

一种大加速度机动目标微动参数估计方法

李彦兵^{*①} 张曦文^② 李飞^① 陈大庆^③ 高红卫^①

^①(北京无线电测量研究所 北京 100854)

^②(中国人民解放军驻航天二院二十三所军代表室 北京 100854)

^③(太原卫星发射中心试验技术部 太原 030027)

摘要: 运动目标具有大加速度时, 在一定的观测时间内, 其瞬时多普勒频率是模糊的。若目标存在微动, 相应产生的微多普勒会叠加于模糊的多普勒频率之上。这种现象常见于高速机动目标。针对提取具有大加速度微动目标的运动特征问题, 该文提出一种参数估计方法。通过对目标多普勒频率的解模糊以及对目标整体运动的估计和补偿, 提取目标的微多普勒分量, 在此基础上估计目标的微动周期。基于仿真数据和实测数据的分析表明, 该方法适用于估计大加速度机动目标的微动参数问题。

关键词: 机动目标; 微多普勒; 运动补偿; 参数估计; 解模糊

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)01-0082-06

DOI: 10.11999/JEIT160261

Estimation of Micro-motion Feature for Large Accelerated Target

LI Yanbing^① ZHANG Xiwen^② LI Fei^① CHEN Daqing^③ GAO Hongwei^①

^①(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

^②(PLA Representative office in No.23 Institute of the Second Academy of China Aerospace, Beijing 100854, China)

^③(Technology Department of Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030027, China)

Abstract: In a certain observation time duration, the instantaneous frequency of motion target with large acceleration is ambiguous. This case is usually met in flexible-motion target with high velocity. If target has micro-motion, it will cause micro-Doppler modulation which adds in the ambiguous Doppler frequency. In order to extract micro-motion feature of large acceleration target, a parameter estimation method is proposed. Through the ambiguity resolution of Doppler frequency and the estimation and compensation of bulk motion of target, micro-Doppler extraction is achieved. And then, micro-motion period is estimated. Analysis based on simulation and measured data show that the method is suit for micro-motion parameter estimation of large acceleration flexible-motion target.

Key words: Flexible-motion target; Micro-Doppler; Motion compensation; Parameter estimation; Ambiguity resolution

1 引言

微运动是近年出现在雷达领域的概念, 它特指雷达目标运动时, 除去质心运动, 目标自身或目标上的某些部件相对于质心的运动, 例如转动、振动、摆动以及这些运动的合成形式等。同目标的整体平动会引起多普勒调制类似, 微运动也会引起多普勒调制现象, 称为微多普勒。美国海军实验室的 Chen V C 教授将这一概念引入雷达领域, 指出若目标具

有微运动, 则微多普勒调制会叠加于目标的整体运动引起的多普勒调制之上^[1]。随后的研究表明, 微多普勒反映了目标的微动信息, 通过信号处理手段有可能从微多普勒中提取与目标运动相符合的特征, 从而为高精度测量、目标识别等高级功能提供信息^[2-11]。

高速运动目标若自身存在加速度或者运动方向与雷达视线存在一定夹角, 目标相对于雷达都会展现出加速运动状态, 引起多普勒频率随时间的线性变化。为了保证姿态稳定或调整飞行轨迹, 通常会对目标进行一定的控制手段, 最常见的便是自旋运动, 同时, 由于受到空气阻力、目标分离产生的横向干扰力, 目标会产生进动等复合运动。这些运动

收稿日期: 2016-03-21; 改回日期: 2016-07-28; 网络出版: 2016-09-30

*通信作者: 李彦兵 xidianlyb@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61271417)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61271417)

