

关于行扫描仪的目标分辨能力

张 孝 霖

(华北光电研究所,北京)

提 要

本文定量地分析了行扫描仪的目标分辨能力。结果说明,其分辨能力大大超过了瞬时视场的限制。当目标或其内部亮度分布的线度小于瞬时视场的线度时,我们能得到一种畸变了,即被展宽而且边沿模糊了的响应。但是如果目标亮度分布的对比度足够大,这种分布就能被成象并被识别。特别是对线性甚至点目标,只要其对比度或亮度增加到 S_L/S_T 倍,就确定地能满足已建立的任何可识别的条件方程,这里 S_L 与 S_T 分别表示瞬时视场和目标的面积。如果进一步利用目标与背景间不同的波谱特性,还能明显地改进目标分辨能力。

自1972年发射第一颗地球资源卫星以来,已有三颗卫星上载有以光机扫描方式工作的多光谱扫描仪。扫描仪不仅作为重要的遥感手段可靠而有效地运行着,而且由其所获取的图象信息大大超过了人们的预计,无论在环境监视、资源探测或在其他方面,都有极为重要的意义。

按通常的经验,大于瞬时视场数倍的目标才足以被识别。以Landsat-C为例^[1],其轨道高度是918公里,对 $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$ 与 $10.4\sim 12.6\mu\text{m}$ 两个波段范围,地面线性分辨率分别为79米与240米。然而,从扫描仪获得的图象发现,对很多目标,特别是线性目标,甚至是点目标*,在一定条件下,即使其线度显著小于瞬时视场的线度,仍能分辨出来。比如,沙漠地区仅三米宽的水道,背景不太复杂的铁道、公路、水坝、机场跑道以及小于瞬时视场的人工设施都十分醒目,而这些目标的宽度都是显著小于瞬时视场的。关于扫描仪的目标分辨能力,已有文献很少涉及;本文将对此加以讨论,并在定量分析的基础上,对目标的可探测条件提供判据。

一、定性分析——问题的物理考虑

1. 线性或点目标

如果以 N_T 为目标亮度, N_{\max} 与 N_{\min} 分别表示背景的最大与最小亮度,在目标全部进入并充满瞬时视场下,其可探测条件一般都表示为

$$N_T - N_{\max} \geq B(N_{\max} - N_{\min}) \quad (1)$$

只要合理选择足够大的常数 B ,就保证了目标的可探测条件。

图1定性地表示了矩形瞬时视场扫过不同宽度线性目标时的响应。这一响应或者表示扫描仪收集孔径上所产生的照度的时间变化,或者是探测器件电响应的时间变化。显然对

收稿日期: 1980年9月2日

* 这里说的点目标自然不是几何点。

小于瞬时视场的目标, 所得到的响应相对于目标图象而言, 是畸变了即展宽而边沿模糊了的图象。

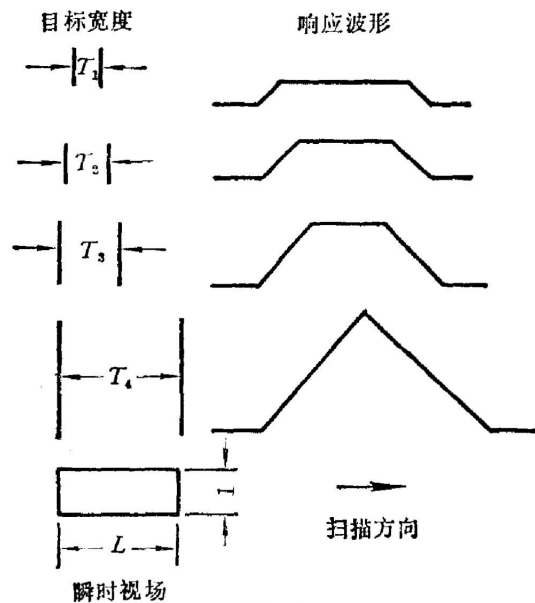


图 1

如果不略去瞬时视场中目标未充满部分的背景的贡献, 则有

$$[TN_T + (L - T)N_{\min} - LN_{\max}] \geq BL(N_{\max} - N_{\min}), \quad (4)$$

更严格的结果为

$$N_T \geq \frac{L}{T} [(1 + B)N_{\max} - (1 + B)N_{\min}] + N_{\min} \quad (5)$$

