

基于散射中心滑动特性的双基地雷达 锥体目标微动特征提取方法

徐志明,艾小锋,刘晓斌,吴其华,赵 锋

(国防科技大学电子信息系复杂电磁环境效应国家重点实验室,湖南长沙 410073)

摘要: 双基地雷达观测下,锥体目标的微动特征可以由顶部局部型散射中心,底面边缘滑动型散射中心和侧面滑动型散射中心的微多普勒来表述.首先,本文建立了三种类型双基地散射中心的微多普勒统一参数化模型;然后,提出滑动系数概念,即采用参数化模型两个参数的比值来定量评价散射中心的滑动特性,从而判别锥体目标上散射中心的类型;最后,通过电磁仿真验证了该参数化模型的准确性以及散射中心类型判别方法的可靠性,对锥体目标识别具有重要意义.

关键词: 双基地雷达;锥体目标;散射中心;微动

中图分类号: TN955 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)03-0461-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20191261

Micro-motion Feature Extraction of Bistatic Radar Cone-Shaped Targets Based on Characteristic Analysis of Sliding Scattering Centers

XU Zhi-ming, AI Xiao-feng, LIU Xiao-bin, WU Qi-hua, ZHAO Feng

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environmental Effects on Electronics and Information System,
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: In the bistatic configuration, the micro-motion features can be represented by three types of scattering centers, the localized scattering center located at the target tip, and the two types of sliding scattering centers sliding along the target bottom edge and on the target side face. The micro-Doppler of three types of scattering centers is firstly represented by a unified parametric model. Then, the sliding coefficient is defined by two parameters of the parametric model, and it is applied to discriminate scattering center types. At last, electromagnetic simulation results demonstrate that the micro-Doppler parametric model is precise, and the presented sliding coefficient is a reliable feature to recognize the cone-shaped targets.

Key words: bistatic radar; cone-shaped targets; scattering center; micro-motion

1 引言

由于受到空气阻力以及释放诱饵等因素的影响,锥体目标在飞行中段和再入段除了自旋,还会伴有进动、章动、摆动等形式的微动^[1].微动同时对电磁波进行额外的调制,产生独特的微动特征.由于锥体目标的微动特征能充分反映目标结构的内在属性,且测量不受雷达信号带宽的限制,利用微动特征对锥体目标进行识别已经被越来越多的学者关注^[2].

锥体目标结构相对简单,散射中心的类型及位置

分布已经研究得较为清楚.国防科技大学马梁、刘进等人首次提出锥体目标底面一阶边缘和锥、柱体结合部分二阶边缘的散射中心会随着雷达视线的变化在边缘上滑动,并不是位置固定不变的理想散射中心^[3,4].文献[5]综合考虑了散射中心滑动现象与遮挡效应,建立了进动锥体目标非理想散射中心的回波模型.北京理工大学郭琨毅团队对双基地雷达模式下锥体目标的散射中心类型进行了系统地研究,指出锥体目标共存在7个散射中心,涵盖4种散射中心类型^[6]:镜面型散射中心、尖顶型散射中心、边缘型散射中心和表面波型散射

中心.

基于上述对锥体目标散射中心的认识,国内外对锥体目标的特征提取和目标识别也展开了广泛的研究.文献[7]基于高分辨率一维距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)序列估计了锥体目标的母线长度和半锥角两个二维几何特征,避免了利用逆合成孔径图像(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)反演锥体目标几何特征稳健性不够的问题.文献[8]利用两次不同视角下的HRRP同时求解了锥体目标进动角,观测角和高度、底面半径、半锥角结构参数,当两次视角差距大时,可以达到很好的估计效果.西安电子科技大学刘宏伟教授团队针对锥体目标的微动特征提取进行了系统的研究:锥体目标平动多普勒补偿^[9]、窄带微动特征提取^[10-12]、宽带微动特征提取^[13-15].空军工程大学张群教授团队较早关注了组网雷达多视角特性在锥体目标三维进动特征提取方面的优越性^[16];冯存前教授团队总结了组网雷达中锥体目标微动特征提取和识别的发展^[17],并基于组网雷达,估计了锥顶散射中心的三维坐标和锥旋轴矢量,实现了锥体目标的三维重构^[18-20].北京航空航天大学束长勇利用微多普勒的频谱结构对锥顶锥体两类散射中心^[21]以及锥体的微动形式(自旋、锥旋、章动)^[22]进行了分类;雷鹏等人建立了基于转动惯量的锥体目标微动模型^[23,24],提出了可以反映目标本质属性的转动惯量比特征^[25].文献[26]利用激光雷达波长短的优点,通过获得的高分辨率一维多普勒像(High-Resolution Doppler Profile, HRDP)估计了锥体目标的进动角、视线角、进动周期三个微动参数.英国思克莱德大学(University of Strathclyde) A. R. Persico在窄带条件下提出了三种基于CVD(Cadence Velocity Diagram, CVD)的锥体目标微动特征提取方法,并分析了三种特征提取方法在不同信噪比下对弹头、诱饵分类的成功概率、目标识别概率和不确定概率^[27];在宽带条件下,利用逆Radon变换获得了锥体目标的二维图像,并基于平移、伸缩、旋转不变的pseudo-Zernike特征对锥体目标和诱饵进行了分类与识别^[28].韩国浦项科技大学(Pohang University of Science and Technology) Kyung-Tae Kim利用窄带“一发三收”雷达网络重构了锥体目标高分辨率一维距离像,估计了锥体目标的锥旋、章动频率运动参数和锥体高度、底面直径、半锥角结构参数^[29].

虽然目前针对锥体目标的散射中心类型和分布已经进行了充分的研究,但是散射中心滑动对微多普勒的调制机理研究还不够深入,仅认识到局部型和滑动型散射中心微多普勒存在差异性.针对锥体目标微动参数估计、特征提取和识别的研究还主要集中在单基地雷达,对双基地雷达的研究较少.双基地雷达作为一种新型体制雷达,不仅具有天然的“四抗”优势,还是组

网雷达的“基本单元”.双基地雷达锥体目标微动特征提取的研究对高对抗环境下导弹防御系统中真假目标识别具有重要意义.

