

文章编号:1004-9037(2012)05-0535-06

# 一种改进型全局最小熵 ISAR 距离对准算法

俞 翔 朱岱寅

(南京航空航天大学电子信息工程学院,南京,210016)

**摘要:**在研究全局最小熵距离对准算法的基础上,结合了亚距离单元对准方法,并通过分析回波相关性对原算法的影响,提出了一种改进型全局最小熵算法。该算法可分为距离像分块对准和亚距离单元对准两部分。本文通过对回波相关性的分析,利用距离像分块对准改善了原算法距离对准的准确性;并通过亚距离单元对准提高了原算法距离对准的精度。实测数据处理结果表明,改进型算法具有较高的距离对准精度,从而提高了成像质量。

**关键词:**距离对准;亚距离单元;分块;对准精度

中图分类号:TN958

文献标识码:A

## Improved Global Minimum Entropy Range Alignment Algorithm for ISAR

Yu Xiang, Zhu Daiyin

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Range alignment is a key procedure in inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging. Based on the global minimum entropy range alignment algorithm, an improved range alignment algorithm is proposed according to the subinteger range-bin method by analyzing the influence of correlation between echoes on the original algorithm. Range profile blocking scheme and subinteger range-bin alignment method are applied to the proposed algorithm. Range profile blocking scheme and subinteger range-bin alignment method improve the accuracy and the precision of the original algorithm, respectively. The real data processing result shows that the algorithm improves the accuracy of range alignment and hence improves the imaging quality of ISAR.

**Key words:** range alignment; subinteger range-bin; blocking; alignment accuracy

## 引 言

逆合成孔径雷达(Inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像是一种利用非合作目标与雷达之间相对运动产生的多普勒频率差异对目标分辨的成像技术。通常雷达与被探测目标之间的相对运动可分解为平动和转动分量,其中只有转动分量对目标像的重建起作用,而平动分量对成像是有利的,因此通常在成像之前需要对目标距离像做运动补偿以去除平动分量。运动补偿算法将直接影响最

终成像的质量。

运动补偿过程可分为距离对准和相位补偿两个部分,本文主要讨论距离对准。距离对准作为相位补偿和成像的基础,目的是将回波距离像对准。现有的距离对准方法主要可以分为距离像互相关对准和全局对准两类。前者典型的算法有:相邻包络互相关法<sup>[1]</sup>、时域和频域积累互相关法<sup>[2]</sup>、包络最大修正峰度法<sup>[3]</sup>等。这类算法较依赖于距离像之间的相关性,因此在距离像相关性不强的情况下对准效果不理想。而全局对准类算法一般是以某种全局准则作为对准依据,通过迭代的方法使某个性能

**基金项目:**国家自然科学基金(61071165)资助项目;国防基础科研计划(B2520110008)资助项目;教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0069)资助项目;航空科学基金(20102052024)资助项目。

**收稿日期:**2011-09-13;**修订日期:**2011-11-15

指标达到最优,例如全局对准算法<sup>[4]</sup>、全局最小熵算法<sup>[5]</sup>等。这类算法对脉冲样本之间的相关性要求不高,同时可以较好地抑制突跳和漂移误差,尤其当遇到回波有间断或回波突变的情况时该类方法较前者具有更好的鲁棒性,但设计该类算法时如何避免落入局部极值是必须要考虑的问题。文献[5]是一种新近提出的全局类算法,该算法除了具备以上介绍的优点外,由于算法迭代过程中使用了高效的搜索估值方法从而避免了局部极值问题。

随着对 ISAR 成像分辨率要求的不断提高,非合作目标高分辨率成像逐渐成为一个重要的研究方向。对于 ISAR 成像来说,分辨率的提高意味着需要更大的积累角和更长的孔径时间,同时要求距离对准算法具有更好的精度和鲁棒性。全局最小熵算法是一种鲁棒性较强的距离对准算法,但该算法的距离对准精度仍然限制在一个距离单元,且算法的收敛速度和准确性间接受到距离像相关性的限制。

为了提高成像分辨率,本文提出了一种基于全局最小熵的改进型距离对准算法,该算法结合了亚距离单元对准方法提高了对准精度;对距离像分块以提高块内回波相关特性的方法提高了算法效率和准确性。实测数据的处理结果证明,改进型算法可以较好地解决距离对准精度和准确性问题,从而有效地提高了成像质量。

