6(1987), 6:401~406

红 外 研 究
Chin. J. Infrared Res.

CCD 刷扫相机飞行方向 MTF 分析与最佳重迭取样系数选取

谌炎新　张守一
(华中工学院光学工程系)

摘要——假定输入为单频正弦光栅，对刷扫工作状态下线列 CCD 输出信号的频谱进行了分析。推导出一定条件下 CCD 飞行方向的 MTF 表达式，并分解为光积分调制传递函数 MTF_i、抽样积分调制传递函数 MTF_{si} 和抽样输出调制传递函数 MTF_{so} 之积。分析了刷扫系数 η 和重迭取样系数 ξ 对 MTF 曲线的影响，认为 ξ 值一般可取 2，最大不宜超过 4。

一、引　言

关于 CCD 刷扫相机在线列方向的 MTF 表达式，文献已经作了较详细的讨论[1~3]。本文则采用信号分析方法，从频率域角度分析 CCD 相机在飞行方向上的输入输出关系，即假定输入为单频正弦光栅，根据输出波形分析其频谱，确定运用 MTF 的条件并推导出表达式。这种方法比较直观、物理意义明确。通过分析，求出代表抽样过程的调制传递函数。还讨论了刷扫系数 η 和重迭取样系数 ξ 对 MTF 的影响，尤其是 ξ 的增大对提高飞行方向分辨率的影响，和如何选取合适的 ξ 等问题。

二、CCD 相机飞行方向 MTF 的推导

定义 CCD 相机的重迭取样系数 ξ 为其光敏元在飞行方向的瞬时视场线度 b(mm)与相机在一个行周期内移动距离之比，即[2]

$$\xi = b/vT_H; \tag{1}$$

式中，v 为相机的飞行速率(mm/s)；T_H 为 CCD 的行扫描周期(s)。

设景物沿飞行方向(设为 y 方向)亮度变化为单频率的正弦光栅，沿 CCD 线列方向即 x 方向的亮度不改变。当 CCD 相机对它刷扫成象时，CCD 光敏元输出时间信号。空间坐标变量 y 与时间坐标变量 t 的关系可表示为

本文 1986 年 12 月 17 日收到。

$$y=vt。\tag{2}$$

若令 $v=1$,则输出信号与输入信号在数学上可用同一变量表示。这里将输出的时间信号写为位置 y 的函数,以便于写出 MTF 表达式。CCD 在对景物成象时,其刷扫方向可以看成对景物的两次积分平均;第一次积分平均是光敏元对景物的积分平均。设光敏元中心处于 y 位置时的输出为 $I'(y)$,则有

$$I'(y)=\int_{y-\frac{b}{2}}^{y+\frac{b}{2}} aE_m[1+m\cos(2\pi\nu_0 y')]dy'=ab\,E_m[1+m\,\mathrm{sinc}(\nu_0 b)\cos(2\pi\nu_0 y)];\tag{3}$$

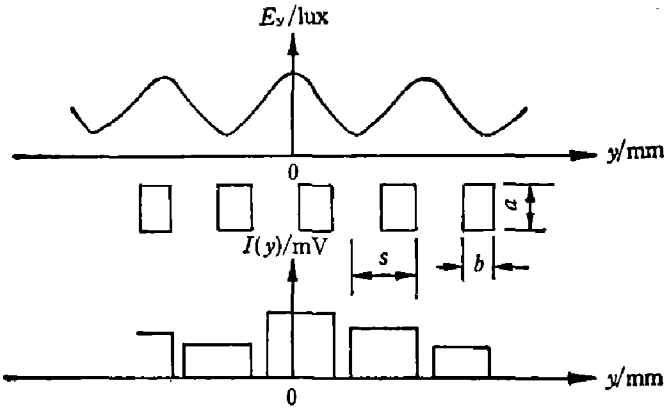

图 1 CCD 飞行方向的输出波形

Fig. 1 The output waveform of CCD in its flying direction.

