

# 弹道中段进动目标的微多普勒研究

孙照强, 李宝柱, 鲁耀兵

(中国航天科工集团二院二十三所, 北京 100854)

**摘要:** 弹道目标的微动特性正成为目标识别领域的一个研究热点。建立了弹道目标进动的数学模型, 分析了有翼弹头和无翼弹头进动特性对雷达回波调制的差异性, 分别进行了有翼弹头进动仿真实验和有翼弹头在微波暗室条件下的微动实验。暗室实验结果证明了仿真结果分析的正确性, 同时也证明了进动数学模型的正确性。

**关键词:** 导弹防御; 进动; 微多普勒; 目标识别

**中图分类号:** TN 95      **文献标志码:** A

## Research on micro-Doppler of ballistic midcourse target with precession

SUN Zhao-qiang, LI Bao-zhu, LU Yao-bing

(Inst. of No. 23, Second Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The micro-motion speciality of ballistic targets is becoming a research hotspot in the domain of target recognition. The mathematical model of precession of ballistic missiles is established, the difference between warhead with vanes and warhead with no vanes is analyzed, and the simulation experiment of warhead with vanes precession and micro-motion experiment in darkroom are carried out respectively. The experimental result in darkroom proves that the analysis of simulation result is correct, which also verifies the mathematical model of precession in another aspect.

**Keywords:** missile defense; precession; micro-Doppler; target recognition

## 0 引言

弹道导弹防御最关键的问题就是对弹头和诱饵的识别问题。随着传感器测量能力和信号处理水平的提高, 对弹道目标微动特性的测量和分析正在成为当前目标探测与识别领域的新兴研究方向<sup>[1]</sup>。应用微多普勒信息进行目标识别是一种非常具有潜在优势的技术手段。典型的弹道导弹飞行过程如图 1 所示, 弹道导弹从发射到攻击一般经历弹箭分离、诱饵释放、惯性飞行以及再入等特征事件, 由于弹箭分离以及诱饵释放时对弹头的横向干扰, 弹头在中段和再入段飞行过程中存在微动<sup>[1]</sup>。自旋弹头最典型的微动是进动 (precession) 特性, 即弹头在绕自身对称轴自旋 (spinning) 的同时, 绕着空间某定向轴进行锥旋 (coning)。其实, 进动是自旋弹道目标所共有的特征, 弹道目标的进动特性同其电磁散射特性、轨道特性一样, 是弹头的固有属性, 它可以作为弹头类目标识别的重要特征量, 也可以用来区分球类目标。因此, 研究弹道目标的微动特性对识别真假弹道目标非常必要。

由于弹道目标进动特性的敏感性, 国外对进动的报道多为综述性文章。为验证利用弹头及弹头类诱饵的进动特

性进行真假识别的可行性, 美国分别于 1990 年的 3 月和 10 月进行了两次飞行试验, 称为“Firefly”试验<sup>[3]</sup>。试验中, 可控锥体气球模拟了几种不同的进动过程, 并同时利用 L 波段雷达, X 波段雷达和激光雷达进行观测。

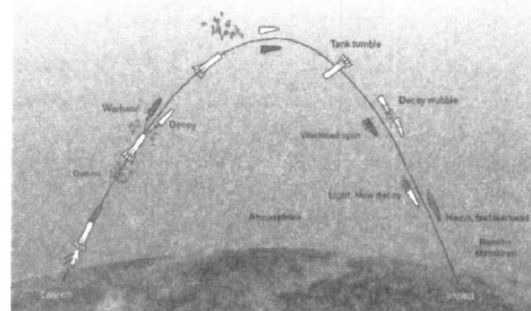


图 1 典型弹道导弹飞行过程<sup>[2]</sup>

本文以弹头为例研究弹道目标进动的微多普勒特性, 建立弹头进动的一般模型, 推导进动微多普勒的理论公式, 分析无翼弹头和有翼弹头进动对雷达回波调制的差异性; 进行仿真实验, 并对仿真结果进行分析; 进行微波暗室下有翼弹头微动 (自旋, 锥旋, 进动) 实验, 实验结果证明了仿真