是典型的微动，会对雷达信号产生相应的周期性调制，并叠加于多普勒频率之上。针对微动目标的运动补偿和特征提取问题，文献[12]通过多级延迟共轭相乘处理实现平动补偿，通过调整延迟时间实现微多普勒缩放，并根据信号能量差异使用 Hough 变换进行各信号分量的逐次分离和微多普勒的逐次提取。文献[13]提出了一种适用于窄带雷达信号的微动参数快速估计方法。通过信号高阶矩包含的信息估计目标旋转频率，进而估计目标微动参数。文献[14]利用经验模态分解将信号分离，使用短时傅里叶变换得到每个本征模态函数的瞬时频率，进而提取空间锥体目标的微动特征。这些研究显示了高速运动目标微动信息提取的可行性，但对于运动补偿问题，研究内容主要集中于多普勒频率不存在模糊的情况。本文针对大加速度运动目标，在目标瞬时多普勒频率存在模糊的情况下，研究目标微动参数的估计问题。

2 信号模型

雷达跟踪目标时，以一定重复频率发射信号照射目标，发射信号经目标的散射后返回雷达。假设仅考虑目标回波的相位变化，不考虑幅度起伏，即目标回波相对于发射信号的变化仅由目标的位置变化所带来，则单散射点目标的回波为^[13]

$$s(t) = \exp(j2\pi f_c(t - \tau)) \quad (1)$$

其中， t 为时间， f_c 为雷达载频， τ 为信号时延。对回波信号混频，且将 $\tau = 2R_t/c$ 代入式(1)，得到混频后的回波信号为

$$\begin{aligned} s(t) &= \exp(-j2\pi f_c \tau) = \exp\left(-j2\pi f_c \frac{2R_t}{c}\right) \\ &= \exp\left(-j4\pi \frac{R_t}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中， R_t 为目标斜距， c 为光速， λ 为雷达发射波波长。由式(2)可知，回波信号的相位为 $\Phi_t = -4\pi R_t/\lambda$ ，仅由目标的斜距确定。当目标具有整体平动和微动时，斜距的变化为

$$R_t = R_0 - vt - \frac{1}{2}at^2 + r \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

其中， R_0 为目标的初始距离， v 为目标整体平动速度， a 为目标整体平动加速度， r 为微动旋转半径， ω 为微动角速度， φ 为初相。此时目标回波信号的瞬时频率为

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{d\Phi_t}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{dR_t}{dt} \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} [v + at - \omega r \sin(\omega t + \varphi)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中，括号中前 2 项为目标整体平动带来的多普勒

频率变化，后一项为微动带来的多普勒频率变化。可以看出，目标的瞬时多普勒频率由整体平动多普勒和微多普勒叠加而成。其中，目标整体平动速度引起目标多普勒频率的偏移，加速度引起多普勒频率随时间的线性变化，微动引起多普勒频率的正弦调制^[12,15]。由式(4)可知，若目标的加速度 a 足够大，以至于引起的多普勒频率变化量大于雷达的脉冲重复频率 (PRF)，则目标的多普勒频率会产生模糊现象；同时，若目标微动角频率与旋转半径的乘积 ωr 足够大，以至于微动引起多普勒频率的正弦调制振幅大于 PRF/2 时，也会引起目标的多普勒频率会产生模糊。需要指出，当存在目标加速度和微运动共同引起多普勒频率模糊时，尽管 3.1 节中介绍的解模糊方法能够正确解多普勒模糊，3.2 节对瞬时频率的直线拟合方法也仅能补偿由目标加速度引起的线性频率变化，对于微动引起的多普勒模糊是无法补偿的。由目标微动引起的多普勒模糊是由于雷达 PRF 过低导致的，即雷达系统对回波信号的采样率不够，导致的多普勒频率混叠现象。本文不考虑这种欠采样的情况，仅考虑由目标加速度带来的多普勒模糊问题。

3 微动参数估计

由以上分析可知，具有微运动的目标，其回波信号的瞬时多普勒频率是目标整体平动引起的多普勒频率与微多普勒频率的叠加。为提取微多普勒信息，首先需要对整体平动进行补偿，以消除多普勒频率的影响。进一步，若目标的瞬时多普勒频率存在模糊现象，则在运动补偿前还需进行多普勒频率解模糊处理。

