

# 宽带雷达弹头目标遮挡效应建模与微多普勒仿真分析

代肖楠<sup>1,2</sup>, 李开明<sup>1</sup>, 赵晓琛<sup>1</sup>, 贺志峰<sup>3</sup>, 蔡斌<sup>1,4</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 95806 部队, 北京, 100076;  
3. 93601 部队, 山西大同, 037006; 4. 北京信息技术研究所, 北京, 100094)

**摘要** 微多普勒特征是弹道导弹目标识别的重要依据。高频雷达体制下, 弹头目标与雷达的位置关系直接影响雷达回波生成及后续的微多普勒特征提取, 因此必须考虑遮挡效应的影响。首先, 使用 3D-Max 软件对锥体弹头进行几何建模, 得到三维网格模型; 其次, 对于弹头顶点和尾翼散射点, 在计算机图形学面消隐算法的基础上, 采用平均法向量法进行遮挡判断, 得到较为真实的目标仿真回波, 对遮挡条件下的弹道目标回波建模与微动特征分析进行了初步探索。仿真结果表明, 该方法可以完成弹头目标的遮挡效应建模。

**关键词** 宽带雷达; 弹头; 遮挡效应; 微多普勒

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.03.014

**中图分类号** TN95 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)03-0105-07

## Occlusion Modeling and Micro-Doppler Simulation Analysis of Ballistic Target Based on Wideband Radar

DAI Xiaonan<sup>1,2</sup>, LI Kaiming<sup>1</sup>, ZHAO Xiaochen<sup>1</sup>, HE Zhifeng<sup>3</sup>, CAI Bin<sup>1,4</sup>

(1. Information and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;  
2. Unit of 95806, Beijing, 100076, China; 3. Unit of 93601, Datong 037006, Shanxi, China;  
4. Beijing Information Technology Research Institute, Beijing 100094, China)

**Abstract** Micro-Doppler feature is an important reference for target recognition of ballistic missile. In high frequency radar system, the position relationship between warhead and radar directly affects the generation of radar echoes and micro-Doppler feature extraction subsequently, so the influence of occlusion effect must be considered. Firstly, the 3D Max software is used to model the geometry of cone warhead, and the 3D mesh model of the warhead target is obtained. Secondly, for the warhead vertex and empenage scatterers, the average normal vector method is used for occlusion judgment on the basis of plane hidden and elimination algorithm from the Computer Graphics, then the more real simulated echoes of target is obtained, which makes a preliminary exploration on echoes modeling and micro-motion characteristics analysis of ballistic targets under the occlusion condition.

**Key words** wideband radar; warhead; occlusion effect; micro-Doppler

弹道导弹在飞行过程中, 通常会伴有自旋、进动等微动形式。微动特征是目标的独特特征, 包含目

收稿日期: 2022-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(61701530, 61871396); 陕西省自然科学基金计划研究项目(2020JM-348)

作者简介: 代肖楠(1991-), 男, 云南玉溪人, 硕士生, 研究方向为雷达成像与目标识别。E-mail: y18500553454@163.com

**引用格式:** 代肖楠, 李开明, 赵晓琛, 等. 宽带雷达弹头目标遮挡效应建模与微多普勒仿真分析[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(3): 105-111. DAI Xiaonan, LI Kaiming, ZHAO Xiaochen, et al. Occlusion Modeling and Micro-Doppler Simulation Analysis of Ballistic Target Based on Wideband Radar[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(3): 105-111.

标的细节信息,微动产生的微多普勒效应为弹道导弹目标识别提供了新的技术途径<sup>[1-12]</sup>。

根据电磁散射相关理论,在高频雷达下,弹头目标的散射特性可以用几个局部的散射点表示。对于弹头目标,散射点包括理想散射点和非理想散射点。理想散射点是指散射中心的位置及其散射强度不随入射电磁波频率和方位角的变化而改变,如弹头的锥顶和尾翼。非理想散射点是指散射中心的位置及其散射强度随入射电磁波频率和方位角的变化而改变,如圆锥底部和锥柱结合部的散射点,这类散射点位于雷达电磁波入射平面和边缘(棱线)的相交处或不连续处,也称作滑动散射点<sup>[5-9]</sup>。对于弹头目标上的理想散射点,在完成精确平动补偿后,其回波的多普勒效应一般表现为正弦调频形式,如目标自旋引起的微多普勒效应<sup>[1-5]</sup>。对于非理想散射点,其微多普勒在自旋时表现为直线,在进动时表现出高阶正弦调频的性质<sup>[5-9]</sup>。

然而,现有的许多研究在讨论弹头目标微多普勒效应时,为了简化分析,大都没有考虑遮挡效应的影响。事实上,遮挡效应将使得弹头的部分散射点回波在整个观测时间窗内出现部分或成段缺失,即使完成精确的平动补偿,遮挡效应的存在也将导致这些散射点的微多普勒特征在时频域或距离-慢时间域不再完整。

