

CCLID 摇扫式调制传递函数

张 斧

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

针对 CCLID 用于摇扫式扫描, 导出了其积分、转移调制传递函数 MTF_I 、 MTF_T . 对它们的取值情况进行了讨论并给出了工程估算结果.

关键词: 调制传递函数, 电荷耦合器件, 遥感, 成像光谱仪.

1 引 言

用线列或面阵成像器件作为探测元件遥感有推帚、摇扫及凝视三种方式^[1]. 摇扫式扫描与推帚式扫描相比, 是通过牺牲信噪比(积分时间减少)来换取高的光谱分辨率和密集的光谱波段数. 另外, 它是轴上成像, 其总视场可达 90° 以上. 该扫描机制可用于实现成像光谱仪. 对于 CCLID 用于推帚扫描成像系统的 MTF 已有不少文献进行了有价值的研究^[2~3], 但对摇扫式扫描尚未见到报道. 本文即对 CCLID 摇扫式扫描的 MTF 进行理论分析与工程估算.

2 积分调制传递函数 (MTF_I)

摇扫式扫描仪用前光具收集一个瞬时视场的光并使之通过光谱仪入孔, 而光被色散后再重新聚焦在线列探测器上, 这样线列中每个单元就对应于同一瞬时视场的不同波段, 在穿轨迹方向利用光机扫描就可得到所需全部视场. 于是在地面几何景象建立的同时, 在线列探测器上便形成了许多邻接的狭窄光谱带.

图 1 中 x 轴为穿轨迹方向, y 轴为平台飞行方向, 本文不考虑扫描视场重迭, 则 $a \times b$ 代表一瞬时视场大小. 若光机扫描时平台无飞行运动, 则穿轨迹扫描视场为图中所示长方形带 $OA_1A_2C_1$ 、 $C_1A_2A_3C_2$. 实际过程中由于光机扫描与平台飞行同时进行, 故它们将发生畸变, 成为平行四边形带 $OB_1B_2C_1$ 、 $C_1B_2B_3C_2$.

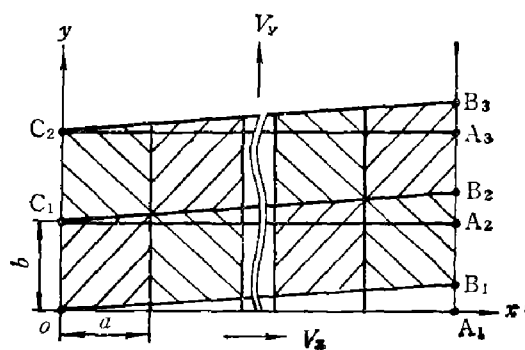


图 1 地物扫描带

Fig. 1 Ground scanning strips

本文 1990 年 5 月 5 日收到, 修改稿 1991 年 4 月 2 日收到.

用 $g(x, y)$ 表示地物 (x, y) 点单位面积反射的辐射功率. 则由傅里叶分析, 空间分布 $g(x, y)$ 可分解为形如 $\exp[j2\pi(f_x x + f_y y)]$ 的基元函数的线性组合. 即

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} G(f_x, f_y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y, \quad (1)$$

$$G(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy, \quad (2)$$

式中 f_x, f_y 为空间频率, $G(f_x, f_y)$ 为空间频率谱. 因为 $g(x, y)$ 总是空间坐标的实函数, 式(1)可改写成

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{Re}\{G(f_x, f_y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)]\} df_x df_y. \quad (3)$$

而 $G(f_x, f_y)$ 一般为一复数, $G(f_x, f_y) = r(f_x, f_y) \exp[j\theta(f_x, f_y)]$. 于是式(3)中带有权重因子的基元函数为

$$O(x, y) = r(f_x, f_y) \cos[2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \theta(f_x, f_y)]. \quad (4)$$

