

文章编号 :1001 - 2486(2005)06 - 0043 - 05

基于一维距离像的导弹目标运动特征提取方法*

冯德军¹, 陈志杰², 王雪松¹, 王国玉¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073 ;

2. 国防科技大学 训练部计算中心, 湖南 长沙 410073)

摘要 :根据导弹目标运动方式及其回波特点,提出了一种基于一维距离像的运动目标特征提取方法。在对回波进行全去斜率处理后获得目标一维像。通过观测一维像序列的长度变化周期,提取目标的章动频率,根据距离像在成像窗口中的位置,获取雷达和目标的径向距离,利用相邻距离像相关方法,获取距离像平移位置,从而推出雷达—目标的径向速度。进行了相应的仿真实验,结果表明了该方法的有效性。

关键词 :一维距离像;运动目标;导弹;特征提取

中图分类号 :TN957, V221 文献标识码 :A

A Method for Extracting Moving Feature of Ballistic Missile Targets from High Resolution Range Profiles

FENG De-jun¹, CHEN Zhi-jie², WANG Xue-song¹, WANG Guo-yu²

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China ;

2. Computing Center of Exercitation Department, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract :Based on the signature analysis of wideband echo from the ballistic missile, a novel method is proposed, which can extract the features of the moving target. High-resolution radar echo is processed by STRETCH technique and range profiles are obtained. By observing the periods of the target length variant, the frequency of nutation is deduced. According to the location of the range profile in imaging windows, the range between the radar and target is estimated. After the range shift between the two adjacent range profile provided by envelope correlation algorithm, the target velocity is estimated by computing the time difference between the adjacent two mixers. Simulation results show the effectiveness of the method.

Key words :high resolution range profile ; moving target ; missile ; signature extracting

导弹攻防对抗目前已成为国内外研究的热点问题之一,受到越来越多的关注^[1,2]。对于中远程导弹来说,中段是导弹防御的关键阶段^[3]。在中段的目标主要有弹头、碎片和各种诱饵,如何从目标群中识别真目标是攻防对抗双方均十分关注的关键技术之一。中段识别的难点主要在于有效特征的提取。进攻方通过 RCS 缩减、有源干扰等手段,可使真假目标的雷达特性十分相似^[4]。文献[5]提出,通过 DIS (digital image synthesizer) 技术,可合成虚假的目标 ISAR 图像。这些对抗手段使得通过 RCS、一维像、二维像等途径提取有效的真目标特征变得更为困难。

运动特征是导弹目标识别所依据的主要特征之一。通过目标运动分辨(TMR)处理,可以得到目标的飞行姿态、轨道特征、速度与加速度等特征^[6]。文献[7]根据窄带跟踪滤波信息研究了导弹运动特性的提取,但其未能提取出目标的章动信息。而章动特性是区分真假的重要特征之一。目标的高分辨率距离像序列包含着目标运动的丰富信息,通过一维像序列提取目标的运动特征将是一种有效的运动特征提取途径,而目前关于该方面的研究还很少见。本文根据宽带回波特点,提出了一种基于一维距离像的目标运动特征提取方法,该方法能获取目标的章动频率、目标的径向距离和速度。

* 收稿日期 :2005 - 07 - 10

基金项目 :全国优秀博士论文专项资金资助项目(08100101);国防预研基金资助(41303517)

作者简介 :冯德军(1972—),男,工程师,博士生。

1 中段导弹运动特性及其仿真

对于中远程导弹而言,中段弹道是整个弹道中距离最长的一段。在此阶段,目标的运动相对平稳,如果将地球看成均匀球体,将弹头看作质点,则目标的运动就是所谓的“二体问题”。此时,目标的飞行状态完全取决于目标的主动段关机参数,即关机速度 V_k 、地心距 r_k 和弹道倾角 θ_k 。地心极坐标下自由段目标运动轨迹方程是

$$r = \frac{P}{1 + e \cos f} \quad (1)$$

式中, r 为地心距, P 为半正焦弦,亦称半通径, f 为极坐标下的极角, e 为偏心率。(1)式表明,自由段运动轨迹方程是以坐标原点为焦点的圆锥曲线,其形状由偏心率 e 决定。当关机参数给定时,通过空间目标运动轨迹方程,可算出目标飞行弹道的长轴 a 、短轴 b 及偏近点角 E_k 。根据开普勒方程,可解得导弹飞行经地点的时间 t_p 。对于给定的时刻,通过反解开普勒方程,可以得到该时刻的偏近点角 E ,然后再算出该时刻的径向速度 V_r 、速度倾角 θ 和地心距等运动参数。具体计算细节请参见文献[8]。

