

弹道中段进动目标非理想 散射中心微动特性研究

姚辉伟,魏玺章,徐少坤,毛钧杰

(国防科技大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所,湖南长沙 410073)

摘要: 传统中段进动目标微动特性研究通常将目标散射中心视为理想散射中心,且用目标自身进动来等效散射中心的运动,据此所得结论具有一定局限性.本文揭示了中段目标自身进动与散射中心运动的异同,综合考虑了实际散射中心的非理想散射现象和遮挡效应,建立了基于非理想散射中心的中段进动目标回波模型,并利用仿真实验分析了不同进动参数对时频特性的影响,通过暗室进动实验证明了本文结果的正确性.

关键词: 弹道中段;非理想散射中心;微动

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)09-1844-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.022

Micro-Motion Characteristics of Non-Ideal Scattering Centers of Midcourse Targets with Precession

YAO Hui-wei, WEI Xi-zhang, XU Shao-kun, MAO Jun-jie

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Conventional studies on characteristics of micro-motion targets with precession in ballistic midcourse usually regard the scattering centers of targets as ideal scattering centers, while the motions of practical scattering centers are equivalent to the precession of targets, based on which the deduced conclusions usually are of certain limitations. This paper reveals the differences between motions of the target and its equivalent scattering centers. By considering the non-ideal scattering phenomena of practical scattering centers as well as their shielding effects, a new radar echo model of midcourse targets with precession is established based on non-ideal scattering centers. The influence of precession parameters upon the time-frequency characteristics is analyzed via a set of simulations, while the correctness of the results is validated by experiments in anechoic chamber.

Key words: ballistic midcourse; non-ideal scattering centers; micro-motion

1 引言

目前国内外研究多基于逆合成孔径雷达(ISAR)实现弹道中段目标的成像与识别.然而,对于复杂运动目标(如中段进动弹头目标),ISAR成像技术面临诸多技术难题.窄带雷达成像由于易于实现,并可获得较好的成像效果,为实现弹道中段目标成像与识别问题提供了新的思路^[1~4],其中,基于窄带雷达回波时频变换域的成像技术与目标散射中心对雷达回波的多普勒调制规律密切相关,因此建立中段进动目标的窄带雷达回波模型并分析回波时频变换域的特性具有重要意义.

在空间微动目标的回波建模与特性分析研究方面,Chen V C等人^[5,6]针对理想点目标,研究了振动、转动、

滚动和锥旋四种模式的微多普勒调制规律;文献[7]建立了进动目标的数学方程,根据理想散射点模型对宽带雷达回波进行建模;文献[8]将空间目标进动模型、宽带电磁计算模型、以及线性调频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仿真的方法;文献[9]分析了有翼和无翼弹头的进动对雷达回波调制的差异,并在微波暗室条件下进行了进动实验;文献[10]建立了目标的三维运动模型,分析了微动对高分辨雷达回波的影响.文献[11]提取了目标的微动特征并用于真假目标的识别.

上述工作均是在理想散射点假设条件下展开的,此时进动目标对回波的多普勒调制具有正弦函数的规律.实际情况中散射中心的运动规律与目标本身的运动规

律并不完全相同.文献[12,13]对此进行了深入分析,但仅考虑了散射中心的位置变化规律,并未考虑散射中心遮挡及各向异性等特点.文献[14]提出了能够描述目标散射中心方向性的属性散射中心模型.

本文内容安排如下:第2节对中段目标自身进动特性和散射中心的运动特性进行建模,揭示了两者的不同之处,并建立了基于相对坐标系的散射中心遮挡模型.第3节采用暗室测量数据对非理想散射中心参数进行估计.第4节利用估计出的散射中心参数进行仿真实验,分析了不同进动参数条件下中段进动目标窄带雷达回波在时频域的特性.最后通过暗室进动实验对本文内容进行了验证.

2 中段进动目标散射中心的非进动规律建模

目标进动对雷达信号的多普勒调制是弹道中段目标的固有特征,也是基于窄带雷达回波时频变换域成像技术的基础.然而很多情况下,散射中心的运动规律与目标自身结构的运动规律并不相同,下文进行详细说明.

2.1 目标自身结构的进动规律

中段进动目标运动模型如图1所示.目标在雷达坐标系 $Q-UVW$ 中的方位角和俯仰角分别为 α 、 β ,参考坐标系 $O-XYZ$ 各坐标轴与雷达坐标系 $Q-UVW$ 各坐标轴方向平行.弹体坐标系 $O-xyz$ 以目标对称轴为 x 轴,初始时刻 x 轴在参考坐标系中的偏航角、俯仰角和横滚角分别为 α_s 、 β_s 、 0 .进动坐标系 $O-x_p y_p z_p$ 以目标进动轴为 x_p 轴,初始时刻 x_p 轴在参考坐标系中的偏航角、俯仰角和横滚角分别为 α_p 、 β_p 、 0 .雷达视线(LOS)在参考坐标系下的单位方向矢量为:

