

弹道中段目标多普勒成像算法研究

丁小峰 魏玺章 胡杰民 黎湘
(国防科技大学空间电子信息技术研究所 长沙 410073)

摘要: 弹道中段目标成像技术是弹道导弹防御系统的核心技术。利用传统的宽带 ISAR 雷达对弹道中段目标成像无法利用统一的相位补偿函数进行相位补偿,导致成像结果的模糊。该文提出一种提取时频骨架线的信号处理算法,算法通过对提取的弹道中段目标窄带回波的时频多普勒骨架线进行幅度增强,提高目标多普勒成像分辨率,仿真数据和暗室测量数据试验表明,该算法能够实现基于窄带雷达回波多普勒信息的弹道中段目标二维成像。

关键词: 窄带雷达; 弹道中段目标; 成像; 骨架线

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-2864-05

The Research on Doppler-only Imaging Algorithm of the Mid-course Missile Object

Ding Xiao-feng Wei Xi-zhang Hu Jie-min Li Xiang

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

Abstract: The midcourse missile imaging method is the key technology for the missile-defense system. Conventional ISAR imaging methods require a uniform function to compensate the phase of the echo. The function is difficult to acquire in the wideband case, so the ISAR imaging result is always smeared. This paper provides a new signal processing algorithm called time-frequency trunk line extraction method. By enhancing the amplitude of the time-frequency doppler which extracted from the narrowband radar return signal, the method improves the doppler imaging resolution effectively. The simulation results and anechoic chamber data of the representative cone-shaped object show that the imaging of the missile target can be obtained from the narrowband radar doppler information using this method.

Key words: Narrowband radar; Mid-course missile; Imaging; Trunk line

1 引言

近年来,弹道导弹防御系统中的目标识别技术受到越来越多的关注。导弹防御系统可在助推段、中段和再入段实现目标识别和拦截。在助推段,诱饵尚未放出,此时进行拦截无需进行真假目标识别,但拦截技术难度较大。在再入段,大气的过滤作用使目标识别相对容易,但拦截时间短,拦截风险大。在中段,目标飞行时间长,可以实现较长时间的识别与拦截,因此,导弹防御系统更多的兴趣集中在中段,中段被认为是导弹防御的关键阶段。导弹防御系统一般采用多种手段综合识别真假,目前国内研究较多的一种方法是弹道中段目标的逆合成孔径雷达(ISAR)成像识别。ISAR 通过采用大带宽信号来获得高的距离分辨率,通过目标相对雷达视线姿态变化产生的多普勒信息获得横向分辨率,从而实现运动目标的二维成像。

ISAR 成像中,通常假设目标均匀转过了一个小的角度。在这样的假设下,经过包络对齐之后,距离压缩域信号的相位误差仅由目标的径向运动引起,因此该相位误差在各个距离单元相同,可以用统一的相位补偿函数进行相位补偿。但是,弹道中段目标通常会有时变的偏航、俯仰和滚动分量,并且伴随翻滚、自旋、进动等中段目标特有的运动状态,导致目标姿态相对于雷达视线不停的变化,引入了新的相位误差,使得弹体散射点的多普勒频率随时间变化,导致 ISAR 像模糊。为提高 ISAR 成像质量,文献[1]中提出一种对复杂运动目标的成像算法;文献[2]中,通过仿真,认为对弹道中段目标进行有效的成像,需要适当调整雷达脉冲累积时间和脉冲重复频率。目前,对弹道中段目标的 ISAR 成像仍处于研究探索阶段。

本文考虑弹道中段目标相对于雷达视线具有剧烈、有规律的姿态变化特性,引入了利用窄带宽雷达对弹道中段目标进行多普勒成像的方法。使用窄带雷达系统利用雷达回波的多普勒信息对目标进行

成像的概念最早在文献[3]中予以介绍，通过对目标不同姿态角的雷达照射回波的分析，利用多普勒层析投影(Doppler tomography)技术对目标成像。随后，多种改进的多普勒成像技术被应用 SAR 和 ISAR 的雷达成像中。文献[4]介绍了利用移动天线发射的单频波对固定目标成像的方法。文献[5]介绍了通过融合多部雷达对同一目标不同方位角的回波多普勒信息，对移动目标成像的方法。文献[6]介绍了利用连续波雷达系统，通过对目标多角度的观测，弥补窄带雷达距离分辨上的缺陷，对目标进行高分辨率成像的方法；并对多普勒成像的分辨率进行了详细的介绍。最近，文献[7,8]中分别报道了利用多普勒成像技术进行窄带高分辨成像的结果，从理论上和实验上证实该方法的正确性。