本文研究了散射中心滑动对微多普勒的调制机理,在此基础上分析了锥体目标的双基地雷达微动特性,建立了可以描述三类散射中心微多普勒的统一参数化模型,提出了可以区分局部型和滑动型散射中心的滑动系数,并用于散射中心类型判别.本文的工作对锥体目标散射特性的认识以及锥体目标的分类和识别问题具有重要的指导意义.

2 双基地雷达锥体目标散射中心微动模型

由于观测条件的限制,文献[6]中列举的7个散射中心并不能全部被观测到.比如锥体目标通常距离双基地雷达较远,从而不会形成大的双基地角,对应于表面波电磁散射机理的爬行波散射中心和行波散射中心将很难被观测到.锥体目标的微动特征主要由三种类型散射中心的微多普勒来表述:锥顶局部型散射中心(SC1),散射中心的位置随着电磁波方向的变化固定不变;锥底边缘滑动型散射中心(SC2),散射中心随着电磁波方向的变化在底面边缘上滑动^[30];锥面滑动型散射中心(SC3),散射中心随着电磁波方向的变化在锥体目标侧面上滑动^[31].本节将分别讨论三类散射中心的双基地微动特征,并建立一个可以表征三类散射中心微多普勒的参数化模型.

2.1 双基地微动模型与单基地微动模型的等效关系

双基地雷达锥体目标微动模型如图1所示.假设锥体目标平动被补偿,只考虑微动带来的频率调制. $O-X_r Y_r Z_r$ 为参考坐标系; $O-X_b Y_b Z_b$ 为物体坐标系; \mathbf{r}_R 为双基地雷达接收站LOS(line of sight, LOS)单位矢量; \mathbf{r}_T 为双基地雷达发射站LOS单位矢量; \mathbf{r}_{BI} 为双基地角平分线单位矢量;假设 \mathbf{r}_{BI} 定义在 $Z_r O Y_r$ 平面内,则 $\mathbf{r}_{BI} = [0, \sin\alpha, \cos\alpha]$.锥体目标以进动角为 θ ,进动角频率为 ω 绕 Z 轴进动,根据右手法则确定 ω 的正负.

双基地雷达锥体目标位置矢量为 $\mathbf{r}_i(t)$ 的散射中心产生的微多普勒为

$$\begin{aligned} f_{mD}(t) &= \frac{1}{\lambda} \frac{d[\mathbf{r}_i(t) \cdot (\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T)]}{dt} \\ &= \frac{2}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \frac{d[\mathbf{r}_i(t) \cdot \mathbf{r}_{BI}]}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 β 为双基地角; λ 为电磁波的波长.

式(1)表明散射中心的双基地微动模型,可以等效为双基地角平分线方向 \mathbf{r}_{BI} 单基地微动模型,差别仅是双基地微多普勒的幅度是 \mathbf{r}_{BI} 单基地微多普勒的 $\cos(\beta/2)$ 倍.假设雷达相干积累时间内双基地角不变,则双基地

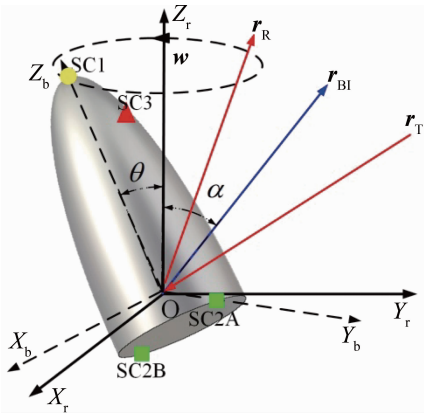


图1 双基地雷达锥体目标微动示意图

微多普勒仅是单基地微多普勒幅度上的伸缩,规律是一致的。

2.2 锥顶局部型散射中心双基地微动模型

锥顶局部型散射中心 SC1 是由锥体目标尖顶绕射所形成的散射中心,在很大的角度范围内都能被观察到. SC1 在锥体目标上的位置不随电磁波方向的改变而改变,即散射中心位置矢量 r_i 为常向量。

根据式(1)可得 SC1 的双基地微多普勒公式为

$$f_{SC1} = \frac{-2}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \frac{d\xi}{dt} \|r_i\|_2 \sin\xi \quad (2)$$

式中, ξ 为 r_{bi} 和 r_i 之间的夹角。

由式(2)可知, SC1 的双基地微多普勒公式为正弦形式,即满足 $f_{SC1} = a \sin(\omega t + \varphi_0)$ 的参数化形式。

2.3 锥底边缘滑动型散射中心双基地微动模型

根据文献[3],锥体目标 SC2 的 r_{bi} 单基地微多普勒解析表达式为式(3). 根据双基地微动模型与 r_{bi} 单基地微动模型的关系, SC2 双基地微多普勒解析表达式可以表示为式(4)。

$$f_{SC2}(t) = \frac{\pm 2wr_0}{\lambda} \sin\alpha \sin\theta \cos(\omega t + \varphi_0) \cdot \frac{F(t)}{\sqrt{(1-F(t))(1+F(t))}} \quad (3)$$

$$f_{SC2}(t) = \frac{\pm 2wr_0}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \sin\alpha \sin\theta \cos(\omega t + \varphi_0) \cdot \frac{F(t)}{\sqrt{(1-F(t))(1+F(t))}} \quad (4)$$

式中 $F(t) = \sin\theta \sin\alpha \sin(\omega t + \varphi_0) + \cos\theta \cos\alpha$, r_0 为锥底的底面半径, φ_0 为 f_{SC2} 的初始相位,其中正、负号分别对应底面边缘的 SC2B 和 SC2A。

对式(4)进行泰勒展开,忽略高阶项得式(5). 由式(5)可知 SC2 双基地微多普勒公式可近似为正弦函数一次项与二次项之和,即可近似表示为 $f_{SC2} = [b \sin(\omega t + \varphi_2) + a] \cdot \cos(\omega t + \varphi_1)$ 的参数化形式。

$$\begin{cases} f_{SC2} = [P_2 \sin(\omega t + \varphi_0) + P_1] \cos(\omega t + \varphi_0) \\ P_1 = \pm \frac{2r_0 w}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \frac{\sin\theta \sin\alpha \cos\theta \cos\alpha}{\sqrt{1 - \cos^2\theta \cos^2\alpha}} \\ P_2 = \pm \frac{r_0 w}{2\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \frac{\sin^2\theta \sin^2\alpha (3 - \cos\theta \cos\alpha)}{\sqrt{1 - \cos^2\theta \cos^2\alpha} (1 - \cos\theta \cos\alpha)} \end{cases} \quad (5)$$

