关于红外成象系统最佳采样频率的讨论

杨 应 槐

(天津技术物理研究所)

1. 问题的提出

并扫是红外扫描系统一种重要的扫描方式。如何将同时获取的若干条并行的视频信号,在规定的时间内转换成电视格式的逐次扫描线,就是采用这种扫描体制所涉及到的多路传输技术,即将若干个通道压缩为一个通道的技术。通常是利用电子多路开关或称为时分制多路开关的方法来实现的。在每一次扫描时间内,它顺序地对每个探测器进行采样,并周期地重复这个过程。根据尼奎斯采样定律,对带限的 N 个通道,如果每个通道的最高频率为 f_H,那么,系统的采样频率 f_S 就由下式来确定[1]:

$$f_S \geqslant 2f_H。\tag{1}$$

可以证明,按式(1)确定的采样频率 f_S 进行采样,基本上包含了原信号中的所有信息成分。但是不难看出,式(1)只规定了系统采样频率的下限,而没有给出上限。这是否意味着采样频率 f_S 选择得越高越好呢,显然不是这样。由电子电路的基本知识可知,系统工作频率越高,要求系统的带宽就相应地加宽,这样引进干扰的可能性就增大,反过来又影响了系统的性能。因而,就存在寻求一个最佳采样频率 f_{S0} 的问题。所谓最佳采样频率 f_{S0},就是以这个频率进行采样,使系统的信息量损失最小而可能引进的干扰又最少。假定

$$f_S \leqslant K f_H。\tag{2}$$

式(2)中的 K 是一个待求的常数。将式(1)和式(2)合并,我们用数学语言来表示一个系统的最佳采样频率,即

$$2f_H \leqslant f_{S0} \leqslant K f_H。\tag{3}$$

很明显,求出式(3)中的 K 值,f_{S0} 就确定了。

2. f_{S0} 的确定

在讨论最佳采样频率如何确定之前,有必要简要地说明一下红外成象系统信息频带的问题。对一个给定参数的红外扫描系统,其最高频率为

$$f_H = \omega f_C,\tag{4}$$

这里 ω 是扫描角速度;f_C 是空间截止频率;ω 和 f_C 分别由式(5)和式(6)给出[2]。

$$\omega = \frac{ABF_R}{\beta}。\tag{5}$$

这里 A、B 分别为水平和垂直视场;F_R 是帧频;β 是探测器在垂直方向上的瞬时视场。

$$f_C = \frac{1}{\alpha}。\tag{6}$$

α 是探测器在水平方向上的瞬时视场。将式(5)和式(6)代入式(4),则有

本文1983年8月29日收到。

$$f_H = \frac{ABF_R}{\alpha\beta} = \frac{1}{\tau_d}。 \tag{7}$$

这里 τ_d 是系统的驻留时间。一个成象系统的带宽是[3]

$$\Delta f_i = \frac{\pi}{4}\,\frac{1}{\tau_d}。 \tag{8}$$

因而就有

$$\Delta f_i = \frac{\pi}{4} f_H \cong f_H。 \tag{9}$$

鉴于式(9)的结果，红外成象系统信息通道的带宽可视为一个最高频率为 f_H 的带限系统。也就是说，在系统中超过频率 f_H 的信号迅速下降。引入这个近似带限的概念，无论对系统设计，还是分析，都不会造成很大误差。而在一个实际使用的系统中，为了使其更接近于一个理想的带限系统，往往在采样之前，设置一个锐截止的低通滤波器，以便得到一个较为理想的带限通频带。对这样的系统进行采样可以应用尼奎斯采样定律。

由式(3)可知，系统最佳采样频率 f_{S0} 的下限是根据被采样信号的信息量损失最少的观点而确定的。上限频率的确定，我们设想从得到一个好的象质方面来考虑。评价红外成象系统的象质，最理想是用最小可分辨温差($MRTD$)。假定未受采样影响的系统最小可分辨温差为 $MRTD$，经采样后得到的最小可分辨温差为 $MRTD'$，那么，$MRTD'/MRTD = A(f)$ 之比值就表示对系统象质的影响程度。依据最小可分辨温差 $MRTD$ 和空间频率的关系，可以得到下式[4]：

$$\frac{MRTD'}{MRTD} = A(f) = \left[1 + \left(\frac{H(f_{ss}-f)}{H(f)}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}。 \tag{10}$$

这里 f 和 f_{ss} 分别为空间频率和空间采样频率。$H(f)$ 是不考虑采样影响的系统的总的调制传递函数。$H(f_{ss}-f)$ 是考虑采样影响的系统总的调制传递函数。系统总的调制传递函数 $H(f)$ 和 $H(f_{ss}-f)$ 分别由下列几个分系统的调制传递函数连乘积表示。

光学系统的传递函数

$$OTF = 1 - \frac{f}{f_0}, \tag{11}$$

其中 f_0 是一个理想的矩形口径的衍射限截止频率。

探测器的传递函数

$$H_{DEF} = \frac{\sin \pi f a}{\pi f a}, \tag{12}$$

其中 a 是方形探测器的边长。

信息通道积分器的传递函数

$$H_s(f) = \frac{\sin \pi f v \tau_s}{\pi f v \tau_s}, \tag{13}$$

其中 v 是扫描速度，τ_s 是响应时间。

考虑到采样影响，上述三部分传递函数分别为

$$OTF'(f) = 1 - \frac{f_{ss}-f}{f_0}, \tag{11'}$$

$$H'_{DEF}(f) = \frac{\sin \pi (f_{ss}-f) a}{\pi (f_{ss}-f) a}, \tag{12'}$$

$$H'_s(f) = \frac{\sin \pi (f_{ss}-f) v \tau_s}{\pi (f_{ss}-f) v \tau_s}。 \tag{13'}$$

