

# 数字成象系统调制传递函数的测定及应用

贾永红

## 摘 要

本文首次探讨了数字成象系统调制传递函数的测定方法及应用。试验结果表明：该测定方法不仅合理可行，而且强有力地证明了MTF的应用价值。即不仅用于象质的评价，而且为成象系统的检定和调试提供了新的技术手段。

【关键词】 线扩散函数；调制传递函数；分解力；瞬时视场；重抽样

## 1 概 述

随着航天遥感技术的迅速发展，遥感工作者对卫星图象的质量越来越关注。如何评价和提高图象的质量，是一个相当重要而又复杂的问题。调制传递函数是评定图象质量的重要方法。由调制传递函数可以较准确地估计成象系统的分解力。因此测定数字成象系统的调制传递函数对评价卫星数字扫描图象是相当重要的。本文首次以固体摄像机CCD获取的数字扫描图象为例，探讨数字成象系统调制传递函数（简称MTF）的测定方法及其应用。

## 2 测定方法

对于数字成象系统而言，其像素大小相对于测定模拟成象系统MTF的刀刃采样间隔而言，显得太大，因此表达刀刃影象的像素就太少。如果直接用刀刃梯度法测定线扩散函数 $A_{(x)}$ 和MTF，则 $A_{(x)}$ 和MTF就存在很大的随机性和不稳定性，从而测定的 $A_{(x)}$ 和MTF就不能用来评价象质。但当数字扫描图象满足采样定理时，由数字扫描图象可以重建成连续图象。这就为测定数字成象系统的MTF提供了一种有效的解决问题的方法。因此数字成象系统MTF的测定方法如下：

（一）确定刀刃范围及刀刃方向：刀刃范围根据刀刃在图象中的位置适当选取。若刀刃方向与采样方向不垂直，则需用最小二乘直线拟合法，确定刀刃方向与采样方向的夹角 $\alpha$ ，如图1

收稿日期：1990—03—13

\* 本文为硕士论文的一部分，宣家兵、梁荫中和刘明华三位副教授给予了支持和帮助

所示。

(二) 刀刃所在范围的重抽样：象元亮度值的间接重抽样是用重抽样函数来表达周围象素亮度值对被抽样点（非整数点位）贡献的权。理想的重抽样函数是辛克函数（如图 2 所示）。其横轴上各点的幅值代表了相应点对原点（O）处亮度贡献的权。但由于辛克函数是定义在无穷域上的，又包括三角函数的计算，实际使用起来不方便。因此常用的亮度重抽样法有最邻近元算法、双线性插值算法和三次褶积重抽样三种。其中三次褶积算法虽然计算速度最慢且最复杂，但重建的图象质量最优。这是由于该方法具有微分特点所致。根据 MTF 测定的要求，笔者选择三次褶积重抽样函数来近似表达辛克函数（如图 3 所示）。