2.4 锥体侧面滑动型散射中心双基地微动模型

随着锥体目标的进动, SC3 会在锥体的侧面进行滑动. 文献[32]推导了半椭球型锥体目标 SC3 的 r_{bi} 方向的单基地微多普勒解析表达式。

r_{bi} 单基地微多普勒解析表达式幅度项乘以系数 $\cos(\beta/2)$, 得到双基地微多普勒解析公式:

$$f_{SC3}(t) = Q(t) \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (6)$$

$$Q(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{w(r_1^2 - r_2^2)g(t)}{\sqrt{g(t)^2 r_1^2 + r_2^2 (1 - g(t)^2)}} \cdot \sin\alpha \sin\theta \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (7)$$

式中 $g(t) = \sin\alpha \sin\theta \sin(\omega t + \varphi_0) + \cos\alpha \cos\theta$; r_1 对应于半椭球型锥体目标的长半轴,即目标的高度; r_2 对应于半椭球型锥体目标的短半轴,即底面半径。

$$\varphi_{SC3}(t) = \int_0^t f_{SC3}(\tau) d\tau = \frac{2}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \sqrt{(r_1^2 - r_2^2)g^2(t) + r_2^2} \quad (8)$$

令 $x = \sin(\omega t + \varphi_0)$, 将 $\varphi_{SC3}(x)$ 在 $x=0$ 处进行泰勒展开得到式(9)。

$$\begin{aligned} \varphi_{SC3}(x) = \frac{2}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) & \left[\sqrt{(r_1^2 - r_2^2) \cos^2\alpha \cos^2\theta + r_2^2} \right. \\ & + \frac{(r_1^2 - r_2^2) \cos\alpha \cos\theta \sin\alpha \sin\theta}{\sqrt{(r_1^2 - r_2^2) \cos^2\alpha \cos^2\theta + r_2^2}} x \\ & \left. + \frac{1}{2} \frac{(r_1^2 - r_2^2) r_2^2 \sin^2\alpha \sin^2\theta}{[(r_1^2 - r_2^2) \cos^2\alpha \cos^2\theta + r_2^2]^{\frac{3}{2}}} x^2 \right] + o(x^2) \end{aligned} \quad (9)$$

因为 $f_{SC3} = d\varphi_{SC3}/dt$, 所以根据式(9)得到式(10)。

$$\begin{cases} f_{SC3}(t) = [P_4 \sin(\omega t + \varphi_0) + P_3] \cos(\omega t + \varphi_0) \\ P_3 = \frac{2w}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \frac{(r_1^2 - r_2^2) \cos\alpha \cos\theta \sin\alpha \sin\theta}{\sqrt{(r_1^2 - r_2^2) \cos^2\alpha \cos^2\theta + r_2^2}} \\ P_4 = \frac{2w}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \frac{(r_1^2 - r_2^2) r_2^2 \sin^2\alpha \sin^2\theta}{[(r_1^2 - r_2^2) \cos^2\alpha \cos^2\theta + r_2^2]^{\frac{3}{2}}} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知, SC3 的双基地微多普勒同样也可以近似为正弦函数的一次项与二次项之和,即可近似表示为 $f_{SC3} = [b \sin(\omega t + \varphi_2) + a] \cdot \cos(\omega t + \varphi_1)$ 的参数化形式。

本小节 SC3 双基地微多普勒公式理论推导过程,

针对的仅是半椭球型锥体目标,由此推断所有类型锥体目标 SC3 的双基地微多普勒满足 $f_{SC3} = [b \sin(\omega t + \varphi_2) + a] \cdot \cos(\omega t + \varphi_1)$ 是不充分的. SC3 随着雷达视线的变化在锥体侧面上滑动,每一时刻 SC3 的位置是由锥体目标的侧面方程决定的. 实际情况下,大多数非合作目标的锥体目标侧面方程是未知的,就算知道锥体目标侧面方程,也很难推导出 SC3 的微多普勒解析公式. 所以,遍历所有锥体目标,判断 SC3 双基地微多普勒满足的规律是不现实. 幸运的是,经过验证,散射中心滑动带来的多普勒调制,大部分能量都会集中在一阶和二阶频率成分,所以 $f_{SC3} = [b \sin(\omega t + \varphi_2) + a] \cdot \cos(\omega t + \varphi_1)$ 对其它类型锥体目标 SC3 双基地微多普勒的参数化描述也是适用的.

2.5 锥体目标双基地微多普勒参数化模型

由 2.2 节至 2.4 节可知,三类散射中心 SC1, SC2, SC3 的双基地微多普勒可以由一个统一的参数化模型 (micro-Doppler Parametric Model, mDPM) 来表示,即

$$f_{Model} = [b \sin(\omega t + \varphi_2) + a] \cdot \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (11)$$

其中 $[a, b, \omega, \varphi_1, \varphi_2]$ 为待估计的参数集.

由式(4)和式(6)可知,散射中心的滑动引进了微多普勒非线性的调制项. 经过泰勒分析,滑动散射中心 SC2 和 SC3 双基地微多普勒能量主要集中在二阶和二阶频率成分,即 f_{Model} 是由一阶正弦函数和二阶正弦函数叠加产生的. 当 $b=0$ 时, f_{Model} 变成正弦形式,对应与锥体目标的锥顶散射中心 SC1. 当 $b \neq 0$ 时, f_{Model} 由于二阶正弦函数的叠加,正弦形式被破坏. b 作为二阶项的系数,反映了滑动散射中心的双基地微多普勒偏离正弦形式的程度; a 的大小反映了散射中心距离锥体目标质心的距离, a 越大,反映了该散射中心距离锥体目标的质心越远; ω 为锥体目标的进动角频率; φ_1, φ_2 为初始相位,不具备具体的物理含义.

