

导弹防御系统中的雷达目标识别研究*

刘永祥, 黎 湘, 庄钊文

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要 :以评估美国国家导弹防御(NMD)系统雷达识别能力为背景,分析了地基雷达识别弹道导弹目标的技术途径。根据弹道导弹目标群在飞行中段和再入段表现出的特性差异,提出了涉及目标结构特性、姿态特性以及再入特性的综合识别策略,并初步分析了各种识别措施的可行性。

关键词 :雷达目标识别;弹道导弹;导弹防御

中图分类号 :TN959.1 **文献标识码** :A

Research on Radar Target Discrimination in the Missile Defense System

LIU Yong-xiang, LI Xiang, ZHUANG Zhao-wen

(ATR Key Laboratory, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract :The technology of the radar discriminating ballistic missile is analyzed so as to evaluate the discrimination capability of ground-based radars in the US National Missile Defense (NMD). According to the characteristics of the ballistic target clusters during the mid-course and re-entry phase, an integrative discrimination strategy for the missile defense system is developed which involves the structure, stance and re-entry characteristics of the target, and each discrimination measure is followed by technical evaluation.

Key words :radar target discrimination; ballistic missile; missile defense

美国 NMD 系统发展进程表明,从来袭导弹目标群中识别出真弹头是主要技术瓶颈之一,是天基红外系统(SBIRS)、地基雷达(GBR)以及拦截器(EKV)识别系统综合能力的体现。弹道导弹攻防的强对抗,决定了导弹防御系统中的目标识别需要建立在弹道导弹不同阶段呈现出来的物理特性和对抗条件基础之上,识别需求决定了探测器配置、类型及技术指标,从这个意义上说,目标识别属于导弹防御系统顶层设计范畴。地基雷达作为弹道导弹防御系统中的主要探测器之一,其任务主要是探测和识别中段和再入段飞行的弹道导弹,解决弹道导弹的预警、真假目标识别和精密跟踪,通过测量目标轨迹、RCS、极化散射矩阵以及散射中心像等,推算出目标的形状、姿态、表面材料电磁参数等物理量,其探测与识别能力是整个防御系统识别能力的重要支撑。目前,典型的弹道防御系统地基雷达包括:美国国家弹道导弹防御系统中的 P、L 波段远程预警雷达、X 波段地基雷达、低层反导系统(PAC-2, PAC-3)中的 C 波段 AN/MPQ-53 雷达、地基机动高层导弹防御系统(THAAD)中 X 波段的 GBR-T 雷达,涉及到的雷达工作频率覆盖了 P、L、C、S、X 波段,其中有些 X 波段地基雷达是径向距离分辨率达到 15~20cm 的宽带雷达^[1]。因此,研究基于多种雷达观测特征的弹道导弹目标识别技术,对于评估美国 NMD 系统识别能力,并针对界定防御系统设计弹道导弹突防策略具有重要意义。

1 中段、再入段弹道导弹目标特性分析

以美国 NMD 为例,弹道导弹防御系统基于“全程观测、分段拦截”作战思想,把中段末期、再入早期作为主要作战窗口之一。中段亦称自由飞行段,该过程弹头与弹体已经分离,且为了对抗的目的,弹头通过释放诱饵形成威胁目标群,在近似真空的大气层外做惯性飞行。再入段是弹头返回大气层并朝向地面目标飞行的阶段,这时大气阻力使得各目标产生减速特性,并且高速再入目标周围会形成等离子

* 收稿日期:2004-02-19
基金项目:国家部委资助项目(4130304-01)
作者简介:刘永祥(1976-)男,博士生。

区。

目前,有关 NMD 系统中地基雷达识别中段弹头和诱饵的详细技术情报是美国总审计局在 2002 年 2 月底公布的两份关于“综合飞行试验”IFT-1A 的试验报告。从总审计局的报告看,NMD 系统目前的识别能力主要基于大量试验数据实现特征匹配,尚未揭示其特征产生机理,距离智能化的特征提取、目标识别仍有较大差距。