对小于瞬时视场的点目标, 易于将式(5)改写为

$$N_T \geq \frac{S_L}{S_T} [(1 + B)N_{\max} - (1 + B)N_{\min}] + N_{\min} \quad (6)$$

这里, S_L 与 S_T 分别表为瞬时视场与点目标的面积。

2. 目标内部具有一定亮度分布的情况

如果目标内部有一定亮度分布, 且此分布的线度又小于瞬时视场, 则当瞬时视场扫过目标时, 只要亮度分布有足够的对比度, 我们将获得对此分布的一定的波形响应。自然此分布花样不致超过光学分辨的极限并在以下的讨论中保证这样的条件。这里着重于原理性论证, 并且假设目标亮度分布为等周期的矩形波, 脉宽等于二分之一周期, 如图 2 所示。易于证明, 除了

$$L = n\lambda, \quad (7)$$

这一特定条件将使响应为零, 即响应波形为一水平线外, 只要满足

当宽为 T 的目标完全进入宽为 L 的瞬时视场时(这里设目标亮度大于背景亮度, 相反的情况可完全类似地进行处理), 如果略去背景的贡献, 在能量上等效于将宽为 T 的辐射源, 在总能量不变下均匀地展布在宽为 L 的更大的辐射面上, 其结果是有效亮度相应减小。当小于瞬时视场的目标完全进入视场时, 有效亮度 N_e 为

$$N_e = \frac{T}{L} N_T, \quad (2)$$

式(1)所表示的一般可探测条件于是改变为

$$N_T \geq \frac{L}{T} [(1 + B)N_{\max} - BN_{\min}]. \quad (3)$$

即在可探测条件方程中, 将 N_T 增加到 L/T 倍, 所探测的目标虽然图象被畸变了, 但仍然足以被识别。



目标亮度分布



$L = \frac{(2n+1)}{2} \lambda$ 的响应



$L = \frac{(4n+1)}{4} \lambda$ 的响应

图 2

$$L = \frac{n}{m} \lambda \quad (m, n \text{ 为正整数}), \quad (8)$$

或说 L/λ 之比为一无理数, 就能得到周期性的响应。这里显然因扫过 m 个整数的视场宽度时, 经历了 n 个整数的分布波长, 正好构成了响应的一个完整的周期。图 2 中仅描出了 $L = (2n+1)\lambda/2$ 为一三角波系列与 $L = (4n+1)\lambda/4$ 为一完全对称的梯形波系列的响应波形。而一般的响应将在下一节加以计算。

二、定量分析^[2,3,4]

1. 目标内部具有一定亮度分布的情况

紧接着定性分析, 仍假设此亮度分布为前述的矩形波脉冲列。为了简化计算, 进一步假设为无限脉冲列。矩形窗口(瞬时视场)函数令为 f_1 , f_1 可表示为(参见图 1)

$$f_1(x) = \begin{cases} 0 & |x| > L/2, \\ 1 & |x| \leq L/2. \end{cases} \quad (9)$$

目标内部亮度分布函数 f_2 可展开为下列傅氏级数:

$$f_2(x) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(-1)^{p-1}}{(2p-1)} \cos(2p-1)2\pi kx. \quad (10)$$

这里 $k=1/\lambda$ 为分布的空间频率。易于算出函数 f_1 与函数 $\cos 2\pi kx$ 的卷积, 即矩形窗口扫过 $\cos 2\pi kx$ 分布的响应为

$$f_1(x) \otimes \cos 2\pi kx = \int_{x-L/2}^{x+L/2} \cos 2\pi ku \, du = \frac{\sin \pi kL}{\pi k} \cos 2\pi kx. \quad (11)$$

