

# 对称三角线性调频连续波雷达目标 微动特征分析与提取

丁帅帅, 张 群, 刘奇勇, 罗 迎, 赵盟盟

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

**摘要** 建立了对称三角线性调频连续波(STLFMCW)雷达目标的微动模型,通过对微动目标回波信号的分析,推导了微动目标的微多普勒表现形式,分析表明微动目标在扫频周期内的连续运动会使目标的微多普勒曲线出现走动和展宽现象。针对该问题,进一步提出了一种微多普勒曲线展宽抑制及距离走动补偿的方法,完成了对相位的校正,并利用扩展 Hough 变换提取出了目标的微动参数。最后通过仿真实验验证了文中所提方法的有效性。

**关键词** 对称三角线性调频连续波;微多普勒特征;微动;展宽;走动

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.03.007

**中图分类号** TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)03-0030-05

## Analysis and Extraction of Micro-motion Features of Symmetrical Triangular LFM CW Radar

DING Shuaishuai, ZHANG Qun, LIU Qiyong, LUO Ying, ZHAO Mengmeng

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The model of micro-motion targets of Symmetrical Triangular LFM CW (STLFMCW) radar is provided. Based on the micro-motion model, the characteristics of the echoed signal are analyzed and the form of the micro-Doppler signal is obtained. The phenomenon that the micro-motion target's continuous moving during the scan period will induce the widening and deviation of micro-Doppler curves is discussed. To solve this problem, a method for removing the widening and deviation of the micro-Doppler curves is proposed. The echo phases can be compensated by using this method. Then, the parameters of micro-motion target are extracted by the extended Hough transform. The simulation experiment validates the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** STLFMCW; micro-Doppler (m-D); micro-motion; widening; deviation

雷达探测的目标通常是运动着的物体,如海上舰艇、地面车辆、空中飞机等。目标的相对径向运动会使雷达接收到的信号频率发生变化,这种现象称为“多普勒效应(Doppler Effect)”<sup>[1-2]</sup>。事实上,目标的运动往往是复杂的。而这些复杂的运动为目标

识别提供了新的重要依据。2000年,美国海军研究实验室的 Victor C. Chen 将目标或目标的组成部分除质心平动以外的振动、转动和加速运动等微小运动统称为微动<sup>[3]</sup>。目标的微动会对雷达回波产生附加的频率调制,使目标主体回波频谱存在旁瓣或展

收稿日期:2014-12-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172169)

作者简介:丁帅帅(1992-),男,山东枣庄人,硕士生,主要从事雷达信号处理研究。E-mail: dingdds@163.com

**引用格式:** 丁帅帅,张群,刘奇勇,等. 对称三角线性调频连续波雷达目标微动特征分析与提取[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(3):30-34. DING Shuaishuai, ZHANG Qun, LIU Qiyong, et al. Analysis and Extraction of Micro-motion Features of Symmetrical Triangular LFM CW Radar[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(3): 30-34.

宽效应,这种现象称为微多普勒效应(Micro-Doppler Effect)<sup>[4]</sup>。

调频连续波(Linear Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)雷达连续发射信号,发射功率相对较低,与传统脉冲式雷达相比具有体积小、重量轻、成本低、功耗小等优势,并具有良好的低截获概率<sup>[5]</sup>。目前应用较为广泛的LFMCW信号有锯齿调频连续波和三角调频连续波2种。锯齿调频连续波一般应用于成像雷达<sup>[6-7]</sup>,而STLFMCW信号因其具有正、负调频斜率的特点,大多应用于目标速度估计、运动目标检测等方面<sup>[8-9]</sup>。