遮挡问题是目标跟踪与识别的难点之一,弹头目标的平动和微动必将导致散射点在雷达视线中存在遮挡现象,进而影响回波的多普勒特征提取。在弹头目标遮挡效应方面,文献[8]综合考虑了弹头目标的非理想散射现象和遮挡效应,建立了基于相对坐标系的散射中心遮挡模型,但该遮挡模型依赖于作者设定的一条穿过弹头体内部的“理想”分界线(顶点与锥柱底面边缘的连线)。文献[9]考虑了弹体对弹翼的遮挡效应,对散射点回波乘以遮挡因子进行回波建模,但模型的建立未能综合考虑目标的形状、与雷达的位置关系及目标的散射机理。文献[10]和文献[11]在窄带雷达条件下对锥柱体弹头的滑动散射点进行了遮挡效应建模,并基于压缩感知理论对弹头微多普勒历程进行了修复,但对遮挡效应的建模是在微动回波信号的基础上乘以周期性信号,调制周期由弹道目标锥旋频率和雷达共同决定,实际中难以操作。文献[12]分析了基于钝头倒角锥模型的弹头目标遮挡效应,但未考虑旋翼散射点的遮挡。

对于弹道导弹目标,实测数据的高成本、安全保密等因素使数据获取十分困难,更加贴近实际的计算机仿真成为重要的研究手段。本文针对平底锥弹头目标,在高频雷达下,首先采用 3D-Max 软件对弹头目标进行几何建模和网格划分,在计算机图形学消隐算法的基础上,结合弹头目标散射点独特的散射特性,完成遮挡效应下的回波建模,仿真分析了遮挡前后弹头目标的微多普勒特征,为雷达目标遮挡效应建模提供了参考和借鉴。

## 1 弹头目标微动建模

实际中,有翼锥体是弹道导弹弹头较为常见的外形结构<sup>[5-9]</sup>。本文以锥体弹头为例,如图 1 所示,雷达静止于雷达坐标系( $U, V, W$ )的坐标原点  $O$ ,目标本地坐标系( $x, y, z$ )的坐标原点位于弹头质心  $O'$  处,本地坐标系随弹头的运动而运动。参考坐标系( $X, Y, Z$ )的坐标原点位于弹头底部  $P_0$  点,  $P_0$  到雷达的距离矢量为  $\mathbf{R}_0$ ,其在雷达坐标系中的方位角和仰角分别为  $\alpha$  和  $\beta$ ,  $P_1, P_2$  为尾翼散射点,  $B$  为底面圆环边缘滑动散射点。同样,参考坐标系与雷达坐标系相互平行,只随弹头平动。

弹体对称轴为  $O'z$  轴,指向锥顶部,定义发射瞬时的射击平面为导弹主对称面,  $O'y$  轴垂直于主对称面,弹头围绕自身对称轴  $O'z$  自旋,同时绕  $P_0N$  旋转,这就构成了弹头的进动,其中绕  $P_0N$  的旋转称为锥旋,  $O'z$  与  $P_0N$  之间的夹角称为进动角,锥旋轴  $P_0N$  相对于参考坐标系的方位角和俯仰角分别为  $\alpha_N$  和  $\beta_N$ ,  $\omega_s$  和  $\omega_c$  分别为自旋和锥旋的角速度矢量。

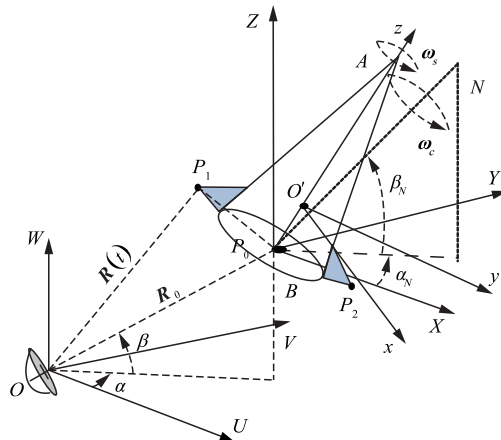


图1 雷达与进动弹头几何关系示意图

设  $P_0$  点在本地坐标系中的坐标矢量为  $\mathbf{r}_0 = (0, 0, z_0)^T$ , 尾翼散射点  $P_1$  在本地坐标系中的初始