## 1 全局最小熵算法

全局最小熵算法<sup>[5]</sup>以平均距离像(Average range profile, ARP)熵值作为距离对准的依据,ARP 定义为所有脉冲的和包络

$$p_{\text{ave}}(r, \Delta_r) = \sum_{n=1}^N p(r + \Delta_r(n), n) \quad (1)$$

式中:  $p(r, n)$  为距离向压缩过的脉冲包络,  $r$  为沿雷达视线方向目标到雷达的距离,  $n$  为脉冲数,  $\Delta_r(n)$  为脉冲包络的偏移量。

那么 ARP 的熵值可以定义为

$$E(\Delta_r) = - \int_r \frac{p_{\text{ave}}(r)}{S} \cdot \ln \frac{p_{\text{ave}}(r)}{S} dr \quad (2)$$

$$S = \int_r p_{\text{ave}}(r) dr$$

为了获得  $E(\Delta_r)$  的极值,对式(2)求导,可得

$$\frac{\partial E}{\partial \Delta_r(n)} = 0 \quad n = 1, \dots, N \quad (3)$$

令  $\tilde{p}_{\text{ave}}(r) = \ln p_{\text{ave}}(r)$ , 则有

$$\int_{f_r} j2\pi f_r P(f_r, n) \tilde{P}_{\text{ave}}^*(f_r) \cdot e^{j2\pi f_r \Delta_r(n)} df_r = 0 \quad (4)$$

式中  $P(f_r, n)$  和  $\tilde{P}_{\text{ave}}(f_r)$  分别为对应于  $p(r, n)$  和  $\ln p_{\text{ave}}(r)$  的距离向傅氏变换。对式(4)进一步分析发现,  $P(f_r, n)$  与  $\tilde{P}_{\text{ave}}(f_r)$  频域乘积即为两者在时域的卷积,只有该卷积影响最终的估值

$$\left. \frac{d[p(r, n) \otimes \tilde{p}_{\text{ave}}(-r)]}{dr} \right|_{r=\Delta_r(n)} = 0 \quad n = 1, \dots, N \quad (5)$$

由式(5)可知,通过迭代求解  $\tilde{p}_{\text{ave}}(r)$  与  $p(r, n)$  相关峰位置可获得相应的  $\Delta_r(n)$ , 所有脉冲做相应移位后更新 ARP, 使得 ARP 的熵逐渐逼近全局最小值。式(5)中的卷积操作可以利用 FFT 所以效率较高,而上述相关函数特性并非平滑曲线,原文通过搜索的方法获取最大相关峰值及其对应的位置以避免落入局部极值。图 1 给出该算法的流程图。

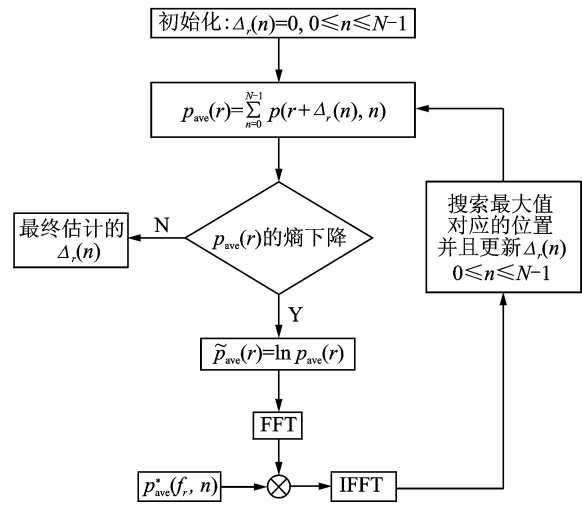


图 1 原算法流程图

## 2 改进型全局最小熵算法

由前面分析可知,全局最小熵算法具有较好的鲁棒性,然而该算法的精度仍然是一个距离分辨单元,限制了距离对准精度;而被观测目标相对雷达的转动引起了回波相关性的变化,该变化对原算法的距离对准准确性和效率有一定影响。本文基于原算法针对以上两点做出了改进并对原算法进行了必要的补充,进一步提高了原算法的性能。

### 2.1 亚距离单元对准

由第 2 节对原算法的分析可知,当  $E(\Delta_r)$  不再减小则迭代终止如图 1 所示,这时可以认为各回波脉冲  $p(r, n)$  已经与  $\ln p_{\text{ave}}(r)$  对准,对准精度为一个距离单元。为了提高距离对准精度,本文结合了亚距离单元对准方法,可以认为亚距离单元是小于一