结果分析的正确性,同时也证明了进动数学模型的正确性。

### 1 弹头进动的数学模型

#### 1.1 弹头进动的一般模型

如图2所示,雷达静止,雷达坐标系(U,V,W)的原点为Q,参考坐标系(X,Y,Z)和雷达坐标系始终平行。目标坐标系(x,y,z)随目标一起运动,它与参考坐标系(X,Y,Z)具有同一原点O,点O在弹头的质心上。

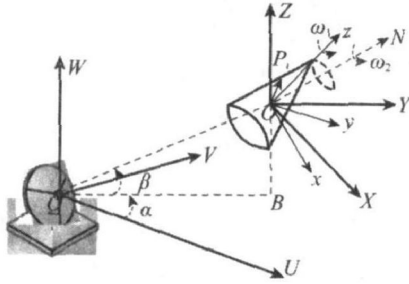


图2 弹头进动一般模型

假设点O在雷达坐标系(U,V,W)中的方位角和俯仰角分别是 $\alpha, \beta$ ,雷达坐标系原点Q到目标质心O的距离为 $R_0$ ,则

$$\mathbf{QO} = \mathbf{R}_0 = (R_0 \cos \alpha \cos \beta, R_0 \sin \alpha \cos \beta, R_0 \sin \beta)^T \quad (1)$$

雷达视线上的单位矢量为

$$\mathbf{n} = (\cos \alpha \cos \beta, \sin \alpha \cos \beta, \sin \beta)^T \quad (2)$$

为了研究弹头进动的方便,假设弹头和雷达之间相对的平动已经通过相应的补偿手段补偿掉,剩下的只有弹头微动——进动。下面从弹头进动是自旋运动和锥旋运动叠加入手,建立进动的数学模型。

##### (1) 弹头先绕目标坐标系Oz轴自旋

设在目标坐标系(x,y,z)中,目标自旋角速度 $\boldsymbol{\omega}_1 = (0, 0, \omega_z)^T, \Omega_1 = \|\boldsymbol{\omega}_1\| = \omega_z$ ,散射点 $P_i$ 在(x,y,z)中的坐标为 $\mathbf{r}_{i0} = (x_0, y_0, z_0)^T$ ,则在参考坐标系(X,Y,Z)中, $P_i$ 点坐标为 $\mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0}$ ,自旋轴的单位矢量为

$$\boldsymbol{\omega}'_1 = (\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z) = \mathfrak{R}_{ini} \boldsymbol{\omega}_1 / \|\boldsymbol{\omega}_1\| \quad (3)$$

式中, $\mathfrak{R}_{ini}$ 为用欧拉角 $(\phi, \theta, \psi)$ 表示的初始旋转矩阵,其定义如下。

$$\mathfrak{R}_{ini} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\boldsymbol{\omega}'_1$ 对应的斜对称矩阵<sup>[4]</sup>为

$$\boldsymbol{\omega}'_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\omega'_z & -\omega'_y \\ \omega'_z & 0 & -\omega'_x \\ -\omega'_y & \omega'_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则自旋矩阵可以表示为

$$\mathfrak{R}_1 = \exp(\Omega_1 \hat{\boldsymbol{\omega}}'_1 t) = \mathbf{I} + \hat{\boldsymbol{\omega}}'_1 \sin \Omega_1 t + \hat{\boldsymbol{\omega}}_1'^2 (1 - \cos \Omega_1 t) \quad (6)$$

所以,在t时刻 $P_i$ 的坐标为

$$\mathbf{r}'_i = \mathfrak{R}_s \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0} \quad (7)$$

(2) 弹头再绕锥旋轴ON以角速度 $\Omega_2$ 进行锥旋

设ON在(X,Y,Z)中的方位角和俯仰角分别为 $\alpha_N, \beta_N$ ,则ON方向的单位矢量为

$$\mathbf{n}_2 = [\cos \alpha_N \cos \beta_N, \sin \alpha_N \cos \beta_N, \sin \beta_N]^T \quad (8)$$

则其对应的斜对称矩阵为

$$\boldsymbol{\omega}'_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \beta_N & \sin \alpha_N \cos \beta_N \\ \sin \beta_N & 0 & -\cos \alpha_N \cos \beta_N \\ -\sin \alpha_N \cos \beta_N & \cos \alpha_N \cos \beta_N & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

