

线阵 CCD 相机细分采样成像 的像质研究

郝云彩 杨秉新 张国瑞

(北京空间机电技术研究所, 北京 100076)

摘 要 从理论上推导了线阵 CCD 相机间歇细分采样和连续细分采样成像所得到的光电图像调制制度和调制传递函数公式, 并讨论了这两种采样方法对提高动态成像调制传递函数的不同效果, 分析比较了它们的特点和工程应用的可能性。

关键词 CCD 相机, 细分采样, 动态调制传递函数。

1 引 言

近年来, 国内外学者对 CCD 动态采样成像的调制传递函数(MTF)的研究产生了浓厚的兴趣。许多文献都论及了包括光学系统的光学成像、采样与重建三个主要环节的光电系统综合成像过程^[1-4], 并研究了动态积分采样条件下调制传递函数的一般性概念。但其中很少有根据接收器的曝光特性和相对于像面的运动速度直接通过动态采样曝光量积分公式来推导在各种采样条件下线阵 CCD 动态调制传递函数表达式的, 而本文和文献[2]试图从另一种途径直接从线阵 CCD 扫描成像的物理过程出发做到这一点。其好处是不但定性, 而且定量地针对线阵 CCD 和有代表性的正弦目标得出初相位、积分时间、采样周期对动态调制传递函数的影响, 从而提出提高其调制传递函数的有效方法, 对工程实践具有直观的参考价值。

本文所提到的细分采样指的是积分时间小于像点扫过一个 CCD 像元所需时间的采样方法, 后者与前者时间之比称之为细分倍数, 下文用 m 表示。细分采样又分为连续细分采样和间歇细分采样, 前者是指像点扫过一个像元的过程中, CCD 要采样 m 次, 数据率增大 m 倍; 后者是在像点扫过一个像元的过程中, 在一次积分时间与前者相同的条件下, CCD 只采样一次, 采样周期保持不变。

本文将从细分原理出发, 推导并论证两种细分方法对提高动态调制传递函数的作用原理不同。为便于讨论, 文中出现的调制传递函数均指由光学图像经推扫转换成光电图像的调制传递函数, 不细分采样情况的物理量加撇号以示区别。在非线传递且非线性不大的情况下, 仍沿用线性条件下的调制概念。

2 间歇细分采样成像的调制传递函数公式的推导与正常成像概率

2.1 调制传递函数公式推导

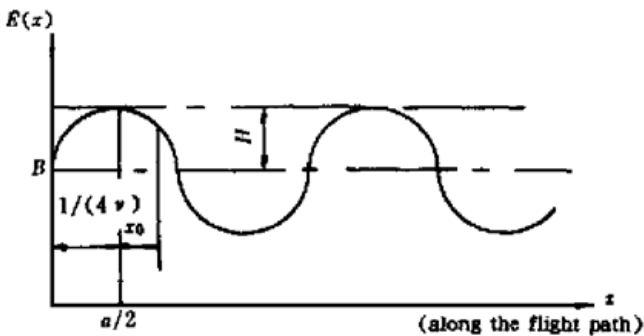


Fig. 1 The irradiance distribution of the optical image $E(x)$ along the flight path. X-The coordinate along the flight path

如图 1 所示, 设光学图像的照度分布为 $E(x)$, x 轴为推扫方向, 像移速度为 v , 采样起始点初相位 x_0 , 积分时间 T , 像移一个像元长度所需的时间为 T_0 , 细分倍数为 $m = T_0/T$, 像元尺寸为 a (设为正方形), 采样序次为 n , 第 n 次采样的信号大小为 $A(n)$, ν 为 $E(x)$ 的空间频率, M_o 为光学图像的调制度, M_e 为光电图像的调制度, MTF_m 为它们的调制传递函数, K 为比例常数。

光学图像沿航迹方向的照度分布为:

$$E(x) = B + H \sin 2\pi\nu x.$$

设第 n 采样点对应的时刻为 t , 则 $A(n)$ 为:

$$A(n) = K a \int_{(n-1)T_0}^{(n-1)T_0 + T} \int_{vt + 1/4v + x_0 - a/2}^{vt + 1/4v + x_0 + a/2} (B + H \sin 2\pi\nu x) dx dt =$$

$$K B a^2 T \{1 + M_o \operatorname{sinc}(\pi\nu a) \operatorname{sinc}(\pi\nu a/m) \cos [2\pi\nu a(n-1) + 2\pi\nu x_0 + \pi\nu a/m]\}, \quad (1)$$

