

· 实践与应用 ·

## 基于 RCS 序列动态特性的弹道目标识别方法 \*

何 帆

(中国电子科技集团公司第二十八研究所 南京 210007)

**摘要:** 通过建立弹道目标雷达散射截面积(RCS)序列的动态特性及识别分类的理论模型,介绍了一种基于RCS序列动态特性的弹道目标识别方法。首先,对RCS采样数据进行滤波除噪,提取进动RCS周期序列;然后,在时频域联合提取序列周期以及均值、变异系数和极差等统计特征;最后,考虑到动态特征反映目标固有特性的能力,应用多属性决策中的层次分析法(AHP)进行信息融合,完成了基于最优线性集成的RCS多特征综合识别。仿真试验表明该方法有效。

**关键词:** 弹道目标识别; 雷达散射截面积; 动态特性; 多特征综合识别

中图分类号: TN953 文献标识码: A 文章编号: 1674-909X(2013)03-0048-07

## Ballistic Missile Target Discrimination Based on RCS Sequence Dynamic Characteristics

He Fu

(The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** The theoretical model of the radar cross section (RCS) sequence dynamic characteristics and discrimination is established. An approach for the ballistic missile target discrimination based on RCS sequence dynamic characteristics is proposed. Firstly, sample data are filtered to obtain the RCS periodic sequence. Then, the RCS periodicity is estimated in the time-frequency domain. Meanwhile, the statistical features, such as the average value, the coefficient of variation and the range are extracted. Finally, considering the ability of RCS dynamic characteristics responding the nature properties, the integrated RCS multi-feature discrimination is realized based on the optimal linear fusion after information fusion based on the analytic hierarchy process (AHP) algorithm of multiple attribute decision making. Simulation results prove that the approach is effective.

**Key words:** ballistic missile target discrimination; radar cross section (RCS); dynamic characteristics; integrated multi-feature fusion

### 1 问题的提出

弹道目标识别是弹道导弹防御的主要技术瓶颈之一。通常根据来袭弹道目标在红外、结构和散射等特性的差异鉴别目标群中的弹头、诱饵或发射碎片等伴飞物。本文针对弹道目标在中段特有的雷达散射截面积(RCS)数据序列,通过建立锥体目标进动RCS数学模型,分析了弹头、诱饵和伴飞碎片的

RCS 动态特性,实现真假弹头识别。

实际上,弹道目标的 RCS 因运动姿态和环境影响而具有一定起伏性<sup>[1]</sup>。在中段飞行过程中,目标姿态相对雷达视线的非均匀变化会引起探测数据变化,静态测量数据无法反映该类时序信息。因此,采用动态测量获得的RCS数据序列进行目标识别。例如,美国导弹防御系统的预警雷达“铺路爪”雷达(PAVE PAWS)具备长时间跟踪目标并测量目标

\* 基金项目:总装“十二五”预研课题资助项目。

收稿日期:2012-08-16

RCS 的能力,为预警系统的弹道目标识别提供 RCS 采样数据<sup>[2]</sup>。

本文识别弹道目标流程如图1所示。首先,对获取的一组 RCS 采样数据进行滤波除噪,提取周期序列;然后,在时频域联合提取序列周期,以及均值、变异系数和极差等统计特征;最后,考虑各类动态特征的识别分类能力,进行基于最优线性集成的多特征综合识别。

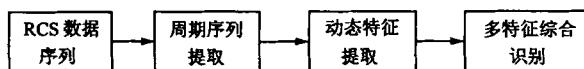


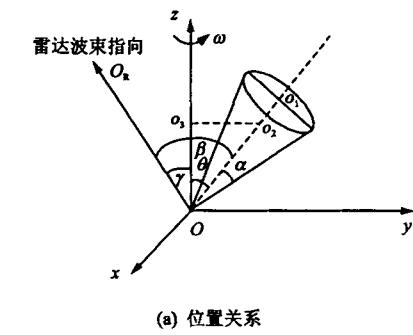
图 1 弹道目标识别流程

## 2 弹道目标 RCS 序列动态特征分析

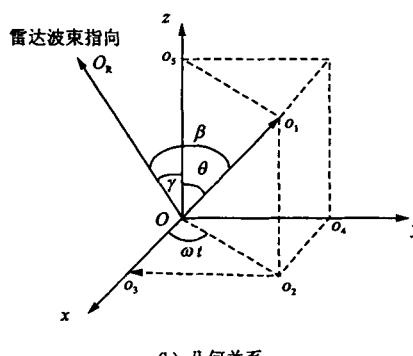
### 2.1 弹头目标进动 RCS 数学建模

弹道目标的中段运动特征是真假弹头识别所依据的主要特征之一,弹头类目标独一无二的进动特征成为识别弹道目标类型的重要特征。进动产生的原因:在弹头与母舱分离过程中,弹头会受到冲击力矩的作用,力矩消失后极轴在平衡位置做固定频率的椭圆锥运动,即进动。

