

doi:10.3788/gzxb20134207.0828

探测器采样频率与光学系统衍射截止频率比值 对航空图像质量的影响

丁帅^{1,2}, 匡海鹏², 王德江², 徐正平², 丁亚林²

(1 中国科学院大学, 北京 100049)

(2 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, 长春 130033)

摘 要:以 Q 值作为参照指标, 考虑光学系统分辨率和探测器分辨率, 通过图像仿真效果的对比讨论了不同 Q 值成像系统的成像质量. 结果表明: 成像系统设计过程中需在光学系统分辨率和探测器分辨率之间进行权衡, $Q=2$ 时成像系统的成像质量最好, 但实际设计过程中考虑到其他因素(系统信噪比、场景大小、运动模糊等), 往往取 $Q<2$ 可获得高品质图像. 因此, Q 值可作为参考指标为光电成像系统设计提供一定指导.

关键词:成像系统; 光学分辨率; 探测器分辨率; 成像质量

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)07-0828-4

Influence of Detector Sampling Frequency to Optics Diffraction Frequency Ratio on Aviation Image

DING Shuai^{1,2}, KUANG Hai-peng², WANG De-jiang², XU Zheng-ping², DING Ya-lin²

(1 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

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

Abstract: The Q of a digital imaging system defines how these two limitations are balanced in the camera design. The image quality in different Q values was simulated and compared. During the design phase, a tradeoff between optical resolution and detector resolution limitations ensues regarding the best Q for an imaging system. A $Q=2$ design seems to offer the best image quality from a fundamental resolution perspective, however, other factors such as signal to noise ratio (SNR), scene area and motion blur can push the design to a lower Q . The best Q for the design is determined by performing careful trade studies. Q value can be used as a directory indicator in imaging system design.

Key words: Imaging system; Optics resolution; Detector resolution; Image quality

0 引言

空间分辨率一直是成像系统的重要评价指标, 光学系统和数字探测器共同限制着系统分辨率. 光学系统将场景上每一点光源衍射成模糊光斑, 探测器阵列则将场景离散并采样成为各像素点并最终形成数字图像^[1]. 光学系统和探测器对像质的影响受人们广泛关注, Mojtaba 和 Dariush 认为成像系统

设计先根据顾客要求经过理论计算选择合适的光学系统和探测器, 通过计算信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 和系统调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 来评价像质, 然后在 SNR 和 MTF 两者间进行权衡确定最终方案^[2]. 葛华勇等基于点扩散函数, 分析了探测器尺寸对分辨率的影响, 并提出针对共焦系统提出最佳针孔半径^[3]. Christophe 和 Bemard 基于推扫式成像高分

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2009CB724001) 和吉林省重大科技攻关项目 (No. 11ZDGG001) 资助

第一作者: 丁帅 (1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为超分辨率. Email: shuai.ding880413@gmail.com

导师 (通讯作者): 匡海鹏 (1971-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为航空相机技术. Email: kuanghp@163.com

收稿日期: 2012-12-06; 录用日期: 2013-01-04

分辨率航空遥感系统,从信号处理的角度对成像过程进行分析,主要讨论了 MTF、SNR 和采样间隔三个参量之间的关系,给出最佳采样方案——超模采样方案^[4]. Cynthia Liu 和 Jer Lin 等从探测器填充因子角度出发,给出最优 MTF 和 SNR 状态下矩形探测器像元的设计方案^[5]. 针对以往提出的各种成像系统设计参考指标及优化方案,本文从光学系统截止频率和探测器采样频率对相分辨率限制的角度出发,将两者对像质的影响综合起来考虑,通过定义 Q 值将光学系统分辨率限制与探测器分辨率限制作为一个统一指标考虑,可通过 Q 值大小直接确定两者之间的权衡关系,为光电成像系统设计提供指导.

1 空间分辨率

空间分辨率,即图像中可分辨的最小空间细节尺寸,反映了系统分辨细节的能力,也是图像中目标细微程度的指标. 它表示景物信息的详细程度^[6-8],通常系统的空间分辨率受光学系统与探测器的双重限制^[9].