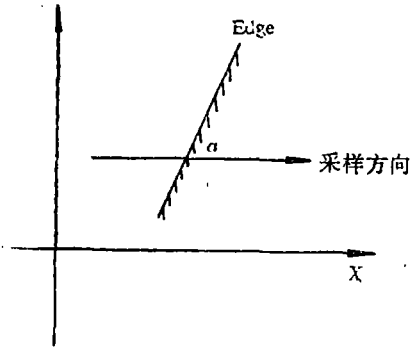


图 1 刀刃与其采样方向

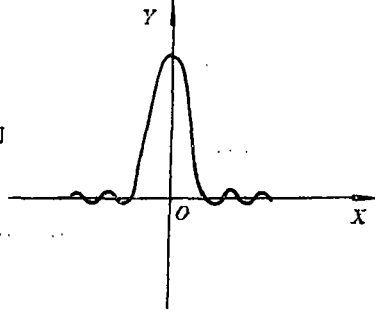


图 2 辛克函数

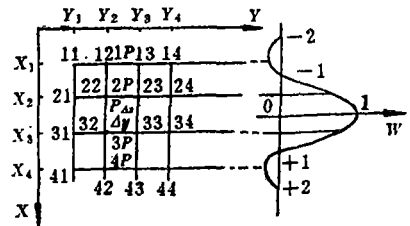


图 3 双三次褶积重抽样

三次褶积重抽样函数的表达式如下：

$$\left. \begin{aligned} w_c(x) &= 1 - 2x_c^2 + |x_c|^3 & 0 \leq |x_c| \leq 1 \\ w_c(x) &= 4 - 8|x_c| + 5x_c^2 - |x_c|^3 & 1 \leq |x_c| \leq 2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $x_c$  定义为以被抽样点为原点的邻近象素的  $x$  坐标值，其象素间隔为 1。

图 3 中  $P$  点为被抽样点，利用三次褶积对  $P$  点亮度重抽样时，其计算公式如下（推导过程见参考文献<sup>[2]</sup>）：

$$B_p = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 w(x_{c(i,p)}) B_{ij} w(y_{c(i,j)}) \quad (2)$$

其中  $B_{ij}$  为  $P$  点四周一个已知象素的亮度值；

$x_{c(i,p)}$  为  $ip$  点相对于  $p$  为原点的坐标值。

(三) 刀刃采样及其滤波：根据 (2) 式对刀刃所在范围重抽样，这样采样间隔就为原来的一半。若是沿如图 1 所示  $x$  方向采集刀刃数据，则实际刀刃采样间距为  $\Delta d = \frac{1}{2} d \sin \alpha$ ，其中  $d$  为象元在  $x$  方向的宽度，采集第一条刀刃数据后，应根据 (一) 中最小二乘拟合的刀刃斜率和采集第一条刀刃数据的起点逐次确定其余几条刀刃的起点，使起点在沿平行于刀刃方向上采集的数条刀刃数据能取平均值，将平均值作该刀刃的最佳采样数据。

尽管各刀刃数据是取平均值的结果，但得到的刀刃数据仍存在一定的噪声，需进行滤波。采用的滤波方法是以 Butter worth 为滤波器的频率域滤波法<sup>[3]</sup>。

(四) 计算线扩散函数  $A(x)$  及其等效宽度 EQW 和  $2\sigma$ ；对刀刃亮度曲线求导就得到线扩散函数  $A(x)$ ，其表达式为：

$$A(x) = \frac{dB(x)}{dx} \quad (3)$$

线扩散函数的等效宽度是评定像质的重要指标参数。其倒数与成象系统的目视分解力接近<sup>[3]</sup>。其表达式为： $EQW = \int A(x)dx / A(x)_{max}$  (4)

$2\sigma$ 是对线扩散函数归化后，线扩散函数为0.61时的宽度。

(五) 计算  $MTF$ ：将线扩散函数进行付立叶变换，就可以求得调制传递函数，然后由  $MTF$  来计算评定象质的参数，考虑到本文是首次对扫描图象进行  $MTF$  的测定，所以计算了如表 2 的各种参数，以进行分析和比较。表 2 各参数的意义介绍如下：

### 1、 $2\sigma$ 、 $EQW$ 和 $\frac{1}{EQW}$

$2\sigma$  是在假定成象系统的线扩散函数呈高斯分布的情况下，线扩散函数最大斜率处的宽度。

$EQW$  是以线扩散函数的最大值  $A(x)_{max}$  为高度，与  $A(x)$  所包围的面积相等的矩形的宽度。如图 4。 $\frac{1}{EQW}$  是  $EQW$  的倒数。

### 2、 $R_{MTF=0.05}$ 和 $R_{MTF=0.02}$

$R_{MTF=0.05}$  和  $R_{MTF=0.02}$  分别代表  $MTF=0.05$  和  $MTF=0.02$  所对应的空间频率，如图 5。

