

基于分布式组网雷达的弹道目标 三维进动特征提取

罗 迎¹, 张 群^{1,2}, 李 松³, 梁 颖¹

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077; 2. 复旦大学波散射与遥感信息国家重点实验室, 上海 200433;
3. 空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800)

摘 要: 弹道目标微动特征提取是当前研究的一个热点,但在单基雷达中,由于视角限制,仅能提取目标在雷达视线方向上的微动分量,难以获得目标的真实三维微动参数.本文基于分布式组网雷达,利用组网雷达的多视角特性,提出了有翼弹道目标三维进动特征提取方法.首先基于目标锥顶散射点的微多普勒特征参数实现了目标空间三维锥旋矢量的重构,在此基础上,通过分析锥底边缘散射点的进动特征与微多普勒曲线的关系,提取了目标的进动周期、自旋周期、进动角、锥底半径、自旋轴与锥旋轴的交点位置等特征,并实现了目标长度的估计.仿真实验验证了算法的有效性,并进一步利用仿真实验分析了算法的鲁棒性.

关键词: 微多普勒; 分布式组网雷达; 弹道目标; 自动目标识别

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 06-1079-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.002

Three-Dimensional Precession Feature Extraction of Ballistic Targets in Distributed Radar Networks

LUO Ying¹, ZHANG Qun^{1,2}, LI Song³, LIANG Ying¹

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

2. Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China;

3. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: The micro-motion feature extraction for ballistic target has attracted great attention in recent years. Because of the limitation of the angle of view, only the characteristics of micro-motion projected in the line-of-sight (LOS) could be extracted in monostatic radars. In the paper, the distributed radar networks are utilized to obtain the three-dimensional micro-motion features of ballistic targets with empennages. Profited from the multi-view of distributed radar networks, the 3-D coning vector of target is reconstructed from the micro-Doppler parameters of the scatterer on the cone apex of ballistic target, and then the precession period, spinning period, precession angle, the radius of cone bottom, and the intersection location of the spinning axis and the coning axis are solved by analyzing the relationship between the micro-Doppler curves and the precession motion of the scatterers on edge of the cone bottom. The length of target is also estimated. Simulations validate the effectiveness of the algorithm, and the robustness of the algorithm is also analyzed.

Key words: micro-Doppler (m-D); distributed radar networks; ballistic target; auto target recognition (ATR)

1 引言

弹道导弹在中段飞行过程中,通常会释放大量的诱饵目标以干扰导弹防御系统的目标识别,因此真假弹头识别问题是弹道导弹防御中的核心问题之一.由于真弹头和诱饵弹头质量分布不同,且真弹头具有姿态控制系统以保证其飞行的稳定性,真假弹头的精细运动特征必然存在差异,这为弹道目标识别提供了新的技术途径.

在中段飞行过程中,弹道目标的运动除了平动分量外,还包括自旋运动分量,同时由于弹箭分离以及诱饵释放时形成的横向作用力,目标还将绕空间某定向轴进行进动.由于弹头和诱饵之间的质量分布差异,其转动惯量存在差异,体现为进动周期、进动角等运动参数的差异.因此,提取目标进动特征参数可为弹头目标识别提供重要特征信息.

“微多普勒(micro-Doppler, m-D)特征”正是反映目标

精细运动特征的一个物理概念^[1,2]. 微多普勒现象可被视为目标结构部件与主体之间相互作用的结果,它是该目标所具有的独特特征,可为完成对特殊目标的分类、识别、成像提供重要信息^[3,4]. 文献[5,6]研究了窄带信号条件下弹头目标的自旋、锥旋、进动等微动的微多普勒效应,文献[7]在宽带信号条件下利用一维距离像序列上散射中心位置的周期性走动估计了目标的进动周期和进动角,文献[8]基于雷达回波的微多普勒特征实现了弹头目标的三维散射分布重构,等等. 这些工作都是基于单基雷达开展的,由微多普勒效应的产生机理可知,在单基雷达条件下,微多普勒效应仅体现了目标运动矢量在视线方向的投影分量,因此难以重构目标真实的进动运动矢量,目标的真实尺寸也难以确定,不利于弹头目标的精确识别. 此外,现有的一些目标微动特征提取工作大都是针对无翼弹道目标展开,由于目标的旋转对称性,其散射点替代效应使得自旋并不会带来散射场的变化^[9],从而简化了分析工作. 但对于有翼弹道目标,尾翼自旋引起的回波调制不能忽略,其与锥旋共同引起的合成调制使得微多普勒特征的分析与提取工作变得更为复杂,需要做更为深入的研究.

随着现代雷达技术的飞速发展,上世纪 80 年代提出的“分布式组网雷达(Distributed Radar Networks)”近年来又重新得到了重视^[10]. 分布式组网雷达内的各部雷达既可以是单基雷达,也可以是双(多)基雷达,甚至可以是多输入多输出(MIMO)雷达^[11]. 分布式组网雷达的一个重要优势在于其可以获得目标在各个视角上的信息,这不仅使得雷达系统具备了良好的反隐身能力,还为重构目标的三维结构和运动特征提供了可能. 特别是由于弹头目标微动在不同视角上有着不同的投影分量,各个雷达接收到的微多普勒信号将有着不同的相位变化,利用该变化可望提取弹头目标的空间三维进动和结构特征,大大提高雷达的目标识别能力. 基于这种考虑,本文基于分布式组网雷达,在分析宽带信号条件下有翼弹头进动引起的微多普勒效应的基础上,基于目标微动参数与雷达视线角之间的关系,提出了一种基于时间—距离像平面的三维进动特征提取方法,获得了弹头目标的空间三维锥旋矢量,进而得到了进动周期、自旋周期、进动角、弹头底面半径、自旋轴与锥旋轴的交点位置等特征,并实现了目标长度的估计,实现了目标的空间三维运动特征和结构的重构.