为了不失一般性, 可用指定空间频率 (f_x, f_y) 的二维空间函数 $O(x, y)$ 来表示地物单位面积反射的辐射功率的空间分布. 考虑理想情况, 探测器空间响应函数为

$$R(x, y) = \operatorname{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y}{b}\right). \quad (5)$$

如果探测器能瞬时响应全部入射辐射功率并转换为相应电信号, 那么扫描是沿 x, y 轴的二维卷积过程, 输出的电功率 $P(x, y)$ 为

$$P(x, y) = O(x, y) \otimes R(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} O(\xi, \eta) \operatorname{rect}\left(\frac{x-\xi}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y-\eta}{b}\right) d\xi d\eta. \quad (6)$$

将式(4)代入式(6)可得

$$P(x, y) = ab \operatorname{sinc}(af_x) \operatorname{sinc}(bf_y) r(f_x, f_y) \cos[2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \theta(f_x, f_y)]. \quad (7)$$

相应二维卷积过程的 MTF_C 为

$$MTF_C = \operatorname{sinc}(af_x) \operatorname{sinc}(bf_y). \quad (8)$$

与一般探测器不同, CCLID 对辐射功率的响应与输出的电信号之间没有一一对应关系, 而是有一积分时间间隔 $t_i^{[5]}$. 设平台飞行速度为 V_y , 光机扫描速度为 V_x , 在一条穿轨迹扫描线中从第 m 个瞬时视场中心 (x_m, y_m) 扫描至第 $m+1$ 个时的积分输出效应, 可用图 1 进行分析. 由坐标方程

$$\begin{cases} x = x_m + V_x t, \\ y = y_m + V_y t, \end{cases} \quad (9)$$

并结合式(7)可得与空间坐标 (x_m, y_m) 相对应的 CCLID 输出电信号能量 $U(x_m, y_m)$.

$$U(x_m, y_m) = \int_0^{t_i} P(x_m + V_x t, y_m + V_y t) dt \\ = A r(f_x, f_y) \cos[2\pi f_x x_m + 2\pi f_y y_m + \theta(f_x, f_y) + \Phi], \quad (10)$$

其中 $A = ab \operatorname{sinc}(af_x) \operatorname{sinc}(bf_y) t_i \operatorname{sinc}[(f_x V_x + f_y V_y) t_i]$, $\Phi = \pi(f_x V_x + f_y V_y) t_i$. 所以

$$MTF_I = \operatorname{sinc}(af_x) \operatorname{sinc}(bf_y) \operatorname{sinc}[(f_x V_x + f_y V_y) t_i] \\ = MTF_C \cdot \operatorname{sinc}[(f_x V_x + f_y V_y) t_i]. \quad (11)$$

若扫描视场无重迭,则由式(9) $a=V_x t_i, b=V_y t_i$. 于是

$$MTF_I = MTF_C \cdot \sin c(af_x + bf_y). \quad (12)$$

考虑一维 x 轴空间频率,则 $MTF_I = \sin c^2(af_x)$. 图 2 给出了此时的 MTF_I 与 MTF_C . 可见摇扫式扫描时, CCLID 的积分调制传递函数 MTF_I 是二维卷积 MTF_C 与积分因子 $\sin c[(f_x V_x + f_y V_y) t_i]$ 相乘的结果. 与 MTF_C 相比,虽然截止频率不变,但积分因子的作用使各空间频率成分的对比如度降低. 而且高频衰减会使有效截止频率下降.

