

空间进动目标的宽带雷达特征信号研究

马 超,许小剑

(北京航空航天大学电子信息工程学院,北京 100191)

摘 要: 本文将空间目标进动模型、宽带电磁散射计算模型以及线性调频(LFM)雷达回波信号模型相结合,提出了一种空间进动目标宽带雷达特征信号预测与高逼真度仿真的方法.利用进动目标的微波暗室测量数据,从雷达散射截面(RCS)和高分辨一维距离像时间序列两方面对模型的逼真度进行了验证,并在此基础上仿真了空间目标的动态宽带 LFM 雷达回波,分析了理想点散射体仿真进动目标特征信号的局限性和成对回波对雷达成像的影响.

关键词: 空间目标;进动;宽带雷达;特征信号;仿真

中图分类号: TN955+.2; V243.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2011)03-0636-07

Modeling of Wideband Radar Signature for Precession Space Objects

MA Chao, XU Xiao-jian

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A high fidelity wideband radar signature prediction model for space objects with precession is developed, where the micro-motion model, electromagnetic scattering calculation and linear frequency modulated (LFM) radar signal model are integrated. The fidelity of the model is demonstrated by comparing both the radar cross section (RCS) and high-resolution range profile time sequences with anechoic chamber measured data. Wideband LFM radar returns of dynamic space object are simulated and analyzed based on the proposed model, considering the limitations of ideal point scatterers model for the precession target signature simulation and the radar imaging distortions impact of paired echoes.

Key words: space objects; precession; wideband radar; signature signal; simulation

1 引言

微动对电磁波具有微多普勒调制、回波功率调制以及成像特征调制等作用.微动目标宽带回波信号反映了目标的电磁散射特性、几何结构特性和运动特性,为雷达目标探测和识别提供了新的途径^[1].随着先进传感器的测量能力和信号处理水平的提高,对空间目标微动特性的测量与分析已成为当前目标探测与识别领域的重要研究方向.

微动高速空间目标的运动一般可以分解成两部分:一是轨道运动,即目标质心的高速运动;二是目标姿态的变化,因目标形状、质量分布、姿态控制和大气扰动等因素影响而存在的翻滚、自旋、进动和章动等微动特征^[2~9].对于高速运动的空間目标,其微动对目标电磁散射特性的调制将造成雷达散射截面(RCS)的周期性起伏^[5]与一维距离像时间序列中强散射中心位置的周期性走动等影响^[7,8];而高速质心运动将对宽带雷达回波的多普勒相位产生调制,表现为目标的一维距离像发生移位、展宽等畸变^[9~11].

Victor C. Chen 详细阐述了微动点目标的微多普勒数学模型,并利用时频分析技术提取了实测数据中目标的微多普勒时频特征^[2,3].文献[4]进一步讨论了速度和加速度对摆动锥体点目标微多普勒特征的影响.文献[5]基于几何绕射理论(GTD),由锥体点目标 RCS 序列估计出了目标的进动参数.文献[6]从电磁散射理论出发,仿真了锥旋目标窄带雷达微多普勒回波信号.贺思三等人提出了一种利用进动目标上强散射中心在一维距离像序列上的位置变化来估计进动参数的方法^[7],并通过仿真和外场试验研究了旋转点目标距离像时间序列的变化特征^[8].文献[10]从目标冲击响应函数角度推导了高速运动目标线性调频(LFM)雷达回波的数学表达式.文献[11]基于理想点散射体分析了高速目标宽带 LFM 雷达回波模型.金光虎^[12]利用点散射体模型仿真了弹道中段目标的宽带雷达回波,分析了目标的微动特性并作了识别研究,同时指出微动目标散射中心模型是一种简单近似模型.研究表明,基于理想点散射体或 GTD 等效点源模型来仿真空间目标的雷达特征信号有以下局限性:(1)没有考虑散射中心的姿态变化特性;

(2)没有反映散射中心的位置随姿态不同而变化.

本文将空间目标进动模型、动态目标宽带电磁散射计算模型以及线性调频(LFM)雷达回波信号模型相结合,从而形成高速运动下的空间进动目标宽带雷达特征信号高逼真度仿真模型.其仿真回波不仅反映了目标散射随姿态、极化、频率等的变化,同时还反映了微动调制或非理想雷达系统对弹道高速进动目标成像的影响.

2 空间目标进动的数学模型

空间目标进动模型如图 1(a)所示.目标在本地坐标系 $OX_bY_bZ_b$ 中沿 OX_b 轴放置,坐标原点 O 为目标质心.目标绕其自身对称轴 OX_b 自旋,同时绕速度矢量 \boldsymbol{v} (称为锥旋轴)以进动角 γ 作锥旋运动^[2],一个旋转周期称为进动周期.雷达坐标系 $QUVW$ 原点 Q 位于雷达中心;参考坐标系 $OX_rY_rZ_r$ 原点为 O ,始终与雷达坐标系平行.则目标在空间中的运动可视为三种运动的叠加:质心沿空间轨迹平动、体对称轴绕速度矢量 \boldsymbol{v} 锥旋、目标绕体对称轴自旋.因此,本体坐标系随着目标的运动而运动,而参考坐标系只随目标质心高速平动.