2 有翼弹道目标进动微多普勒效应

弹道目标的外形一般近似于锥体,在高频区,弹道目标的散射场可以认为是主要由弹头表面的曲率不连续处的电磁散射所合成^[9],对于有翼弹道目标,其等效

多散射中心主要包括锥顶散射点与尾翼边缘散射点,由此可以构建弹道目标的散射模型如图 1 所示,弹头主要由位于锥顶的 A 点、位于底面边缘的尾翼散射点 B 和 C 构成(为了画图清晰起见,假设目标只包括两个尾翼). 目标在绕自身对称轴作自旋运动(自旋运动矢量为 ω_s)的同时,还绕空间某定向轴作锥旋运动,其运动矢量为 ω_c ,两者的运动构成了进动. 以初始时刻目标对称轴为 Z 轴(方向由底面指向锥顶),以自旋轴和锥旋轴的交点 O 为原点,在由 Z 轴和锥旋轴张成的平面内,由 Z 轴右旋 90° 为 X 轴,再根据右手定则确定 Y 轴,由此构成坐标系 $OXYZ$. 雷达位于远场的 O' 点,雷达视线方向单位矢量为 \mathbf{n} . 设自旋轴与锥旋轴之间的夹角为 β , \mathbf{n} 与锥旋轴之间的夹角为 ϵ ,底面半径为 r_1 , O 点到底面圆心 P 的距离为 r_0 ,当 O 点在 P 点上方时, r_0 取正,反之取负.

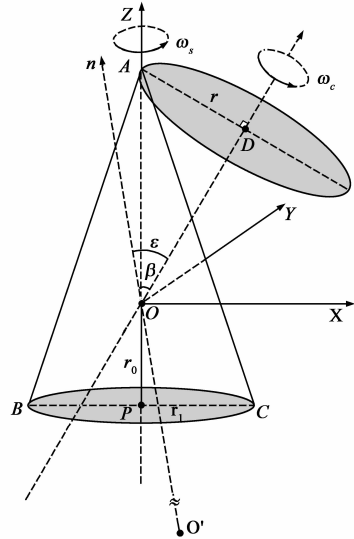


图1 弹道目标运动模型示意图

多散射中心主要包

设分布式雷达网中各雷达均发射宽带线性调频信号,为了避免各雷达信号之间的相互干扰,各雷达应工作于不同的频段. 设其中某雷达发射信号为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right) \quad (1)$$

其中 t 为快时间, T_p 为脉冲宽度, f_c 为起始载频, μ 为调频斜率. 在慢时间 t_m 时刻,目标上某散射点的回波信号可表示为

$$s_r(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau(t_m)}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau(t_m)) + \frac{1}{2}\mu(t - \tau(t_m))^2\right)\right) \quad (2)$$

其中 $\tau(t_m)$ 为 t_m 时刻散射点到雷达的距离延时. 取 O 点为参考点,在不考虑目标平时时,其回波信号为 $s_0(t) = s(t - \tau_0)$,其中 τ_0 为参考点到雷达的距离延时. 将参考点回波信号与目标回波信号共轭相乘以完成距离压缩,即进行“dechirp”处理,再在快时间域进行傅立叶变换并去除剩余视频相位(RVP)项和包络斜置项后得到^[12]

$$S_c(f, t_m) = T_p \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{2\mu}{c}\Delta R(t_m)\right)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(t_m)\right) \quad (3)$$

其中 $\Delta R(t_m)$ 为 t_m 时刻散射点到雷达距离与参考点到雷达距离之差. 由式(3)可见完成距离压缩后回波信号在距离向上聚焦为 sinc 函数, 其峰值位置 $f = -2\mu\Delta R(t_m)/c$ 反映了散射点与参考点到雷达之间的距离差.

对于锥顶散射点 A , 设线段 \overline{OA} 对应的矢量为 \mathbf{r}_A , 则 $\Delta R(t_m) \approx \overline{O'A} \cdot \mathbf{n} - \overline{O'O} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{r}_A^T(t_m) \mathbf{n} = (\mathbf{T}_{\text{coning}} \mathbf{r}_{A0})^T \mathbf{n}$ (4)

其中 \mathbf{r}_{A0} 为初始时刻 \overline{OA} 对应的向量, $\mathbf{T}_{\text{coning}}$ 为散射点锥旋对应的旋转矩阵, 当设锥旋角速度 $\boldsymbol{\omega}_c = [\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz}]^T$, $\Omega_c = \|\boldsymbol{\omega}_c\|$, $\boldsymbol{\omega}'_c = [\omega'_{cx}, \omega'_{cy}, \omega'_{cz}]^T = \boldsymbol{\omega}_c / \|\boldsymbol{\omega}_c\|$ 时, 可以得到^[1]

$$\mathbf{T}_{\text{coning}} = \mathbf{I} + \boldsymbol{\omega}'_c \sin \Omega_c t_m + \boldsymbol{\omega}'_c{}^2 (1 - \cos \Omega_c t_m),$$

$$\boldsymbol{\omega}'_c = \begin{bmatrix} 0 & -\omega'_{cz} & \omega'_{cy} \\ \omega'_{cz} & 0 & -\omega'_{cx} \\ -\omega'_{cy} & \omega'_{cx} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 \mathbf{I} 为单位矩阵. 由式(4)和(5)可知, 在由式(3)确定的 $f-t_m$ 平面上, 利用 $f = -2\mu\Delta R(t_m)/c$ 进行距离定标后, 距离像峰值位置呈现为随 t_m 作正弦形式变化的曲线, 且曲线周期即为锥旋运动的周期 $T_c = 2\pi/\Omega_c$. 此即目标微多普勒效应在宽带信号形式下的表现形式, 该结论与通常的旋转运动在宽带信号形式下的微多普勒效应是一致的^[12,13].

