

文章编号: 1672-2892(2011)01-0033-06

中段翻滚目标运动建模及其宽带雷达回波仿真

袁仕继, 许世平, 博 远

(中国人民解放军 63888 部队, 河南 济源 454650)

摘 要: 弹道导弹飞行经历中段时, 弹头与诱饵的主要差异是运动方式的不同, 而诱饵大都呈现翻滚运动方式。文章从中段翻滚目标的物理、运动和散射特性出发建立了中段翻滚目标的运动模型, 推导出了宽带线性调频(LFM)雷达回波的数学表达式。然后对中段翻滚目标的宽带雷达回波进行了仿真, 并利用目标径向尺寸的周期变化估计出目标的翻滚周期。仿真结果表明中段翻滚目标宽带雷达回波与目标的姿态运动参数、形体参数都有较大关系, 这将为中段目标的识别提供基础。

关键词: 弹道导弹; 中段; 周期估计; 翻滚特征

中图分类号: TN955

文献标识码: A

Motion modeling and wideband radar echo simulation for midcourse rolling target

YUAN Shi-ji, XU Shi-ping, BO yuan

(Unit 63888 of PLA, Jiyuan Henan 454650, China)

Abstract: The main differences between warhead and bait are their movement ways in the midcourse of ballistic missiles, and rolling motion is the major way for bait. The motion model was established based on physical, movement and scattering characteristics of midcourse rolling targets, and the mathematical expression of the wideband Linear Frequency Modulation(LFM) radar echo was deduced. Then wideband radar echoes were simulated and rolling period was estimated based on the changes of target radial length. The simulation results indicate that the wideband radar echoes of midcourse rolling targets have something to do with the target attitude motion parameters and the physique parameters, which will provide an important basis for midcourse target identification.

Key words: ballistic missile; midcourse; period estimate; rolling characteristic

“翻滚”运动是空间目标的一种特殊的运动形式。对于低轨道卫星, 当调姿系统失灵, 卫星在低轨道上受大气阻力及地球、太阳、月亮等的万有引力的作用下, 进行复杂的旋转运动, 最终可能趋向于类似螺旋桨式的翻滚运动; 在卫星发射阶段, 星箭分离前火箭起旋以实现星箭分离后卫星自旋姿态稳定, 星箭分离后的末级火箭往往演变为翻滚运动^[1]; 战术弹道导弹突防时释放的诱饵、分离后的助推器最终也将演变为翻滚运动^[2], 这种运动的特点是空间目标绕一确定空间轴翻滚, 其翻滚平面视为不变。

本文以弹道导弹突防为研究背景, 以战术弹道导弹突防时释放的诱饵、分离后的助推器为研究对象, 对中段翻滚目标进行运动建模并进行宽带雷达回波仿真, 同时研究空间翻滚目标周期提取方法, 最后用仿真实验验证该方法的有效性和实用性。

1 空间翻滚目标宽带雷达回波仿真

弹道导弹飞行一般经过助推段、中段和再入段^[3-4]。目标在中段运动时目标群将不再单一, 在助推火箭关机后, 末助推段飞行器(母舱)在弹道上升过程中不断地释放无源诱饵、有源干扰机及其他有效载荷。为了保持弹头在大气层外飞行的稳定性和提高命中精确度, 弹头在中段要进行姿态控制。姿态控制的方式有多种, 其中自旋稳定是弹头在中段最常用的姿态控制方式。在弹头与母舱体的分离过程中, 弹头会受到冲击力矩的作用, 力矩消失

后极轴在平衡位置作规则的椭圆锥运动，称为章动^[5]。但是对于诱饵和其他碎片，一般没有姿态控制方式，目标会呈现翻滚等随机的运动方式。因此，运动方式不同是弹头与诱饵的主要差异之一。

1.1 空间翻滚目标运动建模

空间翻滚目标的运动大多受其弹道的影响较大，本文首先建立翻滚目标的弹道模型，然后在该弹道模型基础上建立空间翻滚目标的运动模型。文献[4]对中段目标的弹道进行了详尽的描述，本文假设中段目标弹道已知。当目标在导弹中段飞行时，受到地球的万有引力，质心在弹道平面内作椭圆轨道运动。为简化分析，建立地心坐标系 XYZ ，它的原点位于地心 O_E 处， XY 平面为弹道平面，如图 1 所示。把翻滚目标的运动学特性作如下合理的简化：