则在t时刻的锥旋旋转矩阵为

$$\mathfrak{R}_c = \exp(\Omega_2 \hat{\boldsymbol{\omega}}'_2 t) = \mathbf{I} + \hat{\boldsymbol{\omega}}'_2 \sin \Omega_2 t + \hat{\boldsymbol{\omega}}_2'^2 (1 - \cos \Omega_2 t) \quad (10)$$

在t时刻在中(X,Y,Z),散射点 $P_i$ 的坐标为

$$\mathbf{r}_t = \mathfrak{R}_c \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0} \quad (11)$$

从雷达到散射点 $P_i$ 的距离矢量为

$$\mathbf{QP}_i = \mathbf{QO} + \mathbf{OP}_i = \mathbf{R}_0 + \mathbf{r}_t = \mathbf{R}_0 + \mathfrak{R}_c \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0} \quad (12)$$

则散射点 $P_i$ 到雷达的距离为

$$R_i(t) = \|\mathbf{QP}_i\| = \|\mathbf{R}_0 + \mathfrak{R}_c \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0}\| \quad (13)$$

假设雷达发射单载频信号,散射点个数为N,散射点的电磁散射系数为 $\rho_i$ ,则回波信号经过解调后的基频信号可以表示为

$$S_r(t) = \sum_{i=1}^N \rho_i \exp(j4\pi f R_i(t)/c) \quad (14)$$

式中,f是载波频率,c是电磁波传播速度, $R_i(t)$ 为第i个散射点到雷达的距离。

由于窄带信号不具有距离分辨能力,直接对回波信号即式(14)进行时频分析就可得到微多普勒随时间的变化关系。

#### 1.2 弹头进动微多普勒的理论值

进动目标的微多普勒理论公式为

$$f_{m-D} = \sum_i \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_i(t)}{dt} = \sum_i \frac{2f}{c} \frac{d}{dt} R_i(t) =$$

$$\frac{2f}{c} \sum_i \frac{1}{2R_i(t)} \frac{d}{dt} [(\mathbf{R}_0 + \mathfrak{R}_c \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0})^T (\mathbf{R}_0 + \mathfrak{R}_c \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0})] =$$

$$\frac{2f}{c} \sum_i \left[ \frac{d}{dt} (\mathfrak{R}_c \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0}) \right]^T \mathbf{n}_i =$$

$$\frac{2f}{c} \sum_i [(\Omega_2 \hat{\boldsymbol{\omega}}'_2 \mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_c \Omega_1 \hat{\boldsymbol{\omega}}'_1) \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0}]^T \mathbf{n}_i =$$

$$\frac{2f}{c} \sum_i [(\mathfrak{R}_c \Omega_2 \hat{\boldsymbol{\omega}}'_2 + \mathfrak{R}_c \Omega_1 \hat{\boldsymbol{\omega}}'_1) \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0}]^T \mathbf{n}_i =$$

$$\frac{2f}{c} \sum_i [\mathfrak{R}_c (\Omega_1 \hat{\boldsymbol{\omega}}'_1 + \Omega_2 \hat{\boldsymbol{\omega}}'_2) \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0}]^T \mathbf{n}_i \approx$$

$$\frac{2f}{c} \sum_i [\mathfrak{R}_c (\Omega_1 \hat{\boldsymbol{\omega}}'_1 + \Omega_2 \hat{\boldsymbol{\omega}}'_2) \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0}]^T \mathbf{n} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{n}_i = (\mathbf{R}_0 + \mathfrak{R}_c \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0}) / (\|\mathbf{R}_0 + \mathfrak{R}_c \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0}\|)$ 是 $\mathbf{QP}_i$ 的单位矢量。若 $\|\mathbf{R}_0\| \gg \|\mathfrak{R}_c \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_{ini} \mathbf{r}_{i0}\|$ , $\mathbf{n}_i$ 可以