位置为  $\mathbf{r}_1 = (x, y, z_0)^T$ , 其在参考坐标系中的初始位置矢量为  $\mathbf{r} = \mathbf{R}_{\text{init}} \cdot (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0)$ , 其中,  $\mathbf{R}_{\text{init}}$  为 Euler 旋转矩阵, 由初始欧拉角  $(\varphi, \theta, \varphi)$  决定<sup>[1-3]</sup>。则  $t$  时刻  $P_1$  点在参考坐标系中的位置矢量为  $\mathbf{r}_t = \mathbf{T}_r \cdot \mathbf{r}$ , 其中,  $\mathbf{T}_r = \mathbf{T}_r(t)$  为  $t$  时刻的微动矩阵。对于进动弹头, 其微动包含两部分, 即自旋和锥旋, 则微动矩阵可表示为  $\mathbf{T}_r(t) = \mathbf{R}_c(t) \cdot \mathbf{R}_s(t)$ , 其中,  $\mathbf{R}_c(t)$  为锥旋矩阵,  $\mathbf{R}_s(t)$  为自旋矩阵。

由 Euler-Rodrigues 公式可知,  $t$  时刻锥旋矩阵  $\mathbf{R}_c(t)$  在参考坐标系中可表示为<sup>[1-3]</sup>:

$$\mathbf{R}_c(t) = \mathbf{I} + \hat{\mathbf{e}}_c \sin(\Omega_c t) + \hat{\mathbf{e}}_c^2 (1 - \cos(\Omega_c t)) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\hat{\mathbf{e}}_c$  为锥旋斜对称矩阵;  $\Omega_c = \|\boldsymbol{\omega}_c\|$ 。

同理,  $t$  时刻自旋矩阵  $\mathbf{R}_s(t)$  在参考坐标系中可表示为<sup>[1]</sup>:

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{I} + \hat{\mathbf{e}}_s \sin(\Omega_s t) + \hat{\mathbf{e}}_s^2 (1 - \cos(\Omega_s t)) \quad (2)$$

式中:  $\hat{\mathbf{e}}_s$  为自旋斜对称矩阵,  $\Omega_s = \|\boldsymbol{\omega}_s\|$ 。

设弹头平动速度为  $\mathbf{v}$ , 则  $t$  时刻  $P_1$  点到雷达的距离为:

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_0 + \mathbf{v}t + \mathbf{r}_t \quad (3)$$

此时, 尾翼散射点  $P_1$  的瞬时多普勒频率为:

$$f_D = \frac{2}{\lambda} \cdot [\mathbf{v}]^T \cdot \mathbf{n} + \frac{2}{\lambda} \cdot \left[ \frac{d\mathbf{r}_t}{dt} \right]^T \cdot \mathbf{n} = f_{bD} + f_{mD} \quad (4)$$

式中:  $f_{bD}$  为目标主体多普勒;  $\mathbf{n}$  为雷达视线方向 (line of sight, LOS) 的单位矢量, 可表示为  $\mathbf{n} = [\cos\alpha \cos\beta, \sin\alpha \cos\beta, \sin\beta]^T$ 。在远场条件下, 即  $\|\mathbf{R}_0\| \gg \|\mathbf{v}t + \mathbf{r}_t\|$  时, 则  $\mathbf{n}$  可近似为  $\mathbf{n} = \mathbf{R}_0 / \|\mathbf{R}_0\|$ 。

因此, 尾翼散射点的微多普勒  $f_{mD}$  的表达式为:

$$f_{mD} = \frac{2}{\lambda} \left[ \frac{d\mathbf{r}_t}{dt} \right]^T \cdot \mathbf{n} = \frac{2}{\lambda} \left[ \frac{d}{dt} (\mathbf{R}_c(t) \mathbf{R}_s(t) \mathbf{R}_{\text{init}} (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0)) \right]^T \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

如果弹体表面较为光滑, 则自旋时顶点相对静止, 底面边缘滑动散射点受等效替代效应的影响, 不产生微多普勒效应, 此时尾翼散射点旋转的周期即为自旋周期; 而在进动情况下, 弹头顶点的微多普勒特征表现为正弦规律的调制, 而尾翼散射点的微多普勒频率偏离标准正弦形式<sup>[1-3]</sup>, 但进动周期仍然表现出周期形式, 通常进动周期表现为自旋周期和锥旋周期的最小公倍数<sup>[3]</sup>。自旋条件下的微动特征分析与提取相对简单, 本文重点考虑进动姿态。

## 2 遮挡效应建模

实际中, 目标散射点的回波受雷达视线的影响较大, 且弹体表面相对光滑。当弹头目标靠近雷达飞行时, 雷达对弹体为迎头仰视扫描, 尾翼散射点总是存在被遮挡的情况。同时, 实际中雷达载频、带宽对目标的电磁散射都有一定影响, 理论认为: 低频雷达下, 由于电磁波的绕射效应, 边缘滑动散射点的微多普勒同样存在; 而对于高频雷达来源, 波长较短, 尾翼散射点的散射会更强。因此, 对于带尾翼的锥体弹头目标, 其宽带雷达回波主要为顶点和可见尾翼散射点回波; 同理, 当弹道目标远离雷达时, 在一定观测视角下, 弹头顶点被弹体底面所遮挡, 且尾翼散射点的散射强度远大于滑动散射点, 因此, 目标回波主要表现为可见尾翼散射点回波。

