

## 卡车目标遮挡效应建模及微多普勒特征分析

李开明<sup>\*①</sup> 张群<sup>①②</sup> 梁必帅<sup>①</sup> 罗迎<sup>①</sup> 杨小优<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

<sup>②</sup>(复旦大学波散射与遥感信息国家重点实验室 上海 200433)

**摘要:** 微多普勒是微动目标独特的特征, 车轮旋转的微多普勒是卡车目标的重要特征, 可为卡车的识别研究提供依据。首先基于散射点模型, 结合卡车和雷达的位置关系, 采用画家算法对卡车进行遮挡效应建模; 其次, 建立了卡车微动模型, 分析了卡车运动时非旋转散射点多普勒及轮毂旋转散射点微多普勒随方位角、掠地角、速度和加速度的变化规律, 为卡车微多普勒特征提取及识别研究打下基础。仿真验证了该方法的有效性和理论分析的正确性。

**关键词:** 目标识别; 卡车识别; 微多普勒; 画家算法; 遮挡效应

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)09-2114-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01609

## Occlusion Modeling and Micro-Doppler Characteristic Analysis for Truck Target

Li Kai-ming<sup>①</sup> Zhang Qun<sup>①②</sup> Liang Bi-shuai<sup>①</sup> Luo Ying<sup>①</sup> Yang Xiao-you<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

<sup>②</sup>(Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** Micro-Doppler is a unique characteristic of micro-motion targets, as an important signature of truck, micro-Doppler generated by rotation of wheels will offer proof for recognition of the truck. Firstly, on the basis of scatterer model, taking the relative position between radar and truck into consideration, the occlusion model of truck is established by applying the Painter's algorithm in computer graphics; then the micro-motion of truck is modeling, the variation of Doppler and micro-Doppler with azimuth, depression angle, velocity and acceleration is analyzed for non-rotating scatterers and rotating scatterers respectively, which is the fundament of signature extraction and target recognition for the truck based on micro-Doppler. The effectiveness of the method and correctness of the analysis are proved by simulation results.

**Key words:** Target recognition; Truck recognition; Micro-Doppler; Painter's algorithm; Occlusion

### 1 引言

卡车是重要的交通工具, 对卡车目标展开研究, 对于智能交通系统的发展和战场监测具有重要的应用价值<sup>[1-5]</sup>。目前, 对卡车的探测识别主要有声波、地震波和电磁波 3 种方式<sup>[1]</sup>, 其中电磁波主要包括激光、红外和微波。对于声波和地震波, 主要在信号的时域和频域进行特征提取进而完成识别<sup>[2,3]</sup>。对于微波雷达, 可对包含车辆的 SAR/ISAR 图像进行特征提取<sup>[4,5]</sup>, 也可以通过提取车辆目标的高分辨率距离像(HRRP)<sup>[6]</sup>、回波谱图<sup>[7]</sup>、多普勒谱<sup>[6,8,9]</sup>、微多普勒<sup>[10-12]</sup>等特征进行识别。

卡车轮旋转是典型的微动, 目标微动会产生微多普勒(micro-Doppler effect)效应。相对于其它特征, 微多普勒特征独特而稳健, 是目标分类与识别的重要依据<sup>[13-15]</sup>。通常, 卡车的微动只包含车轮的旋转和发动机气缸运动带来的车身振动, 但由于振动幅度极小且频率很高, 不易被雷达感知。

目前, 国内针对卡车目标微多普勒及遮挡效应进行建模研究的还相对较少。文献[11,12]对卡车进行微动建模, 但只是孤立地研究车轮, 并未结合卡车整体的散射效应, 并未考虑车辆与雷达的位置关系及遮挡效应的影响。实际中的雷达通常为机载或阵地雷达, 对车辆通常为俯视扫描, 因此必须考虑遮挡效应。本文针对卡车 3 维散射点模型, 利用画家算法进行遮挡效应建模, 进一步建立了卡车微动模型, 分析了卡车非旋转点多普勒及旋转点微多普勒随方位角、掠地角、速度及加速度的变化规律, 仿真验证了算法的有效性和分析的正确性。

2012-12-12 收到, 2013-03-29 改回

国家自然科学基金(61172169, 61201369)和陕西省自然科学基金(2012JQ8036)资助课题

\*通信作者: 李开明 likaiming1982@163.com

## 2 卡车遮挡效应建模

对于高频雷达(如毫米波雷达),电磁波的主要能量沿射线轨迹传播<sup>[16,17]</sup>。此时,刚体目标遮挡效应建模可等效为碰撞模型。目前,碰撞模型是数学领域的研究难点之一,常常需要借助计算机图形学<sup>[18]</sup>。画家算法是计算机图形学常用的面消隐算法,其核心思想是把物体各个面按其离视点的远近进行排序后,按照深度优先级依次投影进而消除被遮挡面<sup>[18]</sup>。

雷达工作于微波波段时,目标可用散射点模型来近似<sup>[17]</sup>。远场情况下,雷达波近似为平面波,对散射点近似平行照射。假设远场目标在雷达照射下存在一个最大可视区域,称之为“视界”,视界是所有可视区域的并集。视界内所有散射点在垂直于雷达视线(LOS)方向的投影组成的平面,称为“最大投影面”,沿LOS方向从远到近依次对散射点在最大投影面内进行平行投影,使离雷达较近的散射点可以覆盖住离雷达较远的散射点,图1即为遮挡效应示意图。