为了保持弹头在大气层外飞行的稳定性,提高命中精度,导弹设计中大都采用了弹头姿态控制和速度控制技术,以确保弹头在中段飞行是稳定的、无翻滚的^[9]。由于该阶段导弹只受重力的作用,当导弹不进行姿态调整时,可不考虑进动的影响。此时导弹的运动除自旋外,还存在章动。所谓章动,是指导弹存在一个绕其对称轴的速率,其锥顶轨为圆,如图1所示。章动是弹头中段飞行过程中的一个主要特征,其数学描述可用弹头的章动角 γ 、自旋轴 OA 轴绕速度方向的旋转角速度 ω 两个参量来描述。文献[9]指出,为保证弹头的稳定性,弹头的章动频率一般选取在几个 Hz 的量级。

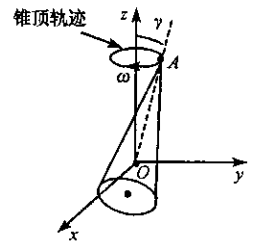


图1 弹头章动示意图

Fig.1 Diagram of warhead nutation

根据前述的方法获得目标的自由段弹道后,设定章动初始时刻、章动频率、章动角大小,便可仿真得到在各个时刻弹头的姿态。显然,若在观测期间雷达的部署位置不变,导弹章动必然引起其雷达视线角的变化,从而导致雷达目标特征信号的变化。

2 基于一维距离像序列的运动特征提取方法

STRETCH(全去斜率)处理是对大带宽信号的常用处理方法,该方法可大大降低雷达 A/D 变换器的采样率,它只需通过全去斜率混频和一次 FFT 变换就可实现对线性调频信号的脉冲压缩,获得目标的一维像^[10,11]。

2.1 章动频率的提取

章动是一种周期性的运动,它使得雷达视线角的变化呈现周期性规律。宽带高分辨成像雷达能获取目标的长度信息,利用其所观测的目标长度变化推导目标的运动的周期性是一种相对可靠而又易行的方法:雷达视线角的周期性变化会引起目标长度的周期性变化,根据目标长度的周期性变化就可推导出目标的章动频率。图2是某实测的导弹分别在方位角为 0° 和 45° 时的一维像,该导弹头长 2.2m,测量时雷达带宽 2GHz,HH 极化。

由图2可看出,该种导弹在头、尾均有一个强散射中心。设定一维像阈值后可获得目标的长度信息。采用该方法获取目标的长度是有效的:在 0° 时,目标占据 30 个分辨单元,根据雷达的分辨率,换算到距离上,目标约长 2.25m,实际长 2.2m;在 45° 时,目标占据 20 个分辨单元,也就是约长 1.5m,实际长为 1.55m。可以看出,利用一维像可较准确地获知目标长度。进一步,根据目标长度周期性的变化可获知目标姿态的周期性变化,进而获取目标的章动频率。值得指出的是,对于导弹目标,由于高速运动造成的距离像展宽效应不可忽略,若不进行补偿,将使得长度特征的提取失真。文献[12]研究了导弹目标的距离像补偿方法,并指出即使在测速误差达 10m/s 级时,其补偿后的距离像展宽效应也很小。因此,