当矩形瞬时视场扫过目标时, 响应为 f_1 与 f_2 的卷积。这可按式(11)的结果对式(10)逐项求积, 于是得响应函数

$$R = f_1 \otimes f_2 = \frac{L}{2} + \frac{2}{k\pi^2} \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^{p-1} \frac{\sin(2p-1)\pi kL}{(2p-1)^2} \cos(2p-1)2\pi kx. \quad (12)$$

这是一般的结果。从中可以看出:

- (i) k (或 λ)不同, 基波就不同;
- (ii) 响应适合于任意的 k , 即任意空间频率的分布, 均能获得对应的响应;
- (iii) 除 $L/2$ 这一直流分量外, 基波与各级谐波幅度中, 均有 $\sin(2p-1)\pi kL/k$ 出现。

因而 K 不同, 对应的幅度就不同。

这说明亮度分布不同, 对应的响应波形就不同, 这就是目标仍可能被识别的重要基础。

在定性分析中已指出, 当 $L=n\lambda$ 时, 响应为零, 这由式(12)显然可见, 这时除 $L/2$ 常数项外, 其余各项的幅值都为零。当 $L=(2n+1)\lambda/2$ 时, 前已指出为三角波系列。将其代入式(12), 且注意到 $\lambda=1/k$, 再由于

$$(-1)^{p-1} \sin(2p-1)\pi kL = (-1)^{p-1} \sin(2p-1) \frac{(2n+1)}{2} \pi = (-1)^n,$$

于是响应波形为

$$\begin{aligned} R &= \frac{L}{2} + \frac{2}{k\pi^2} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2p-1)^2} \cos(2p-1)2\pi kx \\ &= \frac{L}{2} + \frac{4L}{(2n+1)\pi^2} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2p-1)^2} \cos(2p-1)(2n+1) \frac{x}{L} \pi. \end{aligned} \quad (13)$$

这是典型的三角波函数的傅氏级数形式。又如当 $L = (4n+1)\lambda/4$ 时, 同样可算得响应函数为

$$R = \frac{L}{2} + \frac{8L}{(4n+1)\pi^2} \cdot \frac{(-1)^n}{\sqrt{2}} \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m-1} \frac{\cos(4m-3)(4n+1)\pi x/2L}{(4m-3)^2} - \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{\cos(4m-1)(4n+1)\pi x/2L}{(4m-1)^2} \right\} \quad (14)$$

这与对称梯形波的傅氏展开式也完全一致。

进一步, 我们可对一般的响应函数(12)进行频谱分析, 这一点可对式(12)求傅氏变换。但易知单脉冲函数的傅氏变换为

$$F(f_1) = \frac{\sin \pi k L}{\pi k}, \quad (15)$$

三角函数中余弦函数的傅氏变换为

$$F(\cos 2\pi k_0 x) = \pi [\delta(k-k_0) + \delta(k+k_0)]. \quad (16)$$

按傅氏变换的卷积定理即 $F(f_1 \otimes f_2) = F(f_1) \cdot F(f_2)$, 且利用式(15)与(16)的结果, 可对 f_1 与 f_2 分别求出其傅氏变换, 从而得

$$F(f_1 \otimes f_2) = \frac{\sin \pi k L}{\pi k} \left\{ \frac{1}{2} \delta(k_0) + \sum_{p=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{p-1}}{(2p-1)} \delta[k - (2p-1)k_0] + \sum_{p=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{p-1}}{(2p-1)} \delta[k + (2p-1)k_0] \right\}. \quad (17)$$

对于确定的 k_0 (或 λ_0), 这是一离散频谱。如果不考虑平均值 (即直流分量), 就可不考虑 $\delta(k_0)$ 项, 由于对 k_0 取正负值是对称的, 只需讨论 $\delta[k - (2p-1)k_0]$ 部分。并注意到 δ 函数的特性, 即仅当 k 取 $(2p-1)k_0$ 时才有意义, 这时 $\delta = 1$ 。则决定频谱特性的基本结果为下列无穷级数:

$$F(f_1 \otimes f_2) = \frac{\sin(2p-1)k_0 L \pi}{(2p-1)k_0 \pi} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{p-1}}{(2p-1)}, \quad (18)$$