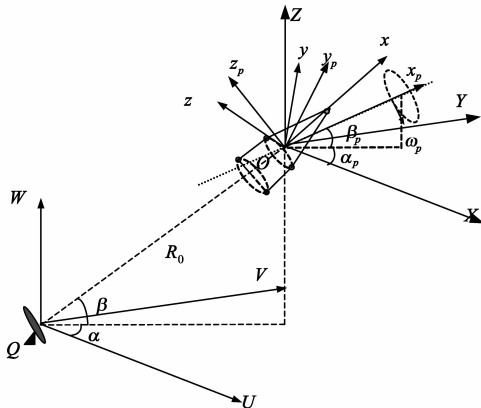


图1 目标结构进动模型

$$\mathbf{n}_{\text{los}} = [\cos\beta\cos\alpha \quad \cos\beta\sin\alpha \quad \sin\beta]^T \quad (1)$$

进动轴在参考坐标系下的单位方向矢量为:

$$\mathbf{n}_p = [\cos\beta_p\cos\alpha_p \quad \cos\beta_p\sin\alpha_p \quad \sin\beta_p]^T \quad (2)$$

由于目标是旋转对称结构,目标绕对称轴的旋转具有不变性,故只需考虑目标进动.设弹体坐标系内一点 P 的位置矢量表示为 $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$,以角速度 Ω 绕进动轴旋转,经过时间 t 后点 P 在参考坐标下的坐标可表示为:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{R}_p(t) \mathbf{R}_{\text{ini}} \mathbf{r}_0 \quad (3)$$

式中, \mathbf{R}_{ini} 是弹体坐标系到参考坐标系的转换矩阵,可由弹体坐标系在参考坐标系中的欧拉角得到. $\mathbf{R}_p(t)$ 为坐标绕空间轴线旋转的旋转矩阵,由 Rodrigues 等式^[15]可知:

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

其中, \mathbf{I} 为 3×3 单位矩阵, $\boldsymbol{\omega}' = \mathbf{n}_p$ 为旋转对称轴在参考坐标系中的单位矢量, $\widehat{\boldsymbol{\omega}}$ 是与 $\boldsymbol{\omega}'$ 对应的反对称矩阵,即

$$\widehat{\boldsymbol{\omega}}' = \begin{bmatrix} 0 & -\sin\beta_p & \cos\beta_p\sin\alpha_p \\ \sin\beta_p & 0 & -\cos\beta_p\cos\alpha_p \\ -\cos\beta_p\sin\alpha_p & \cos\beta_p\cos\alpha_p & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于 $R_0 \gg r_0$,故可用 \mathbf{n}_{los} 的方向来表示散射中心 P 的雷达视线方向,因此, $\mathbf{r}(t)$ 在雷达视线上的投影,即径向距离可表示为:

$$r(t) = \mathbf{r}(t) \cdot \mathbf{n}_{\text{los}} \quad (6)$$

上式即目标进动时理想散射点到雷达径向距离的变化公式,其具有标准的正弦形式^[4].

2.2 目标散射中心的非进动特性

理论计算和测量试验均表明,锥体目标的散射中心通常表现为入射线和目标对称轴所构成的平面与目标不连续处边缘的交点^[16].

如图2所示,台锥结构的散射中心除锥顶外,其他散射中心是雷达视线和目标对称轴形成的平面与底部平面边缘、台锥结合不连续处所在平面边缘的交点.其中锥顶处散射中心的运动规律与目标自身的进动规律一致,而其他4个散射中心的运动规律与目标自身的进动规律并不相同.以1、2两点为例推导这种边缘性散射

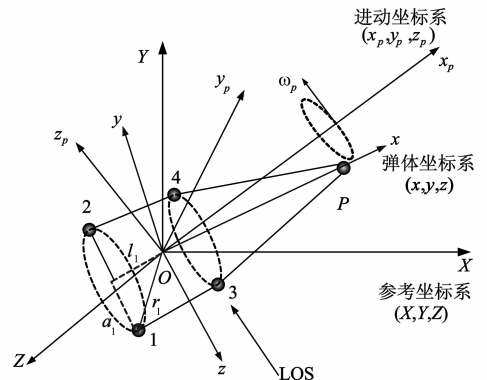


图2 散射中心非进动模型

中心的运动规律.

由 2.1 节可知,目标轴线方单位方向矢量与目标自身的进动规律一致,则 t 时刻目标轴线的单位方向矢量可表示为:

$$\mathbf{n}_s(t) = R_p(t) R_{\text{init}} \mathbf{n}_s(0) \quad (7)$$

其中, $\mathbf{n}_s(0) = [\cos\beta_s \cos\alpha_s \quad \cos\beta_s \sin\alpha_s \quad \sin\beta_s]^T$ 为目标对称轴初始时刻的单位方向矢量. 则 $\mathbf{n}_s(t)$ 与 \mathbf{n}_{los} 所构成平面 Π_1 的法线的方向矢量为

$$\mathbf{n}(t) = \mathbf{n}_s(t) \times \mathbf{n}_{\text{los}} \quad (8)$$

平面 Π_1 可表示为

$$\mathbf{n}(t) \cdot \mathbf{r} = 0 \quad (9)$$

台锥底面的平面 Π_2 可表示为

$$\mathbf{n}_s(t) \cdot \mathbf{r} = d_1 \quad (10)$$

1、2 两散射中心在平面 Π_1 和 Π_2 的交线上,该交线的矢量形式的表达式为

$$\mathbf{r}(t) = k \cdot \mathbf{n}_{\text{line}}(t) + d_1 \cdot \mathbf{n}_s(t) \quad (11)$$

其中 $\mathbf{n}_{\text{line}}(t) = \mathbf{n}(t) \times \mathbf{n}_s(t) / |\mathbf{n}(t) \times \mathbf{n}_s(t)|$ 为交线方向的单位方向矢量, k 为直线的参数. 式(11)的物理意义为,两平面的交线是过矢量 $d_1 \cdot \mathbf{n}_s(t)$ 的终点,且与单位方向矢量 $\mathbf{n}_{\text{line}}(t)$ 平行的直线.