如图2,设卡车处于雷达远场,雷达位于全局坐标系XYZ的Z轴上,坐标为 $(X_r, Y_r, Z_r) = (0, 0, Z_0)$ 。以LOS方向为y轴建立雷达坐标系xyz,  $x'y'z'$ 为卡车本地坐标系,图3为本地坐标系下车轮旋转示意图。为简化分析,设卡车以速度 $\mathbf{v} = [v_x, 0, 0]^T$ 平行于X轴前进,记初始时刻LOS方向矢量为 $\mathbf{R}_{LOS}$ ,其方向为从雷达指向卡车中心Q,对应的方位角和掠地角分别为 $\varphi, \theta$ ,其中 $\varphi$ 为Y轴正向与雷达视线在XOY面内投影的夹角,以顺时针为正,且满足 $\varphi \in (-\pi/2, \pi/2), \theta \in (0, \pi/2)$ 。

设卡车表面共有k个散射点,在本地坐标系下的集合记为 $C' = \{c'_i = (x'_i, y'_i, z'_i)\}_{i=1}^k$ 。则根据右手定则有: $x = y \times Z, z = x \times y$ 。设雷达坐标系的3个坐标轴在全局坐标系中的单位矢量分别为 $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0$ 。设 $\widehat{\mathbf{R}}$ 为雷达坐标系到本地坐标系的旋转变换矩阵,由于本地坐标系与全局坐标系平行,且 $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0,$

$\mathbf{z}_0$ 为相互正交的单位矢量,所以 $\widehat{\mathbf{R}}$ 为正交矩阵。因此可推得 $\widehat{\mathbf{R}}^{-1} = \widehat{\mathbf{R}}^T = [\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0]^T$ ,  $\widehat{\mathbf{R}}^T$ 即为本地坐标系到雷达坐标系的旋转矩阵。

借鉴画家算法,卡车遮挡的实现步骤如下:(1)将集合 $C'$ 通过坐标旋转,变换为雷达坐标系下的集合 $C = \widehat{\mathbf{R}}^T \cdot C'$ ,将卡车目标视界上的散射点在平行于 $xO'z$ 的最大投影面 $S_\pi$ 内进行投影;(2)选择合适的面积单元 $\Delta s$ 把 $S_\pi$ 划分成 $N \times M$ 个单元格,其中 $\Delta s = dx \times dz$ ,  $dx, dz$ 分别为单元格的长和宽;(3)对 $C$ 沿y轴方向进行深度排序,记录下其对应的标号,按照由远到近的顺序依次在 $S_\pi$ 内进行平行投影,使其落在相应的单元格内;(4)按照标号提取出“可视”散射点,并计算其对应的回波。

## 3 卡车目标微动建模

卡车车轮外缘通常为橡胶材质,散射较弱,而轮毂为金属材质且表面起伏较大,散射相对较强。因此,本文重点分析轮毂上的散射点。如图3所示,以卡车后轮为例,设轮毂中心A在全局坐标系的初始坐标为 $(X_C, Y_C, Z_C)$ 。卡车中心Q为本地坐标系原点,其到A点的距离矢量为 $\mathbf{R}_0$ ,车轮半径矢量为 $\mathbf{r}$ ,轮毂半径矢量为 $\mathbf{r}_0$ ,轮毂边缘第n个旋转点A'绕轮毂中心A以角速度 $\boldsymbol{\omega} = [0, \omega_y, 0]$ 转动,初始相位为 $\beta_{n10}$ 。则t时刻轮毂中心A和轮毂旋转点A'到雷达的距离分别为

$$\|\mathbf{R}_A(t)\| = \|\mathbf{R}_{LOS} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_{init} \cdot \mathbf{R}_0\| \quad (1)$$

$$\|\mathbf{R}_{A'}(t)\| = \|\mathbf{R}_{LOS} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_{init} \cdot (\mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_w \cdot \mathbf{r}_0)\| \quad (2)$$

其中 $\|\cdot\|$ 表示欧式范数,  $\mathbf{R}_{init}$ 为欧拉旋转矩阵,此时 $\mathbf{R}_{init} = \widehat{\mathbf{R}}^T$ 。  $\mathbf{R}_w$ 为微动变换矩阵,对于卡车目标,其微动主要为绕轮轴(即本地坐标系 $y'$ 轴)的旋转,故有

$$\mathbf{R}_w = \begin{bmatrix} \cos \Omega t & 0 & -\sin \Omega t \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Omega t & 0 & \cos \Omega t \end{bmatrix} \quad (3)$$