其通项是

$$A(k_0) = \frac{\sin(2p-1)\pi k_0 L}{(2p-1)\pi k_0} \frac{2}{(2p-1)}. \quad (19)$$

现由这一基本结果出发, 考虑以 k_0 为参数, 研究空间频率 k_0 变化时 $A(k_0)$ 即频幅的变化。当

$$\pi(2p-1)k_0 L = \frac{(2n-1)}{2} \pi,$$

即

$$k_0 = \frac{(2n-1)}{2(2p-1)} \frac{1}{L}, \quad (20)$$

得最大频幅

$$A(k_0)_{\max} = \frac{4L}{(2n-1)(2p-1)\pi}. \quad (21)$$

当

$$\pi(2p-1)k_0 L = n\pi,$$

即

$$k_0 = \frac{n}{(2p-1)} \frac{1}{L}, \quad (22)$$

得最小频幅

$$A(k_0)_{\min} = 0. \quad (23)$$

这里只讨论其绝对值。图 3 表示以 p 为参数, $A(k_0) \sim k_0$ 的函数关系。 p 是亮度分布的傅氏展开式中的谐波级数, n 是亮度空间分布的空间频率指数。 n 越大, k_0 越大, λ_0 越小, $A(k_0)_{\max}$ 也越小。可以注意到对 $p=1$ 的基波, 其幅度随 k_0 的衰减并不算太陡。而对大于 1 的 p , 由于 $A(k_0)_{\max}$ 同时随 $1/n$ 与 $1/p$ 而衰减, 所以幅度具有很小的值。这说明只要探测器与电子系统带宽能响应到式 (12) 中的基波频率, 就足以成象并保留了式 (12) 中的主要信息。图 4 是以 n 为参数就 $A(k_0)_{\max} \sim p$ 描出的, 显然这里只有分立的谱线。