3.1 多普勒频率解模糊

当目标的多普勒频率变化量大于雷达 PRF 时，会产生多普勒模糊。若模糊数为 n ，则目标真实多普勒频率与雷达测量多普勒频率之间的关系为

$$f_{\text{real}} = f_{\text{amb}} + n \times \text{PRF} \quad (5)$$

其中， f_{real} 为目标多普勒频率真值， f_{amb} 为目标多普勒频率模糊值。解模糊的目标就是确定模糊次数 n 。进一步，多普勒频率每模糊一次，真值与测量值之间会相差一个 PRF 值，随着模糊次数的增加，真值和测量值之间的差异以 PRF 的整数倍累积。根据这一特点，按时间点依次判断多普勒频率的模糊情况，每模糊一次，则补偿一个 PRF 值。当遍历了时间后，解模糊也相应完成。根据这一思想，多普勒频率解模糊流程如下：

(1) 对目标回波的时频分析按时间顺序依次寻找最大值，记录该最大值序列得到目标瞬时频率的

估计值;

(2) 计算瞬时频率估计值的差分值;

(3) 搜索差分值大于 $\text{PRF}/2$ 的位置, 则该位置即是多普勒发生模糊的位置;

(4) 在多普勒发生模糊的位置处, 以 PRF 作为补

偿量, 对瞬时多普勒频率进行解模糊处理, 得到解模糊后的瞬时多普勒频率值。

图 1 给出瞬时多普勒频率解模糊的示意图, 由此可见, 利用时频分布上多普勒频率的变化, 可以实现对多普勒频率的正确解模糊。

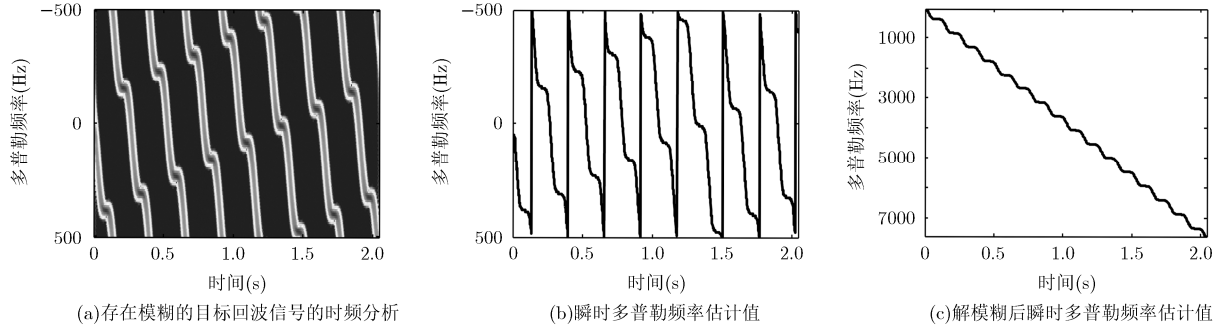


图 1 瞬时多普勒频率解模糊示意图

3.2 运动补偿及微多普勒信号提取

由式(4)可知, 目标存在加速度时, 多普勒频率随时间呈线性变化, 由于微多普勒的存在, 瞬时频率并不是直线, 但其趋势依然为线性变化的轨迹。因此, 利用最小二乘法对解模糊后的瞬时多普勒频率值 f_d 进行直线拟合^[16], 可以得到目标整体平动的估计。令

$$f_d = a_1 t + a_0 \quad (6)$$

其中, a_1, a_0 为直线拟合系数。则拟合误差为

$$e = a_1 t + a_0 - f_d \quad (7)$$

$$\text{令 } \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_1 & 1 \\ t_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ t_n & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_0 \end{bmatrix}, \text{将式(7)写为矩阵形式}$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{T}\mathbf{A} - \mathbf{f}_d \quad (8)$$

式(8)的最小二乘解为: $\hat{\mathbf{A}} = (\mathbf{T}'\mathbf{T})^{-1}\mathbf{T}'\mathbf{f}_d$ 。由此得到目标整体平动的估计值 $\hat{\mathbf{f}}_{\text{motion}} = \mathbf{T}\hat{\mathbf{A}}$ 。利用 $\hat{\mathbf{f}}_{\text{motion}}$ 可以对回波信号中目标的整体平动进行补偿, 以便提取微多普勒信号。