3 双基地雷达锥体目标散射中心类型判别方法

3.1 散射中心滑动性判别指标

根据 2.5 节的分析,三种散射中心的双基地微多普勒都可以用 mDPM 来参数化表征. 当用 mDPM 去拟合未知类型散射中心的微多普勒时, mDPM 中的参数 a 和 b 可以反映散射中心的滑动特性,进而对散射中心的类型进行判别. 本节定义了可以定量衡量散射中心滑动特性的滑动系数 R :

$$R = \frac{b}{a} \quad (12)$$

式(12)本质上是对二阶系数 b 的归一化,一阶频率分量能量一般高于二阶频率分量,所以滑动系数的值域一般为 $R \in [0, 1)$.

3.2 散射中心空间滑动性分析

散射中心 SC2 和 SC3 的滑动轨迹是与双基地雷达 r_{BI} 视线方向有关的. 根据滑动型散射中心 SC2、SC3 的电磁散射机理可知, SC2 位于 r_{BI} 和对称轴 Z_b 所在平面与底面边缘的交点; SC3 对应于 r_{BI} 单基地雷达的镜面后向散射点. 根据两类散射中心的位置与 r_{BI} 视线方向的几何关系,可以得到锥体目标进动时散射中心的滑动轨迹. 为了对比分析,滑动型散射中心 SC2、SC3 与固定型散射中心的区别,假设锥体目标顶部、底面边缘的位置各设置一个固定在目标上虚拟的局部型散射中心 (Virtual Localized Scattering Center, VLSC), 底面边缘 VLSC 与 SC2 初始时刻的位置一致, 锥顶 VLSC 与 SC1 位置一致.

半椭球型锥体目标以进动角 $\theta = 8^\circ$ 进动时, 不同 r_{BI} 视角下 SC2 和 SC3 的滑动轨迹如图 2 和图 3 所示.

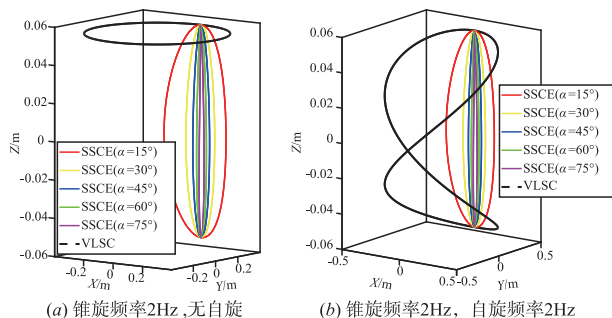


图2 半椭球型锥体目标SC2与设置的局部型散射中心VLSC在参考坐标系内的滑动轨迹

图 2 给出了边缘滑动型散射中心 SC2 与设置的局部型散射中心 VLSC 在参考坐标系 X_r, Y_r, Z_r 内的轨迹, SC2 轨迹由双基地角平分线和半椭球型锥体目标对称轴张成的平面与锥体目标底面边缘交线的端点确定. 由于锥体目标的自身遮挡,只考虑靠近雷达端的散射中心 SC2A. VLSC 在锥体目标底面边缘上位置固定 $(0, r, 0)$, 其中 r 为锥体目标的底面半径. 初始时刻, VLSC 和 SC2A 的位置重合. 图 2 直观地展示出锥体目标边缘滑动型散射中心 SSCE 与局部固定型散射中心 VLSC 伴随锥体目标进动时,空间运动轨迹的差异性.

(1) SC2 在底面边缘上滑动,始终位于双基地角平分线和目标对称轴张成的平面与锥体目标底面边缘交线上, SC2 的空间滑动轨迹与锥体目标是否自旋无关.

(2) VLSC 固定在锥体目标 $(0, r, 0)$ 处, 锥体目标的自旋势必会造成 VLSC 的空间位置变化. 如图 2 所示, 不考虑目标自旋运动时, VLSC 的空间运动轨迹为圆形, 对应的微多普勒为正弦函数形式; 考虑目标自旋运动时, VLSC 的空间运动轨迹变为非规则形式, 对应的微多普勒为非正弦函数形式. 该结论与文献 [33] 的理论推导结果一致, 但是展示效果更加直观.

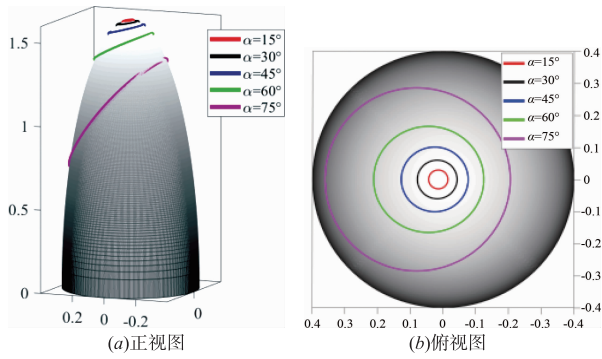


图3 半椭圆型锥体目标($h=1.6\text{m}$, $r=0.4\text{m}$)SC3的滑动轨迹

因此,当底面边缘上的散射中心滑动轨迹与图 2 (a)中锥旋运动下 VLSC 的空间轨迹一致时,则微多普勒为正弦函数形式;相反,则微多普勒为非正弦形式. 根据以上分析,底面边缘滑动型散射中心 SC2 的微多普勒总是非正弦型形式,产生微多普勒高阶频率分量.

如图 3 所示,根据文献 [32] 可以得到不同 r_{BI} 视线角下 SC3 在目标物体坐标系中的滑动轨迹. 当 r_{BI} 视线角为 $30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 时, SC3 在 VLSC 周围小范围地滑动,此时 SC3 可以近似为 VLSC;当 r_{BI} 视线角为 75° 时, SC3 在锥体目标表面大范围地滑动,与 VLSC 的位置差别很大.

