

doi:10.3788/gzxb20184702.0211001

CCD 相机调制传递函数增强滤波器设计

张健^{1,2}, 樊养余¹, 朱波², 许哲², 赵燕²

(1 西北工业大学 电子信息学院, 西安 710129)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 空间光学研究室, 西安 710119)

摘要:通过 CCD 相机成像模型讨论了成像链路各个环节对系统传递函数的影响, 分析了滤波器品质因数的增强效果、品质因数对信噪比的影响, 品质因数对多个像元影响, 分析表明: 当相机光学部件及传感器确定之后, 可以通过设置合理的后端滤波电路品质因数来增强系统传递函数; 当滤波器的最佳品质因数设置值为 1 时, 成像系统在 Nyquist 空间频率处的传递函数能够提高 32%。利用黑白条纹靶进行相机传递函数测试及信噪比测试, 试验结果表明, 调制传递函数增强滤波器在品质因数为 1 时可提高 CCD 成像相机的成像性能, 提高传递函数 30%; 电路噪声抑制能力与通带内最平坦滤波器相当。

关键词:调制传递函数; 低通滤波器; 品质因数; CCD 相机; 带宽; 信噪比

中图分类号: TN713+.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)02-0211001-7

CCD Camera MTF Enhancement Filter Design

ZHANG Jian^{1,2}, FAN Yang-yu¹, ZHU Bo², XU Zhe², ZHAO Yan²

(1 School of Electronics and Information, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(2 Space Optics Lab, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

Abstract: By the discussion of the impact to system MTF by each link in image chains based on the camera imaging model, the enhancement effect of filter quality factor, the impact to Signal to Noise Ratio (SNR), simulation results of the impact of quality factor on multiple pixels were analyzed. The analysis show that the appropriate filter quality factor could enhance the system MTF after the optical design is done and the sensor is confirmed. If the optimum quality factor setting value of the filter is 1, the system MTF at the Nyquist spatial frequency can be increased by 32%. The test results show that MTF enhancement filter can improve the system imaging performance when the quality factor is 1, and the noise suppression capability is comparable to that of the maximally flat filter in passband.

Key words: Modulation Transfer Function (MTF); Low pass filters; Quality factor; CCD cameras; Bandwidth; Signal to Noise Ratio (SNR)

OCIS Codes: 110.4100; 040.1520; 120.2440

0 引言

在基于 CCD 的数字成像系统中, 系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 无论是对于系统设计还是对于后期应用分析都是极其重要的指标参数。光学数字成像相机的成像过程可分为光学成像和电子学处理, 系统的 MTF 可分为光学成像 MTF 及电子学处理 MTF, 设计中 CCD 输出响应及后端电路对 MTF 的影响常被忽略, 或近似为一个常数 (0.95), 相机整体 MTF 可近似为光学系统 MTF 和 CCD 采样 MTF 的乘积^[1]。关于传感器对系统传递函数影响的研究比较多, 如传感器像元几何参数与系统 MTF 的

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划 (No.2016JM6060) 资助

第一作者: 张健 (1977—), 男, 研究员, 博士研究生, 主要研究方向为遥感成像电子学及测试。Email: zhjian@opt.ac.cn

导师: 樊养余 (1960—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为信号与信息处理。Email: fan_yangyu@sina.com

收稿日期: 2017-06-29; 录用日期: 2017-10-30

<http://www.photon.ac.cn>

关系^[2-3]、传感器时序与系统 MTF 的关系^[4-5]等。对于后端信号处理电路方面,更多的研究是研究电路特性对系统 MTF 的影响,李俊霖^[6]通过分析非线性电路与系统 MTF 的关系,认为电路非线性可明显降低系统的 MTF;薛旭成^[7]从 CCD 相机积分级数及增益方面讨论了相机状态设置对系统 MTF 的影响;P. Fredin^[8]讨论了红外成像系统中调整滤波器参数对提高系统传递函数的作用,但是对电路参数如何设置没有进行明确分析。