将奈奎斯特频率 $\nu = 1/2a$ 代入(1)式得:

$$A(n) = K B a^2 T \{1 + M_o \operatorname{sinc}(\pi/2) \operatorname{sinc}(\pi/2m) \cos [\pi(n-1) + \pi x_0/a + \pi/2m]\}. \quad (2)$$

由(2)式可知, $A(n)$ 随 n 变化的周期为 2, 且 $A(1)$ 和 $A(2)$ 即为 $A(n)$ 的极大和极小值, 但何者为大受 x_0 和 m 的影响不确定。

$$A(1) = K B a^2 T [1 + M_o \operatorname{sinc}(\pi/2) \operatorname{sinc}(\pi/2m) \cos(\pi x_0/a + \pi/2m)],$$

$$A(2) = K B a^2 T [1 - M_o \operatorname{sinc}(\pi/2) \operatorname{sinc}(\pi/2m) \cos(\pi x_0/a + \pi/2m)],$$

令 $C = \operatorname{sinc}(\pi/2) \operatorname{sinc}(\pi/2m), \quad D = \operatorname{sinc}^2(\pi/2),$

当 $m \geq 6$ 时, $C = 0.64, D = 0.41$ 。

根据调制度公式有:

$$M_e = M_o \operatorname{sinc}(\pi/2) \operatorname{sinc}(\pi/2m) |\cos(\pi x_0/a + \pi/2m)|,$$

$$MTF_m = M_e/M_o =$$

$$\operatorname{sinc}(\pi/2) \operatorname{sinc}(\pi/2m) |\cos(\pi x_0/a + \pi/2m)| =$$

$$C |\cos(\pi x_0/a + \pi/2m)|, \quad (3)$$

当 $m = 1$ 时, 即得出不细分采样的调制传递函数公式:

$$MTF'_m = \operatorname{sinc}^2(\pi/2) |\sin(\pi x_0/a)| = D |\sin(\pi x_0/a)|. \quad (4)$$

2.2 正常成像概率的概念

从(3)式和(4)式可以看出, MTF_m 和 MTF'_m 随 x_0 余弦和正弦变化的周期均为 a , 只不过 MTF_m 具有与细分倍数有关的初相位 $\pi/2m$, 为了表征采样起始点初相位 x_0 对 MTF_m 和 MTF'_m 的影响, 我们提出了正常成像概率的概念, 即 MTF_m 和 MTF'_m 随 x_0 在一个周期 a 内变

化, 达到某一指定传函 MTF_0 或 MTF'_0 要求的 x_0 所对应的宽度与周期 a 之比, 以 P 和 P' 表示。容易证明, 只要 MTF_0 和 MTF'_0 确定, m 确定, P 和 P' 也就确定了, 而与所取周期从哪一点起算无关。因此可以将(3)、(4) 两式的 x_0 分别向左平移 $\pi/2m$ 和 $\pi/2$ 后再求 P 和 P' 。

$$P = (2/\pi) \arccos (MTF_0/C), \quad (5)$$

$$P' = (2/\pi) \arccos (MTF'_0/D), \quad (6)$$

当 $MTF_0 = MTF'_0$ 时, 由于 $C > D$, 故 $P > P'$, 即对于一定的调制传递函数要求, 采用间歇细分采样的 P 要比不采用细分时要大。

3 连续细分采样光电图像调制度和调制传递函数公式

参考图 1 可列出连续细分采样光电图像第 n 点的信号大小的积分公式为

$$A(n) = Ka \int_{(n-1)T}^{nT} \int_{vt+1/4v+x_0-a/2}^{vt+1/4v+x_0+a/2} (B + H \sin 2\pi x) dx dt =$$

$$KBa^2T [1 + M_0 \operatorname{sinc}(\pi va) \operatorname{sinc}(\pi va/m) \cos(2\pi van/m + 2\pi vx_0 - \pi va/m)], \quad (7)$$

将奈奎斯特频率 $v = 1/2a$ 代入(1) 式得:

$$A(n) = KBa^2T [1 + M_0 \operatorname{sinc}(\pi/2) \operatorname{sinc}(\pi/2m) \cos(\pi n/m + \pi x_0/a - \pi/2m)]. \quad (8)$$