- 1) 弹头的密度是均匀的，这样可以方便求出它的质心，质心位于弹头对称轴上，如图 1 中的 O 点。
- 2) 弹头在中段飞行时，所受外力矩为零，且没有诸如自旋之类的姿态控制。根据受力情况，弹头相对于其质心会在弹道平面内作匀速转动，这就是所谓的翻滚运动。
- 3) 雷达发射的信号以平面波的形式照射到目标上，并且发射信号的主瓣中心时刻对准目标质心。
- 4) 只考虑强散射点产生的回波，这些强散射点是雷达视线平面与弹头的交点。但因为目标相对于雷达具有平移和转动，强散射点并不是在目标上始终不变的点，它与雷达视线平面相对于目标的位置有关，如图 2 所示。
- 5) 每个散射点对回波的散射特性是相同的，散射强度都相等。

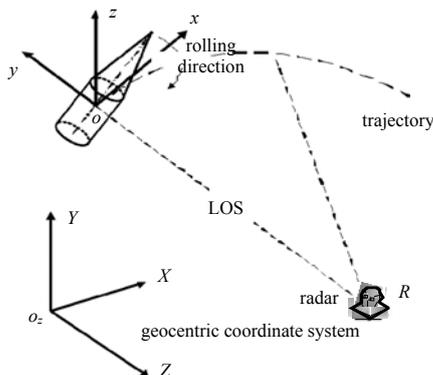


Fig.1 Motion status of midcourse rolling target
图 1 中段翻滚目标运动示意图

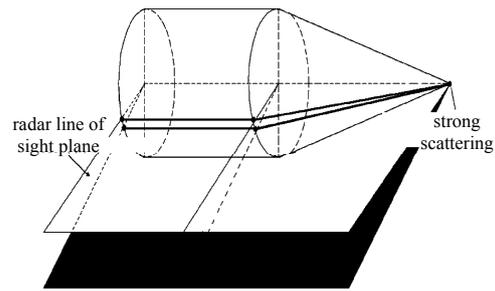


Fig.2 Strong scattering on the warhead
图 2 强散射点在弹头上的分布

在研究目标运动时通常建立 1 个只有目标强散射中心构成的散射点集的目标模型，该散射点模型使目标的雷达特性的分析得到了简化。为确定每个散射点的位置，建立参考坐标系 xyz ，它的坐标原点位于目标的质心， y 方向指向雷达视线的方向。在雷达中观察 y 方向也就是距离向， x 方向则是方位向，而且相对于雷达视线坐标系，参考坐标系和目标有相等的位移，但是没有旋转量。目标具有对称性，这使得产生雷达回波的散射点等效为弹体对称剖面的顶点，该平面就是 xoy 平面，而且，散射点的分布情况完全由雷达视线与目标主轴的夹角决定，将这些散射点编号为 1,2,3,4,5，如图 3 所示。

1.2 空间翻滚目标宽带雷达回波仿真

设雷达发射 LFM 信号，参考距离为 R_{ref} ，某一点目标到雷达的距离为 R_i ，对雷达回波进行解线频调处理后其差频输出为^[6]：

$$s_{if}(t, t_m) = A \text{rect} \left(\frac{t - 2R_i/c}{T_p} \right) e^{-j\frac{4\pi}{c}\gamma(t - \frac{2R_{ref}}{c})R_{Mi}} e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c R_{Mi}} e^{j\frac{4\pi\gamma}{c^2}R_{Mi}^2} \quad (1)$$

式中： $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & |u| > \frac{1}{2} \end{cases}$ ； c 为光速； f_c 为中心频率； T_p 为脉宽； γ 为调频率； $t = t - mT$ 为快时间； m 为整数； T_p 为脉冲重复周期； $t_m = mT$ 为慢时间； A 为常数。