针对这一情况,本文基于STLFMCW信号来研究目标的微动特征。STLFMCW因具有较长的扫频周期,使得脉冲持续时间内,目标与雷达之间径向距离的变化不能忽略,导致目标微多普勒曲线出现走动和展宽现象。本文以旋转目标为例,通过对微动目标回波信号的推导,得到了回波信号中引起微多普勒展宽和走动的误差因子。在此基础上,利用正、负调频信号的特征实现了对二次项误差因子的补偿,并利用扩展Hough变换对误差补偿后的微动曲线进行特征提取,得到了目标的微动参数。最后的仿真实验验证了STLFMCW雷达在目标微动特征分析及其提取处理中的相关结论。

### 1 STLFMCW 信号模型

STLFMCW 信号模型见图 1。

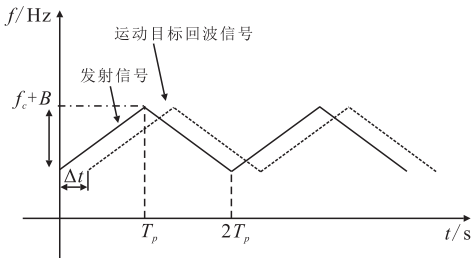


图 1 STLFMCW 回波信号模型

Fig.1 Echoed signal of the STLFMCW

发射信号斜率为正时称为正调频信号(上扫频段),发射信号斜率为负时称为负调频信号(下扫频段)。发射信号表达式为:

$$s_{up}(t_{mup}, t_k) = \text{rect}\left(\frac{t_k}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t_{up} + \frac{1}{2}\mu t_k^2\right)\right) \quad (1)$$

$$s_{down}(t_{mdown}, t_k) = \text{rect}\left(\frac{t_k}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t_{down} - \frac{1}{2}\mu t_k^2\right)\right) \quad (2)$$

式中:  $s_{up}(t_{mup}, t_k)$  表示上扫频段发射信号;  $s_{down}(t_{mdown}, t_k)$  表示下扫频段发射信号;

$\text{rect}(\cdot)$  为矩形窗函数;  $f_c$  为信号载频;  $B$  为信号带宽;  $T_p$  为上、下扫频段发射信号持续时间;  $\mu = B/T_p$  为信号的调频斜率;  $t_k$  为快时间,  $t_{mup}, t_{mdown}$  分别表示上、下扫频段慢时间,  $t_{mup} = 2mT_p, (m=0,1,\dots), t_{mdown} = (2m+1)T_p, (m=0,1,\dots), t_{up}, t_{down}$  为上、下扫频段全时间,三者关系为  $t_{up} = t_k + t_{mup}, t_{down} = t_k + t_{mdown}$ <sup>[10]</sup>。

### 2 STLFMCW 微多普勒展宽抑制及距离走动补偿

假设目标主体做匀速直线运动,微动点做旋转运动。含旋转点的目标运动模型见图 2,其中  $xoy$  为本地坐标系,  $x'_C y'_C$  为目标坐标系。目标主体速度为  $v$ ,沿  $x$  轴和  $y$  轴的速度分量分别为  $v_x, v_y$ 。目标主体上的微动点  $P$  绕旋转中心  $C_r$  做匀速圆周运动,旋转半径为  $r$ ,角速度为  $\omega$ ,初始相位为  $\theta$ 。

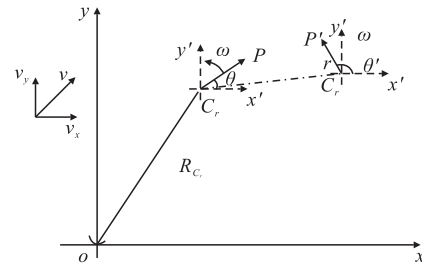


图 2 目标运动模型

Fig.2 Model of moving target

在 LFMCW 信号中,脉冲持续时间  $T_p$  为 ms 级,且为连续波,此时,必须考虑快时间内目标与雷达之间的距离变化对回波产生的影响。因此,传统的“走-停”模式不再成立<sup>[11]</sup>。