对于底面边缘的尾翼散射点 B 或 C , 其运动表现为自旋运动和锥旋运动的合成^[14]. 以散射点 C 为例, 在不考虑散射点遮挡效应时, 有

$$\Delta R(t_m) \approx \overline{O'C} \cdot \mathbf{n} - \overline{O'O} \cdot \mathbf{n} = (\mathbf{T}_{\text{coning}} \mathbf{T}_{\text{spinning}} \mathbf{r}_{C0})^T \mathbf{n} \quad (6)$$

其中 \mathbf{r}_{C0} 为初始时刻 \overline{OC} 对应的向量, $\mathbf{T}_{\text{spinning}}$ 为自旋对应的旋转矩阵, 当自旋角速度 $\boldsymbol{\omega}_s = [\omega_{sx}, \omega_{sy}, \omega_{sz}]^T$, $\Omega_s = \|\boldsymbol{\omega}_s\|$, $\boldsymbol{\omega}'_s = [\omega'_{sx}, \omega'_{sy}, \omega'_{sz}]^T = \boldsymbol{\omega}_s / \|\boldsymbol{\omega}_s\|$ 时, 可以得到

$$\mathbf{T}_{\text{spinning}} = \mathbf{I} + \boldsymbol{\omega}'_s \sin \Omega_s t_m + \boldsymbol{\omega}'_s{}^2 (1 - \cos \Omega_s t_m),$$

$$\boldsymbol{\omega}'_s = \begin{bmatrix} 0 & -\omega'_{sz} & \omega'_{sy} \\ \omega'_{sz} & 0 & -\omega'_{sx} \\ -\omega'_{sy} & \omega'_{sx} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此, 散射点 C 的微多普勒效应比散射点 A 的微多普勒效应要更为复杂, 其在 $f-t_m$ 平面上的变化曲线不再是简单的正弦曲线, 而是表现为更为复杂的曲线形式.

3 三维进动特征提取

3.1 三维锥旋矢量提取

由上节分析可知, 锥顶散射点 A 由于位于锥旋轴上, 其运动形式仅包括锥旋, 因此从分析 A 点的微多普勒效应入手, 有望实现锥旋矢量的重构. 在获得 $f-t_m$ 平面上 A 点的微多普勒变化曲线后, 经过简单的转换即可得到 $\Delta R(t_m)$, 其表达式即为式(4). 因此在雷达视

线方向单位矢量 \mathbf{n} 已知的条件下, 式(4)中还包括了六个未知变量, 即 $\boldsymbol{\omega}_c = [\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz}]^T$ 和 $\mathbf{r}_{A0} = [r_{A0x}, r_{A0y}, r_{A0z}]^T$, 要求解 $\boldsymbol{\omega}_c$ 至少需构建六个以上的方程来建立方程组进行求解. 由于式(4)所示的矩阵形式的方程的求解较为复杂, 且未知变量过多, 因此我们采用几何分析的方法来减少未知变量, 并简化求解过程.

如图 1 所示, 锥顶散射点 A 在绕锥旋轴旋转的过程中, 在空间的运动轨迹构成了一个圆形, 圆心为 A 点在锥旋轴上的投影点 D , 设半径为 r . 为了便于分析, 将 A 点的锥旋运动示意图重画如图 2 所示, 图中平面为 A 点锥旋运动曲线所在平面, 雷达视线方向矢量 \mathbf{n} 在该平面上的投影矢量为 \mathbf{n}' . 由图中几何关系, 式(4)可重写为

$$\Delta R(t_m) \approx (\mathbf{T}_{\text{coning}} \mathbf{r}_{A0})^T \mathbf{n} = r \cos(\Omega_c t_m + \theta) \cdot \sin \epsilon \quad (8)$$

其中 θ 为初始相位, 当 $\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z]^T$ 时, 有

$$\epsilon = \arccos\left(\frac{\boldsymbol{\omega}_c \cdot \mathbf{n}}{\Omega_c}\right) = \arccos\left(\frac{n_x \omega_{cx} + n_y \omega_{cy} + n_z \omega_{cz}}{\Omega_c}\right) \quad (9)$$

由式(8)可知, $f-t_m$ 平面上的微多普勒曲线为以锥旋频率 Ω_c 为频率、 $r \sin \epsilon$ 为振幅的正弦曲线. 不同观测视角的雷达观测到的微多普勒变化曲线的频率均相同, 但具有不同的振幅. 当提取到微多普勒曲线的变化频率 Ω_c 和振幅 M_{ci} (下标 i 表示雷达的序号) 后, 即可构建如下方程组实现锥旋矢量的求解:

$$\begin{cases} M_{ci} = r \sin \epsilon_i, & i = 1, 2, \dots, N \\ \omega_{cx}^2 + \omega_{cy}^2 + \omega_{cz}^2 = \Omega_c^2 \end{cases} \quad (10)$$

其中待求解变量为 $(\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz}, r)$. 式(10)所示的方程组难以求得解析解, 可通过数值计算方法求得近似解, 如采用牛顿法求解. 由于只包括 4 个未知变量, 因此理论上只需获得不同视角条件下 3 组雷达回波, 即可构建 4 个方程实现求解, 但为了保证迭代求解过程能向准确解收敛, 避免求解受无实际物理意义的重根影响, 并进一步提高求解精度, 可通过获取更多视角条件下的雷达回波来增加方程组中方程数量, 以对方程的根提出更为严格的约束.

