

基于波形匹配的超宽带雷达目标识别

刘东红¹, 张永顺¹, 刘远亮², 程俊斌²

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 空军雷达学院, 湖北武汉 430010;
3. 南京航空航天大学, 江苏南京 210016)

摘要:在理论上对波形匹配算法进行了详细地推导,对超宽带雷达目标回波进行了特征提取和分类判决,并在计算机上完成了数值仿真。从仿真结果来看,此识别方法效果良好,易于实现。

关键词:目标识别;超宽带雷达;目标回波;散射中心;特征提取

中图分类号: TN915.16; TN974 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2005)04-0016-04

雷达目标识别技术已发展成为雷达领域的一个重要分支,目标识别是研究雷达目标特征信号的最终目的之一^[1]。在精确制导、战场监视、反导反卫等诸多涉及国家安全的军事领域中^[2-5],雷达目标识别是决定武器系统智能化程度的核心技术之一,也是制约武器系统智能化发展的瓶颈问题。

在光学区,复杂目标可以看成是由许多孤立的散射中心点组成的扩展目标,其回波可看成多散射中心点回波的合成。利用超宽带雷达的高分辨力特性,可以获得目标多散射中心点在径向上的投影分布,即目标的高分辨力距离像。因为超宽带雷达发射的单周期 Gaussian 脉冲极窄,目标上各散射中心点的回波信号相互之间耦合影响较小,所以目标的高分辨力距离像比较稳定,使得该回波信号可用于目标识别。从宏观上讲,目标识别过程包含两个主要步骤:①特征提取——从雷达回波数据中提取出对分类识别有用的目标特征信息;②分类判决——对上一步所获取的目标特征信息作适当的处理,完成特征信号和目标参数间的相互关联与判决。文中遵循以上两个主要步骤,用波形匹配法实现了超宽带雷达目标识别,在理论上进行了推导,算法上进行了仿真。

1 目标散射中心提取

由瞬态电磁散射理论^[6]知,复杂目标在超宽带雷达信号照射下,目标的冲击响应有两部分不同波形组成:①早期响应,由目标不连续边界产生的冲击分量;②晚期响应,由目标的感应电流在自然频率点形成的辐射分量。目标的早期响应是发射信号波前与物体相互作用而产生的,反映了物体的局部电磁特性。当入射波在空间全部通过目标后,目标的早期响应也随之结束,晚期响应开始,目标的整体电磁特性表现为与激励无关的谐振频率。这时,每一个散射中心可以看作一“色散信道”,入射波的幅度随时间的增加而逐渐衰减。根据上面物理过程的分析,文献[7]提出了用 Gaussian 脉冲来描述超宽带目标冲击响应的数学模型

$$h(t) = \sum_{i=1}^M A_i \exp[-\alpha_i^2(t-t_i)]^2 \quad (1)$$

式中: $\alpha_i = \frac{2\sqrt{\pi}}{T}$; T 为脉冲宽度; A_i 和 t_i 分别表示幅度和时延; M 是目标散射中心的数量。

用超宽带雷达发射信号照射不同形状的目标,会接收到不同的目标回波,对回波中所含的特征信息进行提取即可完成目标的识别。下面采用式(1)的冲击响应作为超宽带雷达发射信号对正向(其散射点分布如图

收稿日期:2004-09-07

基金项目:“十五”国防预研基金资助项目(413220402)

作者简介:刘东红(1977-)男,河北邢台人,博士生,主要从事防空武器电子对抗、雷达信号处理研究;