如图2<sup>[2]</sup>所示,锥体目标高为  $h$ ,半锥角为  $\alpha$  ( $0 < \alpha < \pi/2$ ),其侧面散射均匀,绕进动轴  $z$  轴以角速度  $\omega$  进动,进动周期为  $T$ ,进动角为  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq \pi/2$ )。设雷达波束与进动轴夹角为  $\gamma$ ,雷达波束指向  $OO_R$  与锥体目标轴线  $OO_1$  的夹角即为姿态角  $\beta$  ( $0 \leq \beta \leq \pi$ )。



(a) 位置关系



(b) 几何关系

图 2 锥体目标进动与雷达的关系

为便于分析,设锥顶点  $O$  在进动轴上,  $t=0$  时刻锥体轴线位于  $xOz$  平面,则  $t$  时刻锥体轴线矢量  $r_1=OO_1=|OO_1|(\sin\theta\cos\omega t, \sin\theta\sin\omega t, \cos\theta)$ , 雷达波束指向矢量  $r_2=OO_R=|OO_R|(0, -\sin\gamma, \cos\gamma)$ , 以锥体轴线位于  $xOz$  平面内开始计时,姿态角  $\beta$  随时间变化规律为:

$$\beta(t) = \arccos\left(\frac{\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1| |\mathbf{r}_2|}\right) = \arccos(\cos\theta\cos\gamma - \sin\theta\sin\gamma\sin\omega t) \quad (1)$$

锥体弹头 RCS 随时间变化关系为<sup>[3]</sup>:

$$RCS(t) = \begin{cases} \frac{\lambda h \tan\alpha \tan^2(\beta(t) + \alpha)}{8\pi \sin\beta(t)} & \beta \in (0, \pi) \text{ 且 } \beta \neq \pi/2 - \alpha \\ \frac{8\pi h^3 \tan^4 \alpha}{9\lambda \cos^3 \alpha} & \beta = \pi/2 - \alpha \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\lambda$  为雷达波长。

### 2.2 目标 RCS 序列的特征分析

在弹道中段,弹道目标具有高速、进动和摆动等特点,造成目标姿态与雷达视线之间的夹角随时间而变。根据 RCS 与角度之间的变化关系,RCS 数据序列呈现以下特征:

#### 1) 弹 头

弹头具有姿态稳定结构,其动态 RCS 具有规律性。弹头的进动频率一般为几赫兹。由于受进动周期调制,目标的 RCS 数据序列也呈现周期性。由于弹头目标尺寸较小且具有隐身特性,因此其 RCS 均值与弹体、末修舱等尺寸较大目标相比偏小。

#### 2) 诱 饵

诱饵与弹头具有不同内部结构,导致质量分布和微动特征等存在一定差异。诱饵一般无姿态控制机制,其旋转和翻滚可以看作随机运动。表面涂层均匀的球形充气诱饵一般不具备 RCS 动态特性。

#### 3) 发 射 碎 片

发射碎片具有不规则的几何外形和运动方式,在空间呈现自由翻滚。因此,其 RCS 序列变化剧烈,周期特性较不稳定,样本方差、极差和变异系数等统计特征偏大,与弹头类目标存在一定差异。

根据以上分析,RCS 数据序列反映了目标的几何尺寸、形状和微动特性等,因此,可以利用 RCS 对弹道目标进行分类识别。

## 3 基于 RCS 序列动态特性的弹道目标识别方法

### 3.1 RCS 数据建模

根据第 2 章的分析,目标进动引起姿态周期变化。同时,目标沿弹道平动也会形成姿态慢变化,雷

达回波还存在雷达散射截面起伏效应、电磁波传输媒介的非均匀性以及多径效应等。本文以乘性随机噪声过程描述目标RCS序列的随机调制幅度,以加性随机噪声过程来描述各类传播噪声和探测误差。则目标RCS序列可表示为:

$$\begin{aligned} \text{RCS}_m(n) &= \text{RCS}_c(n)L_T(n) + v(n) \\ n &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $n$  为一次采样;  $v$  为数据传输过程中的加性白噪声;  $L_T$  为RCS数据幅度的乘性补偿。对于弹头类目标和锥形重诱饵,  $\text{RCS}_c$  为根据式(2)计算的目标进动RCS序列, 充气球形诱饵的  $\text{RCS}_c$  采用下式计算<sup>[4]</sup>:

$$\text{RCS}_{\text{balloon}} = \pi r^2 \quad (4)$$

其中,  $r$  为气球半径。美国国家导弹防御系统的综合飞行试验(IFT)主要采用直径为 2.2, 1.7 和 0.6 m 的气球作为伴飞诱饵<sup>[5]</sup>。对于伴飞碎片的  $\text{RCS}_c$ , 本文采用正态分布随机数模拟。

### 3.2 周期序列提取

弹道目标RCS序列总的变化可视为在低频变化上迭加了慢变化和高频谐波。目标进动为低频调制, 平动为慢变化, 噪声为高频谐波。利用低频滤波, 可以从目标RCS测量数据中提取出进动RCS序列, 用于识别分类。

式(3)中, 加性高斯白噪声可用低通滤波器滤除; 乘性噪声可用同态滤波器<sup>[6]</sup>处理, 同态滤波器流程如图3所示。



图3 同态滤波器流程

对于RCS数据序列, 首先经过低通滤波器滤除加性噪声; 再对数据序列进行取对数处理, 使式(3)的乘性补偿转换为加性噪声; 然后对信号在频域进行低通滤波, 再转换到时域并进行指数运算, 恢复信号的低频分量。低通滤波器直接对后续动态特征提取的精度产生影响。低通滤波器的频率响应为<sup>[7]</sup>:

$$F_c(\omega) = \begin{cases} 1 & 0 < \omega < \omega_T \\ 0 & \omega_T < \omega \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\omega_T$  为滤波器的截止频率。

### 3.3 动态特征提取

#### 3.3.1 RCS序列周期时频域联合提取算法

RCS序列周期信息反映了弹道目标的微运动周期。通过傅里叶变换获取序列的频率特性, 取峰值处频率可得到数据序列周期。但频谱分析方法要达

到较高的精度需要较长时间观测数据和较高数据率。而弹道目标在中段飞行时, 受多种运动合成的影响, 防御系统的探测资源在较高数据率的要求下难以保证较长观测时间。实际周期估计中, 用得较多的方法是在时域构造周期提取函数, 如自相关函数和平均幅度差函数。但是, 周期提取函数在整数倍周期会出现峰值, 故常导致整数倍的周期提取误差。在序列较短时因求和项较少, 故常导致估计偏差。

为了提高周期提取精度, 本文在RCS数据序列的时频域联合提取周期, 其处理流程如图4所示。

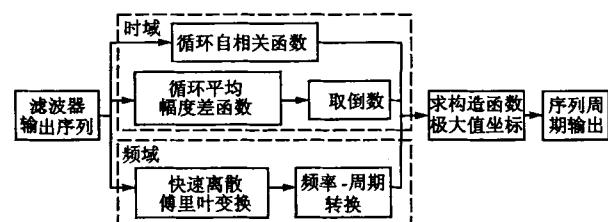


图4 时频域联合提取周期流程

在时域, 采用基于循环自相关函数和循环平均幅度差函数<sup>[7]</sup>, 得到数据序列的时域特性函数:

1) 循环自相关函数:

$$\phi_c(k) = \sum_{n=1}^N \text{RCS}_c(n) \text{RCS}_c(\text{mod}(n+k), N) \quad (6)$$

2) 循环平均幅度差函数:

$$D_c(k) = \sum_{n=1}^N |\text{RCS}_c(\text{mod}(n+k), N) - \text{RCS}_c(n)| \quad (7)$$

其中,  $\text{RCS}_c(n)$  为滤波器输出的周期序列,  $(\text{mod}(n+k), N)$  表明对  $n+k$  进行模为  $N$  的取余操作。

在频域, 采用快速离散傅里叶变换, 得到数据序列的频域特性函数:

$$F_c(\omega) = \text{FFT}(\text{RCS}_c(n)) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

利用数据序列频域和时域间转换关系  $k = 1/\omega$ , 在时域特性函数基础上利用频域函数指示最小周期的峰值, 从而获得较准确的RCS序列周期  $T$ :

$$T = \underset{k}{\operatorname{argmax}} \left( F_c(k) \frac{\phi_c(k)}{D_c(k)} \right) \quad (9)$$