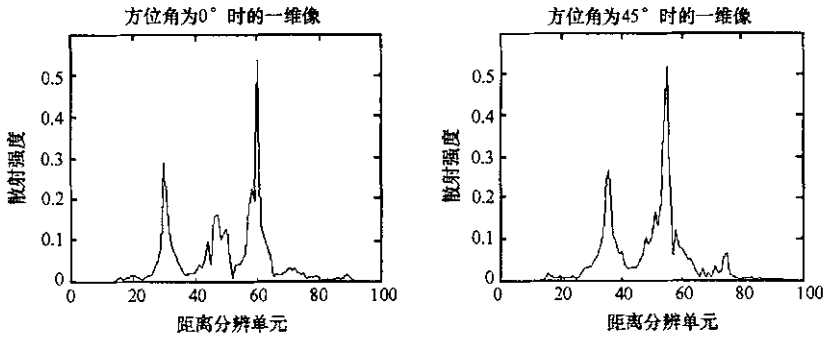


图2 实测导弹在不同方位角下的一维像

Fig.2 Range profiles of measured missile at different azimuth angle

通过距离像补偿后再采用以上方法进行特征提取,依然可获得令人满意的结果。

2.2 目标径向距离和速度获取

目标的径向运动信息是辨别真假的重要特征之一。通常获取目标径向运动信息的方法是采用宽窄交替的工作方式,用窄带进行跟踪滤波,而宽带只进行成像,这使得雷达的跟踪数据率下降。如果宽带系统能提供目标径向距离和速度信息,则不但能丰富雷达信息量,而且能改善系统跟踪性能^[13]。

根据 STRETCH 处理原理可知,雷达需为各次回波提供参考时延以进行混频处理。时延的大小是根据跟踪滤波信息而来的。由于各次跟踪点的位置不同及误差的影响,使得雷达所成一维像在距离窗中的位置发生变化。图3是当雷达发射信号时宽为 $100\mu\text{s}$ 、中频带宽为 5MHz 时相邻两次发射宽带信号所获得的一维像。

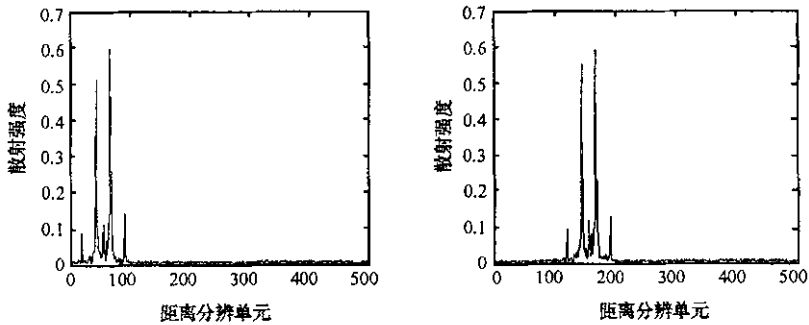


图3 相邻两次发射周期获得的一维像

Fig.3 Range profiles of adjacent pulse

由图3可以看出,相邻两幅一维像具有较强的相似性,同时可看出由于跟踪点位置不同及跟踪误差,一维像落在成像窗口中的不同位置。实际上,目标落在成像窗口中的位置反映了目标与参考时延的距离差。对某一散射中心,在经去斜率混频后,输出为一单频信号,其频率和目标与参考信号间的时延差 $t_r - \tau_0$ (t_r 为回波时延, τ_0 为参考时延) 成比例。通常 t_r 难以精确知晓,通过对混频后回波的频谱分析,可获知其频率为 \hat{f} ,由 STRETCH 处理原理知

$$\hat{f} = k(t_r - \tau_0) \quad (2)$$

式中, k 为调频斜率。对于高分辨雷达而言,在去斜率混频后,有多个频点(对应于多个距离分辨单元),这时可选择其中的最强点作为跟踪点,估计出其频率 \hat{f} ,由此可估计出目标与雷达的径向距离为

$$\hat{R}_r = \frac{c}{2} \left(\frac{\hat{f}}{k} + \tau_0 \right) \quad (3)$$

为进行成像处理,通常要进行距离像对齐。设雷达连续两次观测的间隔为 T ,混频时延差分别为 τ_1 和 τ_2 ,两次相邻距离像对齐时的移位距离为 R ,目标的速度设为 V ,则有:

$$VT = \frac{c}{2}(\tau_1 - \tau_2) + R \tag{4}$$

上式中 R 的符号以前一次距离像为基准,若后一次获得的距离像滞后,符号为正,反之则为负。因此,利用雷达两次观测的时混频时延差及距离像对齐时的移位距离,可以测出目标的径向速度,由式(4)知目标在此间的飞行速度为

$$\hat{V} = \frac{c}{2T}(\tau_1 - \tau_2) + \frac{R}{T} \tag{5}$$

在上式中, τ_1 和 τ_2 是雷达发射相邻两次宽带信号的混频时延差,雷达可以精确知晓,而 R 是距离像对齐时的平移位置,可以精确到几分之一一个波长,由此可看出通过(5)式估计速度将十分精确,跟踪误差已通过 R 进行补偿。以上这种方法虽然简单,但在实际应用中可能会非常有效,宽带提供的目标运动信息不但可提供给窄带提高其跟踪精度,而且可与窄带信息关联,进行欺骗干扰鉴别。

