

# 基于宽带毫米波工作体制的雷达 目标识别方法探讨

何松华 郭桂蓉

(国防科技大学电子技术系, 湖南, 长沙, 410073)

**摘要:** 对基于宽带毫米波工作体制的雷达目标特征获取和识别方法进行了综合分析和探讨. 表明: 在毫米波照射下, 雷达目标可模型化为由多个散射中心组成的扩展目标; 只要发射信号有足够的带宽, 就可以从回波信号中获得各散射中心的空间分布、类型等特征; 仿真结果说明, 这种方法对高频区复杂目标的识别是有效的.

**关键词:** 毫米波, 雷达目标识别, 极化, 距离分辨率.

## 引言

雷达目标识别是当今高技术领域的一个重要发展方向, 过去的研究工作主要是以低频区目标极点为背景, 对高频区目标识别的报道尚不多见. 随着毫米波传播特性研究的成熟及毫米波高功率器件的发展, 毫米波技术正在精确末制导等领域获得应用, 为此, 需要对强地物杂波背景中的目标进行自动识别. 毫米波的波长落在目标高频区, 照射目标时, 目标散射场可模型化为多个散射中心的合成, 散射中心反映了目标的边缘、尖端等表面物理结构特性. 本文以目标多散射中心模型为基础, 探讨了目标的多频响应及调频连续波响应获得目标距离像的方法, 距离像的极化处理以及基于距离像的模式识别方法, 这些方法对解决毫米波雷达及武器系统的目标识别具有理论意义和实际价值.

## 1 目标多频响应散射中心信息的获取

通过高频多频雷达的回波幅相可以获得目标多散射中心的分布及类型特征. 设入射波为一线极化平面波, 其入射场为

$$E_i = E_0 \cdot e^{-jkz}, \quad (1)$$

式(1)中略去时间因子  $e^{j\omega t}$  (下同), 波数  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长. 经线极化天线接收的后向散射场为<sup>[1]</sup>

$$E(k, z) = \left( \frac{e^{jkz}}{z} \right) \cdot \sum_{n=1}^N A_n(k) \cdot e^{j2kD_n}, \quad (2)$$

式(2)中,  $N$  为散射中心数目,  $D_n$  为以  $z$  为参考点的各散射中心距离差. 当  $k$  变化较小时, 目标在高频区的频率响应可近似为<sup>[2]</sup>

$$A_n(k) = A_n \cdot e^{r_n k} \cdot e^{j\theta_n}, \quad (3)$$

式(3)中,  $r_n$ 、 $\theta_n$  为类型特征, 它与散射中心的类型(如尖端散射、棱角绕射等)有关. 对于固定的  $z$  值, 可略去与  $z$  值有关的因子得:

$$E(k) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{j\theta_n} \cdot e^{(r_n + jd_n)k}, \quad (4)$$

式(4)中,  $d_n = 2D_n$ ,  $\xi_n = r_n + jd_n$  称为空间频率. 对式(4)中  $k$  值进行采样, 即令  $k_i = k_0 + i \cdot \Delta k$ , 则有

$$E_i = \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{j\theta_n} \cdot e^{\xi_n k_n} e^{\xi_n i \Delta k}, \quad (5)$$

式(5)可用 Prony 方法求解<sup>[3]</sup>, 于是可得  $D_n$  及  $r_n$ 、 $\theta_n$  值, 但 Prony 法的缺点是抗噪声能力差, 比较实用的方法是通过作  $E_0, E_1, \dots, E_M$  序列作 FFT 处理, 然后根据 FFT 谱峰位置求出空间分布特征  $D_n$ , 因此, 式(5)又可写成:

$$E_i = \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{j(\theta_n + d_n k_0)} e^{r_n(k_0 + i \Delta k)} e^{j d_n \Delta k i}; \quad (6)$$

当  $k$  在小范围内变化时,  $e^{r_n(k_0 + i \Delta k)}$  可认为是常量, 因此式(6)可视为  $N$  个频率为  $d_n \Delta k$  的复正弦波之和. 根据奈奎斯特采样定理, 频域采样间隔  $\Delta k$  应满足:

$$\Delta k \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{|D_n|_{\max}} \leq \frac{\pi}{L}, \quad (7)$$

式(7)中,  $L$  为目标尺寸. 可以推算出 FFT 的谱分辨率(即谱线之间对应的距离差)为

$$\Delta = C / (2M \cdot \Delta f) = C / (2\Delta f), \quad (8)$$

式(8)中,  $\Delta f$  为  $\Delta k$  对应的频差,  $C$  为光速,  $\Delta f$  为多频信号总频宽.

FFT 谱反映了目标多散射中心在雷达径向距离轴上的投影分布, 称为目标的距离像(Range Profile).