对于底面圆环边缘滑动散射点, 其本质上可以看作雷达入射平面 (雷达视线与目标速度矢量或目标对称轴构成的平面) 与锥体底面的交点。当雷达与目标有高度差时 (即在一定仰角观测条件下), 位于下边缘 (或外边缘) 交点始终可见, 上边缘 (或里边缘) 交点与观测视角有关。当目标自旋时, 由于旋转对称的等效替代效应, 位于下边缘的交点始终不变; 当目标进动时, 由于锥旋的影响, 位于下边缘的交点在一小段圆弧上缓慢滑动, 微多普勒表现为偏离正弦或高阶正弦形式<sup>[5]</sup>。

可见, 目标与雷达视线的关系直接影响实际的目标回波和后续的特征提取及识别, 因此必须考虑遮挡效应的影响。

计算机图形学经常使用消隐算法来研究物体的可视性问题<sup>[13]</sup>, 随着计算机图形学的发展, 消隐算法在电磁计算领域也渐渐受到重视。在雷达电磁散射计算方面, 随着目标场景的日益复杂, 需要结合目标实际, 对传统的消隐算法进行改进, 以实现更加贴近真实回波的仿真建模。

细节是模型的重要组成部分, 而法向量是描述模型细节的一个重要参数, 在目标三维网格建模中, 为了在保持模型的全局特征的同时较好地保持模型的细节, 本文对顶点和尾翼散射点均采用平均法向量方法进行可视化判断和处理。

### 2.1 弹头目标三维几何建模及网格划分

首先通过真实弹头的缩比模型, 得到弹头目标的结构参数。使用 3D-Max 软件对锥体弹头进行几何建模, 得到弹头目标的三维网格缩比模型, 见图 2, 此时弹体表面、顶部及尾翼由许多小面元组成。

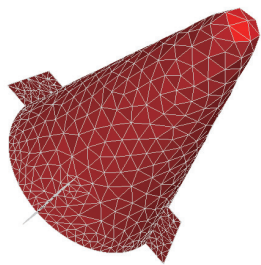


图2 弹头目标三维网格缩比模型

## 2.2 特征散射点提取

结合弹头目标散射点的散射特性,利用消隐算法,在雷达视线方向上进行特征散射点提取。本文重点考虑顶点、尾翼散射点和滑动散射点。

弹头目标通常为凸几何体,可用面消隐算法对散射点进行遮挡判断。由于弹头顶部通常为球冠或椭球冠,并非标准的锥尖,顶点可由多个三角形基本面元的拼接近似,因此顶点法向量可采用顶点所在面元及其相邻的多个面元的平均法向量来进行处理和显示,使模型更加精细准确。而对于尾翼散射点,现有宽带雷达下,距离分辨率一般为分米量级。在较远距离下,尾翼尺度与雷达距离分辨率是可以比拟的,尾翼上不同散射点的分辨间隔相对于尾翼和弹体的尺度差异是非常小的,可以近似看作一个强散射点,同样选择尾翼上各面元的平均法向量作为尾翼散射点的近似法向量。

图3为锥顶点A的局部放大图,A为其所在的三角形面元的中心,假设顶点A所在面元的相邻面元个数为12,分别记其相邻面元的中心依次为 $A_1, A_2, \dots, A_{12}$ (按顺时针顺序),记各面元的法向量依次为 $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_{12}$ ,则采用平均法向量的方法,顶点A的法向量可近似表示为:

$$\mathbf{n}_A \approx \frac{\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2 + \dots + \mathbf{n}_{12}}{12} \quad (6)$$

同理,对于弹头尾翼,其散射中心 $P_1, P_2$ 的法向量仍可以用其相邻面元法向量的平均来近似,这里记 $P_1, P_2$ 的平均法向量分别为 $\mathbf{n}_{P_1}$ 和 $\mathbf{n}_{P_2}$ 。此时,对于弹头顶点和尾翼散射点,采用计算机图形学的面消隐算法即可完成遮挡的判断。其表达式为:

$$\delta_O = \begin{cases} 1, & \cos\langle \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_s \rangle < 0 \\ 0, & \cos\langle \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_s \rangle > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\delta_O$ 为遮挡因子; $\mathbf{n}_s$ 为顶点和尾翼散射中心的平均法向量,可分别由 $\mathbf{n}_A, \mathbf{n}_{P_1}$ 和 $\mathbf{n}_{P_2}$ 表示, $\mathbf{n}$ 为雷达视线方向的单位矢量。即雷达视线方向与散射点平均法向量的夹角为钝角时,散射点可见;雷达视线方向与散射点平均法向量的夹角为锐角时,散射点不可见。