以 STLFMCW 上扫频段为例,选取目标中心为参考点,参考点坐标为  $(X_C, Y_C)$ 。旋转点在本地坐标系的初始坐标为  $(x_{C_r}, y_{C_r})$ ,假设已完成平动补偿。以  $R_{ref}, R_{C_r up}(t_{mup}, t_k)$  分别表示参考点及旋转中心距雷达的距离,则:

$$R_{ref} = \sqrt{(X_C + v_x t_m)^2 + (Y_C + v_y t_m)^2} \quad (3)$$

$$R_{C_r up}(t_{mup}, t_k) \approx R_{C_r up}(t_{mup}) + \alpha_{up} t_k + \beta_{up} t_{mup} t_k \quad (4)$$

式中:  $R_{C_r up}(t_{mup}) = \left( (x_{C_r} + v_x t_{mup})^2 + (y_{C_r} + v_y t_{mup})^2 \right)^{1/2}; \alpha_{up} = \frac{v_x x_{C_r} + v_y y_{C_r}}{R_{C_r up}(t_{mup})}; \beta_{up} = \frac{v^2}{R_{C_r up}(t_{mup})}。$

以  $v_r(t_{mup})$  表示旋转点相对于雷达的径向速度,  $R_{P up}(t_{mup}, t_k)$  表示旋转点距雷达的距离。则:

$$R_{P up}(t_{mup}, t_k) = R_{P up}(t_{mup}) + \alpha_{up} t_k + \beta_{up} t_{mup} t_k + v_r(t_{mup}) t_k \quad (5)$$

式中:  $v_r(t_{mup}) = \frac{dy'_r}{dt_{mup}} = r\omega \cos(\omega t_{mup} + \theta)$ ,

$R_{Pup}(t_{mup}) = R_{Crup}(t_{mup}) + r \sin(\omega t_{mup} + \theta)$ 。

以单个旋转点为例,上扫频段雷达回波信号和参考信号分别为:

$$s_{rup}(t_{mup}, t_k) = \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_{up}}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c(t_{up} - \tau_{up}) + \frac{1}{2}\mu(t_k - \tau_{up})^2\right)\right) \quad (6)$$

$$s_{refup}(t_{mup}, t_k) = \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_{ref}}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c(t_{up} - \tau_{ref}) + \frac{1}{2}\mu(t_k - \tau_{ref})^2\right)\right) \quad (7)$$

式中:  $\tau_{up} = 2R_{Pup}(t_{mup}, t_k)/c$  为旋转点时延;  $\tau_{ref} = 2R_{ref}/c$  为参考点时延。

利用参考信号  $s_{refup}(t_{mup}, t_k)$  对回波信号  $s_{rup}(t_{mup}, t_k)$  进行“De-chirp”处理后得到差频信号  $s_{ifup}(t_{mup}, t_k)$  为:

$$s_{ifup}(t_{mup}, t_k) = s_{rup}(t_{mup}, t_k) s_{refup}^*(t_{mup}, t_k) \quad (8)$$

将式(4)代入式(8)近似处理后得:

$$s_{ifup} = \text{rect}\left(\frac{t_k - (\tau_{up} + \tau_{ref})/2}{T_p - |\Delta\tau|}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R'_{up}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi\mu}{c}\left(t_k - \frac{2R_{ref}}{c}\right)\Delta R'_{up}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}r\omega \cos(\omega t_{mup} + \theta)t_k\right) \exp(-j\alpha_{1up}t_k) \exp(-j\beta_{1up}t_k^2) \quad (9)$$

式中:  $\Delta R'_{up} = R_{Pup}(t_{mup}) - R_{ref}$ ;  $\alpha_{1up} = \frac{4\pi}{\lambda}(\alpha_{up} + \beta_{up}t_{mup})$ ;  $\beta_{1up} = \frac{4\pi\mu}{c}(\alpha_{up} + \beta_{up}t_{mup})$ 。