## 2 调频连续波响应散射中心信息的获取

宽带线性调频连续波也是能激励出多散射中心距离分布信息的常用发射波形. 设调制周期为  $T_p$ , 扫频宽度为  $\Delta f$ ,  $t_m$  为以第  $m$  次扫频时间为起点的变量, 则该扫频调制周期的发射信号为

$$e_i(m, t_m) = A \cdot \cos \left[ 2\pi \left( f_0 + \frac{\Delta f}{2T_p} \cdot t_m \right) \cdot t_m + \varphi_m \right], \quad (9)$$

设接收机第一级混频本振信号与发射信号同步, 为同样参数的线性调频连续波; 又设第  $n$  个散射中心的雷达径向距离为  $R_n$ , 则解调后的目标信号为

$$x(m, t_m) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot \cos(2\pi \cdot f_n \cdot t + \theta_{mn}), \quad (10)$$

$$f_n = (\Delta F / T_p) \cdot (2R_n / C) - f_{01}, \quad (11)$$

式 (11) 中,  $f_{01}$  为多级混频产生的频率迁移 (将信号变成基带信号). 对式 (10) 所示信号采样后作 FFT 谱分析, 根据谱峰位置可求出各  $R_n$  的估计值. 设采样率为  $f_s$ , 采样点数为  $M = f_s \cdot T_p$ , 则 FFT 所能实现的距离分辨率为

$$\Delta = \left( \frac{f_s}{M} \right) \cdot \left( \frac{T_p}{\Delta F} \cdot \frac{C}{2} \right) = \frac{C}{2\Delta F}, \quad (12)$$

由式 (12) 和式 (8) 可见, 它们是完全一致的. 毫米波段的优点是可用的带宽  $\Delta F$  较宽,  $\Delta F$  越大, 散射中心的空间分辨率就越高, 因而能判定目标的精密结构.

### 3 目标距离像的极化处理方法

在高分辨率情况下, 目标占据多个距离单元, 因此不能用点目标的概念描述目标的极化特性. 通过目标的一维距离像可以将目标的多个强散射中心孤立在不同的分辨单元内, 每个强散射中心都可以给出一个极化散射矩阵, 它经过变形、分解和模式匹配, 可以获得表征散射中心类型的基本特征矩阵; 综合多散射中心信息, 可以获得目标物体总体结构上的特征, 常见散射体的散射矩阵  $S$  满足互反对称性, 即

$$S = R(\psi) \cdot T(\tau_m) \cdot S_d \cdot T(\tau_m) \cdot R(-\psi), \quad (13)$$

$$S_d = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$T(\tau_m) = \begin{bmatrix} \cos\tau_m & -j\sin\tau_m \\ -j\sin\tau_m & \cos\tau_m \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix}; \quad (16)$$

对三面体反射,  $a_1 = a_2 = 1$ ; 对双平面反射,  $a_1 = 1, a_2 = -1$ , 对于边缘衍射,  $a_1 = D_s, a_2 = D_h$ ; 对锥尖的散射,  $a_1 = jD_1, a_2 = D_2$ ; 等等. 由于传播效应、测量误差及杂波噪声的影响,  $S$  矩阵的互反对称性一般被破坏, 设实际测量到的某散射中心的极化散射矩阵为

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

为满足互反性, 将  $\hat{S}$  矩阵人为修正为

$$\hat{S}' = \begin{bmatrix} C_1 & \frac{1}{2}(C_2 + C_3) \\ \frac{1}{2}(C_2 + C_3) & C_4 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

由于对称性同样受破坏,  $\hat{S}'$  一般不能按式 (13) 分解. 对于多次反射、边缘绕射、尖端散射等基本散射中心, 有  $\tau_m = 0$ , 可以选择未知数  $a_1, a_2$  及  $\psi$  值, 使  $S$  与  $\hat{S}'$  的匹配误差最小; 然后根据求得的  $\psi$  值判断散射体的姿态, 根据求得的矢量  $(\hat{a}_1, \hat{a}_2)$  与各个基本散射体的特征矢量  $(\hat{a}_1, \hat{a}_2)$  进行匹配, 即:

$$\cos\theta = \left| \frac{a_1 \hat{a}_1 + a_2 \hat{a}_2}{\sqrt{(a_1^2 + a_2^2)(\hat{a}_1^2 + \hat{a}_2^2)}} \right|, \quad \left( 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (19)$$

式 (19) 中  $\theta$  越小, 则未知散射体与基本散射体的匹配程度就越好. 经计算机仿真表明: 对于分布在  $3 \times 3\text{m}^2$  正方形四角的四个基本散射体三面体、双平面、边缘及尖端 ( $D_s = 0.5, D_h = 1.5, D_l = 0.286, D_2 = -1$ ), 当距离分辨率  $\Delta = 0.3\text{m}$  时, 通过四组极化态 (HH, HV, VH, VV) 下距离像求得的极化散射矩阵与已知基本散射体散射矩阵进行匹配 (元素差的平方和取最小), 得到了正确的匹配结果.

#### 4 基于目标距离像的模式识别方法

FFT 输出的幅度谱反映了目标物体各散射中心在雷达径向距离轴上的投影分布, 被称为目标的一维距离像, 即使它是单个极化通道 (如 HH), 它包含的目标信息也是很丰富的. 图 1 给出了模拟地面目标 (坦克、卡车) 当雷达在目标前上方, 方位角为零, 仰角为  $10^\circ$  时的距离像, 它反映了坦克的炮筒、前沿、炮筒与炮塔连接部、炮塔及后沿等层次结构, 以及卡车的前沿、车头与车箱连接部、后沿等不同结构, 这些结构特性可用于目标的识别.