式中,a 为光敏元 x 方向的线度(mm);E_m 为景物辐照度的平均值(Lux);m 为景物光栅的调制度;ν_0 为光栅的空间频率(1/mm)。$\mathrm{sinc}(\nu_0 b)=\sin(\pi\nu_0 b)/\pi\nu_0 b$ 称为抽样函数。

第二次积分平均是由 CCD 在一次光积分时间内光敏元对景物平移 s(mm 完成的。s 称为刷扫间隔。设光积分时间为 T_I,光生电荷转移时间为 T_T,则有:

$$T_H=T_I+T_T,\tag{4}$$

及

$$S=\nu T_I。\tag{5}$$

积分平均值表示该次刷扫的输出信号幅度,用 $I(y_i)$ 表示:

$$I(y_i)=\int_{y_i-s/2}^{y_i+s/2} I'(y)dy=abs\,E_m[1+m\,\mathrm{sinc}(\nu_0 b)\mathrm{sinc}(\nu_0 s)\cos(2\pi\nu_0 y_i)]。\tag{6}$$

CCD 相机的输入输出波形如图 1 所示。图中 E_y 表示景物光栅在 CCD 光敏元上的照度,$I(y)$为 CCD 的输出波形,其中各个矩形脉冲的幅度由式(6)表示。利用卷积定理,将输出信号 $I(y)$看作为一个矩形脉冲和一个无穷 δ 脉冲序列的卷积。矩形脉冲的宽度为 s,高度为 1,用 $\mathrm{rect}\left(\frac{y}{s}\right)$表示。其宽度为 s,因为 CCD 光积分时间与 CCD 各光敏元电荷包全部转移出去的时间基本相同。δ 脉冲序列的间距表示 CCD 在刷扫方向的抽样间距,也等于 s,其强度随每次抽样所得到的光栅平均照度的改变而改变,其定量表达式见式(6)。于是 CCD 的输出波形 $I(y)$可表示为[5,6]:

$$I(y)=\mathrm{rect}\left(\frac{y}{s}\right)*\sum_{i=-\infty}^{\infty} I(y_i)\delta(y-is)。\tag{7}$$

将式(6)代入式(7),为简化表达式,令 $k=abs\,E_m$,则有:

$$I(y)=\mathrm{rect}\left(\frac{y}{s}\right)*\left\{k[1+m\,\mathrm{sinc}(\nu_0 b)\mathrm{sinc}(\nu_0 s)\cos(2\pi\nu_0 y)]\cdot\sum_{i=-\infty}^{\infty}\delta(y-is)\right\};\tag{8}$$

式中,$I(y_i)$中的自变量写作 y 是因为有 δ 脉冲序列与之相乘的缘故。令 $I(y)$的频谱为 $I(\nu)$,有

$$I(\nu)=s\cdot\mathrm{sinc}(\nu_0 s)\cdot k\left\{\left\{\delta(\nu)+m\,\mathrm{sinc}(\nu_0 b)\mathrm{sinc}(\nu_0 s)\frac{1}{2}[\delta(\nu-\nu_0)+\delta(\nu+\nu_0)]\right\}\right.$$
$$\left.*\frac{1}{s}\sum_{i=-\infty}^{\infty}\delta\left(\nu-\frac{i}{s}\right)\right\}。\tag{9}$$

把 $\nu_s=\frac{1}{s}$ 称为 CCD 在刷扫方向的抽样频率，将式(9)改写为：

$$I(\nu)=k\sum_{i=-\infty}^{\infty}\left\{\operatorname{sinc}[(\nu-i\nu_s)s]+\frac{m}{2}\operatorname{sinc}(\nu_0 b)\operatorname{sinc}(\nu_0 s)\right.$$
$$\left.\times\{\operatorname{sinc}[(\nu-\nu_0-i\nu_s)s]+\operatorname{sinc}[(\nu+\nu_0-i\nu_s)s]\}\right\}。\tag{10}$$

图 2 画出了输出频谱 $I(\nu)$ 及对应的输入频谱 $E(\nu)$，横坐标 ν 为空间频率，单位为 1/mm 或 lp/mm。图中上半部表示输入频谱。由于假定输入为单频率信号，故 $E(\nu)$ 只包含直流分量和频率为 $\pm\nu_0$ 的交流分量。它们的幅值分别为 1 和 $m/2$。而下半部表示的输出频谱 $I(\nu)$ 的频率分量比 $E(\nu)$ 要多。除了对应于 $E(\nu)$ 的频率分量外，还增加了许多分量。这些分量的出现是由于抽样的缘故，它们在频率轴上的位置和幅度大小可由式(10)求出。由于 CCD 输出频率分量与输入频率分量之间并不存在一一对应的关系，所以不能直接使用传递函数的概念来评价 CCD 的成象性能。然而注意到 $I(\nu)$ 在 0 到 $\nu_s/2$ 段与 $E(\nu)$ 存在着一一对应的关系，可以做出如下假定：(1) 输入信号频率满足 $\nu_0<\nu_s/2$；(2) 输入信号中滤去高于 $\nu_s/2$ 的分量。在满足这两个条件时才能定义 CCD 的调制传递函数 MTF。