3.3 散射中心类型判别方法

根据式 (5) 和式 (10),可以得到不同 r_{BI} 视线角下散射中心 SC2 和 SC3 的滑动系数解析表达式分别为式 (13) 和式 (14). 表 1 给出了散射中心 SC2 和 SC3 在 5 个 r_{BI} 视线角 (与 3.2 小结对应) 下的滑动系数.

$$R_{\text{SC2}} = \frac{1}{4} \frac{\sin \theta \sin \alpha (3 - \cos \theta \cos \alpha)}{\cos \theta \cos \alpha (1 - \cos \theta \cos \alpha)} \quad (13)$$

$$R_{\text{SC3}} = \frac{r_2^2 \tan \alpha \tan \theta}{(r_1^2 - r_2^2) \cos^2 \alpha \cos^2 \theta + r_2^2} \quad (14)$$

表 1 半椭圆型锥体目标 SC2、SC3 理论滑动系数

α (视线角)	SC2 滑动系数	$\geq 10^{-1}$	SC3 滑动系数	$\geq 10^{-1}$
15°	0.4425	是	0.0026	否
30°	0.3052	是	0.0067	否
45°	0.2695	是	0.0168	否
60°	0.3019	是	0.0520	否
75°	0.4838	是	0.2642	是

图 4(a) 为 SC2 滑动系数理论曲线 ($\theta = 8^\circ$), 因为 $\alpha = 90^\circ$ 为 $R_{\text{SC2}}(\alpha)$ 的奇点, 所以只选取视线角区间 $\alpha \in [0, 85^\circ]$. 由图 4(a) 和表 1 第 2、3 列可以看出, 在各个视线角下 SC2 滑动系数为 10^{-1} 量级. 从数学意义上来说, 上述现象指示 SC2 的微多普勒存在较高能量的二阶频率分量, 为非正弦函数形式, 与文献 [4] 结论一致; 从物理意义上来说, SC2 微多普勒二阶频率分量指示

SC2 具有滑动属性, 属于滑动型散射中心类型, 与 3.2 小结中 SC2 空间滑动性的分析是一致的.

由图 4(b) 和表 1 第 4、5 列可以看出, SC3 的滑动系数随着视线角 α 成单调递增. 特别是当 $\alpha > 60^\circ$, 滑动系数 R_{SC3} 急剧增大. R_{SC3} 的这种变化规律与图 3 是对应的. 当视线角 $\alpha \leq 60^\circ$ 时, SC3 在锥顶附近滑动, 因此 SC3 可以等效为锥顶 VLSC, R_{SC3} 的数值较小, $R_{\text{SC3}} \leq 10^{-1}$; 当视线角 $\alpha > 60^\circ$ 时, SC3 在锥体侧面大范围滑动, 呈现滑动散射中心的独特微动特性, R_{SC3} 的数值急速变大, $R_{\text{SC3}} > 10^{-1}$. 因此, 本文将 10^{-1} 作为判断散射中心是否滑动的阈值. 当滑动系数小于 10^{-1} 时, 将散射中心判定为局部型散射中心; 当滑动系数大于 10^{-1} 时, 将散射中心判定为滑动型散射中心.

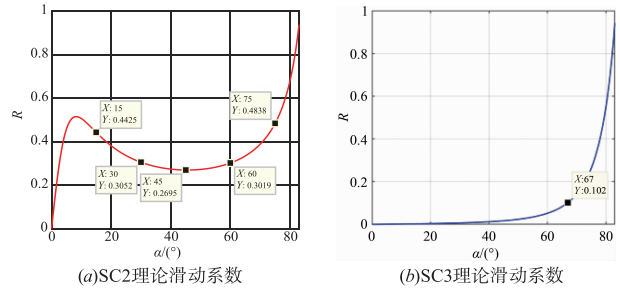


图4 SC2和SC3滑动系数理论曲线

根据以上分析, 3.1 小节中定义的滑动系数可以很好地刻画散射中心的滑动特性, 因此从目标的时频图中提取散射中心的微多普勒曲线, 然后分别计算散射中心的滑动系数, 可以定量衡量散射中心的滑动特性, 从而判别散射中心的类型. 具体流程如图 5 所示.

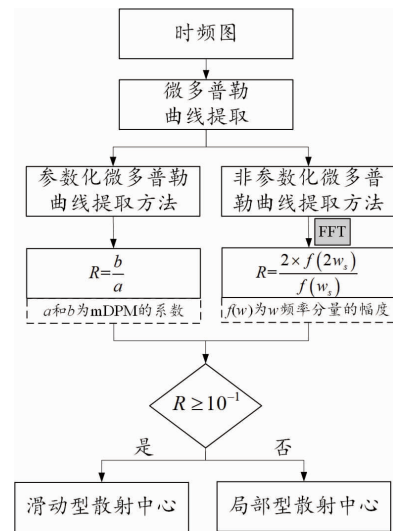


图5 散射中心类型判别流程图

本节以局部型散射中心的正弦型微多普勒为参考标准, 根据散射中心 SC2 和 SC3 的滑动轨迹与局部型散射中心 VLSC 位置关系来判断微多普勒偏离正弦型

规律的程度. 根据 2.5 节式(11)可知 SC2 和 SC3 微多普勒偏离正弦型函数是由于二阶频率分量的叠加, 这种程度可以由滑动系数 R 来定量衡量, 进而可以利用滑动系数刻画散射中心的滑动散射特性, 判别散射中心类型. 与锥体目标的长度、锥底半径等几何参数, 进动角、视线角、进动频率等微动参数不同, 滑动系数 R 是一个描述目标在高频区下电磁散射机理的物理量. 锥体目标的微动特征本质上就是由散射中心的个数和散射中心的类型决定的, 所以综合利用散射中心的个数以及散射中心的类型, 理论上可以对不同结构的锥体目标进行识别.

4 电磁仿真分析

为了验证第 2 节锥体目标双基地微多普勒解析公式的正确性和第 3 节散射中心类型判别方法的有效性, 本节利用电磁计算数据对半椭球型锥体目标的双基地微动特性进行分析. 双基地电磁散射数据维度高(入射方位角、入射俯仰角、接收方位角、接收俯仰角、频率、极化), 利用现有商用电磁计算软件获取锥体目标全空域、宽频带、多极化散射数据将会非常耗时. 为了节约仿真时间, 本节利用商用电磁计算软件 FEKO 中的分层快速多极子算法(MLFMM)获取半椭球型锥体目标的 HH 极化通道窄带电磁散射数据.