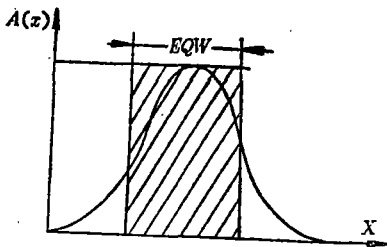


图 4

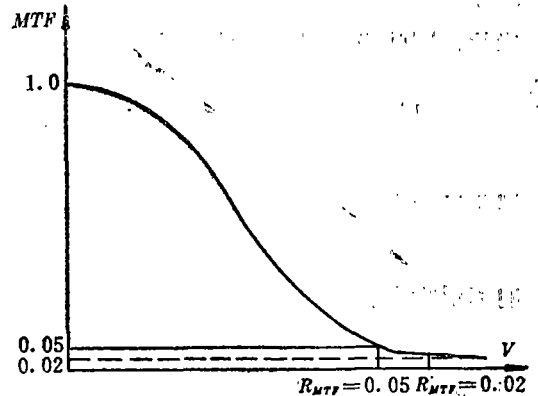


图 5

## 3 试验资料及试验成果分析

为了将上述方法用于测定数字扫描图象的  $MTF$ ，并用于评定图象的质量，试验采用 CCD 摄象机进行了模拟调焦试验，共获取不同调焦量的 12 幅数字图象（试验由梁荫中、刘明华和宣家斌三位副教授设计），该摄象机的象元大小为  $8\mu m \times 12\mu m$ ，试验中  $d$  取  $12\mu m$ ，有关参数见表 1。

按照所述方法，选取人工刀刃、自然刀刃为对象，分别计算  $A(x)$ 、 $MTF(v)$  评定象质的参数  $2\sigma$ 、 $EQW$ 、 $\frac{1}{EQW}$ 、和  $R_{MTF=0.05}$  和  $R_{MTF=0.02}$  等。计算结果如表 2，根据计算结果作了如下分析。

表 1

对 焦 (人眼感觉)	不 清 晰			清 晰						不 清 晰		
图幅编号	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> *	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>9</sub>	A <sub>10</sub>	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>
人工刀刃编号	ED 1		ED 3	ED 4	ED 5	ED 6	ED 7	ED 8	ED 9	ED 10	ED 11	ED 12
自然刀刃编号	RED 1		RED 3	RED 4	RED 5	RED 6	RED 7	RED 8	RED 9	RED 10	RED 11	RED 12
相对调焦量 $\frac{\Delta f}{\mu\text{m}}$	41.5		15.2	10.1	5.1	4.6	5.7	6.2	11.9	21.0	20.5	

- 存数据文件A<sub>2</sub>的磁盘有毛病，数据读不出，没有进行处理。  
相对调焦量是梁荫中付教授测定的。

1. 各个参数与调焦量的关系：为了形象地反映各个参数随调焦量变化的规律性，绘制了各个参数随调焦量变化的略图，如图 6 和 1 所示，由图明显地可以看出，各个参数随调焦量变化的规律性。

①  $2\sigma$  和  $EQW$  随调焦量变化的规律性基本相同， $2\sigma$  相对  $EQW$  来说，大体上向下移了一段距离，但由图 6 和图 7 对比，可以发现，随调焦量的变化以自然刀刃（河流）计算的  $2\sigma$  和  $EQW$  特别是在焦面附近比人工刀刃计算的结果更为敏感，这是因为河流位于象场中心，而人工刀刃位于象场边缘的缘故，但从数值上比较，由表 2 可以得出：以人工刀刃计算的  $2\sigma$  和  $EQW$  在成象清晰时都相应比自然刀刃计算的小，这是因为人工刀刃的反差高于自然刀刃的缘故，因此当用 MTF 方法对数字扫描仪进行检定时，应采用位于象场中心的人工标志。