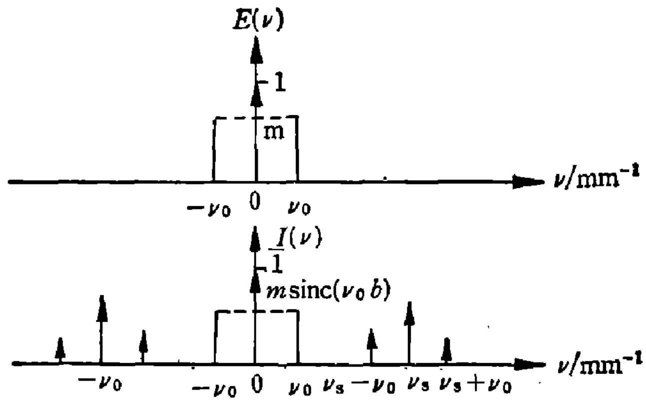

图 2 CCD 的输入输出频谱

Fig. 2 The input and output spectrums of CCD.

令式(10)中 $i=0$，即可得到输出频谱中小于抽样频率的一半的分量为

$$\begin{cases}I_0=k;\\ I_1=km\operatorname{sinc}(\nu_0 b)\operatorname{sinc}^2(\nu_0 s)。\end{cases}\tag{11}$$

式中，I_0 表示直流分量，I_1 表示交流信号分量幅值。相对应的输入直流分量幅值为 k，交流信号分量幅值为 km，将输入交流信号空间频率 ν_0 理解为变量 $\left(0\sim\frac{\nu_s}{2}\right)$，就可以得到带理想低通 $\left(\text{截止频率为 }\frac{\nu_s}{2}\right)$ 的 CCD，其 MTF 为

$$\mathrm{MTF}=\operatorname{sinc}(\nu_0 b)\operatorname{sinc}^2(\nu_0 s)。\tag{12}$$

令 η 为 CCD 的刷扫效率：

$$\eta=\frac{T_I}{T_H};\tag{13}$$

式中，$0<\eta<1$，对应于行扫描中的行扫描效率。由式(1)及式(5)可得：

$$s=\nu\eta T_H=\frac{\eta}{\xi}b。\tag{14}$$

于是式(12)可以改写为：

$$\mathrm{MTF}=\operatorname{sinc}(\nu_0 b)\operatorname{sinc}^2\left(\nu_0\frac{\eta b}{\xi}\right)。\tag{15}$$

式(12)或式(15)即为推导出的 CCD 摄象器件在理想条件下的 MTF 表达式。

三、分析和讨论

CCD 刷扫相机在飞行方向的 MTF 曲线如图 3 所示。图中 η 取 0.95, ξ 值取一组参数, 曲线按 MTF 定义以正值画出。结合式(15)和图 3 进行分析和讨论, 可以得到如下结论。