本文在第 2 节基于暗室测量某弹头目标散射点结构，建立了弹道中段目标进动模型，分析了进动目标对雷达回波的多普勒调制特性；在第 3 节研究利用窄带雷达对弹道中段目标时变的多普勒进行成像的算法，并提出了一种用于提高多普勒成像的质量的提取时频骨架线算法；在第 4 节，根据暗室测量的某弹头缩比模型的全方位角度的单频回波数据动态拟合目标进动时的雷达接收回波，利用本文所提出的提取时频骨架线算法，重建了目标的散射点位置信息。

2 弹道中段目标多普勒调制特性分析

弹头是弹道中段存在的主要目标，也是导弹防御方需要识别的重点对象。典型的弹道中段目标的运动包括进动，自旋等运动状态。弹头目标的散射点强弱是弹体的固有属性，因此自旋和进动等运动状态，会产生散射点相对于雷达视线角的姿态的变化。图 1 给出了利用 X 波段雷达，带宽 1 GHz 的线性调频信号，对某弹头目标缩比模型的暗室数据在 0-6° 的雷达视线照射角范围内的成像，结果表明弹头类目标的鼻锥及尾部两侧存在固有强散射点。

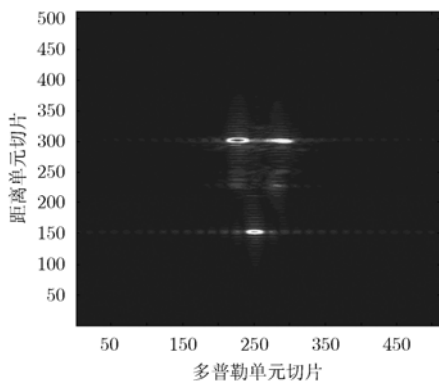


图 1 弹头类目标暗室缩比模型宽带 ISAR 成像(0-6° 方位角)

为研究窄带雷达对中段目标的回波的成像效果，以进动运动形式为例，建立进动锥体模型，锥体散射点位置分布按照图 1 结果设定，仿真弹道中段目标对雷达回波的多普勒调制^[9]，建立模型如图 2 所示。

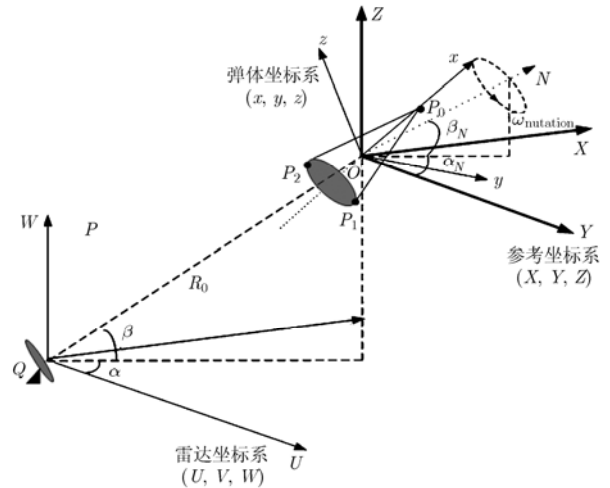


图 2 弹道中段目标进动模型

图 2 建立了弹道中段目标的进动模型，应用了 3 种空间坐标系。弹体坐标系 (x, y, z) ；雷达坐标系 (U, V, W) ；参考坐标系 (X, Y, Z) 。弹体坐标系 (x, y, z) 为动态坐标系，该坐标系随着弹道中段目标运动而运动。原点为目标质心 O ， x 方向为弹体轴线的方向， y 方向与 x 方向垂直， z 方向与 x, y 方向满足右手法则。雷达坐标系 (U, V, W) 为静态坐标系，原点为雷达坐标点 Q 。参考坐标系 (X, Y, Z) 为静态坐标系，原点与弹体坐标系的原点同为 O ，轴线方向和雷达坐标系方向相同。