个距离单元的任意距离,利用傅氏变换的时频移位对称性质便可实现回波信号时域任意距离的移动。

由上节对式(5)的分析可知,原算法将距离对准问题最终归结为迭代求解平均距离像与各距离像相对偏移量的问题。重写式(5)的卷积部分

$$R(\Omega) = p(r, n) \otimes \tilde{p}_{\text{ave}}(-r) \quad (6)$$

根据傅氏变换的卷积性质

$$R(\Omega) \xrightarrow{\text{FT}} R(\omega) = P(\omega, n) \cdot \tilde{P}_{\text{ave}}^*(\omega) \quad (7)$$

式中 $P(\omega, n)$ 与 $\tilde{P}_{\text{ave}}(\omega)$ 分别对应 $p(r, n)$ 与 $\tilde{p}_{\text{ave}}(r)$ 的傅氏变换,再利用傅氏变换的对称性质并离散化可得

$$R(\omega) \xrightarrow{\text{IFT}} R(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega, n) \cdot \tilde{P}_{\text{ave}}^*(\omega) \cdot e^{j\omega\Omega} d\omega \approx \frac{1}{NT} \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} P\left(\frac{2\pi}{NT}k, n\right) \cdot \tilde{P}_{\text{ave}}^*\left(\frac{2\pi}{NT}k\right) \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}k\Omega} \quad (8)$$

由于 $p(r, n)$ 与 $\tilde{p}_{\text{ave}}(r)$ 均为实序列,所以 $P\left(\frac{2\pi}{NT}k, n\right)$ 与 $\tilde{P}_{\text{ave}}^*\left(\frac{2\pi}{NT}k\right)$ 关于 $\omega=0$ 共轭对称,依据此性质只需求解式(7)的一半即可获得相关峰值及其位置,去除与求解峰值无关的系数,式(7)可化简为

$$R'(\eta) = \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} \text{Re}\left[P\left(\frac{2\pi}{NT}k, n\right) \tilde{P}_{\text{ave}}^*\left(\frac{2\pi}{NT}k\right) \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}k\eta}\right] \quad (9)$$

以上推导过程通过在频域乘上线性相位因子解决了时域亚距离单元移位问题。更进一步地利用原算法将两个距离像对准至一个距离单元之后,两者在一个距离单元内的相关性呈近似二次曲线<sup>[6]</sup>,故此时可利用最优化算法高效地估计相关峰值及其位置从而避免搜索。本文以式(8)为目标函数,采用黄金分割法估计相关峰位置。黄金分割法是一种简单而高效的最优化算法,该算法每次迭代搜索区间长度是上次搜索区间的0.618倍,比三等分法收敛快,并且除了第一次迭代外,每次迭代只要计算一个函数值因此效率较高。亚距离单元对准算法基于原算法,在原算法迭代结束后开始亚距离单元对准算法,其中后者利用了黄金分割法迭代求解式(8)的峰值和偏移量 $\Delta_r(n)$ 。通过结合亚距离单元对准方法,改进型算法显著提高了原算法的距离对准精度,提高了成像质量。

## 2.2 基于回波相关性的距离像分块准则

由于孔径时间内目标相对雷达的转动,回波相关性有较为复杂的变化,并且相关性总体呈下降趋势,该变化对原算法的距离对准准确性和效率有一定影响。

假设 $M$ 个回波已经利用原算法距离对准,根据该假设去除式(2)中的 $\Delta_r(n)$ 变量。首先,将式(2)离散化并去除不影响最终估值的因子,得

$$E'(r) = - \sum_{r=1}^N p_{\text{ave}}(r) \cdot p_{\text{ave}}(r) = - \sum_{r=1}^N \sum_{n=1}^M p(r, n) \cdot p_{\text{ave}}(r) = - \left[ \sum_{r=1}^N p(r, 1) \cdot p_{\text{ave}}(r) + \dots + \sum_{r=1}^N p(r, M) \cdot p_{\text{ave}}(r) \right] \quad (10)$$

取式(10)任意一项,根据施瓦茨不等式有

$$|\langle p(r, i), p_{\text{ave}}(r) \rangle|^2 \leq \langle p(r, i), p(r, i) \rangle \cdot \langle p_{\text{ave}}(r), p_{\text{ave}}(r) \rangle \quad (11)$$