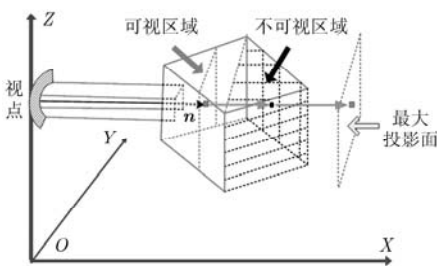


图1 遮挡效应示意图

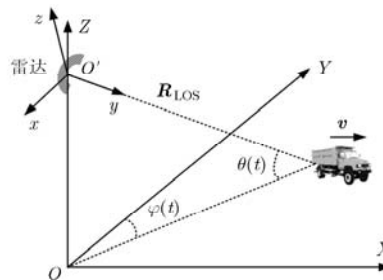


图2 卡车与雷达位置关系图

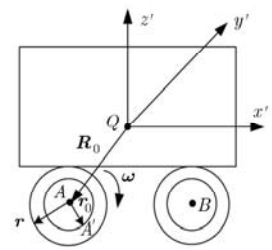


图3 卡车轮轴旋转示意图

其中  $\Omega = \|\boldsymbol{\omega}\| = \omega_Y$ 。对回波相位求导, 即可得到散射点的瞬时多普勒频率。对于点  $A'$  有

$$f_D = \frac{2}{\lambda} \left[ \mathbf{v} + \frac{d}{dt} (\mathbf{R}_{\text{init}} \cdot \mathbf{R}_w \cdot \mathbf{r}_0) \right]^T \mathbf{n} \quad (4)$$

其中  $\mathbf{n}$  为雷达视线方向单位矢量, 且有

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{R}_{\text{LOS}} + \mathbf{v}t + \mathbf{R}_{\text{init}} \cdot (\mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_w \cdot \mathbf{r}_0)}{\|\mathbf{R}_{\text{LOS}} + \mathbf{v}t + \mathbf{R}_{\text{init}} \cdot (\mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_w \cdot \mathbf{r}_0)\|} \quad (5)$$

在远场情况下,  $\mathbf{R}_{\text{LOS}} \gg \mathbf{v}t + \mathbf{R}_{\text{init}} \cdot (\mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_w \cdot \mathbf{r}_0)$ , 此时,  $\mathbf{n} \approx \mathbf{R}_{\text{LOS}} / \|\mathbf{R}_{\text{LOS}}\|$ 。可以看出, 式(4)等号右边第 1 项为卡车平动产生的多普勒频率, 第 2 项即为车轮旋转产生的微多普勒频率。

## 4 卡车微多普勒特征分析

### 4.1 多普勒/微多普勒频率与方位角、掠地角的变化

如图 2, 设初始时刻卡车位于  $Y$  轴的  $(0, Y_c, 0)$  处, 雷达到后轮中心  $A$  的初始距离  $R_{A0} = \sqrt{Y_c^2 + Z_0^2}$ 。  $t$  时刻后,  $A$  点的  $X$  轴坐标变为  $X(t) = X_c + v_X \cdot t = Z_0 \cdot \cot \theta(t) \cdot \sin \varphi(t)$ , 此时  $\theta(t) = \arctan(Z_0 / \sqrt{Y_c^2 + X^2(t)})$ ,  $\varphi(t) = \arctan(X(t) / Y_c)$ 。则 LOS 方向矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\text{LOS}} &= [X(t) - X_r, Y_c - Y_r, Z_c - Z_r] \\ &= [X(t), Y_c, -Z_0] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \|\mathbf{R}_{\text{LOS}}\| &= \sqrt{[Z_0 \cot \theta(t) \sin \varphi(t)]^2 + Y_c^2 + Z_0^2} \\ &= \sqrt{[Z_0 \cot \theta(t) \sin \varphi(t)]^2 + R_{A0}^2} \end{aligned} \quad (7)$$

则 LOS 方向单位矢量为

$$\mathbf{n} = \left[ X(t) / \|\mathbf{R}_{\text{LOS}}\|, Y_c / \|\mathbf{R}_{\text{LOS}}\|, -Z_0 / \|\mathbf{R}_{\text{LOS}}\| \right]$$

故  $A$  点的多普勒频率可表示为

$$\begin{aligned} f_D &= \frac{2 \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}}{\lambda} = \frac{2v_X \cdot Z_0 \cdot \cot \theta(t) \cdot \sin \varphi(t)}{\lambda \cdot \|\mathbf{R}_{\text{LOS}}\|} \\ &= \frac{2v_X}{\lambda \sqrt{1 + E^2 \tan^2 \theta(t) \csc^2 \varphi(t)}} \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $E = R_{A0} / Z_0 = \csc \theta(0)$ ,  $\theta(0)$  为初始掠地角。由式(8)可见, 轮毂中心  $A$  的多普勒受方位角和掠地角的复合调制。由于卡车运动过程中  $\varphi(t)$  从负到正递增,  $\theta(t)$  先增大后减小, 故  $\csc^2 \varphi(t)$  先增大后减小,  $\tan^2 \theta(t)$  先增大后减小, 所以  $A$  点的多普勒频率(绝对值)随方位角和掠地角先减小后增大, 但还需考虑多普勒频率随速度  $v_X$  方向的变化而有正有负。

记  $\mathbf{r}_0 = \|\mathbf{r}_0\|$ , 此时点  $A'$  的瞬时线速度为  $\mathbf{v}_i = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_0 = (\Omega r_0 \cos(\Omega t + \beta_{n10}), 0, \Omega r_0 \sin(\Omega t + \beta_{n10}))$ , 则点  $A'$  的微多普勒频率为

$$\begin{aligned} f_{\text{mD}} &= \frac{2 \cdot \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}}{\lambda} = \frac{2\Omega r_0}{\lambda \sqrt{1 + E^2 \tan^2 \theta(t) \csc^2 \varphi(t)}} \\ &\quad \cdot F \cos(\Omega t + \beta_{n10} + \psi(t)) \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{1 + \tan^2 \theta(t) \csc^2 \varphi(t)} \\ \psi(t) &= \arccot \cot \theta(t) \sin \varphi(t) \end{aligned}$$

