

# 红外遥感图象的解卷积处理

陆家昌\* 李正直\*\*

(苏州大学物理系)

**摘要**——本文通过对红外和多光谱扫描物理机理的分析和典型实例计算,证明用快速傅里叶变换解卷积方法处理图象信息,能较好地重现地面目标的真实分布。文中给出采用不同窗函数时计算机处理实例,并对其结果进行了讨论。

## 一、引言

使用红外和多光谱扫描仪获得的图象,能否较好地重现地面目标的真实分布,这是遥感技术当前普遍关心的问题。文献[1]通过计算分析,说明在某些特定的条件下,小于瞬时视场的线度和点目标,仍能被扫描仪所识别。本文将从红外和多光谱扫描的物理机理出发,通过理论分析和计算机模拟计算,表明用频谱分析和计算机解卷积的数据处理,能较好地复原地面目标的真实分布。

## 二、扫描仪对目标的分辨

我们的一维行扫描系统为例进行讨论。设地面有若干个一维排列的目标,其亮度或辐射分布为间距和宽度都是  $t/2$  的矩形脉冲,强度分别为  $B_0$  和  $A_0$ 。还假定各目标有相似的波形,其强度都在扫描仪的可探测范围内,且背景为零。扫描仪瞬时视场是宽为  $L$  的矩形窗。

当扫描仪横向扫过一维排列的若干个不同目标时,假定探测器响应是线性的,探测器输出电信号的时间变化就是瞬时视场和目标辐射分布的卷积。如令瞬时视场为  $f_1(x)$ , 目标分布为  $f_2(x)$ , 则系统的响应函数  $f(x)$  就是

$$f(x) = f_1(x) * f_2(x); \quad (1)$$

其中

$$f_1(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq L/2; \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

---

本文 1984 年 11 月 30 日收到。

本文内容曾在第六届全国红外科学技术交流会上宣读。

\* 现在苏州无线电元件一厂工作。

\*\* 现在杭州大学物理系工作。

$$f_2(x) = \begin{cases} A_0 & |x| \leq t/4 \\ B_0 & 3t/4 \leq |x| \leq 5t/4 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

对一定的扫描系统来说, 瞬时视场是确定和已知的。当地面目标的间隔和宽度不同时, 系统的响应也就不同。

图 1(为便于作图, 各图未按统一比例) 给出  $t$  和  $L$  不同比值时按式 (1)~(3) 计算所得的扫描系统不同的波形响应。其中图(a)和图(b)分别是  $t=4L$  和  $t=2L$ (即目标间隔大于瞬时视场宽度  $L$ ) 时的响应; 由于扫描的时延特性, 波形分布相对于目标的真实分布有所展宽, 使得波形发生畸变。图(c)和图(d)分别是  $t=L$  和  $t=L/2$ (即目标间隔小于  $L$ ) 时的响应, 其波形发生迭加。而且目标间距越小, 响应波形迭加越严重。在这种情况下, 扫描仪难于甚至根本不可能重现地物目标的真实分布, 为此我们提出图象的解卷积处理方法。