图 1(a)中,设目标质心 O 初始时刻在雷达坐标系中的坐标矢量为 $\boldsymbol{n}_{\text{los}}$.目标锥旋的角速度为 Ω_c ,锥旋轴 \boldsymbol{v} 在参考坐标系中的方位角和俯仰角分别为 α_N, β_N ,则锥旋轴 \boldsymbol{v} 的单位矢量表示为

$$\boldsymbol{n}_v = (\cos\alpha_N \cos\beta_N, \sin\alpha_N \cos\beta_N, \sin\beta_N)^T \quad (1)$$

在本体坐标系中,目标的自旋角速度矢量为 $\boldsymbol{\omega}_s = (\omega_{sx}, 0, 0)^T, \Omega_s = \|\boldsymbol{\omega}_s\| = \omega_{sx}$.目标上任一散射点 P 在本体坐标系中的初始位置为 $\boldsymbol{r}_b = (x_b, y_b, z_b)^T$,则点 P 在参考坐标系中初始坐标为 $\boldsymbol{r}_0 = \boldsymbol{R}_{\text{init}} \boldsymbol{r}_b$,其中 $\boldsymbol{R}_{\text{init}}$ 为目标初始姿态欧拉角 (φ, θ, ψ) (可由 $\gamma, \alpha_N, \beta_N$ 求得)表示的初始旋转矩阵,如图 1(b)所示.本体坐标系最初与参考坐标系重合,首先将本体坐标系绕其 OZ_b 轴旋转 ψ 角,然后绕本体坐标系的新 OY' 轴旋转 θ 角,最后再绕本体坐标系的 OX_b 轴旋转 φ 角,这就得到一个新的姿态欧拉角 (ψ, θ, φ) ,相应的初始旋转矩阵定义如下^[2,13]:

$$\boldsymbol{R}_{\text{init}} = \boldsymbol{R}_z(\psi) \boldsymbol{R}_y(\theta) \boldsymbol{R}_x(\varphi) \quad (2)$$

在 t 时刻点 P 在参考坐标系的位置矢量为:

$$\boldsymbol{r}_t = \boldsymbol{R}_c(t) \boldsymbol{R}_s(t) \boldsymbol{R}_{\text{init}} \boldsymbol{r}_0 \quad (3)$$

式中 $\boldsymbol{R}_c(t), \boldsymbol{R}_s(t)$ 分别为 t 时刻锥旋旋转矩阵和自旋旋转矩阵,由 Rodrigues 公式^[2,13]

$$\boldsymbol{R}(t) = \boldsymbol{I} + \widehat{\boldsymbol{\omega}}' \sin\Omega t + \widehat{\boldsymbol{\omega}}'^2 (1 - \cos\Omega t) \quad (4)$$

求得.其中, \boldsymbol{I} 为 3×3 单位矩阵; Ω 为旋转角速度; $\boldsymbol{\omega}' =$

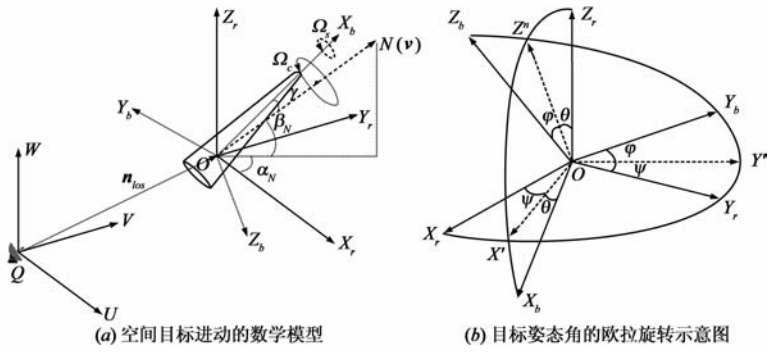


图1 空间目标进动模型及目标姿态旋转示意图

$(\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z)^T$ 为所绕单位方向矢量, $\widehat{\boldsymbol{\omega}}'$ 是 $\boldsymbol{\omega}'$ 所对应的反对称矩阵.

目标自旋轴在参考坐标系中的单位矢量为

$$\boldsymbol{\omega}'_s = (\omega'_{sx}, \omega'_{sy}, \omega'_{sz})^T = \frac{\boldsymbol{R}_{\text{init}} \cdot \boldsymbol{\omega}_s}{\Omega_s} \quad (5)$$

则有

$$\boldsymbol{R}_s(t) = \boldsymbol{I} + \widehat{\boldsymbol{\omega}}'_s \sin\Omega_s t + \widehat{\boldsymbol{\omega}}'^2_s (1 - \cos\Omega_s t) \quad (6)$$

同理,由锥旋轴单位矢量 \boldsymbol{n}_v 可得

$$\boldsymbol{R}_c(t) = \boldsymbol{I} + \widehat{\boldsymbol{\omega}}'_c \sin\Omega_c t + \widehat{\boldsymbol{\omega}}'^2_c (1 - \cos\Omega_c t) \quad (7)$$

其中,式(6)、(7)中的 $\widehat{\boldsymbol{\omega}}'_s$ 与 $\widehat{\boldsymbol{\omega}}'_c$ 分别是 $\boldsymbol{\omega}'_s, \boldsymbol{n}_v$ 所对应的反对称矩阵.