在数字图像处理领域,基本的传递函数补偿(Modulation Transfer Function Compensation, MTFC)处理是通过边缘增强滤波器^[9]对图像中的高频信息进行增强,如基于模型的自适应空域 MTFC 图像复原法^[10]、基于 MTF 估算与总变分优化的图像恢复方法^[11]等。盲复原主要是基于神经网络的图像增强^[12-13],不考虑成像过程,通过训练成熟的神经网络获得图像增强效果。由于 MTFC 本质是用来提高图像不同灰度阶层的差异,因此不可避免地导致图像中噪声被放大,需要在图像信噪比与图像 MTF 之间寻找一种折中。

本文考虑到 CCD 成像系统在水平方向及垂直向特性相同,在一维内空间,基于数字相机成像 MTF 链路提出了一种 CCD 信号处理最小带宽 MTF 增强滤波器的设计方法(对应于数字图像处理的边缘增强滤波器),通过调整滤波器的品质因数,有效提升了光学成像相机的 MTF。将滤波器设置在信号 AD 量化之前,有效抑制了成像链路中各种噪声。在某遥感相机的设计中,MTF 增强滤波器的成功应用使成像 MTF 提升了 30%,相机输出信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)提高约 2%。

1 滤波器设计

1.1 光学数字成像相机传递函数传递链

光学数字成像相机的成像过程为目标反射光通过相机光学镜头在传感器靶面上形成目标像,在一定的曝光时间段内,光信号被传感器转换为电信号。电信号被后端电路处理,最终形成可被计算机处理及存储的图像数字信号。从 CCD 传感器开始至 AD 转换,电信号在每一个环节都会被加载各类噪声(光子噪声、CCD 复位噪声、电路噪声)。光子噪声为原生噪声,后端电路无法处理;CCD 复位噪声可通过相关双采样(Correlated Double Sampling, CDS)消除;电路噪声则为电子电路在工作中自身产生的噪声以及外部干扰导致的噪声,一般情况下视电路噪声为白噪声,可以在 AD 转换前设置合适的滤波器进行抑制。光学数字成像相机成像过程流程见图 1。

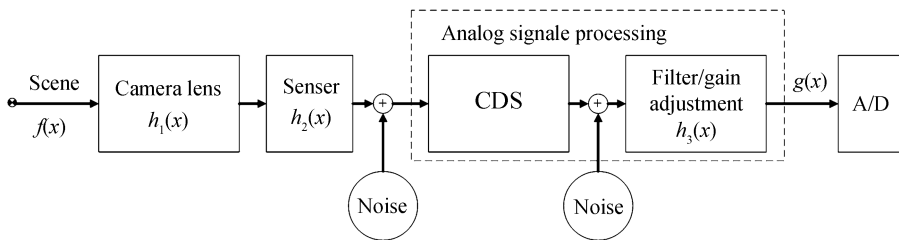


图 1 光学数字成像相机传递函数链路
Fig.1 Optical digital camera MTF chain

图 1 中,假设传感器像元尺寸及像元间距差异可忽略(考虑到当前 CCD 传感器填充因子大都接近于 1),由文献^[2]可知

$$G(\xi) = H_1(\xi) \times H_2(\xi) \times H_3(\xi) = H_1(\xi) \times \text{sinc}^2(\xi a) \times H_3(\xi) \quad (1)$$

式中, $H_1(\xi)$ 为光学镜头传递函数, $H_3(\xi)$ 为后端增益/滤波器传递函数, ξ 为空间频率,单位为 cy/mm ; a 为传感器像元尺寸,单位为 mm 。

对于有 n 个像元的推扫式成像系统,如果像在传感器上的速度为 v_{scan} ,则传感器最小输出像元频率 f 为

$$f = n v_{\text{scan}} \xi \quad (2)$$

式中, f 单位为 cy/s , v_{scan} 单位为 mm/s 。

对于面阵凝视成像系统,也可以推导出类似相应的关系^[2]。可以看出,电路工作时间频率与相机成像空间频率之间为成正比关系,如此,将式(1)中 ξ 用时间频率 ω 进行替换,得到 $G(\omega)$ 为

$$G(\omega) = K \times H_1(\omega) \times \text{sinc}^2(\omega a) \times H_3(\omega) \quad (3)$$

式中, K 为常数因子, 具体大小为像在传感器上的移动速率 v_{scan} 与像元数 n 的乘积.