从 $f-t_m$ 平面上提取微多普勒曲线的频率和振幅的方法很多, 如采用相关法求取频率、极值搜索法求取

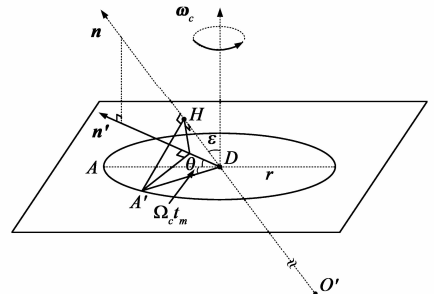


图2 散射点锥旋运动几何示意图

振幅,还可以采用具有更高精度的图像处理算法如 Hough 变换来提取曲线频率和振幅^[12],在提取散射中心时可采用 ESPRIT 方法来获得距离超分辨,限于篇幅,本文不再赘述。

3.2 进动周期、自旋周期提取

经过距离定标后,尾翼散射点在 $f-t_m$ 平面上的对应曲线方程即为式(6),由式(5)和式(7)给出的 $\mathbf{T}_{\text{coning}}$ 和 $\mathbf{T}_{\text{spinning}}$ 的表达式可知,式(6)确定的进动微多普勒曲线也是周期性的,且周期为锥旋周期 T_c 和自旋周期 T_s 的最小公倍数,即有如下关系式成立:

$$T_{pr} = k_1 T_c = k_2 T_s, \quad k_1, k_2 \in \mathbf{N} \quad (11)$$

其中 T_{pr} 为进动周期,由式(5)和式(7)可以得到

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{\text{coning}} \mathbf{T}_{\text{spinning}} = & (\mathbf{I} + \hat{\omega}'_c)(\mathbf{I} + \hat{\omega}'_s) + (\hat{\omega}'_s + \hat{\omega}'_c \hat{\omega}'_s) \sin(\Omega_s t_m) \\ & - (\hat{\omega}'_s \hat{\omega}'_c + \hat{\omega}'_c \hat{\omega}'_s) \cos(\Omega_s t_m) + (\hat{\omega}'_c + \hat{\omega}'_s \hat{\omega}'_c) \sin(\Omega_c t_m) \\ & + \hat{\omega}'_s \hat{\omega}'_c \sin(\Omega_c t_m) - \hat{\omega}'_c \hat{\omega}'_s \cos(\Omega_c t_m) \cos(\Omega_s t_m) \\ & - (\hat{\omega}'_c \hat{\omega}'_s + \hat{\omega}'_s \hat{\omega}'_c) \cos(\Omega_c t_m) - \hat{\omega}'_c \hat{\omega}'_s \cos(\Omega_c t_m) \sin(\Omega_s t_m) \\ & + \hat{\omega}'_c \hat{\omega}'_s \cos(\Omega_c t_m) \cos(\Omega_s t_m) \end{aligned} \quad (12)$$

将式(12)代入式(6),有

$$\begin{aligned} \Delta R(t_m) = & \mathbf{r}_{CO}^T (\mathbf{T}_{\text{coning}} \mathbf{T}_{\text{spinning}})^T \mathbf{n} \\ = & A_0 + A_1 \sin(\Omega_s t_m) + A_2 \cos(\Omega_s t_m) \\ & + A_3 \sin(\Omega_c t_m) + A_4 \sin(\Omega_c t_m) \sin(\Omega_s t_m) \\ & + A_5 \sin(\Omega_c t_m) \cos(\Omega_s t_m) + A_6 \cos(\Omega_c t_m) \\ & + A_7 \cos(\Omega_c t_m) \sin(\Omega_s t_m) \\ & + A_8 \cos(\Omega_c t_m) \cos(\Omega_s t_m) \end{aligned} \quad (13)$$

限于篇幅, $A_0 \sim A_8$ 的表达式文中不再给出。可以看出,式(13)右边主要包括四种频率成分的信号,即 $\Omega_c + \Omega_s$ 、 Ω_c 、 Ω_s 和 $|\Omega_c - \Omega_s|$,其中频率为 $\Omega_c + \Omega_s$ 的成分使得 $\Delta R(t_m)$ 的幅值以频率 $\Omega_c + \Omega_s$ 进行振荡,其他三个频率成分则共同构成了 $\Delta R(t_m)$ 曲线的包络。因此,在一个进动周期 T_{pr} 内, $\Delta R(t_m)$ 曲线的极大值点个数为 $N_p = T_{pr}(\Omega_c + \Omega_s)/(2\pi)$,因此可求得自旋周期为

$$T_s = \frac{T_{pr} T_c}{N_p T_c - T_{pr}} \quad (14)$$

在式(14)中, $T_c = 2\pi/\Omega_c$,当完成锥旋矢量提取后, T_c 为已知量;进动周期 T_{pr} 可通过在 $f-t_m$ 平面上对曲线采用相关法求得; N_p 可采用极值搜索法求得,因此根据式(14)即可求得目标的自旋周期 T_s 。

3.3 进动角、底面半径特征提取

如图3所示,尾翼散射点 B 和 C 在绕对称轴自旋的同时还绕锥旋轴作旋转运动。对于弹头目标,为了保证弹头以较小的攻角再入大气层,自旋轴与锥旋轴之间的

夹角 β 通常较小,一般为几度到十几度^[15],在小进动角条件下,散射点 B 和 C 的运动轨迹被近似限制在由直角梯形 $BQCE$ 绕线段 \overline{CQ} 旋转一周所形成的锥体内,其中点 G 、 Q 分别为点 B 、 C 在锥旋轴上的投影, \overline{CQ} 和 \overline{BQ} 分别为上下两个底面圆的半径。因此,点 B 和 C 的微多普勒曲线的最大值和最小值之差即是该锥体在雷达视线方向上的投影长度,为了求得该投影长度与目标模型参数之间的关系,下面分两种情况予以讨论。

第一种情况:锥旋轴与弹头底面所在平面的交点位于底面圆内。如图3(a)所示,设锥旋轴与底面圆的交点为 K ,位于半径 \overline{BP} 上,由 $\angle KOP = \beta$ 和 $\overline{OP} = r_0$,有 $\overline{KP} = r_0 \tan \beta$,因此该种情况等效于 $r_0 \tan \beta \leq \overline{BP} = r_1$ 。