从图中可以看出矢量 $d_1 \cdot \mathbf{n}_s(t)$ 的终点即底面的圆心,由于单位方向矢量 $\mathbf{n}_{\text{line}}(t)$ 在底面上,故容易得到 1、2 两散射中心的参数 k 即为底面的半径 $\pm a_1$. 代入式(11)即可得到散射中心在参考坐标系下的位置矢量为:

$$\mathbf{r}(t) = \pm a_1 \cdot \mathbf{n}_{\text{line}}(t) + d_1 \cdot \mathbf{n}_s(t) \quad (12)$$

从式(12)中可以看出,散射中心的运动规律较目标自身的进动规律更为复杂. 简单地将目标自身进动等效为散射中心的运动是不准确的.

2.3 基于相对坐标系的散射中心遮挡建模

根据物理光学原理,当散射中心处于被电磁波照亮的部分时才对回波有贡献. 考虑到散射中心位于目标对称轴 $\mathbf{n}_s(t)$ 与雷达视线 \mathbf{n}_{los} 所构成平面 Π_1 内,建立关于散射中心的相对坐标系如图 5 所示,其中 y 轴位于方向平面 Π_1 内,方向与雷达视线单位方向矢量 \mathbf{n}_{los} 相同,且过目标进动轴 op 与对称轴 os 的交点, x 轴方向为平面 Π_1 内与 y 轴垂直的方向.

从图 3 相对坐标系中容易看出,目标的结构参数决定了各散射中心的相对位置,各散射中心在相对坐标系中坐标变化仅与雷达视线和对称轴的夹角有关. 而雷达视线角和对称轴的夹角可由式(1)和式(7)得到,其关系为

$$\begin{cases} |\mathbf{n}_s(t) \times \mathbf{n}_{\text{los}}| = |\mathbf{n}_s(t)| |\mathbf{n}_{\text{los}}| \sin\theta(t) \\ |\mathbf{n}_s(t) \cdot \mathbf{n}_{\text{los}}| = |\mathbf{n}_s(t)| |\mathbf{n}_{\text{los}}| \cos\theta(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\theta(t)$ 为 t 时刻两矢量的夹角. 可以看出,给定初始时刻各散射中心的相对坐标,则 t 时刻的相对坐标可由

坐标转换得到,转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_i(t) \\ y_i(t) \end{bmatrix} = \mathbf{M}(t) \cdot \begin{bmatrix} x_i(0) \\ y_i(0) \end{bmatrix} \quad (14)$$

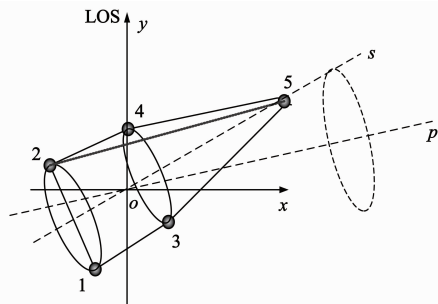


图3 相对坐标系下的遮挡建模

式中, $(x_i(t), y_i(t))^T$ 为第 i 个散射点 t 时刻的坐标, $(x_i(0), y_i(0))^T$ 为第 i 个散射点初始时刻的坐标,转换矩阵为:

$$\mathbf{M}(t) = \begin{bmatrix} \cos(\theta(t) - \theta(0)) & -\sin(\theta(t) - \theta(0)) \\ \sin(\theta(t) - \theta(0)) & \cos(\theta(t) - \theta(0)) \end{bmatrix} \quad (15)$$

经过上述建模,容易看出任意 t 时刻雷达波照亮(即朝 y 轴正向)的散射点和被遮挡的散射点位置的分界线具有如下特征:在相对坐标系中,该直线过沿 x 轴方向最左侧和最右侧两个散射点,位于直线上方的散射点将被遮挡,位于直线下方的散射点将对雷达回波产生贡献.

由上节给出的目标散射中心运动规律及式(14)可得到各散射点的相对坐标 $(x_i(t), y_i(t))^T$; 进而分界线方程可以表示为:

$$y - y_{\text{min}} = f(x) = \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}(x - x_{\text{min}}) \quad (16)$$

其中, $x_{\text{max}} = \max_i \{x_i\}$, $x_{\text{min}} = \min_i \{x_i\}$, y_{max} 、 y_{min} 分别是 x_{max} 和 x_{min} 对应的散射中心的 y 轴坐标; 对于第 i 个散射点的相对坐标 $(x_i(t), y_i(t))^T$, 将其代入式(16), 若 $f(x_i(t)) + y_{\text{min}} > y_i(t)$, 则该散射中心位于分界线的下方; 反之, 若 $f(x_i(t)) + y_{\text{min}} < y_i(t)$, 则该散射中心位于分界线的上方, 即被遮挡.