令 α, β 分别为雷达坐标系中 QO 的偏航角和俯仰角，则 QO 的方向向量为 $\mathbf{n} = [\cos \alpha \cos \beta \cos \beta \sin \alpha \sin \beta]^T$ 。 α_N, β_N 分别为雷达坐标系中 ON 的偏航角和俯仰角，则 ON 的方向向量为 $\mathbf{m} = [\cos \alpha_N \cos \beta_N \cos \beta_N \sin \alpha_N \sin \beta_N]^T$ 。

只考虑进动情况下，目标轴线 x 绕固定射线 ON 做角速度为 ω_{mnt} rad/s 的进动。导弹为刚体目标，目标上一散射点 P ，其在参考坐标系中的初始矢量为 $\mathbf{r}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$ ，经过时间 t 之后，旋转到矢量 \mathbf{r} ，则雷达原点 Q 到散射点 P 的位移矢量表示为 $\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_0 + \mathbf{r}$ 。

散射点 P 对窄带雷达的回波可以表示为雷达原点 Q 到散射点 P 的位移矢量的函数，即

$$\mathbf{s}_p(t) = \rho_p(x, y, z) \exp[j2\pi f_c(t - 2\mathbf{R}(t))/c] \quad (1)$$

混频接收后，得到的基带信号为

$$s_P(t) = \rho_P(x, y, z) \exp\left[j2\pi f_c \frac{2R(t)}{c}\right] \quad (2)$$

其中, $\rho_P(x, y, z)$ 为散射点 P 在弹体坐标系中的散射强度, c 为电磁波传播速度。则基带信号的相位变化: $\Phi(R(t)) = 2\pi f_c \frac{2R(t)}{c}$, $R(t)$ 可以利用与矢量 m 有关的旋转矩阵 \mathbf{R}_t 表示^[9]。基带信号周期性的变化, 产生周期性的多普勒频率。对目标上的 3 个散射点来说, 假定各散射点散射强度 $\rho_k(x, y, z) = 1$, 各参数设定为 $\alpha_N = 45^\circ$, $\beta_N = 60^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $f_c = 1 \text{ GHz}$, $\omega_{\text{rot}} = 10\pi \text{ rad/s}$, 则目标上 3 个散射点回波的多普勒频率的时频特征如图 3 所示。

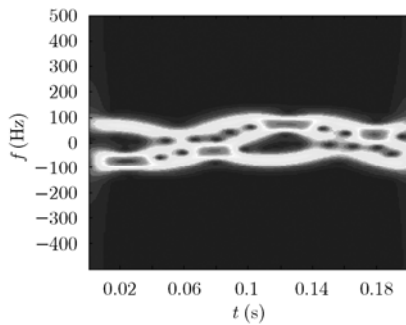


图3 进动目标3散射点多普勒频率

由图 3 可知, 相对于雷达视线旋转的散射点产生的多普勒频率成周期性变化。不同位置的散射点的多普勒随时间变化的频率相同, 为目标的旋转频率; 幅度、初始相位不同。在下一节介绍利用散射点的时变多普勒频率重建散射点位置的方法。

3 基于提取时频骨架线方法的层析投影成像

窄带雷达无法提供距离上的高分辨, 但通过融合旋转目标不同姿态角上的多普勒信息, 利用层析投影方法(tomography), 可以产生二维高分辨图像。层析投影方法是利用对目标多视角观察得到的不同散射点随时变多普勒信息, 重建散射点的位置^[10]。

重建散射点的位置信息, 需要在成像坐标内, 根据雷达回波信息, 恢复目标散射点函数。定义散射点函数沿曲线的积分表示如下:

$$R_\theta(r) = \int_{r, \theta} \rho(r, \theta) ds \quad (3)$$

式(3)中, θ 表示目标相对于雷达视线的姿态角, $\rho(r, \theta)$ 表示目标的散射点强度函数。对于雷达照射波来说, ds 为直线积分, 在 θ 取值不变时, $R_\theta(r)$ 为沿雷达波照射直线 $r = x \cos \theta - y \sin \theta$ 积分, 则式(3)可以表示为

$$R_\theta(r) = \int_{r, \theta} \rho(r, \theta) ds \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(r, \theta) \delta(r - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (4)$$