将式(9)中的相位除以  $2\pi$  并对快时间  $t_k$  求导, 得其距离多普勒频率为:

$$f_{rup} = -2\mu\Delta R'_{up}/c - 2r\omega \cos(\omega t_{mup} + \theta)/\lambda - 2(\alpha_{up} + \beta_{up}t_{mup})/\lambda - 4\mu(\alpha_{up} + \beta_{up}t_{mup})t_k/c \quad (10)$$

式(10)中,第1项表征旋转中心与参考点之间的径向距离;第2项为旋转点的微动特征项;第3项为走动因子,是关于慢时间的函数,随着时间的积累,其会导致走动现象。第4项为展宽因子,是关于快时间的函数,这将导致展宽现象。

在考虑了单次脉冲时间内目标连续运动对回波信号的影响后,旋转点的微多普勒曲线仍呈正弦曲线的形式,并且LFMCW的微多普勒特征的最大频偏不仅与旋转半径有关,而且与旋转频率  $\omega$  有关。

由式(10)可得出旋转点的半径表达式为:

$$r = \lambda f_d / 2\omega \quad (11)$$

式中:  $f_d$  为最大频偏。

$$f_r = -2\mu(\Delta R'_{1up} - \Delta R'_{1down})/c - 4r_1\omega_1 \cos(\omega_1 t_{mup} + \theta_1 + \varphi_1) \cos\varphi_1 / \lambda - 2\mu(\Delta R'_{2up} - \Delta R'_{2down})/c - 4r_2\omega_2 \cos(\omega_2 t_{mup} + \theta_2 + \varphi_2) \cos\varphi_2 / \lambda - 2\mu(\Delta R'_{1up} - \Delta R'_{2down})/c - 2(r_1\omega_1 \cos(\omega_1 t_{mup} + \theta_1) + r_2\omega_2 \cos(\omega_2 t_{mdown} + \theta_2))/\lambda - 2\mu(\Delta R'_{2up} - \Delta R'_{1down})/c - 2(r_2\omega_2 \cos(\omega_2 t_{mup} + \theta_2) + r_1\omega_1 \cos(\omega_1 t_{mdown} + \theta_1))/\lambda \quad (17)$$

通过以上关于STLFMCW旋转点微动特征分析,可以得出如下结论:

1)在频率-慢时间平面上,旋转点的微多普勒特征仍呈现正弦曲线特征,旋转点的运动周期与正弦曲线的运动周期相同,旋转点半径可以通过旋转半径来得到,其表达式为  $r = \lambda f_d / 2\omega$ ;

2)走动因子和展宽因子的存在将导致距离走动和展宽现象。

基于以上分析,同理可得2个旋转点STLFMCW上、下扫频段差频信号:

$$s_{12ifup} = s_{1ifup} + s_{2ifup} \quad (12)$$

$$s_{12ifdown} = s_{1ifdown} + s_{2ifdown} \quad (13)$$

式中:  $s_{1ifup}$ ,  $s_{1ifdown}$  分别表示第1个旋转点上、下扫频段差频信号;  $s_{2ifup}$ ,  $s_{2ifdown}$  分别表示第2个旋转点上、下扫频段差频信号。

现将正、负差频信号进行时域混频以抑制展宽现象:

$$s'_{12if} = s_{12ifup} s_{12ifdown} \quad (14)$$

其距离多普勒频率为:

$$f'_r = f'_1 + f'_2 + f'_3 + f'_4 \quad (15)$$

式中:  $f'_1 = -2\mu(\Delta R'_{1up} - \Delta R'_{1down})/c - \frac{4r_1\omega_1}{\lambda} \cos(\omega_1 t_{mup} + \theta_1 + \varphi_1) \cos\varphi_1 - \alpha_1$ ;  $f'_2 = -2\mu(\Delta R'_{2up} - \Delta R'_{2down})/c - \frac{4r_2\omega_2}{\lambda} \cos(\omega_2 t_{mup} + \theta_2 + \varphi_2) \cos\varphi_2 - \alpha_1$ ;  $f'_3 = -2\mu(\Delta R'_{1up} - \Delta R'_{2down})/c - 2(r_1\omega_1 \cos(\omega_1 t_{mup} + \theta_1) + r_2\omega_2 \cos(\omega_2 t_{mdown} + \theta_2))/\lambda - \alpha_1$ ;  $f'_4 = -2\mu(\Delta R'_{2up} - \Delta R'_{1down})/c - 2(r_2\omega_2 \cos(\omega_2 t_{mup} + \theta_2) + r_1\omega_1 \cos(\omega_1 t_{mdown} + \theta_1))/\lambda - \alpha_1$ ; 其中,  $\varphi_1 = \omega_1 T_p/2$ ,  $\varphi_2 = \omega_2 T_p/2$ ,  $\alpha_1 = \alpha_{1up} + \alpha_{1down}$ ;  $\alpha_{1up} = 4\pi(\alpha_{up} + \beta_{up}t_{mup})/\lambda$ ,  $\alpha_{1down} = 4\pi(\alpha_{down} + \beta_{down}t_{mdown})/\lambda$ 。

式(15)为经过展宽抑制后旋转点距离多普勒频率表达式。式中等号右边共包括4项,其中  $f'_1$ ,  $f'_2$  为旋转点微动特征项,表现为正弦调频信号特性,  $f'_3$ ,  $f'_4$  为展宽抑制时产生的交叉项,与微动特征项相比,表现为2个不同频率的正弦调频信号的耦合,因此呈现出非正弦调频的特点。 $\alpha_1$  为走动因子,是关于慢时间的函数,其会产生走动现象。

现对式(14)做如下处理以补偿距离走动:

$$s_{12if} = s'_{12if} \exp(j\alpha_1 t_k) \quad (16)$$

其距离多普勒频率为:

通过式(17)可以看出,经距离走动补偿后的信号,其微动特征项在频率-慢时间平面内呈现正弦曲线特征,交叉项仍表现为非正弦特性。

本文采用的扩展 Hough 变换可检测满足某种特定解析式的曲线,表现为非正弦特性的交叉项并不影响其参数提取。因此可利用扩展 Hough 变换来提取微多普勒信息。

整个 STLFMCW 微动特征分析与提取的流程见图 3。

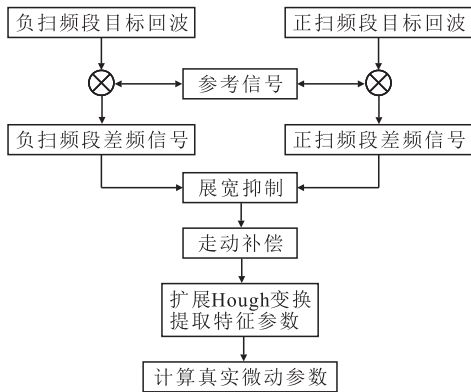


图 3 STLFMCW 微动特征分析与提取流程图

Fig.3 Flow chart of analysis and extraction of micro-motion features in STLFMCW radar

### 3 目标微动特征仿真实验

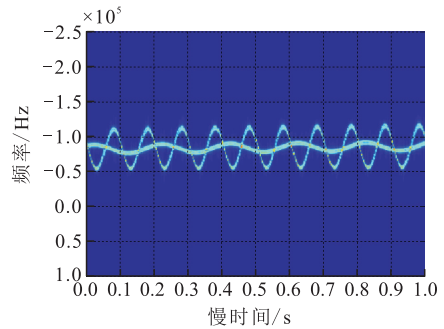
仿真采用图 2 所示模型,雷达位于原点  $o$  处,雷达发射 STLFMCW 信号,信号载频  $f_c = 10$  GHz,脉冲持续时间  $T_p = 3$  ms,带宽  $B = 500$  MHz。目标中心坐标初始位置为  $(-0.5, 15)$  km,目标主体运动速度为 1 500 m/s,运动方向与  $x$  轴正方向夹角为  $45^\circ$ 。