式(9)表明, 轮毂旋转点微多普勒的幅值与旋转频率、半径和雷达载频成正比, 同样其幅度和相位均受到方位角和掠地角的复合调制。对式(9)进一步化简得

$$\begin{aligned} f_{\text{mD}} &= \frac{2\Omega r_0}{\lambda E \sqrt{1 - \frac{G^2}{1 + \tan^2 \theta(t) \csc^2 \varphi(t)}}} \\ &\quad \cdot \cos(\Omega t + \beta_{n10} + \psi(t)) \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $G = \cos \theta(0)$ 。由于旋转点瞬时线速度的方向不停地变化, 故可以不考虑速度方向的影响。同样, 由式(10)可见, 轮毂旋转点微多普勒的峰值包络随方位角和掠地角先减小后增大, 与轮毂中心多普勒(绝对值)随方位角和掠地角的变化趋势一致。实际中, 由于地物的遮挡及雷达盲区的存在, 雷达初始掠地角既不能太大也不能太小, 通常在一定的范围内选取, 此时式(11)的近似成立:

$$\begin{aligned} &\frac{F}{\sqrt{1 + E^2 \tan^2 \theta(t) \csc^2 \varphi(t)}} \\ &= \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \theta(t) \csc^2 \varphi(t)}}{\sqrt{1 + E^2 \tan^2 \theta(t) \csc^2 \varphi(t)}} \approx 1 \end{aligned} \quad (11)$$

此时, 旋转点  $A'$  的微多普勒频率近似为

$$f_{\text{mD}} \approx 2\Omega r_0 \cos(\Omega t + \beta_{n10} + \psi(t)) / \lambda \quad (12)$$

可以看出, 轮毂边缘旋转点的微多普勒频率随时间近似满足正弦(余弦)规律的变化。

### 4.2 多普勒/微多普勒频率随速度、加速度的变化

如图 2, 设初始时刻卡车位于全局坐标系的  $Y$  轴, 沿  $X$  轴方向以速度  $\mathbf{v}$  和加速度  $\mathbf{a}$  前进, 轮毂中心  $A$  到雷达的初始距离为  $R_{A0}$ , 记  $v = \|\mathbf{v}\|$ ,  $a = \|\mathbf{a}\|$ 。  $t$  时刻后,  $A$  点到雷达的距离变为  $\|\mathbf{R}_A(t)\| = (R_{A0}^2 + (vt + at^2/2)^2)^{1/2}$ 。则点  $A$  的多普勒频率为

$$\begin{aligned} f_{\text{DA}} &= \frac{2}{\lambda} \frac{d}{dt} \|\mathbf{R}_A(t)\| = \frac{2}{\lambda} \left( vt + 3vat^2/2 + a^2t^3/2 \right) \\ &\quad \cdot \left( R_{A0}^2 + (vt + at^2/2)^2 \right)^{-1/2} \end{aligned} \quad (13)$$

对式(13)进行泰勒展开并忽略高阶项得

$$f_{\text{DA}} \approx \frac{2v^2}{\lambda R_{A0}} t + \frac{3va}{\lambda R_{A0}} t^2 \quad (14)$$

可以看出, 当卡车匀速运动时, 非旋转点的瞬时多普勒频率表现为时间的一次函数, 在时频平面内为线性调频形式, 且调频斜率与目标速度、初始距离及载频有关。当卡车加速运动时, 非旋转点的瞬时多普勒频率表现为时间的二次函数, 在时频平面内表现为曲线形式, 其曲率大小由速度和加速度共同决定。可见速度、加速度的变大都会导致目标

多普勒频率的走动和频谱的展宽，但速度的变大更多体现在调频斜率的变化，加速度的变大将导致瞬时多普勒的时频曲线发生弯曲。

对于轮毂旋转点  $A'$  有

$$\begin{aligned} \|\mathbf{R}_{A'}(t)\| &= \left\{ (vt + at^2/2 + r_0 \cos(\Omega t + \beta_{n10}))^2 \right. \\ &\quad \left. + Y_c^2 + (Z_0 - r_0 \sin(\Omega t + \beta_{n10}))^2 \right\}^{1/2} \\ &\approx R_{A0} + vt + at^2/2 + r_0 \cos(\Omega t + \beta_{n10}) \end{aligned} \quad (15)$$

此时，其瞬时多普勒频率为

$$\begin{aligned} f_{DA'} &= \frac{2}{\lambda} \frac{d}{dt} \|\mathbf{R}_{A'}(t)\| \\ &= 2 \cdot (v + at - \Omega r_0 \sin(\Omega t + \beta_{n10})) / \lambda \end{aligned} \quad (16)$$

