

红外扫描仪空间分辨率的讨论

尹 达 人

(华东工学院)

摘要——本文讨论了红外扫描仪空间分辨率的物理意义, 推导了四种扫描方式的频谱计算公式, 分析了分辨两个矩形物体及无限线状结构物的条件。

一、引 言

目前, 在有些文献中^[1,2]把红外系统的瞬时视场看作系统的空间分辨率, 把空间分辨率定义为

$$l = D/f \text{ (rad)};$$

式中, D 是红外探测器的尺度, f 是光学系统的焦距。严格地说, 应该用立体角来定义(见图 1), 则有关系式

$$S = \frac{H}{f} D = Hl;$$

式中, H 是卫星离地面的高度, S 称地面分辨率(指空间分辨率对应地面的有效线度)。一般认为, 可分辨的目标不能小于 S , 但是实际测量的结果, 可分辨的目标可以大大小于 S 。以地资卫星 Landsat-C 为例, 其轨道高度为 908 km, 按上式计算结果, 地面分辨率为 79 m ($0.5 \sim 1.1 \mu\text{m}$) 与 240 m ($10.4 \sim 12.6 \mu\text{m}$)。但是在沙漠地区仅 3 m 宽的水道, 不太复杂背景里的铁道、公路、水坝、机场的跑道以及线度小于瞬时视场的人工设施也很醒目^[3]。再如, 美国海盗探空火箭, 地面分辨率为 150 m, 但仍能看出铁路线来, 甚至连宽度不到分辨率 1/10 的排水沟和堤坝也隐约可见^[4]。

上述实例说明, 把瞬时视场看作空间分辨率, 没有反映扫描仪是运动的这一物理本质。

描述受衍射限制的光学系统分辨率的瑞利准则, 讨论的是分辨两个点光源的问题。红外扫描仪空间分辨率的概念也应该讨论两个目标或一些挨近目标能否分清的问题。由于红外扫描仪是一个运动的系统, 除了光学系统外还包含其它部件, 这样问题就比单纯讨论光学分辨率复杂得多。本文从输出波形出发, 对常见的

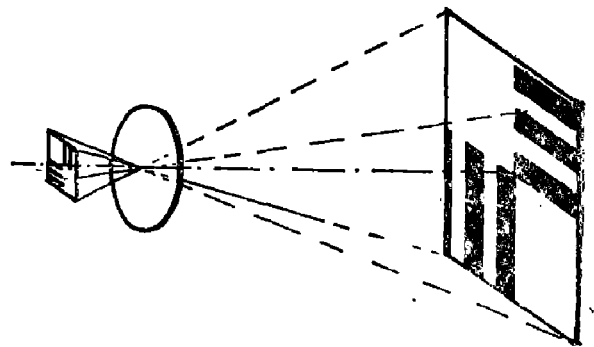


图 1 瞬时视场

Fig. 1 An instantaneous field of view

扫描方式,分析了红外扫描仪分辨两个矩形物体及无限线状结构物的条件,对空间分辨率的问题作出初步的讨论。

二、若干红外扫描系统信号波形及其频谱计算公式

由文献[5],红外扫描系统信号波形及其频谱的计算通式为:

$$p(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(f_x, f_y) R^*(f_x, f_y) \exp[2\pi i(f_x x' + f_y y')] df_x df_y;$$

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) [-2\pi i f t] dt$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(f_x, f_y) R^*(f_x, f_y) \exp[2\pi i(f_x x' + f_y y' - f t)] df_x df_y dt; \quad (1)$$

式中 $Q(f_x, f_y)$ 是目标象函数的空间频谱; $R(f_x, f_y)$ 是红外探测器的传递函数; $x'(t), y'(t)$ 是红外系统相对被探测目标的运动规律。

下面我们对四种运动方式进行讨论,为了简化数学问题,只计算其输出频谱。

1. 匀速直线扫描。将 $x'(t) = v_x t, y'(t) = 0$ 代入式(1)得:

$$P(f) = \frac{1}{v_x} \int_{-\infty}^{\infty} Q(f/v_x, f_y) R^*(f/v_x, f_y) df_y. \quad (2)$$

2. 沿 x 方向来回摆动扫描。将 $x' = H \sin \omega t, y' = 0$ 代入式(1)得:

$$P(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} Q(f_x, f_y) R^*(f_x, f_y) J_n(2\pi f_x H) df_x df_y \delta(f - n f_0) \quad (3)$$

