

双基 FMCW 宽带雷达微多普勒 特征分析与误差因子补偿

刘奇勇¹, 张群¹, 李晓辉², 梁颖¹, 罗迎¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077; 2. 94789 部队, 江苏南京, 210000)

摘要 对双基调频连续波(FMCW)宽带雷达旋转目标的微多普勒效应进行了研究。首先建立了双基 FMCW 宽带雷达中的旋转目标模型, 推导得出了旋转目标的微多普勒效应表达式, 并通过分析目标脉内微动对一维距离像的影响, 得出了一次误差项会引起一维距离像的走动和峰值偏移、二次误差项会引起一维距离像的展宽、同时双基角也会对目标微多普勒特征曲线的最大频偏产生调制等结论。在此基础上, 进一步提出了利用最小熵准则对误差因子进行补偿的方法。仿真分析表明: 该方法能够较精确地估计二次误差项的系数, 有效地补偿目标微多普勒效应的误差因子, 并具有良好的抗噪性能。

关键词 调频连续波; 宽带雷达; 微多普勒; 最小熵准则

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.04.012

中图分类号 TN958.94 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)04-0046-05

A Micro-Doppler Feature Analysis and Error Factor Compensation in Bistatic FMCW Wideband Radar

LIU Qi-yong¹, ZHANG Qun¹, LI Xiao-hui², LIANG Ying¹, LUO Ying¹

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Unit 94789, Nanjing 210000, China)

Abstract: The micro-Doppler effect of rotating target is studied in bistatic frequency modulation continuous wave (FMCW) wideband radar in this paper. Firstly, the model of rotating target is established in bistatic FMCW wideband radar, and the expression of micro-Doppler effect is derived. Then, the conclusion is deduced from the previous that the primary error term causes one-dimensional range profile walk and peak deviation, and the quadratic error term causes the one-dimensional range profile widening, also the maximum of frequency deviation in micro-Doppler feature curve is modulated by the bistatic angle according to the analysis of the influence caused by micro-motion during the pulse repetition interval (PRI) on one-dimensional range profile. Finally, the error factor compensation approach based on minimum entropy principle is proposed. The simulation analysis indicates that the use of the method can estimate the coefficient of the quadratic error term in precision and can compensate the error factor of the micro-Doppler effect effectively and is good in anti-noise performance.

Key words: frequency modulation continuous wave (FMCW); wideband radar; micro-Doppler; minimum

收稿日期: 2014-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172169; 61201369); 陕西省自然科学基金资助项目(2013JQ8008)

作者简介: 刘奇勇(1990-), 男, 湖南邵阳人, 硕士生, 主要从事雷达成像与目标识别研究. E-mail: lqyong0501@163.com

引用格式: 刘奇勇, 张群, 李晓辉, 等. 双基 FMCW 宽带雷达微多普勒特征分析与误差因子补偿 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(4): 46-50. LIU Qiyong, ZHANG Qun, LI Xiaohui, et al. A micro-Doppler feature analysis and error factor compensation in bistatic FMCW wideband radar [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(4): 46-50.

entropy principle

调频连续波(FMCW)双基地宽带雷达不仅具有调频连续波的优势^[1],同时具有双基地宽带雷达的优势^[2]。因为双基 FMCW 宽带雷达采用收、发分置的结构,避免了单基 FMCW 宽带雷达中存在收发天线隔离困难的问题,使得双基 FMCW 宽带雷达在避免收、发雷达干扰方面具有其天然的优势^[3]。文献[4]研究了双基调频连续波 ISAR 的误差补偿方法,提出利用组合参量进行补偿,得到目标的二维像。

微动的概念由美国海军研究实验室的 Victor C. Chen 在 2000 年首先提出^[5]。微动会对雷达的回波信号产生调制,使雷达回波附带有目标的微动信息,同时,由于不同目标的微动特征不同,不同的微动特征会对雷达回波产生不同的调制效果。所以,可以通过对目标的回波进行分析,得到其微多普勒效应及其微动特征,进而对目标进行分辨^[1,6]。