3.3 微动周期估计

当目标的微动具有周期性时, 其周期性反映在斜距的变化上, 进而对雷达发射信号产生周期性的相位调制。由式(3)可知, 补偿了整体平动后, 微动带来的目标斜距变化为

$$R_t = R_0 + r \cos(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

可见, 目标回波进行了运动补偿后, 剩余信号中的相位调制仅由微动产生。此时, 利用信号自相关函数的周期性可以估计出目标的微动周期。

可按如下步骤估计微动周期:

(1) 对微多普勒信号求自相关函数;

(2) 对自相关函数求取模值;

(3) 对模值进行 FFT 变换, 利用变换结果第 1 峰值的位置即可求出周期。

综上所述, 大加速度机动目标微动周期提取算法流程如图 2 所示。

4 实验结果

4.1 仿真实验

首先使用仿真实验对本文算法进行验证。仿真实验产生一个单散射点高机动目标, 质心运动时进行旋转微动。仿真参数设置如下: 雷达载频为 6 GHz, 脉冲重复频率为 1000 Hz, 目标初始速度为 1

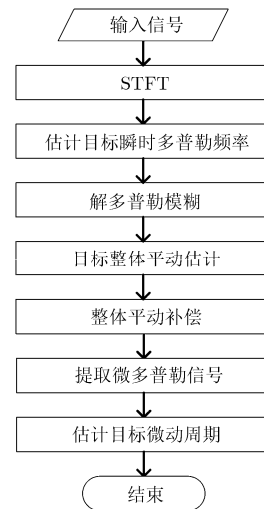


图 2 微动参数提取算法流程图

m/s, 初始加速度为 46 m/s^2 , 散射点旋转角速度为 10 rad/s , 旋转半径为 0.9 m , 对回波信号加入信噪比为 5 dB 的高斯白噪声。

图 3 给出单散射点目标微动周期估计示意图。由于目标具有很大的加速度, 瞬时多普勒频率是模糊的, 表现为穿过横轴的竖线, 其斜率与目标的加速度有关, 如图 3(a)所示; 回波信号解模糊后的瞬时频率值, 以及使用最小二乘方法对瞬时多普勒频率拟合后估计出的目标整体平动多普勒频率估计值由图 3(b)给出。可以看出, 利用文中解模糊方法, 能够还原出目标的真实多普勒频率值, 并对目标的整体平动进行估计; 图 3(c)给出目标进行运动补偿后的结果, 对比图 3(a), 目标的微动能够在时频域被清晰观察到, 微动周期信息完整包含于运动补偿后的目标回波中; 运动补偿后信号的自相关如图 3(d)所示。

表 1 给出利用本文所提方法对仿真目标进行周期估计的结果, 可以看出, 估计值与真值之间的相对误差小于 1% , 取得了较好的估计效果。

为评估参数估计方法对噪声的稳健性和适应性, 我们对不同信噪比水平下的方法性能进行了仿真测试。仿真采用上述相同的参数设置, 人工加入不同信噪比的高斯白噪声, 实验结果如表 2 所示。

表 1 单散射点仿真目标微动周期估计结果

周期真值(s)	周期估计值(s)	相对误差(%)
0.62832	0.62408	0.67

表 2 不同信噪比下目标微动周期估计结果

SNR(dB)	周期真值(s)	周期估计值(s)	相对误差(%)
10	0.62832	0.62408	0.67
5	0.62832	0.62408	0.67
0	0.62832	0.64879	3.26
-5	0.62832	3.12040	396.00