1.1 光学系统分辨率

由于衍射的存在,即使是无像差的光学组件的分辨率也是受限的. 根据瑞利判据,对于一个圆形光瞳衍射受限系统,若一点光源产生的艾利斑强度分布图样的中心恰好落在另一点光源产生艾利斑的第一个零点上,则这两个点光源为系统刚刚能够分辨的两点^[10]. 这两点的物方距离既定义为系统的空间衍射极限. 对于一个入射光波长为 λ , 入瞳直径为 D , 焦距为 f , 成像系统 F 数(相对孔径倒数)为 $f/\#$ 的光学系统,其空间衍射极限^[11]为

$$d_{\text{Rayleigh}} = 1.22\lambda f/D = 1.22\lambda (f/\#) \quad (1)$$

其空间截止频率(ξ_c)表示为

$$\xi_c = 1/\lambda (f/\#) = 1/\lambda (f/D) = D/\lambda f \quad (2)$$

1.2 探测器分辨率

探测器可以把通过光学镜头投影到其上的景物可见光信号转换为电信号,它是一种离散器件,接收到的光信号是连续的,输出的电信号却为离散的. 探测器的离散结构决定其采样频率^[12],即

$$\xi_{\text{sampling}} = 1/p \quad (3)$$

式中, p 为探测器像元间距.

采样定理指出,输入图像的频谱中高于 Nyquist 频率(采样频率的一半)的高频信息会沿着 Nyquist 频率对折混入低频当中,这种现象称为频谱混叠^[9]. 为避免混叠现象,探测器采样的截止频率为 Nyquist 频率,即

$$\xi_N = 1/2p \quad (4)$$

2 Q 值定义及分析

2.1 Q 值定义

在成像系统设计过程中将两种分辨率受限条件统一起来考虑是十分必要且有意义的,成像系统设计参量 Q 定义为探测器采样频率与光学系统衍射截止频率之比^[1]

$$Q = \frac{1/p}{1/\lambda (f/D)} = \frac{\lambda f}{Dp} = \frac{\lambda (f/\#)}{p} = \frac{2\xi_N}{\xi_c} \quad (5)$$

若成像系统对一个波段的不同波长成像,则 λ 为谱段的平均波长. 对大多数光学系统通频带和探测器采样频率是固定的,除非系统 F 数变化,否则 Q 值不会随不同图像变化.

2.2 Q 值对图像质量影响分析

假设探测器像元尺寸等于采样间距且像元间无空隙,可以通过改变点扩散函数(Point Spread Function, PSF)宽度和改变采样频率两种方法来改变成像系统 Q 值. 从图 1 中可以看出: $Q=1$ 时,周期性出现的频谱发生混叠,导致图像不清晰; $Q=2$ 时,探测器采样频率恰好为光学截止频率的两倍,频谱不混叠且 ξ_c 和 ξ_N 之间没有空白区域; $Q=3$ 时,周期性复现的频谱之间虽然没有混叠但 ξ_c 和 ξ_N 之间有一段区域缺少空间频率信息,导致图像模糊. 以上分析表明一个 $Q=2$ 的设计在光学组件和探测器之间提供了最好的空间频率覆盖度.

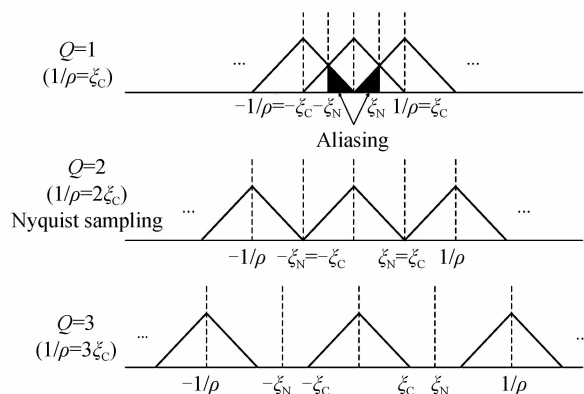


图 1 不同 Q 值下图像频谱

Fig. 1 The image spectra for three different Q values

取 Nyquist 频率为 0.5 周期每像素,从图 2 可以看出: $Q < 2$ 时,系统 MTF 较高,却引入频谱混叠; $Q > 2$ 时,系统 MTF 较低,即便没有频谱混叠现象图像也模糊不清. 同时注意到,对于 $Q \geq 2$ 的成像系统, Nyquist 频率处系统的 MTF 为零,也就是说在 Nyquist 频率及稍低于 Nyquist 频率处的信息将无法显示在图像当中. 当 Q 值降到 2 以下时, Nyquist 频率处的信息可以更好地显示在图像当中,这对一个信号强度和对比度受限的图像尤为重要.

分析表明:似乎所有成像系统都应该被设计成为一个 $Q=2$ 的系统,然而, Q 值仅仅表示了最基础的光学系统和探测器采样的分辨率限制,还有很多其他因素(例如:动态范围和光学镜头质量等)共同决定图像的最终效果.当综合考虑到成像系统图像频谱情况和 MTF 时, $Q < 2$ 时系统的最终成像结果较好.