式中

$$f_0 = \omega/2\pi.$$

3. 在平面内二维正弦扫描。将 $x' = H \sin \omega t, y' = v_y t$ 代入式(1)得:

$$P(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q\left(f_x, \frac{f - n f_0}{v_y}\right) R^*\left(f_x, \frac{f - n f_0}{v_y}\right) J_n(2\pi f_x H) df_x. \quad (4)$$

4. 在平面内二维来回扫描,将 $x' = H \cos \omega_1 t, y' = I \sin \omega_2 t$ 代入式(1)得

$$P(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{p=-\infty}^{\infty} i^n \iint_{-\infty}^{\infty} Q(f_x, f_y) R^*(f_x, f_y)$$

$$\times J_n(2\pi f_x H)$$

$$\times J_p(2\pi f_y I) df_x df_y$$

$$\delta(f - n f_1 - p f_2), \quad (5)$$

式中 $f_1 = \omega_1/2\pi, f_2 = \omega_2/2\pi$ 。这一种扫描方式, H, I, ω_1, ω_2 不同,有不同的图形;若 $x' = \cos \omega t, y' = \sin 4\omega t$, 其扫描图形如图 2 所示。

假设要探测的目标为:

1. 有 k 个相距为 $2b$ 、面积为 $a \times b$ 的矩形孔径阵列,其空间频谱为

$$Q(f_x, f_y) = M \frac{\sin \pi a f_x \sin 2kb\pi f_y}{2\pi^2 f_x f_y \cos \pi b f_y}, \quad (6)$$

若 $k=1$, 则

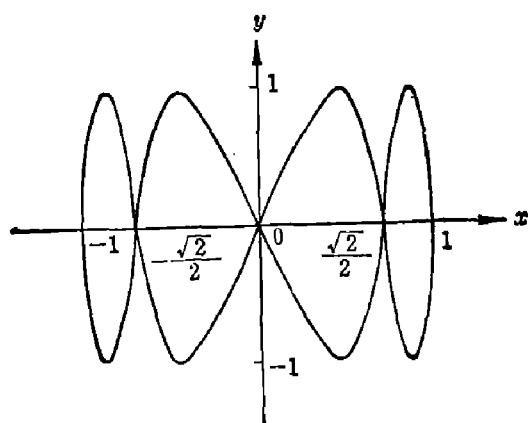


图 2 二维空间扫描

Fig. 2 Two dimensional space scanning

$$Q(f_x, f_y) = M \frac{\sin \pi a f_x \sin \pi b f_y}{\pi^2 f_x f_y}; \quad (7)$$

式中 M 是被探测目标与背景辐射的对比度。

2. 无限的线状结构的目标, 若一个周期的间隔为 $x_0 = \frac{1}{k_0}$, 其空间频谱为

$$Q(f_x, f_y) = \frac{M}{2} \delta(f_x, f_y) + \sum_{p=1}^{\infty} \frac{M(-1)^{p-1}}{\pi(2p-1)} \times [\delta(f_x - (2p-1)k_0, f_y) + \delta(f_x + (2p-1)k_0, f_y)]. \quad (8)$$

对于红外探测器考虑采用多元及单元两种:

对有 g 个相距为 $2l$ 的 $l \times l$ 多元探测器, 其传递函数为

$$R(f_x, f_y) = \frac{\sin \pi l f_x \sin 2gl \pi f_y}{2\pi^2 f_x f_y \cos \pi l f_y}. \quad (9)$$

对于单元探测器, 则 $g=1$, 其传递函数为

$$R(f_x, f_y) = \frac{\sin \pi l f_x \sin \pi l f_y}{\pi^2 f_x f_y}. \quad (10)$$

三、讨 论

空间分辨率涉及到两个目标或一些接近目标能否分清的问题。最常见的是两个矩形物体及许多条线状结构物。

1. 用角直径为 l 的探测器, 以角速度 v_a 对物空间匀速直线扫描, 探测两条相距为 a 的 $a \times b$ 矩形物体。

类似式(6), 变换坐标得

$$Q(f_x, f_y) = M \frac{\sin 4\pi a f_x \sin \pi b f_y}{2\pi^2 f_x f_y \cos \pi a f_x}.$$