可以看出，旋转点的瞬时多普勒频率在时频面内表现为线性调频与正弦调频的叠加。式(16)的第 3 项即为轮毂旋转点微多普勒频率，表现为时间  $t$  的正弦曲线，其幅度与旋转频率、半径及雷达载频有关，其基线位置为轮毂中心的多普勒，即瞬时多普勒中心，由式(16)的第 1、第 2 项决定。因此速度的变大将导致其多普勒中心的走动，同时使车轮旋转角速度  $\Omega$  变大，导致微多普勒曲线的幅值变大，从而使瞬时多普勒谱发生展宽。而加速度的变化主要影响正弦曲线的基线和峰值包络的走势。

## 5 仿真实验

### 5.1 遮挡效应仿真

为使仿真更加逼真，采用 3D-MAX 重建卡车 3 维网格模型，进一步得到图 4(a) 散射点更加密集模型。该 3 维模型共 20068 个散射点，其中车头部分 13195 个，车厢部分 6845 个。因为车厢部分大多

为平面，散射点分布较为稀疏，其分辨间隔约为 0.147 m；而车头部分包括挡泥板、发动机顶盖等，需要较多的散射点才能描述其表面的起伏变化，因此分辨间隔相对较小。每个轮子选取 1 个轮毂中心和 6 个旋转点，初始相位分别为  $(0, \pi/3, 2\pi/3, \pi, 4\pi/3, 5\pi/3)$ 。仿真参数如表 1 所示。

为达到较好的遮挡效果，仿真中  $\Delta s$  的长度  $dx$  和宽度  $dz$  的选取应尽可能接近卡车表面的平均分辨间隔(主要参考车厢分辨间隔)，这里分别取为 0.15 m 和 0.14 m。图 4(b)、4(c) 分别为方位角在  $-45^\circ$  和  $45^\circ$  下的遮挡结果。可以看出，位于雷达波束阴影区的散射点基本被遮挡。可见，画家算法可以有效实现卡车散射点模型的遮挡效应建模。

### 5.2 多普勒/微多普勒频率变化历程仿真

如图 2，设卡车沿  $X$  轴正向从  $(-9000, 1000, 0)$  运动到  $(9000, 1000, 0)$ ，共耗时 820 s，方位角  $\varphi \in (-84^\circ, 84^\circ)$ ，掠地角  $\theta \in (6.3^\circ, 45^\circ)$ 。图 5 和图 6 分别为多普勒/微多普勒随方位角和掠地角变化的关系图。可见，轮毂中心的多普勒频率(绝对值)、轮毂旋转点的微多普勒频率峰值包络随方位角和掠地角先减小后变大，但多普勒频率受速度方向的影响，故随方位角和掠地角的变化一直减小，与理论分析结果一致。同时，从图 5(c) 和图 6(c) 可以看出，微多普勒频率在包络内表现为正弦调制形式。从图 5(c) 可见，当方位角为  $0^\circ$  时，轮毂旋转点微多普勒频率的瞬时值变为零。从图 6(c) 可见，掠地角为  $45^\circ$  时轮毂旋转点微多普勒频率的瞬时值同样变为零，即卡车经过与  $Y$  轴的交点处，与图 5(c) 的结果一致。

表 1 雷达和目标参数

雷达坐标	(0,0,1000)	车轮半径	0.5 m	卡车宽度	2.8 m
发射信号载频	35 GHz	轮毂半径	0.25 m	卡车散射点总数	20068 个
卡车初始位置	(-1000,1000,0)	卡车长度	9.5 m	轮毂中心数	4 个
卡车速度	22 m/s	卡车高度	3.2 m	每个车轮旋转点个数	6 个