对于中段、再入段的弹道导弹目标,雷达识别大致有三个途径。一是“特征”识别,通过对信号特征的辨认来推演有关目标的特征信息,例如:通过回波信号的幅度、相位、极化频率特征及其变化来估计目标的飞行姿态、结构特征、材料特征等;二是“成像识别”,即用高分辨雷达获取目标图像,进而确定目标的尺寸、形状、材料;三是根据目标再入大气所特有的运动状态,获取目标的弹道参数,确定目标的质量。由于弹头与诱饵特性的相似性,以及目标特性在飞行过程的动态变化,识别过程应该基于各目标的不同特征,综合利用多种识别手段,不断排除假目标和碎片,实现真假目标区分。

2 弹道导弹目标雷达综合识别策略

雷达目标识别策略主要基于中段、再入段过程中弹道导弹目标群的不同特性。从结构特性看,飞行中段的威胁目标群可粗分为球锥类、球、角反射器、圆柱及碎片等,形体相对简单,通过高分辨成像进行区分是可行的。从姿态特性看,各目标的飞行姿态特性主要取决于母舱释放弹头和诱饵时的阶段,一般情况下,弹头自旋稳定飞行以保持空间定向,由于释放过程中不可避免地将对弹头产生一定的横向扰动,可能使弹头产生进动;另外,当弹头章动角较大,或者母舱投放弹头时因为某些不可控制的原因,甚至是母舱事先设计好的,弹头有可能产生翻滚。模拟弹头形状的诱饵通常也会产生翻滚。再入段是导弹防御的最后一个屏障,防御系统可以根据各再入目标的运动状态估算出质量比,区分出轻重目标。具体步骤如下:

- (1)通过高分辨雷达成像获取目标的结构特征信息,从目标群中识别出具有锥体结构特性的目标。
- (2)根据锥体目标的进动数学模型,结合锥体目标在不同姿态角下 RCS,得到目标进动状态下的 RCS 回波模板,当确定锥体目标 RCS 回波周期分量中不是目标翻滚时,基于 RCS 序列估计出章动角和进动周期,进而计算出目标的惯量比等特征。
- (3)为保证对所有真弹头进行有效拦截,在再入段通过跟踪目标运动状态估计其质量比,基于此排除轻诱饵。
- (4)将上述不同措施确定出来的威胁目标作为“威胁目标”,通过积累观测综合评判目标类型。

2.1 利用高分辨雷达成像识别弹道导弹目标

弹道导弹飞行中段目标群中各目标形体较小且结构简单,利用高分辨成像可以实现对弹头类目标、球类以及角反射器等具有不同结构特点的目标进行区分。弹头类目标一般为旋转对称体,沿轴线均匀对称,故其姿态只取决于雷达视线与轴线的夹角,如图 1。

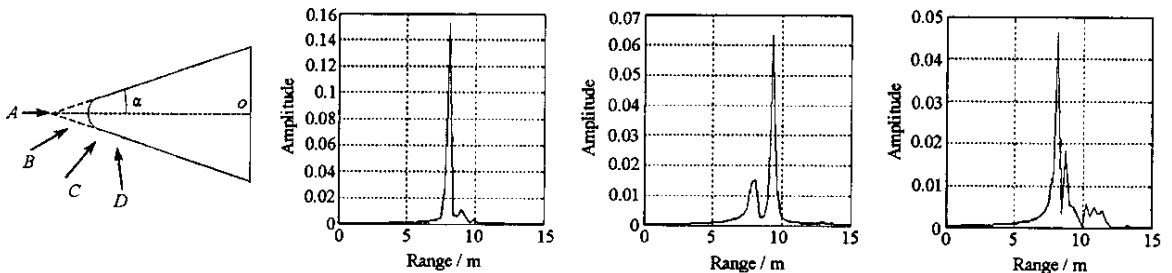


图 1 球锥类弹头的典型姿态下一维距离像(X波段/1GHz)