因此,将双基 FMCW 宽带雷达与微多普勒技术结合起来分辨目标对目标的探测与识别具有重要意义。但是,因为 FMCW 的脉冲持续时间较长,不能再采用传统脉冲式雷达的“走-停”模式^[7]。文献[8]注意到了这一问题,并研究了单基 FMCW-ISAR 中微多普勒效应。但是,在双基宽带雷达系统中,目标的微多普勒效应还受双基角的影响^[9,10]。

本文通过对双基 FMCW 宽带雷达中旋转目标的回波信号进行详细分析推导,提出利用最小熵准则实现了对误差项的补偿。最后通过试验仿真,验证了文中理论分析的正确性以及误差补偿方法的有效性。

1 目标和信号模型建立

在双基地平面内,建立 2 个坐标系 X-Y 和 x-y,并且两坐标系平行,XTY 为本地坐标系,xOy 为目标坐标系,见图 1。本地坐标系 XTY 以发射雷达 T 为原点,收、发雷达线为 X 轴,其中基线长度(收、发雷达的距离)为 L,所以接收雷达 R 的坐标为 $(x_R, y_R) = (L, 0)$ 。在目标坐标系 xOy 中,设参考点 O 为目标中心,O 点在本地坐标系中的坐标为 (x_0, y_0) ;Q 点在本地坐标系 XTY 中的坐标为 (x_q, y_q) 。 α_T, α_R 为旋转中心到发、收雷达的视角。假设旋转点为 P,旋转点 P 以角速度 ω 绕旋转中心 Q 旋转,旋转半径为 r,初始相位为 θ ,以速度 v 沿与 x 轴正方向夹角为 φ 的方向做匀速运动。经过时间 t 后,旋转中心 Q 运动到 Q' 点,参考点 O 运动到 O'

点,旋转点 P 运动到 P' 点。

假设雷达发射的 FMCW 信号为锯齿波,发射的信号见图 2。发射信号表达式为:

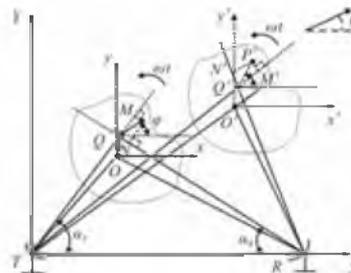


图 1 目标运动模型

Fig.1 Motion model of the target

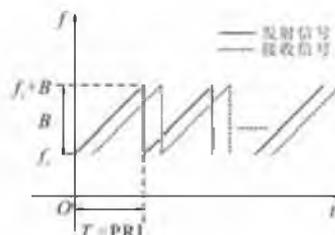


图 2 信号模型

Fig.2 The signal model

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

式中: $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数; f_c 为载频; μ 为信号的调频斜率; T_p 为脉冲持续时间; PRI 为脉冲重复周期,则 $\text{PRI} = T_p$; 带宽 $B = \mu T_p$; t_k 为快时间; t_m 为慢时间; t 为全时间^[11]。

由于 FMCW 信号的脉冲持续时间较长,必须考虑脉冲持续时间内目标与雷达之间的径向距离变化对回波信号的影响。因此,旋转中心到发射雷达和接受雷达的距离 $R_{QT}(t_k, t_m)$ 、 $R_{QR}(t_k, t_m)$ 通过在 $t_k = 0$ 处做一阶泰勒级数展开,可以近似为:

$$R_{QT}(t_k, t_m) \approx R_{QT}(t_m) + \alpha_1 t_k + \beta_1 t_m t_k \quad (2)$$

$$R_{QR}(t_k, t_m) \approx R_{QR}(t_m) + \alpha_2 t_k + \beta_2 t_m t_k \quad (3)$$