近似表示为  $n_i = R_0 / \|R_0\| = n$ , 即雷达视线方向, 即式(2)。

### 1.3 剖析弹头进动数学模型

弹头分为有翼弹头和无翼弹头, 其进动示意图如图 3 所示, 它们对雷达回波的调制是有差异的。

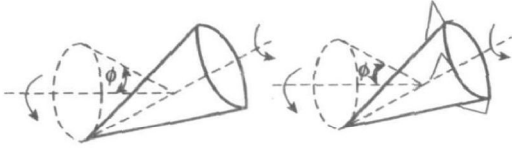


图 3 无翼弹头和有翼弹头进动示意图

(1) 无翼弹头绕其对称轴自旋, 由于其旋转不变性, 即在自旋过程中, 存在散射点的等效替换, 对雷达回波的调制是没有变化的, 自旋矩阵  $\mathfrak{R}$  等效为单位矩阵。因此, 在无翼弹头进动过程中, 雷达回波仅受锥旋调制。所以, 散射点到雷达的距离为

$$R_i(t) = \|QO + \mathfrak{R}_c \mathfrak{R}_{mi} r_{i0}\| \quad (16)$$

(2) 对有翼弹头自旋而言, 它已不具备旋转不变性, 因此, 在有翼弹头进动过程中, 雷达回波同时受自旋和锥旋调制。此时, 散射点到雷达的距离如式(13)所示。

(3) 在建模过程中没有考虑散射点的遮挡效应。在实际雷达中, 无翼弹头进动等效为锥旋, 不受遮挡效应影响; 但有翼弹头进动受遮挡效应影响。

## 2 仿真实验

由于无翼弹头进动等效为锥旋运动, 文献[5]中对锥旋微多普勒已做了详细分析, 在此对无翼弹头进动不再做仿真分析。以下仅对有翼弹头进动做仿真分析。

### 2.1 仿真参数设定

假设点  $O$  位于  $(U=0, V=5\ 000\ \text{m}, W=8\ 660\ \text{m})$  处, 初始欧拉角为  $(\phi=0^\circ, \theta=82^\circ, \psi=0^\circ)$ , 自旋角速度  $\Omega_1 = 4\pi\ \text{rad/s}$ 。进动轴  $\vec{ON}$  的方位角  $\alpha_N = -90^\circ$ , 俯仰角  $\beta_N = 0^\circ$ , 锥旋角速度  $\Omega_2 = \pi\ \text{rad/s}$ 。设有三个强散射点, 在目标坐标系  $(x, y, z)$  中, 散射点  $P_1$  为  $(0, 0, 1.05)$ , 散射点  $P_2$  为  $(0.21, -0.4, -0.58)$ , 散射点  $P_3$  为  $(-0.21, 0.4, -0.58)$ , 单位为  $\text{m}$ 。载频  $f = 5 \times 10^9\ \text{Hz}$ 。

### 2.2 仿真结果

可以得到有翼弹头进动微多普勒  $f_{m-D}$  随时间  $t$  变化的理论值如图 4 所示。

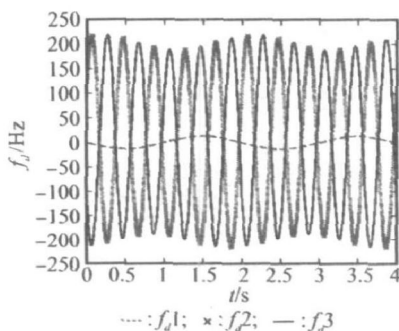


图 4 进动微多普勒随时间变化理论值

对有翼弹头进动回波信号式(14)进行时频分析, 可以得到图 5 所示的时频分布图。

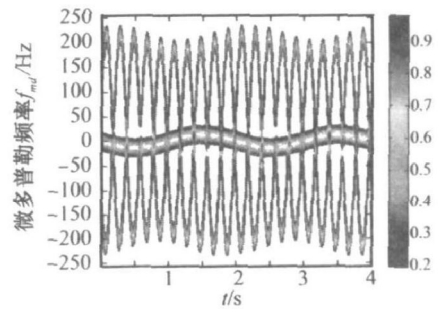


图 5 进动微多普勒时频分布仿真结果

### 2.3 仿真结果分析

(1) 进动是由自旋和锥旋叠加而成, 进动所生成的微多普勒可以看成是自旋微多普勒和锥旋微多普勒叠加而成。同时由于自旋频率较高, 锥旋频率较低, 所以, 图 4 中每个进动散射点的微多普勒包络是由变化较慢的锥旋形成, 其近似为正弦包络, 包络内部是变化较快的自旋微多普勒形成。