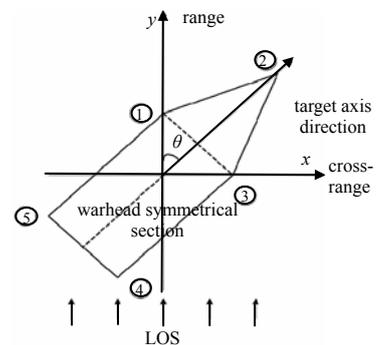


Fig.3 Scattering distribution
图 3 散射点的分布情况

由于翻滚目标一般移动相对缓慢，可设其距离(相对于参考点) R_Δ 的快时间 t (限于 1 个周期) 为固定，而对慢时间 t_m (跨多个周期) 是移动的，即将雷达工作方式等效为“一步一停”的方式。式(1)中的第 1 个相位项在快时间域变换后得到的脉冲是单频的，其值为：

$$f_i = -\gamma \frac{2R_\Delta}{c}$$

频率与 R_Δ 成正比，因此将这一相位项称为距离项。

对中段翻滚目标，使用散射点模型来仿真它的雷达回波。从图 3 中可以发现，根据 t_m 时刻雷达视线与目标主轴的夹角 $\theta(t_m)$ 就能得出当时所有散射点的分布情况。这时对应的雷达回波可以看成是 t_m 时刻没有被遮挡的散射点的回波的叠加，显然任意散射点 i 的 $R_{\Delta i}$ 都可求，利用式(1)得到散射点 i 对应的回波。设集合 $V_{t_m} = \{t_m \text{ 时刻的可见散射点}\}$ ，将所有 $i \in V_{t_m}$ 的散射点回波叠加，就能得到 t_m 时回波表达式：

$$s(\hat{t}, t_m) = \sum_{i \in V_{t_m}} s_{if}(\hat{t}, t_m) = \sum_{i \in V_{t_m}} A \text{rect} \left(\frac{\hat{t} - 2R_i/c}{T_p} \right) e^{-j \frac{4\pi}{c} \gamma (\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}) R_{\Delta i}} e^{-j \frac{4\pi}{c} f_c R_{\Delta i}} e^{j \frac{4\pi \gamma}{c^2} R_{\Delta i}^2} \quad (2)$$

可以结合图 3 对 $\theta(t_m)$ 进行判断来确定式中的集合 V_{t_m} 。

2 空间翻滚目标翻滚周期提取

由文章中 1.2 节的分析可知，雷达回波的情况完全由夹角 θ 决定，为了精确地分析散射点在雷达回波中的变化情况，首先要分析夹角 θ 的变化情况。而影响夹角变化的因素只有两方面，弹头质心沿弹道导弹弹道的运动和弹头绕质心的转动。质心沿弹道导弹弹道的运动对夹角的影响体现在 $\mathbf{l}(t_m)$ 的变化上，弹头绕质心的转动的影响体现在 $\mathbf{n}(t_m)$ 的变化上。 $\theta(t_m)$ 等于两向量 $\mathbf{l}(t_m)$ 和 $\mathbf{n}(t_m)$ 的夹角，因此

$$\cos \theta(t_m) = \frac{\mathbf{l}(t_m) \cdot \mathbf{n}(t_m)}{\|\mathbf{l}(t_m)\| \|\mathbf{n}(t_m)\|} = \mathbf{l}(t_m) \cdot \mathbf{n}(t_m) \quad (3)$$

式中 $\mathbf{l}(t_m)$ 、 $\mathbf{n}(t_m)$ 分别是 $\mathbf{l}(t_m)$ 和 $\mathbf{n}(t_m)$ 的单位向量。记 α_0 为目标主轴在 XOY 平面内的初始极角， $\mathbf{n}(0) = (\cos \alpha_0, \sin \alpha_0, 0)$ ， $\mathbf{l}(t_m) = (l_x(t_m), l_y(t_m), l_z(t_m))$ ，并假设在该平面中，弹头是逆时针转动的，则

$$\mathbf{n}(t_m) = (\cos(\alpha_0 + \omega t_m), \sin(\alpha_0 + \omega t_m), 0) \quad (4)$$

所以

$$\cos \theta(t_m) = l_x(t_m) \cos(\alpha_0 + \omega t_m) + l_y(t_m) \sin(\alpha_0 + \omega t_m) \quad (5)$$