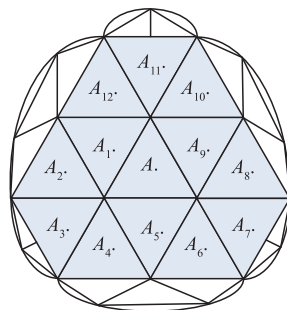


图3 锥顶局部放大图

如图4为弹头散射点遮挡示意图,以弹头目标靠近雷达为例, $\mathbf{n}$ 为雷达视线方向单位向量, $H$ 为雷达视线 $\mathbf{n}$ 与锥体对称轴 $AO'$ 构成的入射平面,入射平面与锥体底面相交于 $B, C$ 两点,此时 $B, C$ 即滑动散射中心,从图中可以看出 $B$ 点始终可见。

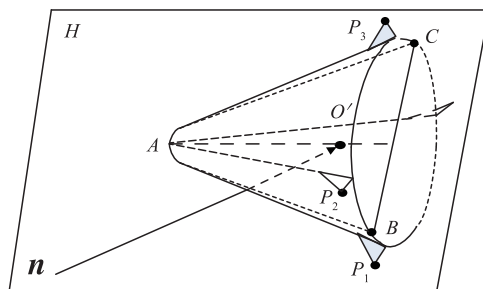


图4 弹头散射点遮挡示意图

不考虑雷达电磁波的绕射效应。可以看出,在雷达视线方向上至少有一个尾翼散射点被遮挡;同理,较远的滑动散射中心 $C$ 被锥体遮挡。从图4的示意图可以看出,若随着目标的平动和微动,雷达视线发生变化,入射平面随之改变,目标回波亦相应发生变化。

基于以上分析,对于弹体顶点、尾翼散射点和滑动散射点,采用平均向量法进行遮挡效应建模,在此基础上提取锥体上的主要可视散射点,得到目标较为真实的仿真回波数据。

## 3 目标回波仿真与微多普勒特征分析

为体现不同观测视角下的遮挡情况,本文分别从侧视、迎头、尾部追踪3个角度进行仿真分析。

首先以侧视为例,仿真参数设置如下:设雷达载频为15 GHz,脉冲重复频率为 $\text{PRF}=2\ 500$  Hz,带宽为1.5 GHz,初始时刻雷达在全局坐标系的坐标为(100 000, 0, 0),弹头位于雷达远场,设初始时刻其质心在全局坐标系中的坐标为(0, 100 000, 0)。此时弹体位于雷达正侧方,弹头在全局坐标系的速度矢量为 $\mathbf{v}=(0, 3\ 000, 0)$ ,其绝对速度约为 $9\ Ma$ ,与真实弹头速度较为接近。同时,为使弹头目标微多普勒更加明显,设弹头锥旋频率为3 Hz,自旋频率为5 Hz,进动

角为  $15^\circ$ 。结合实际弹道导弹的尺寸,设弹长为 3.9 m,底面半径为 0.8 m,尾翼长度为 0.3 m。弹头顶点坐标为  $(0, 1.958, 0)$ , 4 个尾翼散射点坐标分别为  $(-1.105, -1.958, 0)$ ,  $(1.105, -1.958, 0)$ ,  $(0, -1.958, -1.105)$ ,  $(0, -1.958, 1.105)$ , 仿真时长为 2 s。

图 5 为弹头顶点、尾翼散射点在本地坐标系的示意图。

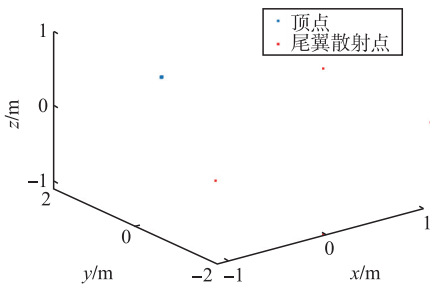


图 5 弹头散射点示意图

图 6 给出了弹头各子面元的法向量分布图,其中橙色向量即为法向量矢量,蓝色部分为锥体表面面元。可以看出,锥体表面的法向量全部指向外侧,锥顶实际中并非理想尖点,因此多个小面元均存在不同方向的法向量,底面边缘的小面元法向量全部垂直向下。