Fig. 1 1-D range profiles of sphere-cone warhead at different aspect angle(X band/1GHz)

考虑到弹头目标形体简单,相邻姿态角下目标距离像具有相似性,因此,对弹头目标的一维距离像模板数据建库时,可以将一定姿态区域内的距离像模板数据作为一个通过相似度量度的集合,则模板数

据的建库问题就转化为如何确定合理的区域划分和相似度量,使得目标全姿态角下的区域划分在满足给定的虚警和漏警条件下,划分区域数量最少。

2.2 利用 RCS 回波序列识别弹道导弹目标

根据雷达综合识别策略,RCS 回波主要实现对弹头类目标翻滚和进动特性的识别。

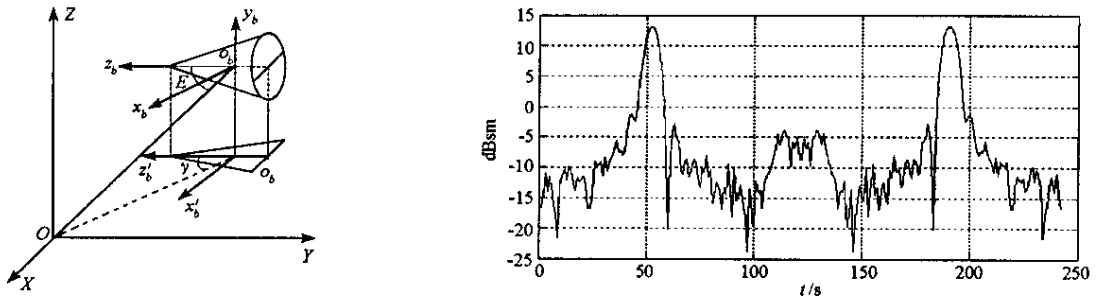


图 2 弹头目标在雷达坐标系中翻滚示意图及其对应的 RCS 序列(UHF 波段)

Fig.2 Sketch map of rotating warhead in radar coordinate and its RCS serials(UHF band)

图 2 给出了球锥类弹头翻滚状态下的 RCS 仿真序列(UHF 波段),在翻滚类弹头的 RCS 模板数据建库过程中,需要考虑弹头运动轨迹与雷达视线的夹角、雷达观测数据率、弹头尺寸、弹头翻滚周期等因素。为了空间定向,母舱投放过程中使弹头以一定的角速度自旋,由于投放过程中不可避免对弹头产生一定的横向扰动,弹头会产生进动。进动最明显的特征是周期性,进动的幅度也与目标诸多本质特征相关,如目标形体、质量分布等^[3]。

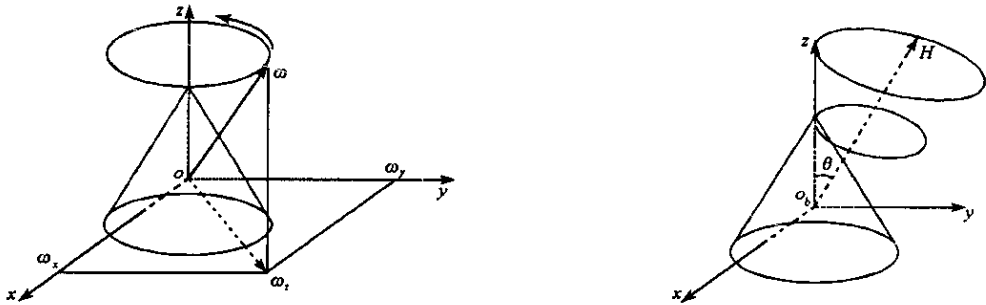


图 3 弹头转速矢量 ω 绕主惯量轴作圆锥运动,并且绕空间固定的角动量 H 作圆锥运动

Fig.3 The rotating speed vector ω has coning precession with main inertia axes e_z and having coning precession with spatial fixed angle momentum H