可以看出, 信噪比为 5 dB 以上时, 参数估计方法对目标真实周期的估计准确, 相对误差仅为 0.67% ; 当信噪比降低到 0 dB 时, 估计准确度有所下降, 相对误差为 3.26% ; 当信噪比为 -5 dB 时, 已不能正确估计出目标的微动周期。进一步分析, 当信噪比过低时, 基于时频分布幅度信息的瞬时频率提取方法已不能准确提取出目标的瞬时频率, 使得通过对瞬时频率直线拟合得到的目标平动参数与真实情况差异较大, 导致目标平动补偿效果较差, 影响了微动周期的估计。为了达到较好的估计效果, 实际中信噪比应在 0 dB 以上。

4.2 实测数据实验

我们在真实环境下测量了某高速机动目标的雷达回波数据。该目标在高速运动的同时存在微运动。原始数据回波的时频分析结果如图 4(a)所示, 由于高速运动, 该目标在雷达径向具有较大加速度, 因此在目标回波信号中出现了多普勒频率模糊现象; 图 4(b)给出回波信号解模糊结果以及整体平动多普勒频率估计值; 图 4(c)给出运动补偿后的结果, 同

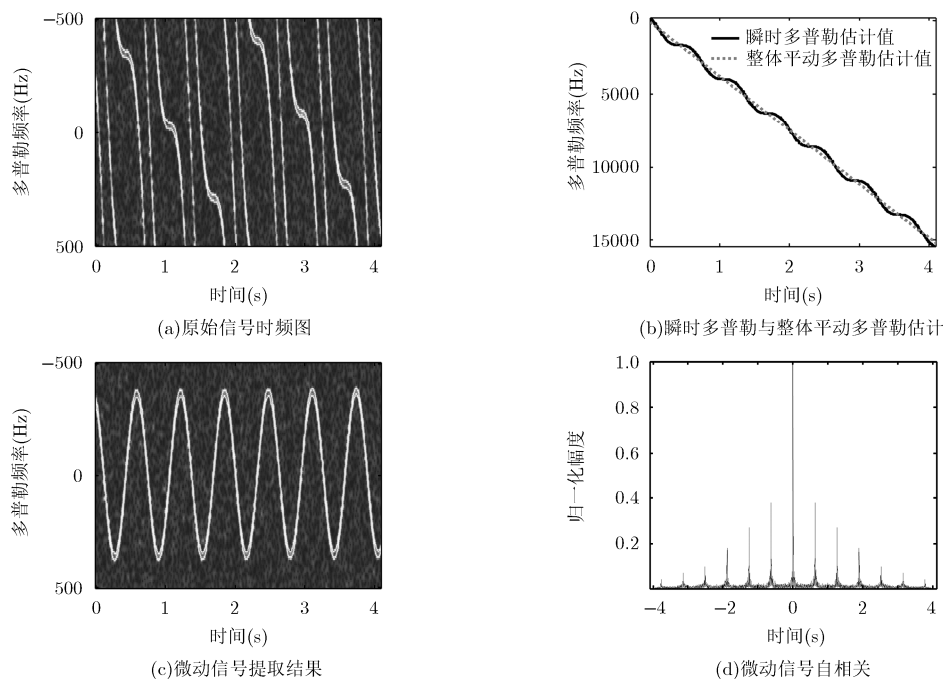


图 3 单散射点机动目标微动周期估计示意图

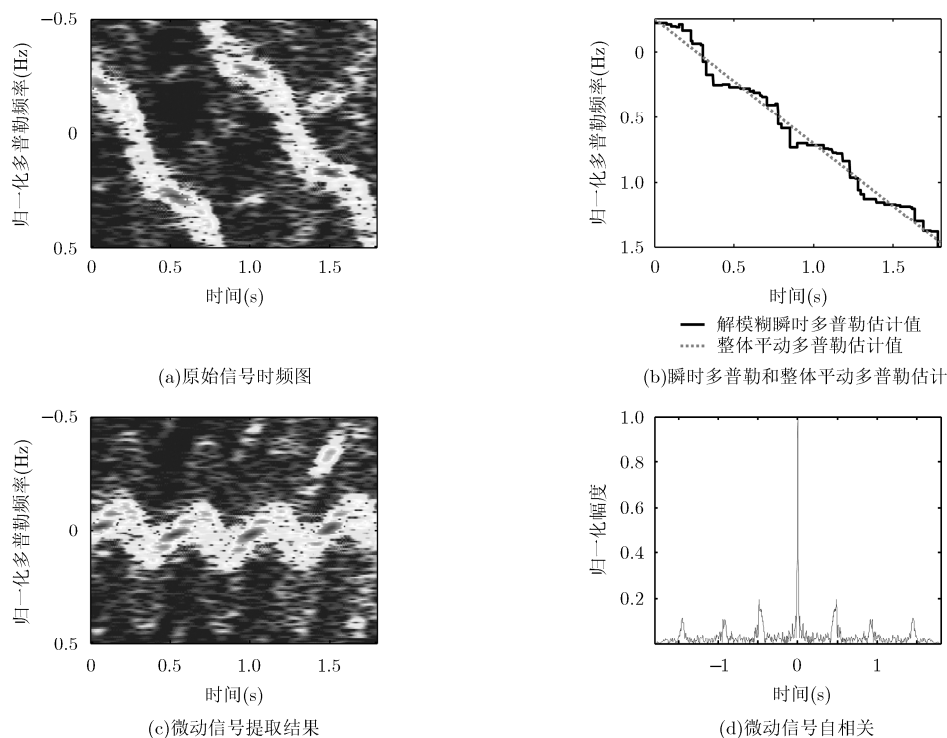


图 4 实测目标微动周期估计示意图

仿真结果一致, 经过运动补偿, 目标的微多普勒信息被提取出来, 可以观察到规律的周期性; 实测目标微多普勒信号的自相关如图 4(d)所示。

通过自相关分析, 计算目标的微动周期, 结果为 0.48822 s。对比目标的微动时频分布图 4(c), 可以看出实测数据的微动周期估计结果与目标运动特征相符。可见, 实测数据的分析结果同仿真结果一致, 验证了本文所提方法的可行性。

5 结论

高速运动目标自身存在大加速度或其运动方向与雷达视线存在一定夹角时, 目标在雷达径向具有加速度, 并引起多普勒频率随时间的线性变化, 严重时会产生多普勒模糊, 为目标的微动信息提取带来困难。通过对回波信号瞬时频率的估计、解模糊以及平动拟合和运动补偿等预处理, 可以较好地提取目标的微动信号, 在此基础上能够估计出目标的微动参数。通过仿真和实测数据的验证表明, 高机动目标微动参数提取是可行的。

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 Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21. doi: 10.1109/TAES.2006.1603402.
- [2] LEI P, WANG J, and SUN J. Classification of free rigid targets with micro-motions using inertial characteristic from radar signatures[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(13): 950-952. doi: 10.1049/el.2014.1091.