因此,在 t 时刻本体坐标系到参考坐标系(雷达坐标系)的坐标变换矩阵为:

$$\boldsymbol{R}_{qb}(t) = \boldsymbol{R}_b(t) = \boldsymbol{R}_c(t) \boldsymbol{R}_s(t) \boldsymbol{R}_{\text{init}} \quad (8)$$

由旋转矩阵的性质可知,在 t 时刻,雷达坐标系到本体坐标系的坐标变换矩阵为

$$\boldsymbol{R}_{bq}(t) = \boldsymbol{R}_{qb}^T(t) = \boldsymbol{R}_{\text{init}}^T \boldsymbol{R}_s^T(t) \boldsymbol{R}_c^T(t) \quad (9)$$

3 动态目标的宽带电磁散射计算

通常单个雷达脉冲的观测时间很短,而多数弹道目标的锥旋频率一般为几赫兹.因此,在极短的单个雷达脉冲持续时间内,可以近似认为目标姿态不变.对给定的雷达系统参数(如带宽、中心载频、天线极化方式等)、雷达位置、目标空间轨迹和进动等参数,计算出某时刻 t 的雷达视线方位角和俯仰角、雷达与目标相位参考点的径向距离,进而采用电磁散射计算理论与算法计算出目标在每一时刻的散射场.

对于具有涂覆层的空间目标,本模型采用物理光学(PO)与阻抗边界条件(IBC)结合的方法来求解涂覆多层雷达吸波材料的金属面元的 RCS;利用物理绕射理论(PTD)及等效边缘电磁流法(MEC)计算棱边的 RCS,详细算法参见文献[14].

在 t 时刻,目标姿态角可提取如下,由坐标变换矩阵 \boldsymbol{R}_{bq} ,雷达视线在目标本体坐标系中的坐标可表示

为^[15]:

$$\mathbf{n}_b(t) = [n_{bx}(t), n_{by}(t), n_{bz}(t)]^T = -\mathbf{R}_{bq}(t) \cdot \mathbf{n}_{\text{los}}(t) \quad (10)$$

其中, $\mathbf{n}_{\text{los}}(t)$ 为 t 时刻雷达视线矢量; $\mathbf{n}_b(t)$ 为其在本地坐标系中的矢量表示; $n_{bx}(t)$ 、 $n_{by}(t)$ 、 $n_{bz}(t)$ 分别为 $\mathbf{n}_b(t)$ 的坐标分量. 进一步转换可得

$$r(t) = \sqrt{n_{bx}^2(t) + n_{by}^2(t) + n_{bz}^2(t)} \quad (11a)$$

$$\beta(t) = \arctan \frac{n_{by}(t)}{n_{bx}(t)} \quad (11b)$$

$$\epsilon(t) = \arccos \frac{n_{bz}(t)}{r(t)} \quad (11c)$$

$$\eta(t) = \arccos \frac{n_{bx}(t)}{r(t)} \quad (11d)$$

其中, $\beta(t)$ 和 $\epsilon(t)$ 分别为雷达视线在目标本体坐标系中的方位角和俯仰角; $\eta(t)$ 为雷达视线与目标体对称轴的夹角.

4 宽带 LFM 雷达回波信号模型

归一化的 LFM 信号可表示为:

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left\{j\left[2\pi(f_c t + \frac{1}{2}\mu\hat{t}^2) + \phi_0\right]\right\} \quad (12)$$

其中, f_c 为信号中心频率; T_p 为脉冲宽度; μ 为线性调频斜率; $B = \mu T_p$ 为信号带宽; $\hat{t} = t - mT_r$ 为快时间; $t_m = mT_r$ 为慢时间; T_r 为脉冲重复周期; m 表示发射脉冲的序号; ϕ_0 为信号的初始相位; $\text{rect}(u)$ 函数定义为

$$\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1/2 \\ 0, & |u| > 1/2 \end{cases} \quad (13)$$

考虑第 m 个脉冲重复周期的接收回波, 对于脉冲 T_p 内以常速 $v(t_m)$ 飞行的目标而言, 其接收回波可表示为^[9-11]:

$$\begin{aligned} s_r(\hat{t}, t_m) &= \sqrt{\sigma_{pq}(\beta(t), \epsilon(t), f(\hat{t}), \hat{t})} \sqrt{\alpha(t_m)} \\ &\cdot s(\alpha(t_m)(\hat{t} - 2R(0, t_m)/c), t_m) \\ &= \sqrt{\sigma_{pq}(\beta(t), \epsilon(t), f(\hat{t}), \hat{t})} \sqrt{\alpha(t_m)} \\ &\cdot \text{rect}\left(\frac{\alpha(t_m)(\hat{t} - 2R(0, t_m)/c)}{T_p}\right) \\ &\cdot \exp\{j2\pi[f_c t_m + f_c \alpha(t_m)(\hat{t} - 2R(0, t_m)/c) \\ &+ \frac{\mu}{2} \alpha^2(t_m)(\hat{t} - 2R(0, t_m)/c)^2] + j\phi_0\} \quad (14) \end{aligned}$$