从空间看弹头转速矢量 ω ,它同时参与两种圆锥运动,一是绕锥体主惯量轴 e_z 做圆锥运动,称为本体章动速率,另一种是绕空间固定的角动量 H 做圆锥运动,称为空间章动速率,图 3 给出其运动过程示意图。在运动形式上,弹头在绕 e_z 自旋的同时, e_z 绕 H 作圆锥运动,即弹头的对称轴在空间中作圆锥运动, e_z 和 H 的夹角称为章动角。章动角大小和进动周期取决于多个因素,如弹头的结构特点、转动惯量、自旋速率以及横向干扰等。图 4 给出了某进动状态下的球锥类弹头目标 RCS 序列,通过建立模板,可以估计出目标的进动周期以及章动角,进而推测目标的质量分布信息。

2.3 利用再入运动特性识别弹道导弹目标

目标群以一定再入角进入大气层时,各物体由于大气阻力作用而呈现出减速特性。质阻比是决定再入目标减速特性的重要参数,是再入目标的主要识别特征。由于质阻比是通过跟踪再入目标的运动状态估计出来的,其误差主要来源于雷达测距、测速、测角的误差^[4]。研究表明,质阻比估计误差受雷达测距误差的影响比较小,但敏感于雷达的测角误差,因此,再入过程观测对雷达的测角精确度要求很高。另外,目标高度是利用质阻比识别所必须考虑的重要因素,因为质阻比的测量精度随着对再入过程的跟踪(目标的高度不断下降)而提高,对于防御系统而言,一方面希望在尽量高的高度上识别出目

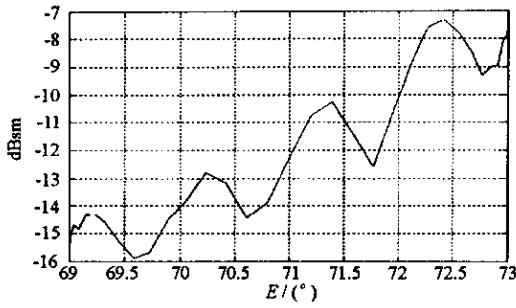


图4 球锥类弹头在某进动状态下的 RCS 序列(UHF 波段)

Fig.4 The RCS serials of sphere-cone warhead in nutation state(UHF band)

标,另一方面希望质阻比测量误差控制在一定范围内而不会造成错误识别。影响质阻比估计精度的第三个因素是雷达布站,这主要是由于雷达对其正前方目标的测量误差比对其侧前方目标的测量误差小的缘故,合理的雷达布站也有利于提高质阻比估计精度。

2.4 其它手段识别弹道导弹目标

NMD 系统地基雷达采用预警雷达与跟踪制导雷达综合应用的工作方式,提高了系统探测距离和探测精度的整体水平,基于此,地基雷达以较高的精度观测到诱饵释放过程成为可能,根据此时的各目标轨迹识别真假目标应该是一种有效手段,特别是针对战术弹道导弹。另外,导弹防御系统利用地基雷达极化信息进行识别也是重要的技术思路,极化信息在确定目标表面材料电磁参数方面具有独到的技术优势。

3 结束语

从目前美国国内关于 NMD 有效性的争论看,在对抗环境下对弹道导弹目标的真假识别能力是争论的焦点。由于导弹攻防技术的强对抗性,弹道导弹防御系统的雷达目标识别技术研究是一项庞大的系统工程,不仅仅是几种识别方法的综合利用,随着反导背景下目标特性研究的深入,智能化的弹道导弹目标识别体系将会不断得到完善。

参考文献:

- [1] 张光义,王德纯. 弹道导弹防御系统中的预警探测雷达[J]. 系统工程与电子技术,1996,18(5)28-31.
- [2] 黄培康. 雷达目标特征信号[M]. 北京:宇航出版社,1993.
- [3] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1997.
- [4] 康斯坦特 J.N. 防御雷达系统工程导论[M]. 北京:国防工业出版社,1977.