在远场条件下,由于微动点的距离变化是微小的变化量,旋转点 P 到发射雷达 T 的距离可以近似为 |PT| 在 QT 上的投影距离 |MT|,旋转点 P 到接受雷达 R 的距离可以近似为 |PR| 在 QR 上的投影距离 |NR|。同时,认为旋转点相对于旋转中心的速度可近似为关于慢时间 t_m 的函数。在相干累积成像时间比较短时,可以将发射角 α_T 、接收角 α_R 视为常数。假设 $v_T(t_m)$ 为旋转点相对于发射雷达在脉内时间的径向速度, $v_R(t_m)$ 为旋转点相对于接收雷达在脉内时间的径向速度, $R_{QM}(t_k, t_m)$ 、 $R_{QN}(t_k, t_m)$ 分别为:

$$R_{QM}(t_k, t_m) \approx r \cos(\omega t_m + \theta - \alpha_T) + v_T(t_m) t_k \quad (4)$$

$$R_{QN}(t_k, t_m) \approx -r \cos(\omega t_m + \theta - \alpha_R) + v_R(t_m) t_k \quad (5)$$

式中: $v_T(t_m) = -r\omega \sin(\omega t_m + \theta - \alpha_T)$, $v_R(t_m) t_k = r\omega \sin(\omega t_m + \theta - \alpha_R)$ 。则:

$$R_{QM}(t_k, t_m) + R_{QN}(t_k, t_m) = \alpha_3 - \beta_3 t_k \quad (6)$$

式中: $\alpha_3 = 2r \sin(\omega t_m + \theta + \frac{\alpha_R - \alpha_T}{2}) \sin(\frac{\alpha_R + \alpha_T}{2})$; $\beta_3 = 2r\omega \cos(\omega t_m + \theta + \frac{\alpha_R - \alpha_T}{2}) \sin(\frac{\alpha_R + \alpha_T}{2})$ 。

因此, 旋转点到发射机和接收机的总的距离 $R_P(t_k, t_m)$ 可以表示为:

$$R_P(t_k, t_m) \approx R_{TM}(t_k, t_m) + R_{RN}(t_k, t_m) = R_Q(t_m) + (\alpha_1 + \alpha_2) t_k + (\beta_1 + \beta_2) t_m t_k + \alpha_3 - \beta_3 t_k \quad (7)$$

式中 $R_Q(t_m) = R_{TQ}(t_m) + R_{RQ}(t_m)$ 。

参考点到发射机和接收机的距离 $R_{OT}(t_m)$ 、 $R_{OR}(t_m)$ 分别为:

$$R_{OT}(t_m) = \sqrt{(x_O + v_x t_m)^2 + (y_O + v_y t_m)^2} \quad (8)$$

$$R_{OR}(t_m) = \sqrt{(x_O - x_R + v_x t_m)^2 + (y_O + v_y t_m)^2} \quad (9)$$

则总的参考距离为:

$$R_{ref}(t_m) = R_{OT}(t_m) + R_{OR}(t_m) \quad (10)$$

2 微多普勒特征分析

用参考信号对雷达回波信号解调, 作 Dechirp 处理, 得到差频信号, 则差频信号可以表示为:

$$s(t_k, t_m) = \text{rect}((t_k - \tau_i)/T_P) \exp(-j2\pi/\lambda R_\Delta) \exp(-j2\pi\mu/c(t_k - R_{ref}/c)R_\Delta) \exp(j2\pi\mu/c^2 R_\Delta^2) \quad (11)$$

式中: $\tau_i = R_i(t_k, t_m)/c$ 为第 i 个旋转点的回波延时; $\tau_{ref} = R_{ref}(t_m)/c$ 为参考点的回波时间延时; $R_\Delta = R_P(t_k, t_m) - R_{ref}(t_m) = R'_\Delta + \alpha_3 + (\alpha - \beta_3) t_k$, 且 $R'_\Delta = R_Q(t_m) - R_{ref}(t_m)$, $\alpha = [(\alpha_1 + \alpha_2) + (\beta_1 + \beta_2) t_m]$; $\lambda = c/f_c$ 为信号的波长。 $s(t_k, t_m)$ 中, 第 3 个指数项的相位一般忽略该因子对相位的影响。因此 $s(t_k, t_m)$ 可以化为:

$$s(t_k, t_m) \approx \text{rect}((t_k - \tau_i)/T_P) \exp(-j2\pi/\lambda R'_\Delta) \exp(-j2\pi\mu/c R'_\Delta t_k) \exp(-j2\pi(\mu/c\alpha_3 - 1/\lambda\beta_3) t_k) \exp(-j2\pi\alpha/\lambda t_k) \exp(-j2\pi\mu(\alpha - \beta_3)/c t_k^2) \exp(-j2\pi/\lambda\alpha_3) \quad (12)$$