#### 3.3.2 RCS序列样本特征计算方法

1) RCS序列均值

RCS序列均值是反映弹道目标散射能力的度量指标。一般地, 真假弹头目标的RCS均值因散射特性和外形尺寸而存在一定差异, 可作为识别分类特征:

$$\overline{\text{RCS}_T} = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T \text{RCS}_c(n) \quad (10)$$

## 2) RCS 序列变异系数

真假弹头目标运动方式存在的差异导致起伏特性存在较大差别。表面均匀的球形诱饵 RCS 方差很小; 弹头目标飞行过程中进行姿态控制, RCS 起伏较稳定, 样本方差相对较小; 而弹体和发射碎片等目标, 在空间呈现自由翻滚, 其样本方差偏大。实际情况中, 某些尺寸较小的碎片, 其 RCS 方差的绝对值可能较小, 采用变异系数作为分类特征:

$$C_T = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T (RCS_c(k) - \bar{RCS}_T)^2} / \bar{RCS}_T \quad (11)$$

## 3) RCS 序列极差

RCS 序列极差反映了目标在 RCS 序列的统计时间内样本取值起伏的极值, 该特征与目标的运动方式和目标外形尺寸均有关, 具体计算公式如下:

$$R_T = \max_{1 \leq k \leq T} \{ (RCS_c(k)) \} - \min_{1 \leq k \leq T} \{ (RCS_c(k)) \} \quad (12)$$

## 3.4 多特征综合识别

一般而言, 弹道导弹防御方较难获得来袭目标的实测数据和精确特征分布, 只能根据有限的先验信息(如 RCS 范围和弹头进动频率等)进行识别。由于先验信息限制, 许多经典而成熟模式识别方法, 如 Bayes 方法和最近邻法等均无法运用。实践表明, 多特征综合有利于改善识别系统性能。因此, 本文采用信息不完全时的模糊模式识别方法, 并构建目标 RCS 序列的多特征综合识别, 其处理流程如图 5 所示。

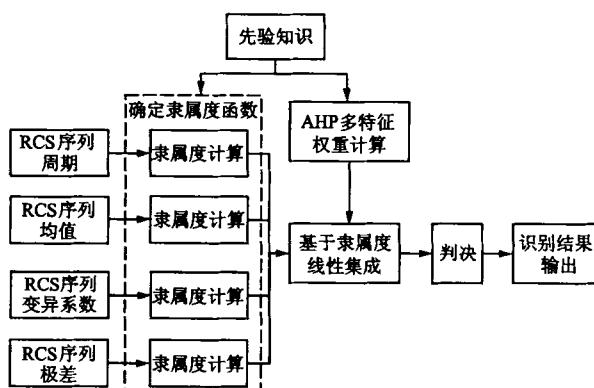


图 5 多特征综合识别流程

## 3.4.1 基于 AHP 的多特征权重计算

层次分析法(AHP)<sup>[8]</sup>是一种定性与定量分析相结合的多属性决策分析方法, 其基本步骤为: 1) 分析系统各因素间关系, 建立系统阶梯层次结构; 2) 对同层次的各元素关于上一层次中某种准则

的重要性进行两两比较, 构造决策矩阵; 3) 由判断矩阵计算被比较元素对于该准则的相对权重, 并进行判断矩阵的一致性检验; 4) 计算各层元素对系统总目标的组合权重, 并进行排序。

## 1) 决策矩阵构造

根据区分目标的作用, 比较任意两个特征对于目标识别的重要性, 并按照表 1 中的标度对重要程度进行赋值, 形成决策矩阵  $A$ :

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (13)$$

其中,  $a_{ij}$  表明特征  $i$  与特征  $j$  对于区分弹头、诱饵和碎片的重要性。矩阵  $A$  具有如下性质:  $\forall i, j \in N$ ,  $a_{ij} > 0$ ,  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ,  $a_{ii} = 1$ 。因此,  $A$  为正互反矩阵。如果  $A$  满足  $a_{ij}a_{jk} = a_{ik}$ ,  $\forall i, j, k$ , 则称  $A$  为完全一致性矩阵。

表 1 重要性标度内涵

重要性标度	两两比较重要性内涵
1	两者同样重要
3	前者比后者稍微重要
5	前者比后者明显重要
7	前者比后者非常重要
9	前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表明相邻判断的中间值