一般说来， $\mathbf{n}(t_m)$ 比 $\mathbf{l}(t_m)$ 变化明显，决定 θ 变化的主要因素是 $\mathbf{n}(t_m)$ ，在短时间内可认为式(5)中 $l_x(t_m)$ 和 $l_z(t_m)$ 为常数。因此，角度 θ 的变化角频率近似等于目标的翻滚频率 ω ，通过散射点在一维像序列中的变化得出角度 θ 的变化。在不考虑遮挡的情况下，散射点 i 在一维像序列中的变化等价于 $R_{\Delta i}$ 在雷达视线平面中的变化。

图 4 表示出了 R_Δ 和 θ 之间的几何关系，显然有

$$R_{\Delta 2} = r_2 \cos \theta \quad (6)$$

式中 r_2 是第 2 个散射点到质心的距离。类似地，对于任意的散射点 i ，可以推出

$$R_{\Delta i} = r_i \cos(\theta + \phi_i) \quad (7)$$

式中 ϕ_i 是质心到散射点 i 的矢径到目标主轴的角度大小，对于每一个 i ， ϕ_i 都是一个常数。

因为 θ 的变化角频率近似等于 ω ，所以可认为 $\theta = \omega t + \vartheta$ ， ϑ 为常数，代入式(7)可得到：

$$R_{\Delta i} = r_i \cos(\omega t + \vartheta + \phi_i) \quad (8)$$

从式(8)中得出：在短时间范围内， $l_x(t_m)$ 和 $l_z(t_m)$ 可近似为常数，且不考虑遮挡时，散射点在一维像序列中的变化频率就是目标的翻滚频率。基于这一点，本文利用翻滚目标的一维距离像序列提取其翻滚频率。

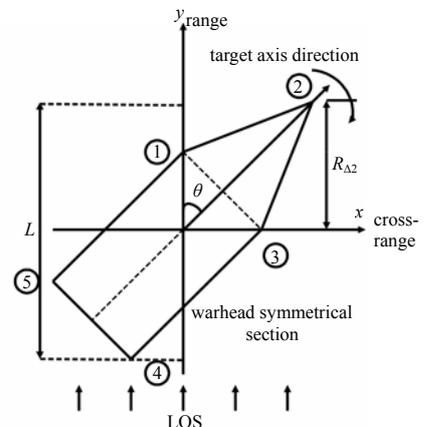


Fig.4 Geometric relationship between R_Δ and θ

图 4 R_Δ 和 θ 之间的几何关系

目标的尺寸是一维像中所提取的目标的重要特征，在雷达视线平面内，目标的径向尺寸表示为 $L(t) = \max(R_{\Delta i}) - \min(R_{\Delta i})$ ， i 属于 t 时刻的雷达可见点集合，弹头散射点模型的尺寸 L 如图 4 所示。

为了简化分析，假设有一线形翻滚目标 AB ，其翻滚中心为 O ，如图 5 所示。从图中可以发现目标的尺寸 L 可表示为：

$$L = |r_A \cos \theta| + |r_B \cos \theta| \tag{9}$$

根据式(8)有 $\theta = \omega t + \vartheta$ ，代入式(9)可得：

$$L(t) = (r_A + r_B) |\cos(\omega t + \vartheta)| \tag{10}$$

因此，目标径向尺寸的变化频率是目标翻滚频率的两倍，对于弹头散射点模型，也可以得出相同的结论。文献[7]给出了利用一维距离像估计目标径向尺寸的具体算法，下面画出通过目标径向尺寸变化提取翻滚频率的流程，如图 6 所示。

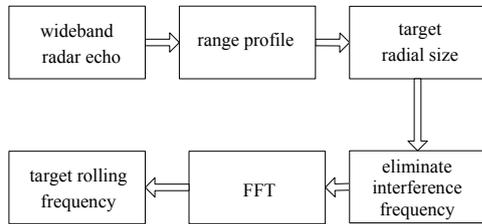


Fig.6 Flow of extracting rolling frequency through the change of target radial length