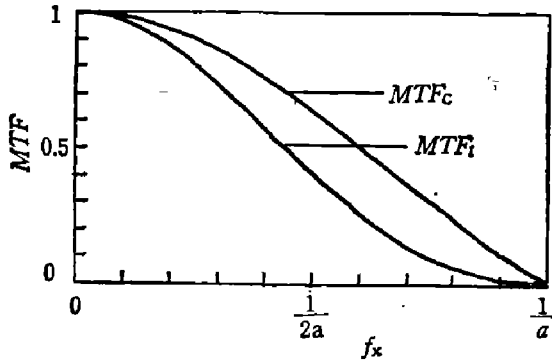


图 2 一维 x 轴空间频率 MTF_I 与 MTF_C 的比较

Fig. 2 Comparison between the MTF_I and MTF_C of one-dimensional x -axis spatial frequency

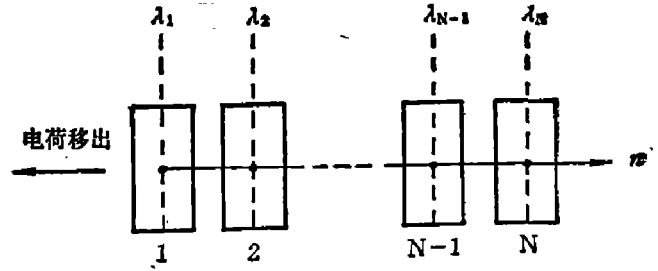


图 3 与光敏元中心相对应的光谱线

Fig. 3 Spectral lines corresponding to the centers of the photosensor elements

3 转移调制传递函数 (MTF_T)

设 CCLID 移位寄存器性能均匀,即各电极下转移效率 η 及转移损失率 ϵ 一致. 采用闪耀光栅作色散元件,落在 CCLID 各光敏元上的光谱的中心波长组成序列 $\{\lambda_n\}$ 如图 3 所示.

用序列 $\{U_{\lambda_n}\}$ 代表原始输入信号,经 CCLID 转移后输出信号为 $\{V_{\lambda_n}\}$. 根据 CCLID 的电荷转移特性^[4],可导出

$$V_{\lambda_n} = \sum_{m=1}^n D_{nm} U_{\lambda_m} \epsilon^{P(n-m)} \eta^{Pm}, \quad n=1, 2, \dots, N, \quad (13)$$

$$D_{nm} = \frac{[P(n-1)]!}{[P(n-m)]! [P(m-1)]!}; \quad (14)$$

式中 P, N 分别为 CCLID 的相数与总元数. 由于 ϵ 很小,故可忽略高于 $2P$ 次的 ϵ 项,则式(13)成为

$$V_{\lambda_n} \approx D_{nn} U_{\lambda_n} \eta^{Pn} + D_{n(n-1)} U_{\lambda_{n-1}} \epsilon^P \eta^{P(n-1)} = O_1 U_{\lambda_n} + O_2 U_{\lambda_{n-1}}. \quad (15)$$

当 $P=4$ 时, $O_1 = \eta^{4n}, O_2 = \frac{1}{3} (n-1)(4n-5)(2n-3)(4n-7) \epsilon^4 \eta^{4(n-1)}$. 考虑到系统的分光作用,式(4)可更一般地表示为

$$O(x, y) = \sum_{n=1}^N r_{\lambda_n}(f_x, f_y) \cos[2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \theta_{\lambda_n}(f_x, f_y)]. \quad (16)$$

于是由式(10)可得

$$U_{\lambda_n}(x_m, y_m) = A r_{\lambda_n}(f_x, f_y) f(\lambda_n) \cos[2\pi f_x x_m + 2\pi f_y y_m + \theta_{\lambda_n}(f_x, f_y) + \Phi + \varphi(\lambda_n)]. \quad (17)$$

式(17)引进 $f(\lambda_n)$ 、 $\varphi(\lambda_n)$ 以反映分光系统对光的振幅、相位调制作用。将式(17)代入式(15), 不考虑相位影响, 令 $\theta_{\lambda_n}(f_x, f_y) + \varphi(\lambda_n) = 0$, 则

$$V_{\lambda_n} = A [c_1 r_{\lambda_n}(f_x, f_y) f(\lambda_n) + c_2 r_{\lambda_{n-1}}(f_x, f_y) f(\lambda_{n-1})] \cos(2\pi f_x x_m + 2\pi f_y y_m + \Phi). \quad (18)$$