(2) 对位于弹头锥顶的散射点  $P_1$ , 自旋对它没有影响, 其只受锥旋的影响。因此, 与文献[5]中锥旋微多普勒一样, 它的微多普勒是随时间正弦变化的, 变化周期等于锥旋周期。

(3) 对于位于锥底的散射点  $P_2, P_3$ , 它们同时受弹头自旋和锥旋影响。因此, 它们微多普勒的周期与自旋周期  $T_1$  和锥旋周期  $T_2$  有关, 具体等于  $T_1$  和  $T_2$  最小公倍数。

## 3 微波暗室下有翼弹头微动实验

为了更深入的研究弹头目标的微多普勒特性, 我们在微波暗室条件下进行了弹头自旋、锥旋、进动的微多普勒提取实验。

### 3.1 实验参数

本次实验使用的弹头模型长度 163 cm, 弹头底部直径 50 cm, 弹头底部的叶片为三角翼, 长 22 cm, 宽 20 cm, 共 4 片。整个弹头用支架支撑着进行自旋、锥旋、进动。锥旋的支点距弹头底端平面 58 cm。自旋频率  $f_1 = 2\ \text{Hz}$  和锥旋频率  $f_2 = 0.5\ \text{Hz}$ , 章动角  $\phi = 8^\circ$ , 雷达视角即雷达视线与锥旋轴的夹角  $\theta = 75^\circ$ 。信号源为载频  $f = 5 \times 10^9\ \text{Hz}$  的窄带信号。

### 3.2 实验结果

考虑到弹头模型支架没有微动, 弹头微多普勒零频附近的频率会受到其影响, 因此, 对自旋和进动实验数据首先进行了高通滤波, 去掉了低频成分对提取微多普勒的影响, 其时频分析结果如图 6 和图 8 所示。对锥旋弹头回波直接进行微多普勒时频分析结果如图 7 所示。

CODT 算法的改善效果在较大规模数据库中尤为明显,说明其适合于处理大规模数据库。

## 7 结束语

本文从离散化,降维和属性选择标准三方面对传统决策树算法进行改进使其更适用于处理大规模数据库。改进后的 CODT 算法不但降低了计算成本而且试验表明该算法使决策树的规则简明性和预测精度得到了提高。

## 参考文献:

- [1] 文专,王正欧.一种高效的基于排序的 RBF 神经网络属性选择方法[J].计算机应用,2003,(8):34-36.
- [2] Buntine W, Niblett T. A further comparison of splitting rules for decision tree induction[J]. *Machine Learning*, 1992, 8(1): 75-85.
- [3] Kononenko I, Se J H. Attribute Selection for Modeling[J]. *Future Generation Computer Systems*, 1997, 13(2-3): 181-195.
- [4] Shih Y S. Families of splitting criteria for classification tree[J]. *Statistics and Computing*, 1999, 9(4): 309-315.
- [5] Kurgan L A, Cios K J. CAIM discretization algorithm[J]. *Knowledge and Data Engineering*, 2004, 2, 16(2): 145-153.
- [6] Wang Haixun, Yu P S. SSDT: a scalable subspace splitting

classifier for biased data[C]. *ICDM Proc., IEEE International Conference Proc.*, 2001: 542-549.

- [7] Quinlan J R. Induction of decision trees[J]. *Machine Learning*, 1986, 1(1): 81-106.
- [8] Quinlan J R. C4.5: programs for machine learning[M]. *San Mateo: Morgan Kaufmann*, 1993.
- [9] 钱国良,舒文豪,陈彬等.基于信息熵的特征子集选择启发式算法的研究[J].软件学报,1998,9(12):911-916.
- [10] Elomaa T, Rousu J. General and efficient multisplitting of numerical attributes[J]. *Machine Learning*, 1999, 36(3): 201-224.
- [11] Li Renpu, Wang Zheng'ou. An entropy-based discretization method for classification rules with inconsistency checking[J]. *Machine Learning and Cybernetics*, 2002, 11(1): 243-246.
- [12] Murphy P M, Merz C J. UCI repository of machine learning databases[OL]. <http://www.ics.uci.edu/mllearn/MLRepository.html>, 1998.
- [13] Ching John Y, Wong Andrew K C. Class-dependent discretization for inductive learning from continuous and mixed mode data[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 7(17): 641-651.