当目标由于自旋等运动使散射点相对于雷达视线的姿态角 θ 随时间 t 发生周期性变化时, 回波的多普勒频率随着时间 t 发生周期性改变, 其多普勒频率的变化情况如图 3 所示。对于窄带雷达信号, 散射点回波信号与 $R_\theta(r)$ 在时频变换域内存在对应关系。即由回波信号的时频变换, 可以得到 $R_\theta(r)$ 随 θ 变化的规律^[10], 因此, 可利用式(5), 根据 $R_\theta(r)$ 重建目标散射点位置信息:

$$\rho(\tau \cos \phi, \tau \sin \phi) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\infty}^{+\infty} R_\theta(r) |r| \\ \cdot \exp(jr\tau \cos(\phi - \theta)) dr d\theta \quad (5)$$

上面介绍了层析投影算法原理, 利用该算法, 对建立的自旋弹道中段目标模型的散射点回波进行重建。图 4 给出了基于图 3 的时变多普勒频率重建的散射点相对位置信息的结果, 重建利用的是目标自旋两个周期内的窄带回波数据, 采样频率 1000 Hz。

由图 4 可知, 通过融合窄带雷达对旋转目标相对于雷达视线不同角度的照射回波, 可以利用散射点产生的时变多普勒频率重建散射点在二维平面内的投影位置。

重建图像的质量与多普勒频率分辨率有关。多普勒频率的分辨率越高, 得到的成像质量越高。在实际应用中, 为得到回波信号中的多普勒信息, 需要对回波信号进行时频分析, 由于时频分析方法的分辨率本身具有一定限制, 而且实际回波信号中混杂着各种频率分量会模糊时频图像, 因此重建的散射点图像将会存在一定程度的模糊。

为改善利用层析投影成像的质量, 本文提出一种提取时频信号骨架线的方法。该方法主要针对目标匀速旋转, 其多普勒频率曲线具有正弦波形式, 方法的主要思想是提取目标回波的多普勒频率信号的骨架线, 并对提取出的信号进行细化和幅度增强, 最后对提取出的骨架线进行三角函数拟合, 利用提取后的骨架线信号进行层析投影成像, 方法的具体步骤如下:

(1) 对时频分析信号时间切片序列低通滤波平滑, 滤除频率域中噪声尖峰, 突出散射点峰值, 图 5 给出了利用低通滤波平滑对图 3 中第 1 列时间切片序列的平滑效果图。

(2) 在步骤(1)处理的基础上, 对时间切片序列进

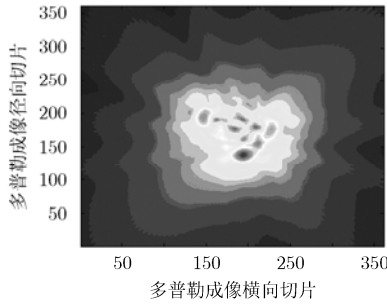


图 4 进动目标三散射点重建

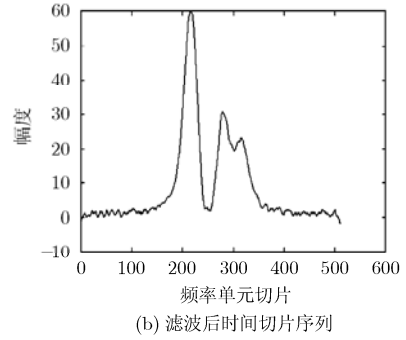
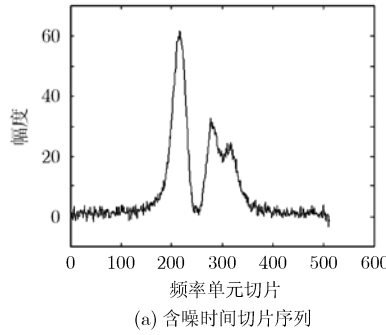


图 5 时间切片序列低通滤波平滑效果

行滑窗检测，寻找窗口范围内的序列最大值位于窗口中心处的序列片断，对其进行幅度增强；其他数据段数据进行幅度加权抑制。窗口的大小 L 控制骨架线的粗细。

(3)调整窗口的大小 L 和权值 w ，提取不同时频骨架线图像；进行层析投影成像，所得图像利用最小均方误差准则与原始图像进行比对，求得最优的窗口大小和权值，准则函数如式(6)所示。其中， $s(x,y)$ 为提取时频骨架线后图像函数， $S(x,y)$ 为原始图像函数， $I(x,y)$ 为均方差值。有些场合为提高运算效率，这一步骤可以省略，此种情况下，通常选择最小的窗口长度和权值，即取 $L = 3$ ， $w = 0$ 。

$$\min_{x,y} I(x,y) = \min_{x,y} \|s - S\| = \min_{x,y} \sum_{y,x} |s(x,y) - S(x,y)|^2 \quad (6)$$