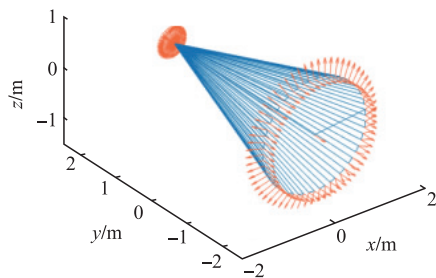


图 6 弹头各子面元的法向量分布图

图 7 为遮挡前弹头散射点的一维距离像分布。在正侧视条件下,遮挡前弹头目标强散射点在雷达视线方向的距离跨度大约为 3 m,考虑到雷达视线角的影响,与目标的真实长度 3.9 m 存在一定的差异,但仍然可以反映出目标强散射点的分布。

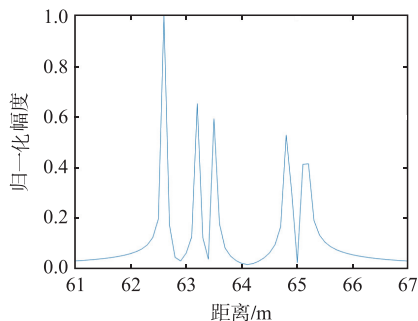
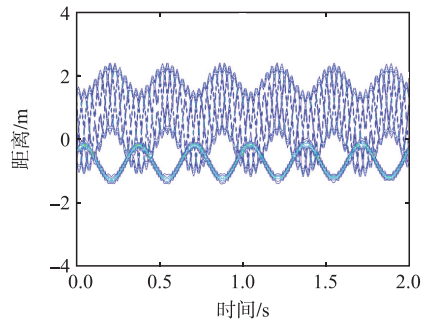


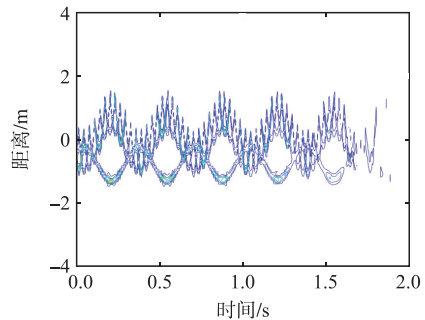
图 7 遮挡前弹头散射点的一维距离像

图 8 为运动补偿后正侧视时遮挡前和遮挡后弹头顶点和尾翼散射点的一维距离像序列,即目标散

射点回波在慢时间-距离域的微多普勒特征曲线。可以看出,顶点只围绕锥旋轴发生旋转,因此其微多普勒曲线为标准正弦曲线,尾翼散射点受到自旋和锥旋的复杂调制,其微多普勒曲线偏离标准正弦,但其包络变化仍为正弦形式。



(a) 遮挡前



(b) 遮挡后

图 8 弹头顶点和尾翼散射点微多普勒曲线

从图 8(b)可以看出,由于遮挡效应的影响,部分尾翼散射点回波丢失,小部分顶点的回波丢失,造成微多普勒曲线的少部分缺失。

图 9 为正侧视时采用本文遮挡效应建模方法提取的弹头表面面元棱线。可见,靠外侧的棱面是可被探测的。

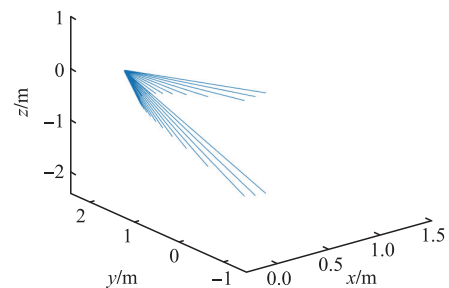


图 9 遮挡后弹头表面面元可见棱线

图 10 为正侧视时遮挡后的弹头散射点一维距离像,由于受遮挡效应的影响部分散射点的回波丢失,遮挡后散射点一维距离像的峰值更加稀疏,可被探测的强散射点回波集中为 3 个较为明显的峰值,相比图 7 HRRP 的峰值明显减少;且可被探测的目标散射点在雷达视线方向的距离跨度为 1 m 左右,明显小于遮挡前的距离跨度,可见遮挡前后目标距离像变化明显。

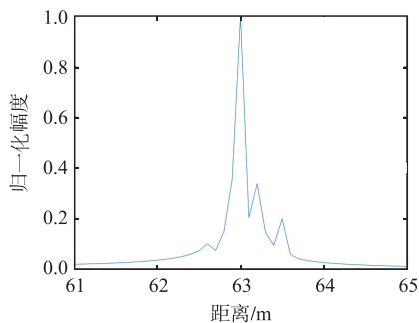
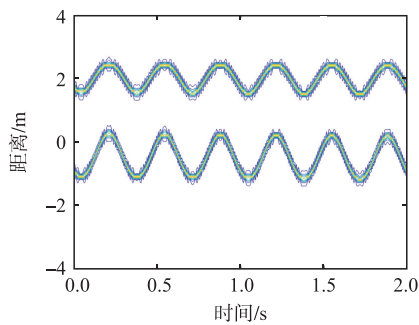
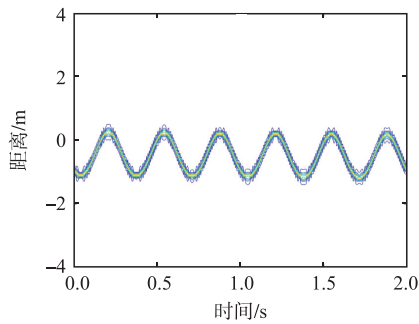