其中, $\sqrt{\sigma_{pq}(\beta(t), \epsilon(t), f(\hat{t}), \hat{t})}$ 为动态目标的宽带复散射幅度; p 和 q 分别表示电磁波入射场和接收天线的极化方向; $(\beta(t), \epsilon(t))$ 为雷达视线相对目标的方位角和俯仰角序列; $\alpha(t_m)$ 为第 m 个脉冲重复周期内速度时间压缩或扩展因子; $f(\hat{t})$ 为雷达入射波频率. 且有

$$\alpha(t_m) = \frac{c - v(t_m)}{c + v(t_m)} \approx 1 - \frac{2v(t_m)}{c}, \quad |v(t_m)| \ll c \quad (15)$$

$$f(\hat{t}) = \sqrt{\alpha(t_m)} [f_c + \mu \alpha(t_m) (\hat{t} - \frac{2R(0, t_m)}{c})] \quad (16)$$

其中, $R(0, t_m)$ 、 $v(t_m)$ 分别为第 m 个脉冲重复周期内目标到雷达之间的径向初始距离和径向平均速度, 并定义目标远离雷达时, 速度为正.

相应的目标质心运动产生的多普勒频率定义为

$$f_d(t_m) = -\frac{2v(t_m)}{\lambda} \quad (17)$$

其中, λ 为雷达波长.

实际雷达系统存在非理想的幅度和相位响应特性. 假设系统的幅度和相位特性分别为 $A(f)$ 和 $\phi(f)$, 则雷达系统频响特性可以表示为

$$H(f) = A(f) \exp\{j\phi(f)\} \quad (18)$$

在理想情况下, $A(f)$ 是一个常量, 而 $\phi(f)$ 是一条直线, 而实际系统则不然. 此外, 在雷达采样周期内的目标微动导致的采样频率间隔不均匀等也会引入幅相误差. 一般情况下, 系统幅相误差与失真在带内的波动周期数相对于宽带成像雷达的大时宽带宽积来说是很小的. 因此, 忽略时间延迟并根据驻定相位原理, 线性调频信号 $s(t)$ 通过该系统后的输出为^[16]:

$$s_{\text{out}}(t) = s(t)H(f) \Big|_{f=\frac{1}{2\pi}\varphi'(t)} \quad (19)$$

其中, $\varphi'(t)$ 为信号 $s(t)$ 的相位导数. 对式(14)中的相位项微分可得回波信号的频率为:

$$f = f_c \alpha(t_m) + \mu \alpha^2(t_m) (\hat{t} - 2R(0, t_m)/c) \quad (20)$$

因此, 非理想雷达系统的输出信号为

$$\begin{aligned} s_r(\hat{t}, t_m) &= \sqrt{\sigma_{pq}(\beta(t), \epsilon(t), f(\hat{t}), \hat{t})} \sqrt{\alpha(t_m)} \\ &\cdot \text{rect}\left(\frac{\alpha(t_m)(\hat{t} - 2R(0, t_m)/c)}{T_p}\right) \\ &\cdot H[f_c \alpha(t_m) + \mu \alpha^2(t_m) (\hat{t} - 2R(0, t_m)/c)] \\ &\cdot \exp\{j2\pi[f_c t_m + f_c \alpha(t_m) (\hat{t} - 2R(0, t_m)/c) \\ &+ \frac{\mu}{2} \alpha^2(t_m) (\hat{t} - 2R(0, t_m)/c)^2] + j\phi_0\} \quad (21) \end{aligned}$$

假设第 m 个脉冲重复周期内, 宽带雷达利用窄带信号对目标中心进行滤波跟踪测得的参考距离为 $R_{\text{ref}}(t_m)$, 则参考信号为

$$\begin{aligned} s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m; R_{\text{ref}}(t_m)) &= \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{\text{ref}}(t_m)/c}{T_{\text{ref}}}\right) \\ &\cdot \exp\{j2\pi[f_c t_m + f_c (\hat{t} - 2R_{\text{ref}}(t_m)/c) \\ &+ \frac{\mu}{2} (\hat{t} - 2R_{\text{ref}}(t_m)/c)^2] + j\phi_0\} \quad (22) \end{aligned}$$

其中, T_{ref} 为参考信号脉冲宽度, 一般稍大于信号时宽 T_p .

去斜处理后的中频输出信号为

$$s_{\text{if}}(\hat{t}, t_m) = \sqrt{\sigma_{pq}(\beta(t), \epsilon(t), f(\hat{t}), \hat{t})} \sqrt{\alpha(t_m)}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \text{rect}\left(\frac{\alpha(t_m)(\hat{t}-2R(0, t_m)/c)}{T_p}\right) \\
& \cdot H[f_c \alpha(t_m) + \mu \alpha^2(t_m)(\hat{t}-2R(0, t_m)/c)] \\
& \cdot \exp\{-j2\pi[\frac{\mu}{2}(1-\alpha^2(t_m))(\hat{t}-2R_{\text{ref}}(t_m)/c)^2]\} \\
& \cdot \exp\{-j2\pi[(1-\alpha(t_m))f_c(\hat{t}-2R_{\text{ref}}(t_m)/c)]\} \\
& \cdot \exp\{-j2\pi[2\mu\alpha^2(t_m)(\hat{t}-2R_{\text{ref}}(t_m)/c)R_{\Delta}(0, t_m)/c \\
& + 2f_c\alpha(t_m)R_{\Delta}(0, t_m)/c - \frac{\mu}{2}(2\alpha(t_m)R_{\Delta}(0, t_m)/c)^2]\} \\
\end{aligned} \quad (23)$$

