

基于自适应 Chirplet 分解的非均匀转动目标 ISAR 相位聚焦

蔡洪¹, 何强², 赵春宇¹

(1. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001; 2. 军械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要: 在 ISAR 成像中, 由非均匀转动引起的相位误差与散射点的径向位置有关, 传统的相位聚焦方法难以采用统一的相位校正函数来进行补偿。针对此问题, 提出一种基于自适应 Gaussian 包络 Chirplet 分解 (AGCD) 快速算法的相位补偿方法。该方法在任意选取的距离单元上, 利用 Gaussian 包络 Chirplet 分解得到两个较强散射点对应的线性调频信号参数, 并结合多特显点处理 (PPP) 模型, 对由平动和非均匀转动造成的相位误差分别进行补偿。该方法计算量小, 估计精度高, 且没有孤立强散射点的要求。仿真实验结果表明了它的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 相位聚焦; 自适应 Gaussian 包络 Chirplet 分解; 非均匀转动

中图分类号: V271.4; TN959.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)06-0079-06

ISAR Phase Focusing for Nonuniform Rotating Target Based on Adaptive Chirplet Decomposition

CAI Hong¹, HE Qiang², ZHAO Chunyu¹

(1. Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, China ;

2. Department of Optical and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In ISAR imaging, the phase error caused by nonuniform rotation is relevant to the radial position of scatterers, so it is difficult for us to use traditional phase focusing algorithms to complete the phase compensation, in which the uniform phase correction function is applied. In order to solve the problem, we put forward a phase compensation method based on adaptive Gaussian Chirplet decomposition (AGCD) fast algorithm. In this method, the linear frequency modulation (LFM) signal parameters of two stronger scatterers in random range bin are obtained via AGCD algorithm, and then the multiple prominent point processing (PPP) model is implemented to eliminate the phase error caused by translational motion and nonuniform rotation. This method has the advantages of low computation cost and high accuracy, and it doesn't require the scatterer be well isolated. The numerical simulation proves its good efficiency.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR); phase focusing; adaptive Gaussian Chirplet decomposition; nonuniform rotation

0 引言

运动补偿是逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 成像的关键技术。在通常情况下, 对非合作目标的运动补偿一般分两步进行: 包络对齐和相位聚焦。其中: 包络对齐将一维距离像做圆周移位, 使同一散射点在不同脉冲内的回波信号始终处于同一个距离单元; 而相位补偿则是在包络对齐的基

础上, 将目标走动造成的多普勒相移补偿掉, 以使各距离单元的回波数据在方位向聚焦。本文假定各次回波数据的包络已经对齐, 重点讨论相位聚焦方法。

常用的相位聚焦方法有: 特显点法^[1], 多特显点综合法^[2], 相位梯度聚焦法 (Phase Gradient Autofocus, PGA)^[3-4], 最小熵聚焦法 (Minimum Entropy, Autofocus, MEA)^[5-7], 加权最小熵聚焦法^[8] 以及基于扩展距离序列的相位补偿方法^[9] 等。这些方法对目标上所有的散射点均采用相同的相位校正函数, 可以有效补偿由于目标平动造成的多普勒频移。然而目标在非均匀转动的情况下, 各散射点的相位误差与它们各自在目标上所处的径向位置有关, 上述相位聚焦方法就显得无能

收稿日期: 2012-05-30

修回日期: 2012-06-29

作者简介: 蔡洪 (1972—), 女, 河北石家庄人, 博士, 高工, 研究方向为逆合成孔径雷达成像和目标识别。

为力了。

针对非均匀旋转目标的 ISAR 成像,学者们提出了许多行之有效的办法,如时频分析^[10-11]。但该方法源于“CLEAN”的思想,需要估计出每一个散射点的回波信号,因而在散射点数目较多的情况下,其运算量还是相当可观的。文献[12]根据目标转速与尺度变换因子的对应关系,沿方位向对信号进行重采样以补偿目标非均匀旋转对成像的影响;文献[13]则将调频傅里叶变换应用于匀加速转动目标的 ISAR 成像,该方法通过一维搜索得到目标的转动参数,避免了两维搜索导致的计算量大的问题;文献[14]通过构造不同的乘积型高阶相位函数,对回波信号的调频率和调频变化率进行估计,可对高次相位项导致的散焦进行补偿;文献[15-16]则通过分析非平稳转动目标回波相位的线性度来选择成像时间。