2.2 滤波器设计频域分析

在数字相机设计中, 要求光学镜头的极限分辨率高于传感器的极限分辨率^[9], 即相机的空间分辨 Nyquist 频率为 $1/2a$ (a 为传感器像元尺寸). 在相机光学镜头、传感器确定之后, 相机 MTF 就由后端电路特性决定. 图 2 为相机 MTF 曲线与信号滤波器电路之间的关系.

对于相机电路设计来说, 信号滤波器的最小带宽为相机 Nyquist 频率. 考虑一个二阶最小带宽低通滤波器, 其半功率带宽为 $\omega_{Nyquist}$, 品质因数为 Q , 直流增益为 1, 滤波器传递函数为

$$H_3(\omega) = 1 / [1 - (\omega/\omega_{Nyquist})^2 + (j\omega/\omega_{Nyquist})/Q] \quad (4)$$

设置滤波器品质因数 $Q > 1/\sqrt{2}$, 则 $|H_3(\omega)|$ 在 $\omega = \omega_{Nyquist} \sqrt{2Q^2 - 1}/\sqrt{2}Q$ 处会出现一个极大 ΔA 超量

$$\Delta A = 2Q^2 / \sqrt{4Q^2 - 1} - 1 \quad (5)$$

结合式(3), 可以看出滤波器将相机的 MTF 在 Nyquist 频率附近提高了 $\Delta A \times 100\%$.

再考虑滤波器噪声抑制能力, 滤波器的等效噪声带宽(Equivalent Noise Bandwidth, ENB)为

$$ENB_{filter} = \omega_{Nyquist} Q / 4 \quad (6)$$

可以看出, 滤波器噪声抑制能力为滤波器带宽及品质因数所决定, 这表明 Q 值不可过大以避免滤波器的噪声抑制能力降低太多.

2.3 滤波器设计时域分析

信号处理过程在频域的分析表明可以通过调整滤波器的品质因数对相机 Nyquist 频率处的 MTF 值进行增强. 然而要将增强效果实现, 还需在时域内完成, 由于 Gibbs 效应, 在时域内的结果与在频域内的结果有一定的差异. 由图 1 可知, CCD 信号在由滤波器处理之前需要进行 CDS 处理, 目的是用来消除 CCD 信号中的复位噪声, CDS 电路实现有多种形式. CCD 信号在经过 CDS 处理之后转换为与信号大小成正比的电平信号, 如图 3. 如果 CDS 电路增益为 1, 输出信号电平与参考电平的差值与 CCD 有效信号大小一致, CDS 电路对成像系统的 MTF 造成的影响可忽略.

低通滤波环节的作用是将 CCD 信号在 AD 转换之前最大限度滤除噪声. 考虑到 CDS 之后的 CCD 信号实质上是离散化后一阶保持的模拟信号, 其有效信息为像元信号电位与参考电位之差, 理论上来说, 只要滤波器输出能够保证在一个像元周期内电平有效信息无损即可, 此种情况下滤波器最小带宽应与 CCD 信号像元速率相当^[14]. 可以看到, 该滤波器最小带宽对应着相机的 Nyquist 频率.

如果滤波器通频带增益为常数, 那么在合适的 AD 采样情况下, 滤波器不会对系统 MTF 造成任何影响. 但是对于如式(4)的二阶滤波器, 阻尼系数 $\zeta = 1/2Q$ 会对滤波器的交流增益造成一定的影响, 进而影响系统 MTF.