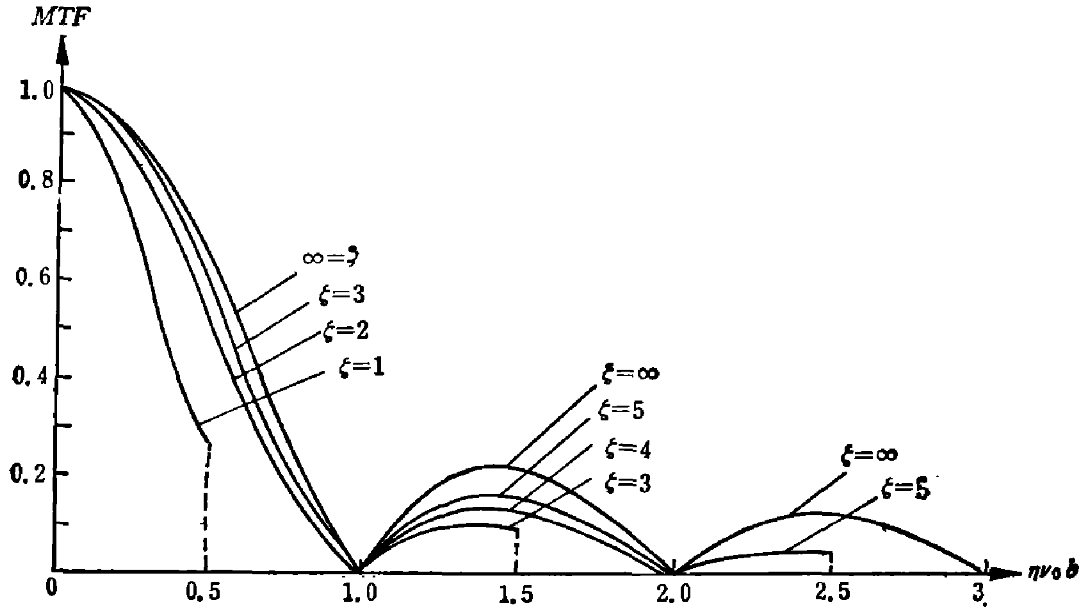

图 3 不同 ξ 值时 CCD 的 MTF 曲线

Fig. 3. MTF curves of CCD for different values of ξ.

1. 由于 CCD 相机在飞行方向上对景物是抽样成象, 因此只有在满足一定的条件时才可以将 CCD 看作为线性系统, 只有对线性系统才能运用 MTF 来描述其频率特性。在上述推导中得出式(12)或式(15)的条件为: (1)输入信号的最大频率小于抽样频率的二分之一; (2)CCD 后面应接有截止频率为 $\frac{\nu_s}{2}$ 的理想低通, 将它和 CCD 一起称为扩展 CCD。

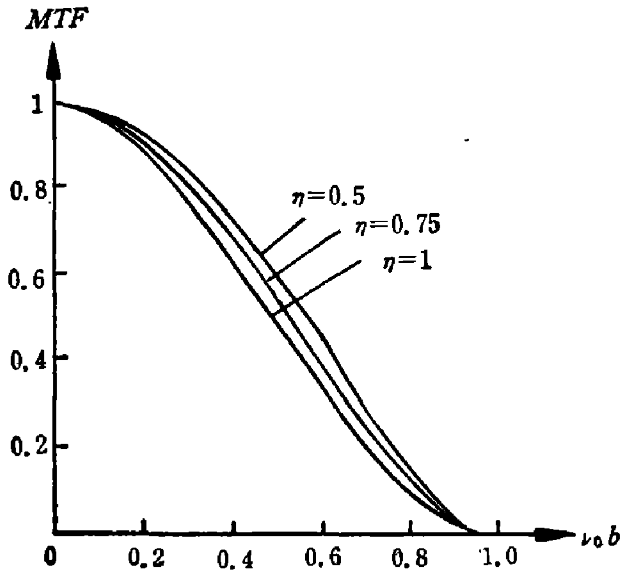

图 4 不同 η 值时 CCD 的 MTF 曲线

Fig. 4. MTF curves of CCD for different values of η.

这两个条件中, 条件(1)可通过光学系统来实现, 一般比较容易满足; 条件(2)只要将 $\frac{\nu_s}{2}$ 设计为电子线路的截止频率即可实现。

值得注意的是, 对于每一个抽样间隔(在图 3 中对应于每一个 ξ 值), CCD MTF 曲线有效的区间不同, 如图 3, 当 $\xi=1$ 时, 曲线的有效区间为[0, 0.5], 当 $\xi=5$ 时, 曲线的有效区间则为[0, 2.5]。

2. 由式(15)可知, CCD刷扫相机在飞行方向的 MTF 是三个 sinc 函数的相乘。

其中 $\mathrm{sinc}(\nu_0 b)$ 代表了光敏元对景物的积分平均作用，仿照线列方向的叫法，可称为积分调制传递函数 MTF_i:

$$\mathrm{MTF}_i=\mathrm{sinc}(\nu_0 b). \tag{16}$$

它与抽样成象无关。与抽样紧密相关的是后两个 sinc 函数中的一个，由于它反映了 CCD 对景物的平均(积分)抽样成象过程，故可称之为抽样积分调制传递函数 MTF_{si}:

$$\mathrm{MTF}_{si}=\mathrm{sinc}\left(\nu_0\frac{\eta b}{\xi}\right)。 \tag{17}$$

第三个因子是由于 CCD 输出脉冲具有一定宽度而出现的。虽然它和抽样过程无直接关系，但它是伴随抽样过程而产生的，故称之为抽样输出调制传递函数 MTF_{s0}:

$$\mathrm{MTF}_{s0}=\mathrm{sinc}\left(\nu_0\frac{\eta b}{\xi}\right)。 \tag{18}$$