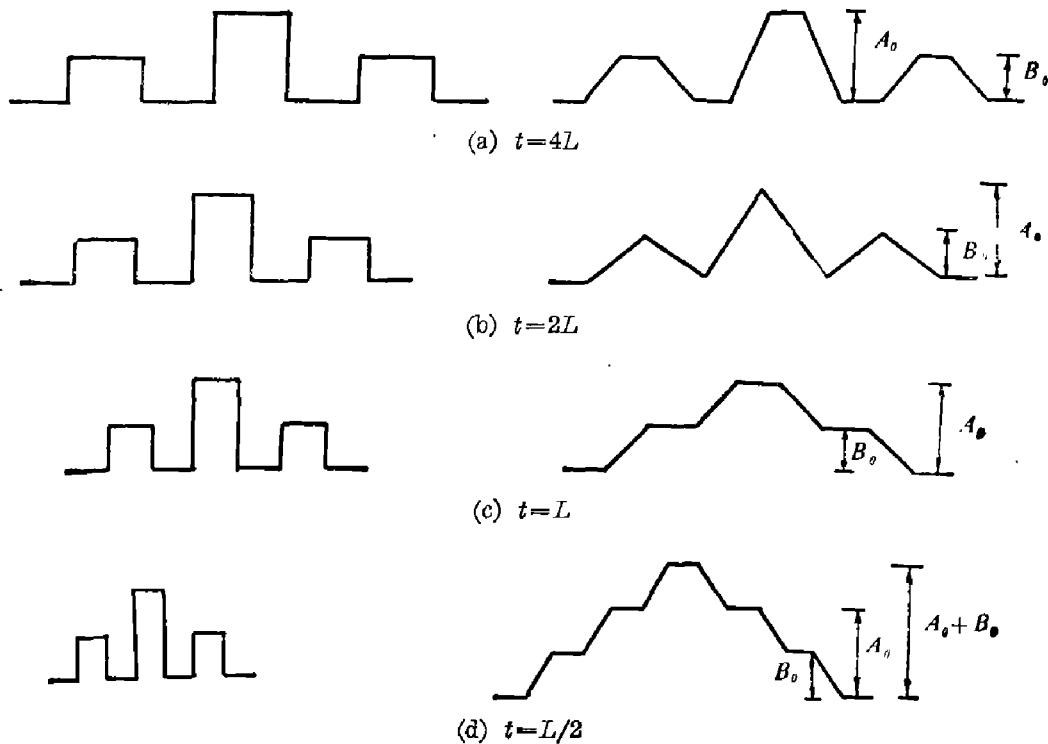


图 1 不同目标的辐射分布(左)及其响应波形(右)

Fig. 1 Radiation distribution of various targets (left) and Correspondent responsive wave shape (right).

### 三、用解卷积法重现目标真实分布

借助频谱信息数据处理技术, 对上述扫描仪的响应波形进行离散化的频谱变换和解卷积运算, 可以消除由于扫描仪扫描过程而产生的波形畸变, 重现地面目标的真实分布。

对式(1)作傅里叶变换, 即得响应函数的频谱为

$$g(f) = F[f(x)] = F[f_1(x) * f_2(x)] = g_1(f) \cdot g_2(f); \quad (4)$$

式中  $g_1(f)$ 、 $g_2(f)$  分别相应于瞬时视场和地面目标分布的频谱。式 (4) 最后的结果基于熟知的卷积定理。

如果扫描仪瞬时视场为  $f_1(x)$ , 可得其频谱  $g_1(f)$ , 如上面所述, 这对于一定的扫描系

统都是已知的。由此可求得地面目标分布的频谱为

$$g_2(f) = g(f)/g_1(f) = F[f(x)]/g_1(f); \quad (5)$$

再经逆傅里叶变换就可得到目标的真实分布  $f_2(x)$ , 即

$$f_2(x) = F^{-1}[g_2(f)] = F^{-1}\{F[f(x)]/g(f)\}. \quad (6)$$

由于实际得到的扫描响应波形大多难以用解析式表示, 且波形宽度也是有限的, 因此一般情况下, 上述解卷积运算只能用数字化方法依靠计算机解决。这里简述离散解卷积的运算要点。

首先将扫描仪得到的响应波形以一定的采样步长  $T$  离散化, 并截取有限长度的  $N$  个数值作为原响应函数的近似

$$\tilde{f}(x) = \sum_{k=0}^{N-1} f(kT)\delta(x-kT); \quad (7)$$

与式 (4)~(6) 相应的离散运算公式可给出为:

响应波形的离散频谱

$$g\left(\frac{n}{NT}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} f(kT)e^{-j2\pi nk/N} \quad (n=0, 1, \dots, N-1); \quad (8)$$

目标辐射分布的离散频谱

$$g_2\left(\frac{n}{NT}\right) = g\left(\frac{n}{NT}\right) / g_1\left(\frac{n}{NT}\right) \quad (n=0, 1, \dots, N-1); \quad (9)$$

式中  $g_1\left(\frac{n}{NT}\right)$  是瞬时视场频谱的离散值。

重现的目标真实分布的离散谱

$$f_2(kT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g_2\left(\frac{n}{NT}\right) e^{j2\pi nk/N} \quad (k=0, 1, \dots, N-1). \quad (10)$$

整个运算过程采用快速傅里叶变换方法(FFT)。值得注意的是, 解卷积运算过程要经过两次离散傅里叶变换, 因此在将响应波形截断数字化处理中, 步长  $T$  的选取必须兼顾到频域的采样间隔。其次, 由于时域截断等效于一个  $\text{sinc}(f)$  型函数和原频率函数单个脉冲的卷积,  $\text{sinc}(f)$  函数旁瓣的影响将在频域造成附加的频率成份, 加上解卷积用频谱离散值相除, 可能出现小数相除的情况(这在高频部分尤其重要), 使高频收敛性进一步变差。这将给最终结果带来很大的误差, 甚至根本不能重现目标的真实分布。为了解决这一问题, 在运算过程中除了要取尽量大的  $N$  和适当的步长  $T$  外, 还必须取合适的窗函数。