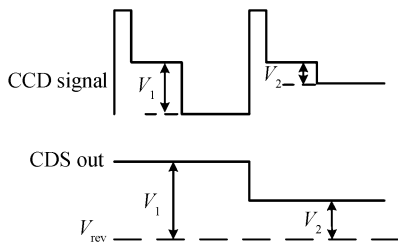


图 3 CCD 信号的 CDS 处理

Fig.3 The CDS processing for CCD signal

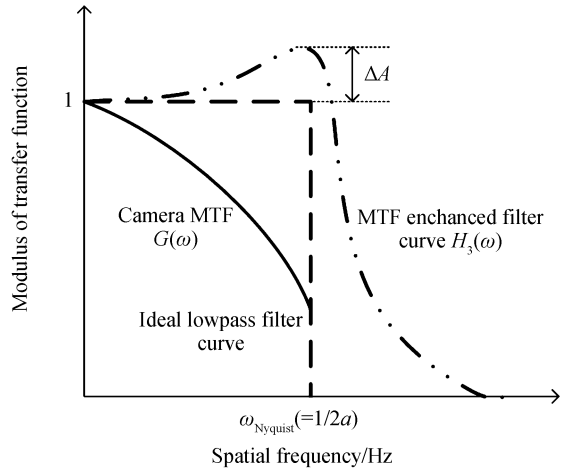


图 2 相机滤波器与 MTF 曲线

Fig.2 Camera filter and MTF curve

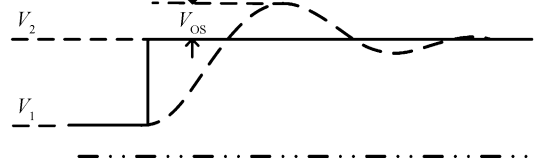


图 4 二阶低通滤波器的阶跃响应

Fig.4 The step response of the 2-nd order low-pass filter

当二阶滤波器阻尼系数 $\zeta=1/2Q<0.5$, 也即 $Q>0.5$ 时, 其阶跃响应会出现振铃(见图 4), 其中第一个振铃超量与信号本身变化量的关系为

$$V_{os} = (V_2 - V_1) \times \exp(-\pi/\sqrt{4Q^2 - 1}) \quad (7)$$

在理想情况下, 相邻像元接收的光信号存在差异时, 输出的 CCD 信号在经过 CDS 处理之后形成阶跃。如果成像目标为 $1/2$ 倍 Nyquist 相机空间频率以下的黑白条纹靶, 滤波器输出响应在 2 个像元周期内与其阶跃响应一致; 如果成像目标为与相机 Nyquist 空间频率相当的黑白条纹靶, 滤波器输出响应在 1 个像元周期与阶跃响应有一定差异, 该差异与品质因数 Q 相关。图 5 为滤波器对 Nyquist 空间频率的黑白条纹靶成像时 CDS 及滤波器的输出情况。表 1 为不同 Q 值时滤波器阶跃响应输出增量及对 Nyquist 空间频率黑白靶成像后 CDS 输出增量。

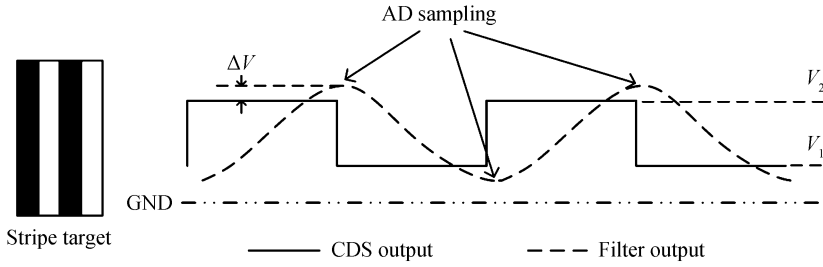


图 5 Nyquist 空间频率条纹靶成像中 CDS 输出及滤波器输出

Fig.5 The output of the CDS and filter in stripe with Nyquist spatial frequency imaging

表 1 滤波器的阶跃响应最大振铃及对相机 Nyquist 空间条纹靶成像后的方波响应最大振铃

Table 1 The maximum amplitude ringing in the filter response to step signal and square signal in stripe target imaging

Q	$\Delta V/(V_2 - V_1)$	$V_{os}/(V_2 - V_1)$
0.6	-0.095	0.01
0.7	-0.032	0.04
0.8	0.03	0.08
0.9	0.09	0.12
1.0	0.16	0.16
1.1	0.22	0.20
1.2	0.28	0.24
1.3	0.34	0.28