其中

$$R_{\Delta}(0, t_m) = R(0, t_m) - R_{\text{ref}}(t_m) \quad (24)$$

为简化对问题的讨论,考虑目标质心运动速度为零的情况,即 $v(t_m) = 0$, $\alpha(t_m) = 1$. 此时式(24)可简化为

$$\begin{aligned}
s_{ij}(\hat{t}, t_m) &= \sqrt{\sigma_{pq}(\beta(t), \varepsilon(t), f(\hat{t}), \hat{t})} \\
& \cdot \text{rect}\left(\frac{\hat{t}-2R(0, t_m)/c}{T_p}\right) \\
& \cdot H[f_c + \mu(\hat{t}-2R(0, t_m)/c)] \\
& \cdot \exp\{-j2\pi[\mu(\frac{f_c}{\mu} - \frac{2R_{\text{ref}}(t_m)}{c} + \hat{t})\frac{2R_{\Delta}(0, t_m)}{c} \\
& - \frac{\mu}{2}(\frac{2R_{\Delta}(0, t_m)}{c})^2]\} \\
\end{aligned} \quad (25)$$

去斜后的中频信号经傅立叶变换即可得到目标的高分辨一维距离像. 同时,对式(25)分析可以得到以下基本结论:

(1) $\sqrt{\sigma_{pq}(\beta(t), \varepsilon(t), f(\hat{t}), \hat{t})}$ 为目标的复散射函数,表征了雷达目标的散射中心分布,不仅是目标本体坐标 $(x_t, y_t, z_t)^T$ 的函数,同时是雷达频率 $f(\hat{t})$ 和目标姿态角 $(\beta(t), \varepsilon(t))$ 的函数. 由于微动的影响,导致目标姿态角 $(\beta(t), \varepsilon(t))$ 的周期性变化,即对目标上各面元和棱边而言,雷达入射矢量为受微动调制的矢量. 因此, $\sqrt{\sigma_{pq}}$ 示出了宽带复散射幅度随微动的变化规律,从而表征了周期性微动对目标电磁散射特性的调制作用:一方面表现为目标 RCS 的周期性起伏和微多普勒频率特征;另一方面,目标散射中心随姿态的周期性变化,在一维距离像时间序列中表现为强散射中心幅度的周期性起伏和位置的周期性走动.

(2) 对于非理想雷达系统或目标微动造成的频率采样非均匀性等, $H(f)$ 将引入系统幅相误差项. 根据成对回波理论^[17],在时域 $s_{ij}(\hat{t}, t_m)$ 将出现一系列的成对旁瓣,这些成对回波可看成是与真实目标延时不同的目标所产生的回波信号,即产生虚假目标.

(3) 雷达回波相位项由两部分组成:第一部分为同目标相对于参考中心的距离 $R_{\Delta}(0, t_m)$ 成线性变化的相位,产生相干差频信号,频率与目标和参考距离差成正

比;第二部分为残余视频相位(RVP),会导致相位畸变,对宽带成像处理无贡献,需要在成像处理中予以消除.

5 数值及实测结果的比对分析

本节针对无质心运动的进动目标,采用本文方法计算其随时间变化的电磁散射场,并同微波暗室实验测量结果比对,以验证本文模型的正确性. 同时,仿真并分析了非理想雷达系统成对回波对目标距离像时间序列的影响和理想点散射体仿真微动目标特征信号的局限性.

5.1 进动模型的微波暗室测量

微波暗室测量实验在北京环境特性研究所完成. 图 2(a) 示出了进动目标模型几何关系图,图 2(b) 为目标三维模型、等效相位中心及各等效散射中心的示意图. 雷达与目标均固定在高度为 7m 的平台上,目标模型可以实现三个维度的运动:自旋、俯仰及锥旋. 目标模型为锥柱裙组合体,总长度为 1400mm,底部直径 333mm,如图 2(b) 所示. 测量实验中未对数据作 RCS 定标处理,故下文中实测数据同计算数据比对时,均作归一化处理.

由目标的进动模型和电磁散射机理可知:对于旋转对称体,理想的自旋运动不会改变特定雷达视线下目标的散射特性,即不会引起等效散射中心的位置改变;而对于非旋转对称体则不然,如带有尾翼的弹体. 其主要等效散射中心如图 2(b) 所示,目标模型球冠的散射机理为镜面反射,其等效的散射中心随入射方向不同而在表面上滑动,通常仅在某一有限的方位角范围内有效;中部圆环结构和圆台底面环状结构的散射机理为边缘型散射,其散射中心为入射面与边缘的交点,在大部分范围内有效且有时值很大. 因此,此类目标的电磁散射特性只随 $\eta(t)$ 变化而变化. 理论分析亦可知,随着目标姿态变化,各等效散射中心在雷达视线上投影距离近似为正弦变化.