(4)对于具有正弦形式的时频回波，利用三角函数对提取后的时频曲线进行拟合。

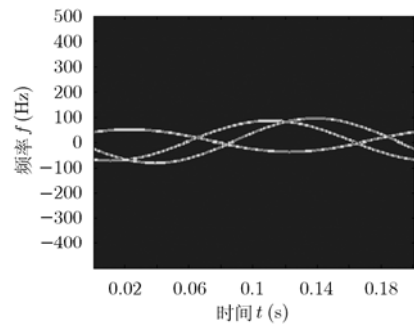
图 6 为利用该方法对图 3 所示的时频多普勒曲线进行层析投影成像结果，其中，窗口值 $L = 3$ ，加权值 $w = 0$ 。

提取时频骨架线算法是对信号进行后端处理的算法，利用提取时频骨架线算法处理后的时频信号用于层析投影成像，可以通过控制窗口长度和加权值来控制目标多普勒时频曲线的清晰程度，使成像质量接近于理论值，因此，图 6(b)中的 3 个散射点非常清晰。

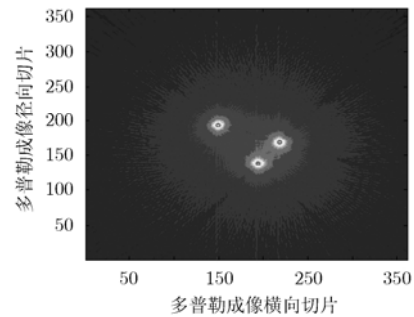
4 暗室仿真数据分析

在图 2 所设定的场景中，利用暗室测量的某弹头缩比目标的全方位角度的单频回波数据动态拟合目标进动时的雷达接收回波，回波信号信噪比为 10 dB。拟合仿真参数设定如下：目标的进动速度 $\omega_{\text{rot}} = 0.2\pi \text{ rad/s}$ ，雷达单频频率 $f_c = 0.85 \text{ GHz}$ ， $\alpha_N = 45^\circ$ ， $\beta_N = 60^\circ$ ， $\alpha = 45^\circ$ ， $\beta = 60^\circ$ ，仿真试验结果如图 7 所示。

通过上述实验可知，匀速旋转目标上的强散射点的雷达回波的时频多普勒具有正弦曲线的形式，



(a) 旋转目标三散射点时频骨架线



(b) 基于提取时频骨架线方法的散射点多普勒成像

图 6

利用不同散射点产生的不同的多普勒曲线，可以通过层析投影算法重建该目标上的强散射点在特定姿态下的相对位置信息。通常情况下，由于存在噪声干扰、时频分析方法的分辨率限制等因素，使得某些散射点的多普勒分量存在模糊，如图 7(a)所示。利用这种多普勒频率信息无法重建出所有散射点相对位置信息。因此本文提出了提取时频骨架线算法，利用该算法提取并增强图 7(a)中各散射点的多普勒频率分量，如图 7(b)所示，用于层析投影成像，最终重建出目标各散射点的相对位置，如图 7(c)所示。