图 5 中, 假设黑白条纹靶的对比度为 1(在实际测试中, 黑白条纹靶对比度往往大于 0.99), 可以计算出 CCD 信号在滤波器前后的对比度传递函数 CTF(Contrast Transfer Function)分别为

$$CTF_{CDS_out} = (V_2 - V_1)/(V_2 + V_1) \quad (8)$$

$$CTF_{Filter_out} = (V_2 - V_1 + 2\Delta V)/(V_2 + V_1) \quad (9)$$

设置滤波器品质因数 $Q=1$, 依据表 1, 有 $\Delta V = V_{os}$, 这样就有

$$CTF_{Filter_out} = (V_2 - V_1 + 2V_{os})/(V_2 + V_1) \quad (10)$$

结合式(7)、(8)、(10), 当 $Q=1$ 时滤波器对系统的 CTF 增加量为

$$\Delta CTF(\%) = 2\exp(-\pi/\sqrt{4Q^2 - 1}) \times 100\% \quad (11)$$

将 CTF 傅里叶展开, 在忽略高次项的情况下 MTF 与 CTF 之间相差一个常数 $\pi/4$ 因子($MTF = CTF \times (\pi/4)$), 因此滤波器对系统 MTF 的增加倍数因子与 CTF 的相同, 将 $Q=1$ 带入式(11), 有 $\Delta MTF(\%) = 32\%$.

对于上述分析, 需要注意的是 AD 转换的采样点的设置, 只有当采样点设置在滤波器输出的波峰及谷底上时才会获得上述 MTF 的增强效果。这在精密时钟控制的情况下是比较容易做到的事情。

在最小带宽的情况下, 限制品质因数取值的另一个因素是滤波器阶跃响应的振铃恢复速度, 高 Q 值会导致振铃恢复速度过慢, 一次信号的梯度变化响应会对后续信号造成显著影响。图 6(a)、图 6(b) 分别显示了最小带宽滤波器(频率被归一化) $Q=1$ 及 $Q=2$ 时的阶跃响应振铃仿真情况。

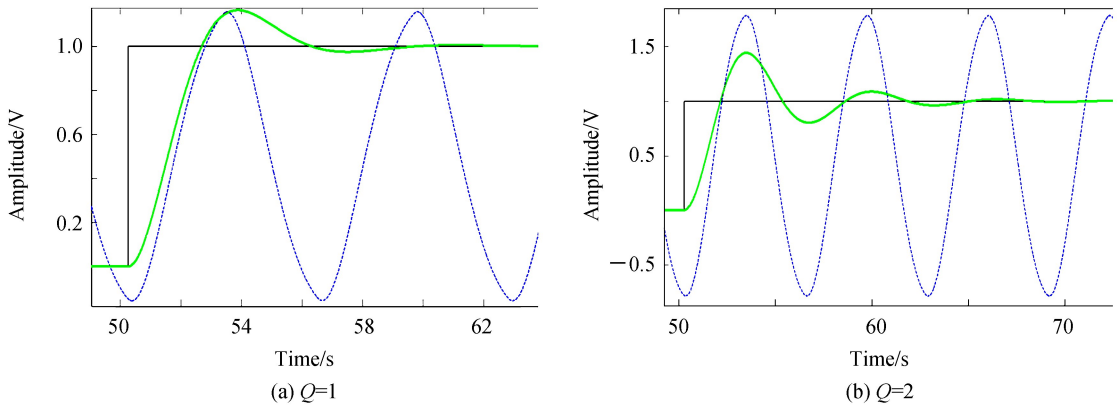


图6 不同Q值最小带宽滤波器阶跃响应振铃

Fig.6 The ringing in minimum bandwidth filter step response with various Q

在图6中,将滤波器对 Nyquist 空间频率黑白条纹靶的响应(虚线)也显示出来用于指示 AD 采样点(AD 采样点位于虚线的波峰及谷底,每一个采样点表示有一个像元).可以看出,当 $Q=1$ 时,阶跃之后只有第 2 个像元会受到振铃的影响,在采样点处幅值比真实输出低 1.4%;当 $Q=2$ 时,第 2 个像元采样点幅值处比真实值低 19.6%,且阶跃之后第 6 个像元之前的像元都会受到振铃的影响(在刀口靶成像时,这种振铃会导致图像边沿两侧出现条纹).