图 6 通过目标径向尺寸变化提取目标翻滚频率的流程

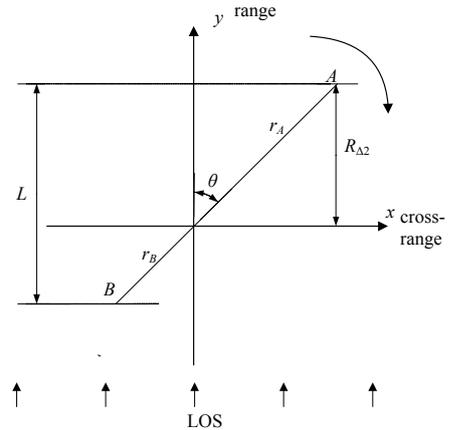


Fig.5 Change of length for linear target
图 5 线形目标的尺寸变化示意图

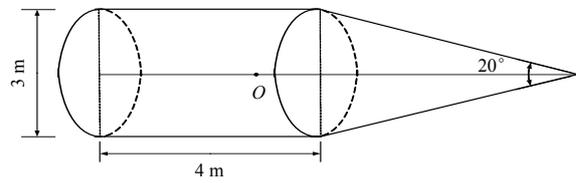


Fig.7 Warhead parameters
图 7 弹头参数

3 仿真实验

由文献[4]可知仿真参数设定如下：

表 1 中所设置的坐标都是在地心坐标系 XYZ 中的坐标。弹头结构见图 7，成像时间段从主动段终点开始计时。

3.1 弹道中段翻滚目标模型的仿真实验

首先要实现弹道的仿真，利用主动段终点参数作为初始值，步长为 0.01 s，弹道仿真结果及运动参数解算结果如图 8 所示。中段翻滚目标除了弹头整体上沿椭圆轨道飞行的特点外，另一个特点就是弹头绕其质心的匀速转动。弹头的运动导致雷达视线和目标主轴夹角的变化，雷达视线和目标主轴夹角直接决定散射点模型。利用 $r(t_m)$ 和雷达位置坐标 (x_R, y_R, z_R) ，就能确定雷达视线方向 $\mathbf{l}(t_m)$ 。根据目标主轴在 XOY 平面内的初始极角 α_0 (可由 θ_0 确定) 和目标翻滚角频率 ω ，可得出任意时刻目标主轴方向 $\mathbf{n}(t_m)$ 。由 $\mathbf{l}(t_m)$ ， $\mathbf{n}(t_m)$ 可以确定雷达视线与目标主轴的夹角 $\theta(t_m)$ 。翻滚模型的雷达视线与目标主轴夹角的变化情况如图 9 所示。

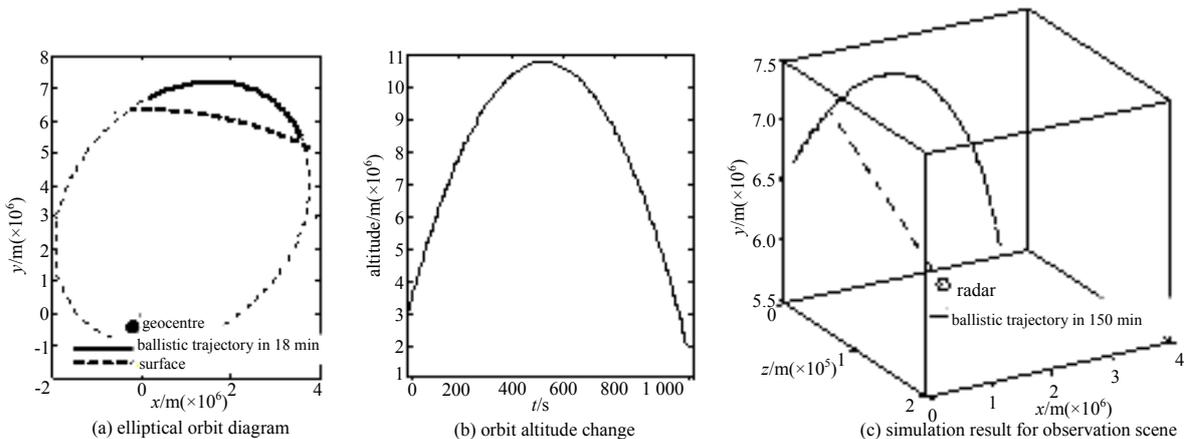


Fig.8 Trajectory simulation results
图 8 弹道仿真结果

3.2 弹道中段翻滚目标一维距离像的仿真

在文章第 3.1 节中，得出了雷达视线和目标主轴的夹角大小 $\theta(t_m)$ ，利用式(2)可以得到回波脉冲的信号形式。对每一次的回波在快时间域进行傅里叶变换就可以得到 1 幅一维距离像。在给定时段内利用式(2)可以得出该时间段内的回波数据，做出每次回波的一维像，就得到了 1 组一维像序列。把 0 s~150 s 内所成的一维像序列画出，得到 1 组一维像序列图，如图 10 所示。利用文献[6]中的方法估计目标径向尺寸，其随时间变化关系如图 11(a)所示；