3 仿真实验

为检验本文所提出方法的有效性,下面进行仿真研究。根据前述的方法进行中段导弹运动仿真。有关参数设置如下, $V_k = 3\text{km/s}$, $r_k = 100\text{km}$,采用最小能量弹道。获得的仿真弹道如图4所示。目标章动角速度为 0.125 周/s,章动角大小为 10° 。雷达位于弹道平面内且与弹着点重合。获得雷达和目标的相对姿态后,采用某导弹在该姿态下的微波暗室测量数据。雷达参数如下:发射线性调频脉冲,带宽为 2GHz ,脉冲宽度为 $100\mu\text{s}$,中频带宽为 5MHz ,雷达采样间隔 5Hz 。雷达自关机点 100s 开始跟踪目标,连续跟踪 50s 。通过 STRETCH 处理后获得目标的一维像,然后进行距离像归一化,归一化后取 0.1 为距离像门限值。获得的目标长度变化如图5(a)所示。

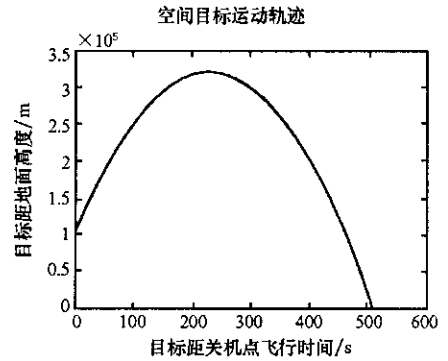


图4 目标中段弹道

Fig.4 Target trajectory in midcourse

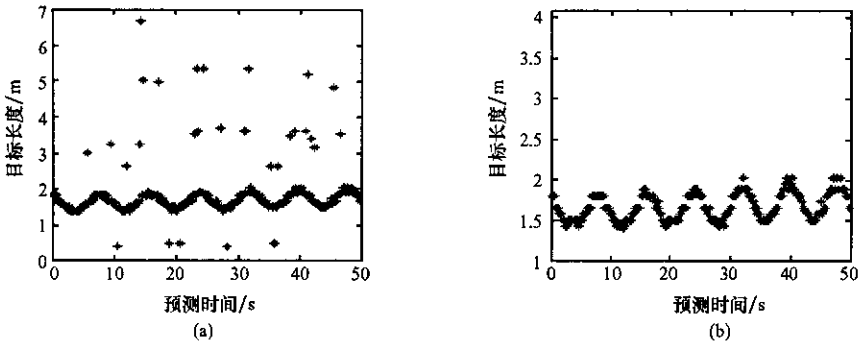


图5 目标长度随观测时间的变化

Fig.5 Target length variant along with observing time

从图5中可明显看出目标长度的周期性变化,并可看出,在 50s 的观测时间内,雷达视线角约经历了 6.2 个周期,由此推算的目标章动频率与真实值极为接近。如果进行频谱分析,还可获得更精确的值。同时,由图5(a)还可看出,由于噪声的影响和距离像的方位敏感性,在某些观测点所获得的目标长度与真实值存在较大的偏差,这可通过平滑的方法来消除。考虑到目标的长度不会呈现剧烈起伏的特点,因此,对于那些与前后观测值相差很大及偏离均值甚远的观测值可以用其邻近的观测值进行平滑。经平滑处理后获得的结果如图5(b)所示。可以看出,平滑效果是较为理想的。