#### 四、计算机计算的考虑和窗函数的形式

为进一步证明解卷积方法对重现地面目标真实分布的有效性, 我们给出计算机模拟处理的实例。

设扫描仪瞬时视场是长为 2 单位的矩形窗口; 地面有一维排列的波形分布相近的六个目标, 其间隔和宽度都是 1/2 单位, 辐射强度分别为 2 单位和 1 单位, 背景辐射为零。当扫描仪沿目标排列方向作行扫描时, 将有两个甚至更多的目标同时进入瞬时视场, 这时遥感系统得到的响应波形是各目标相互迭加的连续分布(见图 2)。显然, 单从这波形本身并不能分辨出不同目标的实际分布。

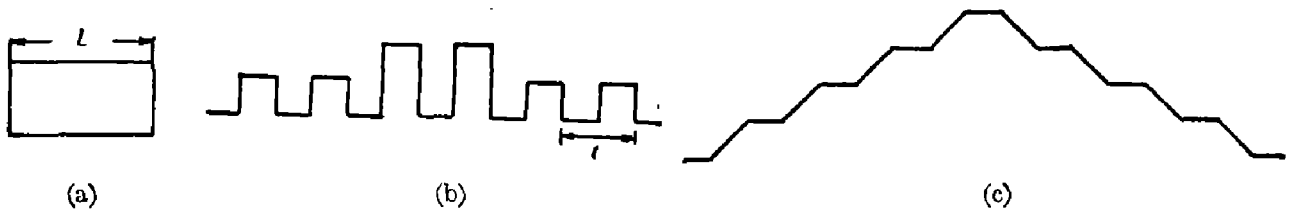


图2 (a) 瞬时视场 (b) 目标辐射分布 (c) 响应波形  
 Fig. 2 (a) Instantaneous field of view (b) Radiation distribution of targets (c) Responsive wave shape

将图2的响应波形截断和数字化。我们取总步长  $N=256 \times 2$ ，采样间隔  $T=0.0625$ 。时域总长度为32单位，而频域采样间隔为  $\frac{1}{NT}=0.03125$ 。实际计算表明，这样的选取对时域和频域离散变换兼顾得较好。此外尚需说明，由于扫描的响应波形和地面的反射或辐射分布都是光的强度分布，是实的，所以解卷积的结果也应得到实的离散谱。这时如果对截断和离散化的响应波形作偶延拓，将使离散傅里叶计算变得更为简捷，结果精度也好。在图2的示例中，由于假定的目标分布和所得的响应波形都已有了偶函数的形式，所以就无需再作这样的延拓。

按式(7)~式(10)，由计算机用快速傅里叶变换程序对上述响应波形作解卷积处理，最后得到的再现目标分布如图3。



图3 不用窗函数时用解卷积处理重现的目标分布  
 Fig. 3 Radiation distribution of targets retrieved by deconvolution processing without using window function

这时各不同目标的分布波形不再交迭，整个分布形式与地面分布较接近。但由于高频部分的影响，波形存在较为严重的吉布斯振荡和漏谱现象。计算机计算表明，在严重的情况下，整个谱的平均泄漏将达到目标强度的1/3左右，重要波形分布的精度较差，信噪比低，使目标(尤其是强度较小的目标)分辨变得困难。为此必须选用合适的窗函数加以修正。

在快速傅里叶变换(FFT)波谱分析和解卷积运算中，由于截断即是对离散或连续信号的有限个数据点( $N$ 个)取样计算，这就引进了误差，这个误差不受计算精度或取舍方式的影响。为了修正数据处理过程中引进的误差，我们采用了窗函数，相当于波谱分析中在时域或频域的滤波，或者对信号进行切趾和平滑化等。在解卷积重现目标分布的运算过程中，引入的误差主要是频域的高频泄漏和频谱离散值相除导致的高频收敛性变差甚至发散，因此我们的窗函数修正都在频域进行。

图4给出红外遥感图象解卷积处理中在频域用三种不同的窗函数修正后重现的目标分布，其中图4(a)是用海宁(Hanning)函数，其解析表达式为

$$W(f) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi f}{T_c}; \quad (11)$$

式中  $T_c$  是频域总长度。海宁函数的傅里叶变换为

$$W(t) = \frac{1}{2} Q(t) + \frac{1}{4} \left[ Q\left(t + \frac{1}{T_c}\right) + Q\left(t - \frac{1}{T_c}\right) \right]; \quad (12)$$

这里

$$Q(t) = \frac{\sin(\pi T_c t)}{\pi t} \quad (13)$$

海宁函数有很小的旁瓣，且能对矩形窗起较好的光滑和高频切趾作用，形式也较简单。由图4(a)可知，使用海宁函数修正后，波形的振荡和泄漏得到明显抑制，除各目标边缘稍有畸变和展宽外，其余各处精度较好，整个重现波形与目标的真实分布符合较好，各目标的正确分辨已毫不困难。