消除干扰频率的影响，这里将零频分量消除，如图 11(b)所示；将 $L(t)$ 作 FFT 变换，找出最大的频率分量，如图 11(c)、(d)所示。表 2 为目标径向尺寸变化频率提取结果。

由上面分析可知，在不考虑雷达视线方向 $L(t_m)$ 的近似误差时，目标翻滚频率的估计误差主要是由 DFT 的频谱分辨率决定。理论上，观测时间长短可以影响 DFT 频谱分辨率，对于确定的目标翻滚频率，观测时间越长，分析频率^[7]越小，频谱分辨率就越高，得到结果就会越精确。如果观测时间有限，也可以通过补零处理，减小栅栏效应^[8-9]，提高频谱分辨率。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Setting of simulation parameters

parameters at burnout	coordinate/km	$x_t=150, y_t=6\ 660, z_t=0$
	velocity/km·s ⁻¹	$V_{kx}=4, V_{ky}=3, V_{kz}=0$
	initial angle between target axis and radar LOS/(°)	$\theta_0=30$
radar parameters	radar coordinate/km	$x_R=365, y_R=6\ 350, z_R=190$
	bandwidth/ GHz	$B=1$
	pulse repetition rate/ Hz	$PRF=300$
	pulse width/ μ s	$T_R=100$
	sampling frequency/ MHz	$F_s=2$
	carrier frequency/ GHz	$F_c=10$
roll parameters	roll period/s	$T_r=50$
	imaging time/s	0-150
	sampling points in time by FFT in fast time	$1.02T_{pf}$

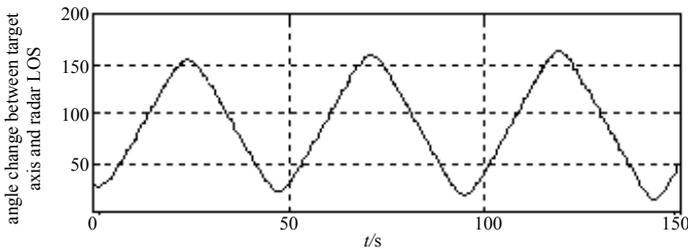


Fig.9 Angle change between target axis and radar LOS after 150 s from the shutdown
图 9 关机后 150 s 雷达视线与目标主轴夹角的变化