图 10 遮挡后弹头散射点的一维距离像

图 11 进一步给出遮挡前后滑动散射点在距离-慢时间平面的微多普勒曲线。从图 11(a)可以看出, 2 个滑动散射点的微多普勒曲线周期一致, 幅度存在一定的差异, 主要是距离雷达远近不同造成的。需要说明的是, 这两条曲线看似正弦, 却并非标准的正弦形式, 略微有所倾斜, 本质上是一个复合调制的正弦曲线<sup>[5]</sup>。从图 11(b)可以看出, 遮挡后距离雷达较近的(下边缘)滑动散射点微多普勒曲线依然完整, 距离雷达较远的滑动散射点回波被遮挡。



(a) 遮挡前



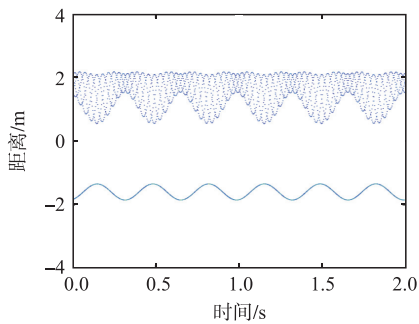
(b) 遮挡后

图 11 滑动散射点微多普勒曲线

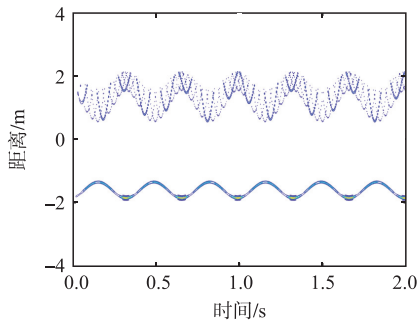
假设精确的运动补偿已完成, 图 12~14 分别给出雷达对弹进行迎头照射、尾部追踪和正下方顶视 3 种观测视角下的遮挡前后的微多普勒曲线, 弹的位置、速度不变, 雷达坐标分别更改为(0, 800 000, 0)、(-100 000, 0, 0)和(0, 0, 0)。

图 12(a)和(b)分别为迎头时遮挡前后弹头顶点和尾翼散射点的微多普勒特征曲线。从图 12(a)可以看出, 由于弹头朝向雷达飞行, 顶点不受遮挡, 故顶点的微多普勒曲线保留较为完整; 从图 12(b)

可以看出, 随着目标的旋转, 尾翼散射点微多普勒曲线部分被遮挡, 曲线不再完整。



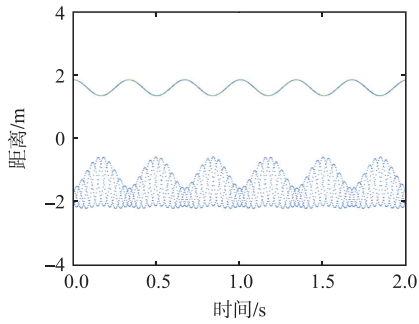
(a) 遮挡前



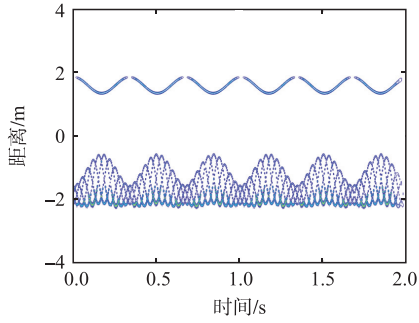
(b) 遮挡后

图 12 迎头时遮挡前后弹头散射点微多普勒曲线

图 13 为尾部追踪时遮挡前后弹头顶点和尾翼散射点的微多普勒特征曲线。从图 13(a)可以看出, 由于弹头远离雷达飞行, 尾翼散射点不受遮挡; 从图 13(b)可以看出, 因弹头旋转, 顶点受到尾翼的周期性遮挡, 顶点的微动回波有少部分缺失, 微多普勒曲线周期性不连续, 而尾翼散射点的微多普勒曲线较为完整。