图4(b)是用布赖柯曼(Blackman)函数<sup>[2]</sup>：

$$W(f) = 0.42 + 0.5 \cos \frac{2\pi f}{T_c} + 0.08 \cos \frac{4\pi f}{T_c} \quad (0 \leq f \leq T_c); \quad (14)$$

式中 $T_c$ 含义同上。这种函数的形式较为复杂，运算量也大，但对波形分析能作更好的误差修正。从图4(b)波形分布看，其精度显然要比图4(a)好。

图4(c)用的是泊真(Parzen)函数<sup>[5]</sup>：

$$W(f) = \begin{cases} 1 - 6\left(\frac{2\pi f}{T_c}\right)^2 + 6\left(\frac{2\pi f}{T_c}\right)^3 & \left(f \leq \frac{T_c}{2}\right), \\ 2\left(1 - \frac{2\pi f}{T_c}\right)^2 & \left(\frac{T_c}{2} < f \leq T_c\right). \end{cases} \quad (15)$$

泊真函数的傅里叶变换第一旁瓣与主瓣的面积比为0.00202，其频域的高频切趾效果也更好，能进一步抑制泄漏现象。但这种函数形式更为复杂，修正运算也更繁，从图4(c)还可看出其修正后得到的波形分布的分辨率也差些。

图5是我们在频域同时用海宁函数和布赖柯曼函数修正后得到的目标分布波形，与图4相比，象质得到进一步改善，各目标强度分布边缘转角处的振荡也大为减弱。



图5 同时用海宁和布赖柯曼函数修正后的目标分布，  
Fig. 5 Radiation distribution of targets corrected by Hanning and Blackman functions

窗函数的选择或设计应该根据遥感扫描系统的不同特性和要求，从目标分布及重现波形的分布精度，分辨率等多方面考虑。如对再现目标分布的精度要求不十分高，又考虑到运算的简单方便，那么选取海宁窗口是较为理想的。

## 五、结 论

1. 利用FFT频谱分析和解卷积方法，能够消除扫描响应的波形重迭，能由系统的响应

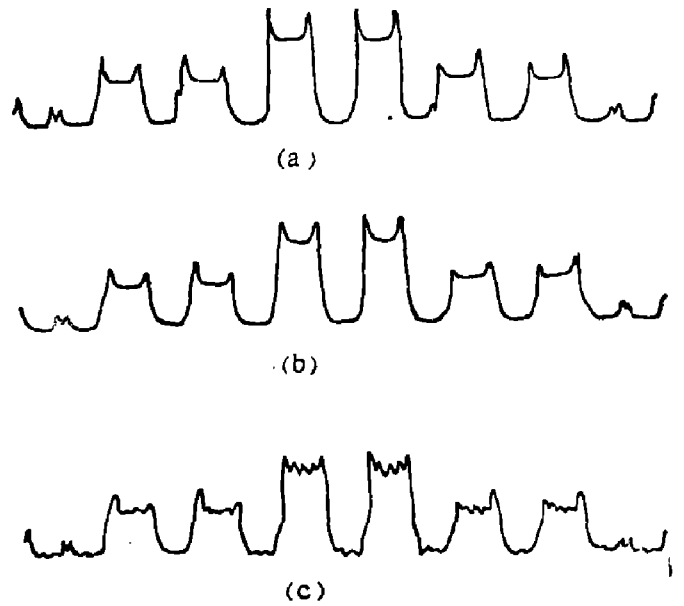


图4 使用不同窗函数时用解卷积方法重现的目标分布 (a) 海宁函数 (b) 布赖柯曼函数 (c) 泊真函数

Fig. 4 Radiation distribution of targets retrieved by deconvolution processing using (a) Hanning (b) Blackman (c) Parzen window functions.

直接再现地面目标的真实分布。

2. 上述运算,可由频谱信息处理技术,用FFT方法快速求解。为提高结果精度,必须选取尽可能大的 $N$ 和适当的 $T$ ;兼顾到时域和频域的采样间隔都不是很大的,同时要选择或设计适当的窗函数进行波形修正。

### 参 考 文 献

- [1] 张孝霖,光学学报,1(1981),2:181.
- [2] A. V. 奥本海姆, R. W. 谢费,数字信号处理,科学出版社,1980,177.
- [3] Otnes R. and Enochson L., *Digital Time Series Analysis*, Wiley, New York, 1972, 258.

## DECONVOLUTION PROCESSING OF IMAGE IN INFRARED REMOTE SENSING

LU JIACHANG, LI ZHENGZHI  
(*Department of Physics, Suzhou University*)

### ABSTRACT

It is shown that in infrared remote sensing the radiation distribution of ground targets can be well retrieved by the FFT deconvolution techniques. The computer-calculated results with various window functions are given and discussed.