3 暗室目标非理想散射中心参数估计

3.1 非理想散射中心模型

为描述目标体上的非理想散射现象, Gerry 根据几何绕射理论提出了一种区分散射中心类型的散射中心模型^[17]. 不考虑测量噪声, 目标回波经匹配滤波处理后得到

$$\begin{aligned} \bar{E}(f, \theta) &= \sum_{i=1}^N \bar{E}_i(f, \theta) \\ &= \sum_{i=1}^N A_i \cdot \left(j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi f}{c} (x_i \cos\theta + y_i \sin\theta) \right) \end{aligned}$$

$$\cdot \text{sinc}\left(\frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\theta - \bar{\theta}_i)\right) \cdot \exp(-2\pi f \gamma_i \sin\theta) \quad (17)$$

式中, $\bar{E}_i(f, \theta)$ 表示单个散射中心的后向散射, f 表示入射频率, θ 表示入射角度, N 表示散射中心的个数. 参数集 $\Theta = \{(x_i, y_i), A_i, \alpha_i, \gamma_i, L_i, \bar{\theta}_i\}$ 表征了各独立散射中心的位置和几何结构, 详细解释如下:

(x_i, y_i) ——表示第 i 个散射中心相对于零相位参考点的二维空间位置, x_i 和 y_i 分别对应横向坐标和纵向坐标, 其到参考点的径向距离为 $r_i(\theta) = x_i \cos\theta + y_i \sin\theta$;

A_i ——表示第 i 个散射中心的散射强度;

α_i ——表示频率影响因子, 表征几何形状. 一般地, $\alpha_i \in \{\pm 1, \pm 0.5, 0\}$;

γ_i ——表示局域性散射中心对入射角的依赖性;

L_i ——表示展布式散射中心的长度;

$\bar{\theta}_i$ ——表示展布式散射中心相对于雷达的方向角.

在上述参数中, α_i 和 L_i 包含了散射中心的几何结构信息, α_i 与散射中心局部区域的表面曲率相关, 长度参数 L_i 是散射中心所对应的实际散射结构长度的直观描述, 可用来区分局域性散射中心和展布式散射中心. 对于局域性散射中心, $L_i = 0$, $\bar{\theta}_i$ 没有意义, $\gamma_i \neq 0$ 表征散射率对方位角的依赖性; 对于展布式散射中心, $L_i > 0$, $\bar{\theta}_i$ 表征散射中心相对于雷达的方向, 同时 $\gamma_i = 0$.

由于弹头目标结构相对简单, 一般在 0° 姿态角观测条件下(从鼻锥方向入射), 可忽略遮挡现象. 根据前文分析, 不妨用 0° 附近的散射中心模型表述目标体上的局域性散射中心, 然后添加上锥柱体的展布式散射中心建立一个精确的散射中心模型; 根据散射中心的运动规律和遮挡效应的判断准则, 即可建立目标在任意姿态下的散射中心模型, 从而得到窄带雷达回波信号模型.

3.2 非理想散射中心参数估计

参数估计的目的是找到一组满足目标电磁散射频率响应的参数解, 常规方法是采用最大似然方法^[14]. 暗室测量模型如图 4 所示, 根据暗室测量数据的成像结果对散射中心进行参数估计, 结果见表 1. 其中, 8 个局域性散射中心参数根据方位 $0^\circ \sim 5^\circ$ 的成像结果估计, 由于参数 γ 值很小, 此处取 $\gamma_p = f_c \gamma$; 两个展布式散射中心参数分别根据 $72^\circ \sim 77^\circ$ 和 $85^\circ \sim 90^\circ$ 的成像结果估计.

需要指出的是, 表中估计出的散射中心的位置参



图4 暗室测量目标模型

数给出了目标对应姿态角下的结构信息, 当目标作进动运动时, 其相对位置由式(12)和式(14)给出.

4 实验与分析

4.1 仿真试验

设雷达工作频率 10GHz, 目标进动频率为 2Hz, 脉冲重复频率为 100Hz. 不失一般性, 设初始时刻目标在雷达坐标系中的方位角 $\alpha = 0^\circ$ 、俯仰角 $\beta = 0^\circ$. 参考坐标系中, 弹体坐标系 x 轴的方位角为 $\alpha_s = 0^\circ$ 、进动坐标系 x_p 轴的方位角为 $\alpha_p = 0^\circ$. 则目标的平均视线角 φ 为 x_p 轴的俯仰角 β_p , 进动角 θ 为 x_p 轴的俯仰角 β_p 与弹体坐标系 x 轴的俯仰角 β_s 之差的绝对值. 显然初始时刻目标各散射中心位于弹体坐标系的 xoz 平面内. 需要指出的是, 进动轴并不一定过目标质心, 假设底面距进动轴与目标自身对称轴的交点为 $0m$ (本文称此交点为参考点), 则上节给出的散射中心相对位置如图 5 所示, 图中两个三角形表示两个展布式散射中心. 散射中心其他参数见表 1.