② 以  $MTF = 0.05$  和  $0.02$  所对应的空间频率（相当于频谱的高频部分）以及  $\frac{1}{EQW}$  均随调焦量的变化而变化，其中  $R_{MTF-0.05}$  和  $R_{MTF-0.02}$  的变化规律是一致的，而  $\frac{1}{EQW}$  与它们不很吻合。这是因为采用频率域滤波时，计算的  $\frac{1}{EQW}$  与目视分解力一致，而  $R_{MTF-0.05}$  和  $R_{MTF-0.02}$  与目视分解力不一致。因此， $\frac{1}{EQW}$  和  $R_{MTF-0.05}$  和  $R_{MTF-0.02}$  的变化规律不可能一致。但比较图 6 和图 7 可以看出，随着调焦量的变化，以自然刀刃计算的  $\frac{1}{EQW}$ ， $R_{MTF-0.05}$  和  $R_{MTF-0.02}$  比人工刀刃计算的结果尤其在焦面附近更为敏感，而由表 2 可知，在数值上前者计算的结果比后者小，理由同上①。

③ 比较图 6 和图 7 可以发现，以人工刀刃和自然刀刃计算的各个参数的峰值（即最佳焦平面）并不一致。这可能是由于试验中调焦幅度比较大的缘故，由表 1 可知，最小相对调焦量为  $4.6\mu\text{m}$ ，还不能充分体现各个参数在焦面附近变化的规律。

综上所述，各个参数都能反映离焦量变化的情况，而且以刀刃在象面中心附近计算的结果反映离焦现象更为敏感。由图 6 和图 7 不仅可以判断成象系统的焦深范围，而且可以根据实际用途选择最佳焦面。这将为解决无人控制的遥感系统产生的离焦现象，提供了一种有效

表 2

刀刃性质	人 工					自 然					备 注
	$2\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )	EQW ( $\mu\text{m}$ )	$\frac{1}{\text{EQW}}$ (线对/ 毫米)	$R_{\text{MFT}} = 0.02$ (线对/ 毫米)	$R_{\text{MTF}} = 0.02$ (线对/ 毫米)	$2\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )	EQW ( $\mu\text{m}$ )	$\frac{1}{\text{EQW}}$ (线对/ 毫米)	$R_{\text{MTF}} = 0.05$ (线对/ 毫米)	$R_{\text{MTF}} = 0.05$ (线对/ 毫米)	
1	44.76	51.83	19.29	24	26	37.20	46.21	21.64	24	27	
2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	文件读 不出
3	25.62	33.44	29.90	32	39	32.30	44.85	22.30	29	31	
4	22.89	28.60	34.96	33	38	27.52	38.74	25.81	34	38	
5	21.09	26.48	37.76	37	41	25.73	38.20	26.18	35	37	
6	20.52	26.53	37.69	38	46	21.63	34.62	28.88	37	49	
7	19.75	25.89	38.63	40	48	21.66	33.34	29.99	47	51	
8	20.12	26.44	37.83	43	53	20.27	33.34	29.89	38	45	
9	19.13	25.79	38.79	46	55	21.57	34.78	28.75	37	39	
10	20.67	27.42	36.47	39	45	30.87	40.81	24.50	33	36	
11	25.41	34.37	29.10	32	37	35.41	44.22	22.62	29	38	
12	32.08	41.29	24.22	21	33	39.99	46.73	21.40	28	31	

方法。

2. 等效宽度EQW与象素大小的关系：由参考文献<sup>[3]</sup>可知，计算的 $\frac{1}{\text{EQW}}$ 与目视分解力基本一致，而目视分解力与景物的反差有很大关系，一般随着景物反差的增大而增大。采用高反差规板测定的分解力数值比用低反差规板测定的分解力数值高得多，大约相差2—3倍。而航摄影物的反差由于大气的散射而受到很大的压缩。由此可知， $\frac{1}{\text{EQW}}$ 与目视分解力一致是以选择低反差刀刃为前提的。因此试验中以河流为刀刃计算的 $\frac{1}{\text{EQW}}$ 代表了目视分解力，从而可以计算出地面分解力 $R_g$ ，其表达式为：

$$R_g = \frac{m}{R_{\text{目视}}} = \frac{m}{\frac{1}{\text{EQW}}} = m \cdot \text{EQW} \quad (5)$$