式中相位项中的第 4 项为一次误差项; 系数 $a_1 = 2\pi\alpha/\lambda$; 第 5 项为二次误差项; 系数 $a_2 = 2\pi\mu(\alpha - \beta_3)/c$ 。在近似条件下, a_1 与 a_2 成比例关系。将式 (12) 中的相位对快时间 t_k 求导数并除以 2π , 得到距离多普勒频率:

$$f_D = -\mu/c R'_\Delta - D \sin(\omega t_m + (\alpha_R - \alpha_T)/2 - \varphi) - 1/\lambda\alpha - 2\mu/c(\alpha - \beta_3) t_k \quad (13)$$

式中: $D = \sqrt{A^2 + B^2} \sin((\alpha_R + \alpha_T)/2)$; $A = 2r\mu/c$; $B = 2r\omega/\lambda$; $\varphi = \arctan(B/A) - \theta$ 。

从上式可以看出, 式中第 1 项表示旋转中心到接收机、发射机的距离与参考点到接收机、发射机的距离差, 第 2 项表征了旋转点的微多普勒仍然呈现为正弦曲线的特征。但与单基 FMCW 宽带雷达不同的是, 双基 FMCW 宽带雷达的微多普勒特征曲线的最大频偏 D 其相位信息还与双基角有关。第 3 项和第 4 项是考虑了目标在单次脉冲持续时间内目标连续运动对回波信号调制所产生的误差因子。第 3 项会导致目标在距离-慢时间平面内的一维距离像峰值出现偏移, 同时会导致一维距离像在整个距离-慢时间平面内出现走动现象。第 4 项是关于快时间 t_k 的一次函数, 其会导致目标的一维距离像在整个距离-慢时间平面内出现展宽现象。

3 基于最小熵准则的补偿算法

文献[11]引入熵的概念进行 ISAR 成像的运动补偿, 得出波形熵值的分布可以表示波形的锐化度, 文献[12]则利用最小熵准则估计目标的径向速度, 本文通过最小熵准则直接估计二次误差项的系数, 再依据一次误差项系数和二次误差项系数的比例关系, 得到一次误差项的系数, 进而实现对误差的完全补偿。

因为二次误差项会引起一维距离像的展宽, 从而使得波形的熵值变大。所以对二次误差项补偿后, 波形会变尖锐, 熵值会变小。设回波的一维距离向量为 $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_N]$, 将该距离向量归一化, 则归一化后各单元的值为: $p_i = |p_i| / \sum_{j=1}^N |p_j|$, ($i = 1, 2, \dots, N$), 并且 $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ 。则 p_i 有类似于概率的性质, 因此它的熵值可以表示为^[11]:

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \ln p_i \quad (14)$$

则经过二次系数补偿后的回波可表示为:

$$s_2(t_k, t_m) = s(t_k, t_m) \exp(j\varphi(m) t_k^2) \quad (15)$$

式中: $s_2(t_k, t_m)$ 为补偿掉二次误差项后的差频信号, $\varphi(m)$ 为二次误差项的补偿系数;

通过求 $s_2(t_k, t_m)$ 的快时间傅里叶变换, 得到一维距离像并计算一维距离像的熵, 使一维距离像的熵最小的 $\varphi(m)$ 即为所求的补偿系数。

本文通过遍历法搜索使一维距离像的熵最小的补偿系数, 步骤如下:

步骤 1 设定系数的遍历范围 ($\varphi_{\min}, \varphi_{\max}$), 步进值为 φ_{step} ;