表 1 散射中心参数

散射中心	A	α	x	y	γ_p	L	$\bar{\theta}_i$
1	0.55	0.5	0.90	0.07	0.05	—	—
2	0.68	0.5	0.75	0.07	0.05	—	—
3	0.82	0	0.15	0.26	0.12	—	—
4	1	0	0.15	-0.12	0.12	—	—
5	0.83	0	0	0.26	0.10	—	—
6	0.89	0	0	-0.12	0.10	—	—
7	0.95	0	-0.3	0.26	0.15	—	—
8	0.27	0	-0.3	-0.12	0.15	—	—
9	9.3	1	0.45	0.16	—	0.77	74.2
10	9.3	1	-0.15	0.22	—	0.43	85.6

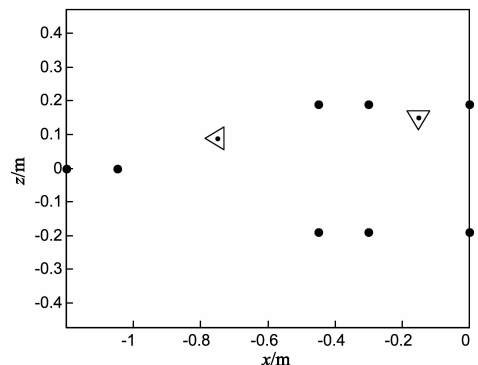


图5 散射中心相对结构

本文设计如下 3 个仿真实验:

实验 1 以底面两个散射中心为例, 比较理想散射中心与非理想散射中心多普勒调制的异同. 平均视线角 $\varphi = 20^\circ$, 进动角 $\theta = 10^\circ$.

综合图 6 和图 7 的结果, 可以看出, 理想散射点假

设条件下,散射点的多普勒调制均为标准正弦形式,进动参数不同将只会引起多普勒的幅度和相位的变化;而非理想散射点假设条件下,进动参数的不同将导致多普勒的不规则变化.另外,在相同的进动参数下,理想散射点假设的多普勒的幅度要大于非理想散射点假设的多普勒幅度,这是旋转对称结构的目标进动时散射点在目标表面的滑动造成的,滑动使得散射点总是在目标被雷达波照亮的一侧,从而散射点在雷达视线上径向距离的变化范围较理想散射点的变化范围小.

实验 2 以底面两个散射中心为例,分析不同的进动参数下非理想散射中心对多普勒调制造成的不规则特性,进动角 $\theta = 10^\circ$.

从图 8 中可以看出,不同进动参数下,非理想散射中心对多普勒的调制表现出各不相同的周期性不规则调制,值得注意的是,当平均视线角较大,且散射点距参考点的距离较远时,多普勒表现为接近于正弦的调制,如图 8(d)所示.

实验 3 由暗室测量模型得到的散射中心参数,在此基础上,考虑目标非理想散射中心假设下的滑动、遮

挡、镜面反射等因素,分析不同进动参数下目标窄带回波在时频域的特征.以发生镜面反射和不发生镜面反射为界,将全姿态分为四个区间:(1)不包含镜面反射;(2)包含第一个镜面反射;(3)包含两个镜面反射;(4)包含第二个镜面反射.下面对这四种情况下中段进动目标窄带雷达回波在时频域的特点进行详细分析.

(1)平均视线角 $\varphi = 20^\circ$,进动角 $\theta = 10^\circ$.

此情况下姿态角范围为 $10^\circ \sim 30^\circ$,显然在区间 1 的范围内,此时展布式散射中心的散射强度很小,如图 9(b)所示.从图 9(a)中可以看出,由于散射点的相对位置不同,其理论多普勒也具有各不相同的特点.多普勒幅度与散射中心距参考点远近有关,其中多普勒幅度大(即离参考点远)的散射中心的理论多普勒具有更接近正弦的形式,而离参考点近的散射中心的多普勒则具有更不规则的形式,这与实验 2 的结论是一致的.图 9(c)为 8 个局域散射中心的窄带雷达回波时频重排图,与图 9(a)相比,图 9(c)所显示的多普勒并不包含全部的 8 个散射中心,这是因为部分散射中心被遮挡的缘故,另外可以明显看出,其中一个散射中心在一个进