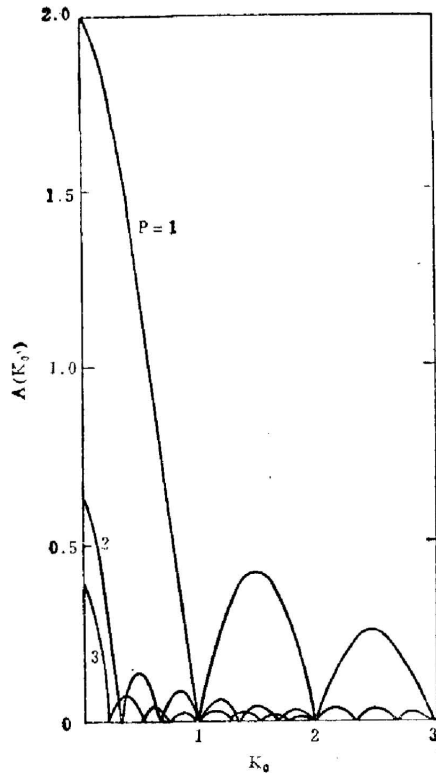


图 3

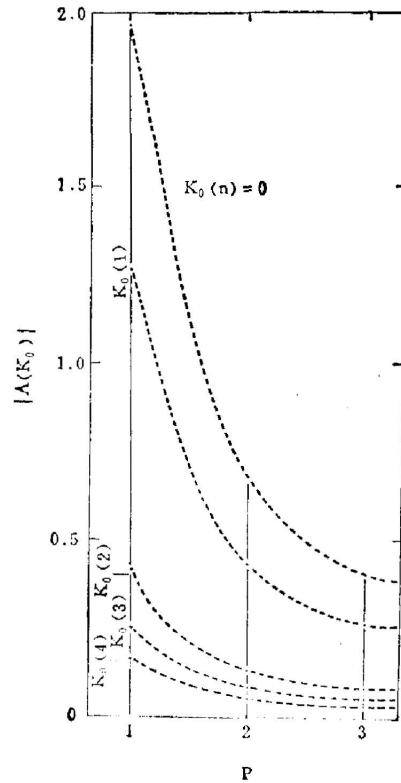


图 4

但是, 当空间频率足够高, 以致 λ 显著小于 L 时, 对系统的带宽要求就十分苛刻。比如通常在讨论带宽时, 假定了 $\lambda = 2L$, 即有最大对比度的相邻明暗条纹的宽都为 L 。此时的带宽(最小)为 $\Delta f_0 = \frac{1}{2\tau}$, τ 是瞬时视场扫过宽为 L 的被分辨元时所停留的时间。当 $\lambda = L/5$ 时, 这时带宽将有 $\Delta f = 10\Delta f_0$, 即增加了 10 倍。因而除得到畸变了图象响应外, 图象信息还进一步受带宽的限制。当带宽不能满足理论上的要求时, 图象将进一步被畸变。但是随着亮度分布的不同, 波形响应就不同, 只要有足够对比度就可获得相应的地物图象。对多谱扫描仪, 更能利用目标或背景的不同波谱特征, 加上本文所述的对应于不同空间分布所得不同的波形响应, 利用电子计算机的处理, 可以大大提高目标分辨能力。这方面已经取得了不少有意义的结果^[5, 6, 7]。

2. 线性或点目标情况

对这类目标,可用单一脉冲函数来表示。我们可以直接求出矩形瞬时视场扫过此类目标时响应函数的傅氏变换。令此单脉冲函数为 f_3 , 于是有

$$f_3 = \begin{cases} 0 & |x| > T/2, \\ N_T & |x| \leq T/2, \end{cases} \quad (24)$$

可得

$$F(f_1 \otimes f_3) = F(f_1) \cdot F(f_3) = \frac{\sin \pi k L}{\pi k} \cdot \frac{\sin \pi k T}{\pi k} N_T. \quad (25)$$

这里仍设矩形瞬时视场长为 1, 宽为 L , 目标亮度是均匀的, 且在与扫描垂直方向上的线度足够大于 1, 因而是处理一维问题。

图 5 同时描出了 $L=T$ 、 $2T$ 、 $4T$ 、 $10T$ 的一组曲线。由曲线清楚可见能量主要分布在低空间频率端, 且与定量分析的结论完全一致, 即当 T/L 比值减小时, 频幅的最大值 ($k=0$) 也减小到 T/L 倍。可以将式(25)改写为更加对称的形式, 令 $\gamma=T/L$, 则有

$$F(f_1 \otimes f_3) = \gamma \frac{\sin \pi k L}{\pi k L} \cdot \frac{\sin \pi k \gamma L}{\pi k \gamma L} L^2 N_T. \quad (26)$$

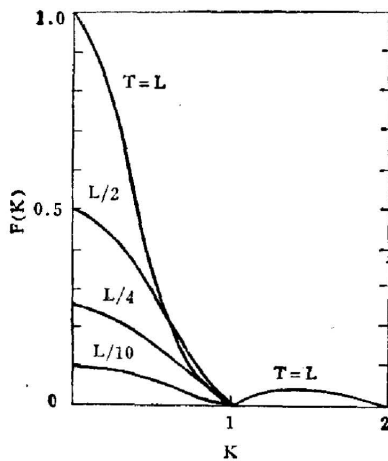


图 5

这更清楚地表明了频幅随 $\gamma=T/L$ 的减小而减小。但如果目标亮度增加到 $N'_T = N_T/\gamma$, 则频幅最大值不变。这里从严格的计算中证明了对于线性甚至是点目标, 即使其线度小于瞬时视场, 只要有足够的对比度, 则仍然能够被识别。这正是地面线性分辨率为 79 米的星载扫描仪仍能分辨出宽仅数米的铁道、公路与水道的基本依据(在一定的背景条件下)。

对于以反射为主的目标与背景, 其对比度要达到 10 以上或 10^2 的数量级是少有的。然而在红外波长范围, 如 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 与 $8 \sim 14 \mu\text{m}$, 如果目标与背景的温差较大, 则对比度在 10 以上是易于出现的。因而对于热目标, 扫描仪有很好的分辨能力。同样, 如果目标与背景有不同辐射特征, 可识别的条件可降低, 这可就具体的目标与背景进行分析。已有的结果^[8]是, 在平静的海域, 利用地资卫星的多光谱数据, 已足以识别长约 100 米的船只, 并能判断其方向与航迹。预期可以识别到仅 30 米长的船只。对具有更高温度的点目标, 利用多谱数据提高分辨能力是颇有潜力的。