- [3] LI Y, DU L, and LIU H. Hierarchical classification of moving vehicles based on empirical mode decomposition of micro-Doppler signatures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(5): 3001-3013. doi: 10.1109/TGRS.2012.2216885.
- [4] DU L, MA Y, WANG B, *et al.* Noise-robust classification of ground moving targets based on time-frequency feature from micro-Doppler signature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(8): 2672-2682. doi: 10.1109/JSEN.2014.2314219.
- [5] LIU H, LIU H, and BAO Z. A novel ISAR imaging algorithm for micromotion targets based on multiple sparse bayesian learning[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1772-1776. doi: 10.1109/LGRS.2014.2308536.
- [6] 李开明, 张群, 梁必帅, 等. 卡车目标遮挡效应建模及微多普勒特征分析[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(9): 2114-2120. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01609.
- [7] LI Kaiming, ZHANG Qun, LIANG Bishuai, *et al.* Occlusion modeling and micro-Doppler characteristic analysis for truck target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(9): 2114-2120. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01609.
- [7] 孙永健, 穆贺强, 程臻, 等. 基于四元数矩阵奇异值的目标特征提取与识别[J]. *电波科学学报*, 2015, 30(1): 160-166. doi: 10.13443/j.cjorS.2014010501.
- [7] SUN Yongjian, MU Heqiang, CHENG Zhen, *et al.* Ballistic