与3.1节中的分析相同, \overline{CQ} 绕 Q 点的旋转运动在雷达视线方向 \mathbf{n} 上的运动表现为式(10)所示的正弦函数形式,其振幅为 $\overline{CQ} \cdot \sin \epsilon$, \overline{CQ} 的长度可由三角形 ΔCQK 中的几何关系求得为 $(\overline{CP} + \overline{PK}) \cos \beta = (r_1 + r_0 \tan \beta) \cos \beta$ 。设正弦曲线取最大值和最小值时分别对应 \mathbf{n} 上的 H_1 点和 H_2 点,并取 Q 点为 \mathbf{n} 轴上的原点,与 \mathbf{n} 同向为正,则有 H_1 点和 H_2 点在 \mathbf{n} 轴上的坐标分别为

$$H_1 = (r_1 + r_0 \tan \beta) \cos \beta \sin \epsilon, \quad (15)$$

$$H_2 = -(r_1 + r_0 \tan \beta) \cos \beta \sin \epsilon$$

对于由 \overline{BG} 绕 G 点的旋转运动,其在 \mathbf{n} 上的运动形成的正弦函数的振幅为 $\overline{BG} \cdot \sin \epsilon$,其中 $\overline{BG} = (\overline{BP} - \overline{KP}) \cos \beta = (r_1 - r_0 \tan \beta) \cos \beta$ 。设 G 点在 \mathbf{n} 上的投影为 G' 点,则在直角三角形 $\Delta QG'G$ 中有

$$\begin{aligned} \overline{QG'} = & -\overline{QG} \cdot \cos \epsilon = -(\overline{QK} + \overline{KG}) \cos \epsilon \\ = & -(\overline{KC} \cdot \sin \beta + \overline{BK} \cdot \sin \beta) \cos \epsilon \\ = & -((r_1 + r_0 \tan \beta) \sin \beta + (r_1 - r_0 \tan \beta) \sin \beta) \cos \epsilon \\ = & -2r_1 \sin \beta \cos \epsilon \end{aligned} \quad (16)$$

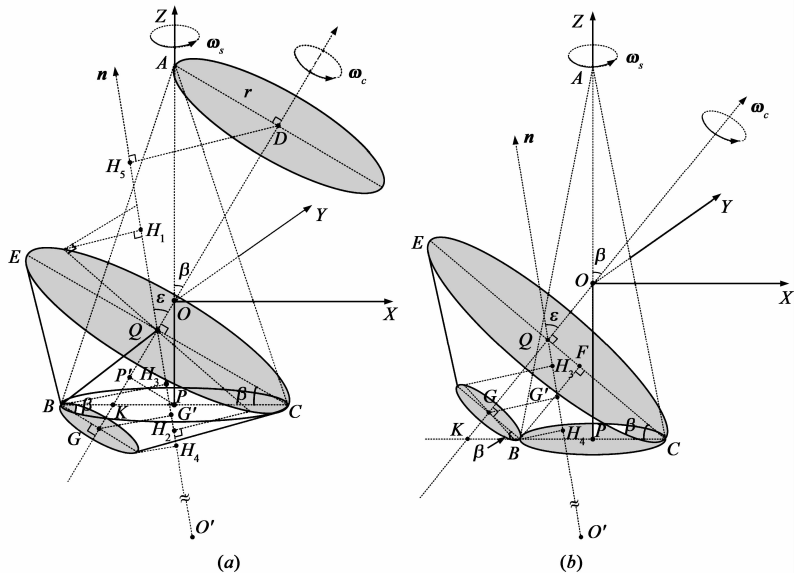


图3 底面边缘散射点进动几何示意图

式中由于 $\overline{QG'}$ 位于 \mathbf{n} 的负半轴,所以取负.设该正弦曲线取最大值和最小值时分别对应 \mathbf{n} 上的 H_3 点和 H_4 点,则 H_3 点和 H_4 点在 \mathbf{n} 轴上的坐标分别为

$$\begin{aligned}\dot{H}_3 &= \overline{QG'} + \overline{BG} \cdot \sin \epsilon \\ &= -2r_1 \sin \beta |\cos \epsilon| + (r_1 - r_0 \tan \beta) \cos \beta \sin \epsilon\end{aligned}\quad (17)$$

$$\begin{aligned}\dot{H}_4 &= \overline{QG'} - \overline{BG} \cdot \sin \epsilon \\ &= -2r_1 \sin \beta |\cos \epsilon| - (r_1 - r_0 \tan \beta) \cos \beta \sin \epsilon\end{aligned}\quad (18)$$

第二种情况:锥旋轴与弹头底面所在平面的交点位于底面圆外,即 $r_0 \tan \beta > r_1$.如图3(b)所示,设锥旋轴与底面圆的交点为 K ,位于半径 \overline{PB} 的延长线上.此时与第一种情况不同的是 $\overline{BG} = (\overline{KP} - \overline{BP}) \cos \beta = (r_0 \tan \beta - r_1) \cos \beta$, H_3 点和 H_4 点在 \mathbf{n} 轴上的坐标分别为

$$\dot{H}_3 = -2r_1 \sin \beta |\cos \epsilon| + (r_0 \tan \beta - r_1) \cos \beta \sin \epsilon \quad (19)$$

$$\dot{H}_4 = -2r_1 \sin \beta |\cos \epsilon| - (r_0 \tan \beta - r_1) \cos \beta \sin \epsilon \quad (20)$$

式(19)和(20)可与第一种情况下的式(17)和(18)统一写为

$$\dot{H}_3 = -2r_1 \sin \beta |\cos \epsilon| + |r_1 - r_0 \tan \beta| \cos \beta \sin \epsilon \quad (21)$$

$$\dot{H}_4 = -2r_1 \sin \beta |\cos \epsilon| - |r_1 - r_0 \tan \beta| \cos \beta \sin \epsilon \quad (22)$$