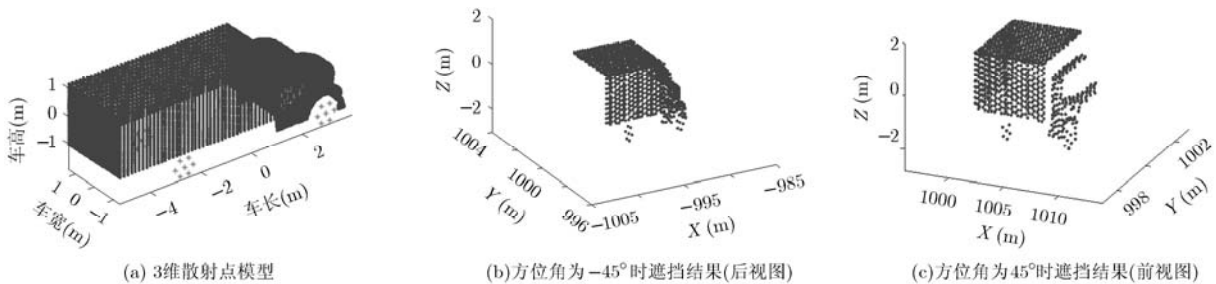


图 4 卡车仿真模型及不同方位角下的遮挡结果

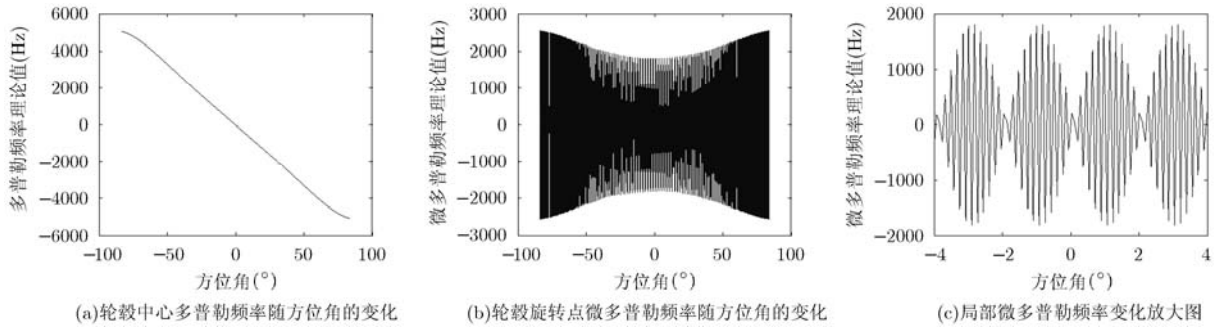


图 5 多普勒/微多普勒频率随方位角的变化关系图

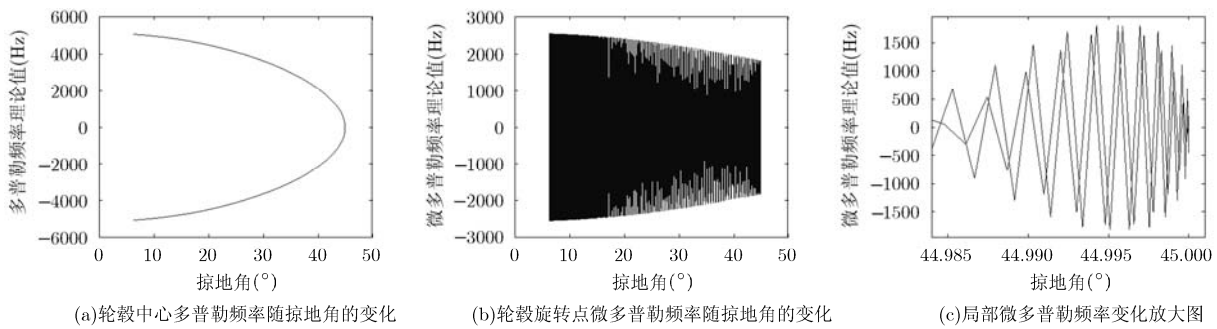


图 6 多普勒/微多普勒频率随掠地角的变化关系图

图 7 和图 8 分别为卡车运动过程中第 200 s, 409 s 和 600 s 的基带回波时频分析结果。可见, 在较短时间内轮毂中心多普勒频率近似不变, 而旋转点微多普勒频率表现为正弦调频形式。同时可以看出,