连同式(10), 代入式(2)得

$$P(f) = \frac{2Mv_a}{\pi^2 f^2} \sin \pi a f / v_a \sin \pi l \frac{f}{v_a} \cos 2\pi a \frac{f}{v_a} \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \pi b f_y \sin \pi l f_y}{f_y^2} df_y. \quad (11)$$

$$\text{令, } F(b, l) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \pi b f_y \sin \pi l f_y}{f_y^2} df_y = \begin{cases} \pi^2 l & \text{当 } b > l, \\ \pi^2 b & \text{当 } b < l, \end{cases}$$

$$\xi = \pi a f / v_a;$$

$$\text{则 } P(f) = \frac{2M a l}{\pi^2 v_a} \frac{\sin \xi}{\xi} \frac{\sin\left(\frac{l\xi}{a}\right)}{\left(\frac{l\xi}{a}\right)} \cos 2\xi F(b, l).$$

当 $l \ll a$ 时,

$$P(f) = \frac{2M a l}{\pi^2 v_a} \frac{\sin^2 \xi}{\xi} \cos(2\xi) F(b, l).$$

这是两个波形为矩形的频谱, 这才真正反映物体原来的形状, 一般可令 $l=0.2a$ 。

当 $l=a$ 时,

$$P(f) = \frac{2M l^2}{\pi^2 v_a} \left(\frac{\sin \xi}{\xi}\right)^2 \cos 2\xi F(b, l). \quad (12)$$

这是两个三角形波的频谱, 这时两个目标还能分清, 但从输出谱来复原图象, 其形状已经畸变。式(12)表明, M 愈大, v_s 愈小, 产生的频谱愈大, 愈容易探测到目标。

当 $l=2a$ 时,

$$P(f) = \frac{Ml^2}{\pi^2 v_s} \frac{\sin^2 \xi}{\xi^2} \cos 2\xi \cos \xi F(b, l);$$

这是一个梯形波的频谱, 这时已分辨不清两个目标。在这种情况下, 能分辨两个目标最基本的条件是 $l < 2a$ 。

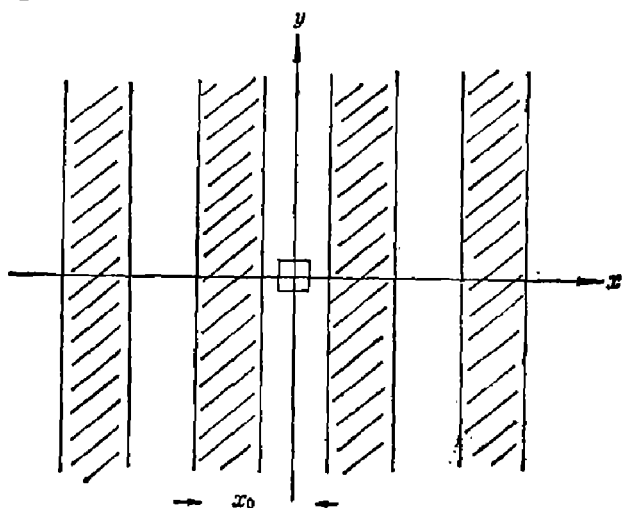


图3 探测线状区域方法之一
Fig. 3 The first method for detecting linear section

2. $l \times l$ 的单元探测器, 以角速度 v_s 直线扫描一周期间隔为 $x_0 = 1/k_0$ 的线状结构物。见图3。

用式(8)及式(10)代入式(2)得

$$P(f) = \frac{Ml^2}{2} \delta(f) + \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^{p-1} \times \frac{Ml \sin[\pi l(2p-1)k_0]}{\pi^2 (2p-1)^2 k_0} \times \delta[f - (2p-1)k_0 v_s]. \quad (13)$$

分析式(13)表明: 频谱成分只跟周期间隔 x_0 及扫描速度 v_s 有关, 与探测器的角直径 l 无关, l 只跟频率幅值有关。

(1) 当 $l = (q + \frac{1}{2}) / k_0$, 其中 $q=0, 1, 2, \dots$ 时, 则

$$P(f) = \frac{Ml^2}{2} \delta(f) + \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p \frac{M(q + \frac{1}{2})}{\pi^2 k_0^2 (2p-1)^2} \delta[f - (2p-1)k_0 v_s];$$

这是周期性三角波的波谱公式。在滤除直流分量以后, 若 x_0 一定, l 愈大, 目标愈容易探测到。

(2) 当 $l = (q + \frac{1}{4}) / k_0$, 其中 $q=0, 1, 2, \dots$ 时, 则

$$P(f) = \frac{Ml^2}{2} \delta(f) + \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^{p-1} \frac{M(q + \frac{1}{4}) \sin[\pi(q + \frac{1}{4})(2p-1)]}{\pi^2 k_0^2 (2p-1)^2} \times \delta[f - (2p-1)k_0 v_s],$$