表 2 锥体目标电磁仿真参数

参数	取值
雷达工作频率	10GHz
脉冲重复频率(PRF)	500Hz
进动角	8°
进动频率	2Hz
仿真时间	1s

长半轴 $r_1 = 1.6\text{m}$, 短半轴 $r_2 = 0.4\text{m}$ 的半椭球锥体目标的电磁仿真参数如表 2 所示. 为了研究不同双基地角下目标的微动特征, r_T 和 r_R 的方位角均为 90° , 俯仰角为: $(\theta_T = 25^\circ, \theta_R = 35^\circ)$, $(\theta_T = 20^\circ, \theta_R = 40^\circ)$, $(\theta_T = 15^\circ, \theta_R = 45^\circ)$, $(\theta_T = 10^\circ, \theta_R = 50^\circ)$. 其中 θ_T 和 θ_R 分别表示 r_T 和 r_R 的俯仰角, 此时 r_{Bi} 视线角均为 $\alpha = 30^\circ$. 将四种双基地配置下的动态电磁散射数据做短时傅里叶变换(STFT)得到锥体目标微动时频图, 如图 6 所示.

图 6 红色实线、黑色实线分别为 SC2 和 SC3 的双基地 mDPM 曲线, 可以看出 mDPM 可以精确地表征 SC2 和 SC3 的双基地微多普勒曲线, 验证了第 2 节中 mDPM 的统一性和准确性. 由图 6 可以看出, 由于双基地微多普勒系数 $\cos(\beta/2)$ 的影响, 随着双基地角的增大, 双基地微多普勒的动态范围逐渐减小. 图 6(a) ~ (d) 中双基地微多普勒只有尺度上的伸缩, 并没有出现平移或

变形. 这是因为在双基地角增大的过程, r_{Bi} 视线角 $\alpha = 30^\circ$ 并未改变, 所以锥体目标的双基地微多普勒的规律并未发生变化.

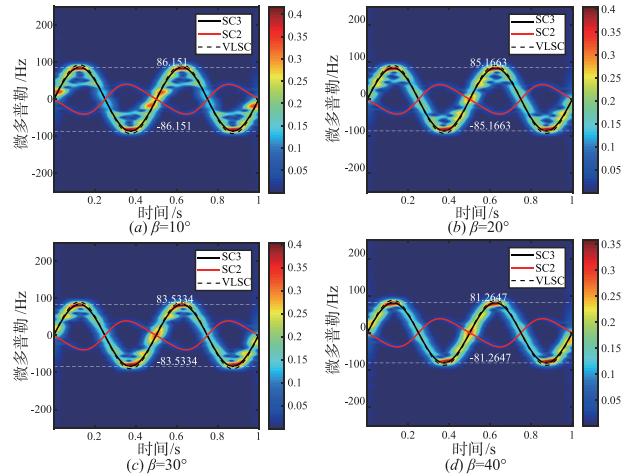


图 6 r_{Bi} 视线角 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 10^\circ \sim 40^\circ$ 时锥体目标时频图

为了研究不同视线角下锥体目标的微动特征, r_T 和 r_R 的方位角均设置为 90° , 俯仰角设置为: $(\theta_T = 10^\circ, \theta_R = 20^\circ)$, $(\theta_T = 25^\circ, \theta_R = 35^\circ)$, $(\theta_T = 40^\circ, \theta_R = 50^\circ)$, $(\theta_T = 55^\circ, \theta_R = 65^\circ)$, 双基地角保持 $\beta = 10^\circ$ 不变, 得到半椭球型锥体目标的窄带时频图.

如图 7 所示, 随着视线角的增大, 微多普勒的动态范围逐渐增大. 图 7 中黑色虚线代表锥顶散射中心 VLSC 的理论微多普勒曲线, 可以看出随着 r_{Bi} 视线角由 15° 增大到 60° , SC3 的双基地微多普勒逐渐偏离 VLSC 的理论微多普勒. 这是由于半椭球型锥体目标侧面上散射中心 SC3 的滑动轨迹随着 r_{Bi} 视线角的增加逐渐偏离锥顶的固定散射中心.

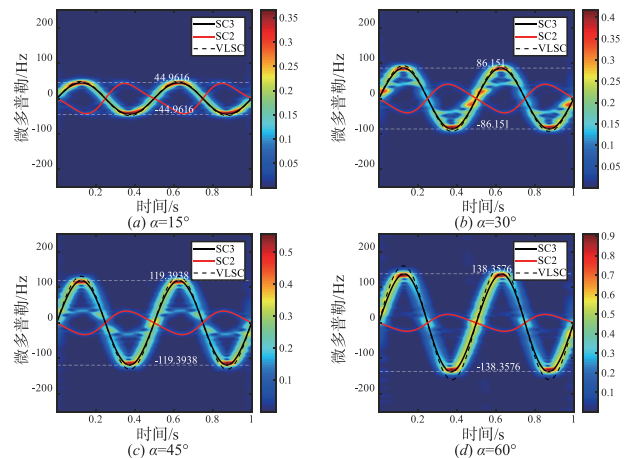


图 7 r_{Bi} 视线角 $\alpha = 15^\circ \sim 60^\circ$, $\beta = 10^\circ$ 时锥体目标时频图

作者利用非参数化微多普勒曲线提取方法从图 7 中获得了半椭球型锥体目标对应于散射中心 SC2 和 SC3 的微多普勒曲线, 通过快速傅里叶变换计算得到散

射中心微多普勒曲线的频谱图,如图 8 所示.根据式 (11)mDPM 模型可知,滑动系数的分子变量 b 数值上是微多普勒二阶频率分量幅度的 2 倍;分母变量 a 数值上等于微多普勒一阶频率分量的幅度.根据这个关系,从微多普勒曲线频谱图中估计得到散射中心滑动系数如表 3 所示.从表 3 的估计结果来看,散射中心 SC2 可以判别是滑动型散射中心,SC3 为局部型散射中心.根据前面的分析,SC3 在此处判别为局部型散射中心类型,是因为在视线角 $<60^\circ$ 时,SC3 在锥顶小范围滑动,可以等效为局部型散射中心.从表 3 中滑动系数的估计结果与表 1 的理论结果对比来看,估计结果存在误差,SC2 的滑动系数为 10^{-1} 量级,滑动系数估计结果与理论值的相对误差在 10% 左右;SC3 的滑动系数估计值与理论值均接近于 0,绝对误差在 1% 以内.对于作者采用的非参数化微多普勒曲线提取算法,误差主要是频率分辨率不高和噪声引起的.从散射中心类型的判断结果来看,虽然存在滑动系数的估计误差,但是并没有影响散射中心类型的判断结果,体现了选取 10^{-1} 作为阈值的合理性以及整个散射中心类型判别算法的鲁棒性.