随着卡车运动, 轮毂中心的多普勒频率与轮毂旋转点的微多普勒频率峰值随方位角和掠地角的变化先减小后变大, 与图 5 和图 6 的结论一致。

图 9 和图 10 分别给出卡车速度为 22 m/s 和 27

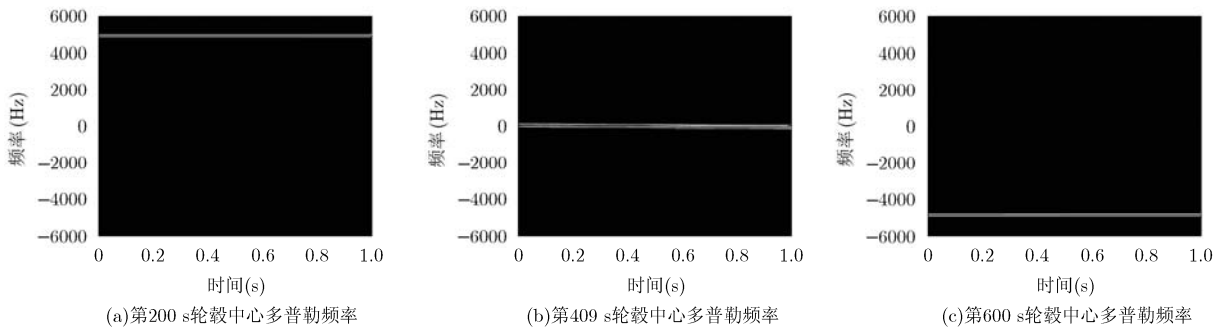


图 7 不同时刻轮毂中心回波时频分析结果

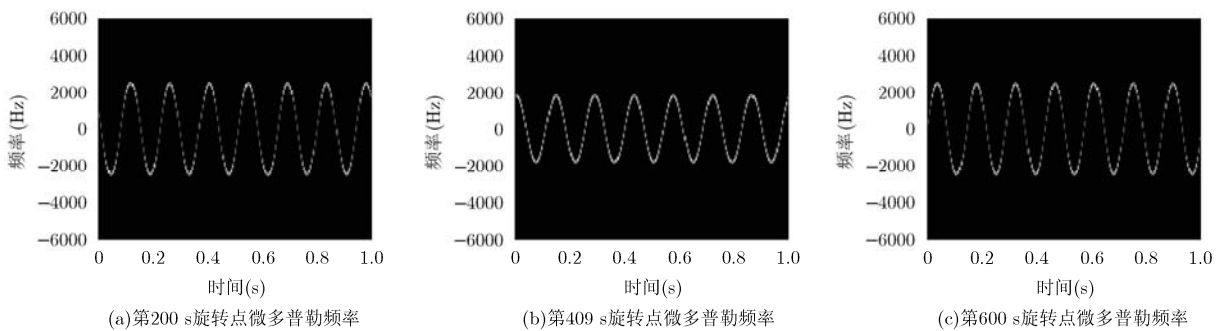


图 8 不同时刻轮毂旋转点回波时频分析结果

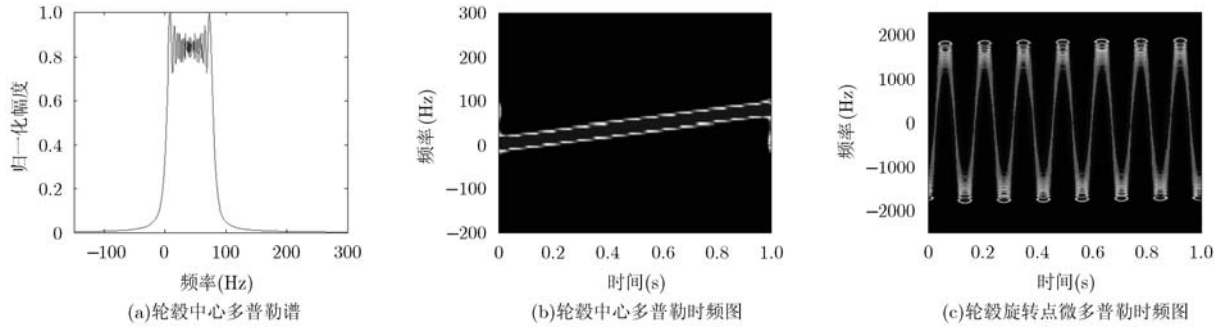


图 9  $v = 22 \text{ m/s}$  时多普勒谱及多普勒/微多普勒时频图

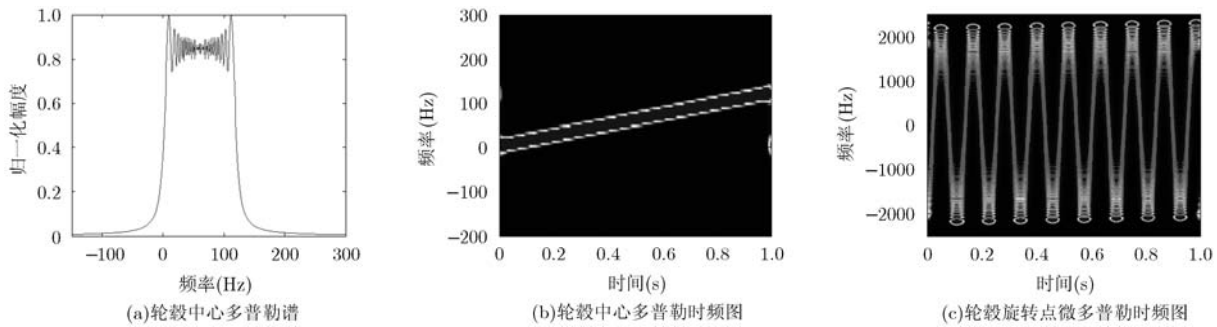


图 10  $v = 27 \text{ m/s}$  时多普勒谱及多普勒/微多普勒时频图

$\text{m/s}$  时，轮毂中心多普勒谱及多普勒/微多普勒的时频表示。从图 9 可见，轮毂中心多普勒频率随时间近似为线性调频变化，旋转点的微多普勒频率曲线接近标准正弦，其峰值包络基本平坦，变化趋势与多普勒频率一致，验证了式(16)的理论结果。由图 10 对比可见，速度的增大使轮毂中心多普勒谱展宽，多普勒频率中心发生走动，微多普勒频率曲线的峰值明显变大。

图 11 给出速度为  $22 \text{ m/s}$ 、加速度为  $14 \text{ m/s}^2$  的仿真结果。对比图 9 可见，随着加速度的增大，轮毂中心多普勒谱展宽明显，其时频曲线发生较大弯曲，旋转点微多普勒时频曲线的基线及峰值包络相应地向上弯曲，与理论分析一致。

### 6 结论

本文结合散射点模型，利用画家算法实现了卡

车目标遮挡效应建模，分析推导了卡车散射点多普勒/微多普勒频率的变化历程并进行仿真验证，得出如下结论：(1)卡车非旋转点(包括轮毂中心)多普勒频率(理论值)和轮毂旋转点微多普勒频率的峰值包络随方位角和俯仰角先变小后变大，两者变化趋势一致，但非旋转点的多普勒频率需进一步考虑速度方向的变化；(2)在时频域，非旋转点多普勒频率表现为线性调频形式，旋转点微多普勒频率表现为线性调频与正弦调频的叠加；(3)速度的变大使多普勒频率曲线斜率变大，导致多普勒中心走动和多普勒/微多普勒谱的展宽，使微多普勒频率曲线幅度变大；加速度的变大影响多普勒频率曲线的曲率，使多普勒/微多普勒谱展宽，影响正弦曲线的基线和峰值包络的走向。通过对卡车目标的微多普勒分析与仿真，预期为卡车目标特征提取与识别提供参考。