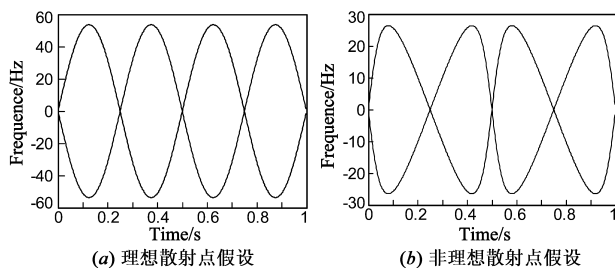


图6 底面距参考点的距离 $d=0m$

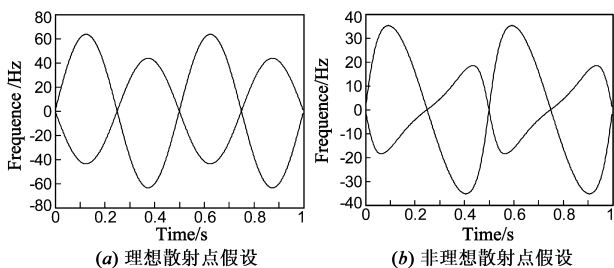


图7 底面距参考点的距离 $d=0.2m$

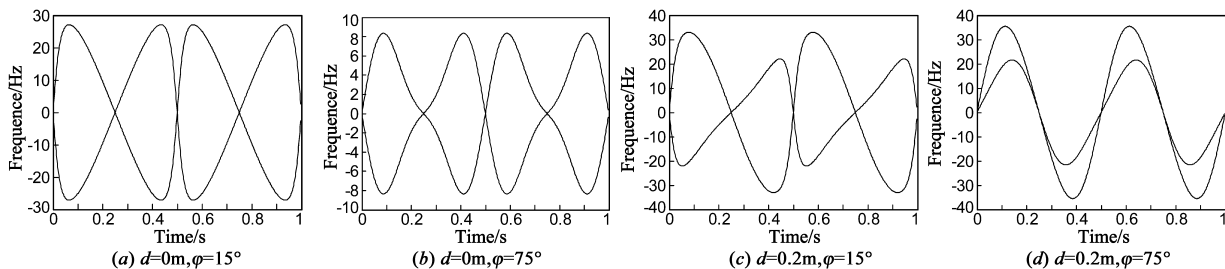


图8 不同进动参数下非理想散射点多普勒

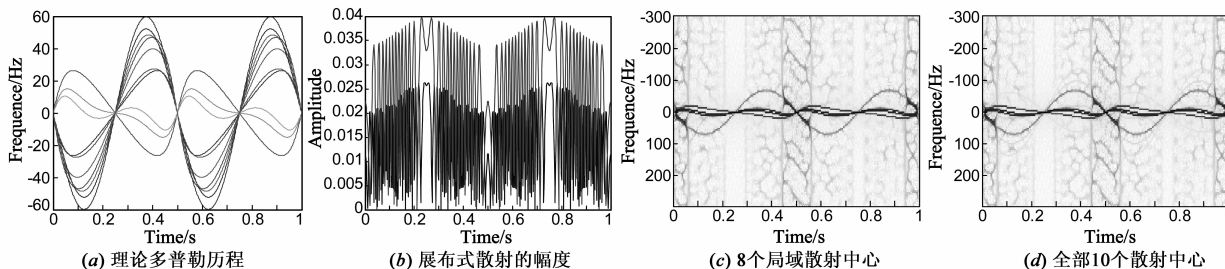


图9 区间1

动周期的部分时间内被遮挡,其他时间内在时频重排图上则具有一个较强的显示.由于在区间 1 的范围内时,展布式散射中心的强度并不大,故此区间内的窄带雷达回波主要由局域散射中心贡献,如图 9(d)所示.

(2) 平均视线角 $\varphi = 70^\circ$, 进动角 $\theta = 10^\circ$.

此情况下姿态角范围为 $60^\circ \sim 80^\circ$, 此时将出现 74.2° 时的镜面反射, 此处的展布式散射中心强度如图 10(b) 所示. 其特点是强度大, 持续时间短, 由于其在空