根据常识, 只有弹头和锥形轻、重诱饵才可能具备稳定的进动特征, 并且进动周期取决于目标的内部结构、质量分布和外形, 反映了目标固有特性; 碎片不具有稳定的微动特性; 表面涂层均匀球形充气诱饵的微动特性对传感器探测影响较小。因此, RCS 序列周期对于真假弹头识别的重要性较高。变异系数是相对量, 极差是绝对量, 故变异系数比极差更能反映目标 RCS 序列的波动, 以推测目标是否采取了姿态控制技术。RCS 均值主要取决于目标大小和电磁反射涂层, 在无先验知识情况下, 较难区分隐身技术的弹头和小碎片, 故 RCS 均值对于目标识别的重要性相对较低。根据以上分析, 可得到 RCS 序列均值、变异系数、极差和周期 4 个特征属性的决策矩阵  $A$  如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 & 1/4 \\ 3 & 1 & 5 & 1/3 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 1/7 \\ 4 & 3 & 7 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

## 2) 权重计算

获得决策矩阵  $A$  后, 可求出 4 个特征线性集成时的相对权向量  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ , 并进行一致性检验。本文采用特征根法, 基本步骤如下<sup>[8]</sup>:

- (1) 取与矩阵  $A$  同阶的归一化初始向量  $\bar{w}^0 = (w_1^0, w_2^0, \dots, w_n^0)^T$ ,  $w_i^0 > 0$  且  $\sum_{i=1}^n w_i^0 = 1$ ;
- (2) 计算  $w^{q+1} = A \bar{w}^q$ ,  $q = 0, 1, 2, \dots$ ;
- (3) 归一化  $\bar{w}^{q+1} = w^{q+1} / \sum_{i=1}^n w_i^{q+1}$ ;
- (4) 对于给定精度  $\epsilon > 0$ , 当  $|w_i^{q+1} - \bar{w}_i^q| < \epsilon$  成立时, 则  $w = \bar{w}^{q+1}$ ,  $w$  为矩阵  $A$  最大特征根对应的权重特征向量, 且有:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n (w_i^{q+1} / w_i^q) \quad (15)$$

在获得权重向量后, 需要进行一致性检验。定义一致性指标 CI 为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (16)$$

引入平均随机一致性指标 RI, 该指标通过查表 2<sup>[8]</sup>获得。

表 2 平均随机一致性指标

阶数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

由 CI 和 RI 定义一致性比例 CR 为:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (17)$$

当 CR > 0.1 时, 需对决策矩阵进行适当修正, 以保持一定程度的一致性。

#### 3.4.2 多特征模糊识别

模糊模式识别技术将目标特征量转换成由模糊集及隶属函数表征的合理语言标记, 即把对象  $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$  规划到模糊集  $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$  的某个最相似的类别  $\tilde{A}_i$  中去, 每个特性指标  $x_i$  刻画了对象  $x$  的某个特性。当某一识别算法作用于对象  $x$  时, 将产生一组隶属度  $\tilde{A}_1(x), \tilde{A}_2(x), \dots, \tilde{A}_n(x)$ , 分别表明对象  $x$  隶属于类别  $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$  的程度。建立了模糊模式的隶属函数组后, 则可按某种隶属原则判断出对象  $x$  应归属的类别。

##### 1) 隶属度函数建立

构造以下隶属度函数:

$$\tilde{A}_i(x_p) = e^{-w_p |x_p - T_p^{A_i}| / T_p^{A_i}} \quad (18)$$

其中, 隶属度值表明目标为  $A_i$  的概率;  $x_p$  为 RCS 数据序列的某一个特征值;  $T_p^{A_i}$  为特征类型  $A_i$  在  $p$  特征上的先验阈值;  $w_p$  为特征  $p$  的权重, 由 AHP 得到。则基于  $m$  个特征的目标为  $A_i$  的概率为:

$$P(A_i) = \prod_p \tilde{A}_i(x_p) \quad (19)$$

##### 2) 模糊判决

对于弹道目标群的识别场景而言, 往往无法获得全体模糊集的集合, 而只能获得待识别对象为感兴趣目标的隶属度函数。如在特定战情下, 只可能知道来袭导弹弹头的 RCS 值约为  $0.1 \sim 1 \text{ m}^2$ , 进动周期约为  $1 \sim 10 \text{ Hz}$ 。但对诱饵和发射碎片的特征分布却一无所知, 故无法获得模糊集的全集。隶属度函数表明了待识别对象属于特定类别的可能程度, 而弹道目标识别只关心目标为真(或为假)弹头程度的高低, 因此可以直接采用隶属度值的绝对大小来进行目标真假判断。对弹道目标  $x$ , 获得其为真的隶属度函数  $\tilde{A}(x)$  后, 设定隶属度门限阈值  $d_1$  和  $d_2$ , 可采用以下规则判决<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} \text{如 } \tilde{A}(x) > d_1, \text{ 则 } x \text{ 为真目标} \\ \text{如 } \tilde{A}(x) < d_2, \text{ 则 } x \text{ 为假目标} \\ \text{否则, 拒判} \end{cases} \quad (20)$$