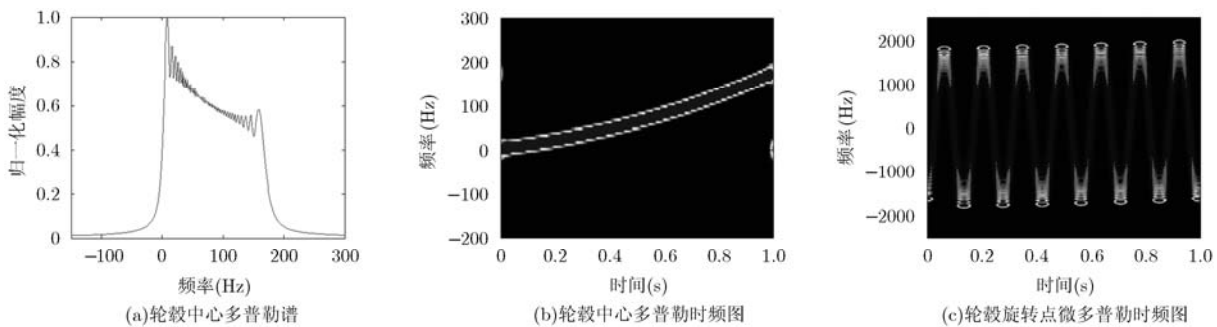


图 11  $v = 22 \text{ m/s}$  ,  $a = 14 \text{ m/s}^2$  时多普勒谱及多普勒/微多普勒时频图

## 参考文献

- [1] 张河. 探测与识别技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003: 1-8.
- [2] 林岳松, 陈琳, 郭宝峰. 基于数据驱动的信息融合及其在车辆声辨识中的应用[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2158-2163. Lin Yue-song, Chen Lin, and Guo Bao-feng. A data-driven fusion and its application to acoustic vehicle classification[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2158-2163.
- [3] 陈珅培, 王曙光, 宁全利. 一种基于炮射地面震动传感器的目标识别算法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(2): 185-188. Chen Shen-pei, Wang Shu-guang, and Ning Quan-li. The study of gun-launched ground vibration sensor recognition arithmetic[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2011, 31(2): 185-188.
- [4] 李禹, 计科峰, 粟毅. SAR图像车辆目标ROI的提取技术[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2105-2109. Li Yu, Ji Ke-feng, and Su Yi. The method of ROI extraction for vehicle in SAR image[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(9): 2105-2109.
- [5] Martorella M, Giusti E, Berizzi F, et al. Automatic target recognition of terrestrial vehicles based on polarimetric ISAR image and model matching[C]. 2008 International Conference on Radar, Adelaide, Aus, Sept. 2-5, 2008: 38-43.
- [6] 廖东平. 支持向量机方法及其在机载毫米波雷达目标识别中的应用研究[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2006. Liao Dong-ping. Study on support vector machine method and its application in target recognition for airborne MMW radar[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2006.
- [7] Eryildirim A and Onaran I. Pulse Doppler radar target recognition using a two-stage SVM procedures[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1450-1457.
- [8] 冀振元, 李晨雷, 唐文彦. 支持向量机在车辆目标识别中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 284-286. Ji Zhen-yuan, Li Chen-lei, and Tang Wen-yan. Application of SVM in recognition of vehicles[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(2): 284-286.
- [9] 方菲菲, 余稳. 基于PCA-LDA-SVM的多普勒雷达车型识别算法[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(1): 111-116. Fang Fei-fei and Yu Wen. Vehicle recognition algorithm with Doppler radar based on PCA-LDA-SVM[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2012, 27(1): 111-116.
- [10] Smith G E, Woodbridge K, and Baker C J. Radar micro-Doppler signature classification using dynamic time warping[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1078-1096.
- [11] 李彦兵, 杜兰, 刘宏伟, 等. 基于微多普勒特征的地面目标分类[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2848-2853. Li Yan-bing, Du Lan, Liu Hong-wei, et al. Ground targets classification based on micro-Doppler effect[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2848-2853.
- [12] 李彦兵, 杜兰, 刘宏伟, 等. 基于信号特征谱的地面目标分类[J]. 电波科学学报, 2011, 26(4): 641-648. Li Yan-bing, Du Lan, Liu Hong-wei, et al. Moving ground targets classification based on eigenvalue sequence of echo signal[J]. *Journal of Radio Science*, 2011, 26(4): 641-648.
- [13] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [14] 张群, 罗迎, 何劲. 雷达目标微多普勒效应研究概述[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(2): 22-26. Zhang Qun, Luo Ying, and He Jin. Review of researches on micro-Doppler effect of radar targets[J]. *Journal of Airforce Engineering University (Natural Science Edition)*, 2011, 12(2): 22-26.
- [15] 王宝帅, 杜兰, 刘宏伟, 等. 基于经验模态分解的空中飞机目标分类[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(9): 2116-2121. Wang Bao-shuai, Du Lan, Liu Hong-wei, et al. Aircraft classification based on empirical mode decomposition[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(9): 2116-2121.
- [16] 黄培康, 殷弘成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 23-28.
- [17] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 13-17.
- [18] Hill F S JR 著. 罗霄, 商青华, 袁春阳, 等, 译. 计算机图形学—用OpenGL实现[M]. 第2版, 北京: 清华大学出版社, 2006: 705-716.
- 李开明: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为雷达成像与目标识别.
- 张群: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理与电子对抗.