因此,弹头底面边缘散射点在整个进动过程中,其在雷达视线方向 \mathbf{n} 上的投影位置分布范围为 $[\min(\dot{H}_1, \dot{H}_2, \dot{H}_3, \dot{H}_4), \max(\dot{H}_1, \dot{H}_2, \dot{H}_3, \dot{H}_4)]$,即对应的微多普勒曲线的最大值与最小值之差为

$$\begin{aligned}M_p &= \max(\dot{H}_1, \dot{H}_2, \dot{H}_3, \dot{H}_4) - \min(\dot{H}_1, \dot{H}_2, \dot{H}_3, \dot{H}_4) \\ &= \dot{H}_1 - \min(\dot{H}_2, \dot{H}_4)\end{aligned}\quad (23)$$

M_p 可通过提取 $f-t_m$ 平面上的微多普勒曲线的最大值与最小值后做差得到;在3.1节中求解得到锥旋运动矢量后, ϵ 为已知量,因此在上式中,未知变量为 (r_0, r_1, β) .通过对3组以上不同雷达的回波进行处理后,构建多元方程组

$$M_{pi} = \dot{H}_{1i} - \min(\dot{H}_{2i}, \dot{H}_{4i}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

即有望求解 (r_0, r_1, β) .但根据式(23),当 $\min(\dot{H}_2, \dot{H}_4) = \dot{H}_4$ 且 $r_0 \tan \beta < r_1$ 时, $M_p = 2r_1 \sin \beta |\cos \epsilon| + 2r_1 \cos \beta \sin \epsilon$,与 r_0 无关,因此由式(24)求解 r_0 存在困难,但求解 (r_1, β) 是可行的.式(24)所示的方程组难以求得解析解,可采用最小二乘法搜索求得其近似解.求得 (r_1, β) 后,即可获得弹头目标的底面半径 r_1 、进动角 β ,结合3.1节中求得的 r ,还可进一步求得自旋轴和锥旋轴的交点到弹头锥顶的距离为 $r/\sin \beta$.

3.4 目标长度估计

由于求解 r_0 存在困难,因此无法得到弹头目标锥体长度的准确值,但是通过适当近似,可以得到锥体长度的估计值.如图3(a)所示,设锥顶散射点 A 在锥旋轴上的投影为 D , D 在雷达视线方向上的投影为 H_5 ;锥底圆心 P 在锥旋轴上的投影为 P' ,则目标长度为

$$\begin{aligned}\overline{AP} &= \overline{P'D} / \cos \beta = (\overline{GD} - \overline{GP'}) / \cos \beta \\ &= (\overline{GH_5} / |\cos \epsilon| - \overline{BP} \sin \beta) / \cos \beta\end{aligned}\quad (25)$$

式(25)中, $\overline{BP} = r_1$ 为已知量, β 和 ϵ 也为已知量,但 $\overline{GH_5} = \overline{G'H_1} + \overline{H_1H_5}$ 的值难以得到.考虑到在 $f-t_m$ 平面上我们可以提取到进动周期内目标所有散射点的微多普勒曲线在距离向上占据的最大长度 L_{\max} ,且有如下关系式成立:

$$M_p + \overline{H_1H_5} = L_{\max} - r \sin \epsilon = L_{\max} - M_c \quad (26)$$

当用 M_p 近似代替 $\overline{G'H_1}$ 时,目标长度的近似估计值为

$$\overline{AP} \approx ((L_{\max} - M_c) / |\cos \epsilon| - r_1 \sin \beta) / \cos \beta \quad (27)$$

当 $\min(\dot{H}_2, \dot{H}_4) = \dot{H}_2$ 时,用 M_p 近似代替 $\overline{G'H_1}$ 时引入的目标长度估计误差为

$$\begin{aligned}e_l &= |\overline{GH_2} / (\cos \beta |\cos \epsilon|)| \\ &= |(\overline{QG'} - \dot{H}_2) / (\cos \beta |\cos \epsilon|)| \\ &= |-2r_1 \sin \beta |\cos \epsilon| + (r_1 + r_0 \tan \beta) \cos \beta \sin \epsilon / (\cos \beta |\cos \epsilon|)| \\ &= |-2r_1 \tan \beta + (r_1 + r_0 \tan \beta) | \tan \epsilon ||\end{aligned}\quad (28)$$

当 $\min(\dot{H}_2, \dot{H}_4) = \dot{H}_4$ 时,目标长度估计误差为

$$e_l = |\overline{H_4G'} / (\cos \beta |\cos \epsilon|)| = |r_1 - r_0 \tan \beta| \cdot |\tan \epsilon| \quad (29)$$

可见两种情况下目标长度的估计误差均与 $|\tan \epsilon|$ 有关.对于式(29), e_l 与 $|\tan \epsilon|$ 成正比关系;而对于式(28),由于在小进动角条件下 $-2r_1 \tan \beta$ 通常较小,因此 e_l 也可近似认为与 $|\tan \epsilon|$ 成正比关系.因此在估计目标长度时,应选取 $|\tan \epsilon|$ 最小的雷达回波数据进行处理,以使目标长度估计误差最小.

4 仿真分析

4.1 算法有效性验证

为了验证本文理论分析的正确性及所提算法的有效性,我们进行如下计算机仿真.设弹头目标底面半径 $r_1 = 0.5\text{m}$,自旋轴与锥旋轴的交到底面的距离 $r_0 = 0.3\text{m}$,自旋轴和锥旋轴的交点到弹头锥顶的距离为 1m ,弹头长度为 1.3m .自旋角速度大小为 $5\pi\text{rad/s}$,锥旋角速度矢量为 $\boldsymbol{\omega}_c = [2.1821, 0, 12.3755]^T$,其大小为 $\Omega_c = 4\pi\text{rad/s} = 12.5644\text{rad/s}$.进动角为 $\pi/18\text{rad}$,即 0.1745rad .分布式组网雷达系统中共包括6部雷达,其在大地坐标系中的坐标分别为 $(0, 0, 0)$ 、 $(30, 0, 0)$ 、 $(20, 30, 0)$ 、 $(40, 40, 0)$ 、 $(0, 60, 0)$ 和 $(8, 0, 0)$,不考虑弹头目标平动时,其自旋轴与锥旋轴的交点在大地坐标系中的坐标为 $(30, 10, 50)$,单位均为 km .各雷达均辐射线性调频信号,信号的载频分别为 6GHz 、 9.5GHz 、 13GHz 、 16.5GHz 、 20GHz 和 23.5GHz ,信号的脉宽为 $0.5\mu\text{s}$,带宽均为 3GHz ,获得的距离分辨率为 0.05m .脉冲重复频率为 500Hz ,回波信号时长为 3s .图4给出了不同雷达观测得到的 $f-t_m$ 平