式中“ $\langle \rangle$ ”表示内积,  $1 \leq i \leq N$ 。当且仅当 $p(r, n)$ 与 $p_{\text{ave}}(r)$ 线性相关时式(11)等号成立

$$Q = \langle p(r, i), p_{\text{ave}}(r) \rangle \quad (12)$$

式(12)取得最大值。若 $p(r, i)$ 与 $p_{\text{ave}}(r)$ 相关性越弱则式(12)越远离最大值。再考虑式(1),去掉位移变量 $\Delta_r$ 重写如下

$$p_{\text{ave}}(r) = \sum_{n=1}^N p(r, n) \quad (13)$$

可以看出 $p_{\text{ave}}(r)$ 是 $p(r, n)$ 的线性组合,将式(13)代入式(12)得到

$$Q = \langle p(r, i), \sum_{n=1}^N p(r, n) \rangle = \langle p(r, i), p(r, 1) \rangle + \langle p(r, i), p(r, 2) \rangle + \dots + \langle p(r, i), p(r, N-1) \rangle \quad (14)$$

式中 $1 \leq i \leq N$ ,  $p(r, n)$ 之间的相关性等价于 $p(r, i)$ 与 $p_{\text{ave}}(r)$ 之间的相关性,即当 $p(r, n)$ 之间的线性相关性越强时,  $E'(r)$ 越逼近最小值;反之,  $E'(r)$ 越远离最小值。另外,实验结果表明距离像之间的相关性与算法收敛速度也呈正相关性。

综上所述,利用原算法对相关性越强的距离像做距离对准可以获得越小的全局熵值,因此可以通过分块的方法提高算法的局部距离对准准确性和效率。

## 3 实验结果与分析

改进型全局最小熵算法流程如图2。下面首先

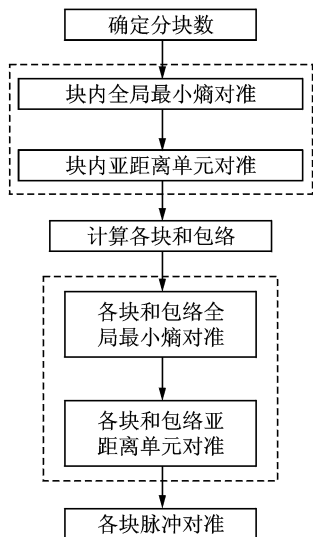


图 2 改进型全局最小熵算法流程

表 1 实测数据 1 距离对准熵值

对比算法	分块号						全局熵
	1	2	3	4	5	6	
原算法	2.097	2.105	2.094	2.090	2.104	2.125	2.110
分块算法	2.096	2.104	2.093	2.089	2.102	2.124	2.110

表 2 实测数据 2 距离对准熵值

对比算法	分块号						全局熵
	1	2	3	4	5	6	
原算法	2.083	2.093	2.108	2.112	2.091	2.087	2.100
分块算法	2.081	2.089	2.107	2.111	2.090	2.086	2.099

将验证分块算法的有效性,将两组实测数据分别用原算法和分块算法做距离对准,两组实测数据均为 512 个回波,256 个距离门。将 512 个回波平均分为 6 个子块,距离对准后的熵值分别如表 1,2 所示。表 1 和表 2 是分别利用原算法和分块算法距离对准后再分块得出的局部熵和全局熵,可以看出分块算法的局部熵值略小于原算法,而两种算法的全局熵值相当。结果说明,两组实测数据的回波相关性都较强,分块算法提高了局部距离对准的准确性。

为了进一步验证改进型距离对准算法的性能,下面仍将采用以上两组实测数据,分别对改进型算法与原算法作比较,相位补偿方法都采用基于 PGA 的多普勒中心跟踪法<sup>[7]</sup>,成像则采用 RD 算法。实验结果见图 3~6。