张永顺(1961-)男,陕西咸阳人,教授,博士生导师,主要从事防空武器电子对抗、雷达信号处理研究。

1(a)所示)和侧向(其散射点分布如图1(b)所示)飞行的飞机进行照射。

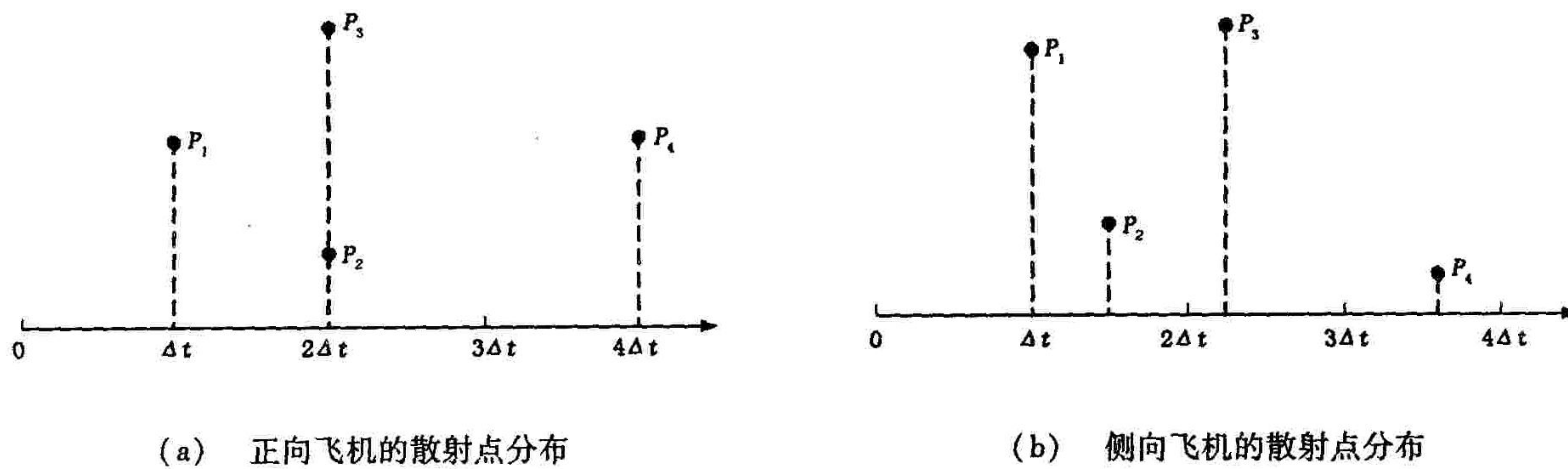


图1 被识别飞机的散射点分布图

图1中的 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 为飞机上的4个散射中心点,它们分别代表机头,两翼和垂尾。假设每个散射点的散射强度相同,则图1中表示的正向、侧向飞机的超宽带雷达目标回波 $F_{R1}(t)$ 、 $F_{R2}(t)$ 分别如图2(a)、图2(b)所示。

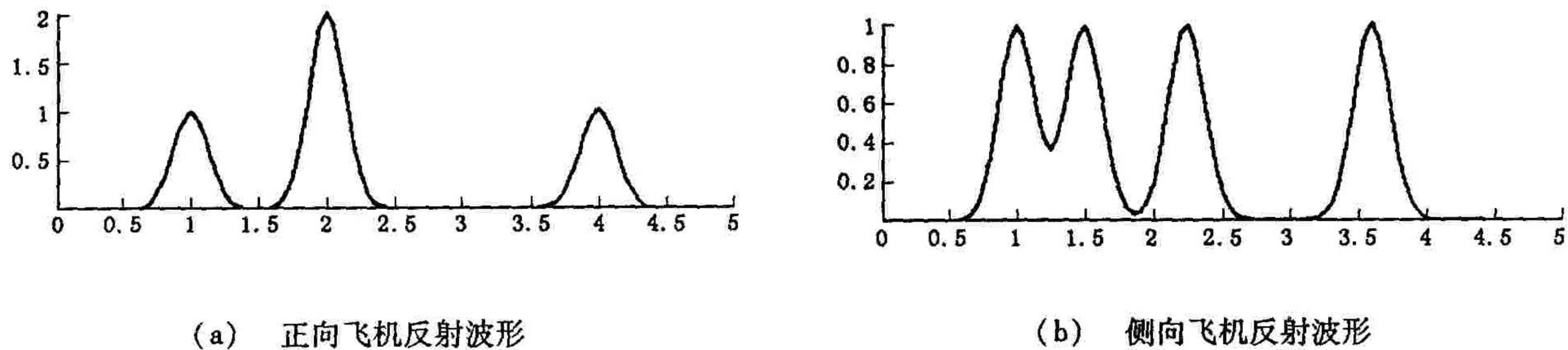


图2 飞机在超宽带雷达照射下的反射波形

2 波形匹配算法推导

由图2可以看到,在超宽带雷达的照射下,对于不同形状或不同姿态飞行的反射体,其反射信号差别很大,因此,可以利用具有不同特征的超宽带回波信号对目标进行识别。首先,将不同形状或不同姿态飞行的目标回波波形存储下来,然后将雷达接收到的信号与存储的波形进行比较,找出形状与之最接近的反射波。这样,就可以有效地识别出感兴趣的目标。

图2中包含目标形状信息的反射信号 $F_{R1}(t)$ 和 $F_{R2}(t)$ 是目标二维空间图像在时域中的投影。可以说,空间中的二维图像转化为时域中的一维图像,必然会造成信息的丢失,正如空间中的一个圆柱体,从不同的方向进行投影,即可能得到一个圆,也可能得到一个矩形。但是通过对同一目标进行连续观察,从不同的方向积累目标的一维信息,然后综合这些一维信息可以有效地恢复出目标的二维形状。