- targets feature extraction and recognition based on QMSVD[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015, 30(1): 160–166. doi: 10.13443/j.cjorS.2014010501.
- [8] 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(5): 1091–1096. doi: 10.11999/JEIT140985.
- CAO Wenjie, 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(5): 1091–1096. doi: 10.11999/JEIT140985.
- [9] 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(4): 961–968. doi: 10.11999/JEIT140814.
- HAN Xun, DU Lan, and LIU Hongwei. Parameter estimation of cone-shaped target based on narrowband micro-Doppler modulation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 961–968. doi: 10.11999/JEIT140814.
- [10] 胡晓伟, 童宁宁, 董会旭, 等. 弹道中段群目标平动补偿与分离方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(2): 291–296. doi: 10.11999/JEIT140494.
- HU Xiaowei, TONG Ningning, DONG Huixu, *et al.* Translation compensation and resolution of multi-ballistic targets in midcourse[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(2): 291–296. doi: 10.11999/JEIT140494.
- [11] 鄢宏华, 王文生. 雷达目标微多普勒特征提取的频率稳定度约束[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(4): 644–652. doi: 10.13443/j.cjors.2013082701.
- YAN Honghua and WANG Wensheng. Frequency stability constraints on micro-Doppler feature extraction of radar target[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(4): 644–652. doi: 10.13443/j.cjors.2013082701.
- [12] 杨有春, 童宁宁, 冯存前, 等. 弹道中段目标回波平动补偿与微多普勒提取[J]. *中国科学: 信息科学*, 2013, 43(9): 1172–1182. doi: 10.1360/112011-1160.
- YANG Youchun, TONG Ningning, FENG Cunqian, *et al.* Translation compensation and micro-Doppler extraction of the echo from ballistic targets in midcourse[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2013, 43(9): 1172–1182. doi: 10.1360/112011-1160.
- [13] 邓冬虎, 张群, 罗迎, 等. 基于高阶矩函数的雷达目标微动参数估计方法[J]. *电子学报*, 2013, 41(12): 2339–2345. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.004.
- DENG Donghu, ZHANG Qun, LUO Ying, *et al.* Micro-Motion parameter estimation of radar target based on high-order moment function[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(12): 2339–2345. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.004.
- [14] 牛杰, 刘永祥, 秦玉亮, 等. 一种基于经验模型分解的锥体目标雷达微动特征提取新方法[J]. *电子学报*, 2011, 39(7): 1712–1715.
- NIU Jie, LIU Yongxiang, QIN Yuliang, *et al.* A new method of radar micro-motion feature extraction of cone target based on empirical mode decomposition[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(7): 1712–1715.
- [15] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 等. 加速度对微多普勒的影响及其补偿研究[J]. *宇航学报*, 2009, 30(2): 705–711. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.053.
- GAO Hongwei, XIE Lianggui, WEN Shuliang, *et al.* Research on the influence of acceleration on micro-Doppler and its compensation[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2): 705–711. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.053.
- [16] 刘凡, 赵凤军, 邓云凯, 等. 一种基于最小二乘直线拟合的高分辨率 DBS 成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(4): 787–791. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00681.
- LIU Fan, ZHAO Fengjun, DENG Yunkai, *et al.* A new high resolution DBS imaging algorithm based on least squares linear fitting[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(4): 787–791. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00681.
- 李彦兵: 男, 1982年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为雷达自动目标识别和雷达信号处理理论.
- 张曦文: 女, 1971年生, 高级工程师, 研究方向为电子与信息系统.
- 李 飞: 男, 1984年生, 博士, 工程师, 研究方向为雷达自动目标识别和雷达信号处理理论.
- 陈大庆: 男, 1964年生, 硕士, 研究员, 研究方向为雷达系统仿真、雷达目标特性测量.
- 高红卫: 男, 1980年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为雷达总体技术、雷达信号处理.