这是周期性梯形波的频谱公式。

(3) 当 $lk_0 \ll 1$ 时, 则

$$P(f) = \frac{Ml^2}{2} \delta(f) + \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^{p-1} \frac{Ml^2}{\pi(2p-1)} \delta[f - (2p-1)k_0 v_s];$$

这是周期性方波的频谱公式。这种情况探测线状结构物才不失真: 这时产生的谱值随着 l 的减少而减少。说明, 不失真探测是以损失灵敏度为代价来换取的。

(4) 当 $l = q/k_0$, 其中 $q=1, 2, 3, \dots$ 时, 则

$$P(f) = \frac{Ml^2}{2} \delta(f)。$$

在这种情况下, 线状结构物探测不出来, 也就是说, 分辨线状结构物最基本条件是 $l \neq q/k_0$ 。

其中 $q=1, 2, 3, \dots$ 。

3. 用 g 个 $l \times l$ 多元探测器, 二维正弦形扫描, 探测一线状结构物, 见图 4。

用式(8)、(9)代入式(4)得

$$P(f) = \left\{ \frac{Mgl^2v_v}{2} + \sum_{p=1}^{\infty} 2Mlgv_v(-1)^{p-1} \right. \\ \times \frac{\sin[\pi l(2p-1)k_0] J_0[2\pi H(2p-1)k_0]}{\pi^2(2p-1)^2k_0} \left. \right\} \\ \times \delta(f) + \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \\ \times \frac{2gMlv_v(-1)^{p-1} \sin[\pi l(2p-1)k_0]}{\pi^2(2p-1)^2k_0} \\ \times J_{2r}[(2p-1)2\pi Hk_0] \delta(f-2rf_0) \quad (14)$$

分析式(14)表明, 其频谱成份只有 f_0 的两倍频。根据计算, $r > 3, P > 1$ 的谱值已可忽略不计, 且 g, v_v, l, M 愈大, 产生的谱值愈大。

分析式(14)还表明, 当 $l=q/k_0$, 其中 $q=1, 2, 3, \dots$ 时;

$$P(f) = \frac{Mgl^2}{2} v_v \delta(f)。$$

这时线状结构物探测不出来。这与上述例 2 的扫描方式不同, 但不能分辨线状结构物的条件相同。

4. 用 g 个 $l \times l$ 多元探测器, 在 x 方向以 $x' = H \sin \omega t$ 来回摆动扫描, 探测 k 个 $a \times b$ 的矩形物体, 如图 5 所示。

用式(6)及式(9)代入式(3), 并利用文献[6]的公式, 当 $a+l < 2H$ 时, 得:

$$P(f) = \frac{M}{2\pi} \left\{ \left[(a+l) \arcsin \left(\frac{a+l}{2H} \right) \right. \right. \\ \left. \left. - (a-l) \arcsin \left(\frac{a-l}{2H} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + 2H \sqrt{1 - \left(\frac{a+l}{2H} \right)^2} - 2H \sqrt{1 - \left(\frac{a-l}{2H} \right)^2} \right] \right. \\ \times \sum_{\psi=0}^{g-1} \sum_{\xi=0}^{k-1} (-1)^{k+g+\xi+\psi} (\lambda - |W|) \left. \right\} \delta(f) \\ + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{MH}{\pi(4r^2-1)} \\ \times \left\{ {}_2F_1 \left[r - \frac{1}{2}; -\frac{1}{2} - r; \frac{1}{2}; \left(\frac{a-l}{2H} \right)^2 \right] \right. \\ \left. - {}_2F_1 \left[r - \frac{1}{2}; -\frac{1}{2} - r; \frac{1}{2}; \left(\frac{a+l}{2H} \right)^2 \right] \right. \\ \left. \sum_{\psi=0}^{k-1} \sum_{\xi=0}^{g-1} (-1)^{k+g+\psi+\xi} (\lambda - |W|) \right\} \delta(f-2rf_0);$$