$d_1$  和  $d_2$  可根据需要设定。如要保持较高的识别可信度, 可设  $d_1$  较大,  $d_2$  较小; 如减少拒判次数, 可将  $d_1$  和  $d_2$  的值设为较接近或相等。

## 4 仿真实验

根据均值、变异系数、极差和周期 4 个特征的重要性排序, 采用式(14)作为决策矩阵, 取归一化初始向量  $\bar{w}^0 = (0.15, 0.3, 0.05, 0.5)$ , 利用 AHP 进行多特征权重计算, 结果为:  $w_p = (0.127, 0.270, 0.059, 0.544)$ 。

按式(2)~式(4)建立仿真数据, 对弹头, 取  $\alpha = 25^\circ, \lambda = 3 \text{ cm}, \theta = 30^\circ, \gamma = 30^\circ, \omega = 4 \text{ rad/s}, L = 2 \text{ m}$ ; 对锥形重诱饵, 取  $\omega = 5 \text{ rad/s}$ , 结构参数与真弹头相同; 对球形轻诱饵, 取  $r = 0.6 \text{ m}$ ; 对伴飞碎片, 取  $\mu = 0.5, \sigma = 0.2$  的正态随机分布正值; 采样周期 0.1 s, 接收 RCS 数据的观测窗口为 15 s, 共 150 个点; 式(5)采用 128 点 FFT 变换, 输出 128 点周期序列; 滑动窗口 1 s, 共观测 120 s, 获取 100 组测量数据。对弹头、锥形重诱饵和伴飞碎片原始测量数据的乘性补偿取  $\mu = 1.6, \sigma = 0.3$ ; 对球形轻诱饵原始测量数据的乘性补偿取  $\mu = 1.1, \sigma = 0.1$ 。加性随机白噪声取  $\mu = 0, \sigma = 0.03$ ; 滤波后得到 RCS 数据序列为  $\text{RCS}_c(n)$ , 式(5)中,  $\omega_T = 2 \text{ Hz}$ 。式(19)中, 4 个特征的先验阈值  $T = (0.20, 0.20, 0.10, 1.6)$ 。式(20)中  $d_1 = d_2 = 0.5$  为经验值<sup>[9]</sup>。仿真提取的弹道目标 RCS