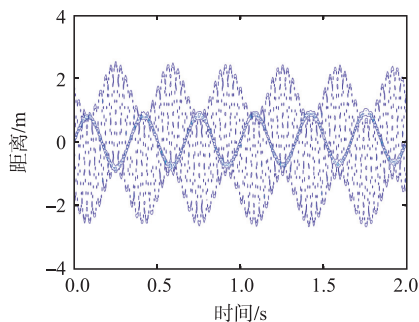
(a) 遮挡前



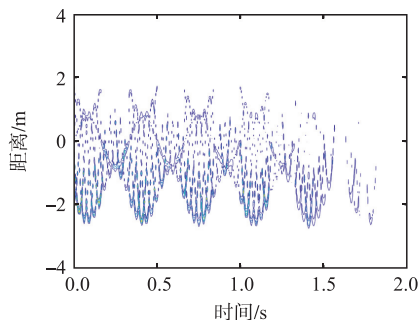
(b) 遮挡后

图 13 尾部追踪时遮挡前后弹头散射点微多普勒曲线

考虑到更为特殊的情况,当雷达位于弹体正下方时,图14给出了运动补偿后在顶视条件下弹头散射点回波遮挡前后的微多普勒曲线。由图14(a)可见,此时顶点回波的微多普勒位于尾翼散射点微多普勒曲线的中间位置;由图14(b)可见,由于雷达与弹底面共面,对尾翼散射点为直视,当尾翼转至远离雷达一侧时,回波被遮挡;而随着弹远离雷达,顶点回波随时间的增加遮挡效应逐渐明显。由图15可以看出,顶视条件下弹头表面的大部分棱线可见。



(a) 遮挡前顶点及尾翼散射点微多普勒曲线



(b) 遮挡后顶点及尾翼散射点微多普勒曲线

图14 顶视时遮挡前后弹头散射点微多普勒曲线

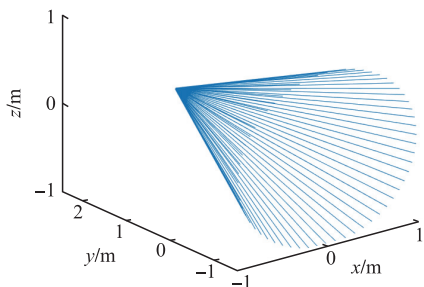


图15 顶视时遮挡后弹头表面面元可见棱线

## 4 结语

实际中的弹道导弹目标实测数据获取较为困难,计算机仿真仍是十分有效的工具手段。本文在宽带高频雷达下,针对锥体弹头目标,在计算机图形学消隐算法的基础上,结合弹头目标散射点独特的散射特性进行遮挡效应建模,进一步获取了遮挡后目标散射点在距离-慢时间平面的微多普勒曲线,仿真分析了遮挡对散射点微多普勒的影响,对于实际

中的弹道目标探测及微动特征提取具有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] CHEN V C, LI F Y, HO S S, et al. Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model and Simulation Study [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] CHEN V C. Micro-Doppler Effect in Radar [M]. Boston, London: Artech House, 2011.
- [3] ZHANG Q, LUO Y, CHEN Y A. Micro-Doppler Characteristics of Radar Targets [M]. Netherlands: Elsevier Press, 2017.
- [4] 张群, 胡健, 罗迎, 等. 微动目标雷达特征提取、成像与识别研究进展 [J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 531-547.
- [5] 马梁, 刘进, 王涛, 等. 旋转对称目标滑模型散射中心的微 Doppler 特性 [J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(5): 605-616.
- [6] WANG J, LEI P, SUN J P, et al. Spectral Characteristic of Mixed Micro-Doppler Time-Frequency Data Sequences in Micro-Motion and Inertial Parameter Estimation of Radar Targets [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2014, 8(4): 275-281.
- [7] GAO H W, XIE L G, WEN S L, et al. Micro-Doppler Signature Extraction from Ballistic Target with Micro-Motions [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2010, 46(4): 1969-1982.
- [8] 姚辉伟, 魏玺章, 徐少坤, 等. 弹道中段进动目标非理想散射中心微动特性研究 [J]. 电子学报, 2012, 40(9): 1844-1851.
- [9] 袁斌, 徐世友, 刘洋, 等. 基于复数经验模式分解的非旋转对称空间进动目标回波分离及成像研究 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 1-7.
- [10] 许旭光, 冯存前, 陈蓉, 等. 锥柱体弹道目标遮挡效应分析 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(3): 36-41.
- [11] 许旭光, 冯存前, 李靖卿, 等. 中段弹道目标微多普勒历程修复算法 [J]. 信号处理, 2018, 34(7): 860-866.
- [12] 苏楠, 戴奉周, 刘宏伟. 基于 HRRP 序列的钝头倒角锥目标微动特性分析及参数估计 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41(7): 1751-1757.
- [13] HEARN D, BAKER M P, CARITHERS W R. 计算机图形学 [M]. 4 版, 蔡士杰, 杨若瑜, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014.

(编辑: 徐敏)