多特显点处理(Prominent Point Processing, PPP)模型最早被应用于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像^[17],它通过估计 3 个孤立散射点的运动参数来补偿由平动、非均匀转动和大转角引起的相位误差。但是在实际中,孤立散射点很难找到或者根本不存在。1998 年,文献[18]在 PPP 模型的基础上,详细分析了 ISAR 成像中散射点回波相位的多项式特征,提出采用自适应联合时频(Adaptive Joint Time-Frequency, AJTF)技术来实现散射点运动参数的估计。这种方法没有孤立散射点的要求,但是由于目标的运动参数未知,需要在很大范围内对相位多项式的系数进行搜索,运算量较大。文献[19-21]则提出将遗传算法和粒子群算法应用到 AJTF 技术中,以减少搜索次数。

受到文献[18]的启发,本文提出了一种基于 Gaussian 包络 Chirplet 自适应信号分解(Adaptive Gaussian Chirplet Decomposition, AGCD)^[22]快速算法的非均匀转动 ISAR 相位聚焦方法。该方法针对飞机一类惯性较大的目标,采用二次多项式来描述各散射点子回波的相位变化,指出各距离单元回波信号的多分量线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)波性质,并采用 AGCD 算法自适应地提取散射点回波参数,然后再利用 PPP 模型实现方位向聚焦。AGCD 算法是一种参数化时频分析方法,它能够将信号分解成一系列不同线性调频信号的组合,因此能够有效提取多分量线性调频信号的参数。它的快速算法可以得到线性调频信号参数的解析解,因而具有很少的运算量。利用 AGCD 分解得到的起始频率和多普勒调频率,就可以对由平动、非均匀转动引起的相位误差进行补偿。

1 目标回波特性分析

假设目标在成像期间是理想的平面转动,且已对

各次回波作了包络对齐处理。于是,雷达接收到的第 n 个距离单元的目标回波信号可以表示为

$$s_R(n, t) = \sum_{k=1}^{N_k} A_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} [R(t) + x_k \cos \theta(t) + y_k \sin \theta(t)] \right\} \quad (1)$$

式中: f_0 为雷达的中心频率; t 表示与脉冲数成正比的慢时间; N_k 表示距离单元 n 内所包含的散射点个数; A_k 为第 k 个散射点的回波强度; (x_k, y_k) 为第 k 个散射点相对于转台中心的位置参数; $R(t)$ 表示经过包络对齐粗补偿后剩余的径向距离变化; $\theta(t)$ 表示目标在成像期间转过的角度。

用泰勒级数将 $R(t)$ 和 $\theta(t)$ 展开成多项式的形式。

$$\begin{cases} R(t) = R_0 + vt + \frac{1}{2}v't^2 + \frac{1}{3!}v''t^3 + \dots \\ \theta(t) = \Omega t + \frac{1}{2}\Omega't^2 + \frac{1}{3!}\Omega''t^3 + \dots \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)可以看出:目标距离 $R(t)$ 可以通过初始距离 R_0 、初始径向速度 v 、初始径向加速度 v' 和其他高阶项 v'' 等来表示;旋转角 $\theta(t)$ 则可以通过初始角速度 Ω 、初始角加速度 Ω' 和其他高阶项 Ω'' 等来表示。把式(2)代入式(1),可以得到

$$s_R(n, t) = \sum_{k=1}^{N_k} A_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} [(R_0 + x_k) + (v + y_k \Omega)t + \frac{1}{2}(v' + y_k \Omega' + x_k \Omega^2)t^2 + \dots] \right\} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,目标散射点的回波相位可以由一个以慢时间 t 为自变量的高阶多项式来表示。在理想情况下,如果目标在一个很小的观测时间内作均匀转动,即 $R(t) = R_0$, $\theta(t) = \Omega t$, 且 $(\Omega t)^2 \ll 1$, 那么式(3)可以写为

$$s_R(n, t) = \sum_{k=1}^{N_k} A_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} [(R_0 + x_k) + y_k \Omega t] \right\} \quad (4)$$