2 滤波器实现及测试结果

在某基于 TDI-CCD 的 10-bit 数字相机中,CCD 像元速率为 4Mhz.在 CCD 信号处理电路中,在 CCD 信号的 CDS 处理与 AD 转换之间加入了一个二阶低通滤波器,如图 7.

滤波器直流增益 $A=1+R_B/R_A$,品质因数 $Q=1/(3-A)$,半功率带宽 $\omega_0=1/RC$.

对相机信噪比的测试比较简单,使用积分球作为均匀光源,计算每一个像元在某一亮度下的响应信噪比,最后取相机所有像元信噪比的均值,计算方法为

$$SNR = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \overline{DN_m} / \sqrt{\sum_{n=1}^N (DN_{m,n} - \overline{DN_m})^2 / N} \quad (12)$$

式中, M 为相机总像元数, N 为推扫成像行数(这里取 500), $\overline{DN_m}$ 为第 m 个像元的均值.

对相机 MTF 的测试则有多种方法,诸如随机靶测试^[15]、倾斜刃边法^[16]、黑白条纹靶测试等.随机靶测试靶标加工困难,数据处理繁琐;倾斜刃边法则不太适用于推扫成像系统的实验室测量;黑白条纹靶测试方法靶板制作相对简单,测试结果为 CTF,与相机相差 $\pi/4$ 的因子,数据处理方便.这里使用黑白条纹靶测试方法进行相机 MTF 测试.

在相机的 MTF 黑白条纹靶测试方法中,使用与相机 Nyquist 空间频率相当的黑白条纹靶(对比度大于 0.99)作为成像目标,通过平行光管模拟无穷远.成像过程中,在偏角为 0° 时,条纹靶与传感器像元之间的相位关系会影响图像输出:相位差为 $\pi/2$ 的奇数倍时,相机输出为一均匀灰度;在其他情况时,相机输出为 0.5 倍像元空间频率的黑白条纹,且当相位差为 π 的整数倍时,黑白条纹的对比度达到最大,此时的图像黑白条纹对比度可以用来计算相机的 MTF.计算方法为:选定一对黑白条纹,依据式(13)计算 MTF

$$MTF = (\pi/4)(DN_{white} - DN_{black}) / (DN_{white} + DN_{black}) \quad (13)$$

式中, DN_{white} 、 DN_{black} 分别为黑白条纹的灰度均值.

分别计算获得连续 3~4 对黑白条纹的 MTF,然后取均值作为最终相机 MTF 测试结果.图 8 为相机在有/无 MTF 增强滤波器的情况下分别对条纹靶成像的结果,(b)中滤波器品质因数为 1.

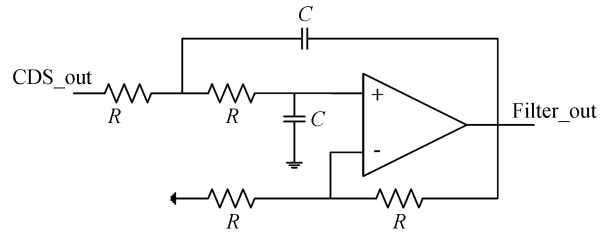
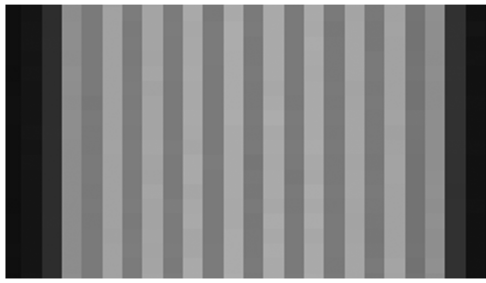
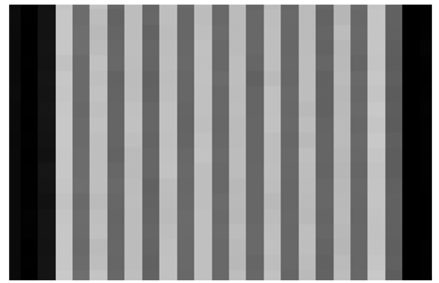