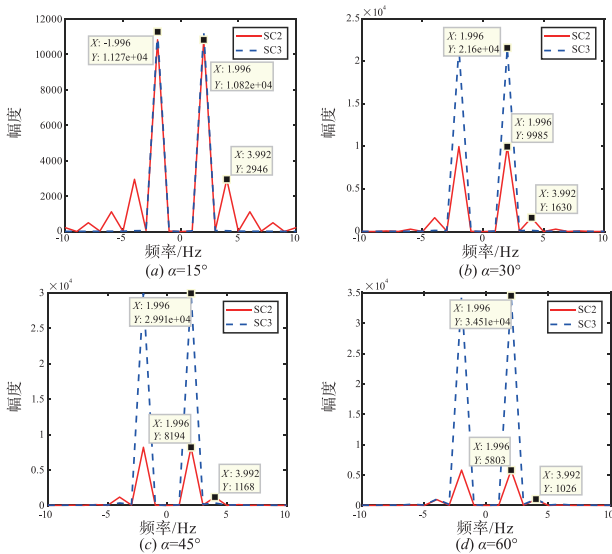


图8 r_{BI} 视线角 $\alpha=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 双基地角 $\beta=10^\circ$ 时半椭球型锥体目标微多普勒曲线频谱

表 3 半椭球型锥体目标 SC2、SC3 滑动系数估计结果

α	SC2	相对误差	$\geq 10^{-1}$	SC3	$\geq 10^{-1}$	绝对误差
15°	0.54	18%	是	0	否	0.3%
30°	0.33	8%	是	0.01	否	0.3%
45°	0.29	7%	是	0.02	否	0.3%
60°	0.35	14%	是	0.06	否	0.8%

5 结束语

近年来锥体目标散射中心的类型和分布已经得到

了充分的研究,但是散射中心滑动对微多普勒调制机理的研究还不深入,仅停留在认识到局部型和滑动型散射中心微多普勒存在差异的层面.本文结合提出的滑动系数对锥体目标滑动型散射中心的双基地微动特性进行了分析,建立了滑动特性的定量表征方法,并指出锥底边缘滑动型散射中心在各个视线角下均呈现区别于局部型散射中心的滑动特征;锥体侧面滑动型散射中心在视线角较小时仅在锥顶附近滑动,此时与锥顶局部型散射中心是等效的;当视线角较大时,散射中心才会在锥体侧面上大范围滑动,呈现出明显的滑动特征.基于上述对散射中心滑动特性的认识,利用提出的滑动系数可以将滑动型和局部型散射中心进行有效地区分.

目前视线角较小时锥体侧面滑动型散射中心和锥顶局部型散射中心,视线角较大时锥体侧面和锥底边缘滑动型散射中心利用滑动系数还是不能区分.由于锥顶和底面边缘的散射中心是由于电磁波绕射产生的,而锥体侧面的散射中心对应于电磁波镜面反射,因此今后将从几何绕射理论入手,考虑散射中心幅度对频率、极化的依赖关系,提出新的指标将三类散射中心进行更细致的划分.

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 Electronica Sinica,2007,35(3):520-525. (in Chinese)

[2] 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(05):531-547.
Zhang Qun,Hu Jian,Luo Ying, et al. Research progresses in radar feature extraction, imaging, and recognition of target with micro-motions[J]. Journal of Radars,2018,7(5):531-547. (in Chinese)

[3] 马梁.弹道中段目标微动特性及综合识别方法[D].长沙:国防科学技术大学,2011.

[4] 刘进.微动目标雷达信号参数估计与物理特征提取[D].长沙:国防科学技术大学,2010.

[5] 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.
YAO Hui-wei,WEI Xi-Zhang,XU Shao-kun, et al. Micro-motion characteristics of non-ideal scattering centers of midcourse targets with precession[J]. Acta Electronica Sinica,2012,40(9):1844-1851. (in Chinese)

[6] 屈泉西.雷达目标散射中心模型及其应用[D].北京:北京理工大学,2015.