面上目标散射点的微多普勒曲线,其中曲线 *A* 对应锥顶散射点,曲线 *B* 和 *C* 分别对应底面边缘的两个散射点,进动周期内目标所有散射点的微多普勒曲线在距离向上占据的最大长度 L_{\max} 如图中标注所示.可见因目标相对于各雷达的视角不同,微多普勒曲线的振荡幅值存在明显差异.

采用文献[14]所述基于 Hough 变换的正弦曲线参数提取方法,可以十分准确地提取到曲线 *A* 的频率为 $4\pi\text{rad/s}$, 振幅分别为 0.070m 、 0.045m 、 0.065m 、 0.105m 、 0.065m 和 0.050m . 在提取曲线参数的基础上,利用式(10)建立方程组,采用 MATLAB 中的 `fsolve` 命令求解, $(\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz}, r)$ 的迭代搜索初值设为 $(1, 1, 1, 1)$, 可解得 $(\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz}, r) = (2.1472, 0.0371, 12.3963, 0.1771)$, $\Omega_c = 12.5810\text{rad/s}$, 均与理论值十分接近.

在求得三维锥旋矢量的基础上,进一步采用相关法求得散射点 *B* 和 *C* 的进动周期为 $T_{pr} = 2.004\text{s}$; 对各雷达获得的微多普勒曲线 *B* 进行峰值检测(曲线 *C* 和曲线 *B* 的形状相同,仅相位相差 πrad), 得到进动周期内的极大值点个数 $N_p = 9$, 根据式(14)计算得到自旋周期 $T_s = 0.4014\text{s}$, 与真实值相当吻合.

提取 $f-t_m$ 平面上的微多普勒曲线 *B* 的最大值与最小值后做差,得到 M_{pi} 的值分别为 0.54m 、 0.42m 、 0.52m 、 0.72m 、 0.52m 和 0.45m . 将这些参数代入式(24)后采用最小二乘法搜索求解,得到底面半径为 0.5m , 进动角为 0.1737rad , 均与实际值相当吻合. 利用求得的 r 和进动角 β , 进一步求得自旋轴和锥旋轴的交点到弹头锥顶的距离为 $r/\sin\beta = 1.0247\text{m}$, 也与实际值非常接近.

根据式(9),由求得的锥旋运动矢量 $\omega_c = [\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz}]^T$ 和各雷达的视线方向矢量,得到各组雷达的 ϵ 分别为 0.4005 、 0.2541 、 0.3747 、 0.6379 、 0.3714 和 0.2964 , 其中第二部雷达对应的 $|\tan\epsilon|$ 最小,选取该部雷达的数据,得到 $L_{\max} = 1.50\text{m}$, 按照式(27)计算得到弹头目标长度的估计值为 1.4385m , 与真实值之间的误差为 0.1385m . 当分布式组网雷达系统中雷达数量进一步增多时,完全有可能选取到使得 $\tan\epsilon$ 更小的雷达数据,此时可得到弹头目标长度更为准确的估计.

以上仿真验证了本文所提方法的有效性.

4.2 鲁棒性分析

由于发射信号带宽的限制,各雷达的距离分辨率有限,且由于一维距离像旁瓣的存在,在提取 $f-t_m$ 平面上曲线振幅参

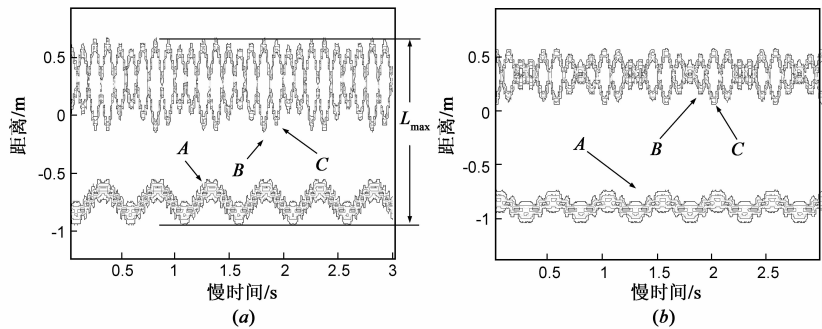


图4 第4部雷达(a)和第6部雷达(b)观测得到的 $f-t_m$ 平面上的微多普勒曲线

数时将不可避免地会引入误差,而该估计误差必然会影 响方程组(10)和(24)的求解精度.为了考察和分析这种影响,我们定义误差与真实值之间的比值为归一化误差,即

$$\rho = \frac{\hat{X} - X}{X} \quad (30)$$

其中 X 为真实值, \hat{X} 为估计值,并定义 $|\rho|$ 为归一化绝对误差.简单起见,我们假设曲线参数 M_{ci} 和 M_{pi} 的测量值的归一化误差服从 $[-a, a]$ 上的均匀分布,当 a 在 $[0, 0.1]$ 区间内变化时,考察求解得到的目标微动特征参数 $(\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz}, r_1, \beta, r/\beta)$ 的归一化绝对误差的变化规律.其余仿真参数同 4.1,但为了避免 $X = 0$ 时导致式(30)右边分母为零的情况(如 $\omega_{cy} = 0$ 时),对 ω_c 进行了欧拉旋转,这不会对算法的验证分析造成影响.采用蒙特卡洛仿真方法进行鲁棒性分析,仿真次数为 100 次,取归一化绝对误差的均值画图如图 5(a)和(b)所示.