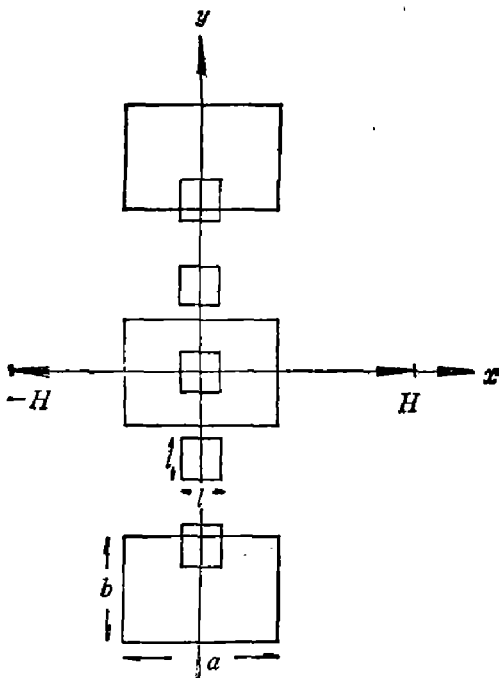


图 5 一维摆动扫描

Fig. 5 One-dimensional swing scanning

式中 ${}_2F_1[a; b; c; x]$ 是超比函数, $\lambda = (2\psi+1)l + (2\xi+1)b, W = (2\psi+1)l - (2\xi+1)b$ 。

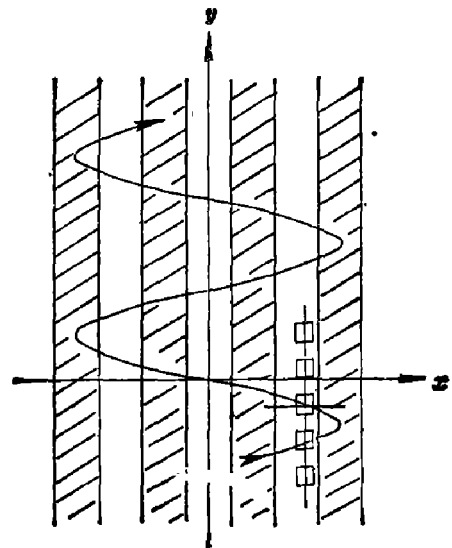


图 4 探测线状区域方法之二
Fig. 4 The second method for detecting linear section

根据分析,上式中 $r > 3$ 的谐波成分已可忽略不计。

当 $|l-a| > 2H$ 时, $P(f)$ 值是一常数,这时已探测不出目标。说明,能探测的条件是

$$|l-a| < 2H。$$

四、小 结

空间分辨率的物理意义是指系统在什么条件下能够分辨两个或者几个靠得多近的目标。上述分析指出,在垂直扫描的情况下,能够分辨相距为 a 的两个物体的最基本的条件为 $l < 2a$; 其中 l 是探测器的角直径,或称系统的瞬时视场。例如系统的瞬时视场为 2 mrad, 它只能分辨两条相距大于 1 mrad 的目标。能够分辨周期间隔为 $\omega_0 = \frac{1}{k_0}$ 的无限线状结构物的条件是 $l \neq q/k_0$, 其中 $q = 1, 2, 3, \dots$, 即能分辨的最基本条件为系统的瞬时视场不是线状结构物周期间隔的整数倍,这就可以解析,线状目标其宽度比极限分辨率小很多时也能分辨的道理。

对于要探测的线状结构物,首先是能否探测到,其次是能否分辨线状结构物,再次是能否逼真地显示线状结构物。系统的信噪比达到能探测的标准后,满足上述分析的条件,就能分辨线状结构物,至于要逼真地显示目标,就一定要使用小的瞬时视场,这就必然降低系统的灵敏度,即不失真探测地物目标的代价是降低系统的灵敏度。

由此可见,把系统的瞬时视场称作空间分辨率是不恰当的,认为可分辨的目标不能小于地面分辨率 S 是不符合实际情况的。空间分辨率跟探测器外形,扫描方式,地物外形等均有关系,上述结论是在特定的分析条件获得的。对于多光谱扫描仪,还可利用不同光谱区的目标与背景的不同来分辨。这些问题还有待今后研究。

致谢——作者得到匡定波同志的指导,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Hassell P. G. et al., *NASA-CR-134177*, (1974).
- [2] Wolfe W. L. et al., *The Infrared Handbook* (IRIA Center, 1978), Chapter 19.
- [3] 张孝霖, 光学学报, 1(1981), 2: 181.
- [4] 航天部五院, 国外摄影侦察卫星侦察分辨率水平的分析, 1981 年遥感技术学术报告会论文。
- [5] 尹达人, 许生龙, 光学学报, 8(1983), 6: 573.
- [6] 爱尔台里, A, 高级超越函数(第二册), 张致中译, 上海科技出版社, 1959.

A DISCUSSION ON SPACE RESOLUTION OF IR SCANNER

YIN DAREN

(East China Engineering Institute)

ABSTRACT

The physical meaning of space resolution of IR scanner is discussed. Spectral formulae are given for four scanning modes, and two criteria are defined for detecting rectangular aperture and linear section.