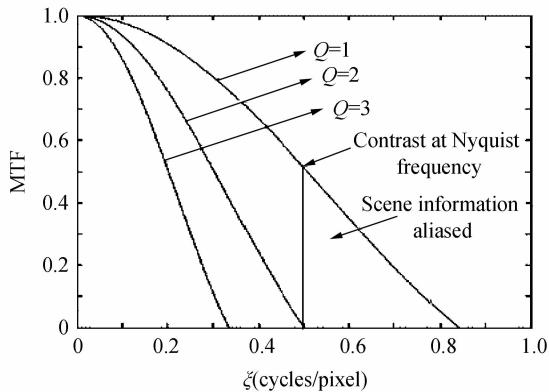


图2 不同 Q 值下某系统 MTF

Fig. 2 A system MTF for three different Q values in cycles/pixel

3 实验与结果分析

3.1 仿真实验

图3和图4是在 Matlab7.0 环境下仿真的两组图像^[13-14],仿真实验所使用的原始图像为从 10 km 高空对地垂直拍摄得到的图像,如图3(a).该图像成像系统参量如表1,根据式(5)可知,该图对应成像系统 Q 值为 0.308.

图3中保持探测器采样频率不变,通过增加 PSF 宽度使 Q 值增大^[15].从图3可以看出,尽管 Q 值增大减少频谱混叠,但图像模糊度随着 Q 值增加

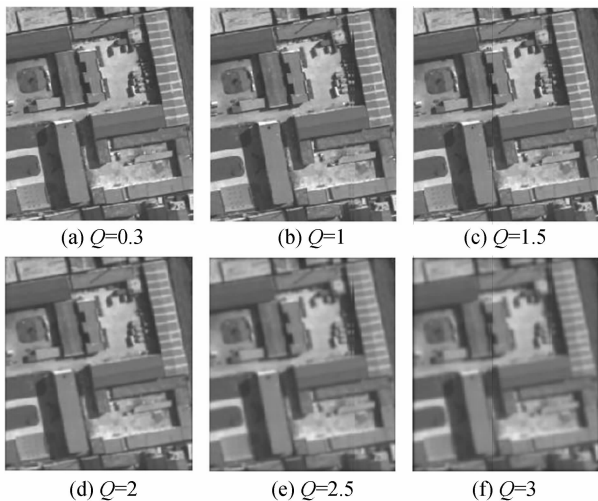


图3 通过改变光学系统 PSF 改变 Q 值

Fig. 3 Changing Q by changing the optics PSF

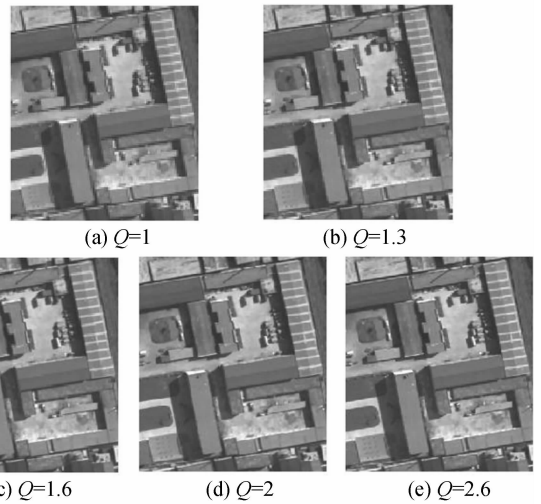


图4 通过改变探测器采样频率来改变 Q 值

Fig. 4 Changing Q by changing the detector sampling

表1 仿真原始图像成像系统参量

Table 1 System parameters of original image

Parameters	Value
Pixel/ μm^2	10×10
Camera focal length/m	1
Relative aperture	1 : 5.6
Q	0.308

却逐渐增强.从仿真结果来看,5幅图形中成像质量较好的是 $Q < 2$ 的成像系统所采集到的图像.

图4中保持系统 PSF 不变,通过提高采样频率,即减小像元间距 p 使 Q 值增大(改变采样点会改变图像尺寸,为方便比较将图像显示成同等大小).从图中可以看出:在系统达到 $Q=2$ 之前增加采样点使得图像质量明显提高; $Q > 2$ 时,图像质量与 $Q=2$ 时相比并没有明显变化;在 $Q=2$ 时,成像系统的成像质量开始受限于光学成像系统,即使提高采样频率,也无法使图像变得更加清晰.