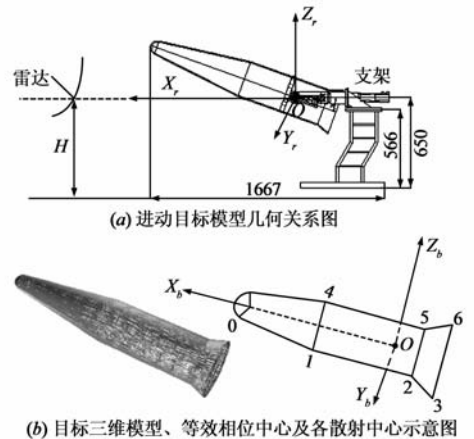


图2 微波暗室进动测量系统示意图

5.2 进动目标 RCS 计算与实验数据比对分析

具体参数如下:雷达频率 10GHz,水平极化,数据采样时间 8s,采样间隔 1.12ms.目标自旋频率 0Hz,锥旋频率 0.5Hz,进动角 15°,方位角为 70°.锥旋轴为 Ox_r 轴,雷达视线位于 $Ox_r Y_r$ 平面内.

图 3(a)与(b)分别示出了目标理论计算和实测数据随时间变化的 RCS 序列.由图可知,目标 RCS 随时间呈周期性变化,且变化周期等于进动周期 2s,理论计算与实测数据在变化趋势、动态范围和散射特征明显的区域曲线等变化规律上具有一致性.理论计算与实测数据比较存在一些差异,主要是微动测量系统中目标尾部支架(如图 2(a)所示)的固定回波(在后面将进一步分析)和随机抖动等的影响.

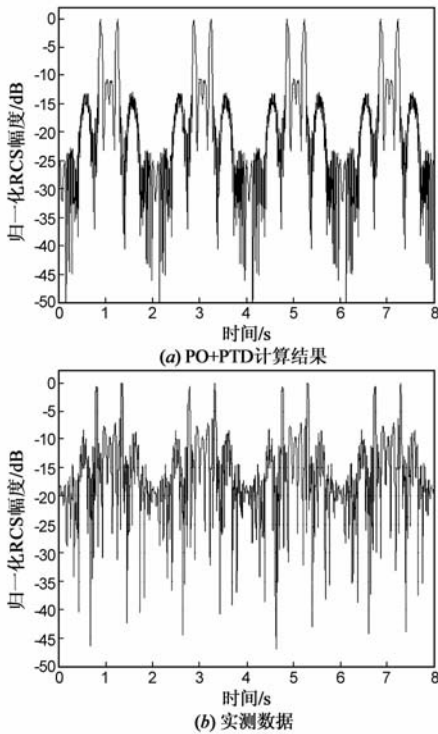


图3 随时间变化的进动目标RCS序列

5.3 目标距离像时间序列计算结果与实验数据比对分析

理论计算参数为:雷达中心频率 10GHz,带宽 4GHz,脉冲宽度 0.1s,脉冲重复周期 0.2s,水平极化.目标自旋频率 0Hz,锥旋频率 0.1Hz,进动角 10°,方位角为 70°.锥旋轴为 Ox_r 轴,雷达视线位于 $Ox_r Y_r$ 平面内,观测时间 25s.暗室测量实验参数:带宽 1GHz,其他参数与理论计算参数相同.由于测量中带宽较窄,为便于对比,图 4~图 6 中实测数据的成像结果均采用 Burg 超分辨率成像算法处理.

图 4(a)为采用 PO + PTD 方法计算的目标随时间变化的一维距离像序列,可见各强散射中心的径向位

置因进动而作近似正弦周期变化,且变化周期等于进动周期 10s.图 4(b)为其局部放大图,可知目标的顶部球冠和底部边缘散射较强,中部散射较弱,而底部圆台的散射较为复杂,正弦变化规律不够明显,主要是 2、3 号散射中心没有很好地分辨开造成的.