步骤 2 计算系数 $\varphi_i = \varphi_{\min} + (i-1)\varphi_{\text{step}}$, ($i = 1, 2, \dots, \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{\varphi_{\text{step}}}$) 补偿后的一维距离像的熵 H_i ;

步骤 3 计算 H_i 中的最小值 H_{\min} , 并得到对应的 i , 最小熵所对应的补偿系数即为要求的系数

$\hat{\varphi}$, 则 $\hat{\varphi} = \varphi_{\min} + (i-1)\varphi_{\text{step}}$;

再根据二次误差项系数与一次误差项系数的比例关系, 得到一次误差项的系数 $\hat{\gamma} = \frac{c}{\lambda\mu} \hat{\varphi}$; 则对一次误差项进行补偿后的信号 $s_1(t_k, t_m)$ 和完全补偿后的信号 $s_{12}(t_k, t_m)$ 可以分别表示为:

$$s_1(t_k, t_m) = s(t_k, t_m) \exp(j\hat{\gamma}t_k) \quad (16)$$

$$s_{12}(t_k, t_m) = s(t_k, t_m) \exp(j\hat{\gamma}t_k) \exp(j\hat{\varphi}t_k^2) \quad (17)$$

4 仿真及结果分析

仿真采用模型见图 1, $L=10$ km, 假设发射的是 FMCW 信号, 信号载频 $f_c=10$ GHz, 脉冲持续时间 $T_p=2$ ms, 带宽为 $B=500$ MHz。目标中心的初始坐标为 $(0, 50)$ km, 目标主体飞行速度为 2 km/s, 沿与 x 轴正方向呈 $\pi/3$ 的角度飞行。2 个旋转点的半径均为 3 m, 旋转频率分别为 10π rad/s、 20π rad/s, 初始相位分别为 $\pi/2$ 、 $\pi/4$, 旋转中心在目标坐标系中的坐标为 $(5, 2)$ m。

首先对最小熵准则补偿得到的参数进行误差估计, 仿真结果见图 3。

图 3 为估计第 200 个脉冲的二次相位项的系数得到的误差曲线。可以看出, 在信噪比为 -10 dB 到 10 dB 之间时, 估计得到的二次相位项的系数 $\hat{\varphi}$ 的归一化偏差和归一化方差都很小, 都小于 -25 dB, 表明估计得到的二次相位项的系数与真实值很接近, 能够用估计值代替真实值进行相关的运算。

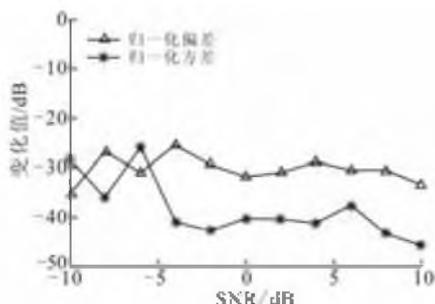


图3 归一化偏差与归一化方差信噪比变化曲线

Fig.3 The snr vary curve of normalization deviation and normalization variance

在基线长度 $L=10$ km 时, 利用最小熵准则, 对旋转点的微多普勒的一次相位误差和二次相位误差分别进行补偿, 图 4 给出了补偿前、后旋转点的微多普勒特征曲线。由图 4 可知, 旋转点的微多普勒特征曲线呈正弦形式。由图 4(a)、(b)可知, 一次误差项会导致目标的一维距离像的频率峰值发生偏移, 并在整个距离-慢时间域上产生走动, 这是因为一次误差项是慢时间的函数。由图 4(a)、(c)可知, 二次误差项会导致目标的一维距离像在整个距离慢时间

域出现展宽现象, 这是因为二次误差项是快时间的函数, 由图 4(a)、(d)可知, 旋转点的微多普勒特征曲线的最大距离偏移与旋转频率有关, 旋转频率越大, 最大距离偏移越大; 同时, 旋转点的微多普勒特征曲线的周期也与旋转频率有关, 旋转频率越大, 周期越小; 并且, 利用最小熵准则能够对旋转目标的微多普勒的误差因子进行有效的补偿。