其中 $m$ 为摄影比例尺分母。

在扫描法成象中，评价图象分辨本领用组成图象的最小信息单元——象素所代表的地面

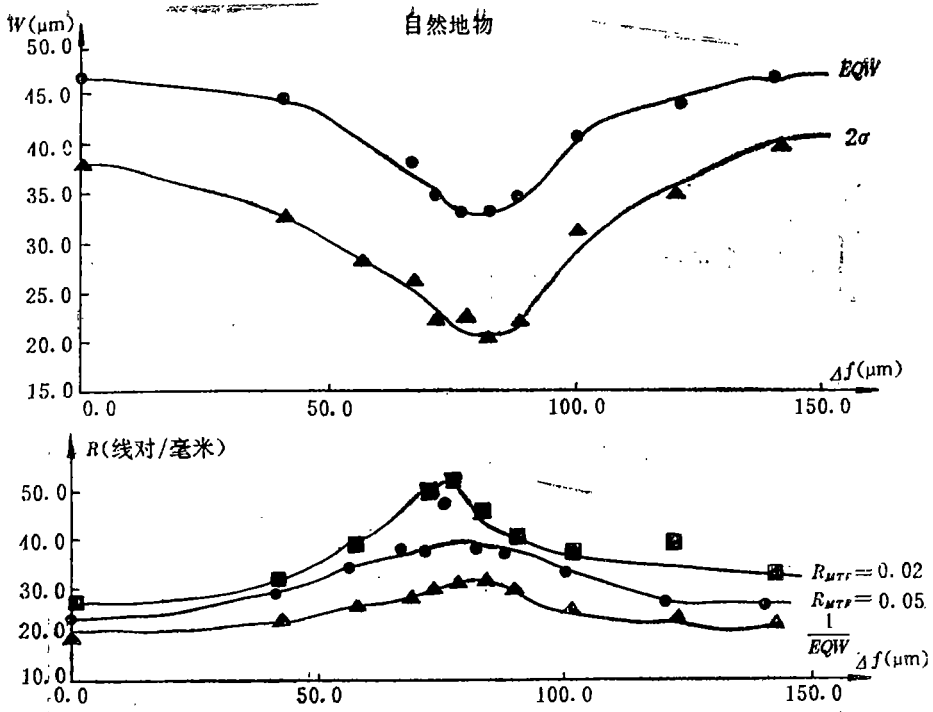


图 6

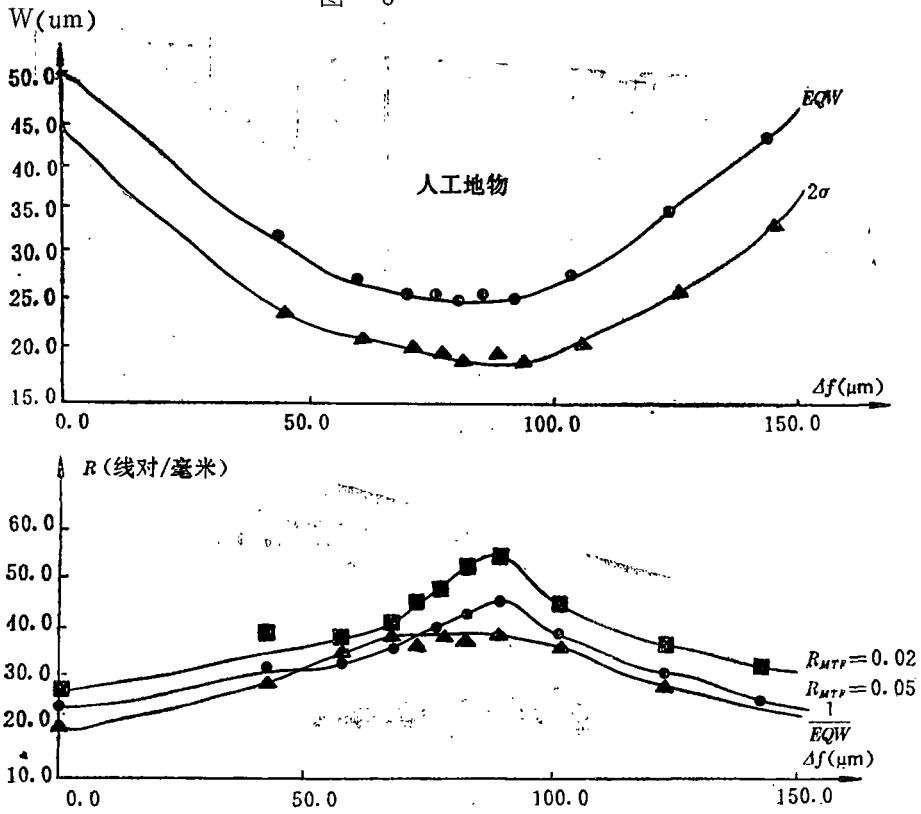


图 7

尺寸 $IFOV$  (瞬时视场) 表示。其计算公式为:

$$IFOV = m \cdot S \quad \text{其中 } S \text{ 为象素边长} \quad (6)$$

一般认为瞬时视场与地面分解力在数值上之比为 $1/2\sqrt{2}$ 。即 $IFOV = R_g/2\sqrt{2}$  (7)

将(5)和(6)式代入(7)式可得:

$$S = EQW/2\sqrt{2} \quad (8)$$

由(8)式可知,只要测定出 $EQW$ 就可以计算出象元边长,从而可以对扫描仪进行检定。

将表2中以自然刀刃测定的 $EQW$ 最小值 $33.34\mu\text{m}$ 代入(8)式得

$$S = \frac{EQW}{2\sqrt{2}} = \frac{33.4}{2\sqrt{2}} \approx 11.7\mu\text{m}$$

这与实际参与计算的象元长度 $d = 12\mu\text{m}$ 相比,非常接近,由此可见,用上述方法测定的 $\frac{1}{EQW}$ 不仅可用于象质评价,而且完全可以对扫描仪进行检定。

## 4 结 论

1. 本文研究了数字成象系统 $MTF$ 的测定方法,并提出了重抽样法在测定数字扫描图象 $MTF$ 中的应用,试验表明该方法是完全可行的,从而为数字成象系统 $MTF$ 的测定及应用奠定了基础。

2. 探讨了应用上述方法计算评定象质的参数随离焦量变化的规律性。试验表明:各个参数都能较敏锐地反映出离焦现象,从而为解决成象系统产生的离焦现象提供了一种有效方法。

3. 导出了线扩散函数的等效宽度 $EQW$ 与象元大小的关系。试验结果表明:该方法测定的 $\frac{1}{EQW}$ 不仅可用于象质评价,而且完全可以对扫描仪进行检定。

综上所述,试验结果不仅表明测定方法的合理可行性,而且强有力地证明了 $MTF$ 的应用价值。即不仅可用于象质的评价,而且为成象系统的检定和调试提供了新的技术手段。从而为 $MTF$ 的应用提供了新的研究课题。

## 参 考 文 献

- [1] 俞浩清. 摄影与空中摄影. 测绘出版社, 1985年.
- [2] 杨凯, 卢健, 林开愚, 蓝运超, 孙家柄. 遥感图象处理原理和方法. 测绘出版社, 1988年.
- [3] 李莉华. 航摄系统调制传递函数的测定及其应用. 武汉测绘科技大学学报, 1988, No. 1.

- [ 4 ] 宣家斌, 吴祖义. 航空与航天摄影技术. 武汉测绘科技大学出版社, 1988年.
- [ 5 ] Begni G, Legor D, Dinguirand M. An In-flight Refocusing Methods for the spot HRV Camaras. PE&RS vol50, No.12, December 1984; PP(1697)~1705

## The Determination and Application of the Modulation Transfer Function of the Digital Imaging System

*Jia yonghong*

### Abstract

In this paper, The Modulation Transfer Function of the digital imaging system is determined for the first time. The results show that this method is reasonable and reliability, and the *MTF* is not only able to estimate the image quality, but also supplies a new technique means for testing and adjusting any kinds of remote instruments.

**【Key word】** line spread function, modulation transfer function, resolution, instaneous field-of-view, resampling.