(上接第 540 页)

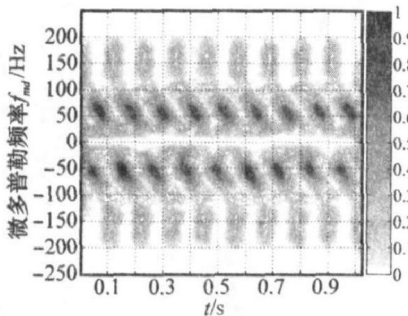


图 6 弹头自旋微多普勒时频分布

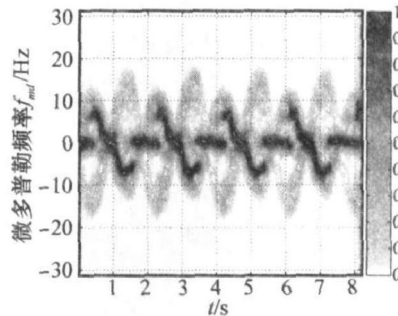


图 7 弹头锥旋微多普勒时频分布

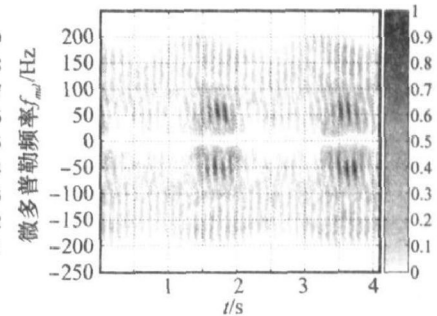


图 8 弹头进动微多普勒时频分布

## 3.3 实验结果分析

(1) 弹头自旋时,由于四个尾翼在旋转过程中存在遮挡,雷达只能测到目标在雷达视线范围内的情况。与直升机旋翼的“闪烁”效应相似,在雷达视线内,尾翼旋转过程中存在“闪烁”效应,如图 6 所示。这与散射点模型是有差异的。

(2) 弹头锥旋时,在雷达视线内的叶片始终在雷达视线内,此时不存在遮挡。从图 7 中可以很清楚地看到有两个强散射点的时频分布。另外,零频部分是由弹头支架导致。

(3) 弹头进动时,其时频分布如图 8 所示,其包络是由变化较慢的锥旋形成,其近似为正弦包络,包络内部是变化较快的自旋微多普勒形成。这表明了上节中进动仿真结果分析的正确性,并从一个侧面证明了进动数学模型是正确的。

## 4 结束语

进动是自旋弹道目标的一个典型的运动特征。本文建立了弹道目标进动的数学模型,对有翼弹头和无翼弹头进

动特性对雷达回波调制的差异性进行了详细分析,分别进行了有翼弹头进动仿真实验和有翼弹头在微波暗室条件下的微动实验。暗室实验结果证明了仿真结果分析的正确性,并从一个侧面证明了进动数学模型的正确性。这为下一步利用微多普勒进行目标识别奠定基础。

## 参考文献:

- [1] 庄钊文,刘永祥,黎湘.目标微动特性研究进展[J].电子学报,2007,35(3):520-525.
- [2] Nunn E C. The US army white sands missile range development of target motion resolution[J]. *Proc. of IEEE Electronics and Aerospace Systems Conventions. Arlington, USA: IEEE Press*, 1980: 346-352.
- [3] 陈行勇,黎湘,郭桂蓉,等.中段目标进动雷达特征提取[J].信号处理,2006,22(5):707-711.
- [4] Chen V C, Li F, Ho S, et al. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(4): 271-276.
- [5] Chen V C, Li F, Ho S, et al. Micro-Doppler effect in radar phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Trans. on AES*, 2006, 42(1): 2-21.