图7 CCD 相机 MTF 增强滤波器

Fig.7 The CCD camera MTF enhancement filter



(a) Strip target imaging without MTF enhanced



(b) Strip target imaging with MTF enhanced

图8 有无 MTF 增强滤波器时相机对条纹靶成像比较

Fig.8 Strip target imaging with and without MTF enhancement filter

表 2 为相机滤波器参数(Q, ω_0)分别为(0.7, 4.1 MHz)、(1, 4.1 MHz)及旁路滤波器时相机 MTF、相机信噪比测试数据.

表 2 不同滤波器参数情况下的相机 MTF 及 SNR

Table 2 The MTF and SNR for filter with various parameters

Filter parameters: Q, ω_0 / MHz	MTF	SNR(Gray level 82)
0.7, 4.1	0.200	92.16
1, 4.1	0.260	92.05
Filter bypassed	0.201	90.10

注:信噪比测试中入射光强比较低,是为了降低光子噪声的影响.

可以看出,在没有滤波器时,系统 MTF 未被增强,同时图像 SNR 也没有任何改善;将滤波器调整至最小带宽附近($\omega_0 = 4.1\text{MHz}$)且通带内无尖峰($Q = 0.7$),成像 MTF 未被增强,图像 SNR 提高了 2.3%;将最小带宽滤波器 Q 值提高至 1 时,由于等效噪声宽度有一定增加,图像信噪比较无滤波器提高了 2.2%,但是 MTF 值则大幅度提高.显然,最小带宽 MTF 增强滤波器对相机成像质量产生了一个有效提升.

3 讨论

由 MTF 增强滤波器设计过程描述可以看出,滤波器增强 MTF 的本质是对相邻像元之间的电位差进行等比例放大,由于处理过程的顺序关系,因此只有当 CCD 按照成像像元顺序(或逆序)输出时,MTF 增强滤波器才会有效果,而当 CCD 像元输出按照非顺序(或逆序)输出时(例如某些线阵 CCD 传感器的奇、偶像元分别从 2 个输出通道输出),MTF 增强滤波器就不适宜使用了.同时,由于滤波器电路信号处理过程只能按像元输出依次进行,因此对于成像过程只能在一个方向(行或列)进行 MTF 增强,但是无论如何,从最终图像的目视结果来看还是能够有较好的增强效果.

从 MTF 增强方面看,本文中的 MTF 增强滤波器产生的效果可以使用图像处理中的边缘增强滤波器同样的实现,但是由于在处理过程中,MTF 增强滤波器同时抑制了 CCD 信号中的噪声,在一定程度上提高了相机像元响应的信噪比,最终提高了数字相机的信噪比,这是通过数字边缘增强的方法所不能实现的.

4 结论

本文依据数字成像相机成像链路特点,提出了一种最小带宽 MTF 增强滤波器的设计方法,分别从频域及时域内讨论了滤波器参数对 CCD 信号的影响情况.对于 CCD 信号处理流程,在 CDS 处理之后进行滤波时,滤波器最小半功率带宽为相机的 Nyquist 频率,当滤波器品质因数设置为 1 时,设置合理的 AD 采样点,能够有效提高信号的传递函数,进而增强相机成像 MTF.同时,由于滤波器本身具备带外信号抑制的能力,夹杂在 CCD 信号中的噪声得到了一定的抑制,一定程度上提高了相机响应信噪比.MTF 增强滤波器最后实现于某线阵 CCD 传感器的相机中,将相机 MTF 在“行”方向提高了 30%,图像灰度为 82 时信噪比得到 2% 的提升,验证了 MTF 增强滤波器的效果.