5 结论

本文在建立弹道中段目标运动模型的基础上，分析弹道中段目标进动对雷达回波多普勒调制。针对弹道中段目标进行成像的问题，引入了多普勒成

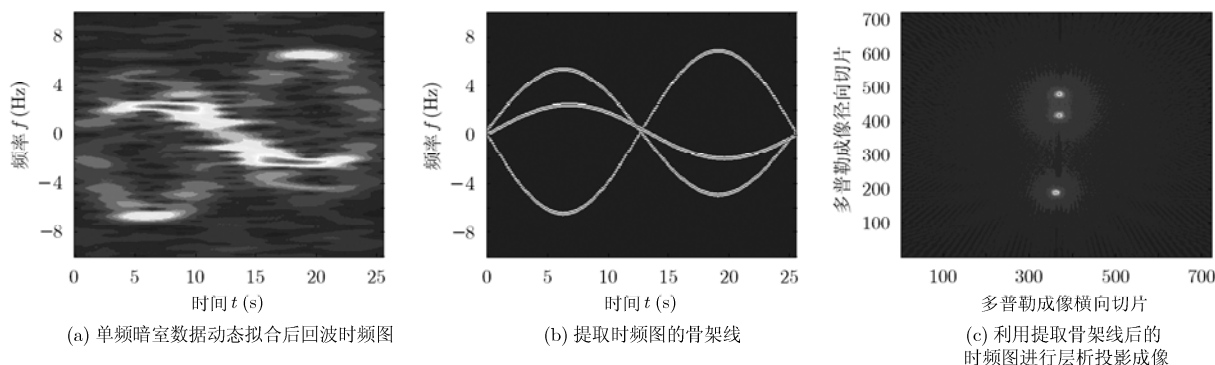


图7

像的概念；由于多普勒成像技术可利用现有的窄带雷达对弹道中段目标进行成像问题的研究，同时针对运动状态复杂的弹道中段目标，多普勒成像较之ISAR成像具有一定的技术优势，因此，该技术的引入，不仅极大地拓展了窄带雷达在弹道中段防御系统中目标识别方面的潜力，同时，为弹道防御系统提供一种可行的技术手段，弥补弹道中段目标ISAR成像技术可能存在的固有的不足。最后，本文提出一种基于提取时频骨架线的方法，通过对比试验表明，该方法能有效地提高多普勒成像的质量。本文的研究内容为弹道中段识别系统提供了一种新的发展思路。

参考文献

- [1] 韩兴斌, 胡卫东, 郁文贤, 杜小勇. 一种复杂运动目标的ISAR成像算法[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1159-1163.
Han Xing-bin, Hu Wei-dong, Yu Wen-xian, and Du Xiao-yong. An ISAR imaging algorithm for the complex motion target [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1159-1163.
 - [2] 冯德军, 王雪松, 肖顺平, 王国玉. 弹道中段雷达仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2511-2516.
Feng De-jun, Wang Xue-song, Xiao Shun-ping, and Wang Guo-yu. Simulation of radar imaging of ballistic target in midcourse[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(11): 2511-2516.
 - [3] Munson D, O'Brien J, and Jenkins W. A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar[J]. *Proceedings of IEEE*, 1983, 71(8): 917-925.
 - [4] Borden B and Cheney M. Synthetic-aperture imaging from high-Doppler-resolution measurements [J]. *Institute of Physics Journal on Inverse Problems*, 2005, 2(11): 1-11.
 - [5] Himed B, Bascom H, Clancy J, and Wicks M C. Tomography of Moving Targets (TMT) Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites[C]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 4540: 608-619.
 - [6] Coetzee S L, Baker C J, and Griffiths H D. Narrow band high resolution radar imaging[C]. *Proceedings of IEEE Radar Conference*, Atlanta, USA, 2006: 622-625.
 - [7] Wicks M C, Himed B, Bascom H, and Clancy J. Tomography of moving targets for security and surveillance[C]. *Proceeding NATO Advanced Study Institute*, IL Ciocco, Italy, 2005: 415-430.
 - [8] Bracken J E, Bascom H, Clancy J, Himed B, and Wicks M C. Ultra narrow band adaptive tomographic radar [C]. *International Conference on Waveform Diversity and Design*, Hawaii, 2005: 36-39.
 - [9] Victor C. Micro-Doppler effect in radar: Part I: Phenomenon, physics, mathematics, and simulation study [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
 - [10] Cheng Lock Charles Chua Major. Doppler-only Synthetic Aperture Radar [D]. *Postgraduate Degree Thesis of Naval Postgraduate School*, 2006.
- 丁小峰: 男, 1981年生, 博士生, 从事雷达目标识别、目标特性等领域的研究工作。
- 魏玺章: 男, 1976年生, 副教授, 博士, 从事雷达目标识别、目标特性等领域的研究工作。
- 胡杰民: 男, 1983年生, 博士生, 从事雷达目标识别、目标特性等领域的研究工作。
- 黎湘: 男, 1967年生, 博士, 教授, 从事精确制导、雷达信息处理、非线性信息处理等领域的研究工作。