由图 5 可知,方程组的求解精度一定程度上受到曲线参数估计精度的制约,但在曲线参数 M_{ci} 和 M_{pi} 的测量值的归一化绝对误差小于 0.1 时,目标微动特征参数的求解仍能获得较高的精度.若要提高求解精度,应进一步提高 M_{ci} 和 M_{pi} 的测量精度,因此应尽可能地增加雷达辐射信号带宽,以获得更高的距离分辨率.

5 结论

基于微多普勒特征的弹道目标识别是当前目标识别领域研究中的一个热点.本文基于分布式组网雷达,

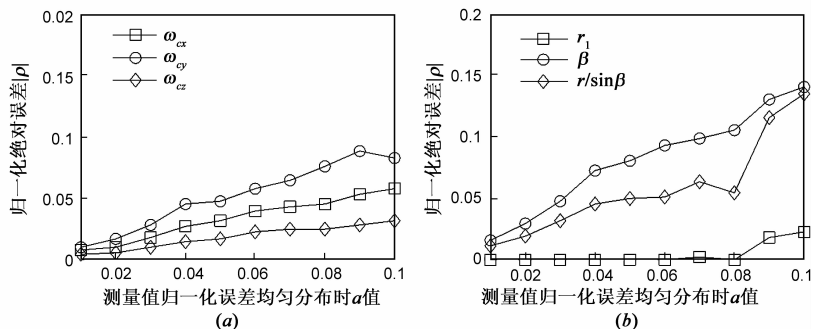


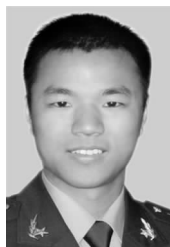
图5 鲁棒性分析

利用分布式雷达的多视角特性实现了有翼弹头三维进动特征参数,获得了目标的空间锥旋矢量、进动周期、自旋周期、进动角、底面半径、自旋轴与锥旋轴的交点位置等特征参数,并实现了目标长度的大致估计,克服了普通单基雷达中仅能提取目标在雷达视线方向上微动分量的局限,为弹道目标识别提供了更为准确丰富的特征信息.对于无翼弹头的三维进动特征提取问题,由于弹头的旋转对称性,其微多普勒效应与有翼弹头的微多普勒相比存在差异,相应的三维进动特征提取问题尚需进一步研究.

参考文献

- [1] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model and simulation study [J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(1): 2 - 21.
- [2] 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.
ZHANG 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)
- [3] Xueru Bai, Mengdao Xing, Feng Zhou, Guangyue Lu, Zheng Bao. Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3514 - 3523.
- [4] 白雪茹, 周峰, 邢孟道, 保铮. 空中微动旋转目标的二维 ISAR 成像算法 [J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1937 - 1943.
BAI Xue-ru, ZHOU Feng, XING Meng-dao, BAO Zheng. 2D ISAR imaging algorithm for air micro-motion targets [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1937 - 1943. (in Chinese)
- [5] 孙慧霞, 刘铮, 薛宁. 自旋进动目标的微多普勒特征分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 357 - 360.
SUN Hui-xia, LIU Zheng, XUE Ning. Micro-Doppler analysis of spinning-precession targets [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2): 357 - 360. (in Chinese)
- [6] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 匡勇. 弹道导弹目标微动特性的微多普勒分析与仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(4): 954 - 957.
GAO Hong-wei, XIE Liang-gui, WEN Shu-liang, KUANG Yong. Micro-Doppler analysis and simulation study of micro-motion performance of ballistic missile targets [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(4): 954 - 957. (in Chinese)
- [7] 贺思三, 周剑雄, 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] 杨冬, 王俊, 张玉玺. 利用弹头目标微动信息的两种三维
散射中心提取方法 [J]. 信号处理, 2011, 27(2): 281 - 286.
YANG Dong, WANG Jun, ZHANG Yu-xi. Two 3-D scattering centers extraction methods by using micro-motion information of ballistic targets [J]. Signal Processing, 2011, 27(2): 281 - 286. (in Chinese)
- [9] 金光虎, 高勋章, 黎湘, 陈永光. 基于 ISAR 像序列的弹道目标进动特征提取 [J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1233 - 1238.
JIN Guang-hu, GAO Xun-zhang, LI Xiang, CHEN Yong-guang. Precession feature extraction of ballistic targets based on dynamic ISAR image sequence [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1233 - 1238. (in Chinese)
- [10] Subotic N S, Thelen B, Cooper K, et al. Distributed radar waveform design based on compressive sensing considerations [A]. IEEE 2008 Radar Conference [C]. Rome, Italy: IEEE Press, 2008. 1 - 6.
- [11] Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. MIMO radar: an idea whose time has come [A]. Proceeding of the IEEE Radar Conference [C]. Philadelphia, PA: IEEE Press, 2004. 71 - 78.
- [12] Zhang Q, Yeo T S, Tan H S, Luo Y. Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough Transform [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291 - 299.
- [13] 吴晓芳, 刘阳, 王雪松, 卢焕章. 基于频率步进雷达时间-距离像的宽带微动特征提取 [J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1416 - 1421.
WU Xiao-fang, LIU Yang, WANG Xue-song, LU Huan-zhan. Feature extraction of wide-band micro motions based on stepped-frequency radar time-range profiles [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7): 1416 - 1421. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 王涛, 周颖, 王雪松, 肖顺平, 郭桂蓉. 雷达目标的章动特性与章动频率估计 [J]. 自然科学进展, 2006, 16(3): 344 - 350.

作者简介



罗 迎 男, 1984 年 8 月出生于湖南益阳, 现为空军工程大学电讯工程学院博士生, 已在《IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing》、《电子学报》等国内外学术期刊和会议录上发表和录用论文 50 余篇. 研究方向: 雷达成像与目标识别.

E-mail: luoying2002521@163.com