为了精确求出不同 T/L 比值下的总能量或其分布, 需要将式(25)或(26)对 k 进行积分(在全 k 值或部分 k 值范围内)。但在一般情况下式(26)不能积分, 只能用计算机进行数值求解。仅当 $T=L$ 时, 可在全 k 值范围内积分求解。如令瞬时视场长亦为 L , 即面积为 L^2 的瞬时视场, 于是有

$$W = LN_T \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2 \pi k L}{(\pi k L)^2} L^2 dk = L^2 N_T \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2 u}{u^2} du = L^2 N_T, \quad (27)$$

这正是预期的结果。

三、结 论

本文着重分析了行扫描仪的目标分辨能力。结果证明其目标分辨能力大大超过了瞬时视场的限制。这里集中分析了内部有特定亮度分布的目标和线性以至点目标,这些目标或其亮度分布的线度是小于瞬时视场的线度的。结果证明:

(i) 当目标本身或其内部亮度分布的线度小于瞬时视场时,能得到畸变了、即展宽而且边沿模糊了的图象响应。

(ii) 目标内部亮度分布不同,响应亦不同。如果这种亮度分布的对比度足够大,再加上不同于周围背景或其他目标的波谱特征,这种目标是能够被识别的。如果系统的带宽不够,图象将进一步被畸变。

(iii) 对线性以及点目标,只要目标与背景有足够的对比度,是完全能被识别或被分辨的。定性与定量分析都证明,在一般的两相邻瞬时视场可区别,即可探测的条件中,只要将目标亮度提高到 L/T 倍或 S_L/S_T 倍,就同样满足。

如果是多光谱扫描仪,还可以进一步利用目标与背景在波谱特征上的差异,使可探测条件更易于满足。

参 考 文 献

- [1] F. J. Dople; *Photogram. Engng & Remote Sensing*, 1978, **XL IV**, No.2 (Feb), 155.
- [2] 郑钧; 线性系统分析(科学出版社, 1979年, 第二版)
- [3] a. M. R. Holter et al.; *Fundamental of Infrared Technology* (Macmillan Company, New York, 1962)
b. R. D. Hudson Jr.; *Infrared System Engineering* (John & Sons, Inc., 1969), Chapter 13.
c. W. L. Wolfe; *Handbook of Military Infrared Technology* (Office of Naval Research Department of the Navy, Washington, D. C. 1965), 729.
- [4] 同文献[3]-c, 645.
- [5] *Proc. Ninth Internat. Symp. on Remote Sensing of Environment*, 1974, **1** (Session 1), **2** (Session 10);
Proc Tenth, 1975, **1** (Session 7), 373.
- [6] *Proc. Eleventh Internat. Symp. on Remote Sensing of Environment*, 1977,
- [7] *4E Symp. Canadian sur la Teledetection*, 1977.
- [8] M. J. McDonnell, A. J. Lewis; *Photogram. Engng & Remote Sensing*, 1978, **XL IV**, No. 3 (Mar), 297.

On the target resolution of line scanners

ZHANG XIAOLIN

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing)

(Received 2 September 1980)

Abstract

The target resolution of line scanners is analyzed quantitatively. It is concluded that its resolution greatly exceeds the limit of instantaneous field of view (IFOV). When the scale of the target or its internal radiance distribution is smaller than the IFOV, we can obtain a distorted, i.e., expanded and boundary blurred response. But if the contrast of target radiance distribution is large enough, this distribution can be imaged and distinguished. Particularly, for linear or spot targets, as long as the contrast or radiance increases by a factor of S_L/S_T , it can certainly meet the condition of any equations constructed for the distinguishable targets, here S_L and S_T expresses respectively the areas of the IFOV and the target. If we further make use of the difference of spectral characteristics between the target and background, we can improve the target resolution obviously.