将式(11)～(13′)分别代入式(10)，简化后得[4]

$$A(f)=\left[1+\left(\frac{f_0-f_{ss}+f}{f_0-f}\right)^2\left(\frac{f}{f_{ss}-f}\right)^4\right]^{1/2}。\tag{14}$$

考虑到这样一个情况，各种不同形式的干扰最后对系统产生的不良影响都可归结为使采样点相位发生变化。这种变化有正与负之别。如果正值表示超前，负值就表示滞后。在我们的讨论中只求其绝对值，这个值变大就意味着得到的温度分布图象的象质被恶化了。超前或滞后对我们的讨论是无关紧要的。因此，将式(14)改写为

$$A(f)=\left[1+\left(\frac{f_{ss}/f-f_0/f-1}{f_0/f-1}\right)^2\left(1-\frac{f_{ss}}{f_{ss}-f}\right)^4\right]^{1/2}。\tag{15}$$

在式(15)中，若f_{ss}取某一值以致$A(f)=1$，则以这样的频率进行采样引进的干扰为最少。很显然，上面结论要成立，唯有式(16)中左边两项连积等于零。根据假设，这样的频率为最佳空间采样频率，以f_{ss0}表示，则有

$$\underbrace{\left(\frac{f_{ss0}/f-f_0/f-1}{f_0/f-1}\right)}_{\mathrm{I}}\underbrace{\left(1-\frac{f_{ss0}}{f_{ss0}-f}\right)}_{\mathrm{II}}=0\tag{16}$$

在式(16)中，不是第I项值为零，就是第II项值为零。一般来说，光学部分不会给系统引进噪声，它有着限制系统性能进一步提高的可能。所以，第I项等于零是可能的。因而就有

$$\frac{f_{ss0}}{f}-\frac{f_0}{f}-1=0。\tag{17}$$

第II项表示探测器和积分器传递特性，这两部分在传递信息过程中分别有引进附加噪声的可能，所以，第II项不可能为零。

根据红外成象系统的特点，可求出f_0/f之比值。进而可求出f_{ss0}和f之间的关系。为了求介f_0/f之比值，以f_c替代f。这样可将式(17)改写为

$$\frac{f_{ss0}}{f_c}-\frac{f_0}{f_c}-1=0。\tag{17′}$$

系统的空间截止频率f_c和空间分辨率有下列关系：

$$f_c=\frac{1}{r},\tag{18}$$

$$r=\frac{a}{F}。\tag{19}$$

这里F是光学系统的有效焦长。对一个确定的光学系统，衍射限决定的探测器最小尺寸为[5]

$$a_{\min}=2.44\,\frac{\lambda}{D_0}F。\tag{20}$$

式中λ是工作波长；D_0是光学系统的通光口径。光学系统的截止频率f_0可表示为

$$f_0=\frac{D_0}{\lambda}。\tag{21}$$

将式(19)和式(20)代入式(18)便得到

$$f_c=\frac{1}{2.44}\left(\frac{D_0}{\lambda}\right)。\tag{22}$$

式(21)和式(22)相除有

$$f_0/f_c=2.44。\tag{23}$$

将式(23)代入式(17′)中，得到

$$\frac{f_{ss0}}{f_o}=3.44。\tag{24}$$

在同一个系统中，空间频率 f_{ss} 和 f 与它们相应的电频率有相同的空间和时间的变换系数，将式(24)两边同乘 ω，则有

$$f_{s0}=3.44f_H。\tag{25}$$

结合式(1)，按照式(3)的形式，就得到矩形口径衍射限光学元件的红外成象系统的最佳采样频率为

$$2f_H\leqslant f_{s0}\leqslant 3.44f_H。\tag{26}$$

多数情况下，光学部分口径是圆的，而探测器是方形的。对圆形通光口径，当精度为 ± 0.01 时时，衍射限的传递函数表达式是[3]

$$H_0(f)=1-1.218\frac{f}{f_0}。\tag{27}$$

同样可得到类似于式(25)的表式：

$$f_{s0}=3f_H \tag{28}$$

综上所述，我们可得到工作在衍射限的光学元件的红外成象系统的最佳采样频率为：

$$2f_H\leqslant f_{s0}\leqslant 3f_H。\tag{29}$$

或用每个驻留时间内采样次数来表示：

$$\frac{2}{\tau_d}\leqslant f_{s0}\leqslant\frac{3}{\tau_d}。\tag{30}$$

参 考 文 献

[1] M· 施瓦茨[美]，柴振明译，信息传输，调制和噪声，1979, 118～119.

[2] 杨应槐，红外与激光技术，2(1982), 5.

[3] 迈克·劳埃德著，*Thermal imaging system*, 1975, 97.

[4] Donalde. Maoohll Jr., *Porc. SPIE* **226**, 1980.

[5] R. D. 小哈得逊，红外系统原理，1975, 109.

DISCUSSION ON OPTIMAL SAMPLE FREQUENCY OF INFRARED IMAGING SYSTEMS

YANG YINGHUAI

(Tianjin Institute of Technical Physics)

ABSTRACT

Through analysis of characteristics of infrared imaging systems, the determination of the optimal sample frequency is discussed. The range of optimal sample frequency is given quantitatively.