显然,各散射点子回波的多普勒频移是一个与横距 y_k 成正比的常数,采用简单的 Fourier 变换就可以完成方位向聚焦。因此,相位补偿的目的就是要消除二次和二次以上相位项对成像的影响。本文针对飞机一类惯性目标,重点研究回波相位二次项的补偿问题。

假设 $(\Omega t)^2 \ll 1$, 忽略 $x_k \Omega^2$ 对成像的影响,这对于 X 波段及更高频段的雷达是合理的^[23]。于是式(3)可写为

$$s_R(n, t) = \sum_{k=1}^{N_k} A_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} [(R_0 + x_k) + (v + y_k \Omega)t + \frac{1}{2}(v' + y_k \Omega')t^2] \right\} \quad (5)$$

这样,散射点子回波相位的二次项主要由两部分构成,即 v' 和 $y_k \Omega'$, 它们分别由目标平动和非均匀转动

引起。其中: v' 是目标的径向加速度, 它对目标上各个散射点的影响相同, 可以采用统一的相位校正函数来补偿; Ω' 是目标的角加速度; 相位误差 $y_k \Omega'$ 与各散射点在目标上的横向位置 y_k 有关。如果能够估计出这些运动参数, 就可以从雷达数据中除去不需要的二次相位项, 实现方位向聚焦。

2 AGCD 原理及其快速算法

AGCD 算法是一种参数化的时频分析方法。对于任意有限能量信号 $s(t) \in L^2(R)$, 可将其自适应地分解为

$$s(t) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m g_m(t) \quad (6)$$

式中, A_m 为 $s_m(t)$ 和 $g_m(t)$ 的内积, 即 $A_m = \langle s_m(t), g_m(t) \rangle$, 它反映了信号 $s(t)$ 和基函数 $g_m(t)$ 之间的相似程度。AGCD 的目的就是要寻找最佳和最少的基函数, 使式(6)成立或者在误差范围内成立。AGCD 分解采用的基函数是具有 Gaussian 包络的线性调频小波基函数, 即

$$g_m(t) = \sqrt{\frac{\alpha_m}{\pi}} \exp\left[-\frac{\alpha_m}{2}(t-t_m)^2 + j\omega_m(t-t_m)\right] * \exp\left[j\frac{\beta_m}{2}(t-t_m)^2\right] \quad (7)$$

式中: $t_m, \omega_m, \beta_m \in \mathbf{R}, \alpha_m \in \mathbf{R}^+$; (t_m, ω_m) 表示 Gaussian 包络线性调频基的时频中心; α_m 为方差, 它控制着基函数 $g_m(t)$ 在时频平面上的时间宽度和频带宽度; β_m 为调频率。

设 $s_0(t) = s(t)$, $s_i(t)$ 为第 i 步分解的结果, 则有

$$s(t) = \sum_{i=0}^p \langle s_i(t), g_i(t) \rangle g_i(t) + s_{p+1}(t) \quad (8)$$

式中, $s_{p+1}(t)$ 为第 P 次分解后的信号残量。不失一般性, 如果令高斯基元能量为单位能量, 即有 $\|g(t)\|^2 = 1$ 。由于自适应分解中基函数集是完备但并非正交的, 存在冗余, 因此式(8)分解并不唯一, 为了减少分解次数, 每次分解时都力图寻找与待分解信号残量最匹配的基函数, 即要求有

$$|A_i|^2 = \max_{g_i} |\langle s_i(t), g_i(t) \rangle|^2 \quad (9)$$

而此时信号残量能量为最小, 即

$$\min_{g_i} \|s_{i+1}(t)\|^2 = \min_{g_i} (\|s_i(t)\|^2 - |A_i|^2) \quad (10)$$

从而使信号自适应分解的收敛速度达到最快。在分解中, 各个基函数间不一定正交, 但由于每一步信号分解采用的是正交投影, 分解中所得的投影序列能量可以简单地相加。当信号残量的能量达到误差容限时, 即可停止分解。

AGCD 分解是一个多维优化问题, 一般很难得到

解析解, 且计算量很大, 在实际中难以应用。而 AGCD 快速算法则巧妙地将多维参数的搜索问题转变为多维曲线拟合问题, 并将多维优化搜索过程转变为构造和求解超越方程, 通过构造超越方程和参数空间采样点的选取得到方程的闭式解, 这种快速算法能得到各个自适应调频基函数的解析解, 极大地降低了运算量, 使自适应分解的实用化取得实质性进展, 其具体算法请参阅文献[22], 在这里不再赘述。