雷达和目标的参数设置同上,采用本文阐述的方法进行目标径向距离和速度测量。在进行距离像对齐时,采用最大匹配相关法。在观测期间获得的测量误差结果如图6所示。

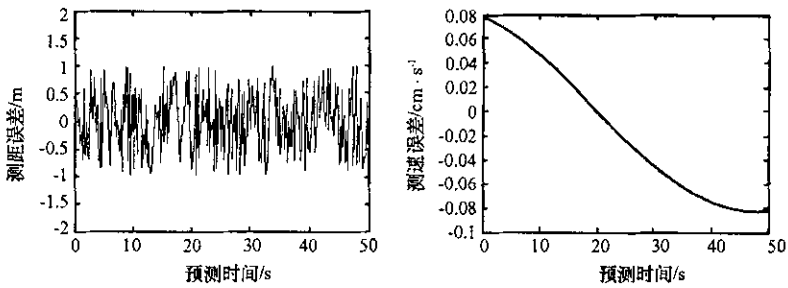


图6 测距误差与测速误差

Fig.6 Error of range and velocity estimation

由图6可以看出,采用本文的方法对距离和速度的测量精度都相当高,但其误差结果却表现为两种不同的形式:测距表现为随机误差,测速表现为系统误差。分析误差来源发现,测距误差主要是由于跟踪点在目标上的位置不确定性(距离闪烁)引起的,一般其绝对值不会超过目标长度;测速误差则是由目标—雷达的相对速度变化引起的。实际上,本文提出的测速方法隐含着一假设:在雷达发射两次宽带脉冲期间目标相对雷达做匀速运动,偏离这种运动方式越远,则误差越大。显然,在弹道的不同阶段,目标相对雷达的径向速度是变化的,但这种变化幅度较小,且是慢变化,在满足一般跟踪数据率条件下,采用本文提出的方法依然可获得较高的测量精度。就本文的仿真条件而言,在目标飞行的各个阶段,最大测速误差均不超过 0.5m/s 。对于飞行速度高达 1000m/s 以上的目标而言,这是令人满意的,而且,通过进一步的运动学建模和滤波等处理,还将进一步提高测速精度。

4 结论

弹道目标的运动特性是标识其身份的重要特征,而目前利用宽带回波提取目标运动特性的研究还较为少见。本文提出了一种利用目标—维像提取运动特征的方法:通过距离像序列提取目标的章动频率和目标径向速度,根据去斜率混频处理后获得的一维像特点获取目标的径向距离。与基于窄带的运动特征提取方法相比,这种方法计算更为简单,仿真结果也表明该方法能达到良好的测量精度。本文提出的这种方法对宽带目标识别雷达而言具有较重要的意义:宽带提供的目标运动信息不但增加了雷达获取的信息量,而且可供窄带系统提高跟踪精度,因此,这种方法有助于改善雷达的跟踪能力和目标识别能力。

参考文献:

- [1] 黄培康. 反导系统中的目标识别技术[J]. 战略防御, 1981(5):1-14.
- [2] Sessler A M, Cornwall J M, Dietz B. Countermeasures—A Technical Evaluation of the Operational Effectiveness of the Planned US National Missile Defense System[R]. Union of Concerned Scientists, 2000.
- [3] Tanks D R. 了解国家导弹防御技术[J]. 863先进防御技术通讯(A类), 2000(10):1-42.
- [4] 彭望泽. 防空导弹武器系统电子对抗技术[M]. 北京:宇航出版社, 1995.
- [5] Le Dantec F A. Performance Analysis a Digital Image Synthesizer as a Countermeasure against Inverse Synthetic Aperture Radar[R]. ADA407076, 2002.
- [6] Nunn E C. The US Army White Sands Missile Range Development of Target Motion Resolution[A]. IEEE EASCON[C], 1980:346-352.
- [7] 陈建文, 李士国. 基于目标运动分辨技术提取导弹目标运动特征[J]. 现代雷达, 2003, 25(6):5-7.
- [8] 张毅, 等. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1999.
- [9] 罗宏. 动态雷达目标的建模与识别研究[D]. 航天工业总公司第二研究院论文, 2000.
- [10] 冯德军, 王雪松, 等. 基于ESPRIT的中段弹道目标特征提取方法[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(2):41-44.
- [11] 国家高技术863-308专题专家组. 逆合成孔径雷达论文集[C]. 1996.
- [12] 黄小红. 目标高速运动对一维距离像的影响及补偿方法研究[J]. 信号处理, 2001, 18(6):487-490.
- [13] Wang J G, He P. Use of the Radial Velocity Measurement in Target Tracking[J]. IEEE Trans. on AES, 2003, 39(2):401-413.