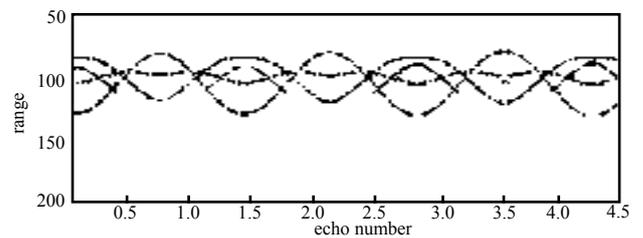


Fig.10 Range profiles of echo in 0 s-150 s
图 10 0 s~150 s 所有回波成的一维距离像

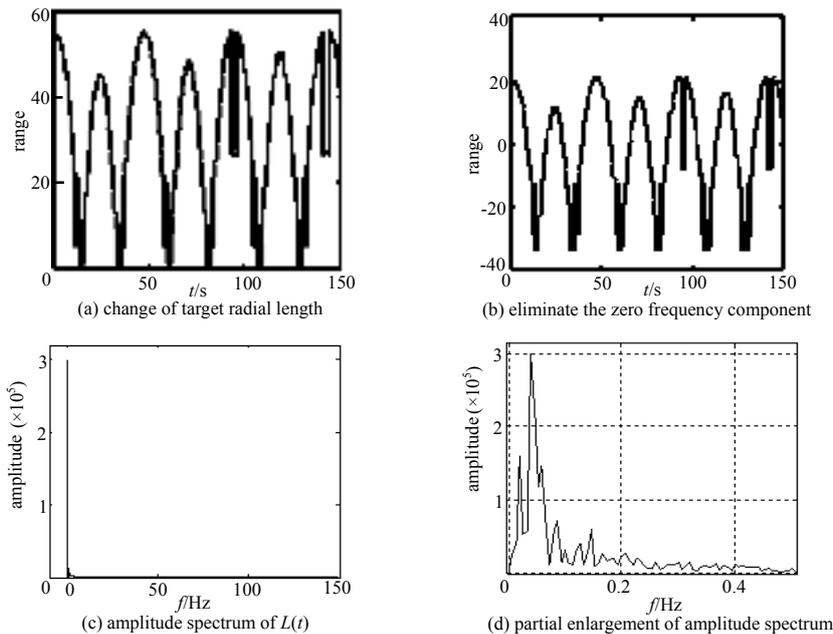


Fig.11 Extracting the changes of target radial length by range profile
图 11 一维距离像中提取目标径向尺寸变化

表2 目标翻滚频率提取结果
Table2 Extraction results of rolling frequency

estimate compared with true	length variation	estimation value	true value	estimation error
f/Hz	0.040 0	0.020 0	0.020 0	0
period/s	25	50	50	0

4 结论

中段翻滚目标研究因为其内容的敏感性,公开发表的论文较少,更没有公开的中段翻滚目标雷达回波数据,因此研究中段翻滚目标雷达仿真就十分必要,本文从中段翻滚目标的运动、散射等特性出发,建立了中段翻滚目标的运动模型,推导出了宽带 LFM 雷达回波的数学表达式,并利用目标径向尺寸的周期变化估计翻滚目标的翻滚周期。文章最后根据关机点位置、速度信息描绘了弹道曲线,并根据受力情况得到了中段目标姿态运动参数,根据移动散射点模型得到了雷达回波。结果表明,中段翻滚目标宽带雷达回波与目标的姿态运动参数、形体参数都有较大关系,这为中段翻滚目标的目标识别、二维 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)成像提供了基础。

参考文献:

- [1] 白广周,张洪祥. 基于雷达 RCS 测量的空间翻滚目标识别研究[J]. 飞行器测控学报, 1999,18(1):50-58. (BAI Guangzhou,ZHANG Hongxiang. Spatial Rolling Target Identification Research Based on RCS Survey[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 1999,18(1):50-58.)
- [2] 黄培康,阎锦. 弹道导弹(BM)对抗中的识别与反识别技术[J]. 航天电子对抗, 2005,21(3):1-4. (HUANG Peikang,YAN Jing. The Recognition and Anti-recognition Technology in Ballistic Missile(BM) Resistance[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2005,21(3):1-4.)
- [3] 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, 2006. (FENG Dejun. Radar Identification and Appraisal Research of Midcourse Target[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2006.)
- [4] 贾沛然,沈为异. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙:国防科学技术大学出版社, 1987. (JIAN Peiran,SHEN Weiyi. Ballistic Missile Ballistics[M]. Changsha:National University of Defense Technology Press, 1987.)
- [5] 刘永祥. 导弹防御系统中的雷达目标综合识别研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2004. (LIU Yongxiang. Research on Radar Target Discrimination in the Missile Defense System[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2004.)
- [6] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2006. (BAO Zheng,XING Mengdao,WANG Tong. Radar Image Technology[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2006.)
- [7] 毕莉. 基于一维距离像的中段弹道目标尺寸特性反演研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007. (BI Li. Research on extraction length of midcourse missile target based on range profile[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2007.)
- [8] Richard G Lyons. 数字信号处理[M]. 朱光明,程建远,刘保童,等,译,北京:机械工业出版社, 2006. (Richard G Lyons. Digital Signal Processing[M]. Beijing:China Machine Press, 2006.)
- [9] 李素之,万建伟. 时域离散信号处理[M]. 长沙:国防科学技术大学出版社, 1994. (LI Suzhi,WAN Jianwei. Discrete TimeDomain Signal Processing[M]. Changsha:National University of Defense Technology Press, 1994.)

作者简介:



袁仕继(1981-),男,四川通江人,在读硕士研究生,主要研究方向模式识别及雷达信号处理.email:yuanke520@sohu.com.

许世平(1982-),男,江苏盐城人,在读硕士研究生,主要研究方向为软件工程。

博 远(1984-),男,吉林省四平人,本科,主要从事电子对抗研究