参考文献

- [1] LI Xu-yang, YI Hong-wei, QI Hao-cheng. Optical system design of multispectral space camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(3): 0311002.

- 李旭阳,易宏伟,齐浩程. 多光谱遥感相机光学系统设计[J]. 光子学报,2015,**44**(3):0311002.
- [2] BOREMAN G D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems[M]. Bellingham, WA: SPIE press 2001:53-55.
- [3] WANG Fan, GUO Rong-li, NI Jin-ping, *et al.* Modulation transfer function of a trapezoidal pixel array detector[J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(1): 013106.
- [4] NIE Kai-ming, LI Lin, YAO Su-ying. Scanning modulation transfer function model of TDI CMOS image sensor[J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2016, **82**(1):17 - 25.
- [5] WANG De-jiang, DONG Bin, LI Wen-ming, *et al.* Influence of TDI CCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **19**(10): 2500-2506.
王德江,董斌,李文明,等. TDI CCD 电荷转移对遥感相机成像质量的影响[J]. 光学精密工程,2011,**19**(10):2500-2506.
- [6] LI Jun-lin, GUO Yong-fei, LI Jing-qiu, *et al.* Influence of electronic nonlinearities of spacecamera on MTF and their discriminance[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(11): 3219-3226.
李俊霖,郭永飞,李静秋,等. 遥感相机电子学非线性对调制传递函数的影响及其判别[J]. 光学精密工程,2015,**23**(11): 3219-3226.
- [7] XUE Xu-cheng, SHI Jun-xia, LV Heng-yi, *et al.* Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(4):857-863.
薛旭成,石俊霞,吕恒毅,等. 空间遥感相机 TDI CCD 积分级数和增益的优化设置[J]. 光学精密工程,2011,**19**(4): 857-863.
- [8] FREDIN P. Optimum choice of anamorphic ratio and boost filter parameters for a SPRITE based infrared sensor[C]. SPIE, 1991, **1488**: 432-442.
- [9] ROBERT D F. Modeling the imaging chain of digital cameras[M]. Bellingham, WA: SPIE press 2010: 127-134.
- [10] ZHOU Nan, QI Wen-wen, CAO Shi-xiang, *et al.* Adaptive MTFC restoration algorithm of remote sensing images based on spatial domain[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, **36**(4):54-62.
周楠,齐文雯,曹世翔,等. 基于空域的自适应 MTFC 遥感图像复原算法[J]. 航天返回与遥感, 2015, **36**(4): 54-62.
- [11] GE Ping, WANG Mi, PAN Jun, *et al.* A study of adaptive MTF restoration of high resolution TDI-CCD image data[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2010, **87**(4): 23-28.
葛平,王密,潘俊,等. 高分辨率 TDI-CCD 成像数据的自适应 MTF 图像复原处理研究[J]. 国土资源遥感, 2010, **87**(4): 23-28.
- [12] JANG J H, KIM S D, RA J B, Enhancement of optical remote sensing images by subband-decomposed multiscale Retinex with hybrid intensity transfer function[J]. *IEEE Geoscience and Remote sensing Letters*, 2011, **8**(5):983-987.
- [13] SU Juan, LI Bing, WANG Yan-zhao. Infrared image enhancement based on PCNN segmentation and fuzzy set theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(9): 0910001.
苏娟,李冰,王延钊 结合 PCNN 分割和模糊集理论的红外图像增强[J]. 光学学报,2016, **36**(9): 0910001.
- [14] ZHANG Jian,ZHANG Bo-heng,BIAN Chuan-ping *et al.* CCD signal filter design[J]. *Spacecraft recovery & remote sensing*, 2006, **27**(4):49-52.
张健,张伯珩,边传平,等.CCD 信号处理的滤波器设计[J]. 航天返回与遥感,2006, **27**(4): 49-52.
- [15] KANG Ji-qiang, HAO Qun, CHENG Xue-min. Measurement and comparison of one-and two dimensional modulation transfer function of optical imaging systems based on the random target method[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(10): 104105.
- [16] Photography-electronic still picture cameras-resolution measurement[S]. ISO Standard 12233:2000.