旋转点旋转半径分别为 6 m、2 m,旋转频率分别为 10 Hz、5 Hz,初始相位都为  $90^\circ$ ,旋转中心在目标坐标系的位置为  $(-5, 5)$  m。

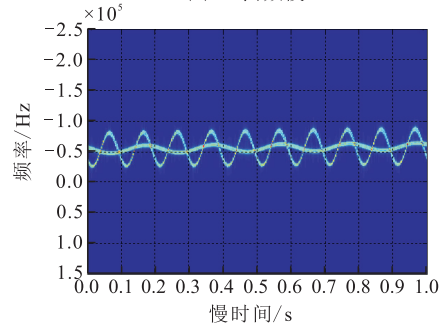
图 4 为正、负扫频段旋转点微多普勒曲线,从图 4 中可以看出,2 个旋转点的微多普勒曲线在正、负扫频段内互不影响,且表现为正弦特性,但都存在展宽和走动现象。

图 5 为展宽消除后旋转点微多普勒曲线,图中共 4 条曲线,其中曲线 3、4 的振幅随着时间会发生变化,表现为非正弦特性,其由交叉项产生。曲线 1、2 为旋转点微多普勒曲线。图 5 与图 4 的对比发现,经过正、负差频信号混频,其展宽效应已得到抑制,但仍存在走动现象,且有交叉项产生。

图 6 为展宽消除、距离走动补偿后旋转点微多普勒曲线,与图 5 相比,经过距离走动补偿后,其走动现象已得到改善。



(a) 正扫频段



(b) 负扫频段

图 4 正、负扫频段旋转点微多普勒曲线

Fig.4 Micro-Doppler curve of rotating targets in up and down frequency modulation signal

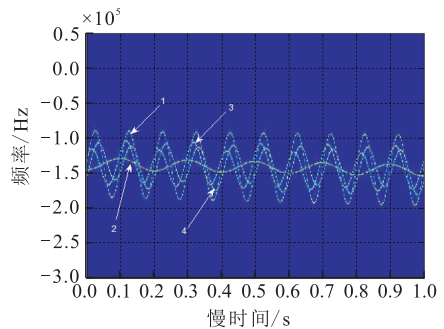


图 5 展宽消除后旋转点微多普勒曲线

Fig.5 Micro-Doppler curve of rotating targets after removing the main lobe widening

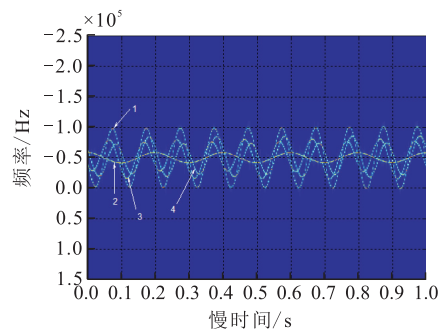


图 6 展宽消除、距离走动补偿后旋转点微多普勒曲线

Fig.6 Micro-Doppler curve of rotating targets after removing the main lobe widening and deviation of the range profile

应用扩展 Hough 变换对图 6 进行微动特征信息提取,提取参数见表 1。

表1 扩展 Hough 变换提取正弦曲线参数

Tab.1 Parameters of sine curve are extracted by Hough transform

参数/单位	1	2	3	4	5
$f_d/\text{Hz}$	$7.9 \times 10^3$	$8.0 \times 10^3$	$4.9 \times 10^4$	$7.9 \times 10^3$	$5.0 \times 10^4$
$\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	31.797 5	31.800 0	62.643 9	31.797 5	62.710 0