由(8) 式可知, $A(n)$ 随 n 变化的周期为 $2m$, 因 n 是正整数, 所以 m 也应是大于 1 的正整数。当

$$\pi n/m + \pi x_0/a - \pi/2m = 2i\pi, \quad (i = 1, 2, \dots)$$

时, 有 $A_{\max}(n)$, 此时 $n = 2im - mx_0/a + 1/2$, 由于 n 是离散变量, 故 $A(n)$ 是离散函数, 令:

$$n_1 = [n + 0.5] = [2im - mx_0/a + 1],$$

则 $A_{\max}(n) = A(n_1)$ 。

同理, 当 $\pi n/m + \pi x_0/a - \pi/2m = (2i - 1)\pi$ 时, 有 $A_{\min}(n)$,

$$n = (2i - 1)m - mx_0/a + 1/2,$$

令

$$n_2 = [n + 0.5],$$

则

$$A_{\min}(n) = A(n_2),$$

可得光电图像调制度公式

$$M_e = \frac{A(n_1) - A(n_2)}{A(n_1) + A(n_2)}. \quad (9)$$

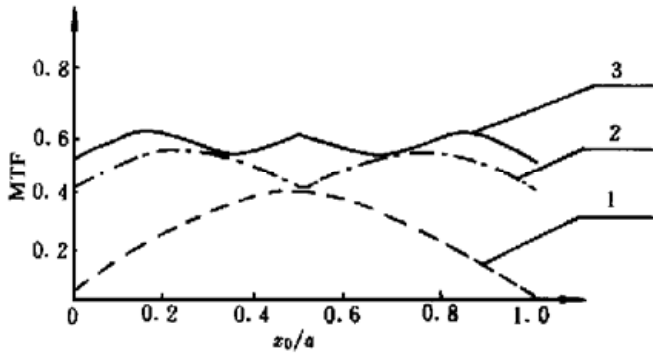
设光学图像的调制度 $M_0 = 1$, 则由(6)、(7) 式得

$$MTF_m = \frac{-\operatorname{sinc}(\pi/2) \operatorname{sinc}(\pi/2m) \sin[\pi(n_1 + n_2 - 1)/2m + \pi x_0/a] \sin[\pi(n_1 - n_2)/2m]}{1 + \operatorname{sinc}(\pi/2) \operatorname{sinc}(\pi/2m) \cos[\pi(n_1 + n_2 - 1)/2m + \pi x_0/a] \cos[\pi(n_1 - n_2)/2m]}. \quad (10)$$

根据(8) 式, 对不同的 m 和 x_0 进行了计算, 因 x_0 的周期为 a , 所以 x_0 取间隔 $a/10$ 的十一个点, 见表 1。

Table 1. MTF for the different m and x_0/a values

MTF \backslash x_0/a \nearrow m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0	0.00	0.41	0.53	0.58	0.60	0.62	0.62	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64
0.1	0.13	0.52	0.60	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.63	0.63	0.64	0.64
0.2	0.24	0.57	0.61	0.61	0.60	0.63	0.64	0.64	0.64	0.63	0.64	0.64
0.3	0.33	0.57	0.56	0.61	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64	0.63	0.64	0.64
0.4	0.39	0.52	0.58	0.63	0.60	0.64	0.63	0.64	0.64	0.63	0.64	0.64
0.5	0.41	0.41	0.62	0.58	0.63	0.62	0.64	0.63	0.64	0.63	0.64	0.64
0.6	0.39	0.52	0.58	0.63	0.60	0.64	0.63	0.64	0.64	0.63	0.64	0.64
0.7	0.33	0.57	0.56	0.61	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64	0.63	0.64	0.64
0.8	0.24	0.57	0.61	0.61	0.60	0.63	0.64	0.64	0.64	0.63	0.64	0.64
0.9	0.13	0.52	0.60	0.63	0.60	0.64	0.64	0.64	0.63	0.63	0.64	0.64
1.0	0.00	0.41	0.53	0.58	0.60	0.62	0.62	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64
average	0.24	0.51	0.58	0.61	0.61	0.63	0.63	0.64	0.64	0.63	0.64	0.64



根据表 1, 把不同 m 值的 $MTF(x_0)$ 曲线画出, 如图 2 所示。

由图 2 可见, 当连续细分采样时, 随着细分倍数 m 的增大其推扫成像的调制传递函数的平均值和最小值都很快提高。当 $m \geq 3$ 时, MTF_m 在任何 x_0 下的值均超过 0.5, 高于不细分采样时的调制传递函数最大值 0.41, 此时连续细分采样的正常成像概率为 100%, 这是连续细分采样的最大优点。

Fig. 2 The curves of $MTF_m(x_0)$ for the different m values.