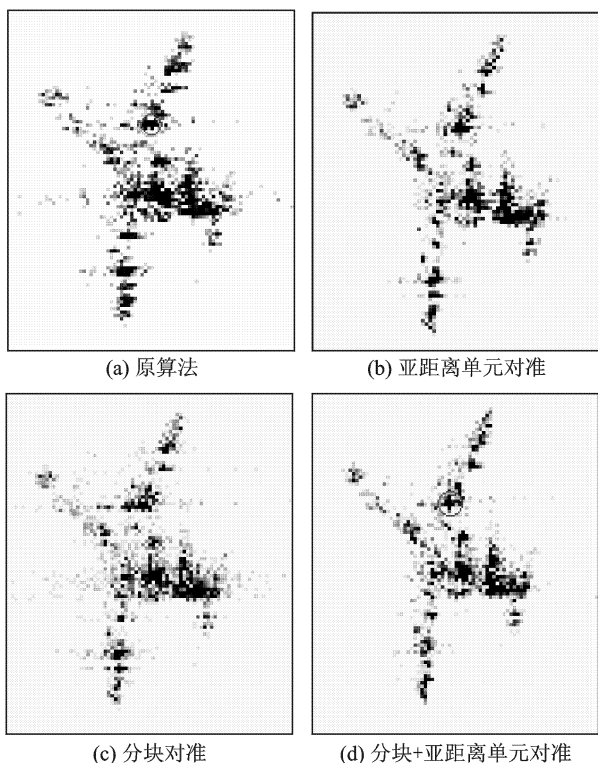


图 3 实测数据 1 成像结果

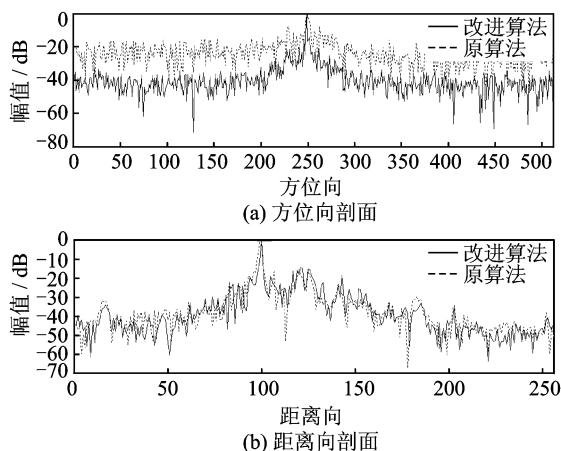


图 4 强散射点包络

从以上两组实测数据成像对比可以看出,在经过分块和亚距离单元对准后图像的聚焦效果有了改善,如图 3(d)和图 5(d)所示,可以看出利用改进型算法处理之后的成像效果较好。进一步分析,分别对图 3 和图 5 的(a,d)子图中红圈内的强散射点做方位向和距离向剖面,如图 4 和图 6 所示。观察图