于是

$$\begin{aligned} MTF_T &= \frac{c_1 r_{\lambda_n}(f_x, f_y) f(\lambda_n) + c_2 r_{\lambda_{n-1}}(f_x, f_y) f(\lambda_{n-1})}{c_1 r_{\lambda_n}(0, 0) f(\lambda_n) + c_2 r_{\lambda_{n-1}}(0, 0) f(\lambda_{n-1})} \\ &= \frac{r_{\lambda_n}(f_x, f_y)}{r_{\lambda_n}(0, 0)} \\ &= \frac{c_1 f(\lambda_n) + c_2 f(\lambda_{n-1}) R_{\lambda_n, \lambda_{n-1}}(f_x, f_y)}{c_1 f(\lambda_n) + c_2 f(\lambda_{n-1}) R_{\lambda_n, \lambda_{n-1}}(0, 0)}, \end{aligned} \quad (19)$$

式中 $R_{\lambda_n, \lambda_{n-1}}(f_x, f_y) = \frac{r_{\lambda_{n-1}}(f_x, f_y)}{r_{\lambda_n}(f_x, f_y)}$. $R_{\lambda_n, \lambda_{n-1}}(f_x, f_y)$ 为地物空间频率为 (f_x, f_y) 的基元余弦函数在不同波段 λ_{n-1} 、 λ_n 的振幅因子之比。

由式(19)可得结论如下:

(1) 高的电荷转移效率, 将使 $MTF_T \rightarrow 1$. 理想情况 $\eta=1$ 、 $s=0$, 则 $c_2=0$, 于是 $MTF_T=1$.

(2) n 值越小, 则 c_2 越小, 此时 λ_n 波段 MTF_T 影响也越小. 对 λ_1 波段, c_2 有最小值 0, 因而相应的 $MTF_T=1$.

(3) 对某空间频率 (f_x, f_y) , 若相邻波段对应的地物单位面积反射的辐射功率的对比度相差愈小, 则产生的 MTF_T 影响也愈小. 如果任意空间频率 (f_x, f_y) 都有 $R_{\lambda_n, \lambda_{n-1}}(f_x, f_y) = 1$, 那么 MTF_T 也总为 1.

(4) 若 $\frac{R_{\lambda_n, \lambda_{n-1}}(f_x, f_y)}{R_{\lambda_n, \lambda_{n-1}}(0, 0)} \leq 1$, 即 $\frac{r_{\lambda_{n-1}}(f_x, f_y)}{r_{\lambda_{n-1}}(0, 0)} \leq \frac{r_{\lambda_n}(f_x, f_y)}{r_{\lambda_n}(0, 0)}$ 时, $MTF_T \leq 1$. 反之, 则 $MTF_T > 1$. 其物理意义是, 如果第 $n-1$ 个光敏元所对应的 λ_{n-1} 波段的某空间对比度小于、等于或大于等 n 个光敏元所对应的 λ_n 波段的某空间对比度时, λ_n 波段在该空间频率的 MTF_T 将被衰减、保持或增强. 这里之所以出现 $MTF_T > 1$, 是因为 COLID 电荷转移的特殊性所致. 由式(5)可见, 经 COLID 电荷转移后的 λ_n 波段输出信号 V_{λ_n} 不仅取决于 λ_n 波段输入信号 U_{λ_n} , 而且还取决于 λ_{n-1} 波段输入信号 $U_{\lambda_{n-1}}$. 但 MTF_T 的取值随输入信号特性而改变, 并不是一系统常数, 故 MTF_T 无论是大于 1 还是小于 1, 都将是一种对 1 的偏离而给系统的正确空间分辨带来不利影响.

由式(11)及式(19), 综合的扫描调制传递函数 MTF 可表示为

$$MTF = MTF_I \cdot MTF_T. \quad (20)$$

式(20)是在忽略 COLID 由于光生电荷的扩散以及光穿透 SiO_2 、多晶硅和 Si 时穿透率的变化等其它因素所产生的调制传递函数 MTF_D 的情况下, 所给出的 COLID 用于摇扫式扫描方式的扫描调制传递函数.