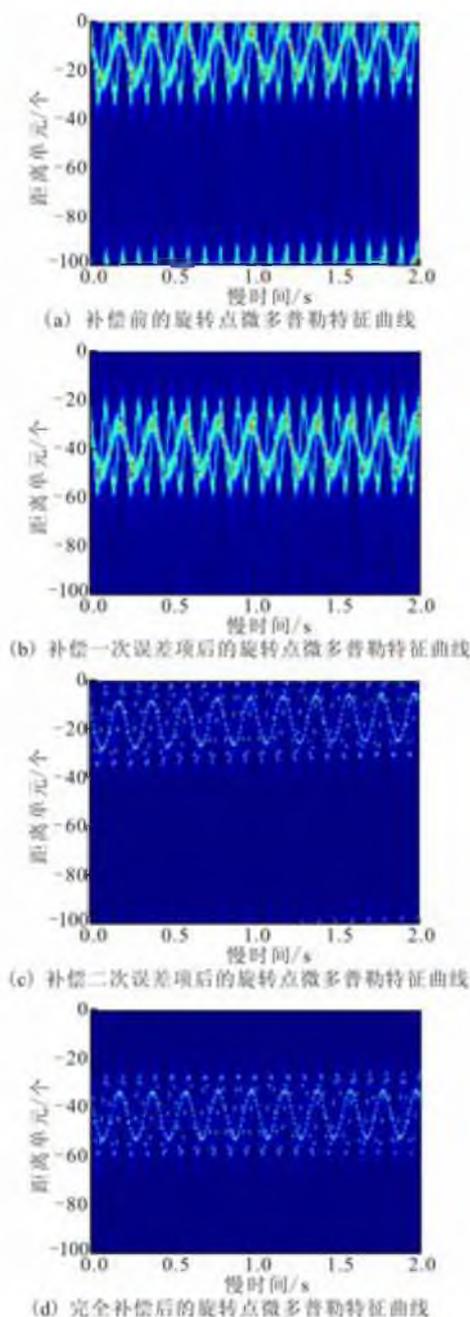


图4 微多普勒特征曲线

Fig.4 The analysis and error compensation of the micro-Doppler

目标在双基 FMCW 宽带雷达中的最大频偏不仅与目标的旋转半径和旋转频率有关, 还与双基角有关, 图 5 是在双基角改变时, 经过完全补偿后得到的目标的微多普勒特征曲线。

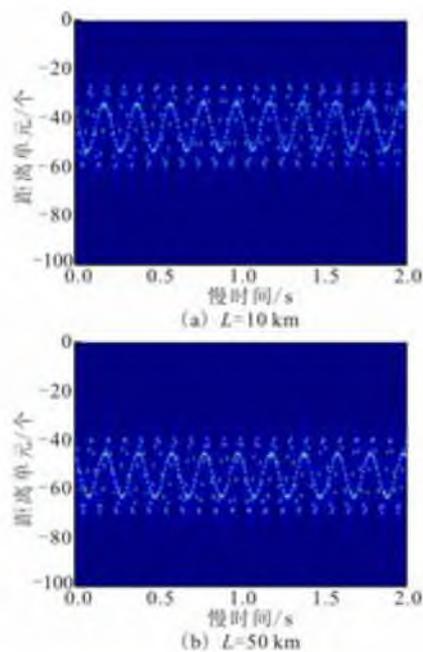


图5 微多普勒特征曲线与双基角的关系

Fig.5 The relation of micro-Doppler feature curve and bistatic angle

表1 双基角与最大距离偏移值的关系

Tab.1 The relation of bistatic angle and maximum of range deviation

基线长度/km	10	50
最大距离偏移值(单元/个)	32.35	29.66

从仿真结果可看出,在散射点的旋转频率和旋转半径固定时,改变模型的双基角,目标微动特征曲线的最大距离偏移会发生变化;并且,随着双基角的变大,最大距离偏移会变小。同时,当旋转点的旋转半径相同,而旋转频率不同时,得到的微动特征曲线的最大距离偏移也不同,即旋转点的微多普勒特征曲线的最大距离偏移与旋转点的旋转频率有关。这是因为呈正弦形式的微多普勒特征曲线的幅值因子不仅与双基角有关,还与旋转频率和旋转半径有关。