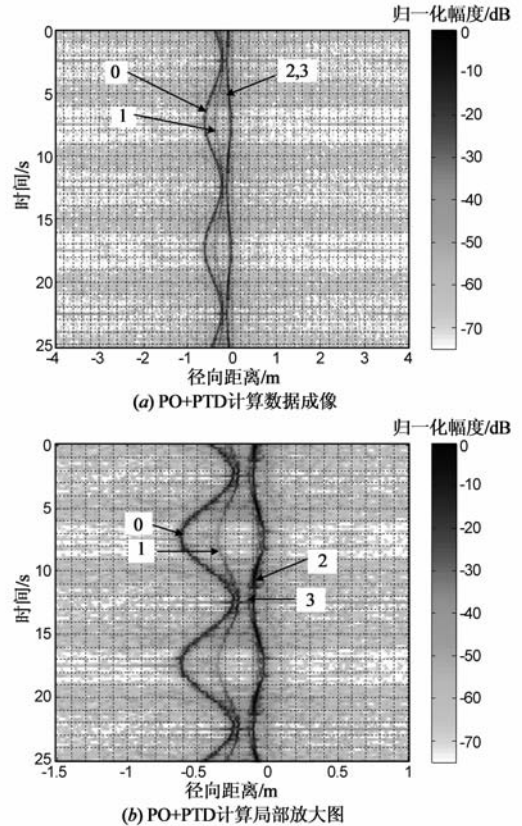


图4 理论计算的目标距离像时间序列

图 5(a)和(b)分别为实测数据整体成像图与局部放大图.从图中可以看出,目标上 0、1 号散射中心呈明显的正弦周期变化,变化周期为进动周期 10s;尾部 2、3 号散射中心无法分辨开,且尾部散射最强,0 号散射中心次之,1 号最弱.对比图 4 与图 5 可知,理论计算与实测数据所示的距离像时间序列均呈明显的周期变化,且幅度和位置变化特征均具有很好的一致性.理论计算成像结果中,0 号散射中心径向距离极小值与极大值分别为 -0.66m 、 -0.21m ,位移范围为 0.45m .实测数据成像结果中,0 号散射中心径向距离极小值与极大值分别为 -0.68m 、 -0.18m ,位移范围约为 0.5m .此处差异主要是由于实测数据的距离分辨率较低,尽管采用了超分辨处理仍难以准确分辨目标各散射中心所在距离单元所致.

此外,图 5 中除了目标本身的散射,在距离目标中心更远处,还有一径向距离恒定不变的强散射中心和若干成对出现的较弱散射中心.经分析可知:测量系统中固定支架后端的径向投影距离不随时间变化,对应

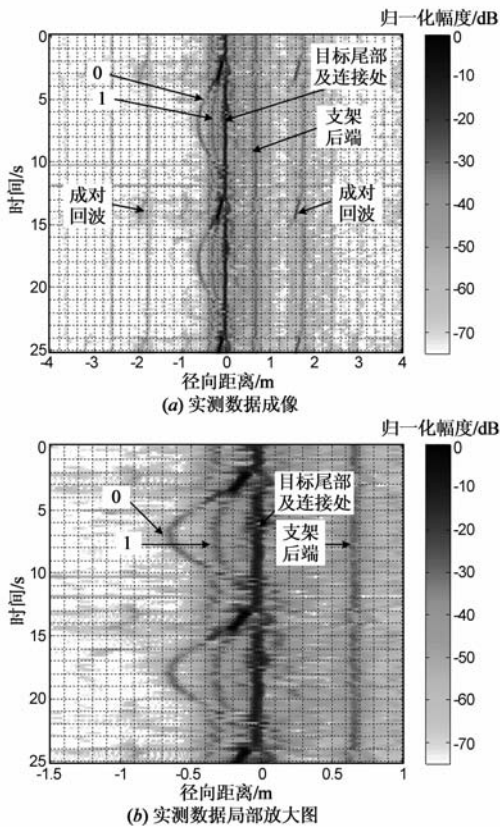


图5 实测数据的目标距离像时间序列

于图 5(a)中 0.65m 附近距离单元;而在 -1.75m 、 1.75m 附近出现的成对散射单元则为目标微动或系统误差造成的成对回波,这些可能的误差包括测量系统角速度受电机启动时间、旋转的不均匀等因素影响造成的相位参考中心的随机抖动,以及扫频测量中频率锁定精度不够高等。

为了进一步验证上述分析的正确性,图 6 给出了将随机抖动的相位等因素等效为雷达系统幅相误差,利用式(25)仿真计算得到的非理想条件下的目标距离像时间序列。仿真参数如下:幅频波动谐波误差 10%,波动频率 480Hz;相频波动的理想相位项幅度 0,谐波相位项峰值误差 0.06rad,波动频率 480Hz。对比图 5(a)和图 6 可知,计算结果所示成对回波所在距离单元与实测数据的成像结果是一致的,表明前文的分析是正确的。

作为最后一个例子,我们来研究本文模型结果同简单点目标模型结果之间的差异。图 7 示出了利用理想点散射体仿真所得的目标距离像时间序列。从图中可见,其球冠 0 号散射中心在微动中产生的径向距离位移范围约为 0.36m,远小于实验测量结果与理论计算模型结果。经分析,这是因为采用理想点散射体或 GTD 等效点源模型时,是将球冠散射简化为一个固定的点,而实际目标该等效散射中心随雷达入射方向不同是在表面滑动的。这种位移特性用点源模型没有表现出来,但采

用 PO + PTD 计算模型时,这种散射中心位置随姿态的滑动可得到较好的体现。

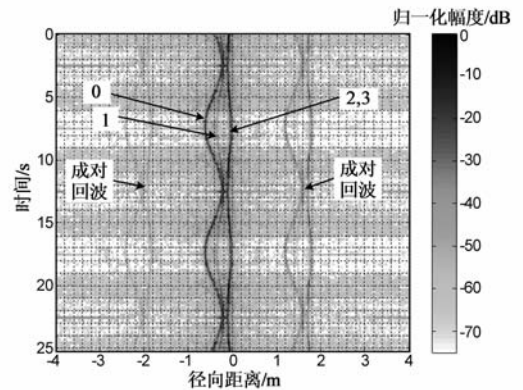


图6 非理想雷达系统的目标距离像时间序列(考虑成对回波)