3.2 仿真结果客观评价

峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)是最普遍、最广泛使用的评鉴像质的客观量测法,也是一种比较接近人眼视觉效果的客观评价^[16],计算公式为

$$\text{PSNR} = 10 \times \log \left(\frac{255^2}{\text{MSE}} \right) \quad (6)$$

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{n=1}^{\text{Framesize}} (I_n - P_n)^2}{\text{Framesize}} \quad (7)$$

式中,均方误差为(Mean Square Error, MSE); I_n 指原始影像第 n 个像素灰度值; P_n 指经处理后的影像第 n 个像素灰度值; Framesize 为图像大小; PSNR 的单位为 dB.

表 2 列出图 3 中各图像相对于原始图像的 PSNR.

表 2 图 3 中各图像相对于原始图像的 PSNR

Table 2 PSNR for images in Fig. 3 compared to original image

	Q=1	Q=1.5	Q=2	Q=2.5	Q=3
PSNR/dB	120.089 0	46.697 0	28.566 2	25.383 0	23.870 8

PSNR 值越大表示图像失真越小,像质越好.表 2 中数据表明, $Q < 2$ 时图像质量较好,尤其当 $0.3 < Q < 1.5$ 时,与 3.1 节中分析结果一致.

4 结论

在红外成像系统设计过程中,需要在光学系统分辨率与探测器分辨率之间进行权衡.理论分析表明似乎所有的成像系统都应该设计成 $Q = 2$ 的系统,然而实际的系统中还有许多其他因素会影响其最终成像质量(例如:系统信噪比、场景大小、运动模糊等).这些因素会导致系统最终的 Q 值小于 2,决定对于系统来讲最好的 Q 值需要综合考虑成像系统的用途和设计限制条件(现有技术、相机尺寸等).在设计成像系统时需权衡以上各项条件,尽量得到一个 Q 接近于 2 的系统.

参考文献

- [1] FIETE R D. Modeling the imaging chain of digital cameras [M]. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2010.
- [2] ABOLGHASEMI M, ABBASI - MOGHADAM D. Design and performance evaluation of the imaging payload for a remote sensing satellite[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(8): 2018-2026.
- [3] GE Hua-yong, WANG Bao-hua, REN Qiu-shi. Influence of detector on resolution in confocal imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 587-590.
- [4] LATRY C, ROUGE B. Optimized sampling for CCD instruments; the supermode scheme[J]. *IEEE Proceedings IGARSS*, 2000, **4**: 2322-2324.
- [5] LIU C, LIN J, TSENG M. Design of CMOS sensor fill factor for optimal MTF and SNR[C]. *SPIE*, 2010, **7826**: 78261N.
- [6] QIAO Jian-ping. Research on super-resolution reconstruction and image enhancement technique [D]. Ji'nan: Shandong University, 2008: 21-23.
乔建苹. 超分辨重建与图像增强技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2008: 21-23.
- [7] YUAN Jian-hua. Topics in super-resolution image reconstruction[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, 2006: 1-3.
袁建华. 超分辨率重建中若干问题的研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2006: 1-3.
- [8] CHENG Yan. Studies on image super resolution construction [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. 1-3.
程燕. 图像超分辨率重建关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. 1-3.
- [9] LIU Yan-yan. Research on novel super-resolution reconstruction method[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010: 21-26.
刘妍妍. 一种新型超分辨技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010: 21-26.
- [10] GOODMAN J W. Introduction to fourier optics[M]. QIN Ke-cheng, LIU Pei-sen, CHEN Jia-bi, et al, transl. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 112-113.
GOODMAN J W. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 112-113.
- [11] SMITH W J. Modern optical engineering[M]. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2000: 192-195.
- [12] WANG De-jiang, KUANG Hai-peng, LI Wen-ming, et al. Effect of optical zoom and scaling algorithms on image resolution[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(12): 46-49.
王德江, 匡海鹏, 李文明, 等. 光学变焦与缩放算法对图像分辨率的影响[J]. 光电工程, 2010, **37**(12): 46-49.
- [13] 张志涌. 精通 MATLAB R2011a[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [14] 王正林, 刘明. 精通 MATLAB[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [15] MENG Yong-ding, MA Jia. Realizing digital image restoration based on MATLAB[J]. *Computer Study*, 2007 (1): 31-32.
孟永定, 马佳. 基于 MATLAB 实现数字图像恢复[J]. 电脑学习, 2007(1): 31-32.
- [16] XU Zheng-ping, ZHAI Lin-pei, GE Wen-qi, et al. CCD geometric superresolution method based on subpixel [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2450-2451.
徐正平, 翟林培, 葛文奇, 等. 亚像元的 CCD 几何超分辨方法[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(12): 2450-2451.