式(17)和式(18)的表达式相同，说明了这种伴随关系，因而它们也可以统称为抽样调制传递函数。于是式(15)可以改写为:

$$\mathrm{MTF}=\mathrm{MTF}_i\cdot\mathrm{MTF}_{si}\cdot\mathrm{MTF}_{s0}。 \tag{19}$$

3．刷扫效率 η 的值可在 0～1 之间选择。为了增大光敏元接收的辐射能量，在行扫描周期不变的条件下需要增大 η。由式(15)可看出，为得到 MTF 曲线好的高频特性(对应 MTF 值升高)，η 值应当降低。为此，η 值的选取应综合考虑器件性能，输入信号能量大小及系统分辨率要求等几方面因素。图 4 以 η 为参变量画出了一组曲线($\xi=2$)，从中可以看出 η 的改变对 MTF 曲线的影响。

4．重选取样对 MTF 曲线的影响有两个方面:

(1) 由于 $\nu_s=\frac{1}{s}=\frac{\xi}{\eta b}$，故 ν_s 与 ξ 成正比。而在推导 MTF 表达式时，已假定输入输出信号的频率都不大于 $\frac{\nu_s}{2}$，因而 ξ 愈大，其对应的 MTF 有效区间愈大，表示其分辨率或成象质量正在提高。换言之，如果提高重选取样系数 ξ，相机的分辨率有可能突破由系统瞬时视场决定的空间分辨率。在图 3 中可以看到，当 ξ 从 1 增大到 5 时，系统可能探测到的空间频率由 $\frac{1}{2\eta b}$ 增大到 $\frac{5}{2\eta b}$。这表明增大 ξ 是一种有效的提高系统分辨率的方法。

(2) 空间频率在 0～$\frac{\nu_s}{2}$ 区间内，当 ξ 增大时，MTF 曲线逐渐升高。MTF 曲线的升高表明系统对景物的高频分量衰减减少，系统的成象质量提高。从这个角度而言，即使对于空间频率较低的景物，提高重选取样系数对于提高象质也是有好处的。

5．在实际应用中，由于技术上的困难，ξ 值是不可能无限增大的，另一方面，为提高分辨率，也没有必要无限增大 ξ。在理论上，当 $\xi\to\infty$ 时，CCD 的 MTF 为:

$$\mathrm{MTF}=\mathrm{sinc}(\nu_0 b)=\mathrm{MTF}_i。 \tag{20}$$

这个表达式与 CCD 对景物卷积成象的 MTF 表达式相同，这说明抽样成象时无论 ξ 如何增大，其 MTF 曲线都不可能超过卷积成象的 MTF 曲线。综上所述，ξ 值大于 1 对成象有利，但不宜太大。一般以接近 2 为宜，最大不超过 4。

参 考 文 献

[1] 张守一、尹仲任,红外研究,1(1982),1: 45～52.
[2] 张守一、陈汝钧,红外研究,5(1986),2: 113～116.
[3] 谌炎新、刘贤德,华中工学院学报,(1982),4: 21～28.
[4] 原芸,红外研究,4(1985),1: 25～28.
[5] J.M. 劳尔德,热成象系统,国防工业出版社,1981,70～109.
[6] 郑君理等,信号与系统,人民教育出版社,1981,221～227.
[7] Barbe D. F. and white W. H., *Porc. CCD Applications cont.*, U. S. Naval Electronics Laboratory Center, 1973, 13～20.
[8] Howes M. J. and Morgen D. V., *Charge Coupled-Devices and Systems*, John Wiley & Sons, 1979, 264～266.

ANALYSIS OF MTF OF CCD PUSH-BLOOM IMAGING SYSTEM IN ITS FLYING DIRECTION AND SELECTION OF THE OPTIMUM SUPERPOSED SAMPLING COEFFICIENT

SHEN YENXIN   ZHANG SHOUYI

(Department of Optical Engineering, Huazhong University of Science and Technology)

ABSTRACT

For a linear array CCD in a push-bloom imaging system, on condition that the input signal is a sine pattern with single frequency, the output signal spectrum is analysed. The MTF expression of CCD in its flying direction is derived on certain conditions, which is then expressed as a product of MTF_i, MTF_{si}, MTF_{so}. The effects of push-bloom coefficient η and superposed sampling coefficient ξ on MTF curves are analysed. In general the value of ξ could be chosen as 2, at most as 4.