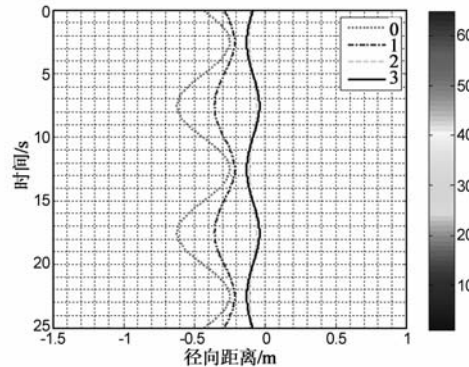


图7 理想点散射体仿真的目标距离像时间序列

6 结论

本文提出了一种将空间目标进动模型、动态目标宽带电磁散射计算模型与 LFM 雷达回波信号模型相结合的方法,对空间进动目标的宽带雷达特征信号进行了理论计算与分析,并同进动目标模型的微波暗室测量数据进行了比对分析。研究表明,对于具有复杂几何外形的目标,本文模型可以逼真地计算其微动雷达特征信号,并反映出微动调制造成或宽带雷达系统自身的幅相误差对一维高分辨距离像时间序列的影响。本文的方法可进一步推广到旋转、摆动、振动等其它微动条件下,目标的动态雷达特征信号的建模与仿真。

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.
Zhuang Zhao-wen, Liu Yong-xiang, Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. Acta Electronic Sinica, 2007, 35(3): 520-525. (in Chinese)
- [2] V C Chen, F Li, S S Ho, et al. Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(1): 2-21.

- [3] V C Chen. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions[J]. IET Signal Process, 2008, 2(3): 291 - 300.
- [4] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 等. 摆动锥体目标微多普勒分析和提取[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2497 - 2502.
Gao Hong-wei, Xie Liang-gui, Wen Shu-liang, et al. Analysis and extraction of micro-doppler induced by cone-shaped target's wobbling[J]. Acta Electronic Sinica, 2008, 36(12): 2497 - 2502. (in Chinese)
- [5] 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 Hang-yong, Li Xiang, Guo Gui-rong, et al. Radar feature extraction of micro-precession ballistic missile warhead[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(4): 643 - 646. (in Chinese)
- [6] Xiaojian Xu, Chao Ma, Lijie Zhang, et al. Modeling of wideband radar micro-doppler signatures for a coning object[A]. IET International Radar Conference 2009(CP551)[C]. Guilin, China; IET, 2009. 527.
- [7] 贺思三, 周健雄, 付强. 利用一维距离像序列估计弹道中段目标进动参数[J]. 信号处理, 2009, 25(6): 925 - 929.
He Si-san, Zhou Jian-xiong, Fu Qiang. Using HRRP sequence to estimate the precession parameters of midcourse target[J]. Signal Processing, 2009, 25(6): 925 - 929. (in Chinese)
- [8] S S He, J X Zhou, H Z Zhao, et al. Analysis and extraction of stepped frequency radar signature for micro-motion structure[J]. IET Radar Sonar Navig, 2009, 3(5): 484 - 492.
- [9] Lora G Weiss. Wavelets and wideband correlation processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1994, 11(1): 13 - 32.
- [10] Byron M Welsh, Robert W Hawley. Linear FM radar effects on moving target signatures[A]. Proceedings of SPIE on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VIII[C]. Bellingham WA, USA: SPIE, 2001. 164 - 173.
- [11] 文树梁, 袁起, 何佩坤, 等. 宽带线性调频雷达信号多普勒效应分析与处理[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(4): 573 - 577.
Wen Shu-liang, Yuan Qi, He Pei-kun, et al. Doppler effect analysis and processing for wideband linear frequency modulated radar signal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(4): 573 - 577. (in Chinese)
- [12] 金光虎. 中段弹道目标 ISAR 成像及物理特性反演技术研究[D]. 湖南长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2009.
Jin Guang-hu. Research on ISAR Imaging and Physical Feature Extraction of Midcourse Ballistic Target[D]. Changsha, Hunan: Graduate School of National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [13] R M Murray, 李泽湘, S S Sastry. 机器人操作的数学导论[M]. 徐卫良, 钱瑞明, 译. 北京: 机械工业出版社, 1997. 16 - 20.
- [14] 王勇, 许小剑. 一种计算多层涂覆目标 RCS 的快速算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(7): 838 - 843.
Wang Yong, Xu Xiao-jian. A fast RCS calculation technique for targets coated with multi-layer RAM[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 838 - 843. (in Chinese)
- [15] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 86 - 92.
- [16] 文树梁, 袁起, 秦忠宇. 宽带线性调频信号 Stretch 处理误差获取与补偿[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 26 - 39.
Wen Shu-liang, Yuan Qi, Qin Zhong-yu. Doppler effect analysis and processing for wideband linear frequency modulated radar signal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(1): 26 - 39. (in Chinese)
- [17] Xiaojian Xu, Ram M Narayanan. FOPEN SAR imaging using UWB step-frequency and random noise waveforms[J]. IEEE Trans on AES, 2001, 37(4): 1287 - 1300.

作者简介



马 超 男, 1984 年 2 月出生于湖北荆州, 现为北京航空航天大学电子信息工程学院博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理。

E-mail: machao@ee.buaa.edu.cn



许小剑(通讯作者) 男, 1963 年 4 月出生于江西万安, 2002 年获美国内布拉斯加大学博士学位, 现为北京航空航天大学电子信息工程学院信号与信息处理学科教授、博士生导师。主要研究领域: 高分辨率雷达成像、遥感特征处理与识别、电磁散射与辐射建模等。

E-mail: xiaojianxu@buaa.edu.cn