4 工程估算

实际的摇扫式扫描仪, 在考虑数据磁带记录之前的系统调制传递函数时, 还应计有光学调制传递函数及电路传递函数. 分析与实践都表明, 对系统调制传递函数衰减最大的仍是

扫描调制传递函数。特别是在高频部分,由图2可知,当 $f_x = \frac{1}{a}$ 时, $MTF_I = 0$ 。低频部分对应的是大块均匀的地物,如较大面积的河床、植被、沙漠、岩矿等,而这正是遥感研究的对象。故对 $f_x < \frac{1}{2a}$ 部分,系统调制传递函数不能太小,系统要有足够的分辨能力。由图2可知, $f_x = \frac{1}{2a}$ 时, $MTF_I = 0.405$ 。为了估算 MTF_T ,给出一组工程数据 $N = 1024$, $P = 4$, $\eta = 0.9999$, $\varepsilon = 10^{-4}$ 。当 $n = N$ 时, $c_1 = 0.664$, $c_2 = 7.748 \times 10^{-4}$ 。若认为分光系统的设计较为理想,因而 $f(\lambda_n) \approx f(\lambda_{n-1})$ 。其一维 x 轴的空间分布 $O(x)$ 如图4所示。

设系统要求的与一维空间频率 $f_x = \frac{1}{2a}$ 对应的可分辨反射率差为1%。于是对于 λ_n 波段, MTF_T 衰减最大的情形由图4给出。此时 $r_{\lambda_{n-1}}(f_x) = 1$, $r_{\lambda_{n-1}}(0) = 100$, $r_{\lambda_n}(f_x) = 1$, $r_{\lambda_n}(0) = 1$ 。将上述参数代入式(19)可得 $MTF_T = 0.897$ 。再由式(20)求得扫描调制传递函数 $MTF = 0.363$ 。由此可见,系统还是能够分辨出按如此空间频率变化的地面景物的。这个结论将对系统设计起指导作用。

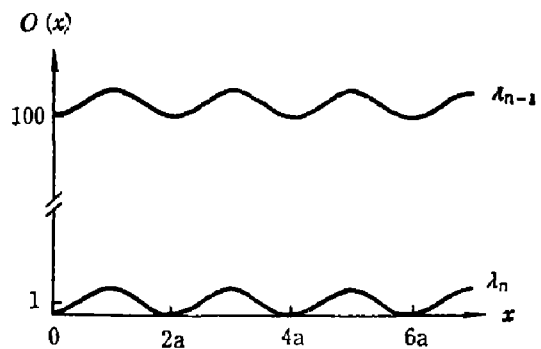


图4 一维 x 轴空间分布函数 $O(x)$

Fig. 4 One-dimensional x -axis spatial distribution function $O(x)$

致谢: 作者曾得到龚惠兴研究员、张智敏副研究员多方面的有益指导,谨表衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Philip Gizdziel et al. *SPIE, Vol. 972 Infrared Technology XIV* (1988); 83~86
- 2 Nelson R D, Waters WP. *CCD Applications Conf. Proc.*, 1973: 207~216
- 3 张孝霖. 光学学报, 1981; 1(6): 546~549
- 4 Séquin G H, Tompsett M F. *Charge Transfer Devices*, Academic Press, Inc., 1975. 王以铭译, 电荷转移器件, 北京: 科学出版社, 1979; 67~72

MTF OF CCLID IN WHISKBROOM SCANNING

ZHANG FU

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

The integration modulation transfer function MTF_I and the transfer modulation transfer function MTF_T of the COLID in whiskbroom scanning are strictly analyzed, while the expressions of the MTF_I and MTF_T are derived. Their values are discussed and the engineering estimation of them is made finally.

Key words: modulation transfer function, COLID, remote sensing, imaging spectrometer.