在实际应用中,可以预先存储数百个训练样本 $F_{Tj}(j = 1, 2, \dots, n; 0 < t < T)$,对目标进行识别之时把接收到的回波信号 $F_{Ri}(t)$ 作为测试样本,则积分

$$\frac{1}{T} \int_0^T [F_{Ri}(t) - F_{Tj}(t)]^2 dt = G(i, j) \tag{2}$$

表示 $F_{Ri}(t)$ 与 $F_{Tj}(t)$ 的均方误差。当 $G(i, j)$ 的值最小时,表示在最小均方误差准则下, $F_{Ri}(t)$ 接近于 $F_{Tj}(t)$ 。当 $G(i, j)$ 的值等于零时, $F_{Ri}(t)$ 与 $F_{Tj}(t)$ 完全相同。

将式(2)展开得

$$G(i, j) = \frac{1}{T} \left[\int_0^T F_{Ri}^2(t) dt - 2 \int_0^T F_{Ri}(t) F_{Tj}(t) dt + \int_0^T F_{Tj}^2(t) dt \right] \tag{3}$$

式(3)的第一个积分项表示测试样本的能量,它对于任一训练样本都相同。对目标进行识别的目的是找到使 $G(i, j)$ 达到最小值的训练样本 $F_{Tj}(t)$, $G(i, j)$ 的具体值是多少并不关心,因此,第一个积分项可以省略。则式(3)可变为

$$H(i, j) = \frac{2}{T} \int_0^T F_{Ri}(t) F_{Tj}(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T F_{Tj}^2(t) dt \tag{4}$$

这样,问题变成在最小均方误差准则下,找使 $H(i,j)$ 有最大值的 $F_{Tj}(t)$ 。式(4)中的第二个积分项表示训练样本的能量,由于所存储的训练样本的能量有所不同,所以此项不能省略。但是在存储训练样本之时,可以计算出每一个训练样本的能量,最后把训练样本的能量和其波形一同存储起来,当计算不同的测试样本之时,就可以直接调用其能量值。

为了得到目标的距离,必须准确地测得测试样本 $F_{Ri}(t)$ 的到达时间,鉴于此,在测试样本 $F_{Ri}(t)$ 中引入时间变量 τ ,得到如下表达式

$$H(i,j,\tau) = \frac{2}{T} \int_0^T F_{Ri}(t-\tau) F_{Tj}(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T F_{Tj}^2(t) dt \quad (5)$$

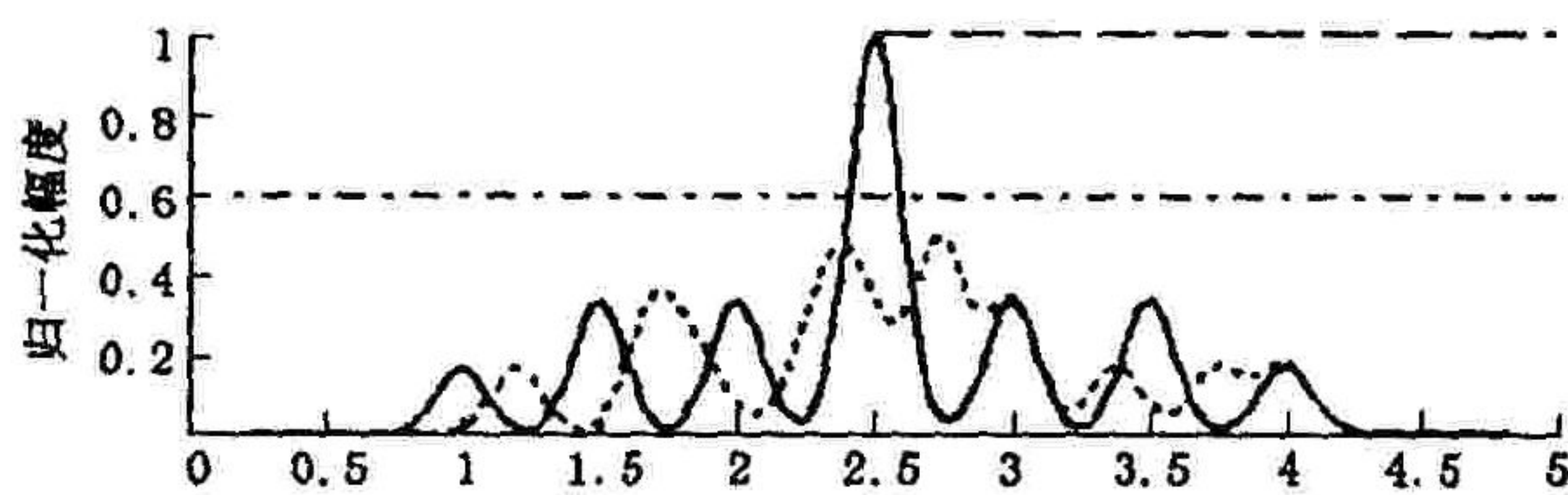
当 $H(i,j,\tau)$ 出现最大值时,即可判决为测试样本。对不同的测试样本, $H(i,j,\tau)$ 的最大峰值各不相同,在实际的雷达系统中直接处理这样的 $H(i,j,\tau)$ 值比较困难,因为,相差较大的 $H(i,j,\tau)$ 最大峰值使得检测门限无法确定。所以,在处理之前先对其进行归一化处理,使它们具有一致的动态范围^[8],定义:

$$H_{peak}(i,j,\tau) = \max(H(i,j,\tau)) \quad (6)$$

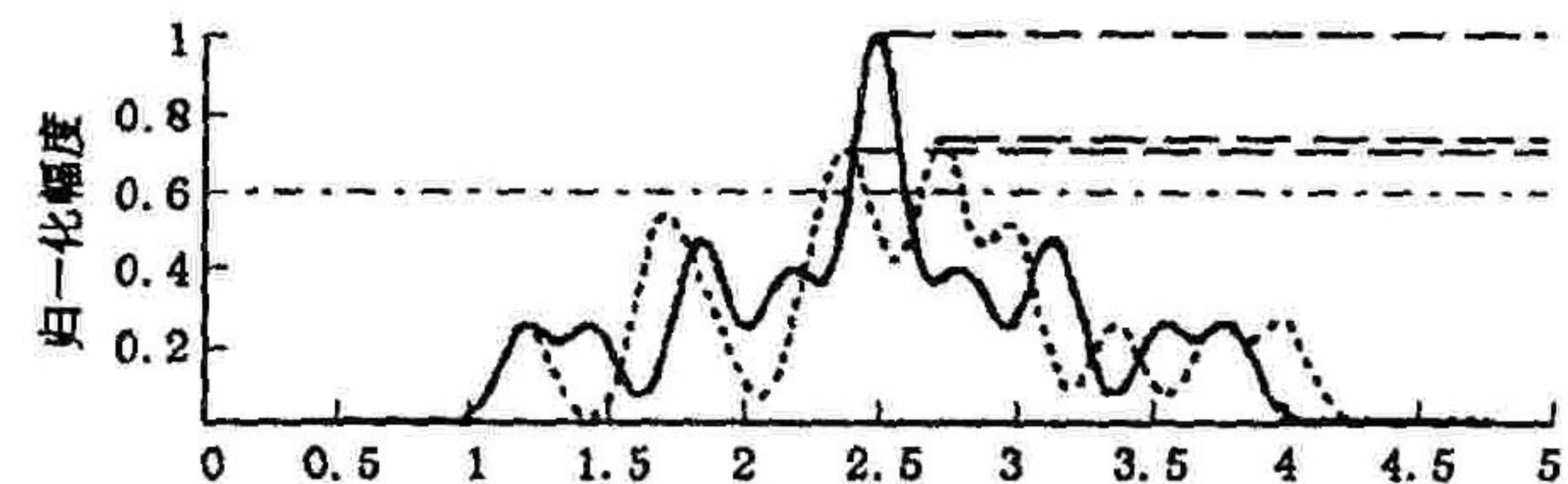
$$H_{max\ peak}(\tau) = \max(H_{peak}(i,j,\tau)) \quad (7)$$

$$H(i,j,\tau) = [H_{peak}(i,j,\tau)/H_{max\ peak}(\tau)] H_{peak}(i,j,\tau) \quad (8)$$

以 $F_{R1}(t)$ 和 $F_{R2}(t)$ 作为两个训练样本 $F_{T1}(t)$ 和 $F_{T2}(t)$,按上述定义,当测试样本为 $F_{R1}(t)$ 时,得到 $H'(1,1,\tau)$ 和 $H'(1,2,\tau)$ 的波形如图 3(a) 所示。从图中可以看出 $H'(1,1,\tau)$ 的最大峰值较大,则认为所观测的目标形状与图 1(a) 所示的形状接近。同理,当测试样本为 $F_{R2}(t)$ 时,得到 $H'(2,1,\tau)$ 和 $H'(2,2,\tau)$ 的波形如图 3(b) 所示。从图中可以看出 $H'(2,2,\tau)$ 的最大峰值较大,则认为所观测的目标形状与图 1(b) 所示的形状接近。