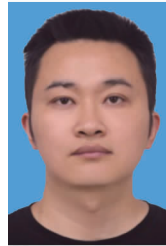
- [7] 徐少坤,刘记红,袁翔宇. 基于 HRRP 序列的中段目标二维几何特征反演方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(10):2366-2373.
XU Shaokun, LIU Jihong, YUAN Xiangyu. Two-dimensional geometric feature inversion method for midcourse target based on HRRPs[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(10):2366-2373. (in Chinese)
- [8] 宁超,黄璟,黄培康. 基于 HRRP 的进动锥体目标特征参数求解方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(04):650-655.
Ning Chao, HUANG Jing, HUANG Peikang. Solution for characteristic parameters of precession cone-shaped target using HRRP [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(04):650-655. (in Chinese)
- [9] 韩勋,杜兰,刘宏伟. 空间锥体目标的平动补偿与微动特征提取方法[J]. 电波科学学报, 2014, 29(05):815-820,826.
HAN Xun, DU Lan, LIU Hongwei. Translation compensation and micro-motion feature extraction of space cone-shaped target[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(05):815-820,826. (in Chinese)
- [10] 韩勋,杜兰,刘宏伟. 基于窄带雷达组网的空间锥体目标特征提取方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12):2956-2962.
HAN Xun, DU Lan, LIU Hongwei. Feature extraction of space cone-shaped target based on narrow-band radar networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(12):2956-2962. (in Chinese)
- [11] 韩勋,杜兰,刘宏伟. 基于窄带微多普勒调制的锥体目标参数估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(04):961-968.
HAN Xun, DU Lan, LIU Hongwei. Parameter estimation of cone-shaped target based on narrowband micro-doppler modulation [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(04):961-968. (in Chinese)
- [12] 曹文杰,张磊,杜兰,等. 基于瞬时频率估计的进动锥体目标微多普勒频率提取方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(05):1091-1096.
CAO Wen-jie, ZHANG Lei, DU Lan, et al. Micro-Doppler frequency extraction for cone-shaped target with precession based on instantaneous frequency estimation [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(05):1091-1096. (in Chinese)
- [13] 邵长宇,杜兰,韩勋,等. 基于极化散射特性的空间锥体目标宽带回波对齐[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(02):434-441.
SHAO Changyu, DU Lan, HAN Xun, et al. Polarization scattering characteristics based range alignment for bandwidth echoes of space coning target[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(02):434-441. (in Chinese)
- [14] 邵长宇,杜兰,韩勋,等. 基于双视角距离像序列的空间锥体目标参数估计方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11):2735-2741.
SHAO Changyu, DU Lan, HAN Xun, et al. Estimation method for space coning target parameters based on two-aspect range profile sequences[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(11):2735-2741. (in Chinese)
- [15] L Hong, F Dai, H Liu. Motion-parameter estimation for precession-with-nutation space targets based on wideband radar measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(2):643-657.
- [16] 罗迎,张群,李松,等. 基于分布式组网雷达的弹道目标三维进动特征提取[J]. 电子学报, 2012, 40(6):1079-1085.
LUO Ying, ZHANG Qun, LI Song, et al. Three-dimensional precession feature extraction of ballistic targets in distributed radar networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6):1079-1085. (in Chinese)
- [17] 冯存前,李靖卿,贺思三,等. 组网雷达中弹道目标微动特征提取与识别综述[J]. 雷达学报, 2015, 4(6):609-620.
Feng Cun-qian, Li Jing-qing, He Si-san, et al. Micro-Doppler feature extraction and recognition based on netted radar for ballistic targets [J]. Journal of Radars, 2015, 4(6):609-620. (in Chinese)
- [18] 赵双,鲁卫红,冯存前,等. 基于窄带雷达网的弹道目标三维进动特征提取[J]. 雷达学报, 2017, 6(01):98-105.
Zhao Shuang, Lu Weihong, Feng Cunqian, et al. Three-Dimensional precession feature extraction of ballistic targets based on narrowband radar network [J]. Journal of Radars, 2017, 6(1):98-105. (in Chinese)
- [19] 陈蓉,冯存前,李靖卿,等. 基于宽窄带微多普勒融合的锥体目标三维重构[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(02):60-66.
CHEN Rong, FENG Cunqian, LI Jingqing, et al. A three-dimensional reconstruction method of cone targets based on micro-Doppler fusion of wideband and narrowband netted radars [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(02):60-66. (in Chinese)
- [20] 许丹,田波,冯存前,等. 基于自适应融合的弹道目标空间位置重构[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(06):1216-1223.
XU Dan, TIAN Bo, FENG Cunqian, et al. Space position

- reconstruction of ballistic target based on adaptive fusion [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(06): 1216 – 1223. (in Chinese)
- [21] 束长勇, 张生俊, 黄沛霖, 等. 基于微多普勒估计进动锥体目标特征参数[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(01): 15 – 20.
SHU Changyong, ZHANG Shengjun, HUANG Peilin, et al. Characteristic parameters estimation of procession cone target based on micro-Doppler [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(01): 15 – 20. (in Chinese)
- [22] 束长勇, 张生俊, 黄沛霖, 等. 基于微多普勒的空间锥体目标微动分类[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(07): 1387 – 1394.
SHU Changyong, ZHANG Shengjun, HUANG Peilin, et al. Micro-motion classification of spatial cone target based on micro-Doppler [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(07): 1387 – 1394. (in Chinese)
- [23] P Lei, J Wang, J Sun. Analysis of radar micro-doppler signatures from rigid targets in space based on inertial parameters [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2011, 5(2): 93 – 102.
- [24] P Lei, J Sun, J Wang, et al. Micromotion parameter estimation of free rigid targets based on radar micro-Doppler [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10): 3776 – 3786.
- [25] P Lei, J Wang, Sun. Classification of free rigid targets with micro-motions using inertial characteristic from radar signatures [J]. Electronics Letters, 2014, 50(13): 950 – 952.
- [26] N Wang, D Mo, Z Song, et al. Feature extraction of procession target based on Doppler profile sequences by maximum likelihood estimation [J]. Electronics Letters, 2019, 55(9): 554 – 556.
- [27] A R Persico, C Clemente, D Gaglione, et al. On model, algorithms, and experiment for micro-Doppler-based recognition of ballistic targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(3): 1088 – 1108.
- [28] A R Persico, C V Ilioudis, C Clemente, et al. Novel classification algorithm for ballistic target based on HRRP frame [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6): 3168 – 3189.
- [29] I Choi, S Park, K Kang, et al. Efficient parameter estimation for cone-shaped target based on distributed radar networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(21): 9736 – 9747.
- [30] X Ai, X Zou, Y Li, et al. Bistatic scattering centres of cone-shaped targets and target length estimation [J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(12): 2888 – 2898.
- [31] K Y Guo, Q F Li, X Q Sheng, et al. Sliding scattering center model for extended streamlined targets [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 139(3): 499 – 516.
- [32] Z Xu, X Ai, Q Wu, et al. Micro-Doppler characteristics of streamlined ballistic target [J]. Electronics Letters, 2019, 55(3): 149 – 151.
- [33] 黄志星. 基于微多普勒的空间多目标特征提取与参数估计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.

作者简介



徐志明 男, 1995 年出生, 2017 年毕业于武汉大学, 获工学学士学位, 现于国防科技大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室攻读博士学位. 主要研究方向: 双基地雷达目标特性与特征提取.



艾小锋 男, 1983 出生, 2013 年毕业于国防科技大学, 获工学博士学位, 现为国防科技大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室副研究员, 主要研究方向为: 双基地雷达成像、特征提取.

E-mail: anxifu2001@163.com



刘晓斌 男, 1990 出生, 2018 年毕业于国防科技大学, 获工学博士学位, 现为国防科技大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室讲师, 主要研究方向为: 暗室测量技术.



吴其华 男, 1990 出生, 2019 年毕业于国防科技大学, 获工学博士学位, 现为国防科技大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室讲师, 主要研究方向为: ISAR 成像技术.



赵锋 男, 1978 出生, 2007 年毕业于国防科技大学, 获工学博士学位, 现为国防科技大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室教授, 主要研究方向为: 电子信息系统仿真建模评估.