周期序列如图 6 所示。对于 RCS 测量数据序列, 均值、变异系数、极差均在 1 个周期内统计, 再求样本

内多个周期的平均值。特征提取结果如图 7 所示, 识别结果如图 8 和表 3 所示。

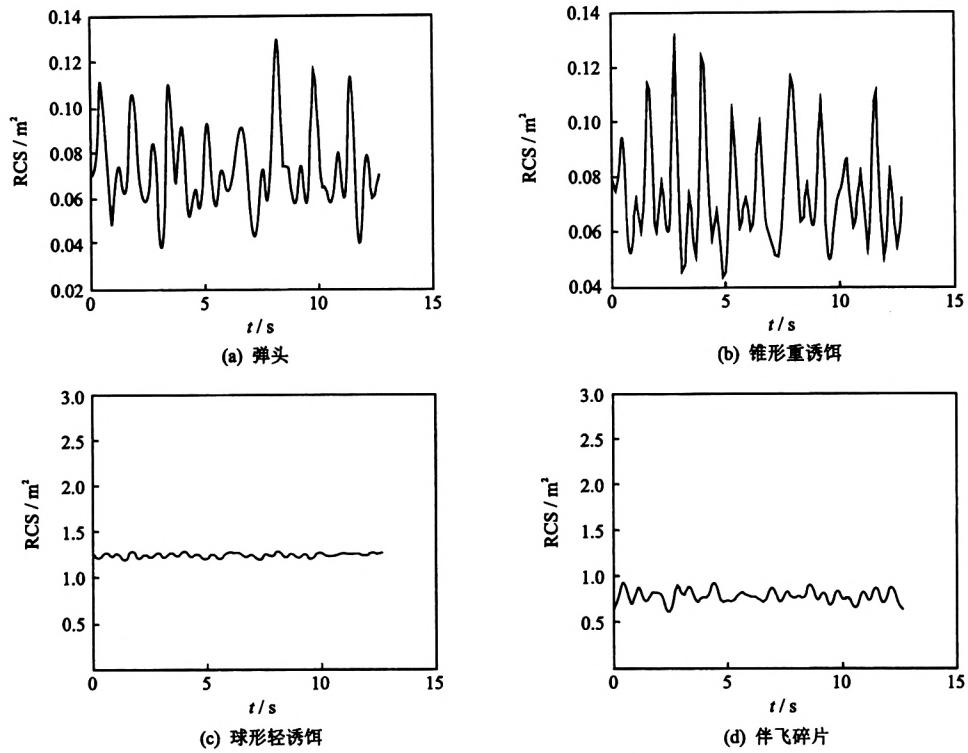


图 6 仿真提取的弹道目标 RCS 周期序列

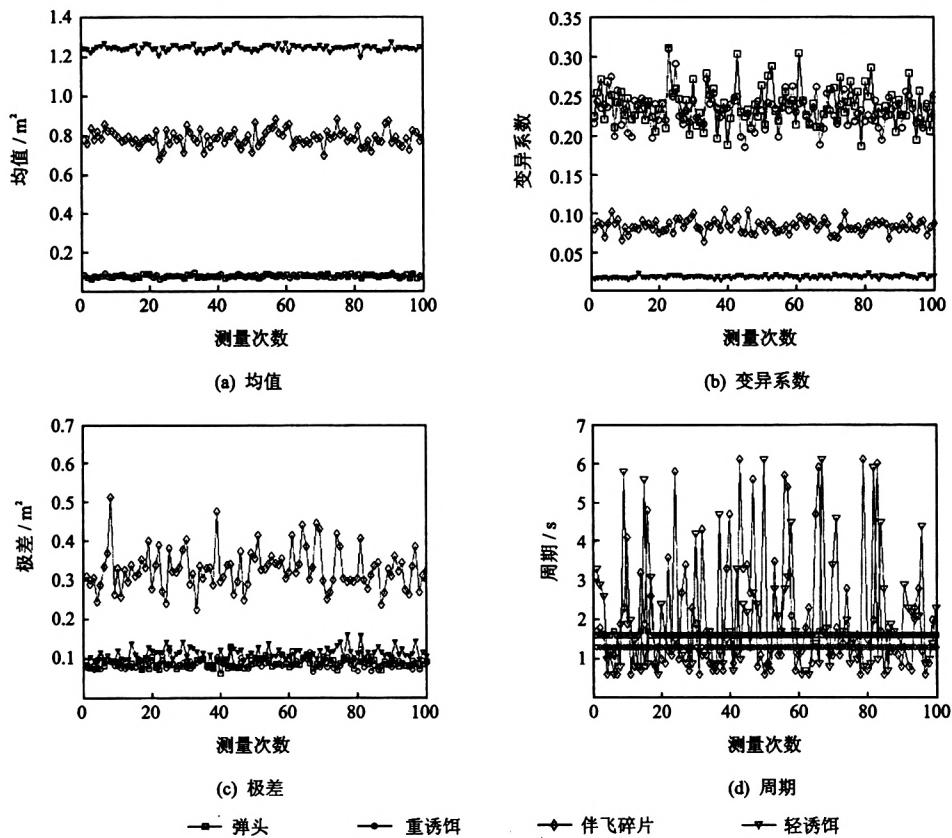


图 7 弹道目标 RCS 动态特征提取结果

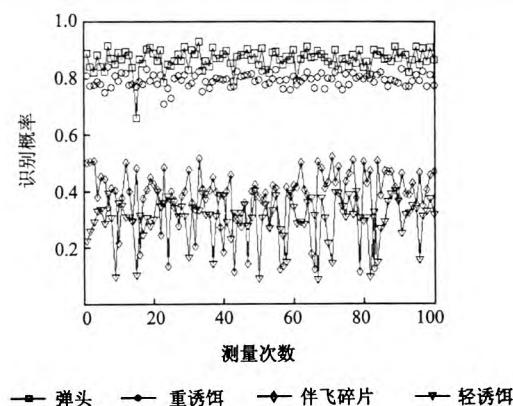


图8 弹道目标识别结果

表3 模糊识别结果 单位:次

结果	弹头	锥形重诱饵	球形轻诱饵	碎片
真目标	100	100	0	11
假目标	0	0	100	89

由图7和表3可见,由于球形轻诱饵和碎片的RCS动态特征与弹头有本质区别,本文算法可以快速剔除,可在中段早期完成目标群初步选择,避免作战资源因大量诱饵和碎片而饱和。重诱饵在散射和微运动特性方面可以做到与弹头一致,由图8可见,两类目标的识别结果有一定差异,可以通过调整式(20)中的门限阈值提高识别准确率。实际作战中,将真目标判断为假目标付出的代价远远大于将假目标判断为真目标的,故将目标认定为假的条件较为苛刻,还需在基于RCS序列识别处理的基础上,融合宽带识别信息进一步区分目标。