由表1中的数据可以判定有2个旋转频率不同的点,旋转频率分别为5.06 Hz,9.97 Hz。

通过式(11)计算得出旋转点的真实半径 $r$ ,见表2。

表2 由检测参数计算得旋转点真实半径

Tab.2 Radius of rotating targets by the parameters

半径/m	1	2	3	4	5	均值
$r_1$	1.863 4	1.886 8		1.863 4		1.871 2
$r_2$		5.866 5		5.979 9		5.923 2

对计算得到的各个旋转点的半径求均值得到2个旋转点的真实半径分别为1.87 m和5.92 m,与理论值相当接近。通过以上分析可以看出,正、负差频信号混频可抑制展宽现象,但会带来交叉项的问题,通过误差因子补偿可消除距离走动,由混频产生的交叉项表现为非正弦特性,并不影响扩展 Hough 变换对微动参数的提取。

## 4 结语

本文通过对微动目标回波信号的分析,得出了影响旋转点一维距离像展宽和走动的相位因子。针对展宽和走动现象,提出了一种基于正、负调频信号的微多普勒展宽抑制的方法,并对距离走动进行补偿。最后的仿真实验验证了理论推导的正确性,为以后 STLFMCW 技术应用于微动特征分析提供了参考。

## 参考文献(References):

- [1] 丁鹭飞,耿富录,陈建春.雷达原理[M].北京:电子工业出版社,2009.  
DING Lufei, GENG Fulu, CHEN Jianchun. Radar Principle [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [2] 徐艺萌,管桦,罗迎,等.含旋转部件目标稀疏孔径 ISAR 成像方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2013,14(4): 57-61.  
XU Yimeng, GUAN Hua, LUO Ying, et al. Sparse-Aperture ISAR Imaging for Target with Rotating Parts[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013,14(4): 57-61. (in Chinese)

- [3] Chen V C, Li F Y, S-S Ho, et al. Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model and Simulation Study [J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(1): 2-21.
- [4] 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, HE Jin. Review of Researches on Micro-Doppler Effect of Radar Targets[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2011, 12(2): 22-26. (in Chinese)
- [5] 梁毅,郭亮,邢孟道,等.一种斜视 FMCW SAR 的等效正侧视处理方法[J].电子学报,2009, 37(6): 1159-1164.  
LIANG Yi, GUO Liang, XING Mengdao, et al. An Equivalent Side-Looking Method for Squint FMCW SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(6): 1159-1164. (in Chinese)
- [6] Giusti E, Martorella M. Range Doppler and Image Autofocusing for FMCW Inverse Synthetic Aperture Radar [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 2087-2823.
- [7] 贾高伟,常文革.调频连续波 SAR 实时成像算法研究[J].电子与信息学报,2013, 35(10): 2453-2459.  
JIA Gaowei, CHANG Wenge. Study on the Real Time Imaging Algorithm for Frequency Modulated Continuous Wave Synthetic Aperture Radar [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(10): 2453-2459. (in Chinese)
- [8] 梁毅,周峰,邢孟道,等.采用调频连续波的高速动目标检测方法[J].西安电子科技大学学报,2008, 35(4): 586-591.  
LIANG Yi, ZHOU Feng, XING Mengdao, et al. High Speed Ground Moving Target Detection Research Using triangular FMCW modulation [J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(4): 586-591. (in Chinese)
- [9] Eugin Hyun, Woo-Jin Oh, Jong-Hun Lee. Multi-Target Detection Algorithm for Automotive FMCW Radar [C]//SPIE Defense, Security and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2012: 83611E-83611E-6.
- [10] 保铮,邢孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2005.  
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar Imaging Technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [11] 韩冰,梁兴东,丁赤飏.超高分辨率机载聚束 FMCW SAR 成像方法研究 [J].系统仿真学报,2009, 21(18): 5861-5873.  
HAN Bing, LIANG Xingdong, DING Chibiao. Imaging Algorithm for Ultra-high Resolution Airborne Spotlight FMCW SAR [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(18): 5861-5873. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)