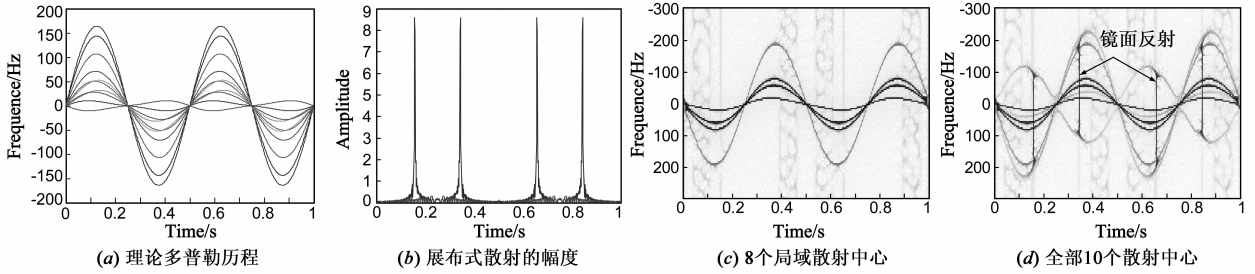


图 10 区间 2

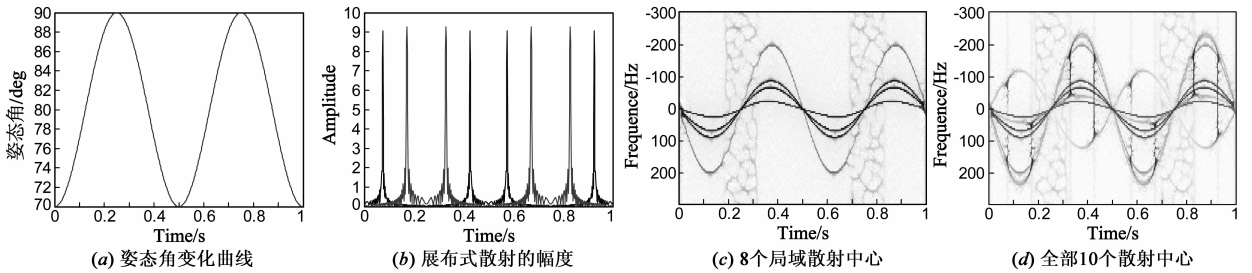


图 11 区间 3

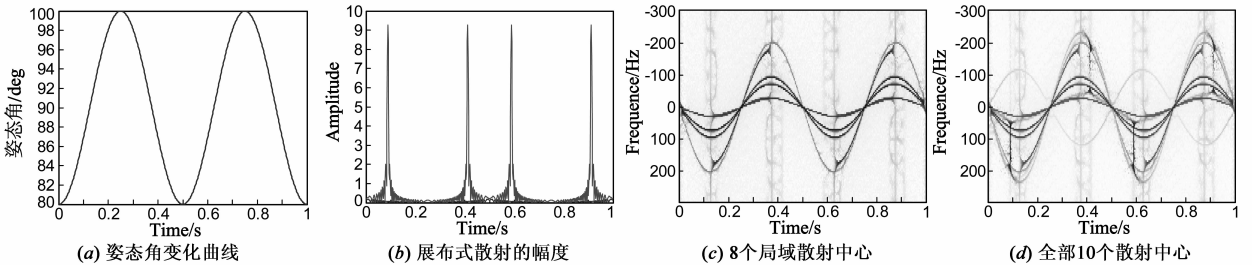


图 12 区间 4

(3) 平均视线角 $\varphi = 80^\circ$, 进动角 $\theta = 10^\circ$.

此情况下姿态角范围为 $70^\circ \sim 90^\circ$, 此时将交替出现 74.2° 时与 85.6° 时的镜面反射, 此处的展布式散射中心强度如图 11(b) 所示. 与区间 2 相比, 全部散射中心的时频重排图除出现更多的亮线外, 局域散射中心的时频曲线被淹没的情况更为严重. 另外, 姿态角 74.2° 时的亮线长度要比姿态角 85.6° 时的长度长, 这与展布式散射中心的参数 L_i 有关, 这种结果与表格 3 的参数是一致的.

(4) 平均视线角 $\varphi = 90^\circ$, 进动角 $\theta = 10^\circ$.

区间 4 的结果与区间 2 类似, 不同之处在于此种情

间上有一定的展宽, 故其在时频域的特点如图 10(d) 所示. 从图 10(a) 中可以看出, 散射点具有更大的多普勒幅度, 且幅度较大的多普勒具有更接近正弦的形式, 而离参考点近的散射中心的多普勒则具有较不规则的形式, 这与实验 2 的结论是一致的. 图 10(c) 为 8 个局域散射中心的窄带雷达回波时频重排图, 与图 10(a) 相比, 图 10(c) 所显示的多普勒并不包含全部的 8 个散射中心, 这是因为部分散射中心被遮挡的缘故.

况下出现了某散射点在一个进动周期内的部分时间被遮挡的情况.

综上所述, 在考虑进动目标的散射点滑动、遮挡以及展布式散射等非理想散射的情况下, 中段进动目标的窄带雷达回波时频特性具有与理想散射假设条件下不同的特点, 这为基于窄带雷达信息的反演提供了理论依据.

4.2 暗室进动实验

目标模型为无翼轴对称锥柱组合体, 如图所示, 全长 1400mm, 转动中心距目标顶部约 1100mm, 实验目标系统由目标模型、传动机构、支架、控制设备等组成, 通

过电机及减速机构带动目标模型实验三维进动.在暗室内对目标进行单频测量,测量频率为 10GHz.点频数据的采样时间为 11.2s,采样点数为 10000 点.

目标进动周期固定为 2s,设置进动角为 15°,方位角为 25°和 70°的结果分别如图 14、图 15 所示.从图 14 中可以看出,时频分布图有两条较明显的分布曲线,其中幅度较大更接近于正弦曲线,这与仿真实验的分析

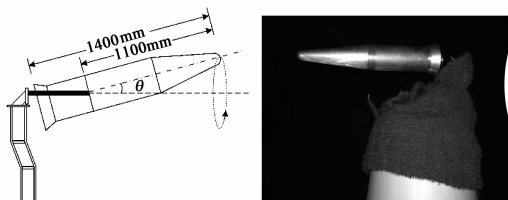


图13 实验系统示意图及实物图

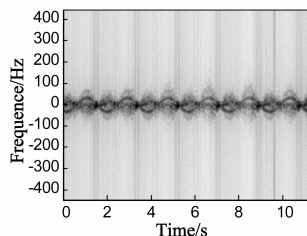


图14 方位角为25°时的时频分布

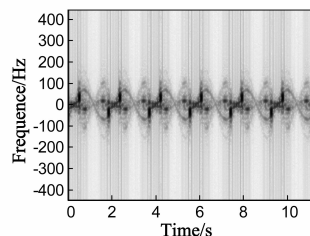


图15 方位角为70°时的时频分布

5 结束语

本文通过对中段目标自身结构的进动特性和目标散射中心的运动特性进行建模,揭示了两者的不同之处,并建立了基于相对坐标系的散射中心遮挡模型.介绍了非理想散射中心的建模和参数估计方法,并对用暗室测量数据进行散射中心参数估计,用估计所得到的散射中心参数建立了更接近实际的中段进动目标的窄带雷达回波模型作为本文的数据来源.最后通过仿真试验分析了不同进动参数对时频曲线特点变化的影响.本文的窄带雷达回波模型在时频域表现得更为复杂,但对弹道导弹防御领域的雷达信号处理、目标特征提取、目标识别具有较强的实用意义.