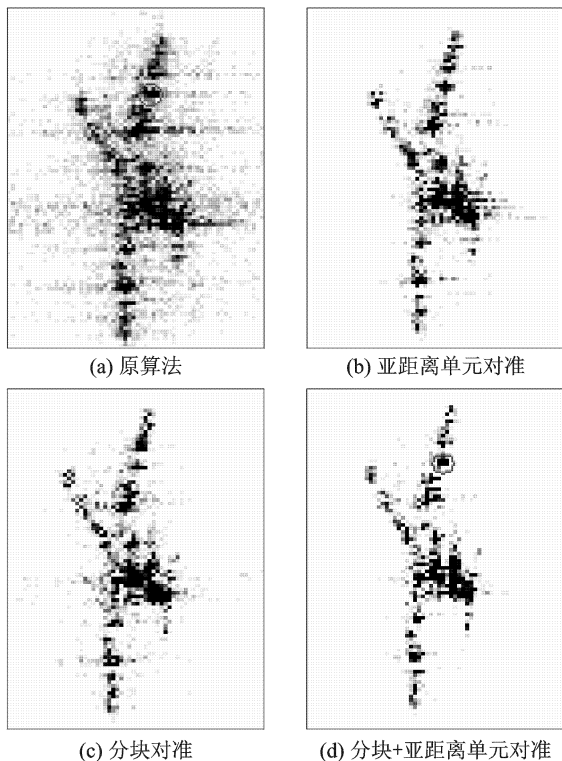


图5 实测数据2成像结果

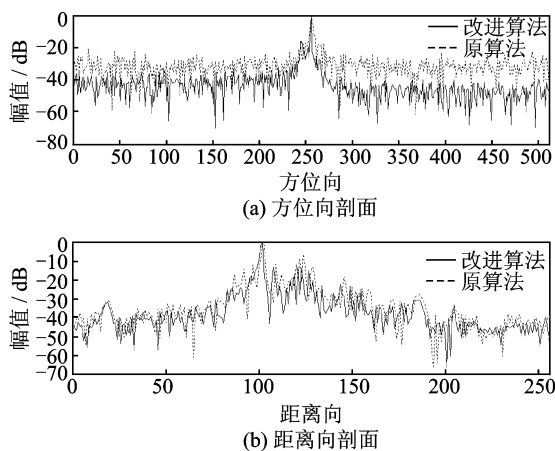


图6 强散射点包络

离向剖面,发现改进算法与原算法的峰值旁瓣比无明显差别;而改进算法的方位向剖面在整个PRF范围内都具有较高的峰值旁瓣比,该比值较原算法提高了约10~20 dB,即图像获得了更高的信噪比,并且改进算法的主瓣宽度也较原算法更窄,因此方位向分辨率得到了一定提高。表3~5再给出图3和图5中各子图的熵和对比度。

从实验结果表3和表4可以看出,通过亚距离单元对准和分块处理后整体成像质量有了较明显的提高;结合以上两种方法构成的改进型算法更进一步地改善了方位向聚焦效果。表5给出了算法的

表3 图3子图的熵和对比度

对比子图	图像熵	图像对比度
图3(a)	3.338	2.499
图3(b)	2.898	3.396
图3(c)	3.334	2.483
图3(d)	2.864	3.465

表4 图5子图的熵和对比度

对比子图	图像熵	图像对比度
图5(a)	3.245	2.547
图5(b)	2.803	3.467
图5(c)	3.184	2.573
图5(d)	2.779	3.454

表5 算法效率比较

对比数据	原算法	分块对准	分块+亚距离单
	FFT次数	FFT次数	元对准FFT次数
实测数据1	6 150	5 413	6 858
实测数据2	3 580	3 025	4 912

效率评估,结果表明分块对准可以提高原算法效率约20%左右,再结合亚距离单元对准后,运算量较原算法有一定增加,但由于ISAR成像目标较小,最终改进型算法的运算量仍然是可以接受的,如表5所示。

## 4 结束语

本文提出了一种改进型全局最小熵距离对准算法。该算法在原算法基础上结合了亚距离单元对准方法,通过亚距离单元对准提高了算法的精度;通过分析回波相关性对原算法距离对准准确性的影响,提出了基于回波相关性的分块准则,改善了原算法距离对准的准确性。通过实验结果对比可以看出,与原算法相比,改进型全局最小熵距离对准算法的成像质量有了较明显提高。

### 参考文献:

[1] Chen C C, Andrews H C. Target motion induced radar imaging [J]. IEEE Trans on AES, 1980, 16 (1):2-14.

[2] 王根源, 保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法[J]. 电子学报, 1998, 20(6):5-8.

Wang Genyuan, Bao Zheng. A new algorithm of range alignment in ISAR motion compensation [J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 20(6):5-8.

- [3] 汪玲,朱兆达. 一种基于最大修正峰度的 ISAR 距离对准算法[J]. 南京航空航天大学学报,2006,38(6):722-726.  
Wang Ling, Zhu Zhaoda. New range alignment algorithm for ISAR based on maximum modified kurtosis [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2006,38(6):722-726.
- [4] Wang Junfeng, Liu Xingzhao. Improved global range alignment for ISAR[J]. IEEE Trans on AES, 2007,43(3):1070-1075.
- [5] Zhu Daiyin, Wang Ling. Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile[J]. IEEE GRS Letters,2009,6(2):204-208.
- [6] Munoz-ferreras J M, Perez-Martinez F. Subinteger range-bin alignment method for ISAR imaging of noncooperative targets[J]. IEEE EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2010, 16 (10): 1115-1170.
- [7] 朱兆达,邱晓辉. 用改进的多普勒中心跟踪算法进行 ISAR 运动补偿[J]. 电子学报,1997,22(3):65-69.  
Zhu Zhaoda, Qiu Xiaohui. ISAR motion compensation using modified Doppler centroid tracking method [J]. Acta Electronica Sinica,1997,22(3):65-69.

作者简介:俞翔(1982-),男,博士研究生,研究方向:逆合成孔径雷达成像技术,E-mail: cwal20@163.com; 朱岱寅(1974-),男,教授,博士生导师,研究方向:雷达成像和信号处理。