Curve 1 for $m = 1$, curve 2 for $m = 2$, curve 3 for $m = 3$

4 间歇细分采样与连续细分采样的特点比较

由上述推导可知, 间歇细分采样与连续细分采样各有利弊, 各具特点。

1) 调制传递函数最大值比较

由(3)式易见, 间歇细分采样的调制传递函数最大值随 m 增大而增大, 最大可达 0.64; 由表 1 可见, 连续细分采样调制传递函数最大值随 m 增大, 最大也可达 0.64。

2) 调制传递函数随初相位 x_0 变化情况比较

由(3)式易见, 对于间歇细分采样成像, 无论 m 取何值, 调制传递函数均随初相位 x_0 作余弦变化; 由表 1 和(10)式可见, 连续细分采样调制传递函数随 x_0 的变化曲线与 m 有关, 当 $m \geq 11$ 时, 调制传递函数已不随 x_0 变化, 且达到 0.64, 正常成像概率都等于 100%, 这是其最主要的优点。

3) 从数据率大小比较

连续细分采样成像在扫过一个像元时, 将产生 m 个数据, 所以它比不细分采样的数据率要大 m 倍, 这也是它的最主要的缺点; 间歇细分采样成像在扫过一个像元时, 将产生 1 个数据, 其数据率与不细分时相同, 这是其主要的优点。

4) 应用可能性的比较

如果卫星数据传输系统与处理系统可保证足够的传输率, 或可实现高数据压缩比, 则从像质看, 连续细分采样成像更有优越性。然而, 系统可能产生像面能量不足的问题, 为确保足够的能量, 势必要选择高灵敏度的 CCD。而间歇细分采样成像可使数据率保持不变, 其正常成像概率虽然比连续细分采样低, 但比不细分采样的高, 因此更有工程可行性。当然间歇细分采样成像也要选择高灵敏度的 CCD。

结 论 1) 不细分采样推扫成像的调制传递函数最大值为 0.41, 而细分采样成像的最大值为 0.64, 因此在同样正常成像概率下细分采样成像可提高像质, 从而提高分辨率。

2) 连续细分采样和间歇细分采样成像均能提高推扫成像的调制传递函数, 但各有利弊, 单从提高像质角度而言前者优于后者, 单从数据率角度而后者优于前者, 从工程可行性来看, 后者优于前者。

中国科学院西安光机所薛鸣球院士对本文的研究工作给予了大力支持, 在此深表感谢!

参 考 文 献

- [1] 陈自宽, 翟宏琛, 母国光. 光电成像系统中的光学传递函数. 光学技术, 1998, (1): 57~60, 41
- [2] 郝云彩, 杨秉新. 航天线阵 CCD 相机推扫成像过程的像质研究. 光子学报, 1998, 27(7): 39~44
- [3] Campana S B. Techniques for evaluating charge-coupled imagers. *Opt. Engng.*, 1997, 16(3): 267~274
- [4] Hock K M. Effect of oversampling in pixel arrays. *Opt. Engng.*, 1995, 34(5): 1281~1288

Image Quality of Space Line CCD Camera with Imaging Methods of Fine Signal Sampling

Hao Yuncai Yang Bingxin Zhang Guorui

(Beijing Institute of Space Machine and Electricity, Beijing 100076)

(Received 21 March 1999; revised 4 August 1999)

Abstract Two formula of modulation and modulation transfer function (MTF) of a line CCD optical-electronic imaging system are deduced by both methods of continuous fine signal sampling and interval fine signal sampling. It was pointed out that these two methods were different in improving the imaging quality of space line CCD camera. The characteristics of the two methods were compared.

Key words CCD camera, fine signal sampling, dynamic modulation transfer function.