参考文献

- [1] 丁小峰.基于窄带信息的弹道中段目标特性反演技术研究[D].国防科学技术大学:长沙,2011.
DING Xiao-feng. Research on the Inversion Technology of Ballistic Mid-course Targets Based on the Narrowband Radar Information [D]. Changsha: The National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] 丁小峰,等.基于层析投影算法的空间旋转目标窄带雷达成像[J].信号处理,2010,26(5):648-653.
DING Xiao-feng, et al. Narrowband imaging for spatial rotating targets based on tomography algorithm [J]. Signal Processing, 2010, 26(5): 648-653. (in Chinese)
- [3] 丁小峰,等.空间进动锥体目标窄带雷达成像技术[J].中国科学:技术科学,2010,40(6):686-694.
- [4] Xiaofeng DING, et al. Narrowband imaging method for spatial precession cone-shaped targets [J]. Science China Technologi-

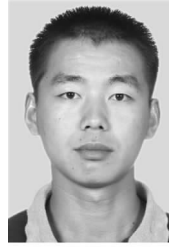
结果一致.从图 15 可以看出,目标在方位角 70°附近以 15°的进动角作进动运动,其姿态变化范围包含了目标发生展布式散射的姿态角,因而时频分布图在一个周期内出现了沿频率轴方向展布的亮斑,另外,时频曲线出现了断续现象,这可能是由于散射点的遮挡造成的,这种现象符合仿真实验的结果与分析.由暗室进动实验的结果可以看出本文研究与分析的有效性.

cal Sciences, 2010, 53(4): 942-949.

- [5] Chen V C. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions [J]. IET Signal Processing, 2008, 2(3): 291-300.
- [6] CHEN V C, et al. Micro-Doppler effect in radar phenomenon, model, and simulation study [J]. IEEE, 2006, 42(1): 2-21.
- [7] 金光虎.中段弹道目标 ISAR 成像及物理特性反演技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009.
JIN Guang-hu. Research on ISAR Imaging and Physical Feature Extraction of Midcourse Ballistic Target [D]. Changsha: The National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [8] 马超,许小剑.空间进动目标的宽带雷达特征信号研究[J].电子学报,2011,39(3):636-642.
MA Chao, XU Xiao-jian. Modeling of wideband radar signature for precession space objects [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 636-642. (in Chinese)
- [9] 孙照强,李宝柱,鲁耀兵.弹道中段进动目标的微多普勒研究[J].系统工程与电子技术,2009,31(3):538-540.
SUN Zhao-qiang, LI Bao-zhu, LU Yao-bing. Research on micro-Doppler of ballistic midcourse target with precession [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(3): 538-540. (in Chinese)
- [10] 贺思三.微动目标高分辨雷达信号建模与特征提取[D].长沙:国防科学技术大学,2010.
HE Si-san. High Resolution Radar Signal Modeling and Feature Extracting for Micro-Motion Targets [D]. Changsha: The National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)

- [11] 关永胜,左群声,刘宏伟.基于微多普勒特征的空间锥体目标识别[J].电波科学学报,2011,26(2):209-215.
GUAN Yong-sheng, ZUO Qun-sheng, LIU Hong-wei, Micro-Doppler signature based cone-shaped target recognition [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(2):209-215. (in Chinese)
- [12] 马梁,等.旋转对称目标滑动型散射中心的微 Doppler 特性[J].中国科学:信息科学,2011,41(5):605-616.
- [13] 刘进,等.空间进动目标动态散射特性的实验研究[J].航空学报,2010,31(5):1014-1023.
LIU Jin, et al. Experimental study on dynamic scattering properties of space precession target [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(5):1014-1023. (in Chinese)
- [14] Moses R L, L C Potter, I J Gupta. Feature Extraction Using Attributed Scattering Center Models For Model-Based Automatic Target Recognition [M]. Approved for Public Release, 2005.
- [15] Murray M R, L Z, S S Sastry. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation [M]. Boca Raton: CRC Press, 1994.
- [16] 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.
- [17] Gerry M J, et al. A parametric model for synthetic aperture radar measurements [J]. IEEE Transactions on Antennas and propagation, 1999, 47(7):1179-1188.

作者简介



姚辉伟 男.1983年5月出生于河南辉县.2005年、2007年在国防科技大学分别获得通信工程专业工学学士、信息与通信工程工学硕士学位.2008年至今为国防科技大学博士生,从事雷达目标识别、目标特性等领域相关研究工作.
E-mail: pla0611@163.com



魏玺章 男.1976年4月出生于河北吴桥.1997年、2002年在国防科技大学分别获得微波工程专业工学学士、通信与信息系统专业工学博士学位.其后在国防科技大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所工作,现为副教授,硕士生导师,从事雷达目标识别、目标特性等领域相关研究工作.

E-mail: liweier@sina.com

徐少坤 男.1983年出生于湖北随州,国防科技大学空间电子信息技术研究所博士研究生.主要研究方向为成像雷达对抗、信息融合.

E-mail: xsk0220@163.com

毛钧杰 男.1943年6月出生于湖南长沙.教授,博士生导师,电子学会高级会员,享受政府特殊津贴,主要从事毫米波多模复合制导与天线设计等方向的研究与教学工作.