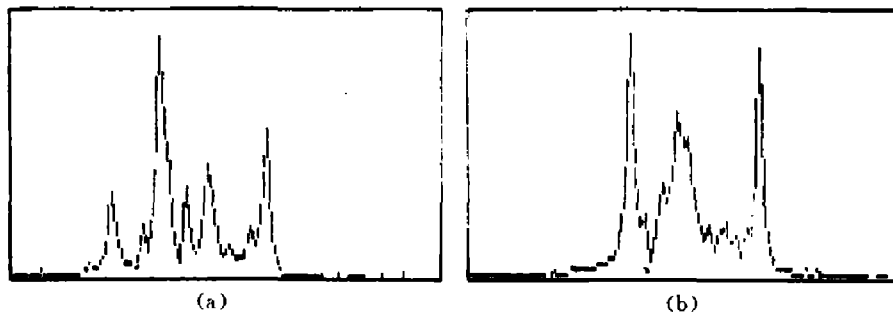


图 1 目标一维距离像 (FFT 幅度谱) (a) 坦克 (b) 卡车 ( $\Delta F = 500\text{MHz}$ )

Fig. 1 1-D range profiles of targets (a) tank (b) truck

当目标姿态角变化时, 目标各散射中心在径向距离轴上的投影位置也发生变化, 因此当姿态角未知情况下距离像的识别是一大难题. 在仿真识别过程中, 我们解决了如下距离

像识别问题: (1) 建立目标模型. 对不同姿态角, 将坦克等四种目标的三维散射中心分布图在雷达径向上进行投影. (2) 建立目标的特征关系模型. 在已知目标距离像上提取了一系列特征, 包括径向长度、谱峰数目、谱峰位置相对于径向中心距离差的平方和、幅度谱的梅林变换等; 并用序贯推理法<sup>[4]</sup>建立了反映特征之间制约关系的分类规则库. (3) 模式分类. 未知目标的距离像特征值与规则库中的每条分类规则的门限按顺序进行匹配检索, 完成目标分类.

仿真结果表明, 对坦克等四种目标, 当仰角  $\beta = 10^\circ$  固定时, 目标方位角从  $0^\circ$  到  $360^\circ$  按  $30^\circ$  间隔采样建模, 则对不知方位角 (任意方位角抽样) 距离像的分类正确率可优于 85%.

## 5 基于宽带毫米波体制目标识别方法的特点

(1) 毫米波由于有近似光学的直线传播特性, 因此目标距离像一般只反映目标镜面 (被照射面) 的结构特性, 它是随姿态角变化而变化的; 获得了目标的精密结构特性, 但它失去了低频雷达目标的总体粗结构特性.

(2) 多散射中心及分布式目标理论是目标识别的基础, 散射中心在高频区目标识别中的意义与低频谐振区雷达目标的极点相似; 对散射中心分布特性、频率响应特性及极化转移特性的分析和研究是目标识别的基础.

(3) 宽带体制提供高的距离分辨率可以对目标的强散射中心进行孤立, 分辨率越高, 则分散在散射中心单元的杂波和噪声功率就越小; 因此高频区目标识别算法具有较强的抗杂波和抗噪声能力.

(4) 特征值随姿态角的变化不是随机变化, 因此, 传统的统计模式识别方法不大适用于复杂目标的分类; 识别过程中需要建立起特征值的动态关系模型, 这种模型比统计模型 (特征均值、协方差矩阵等) 要复杂.

(5) 常规 FFT 谱估计算法可以实现宽带波形所固有的分辨率, 而且处理方法简单易行.

## 6 结语

目标距离像及其极化处理与模式识别方面的研究表明, 毫米波在目标识别中的应用是可行的, 其优点是可以获得高的分辨率; 通过宽带波形获得高的距离分辨率只是其高分辨性能的一个方面; 它在多普勒分辨力及角分辨力方面的潜力将为雷达目标识别的研究开辟更广阔的应用前景.

### 参考文献

- 1 Songung H. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1968,16(1):99
- 2 Hurst MP. *AD-P001105*, 245~257
- 3 Brittingham E.K. *Proc. IEEE*, 1985,68(1):13~19
- 4 何松华, 郭桂蓉. 模式识别与人工智能, 1992,(2):135~140

## AN APPROACH TO RADAR TARGET RECOGNITION BY USING WIDE-BAND MILLIMETER WAVE TECHNOLOGY

He Songhua, Guo Guirong

*(Department of Electronic Technology, Changsha Institute of Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China)*

**Abstract:** A method for feature extraction and target recognition by using wide-band millimeter wave technology is presented. It is shown that radar targets can be described in terms of multiple scattering centers at the operating frequency of millimeter wave. With a modest bandwidth of the transmitted signals, features about spacial distribution, category and polarization of scattering centers can be extracted from the received signals. The method is effective for high-frequency recognition of complex targets.

**Key words:** millimeter wave, radar target, recognition, polarization, range resolution