5 结语

本文通过对双基 FMCW 宽带雷达目标微多普勒进行了详细的分析,得到了影响旋转点一维距离像展宽、走动和峰值频率偏移的相位因子,并利用最小熵法则实现了对误差的补偿。最后,通过实验仿真验证了论文理论分析的准确性和误差补偿方法的有效性。

参考文献(References):

[1] 梁毅,王虹现,邢孟道,等. 调频连续波 SAR 慢速运动目标参数估计与成像[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(5): 1001-1006.
LIANG Yi, WANG Hongxian, XING Mengdao, et al. Slow ground moving target parameter estimation and imaging in FMCW SAR [J]. Systems engineering and electronics, 2011, 33(5): 1001-1006. (in Chinese)

[2] 高昭昭, 梁毅, 邢孟道, 等. 双基地逆合成孔径雷达成像分析[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(5): 1055-1059.
GAO Zhaozhao, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. Analysis of ISAR imagery for bistatic radar [J]. Systems engineering and electronics, 2009, 31(5): 1055-1059. (in Chinese)

[3] 秦国栋, 陈伯孝, 杨明磊, 等. 双基地多载频 FMCW 雷达目标加速度和速度估计方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 794-798.
QIN Guodong, CHEN Baixiao, YANG Minglei, et al. Acceleration and velocity estimation of targets in bistatic multi-frequency FMCW radar [J]. Journal of electronics & information technology, 2009, 31(4): 794-798. (in Chinese)

[4] 朱仁飞, 朱小鹏, 张群. 基于调频连续波信号的双基地 ISAR 成像研究[J]. 宇航学报, 2012, 33(2): 222-227.
ZHU Renfei, ZHU Xiaopeng, ZHANG Qun. Imaging study on bistatic ISAR based on frequency modulation continuous wave [J]. Journal of astronautics, 2012, 33(2): 222-227. (in Chinese)

[5] Chen V C, Li F Y, 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.

[6] Chen V C. Analysis of radar micro-Doppler signature with time-frequency transform[C]//Proc of the 10th IEEE workshop on statistical signal and array processing. Pocono Manor, PA: IEEE press, 2000. 463-466.

[7] 张大伟, 魏芳, 王岩飞. 多普勒效应对 FMCW-SAR 系统成像性能的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(3): 559-563.
ZHANG Dawei, WEI Fang, WANG Yanfei. Analysis of the Doppler effect in FMCW-ISAR and its influence on the Image of the system [J]. Journal of electronics & information technology, 2008, 30(3): 559-563. (in Chinese)

[8] 梁颖, 田韵, 张群, 等. 基于多项相位变换的 FMCW-ISAR 微多普勒特征提取方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(2): 74-78.
LIANG Ying, TIAN Yun, ZHANG Qun, et al. An extracting method of micro-Doppler features in FMCW-ISAR based on polynomial phase transform [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(2): 74-78. (in Chinese)

[9] 张亚标, 朱振波, 汤子跃, 等. 双站逆合成孔径雷达成像理论研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 969-972.
ZHANG Yabiao, ZHU Zhenbo, TANG Ziyue, et al. Bistatic inverse synthetic aperture radar image formation [J]. Journal of electronics & information technology, 2006, 28(6): 969-972. (in Chinese)

[10] 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 Zhaowen, LIU Yongxiang, LI Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion [J]. Acta electronica sinica, 2007, 35(3): 520-525. (in Chinese)

[11] 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. The radar imaging technology[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2005. (in Chinese)

[12] 杨剑, 许人灿, 鲍庆龙, 等. 基于熵最小准则的 ISAR 成像高速运动补偿实现方法[J]. 信号处理, 2009, 25(12): 1861-1866.
YANG Jian, XU Rencan, BAO Qinglong, et al. The implemental methods of high velocity compensation in ISAR imaging based on entropy minimization [J]. Signal processing, 2009, 25(12): 1861-1866. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)