## 5 结束语

弹道目标多特征综合识别具有明确物理意义,在识别数据库欠缺的情况下根据先验知识可判断目标类型。另外,采用的特征还应根据其稳定性,可反映真假目标。本文设计了一种基于RCS序列动态特性的弹道目标识别方法,选取目标RCS均值、变异系数、极差和周期4个动态特征。分析结果表明,这

些特征的物理意义清晰,具有较好的可分性测度,可用于目标识别。在提取方法和分类识别算法上,复杂度与序列长度基本满足线性关系,具有识别实时性。仿真试验证明该方法有效可行。

## 参考文献(References):

- [1] 马浩,林学,成伟明.面向雷达模拟操作训练的雷达回波仿真[J].指挥信息系统与技术,2011,2(3):66-71.  
Ma Hao,Lin Xue,Cheng Weiming. Radar echo signal simulation for radar operation training[J]. Command Information System and Technology,2011,2(3):66-71. (in Chinese)
- [2] 周万幸.弹道导弹雷达目标识别技术[M].北京:电子工业出版社,2011.
- [3] 陈行勇,黎湘,郭桂蓉,等.微进动弹道导弹目标雷达特征提取[J].电子与信息学报,2006,28(4):643-646.  
Chen Hangyong,Li Xiang,Guo Guiyong,et al. Radar feature extraction of micro-precession ballistic missile warhead [J]. Journal of Electronic & Information Technology,2006,28(4):643-646. (in Chinese)
- [4] 刘兴,梁维泰,赵敏.一体化空天防御系统[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [5] Wright D. The target set for missile defense intercept test IFT-9 [EB/OL]. (2002-10-11) [2012-08-05].  
<http://www.ucsusa.org/assets/documents/nwgs/ift9.pdf>.
- [6] 刘丽华.弹道导弹中段雷达特性分析与提取方法研究[D].长沙:国防科学技术大学信息与通信工程,2006.
- [7] 罗宏.动态雷达目标的建模与识别研究[D].北京:航天科工集团公司第二研究院,2004.
- [8] 李弼程,黄洁,高世海,等.信息融合技术及其应用[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [9] 冯德军.弹道中段目标雷达识别与评估研究[D].长沙:国防科学技术大学信息与通信工程,2006.

## 作者简介:

何松,男(1986—),助理工程师,研究方向为自动控制、雷达情报处理、图像处理和弹道目标识别。

[166.16.67.128/a4402.html](http://166.16.67.128/a4402.html)

- [8] 中国标准化研究院. GB/T 19488.2—2008 电子政务数据元素 第2部分:公共数据元目录[S].北京:中国标准化研究院,2008.

## 作者简介:

靳大尉,男(1979—),讲师,研究方向为军事数据工程。

赵成,男(1977—),讲师,研究方向为分布式计算。  
刘庆河,男(1985—),硕士研究生,研究方向为军事数据工程。

(上接第43页)

- [4] 国家技术监督局. GB 3101—1993 有关量、单位和符号的一般原则[S].北京:国家技术监督局,1993.
- [5] 国际标准化组织. ISO/IEC 11179:1994 Information technology-specification and standardization of data element[S]. [S. l.]:ISO,1994.
- [6] 袁满.数据元技术是解决IT行业信息标准化不可忽视的重要技术[EB/OL].(2012-01-30)[2012-11-12].  
<http://www.doc88.com/p-718479030841.html>.
- [7] Hayes G. DoD metadata registry[EB/OL].(2006-05-17)[2010-05-19].  
<http://wenku.baidu.com/view/>

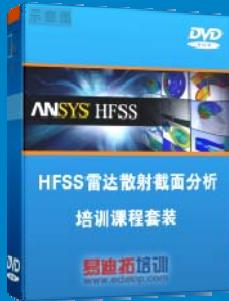
## 雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

### ● 更多培训课程:

#### ● HFSS 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

#### ● CST 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

#### ● 天线设计培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>