(a) $H'(1,1,\tau)$ 和 $H'(1,2,\tau)$ 波形



(b) $H'(2,1,\tau)$ 和 $H'(2,2,\tau)$ 波形

图 3 匹配波形与峰值电压比较器输出

3 分类判决

为了判决 $H'(1,1,\tau)$ 和 $H'(1,2,\tau)$ 中哪个具有较大的最大峰值,假设图 3(a) 中的信号为电压信号,并引入如图 3(a) 中的点划线所示的一门限电压幅度 $V_{th} = 0.6$ (此门限值可根据检测概率与虚警概率而定)。然后,将超过门限值的信号通过一峰值电压跟随器,跟随器的输出为图 3 中的虚线所示。其输出延迟 $t = \frac{2l_{max}}{c}$ (l_{max} 是存储为训练样本的目标最大尺寸, $c = 3 \times 10^8$ m/s) 后将电压跟随器的输出送入电压比较器,同时将电压跟随器的门限值复位。最后,根据电压比较器的输出判定出与被测目标最为接近的存储在目标库中的训练样本,再根据训练样本识别出被测目标。另外,延迟 t 的选取与被测目标的尺寸有关,例如, F117A 的长度为 20.09 m,则电压跟随器应延迟 130.6 ns;若被测的目标为巡航导弹,则电压跟随器的延迟会相应的缩短。

同理,判决 $H'(2,1,\tau)$ 和 $H'(2,2,\tau)$ 中哪个具有较大的峰值的原理和过程与判决 $H'(1,1,\tau)$ 和 $H'(1,2,\tau)$ 完全相同,仿真后的波形图如图 3(b) 所示。

4 结束语

尽管雷达本身已被证明是对空中目标检测、测距和跟踪最强有力的工具,近年来,雷达目标识别技术在理论上也取得了长足的进展,然而,由于雷达传感器的特殊性、硬件工艺的限制等因素的影响,使得识别可靠

性问题的解决程度离实际应用仍有一些差距,到目前为止,雷达目标识别的工程实现在文献中的报道也极少。另外,雷达目标识别问题是伴随着雷达的产生而产生,也必将随着雷达技术和其它相关技术的飞速发展而逐步地得到解决。随着传感器技术、信号处理技术的飞速发展和新的大规模集成芯片、目标识别算法的不断出现,雷达目标识别技术及其工程实现一定会取得突破性的进展。

参考文献:

- [1] 黄培康. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [2] Liao Xue - jun, Bao Zheng. Radar Target Recognition Based on Parameterized High Resolution Range Profiles[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2000, 14(7): 979 - 986.
- [3] George Linde. Use of Wideband Waveforms for Target Recognition with Surveillance Radars[A]. IEEE International Radar Conference[C]. 2000. 128 - 133.
- [4] Rob Williams, John Westerkamp, Dave Cross, et al. Automatic Target Recognition of Time Critical Moving Target using 1D High Range Resolution Radar[J]. IEEE AES Systems Magazine, 2000, (4): 37 - 41.
- [5] 甄署春, 冯有前, 卜雪妮. 基于距离分类准则的雷达目标识别方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版) 2004, 5(6): 18 - 20.
- [6] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [7] Hussain M G M. Principles of High Resolution Radar Based on Nonsinusoidal Waves Part III: Radar Target Reflectivity Model [J]. IEEE Trans. EMC., 1990, 32(2): 144 - 152.
- [8] 赵惠昌, 刘泽红, 刘宝华. 一种雷达目标形状识别算法研究[J]. 现代雷达, 2000, 22(6): 31 - 33.

(编辑: 田新华)

UWB Radar Target Recognition Based on Waveform Matching

LIU Dong - hong¹, ZHANG Yong - shun¹, LIU Yuan - Jang², CHENG Jun - bin³

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China; 2. The Key Laboratory, Air Force Radar Academy, Wuhan, Hubei 430010, China; 3. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: In theory the waveform matching algorithm is deduced in detail. Then, feature extraction and classified distinguishing are achieved for UWB radar returns, and besides, this algorithm is simulated via computer. The result of simulation shows that this radar target recognition method is good in effect, and simultaneously can be easily realized.

Key words: target recognition; UWB radar; target returns; scattering centers; feature extraction