. 11 Images of resolution checker

可见,相同成像条件下,彩色面阵 CCD 的分辨率比单色面阵 CCD 的分辨率降低了约 40%,基本符合 MTF 对比分析结论。

6 结 论

本文建立了基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 的 MTF,利用所构建的 MTF 推导得出:当像元边长与对应中心距相等时,单色面阵 CCD 在 Nyquist 处的 MTF 值为 0.405 3,彩色 CCD 在 Nyquist 频率处的 MTF 值为 0.067 6。通过对比彩色面阵 CCD 及单色面阵 CCD 的 MTF 曲线可知,彩色面阵 CCD 的分辨率显著低于单色面阵 CCD 的分辨率。分辨率板成像实验表明,在相同成像条件下,彩色面阵 CCD 的分辨率比单色面阵 CCD 的分辨率降低约 40%,基本符合 MTF 对比分析结论。

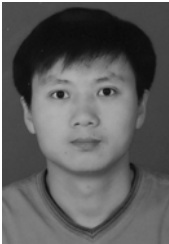
彩色面阵 CCD 的 MTF 为光电成像系统成像质量分析提供了重要依据。在实际工程分析过程中,可通过确定彩色面阵 CCD 的 MTF 及光学系统的 MTF 使光电成像系统整体 MTF 值大于 0.2 的空间频率并用作光电成像系统的设计分辨率。本文所建立的彩色面阵 CCD 的 MTF 以一定简化条件为基础,与实际系统尚存在一定差距;希望本文能够为建立更加全面、准确的彩色面阵 CCD 的 MTF 提供思路。

参考文献:

- [1] FELTS J C, KARIM M A. Modulation transfer function of charge-coupled devices [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(5): 717-722.
- [2] 郑琳,仲思东,何对燕. 电荷耦合成像器件的调制传递函数[J]. *武汉测绘科技大学学报*, 1996, 21(2): 176-182.
ZHENG L, ZHONG S D, HE D Y. The modulation transfer function of charge-coupled devices [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1996, 21(2): 176-182. (in Chinese)
- [3] MAGNAN P, ESTRIBEAU M, ROLLAND G, et al.. Theoretical evaluation of MTF and charge collection efficiency in CCD and CMOS image sensors [J]. *SPIE*, 2009, 7427: 23-34.
- [4] 王凌,冯华君,徐之海. 基于调制传递函数的 CCD 亚像元成像质量评价[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, 38(7): 845-847.
WANG L, FENG H J, XU Z H. Evaluation for subpixel imaging quantity of CCD sensor based on modulation transfer function [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2004, 38(7): 845-847. (in Chinese)
- [5] 王凌,徐之海,冯华君,等. 线阵推扫式 CCD 亚像元成像的列向动态调制传递函数[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2008, 42(2): 37-17-320.
WANG L, XU Z H, FENG H J, et al.. Transverse dynamic modulation transfer function of sub-

- pixel push-scanning imaging by linear CCD [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2008, 42(2): 37-17-320. (in Chinese)
- [6] LAMBERT B M, HARBOLD J M. Experimental methods for measurement of the modulation transfer function (MTF) for time delay and integrate (TDI) charge coupled device (CCD) image sensors [J]. *SPIE*, 2009, 7405: 75-83.
- [7] 马天波, 郭永飞, 李云飞. 科学级 TDICCD 相机的行频精度[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 2028-2035.
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese)
- [8] 闫格. CMOS 图像传感器白平衡数字处理电路设计 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
YAN G. *Design of CMOS image sensor automatic white balance digital process circuit* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [9] 刘亚侠. TDI CCD 遥感相机标定技术的研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
LIU Y X. *Research on the calibration technique of the TDI CCD remote sensing camera* [D]. Chang-
- chun: Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, Chinese Academy of sciences, 2005. (in Chinese)
- [10] KAI M H, Effect of oversampling in pixel arrays [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(5): 1281-1288.
- [11] FTF5066C 33M full-frame CCD image sensor [EB/OL]. <http://www.teledynedalsa.com/sensors/products/sensordetails.aspx?partNumber=FTF5066C>, 2009.
- [12] 杨秉新. TDI CCD 相机的相对孔径与器件像元尺寸关系的研究 [J]. *航天返回与遥感*, 2001, 22(2): 9-12.
YANG B X. Investigation on the relationship of relative aperture to pixel dimensions for TDI CCD camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2001, 22(2): 9-12. (in Chinese)
- [13] 杨桦, 焦文春, 朱永红, 等. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数 [J]. *光学学报*, 2002, 22(3): 313-316.
YANG H, JIAO W CH, ZHU Y H, *et al.*. Modulation transfer function of CCD camera at Nyquist frequency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(3): 313-316. (in Chinese)

作者简介:



杨永明 (1980—), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 2009 年于吉林大学获得工学博士学位, 主要从事航空光电成像技术及航空稳像控制技术的研究。E-mail: yongmingyang@sohu.com



李清军 (1966—), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 1990 年毕业于吉林工业大学电子工程系, 主要从事机载设备稳定跟踪测量技术的研究。E-mail: liqj_ciom@tom.com



李文明 (1978—), 男, 吉林长春人, 助理研究员, 2002 年毕业于吉林大学计算机科学与技术系, 主要从事航空测绘相机控制技术研究。E-mail: snow_79@163.com



陈浞惠 (1961—), 女, 吉林长春人, 高级工程师, 1989 年毕业于长春光学精密机械学院光学电子工程系, 主要从事大型光学仪器的研究和研制。E-mail: chenxh@ciomp.ac.cn