3 基于 AGCD 分解的相位聚焦算法

由以上分析可知, 一个距离单元的回波信号近似为多分量线性调频信号。而 AGCD 快速算法就是要将一个信号分解成多个线性调频信号的组合, 而且能够直接得到各个信号分量的起始频率和调频率, 因此即便在一个距离单元中有多个散射点, AGCD 算法也能估计出各个散射点对应的线性调频信号参数。首先采用 AGCD 快速算法得到其中一个较强散射点对应的线性调频信号参数, 并构造相位补偿函数, 以消除由目标平动引起的相位误差; 然后再采用相同的方法, 提取出另外一个较强散射点对应的线性调频信号, 通过估计目标的非均匀转动参数和非均匀采样来去除由非均匀转动引起的相位误差。下面给出具体的算法步骤。

1) 补偿由平动引起的相位误差。任意选取一个距离单元的回波进行 AGCD 分解, 提取出其中一个较强散射点 (x_1, y_1) 的子回波, 并得到其初始频率 f_{01} 和调频率 γ_1 , 构造一个径向运动补偿基函数

$$h_{pT} = \exp\left(-j2\pi\left(f_{01}t + \frac{1}{2}\gamma_1 t^2\right)\right) \quad (11)$$

式中:

$$f_{01} = 2f_0(v + y_1\Omega)/c; \quad (12)$$

$$\gamma_1 = 2f_0(v' + y_1\Omega')/c. \quad (13)$$

于是, 式(11)可以写为

$$h_{pT} = \exp\left\{-j\frac{4\pi f_0}{c}\left[(v + y_1\Omega)t + \frac{1}{2}(v' + y_1\Omega')t^2\right]\right\} \quad (14)$$

令式(5)与式(14)做共轭相乘, 即

$$s_T(n, t) = s_R(n, t) \cdot \text{conj}\{h_{pT}(t)\} \quad (15)$$

于是, 第 n 个距离单元上的回波信号变为

$$s_T(n, t) = \sum_{k=1}^{N_i} A_k \exp\left\{-j\frac{4\pi f_0}{c}\left[(R_0 + x_k) + \Delta y_k \Omega t + \frac{1}{2}\Delta y_k \Omega' t^2\right]\right\} \quad (16)$$

其中, $\Delta y_k = y_k - y_1$ 。

从式(16)可以看出, 散射点 (x_1, y_1) 被补偿到了转台中心, 二次相位项与径向加速度 v' 无关, 径向运动误

差已经被消除了。

2) 补偿由非均匀转动引起的相位误差。任选另外一个距离单元,采用 AGCD 分解方法得到第 2 个较强散射点 (x_2, y_2) 的回波信号,并将其初始频率和调频斜率分别记作 f_{02} 和 γ_2 。

$$f_{02} = 2f_0 \Delta y_2 \Omega / c \quad (17)$$

$$\gamma_2 = 2f_0 \Delta y_2 \Omega' / c \quad (18)$$

从上面两式可知:

$$\gamma_2 / f_{02} = \Omega' / \Omega \quad (19)$$

将式(16)写为

$$s(n, t) = \sum_{k=1}^{N_i} A_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} \left[(R_0 + x_k) + \Delta y_k \Omega \left(t + \frac{1}{2} \frac{\Omega'}{\Omega} t^2 \right) \right] \right\} \quad (20)$$

定义一个新的时间变量

$$t' = t + \frac{1}{2} \frac{\Omega'}{\Omega} t^2 = t + \frac{1}{2} \frac{\gamma_2}{f_{02}} t^2 \quad (21)$$

于是,第 n 个距离单元的回波信号为

$$s(n, t) = \sum_{k=1}^{N_i} A_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} \left[(R_0 + x_k) + \Delta y_k \Omega t' \right] \right\} \quad (22)$$

显然,对于新的时间变量 t' ,目标为均匀转动。因此,通过插值得到一组以 t' 为变量的离散数据,就可以将由非均匀转动造成的相位误差补偿掉了。

4 数值仿真结果

采用一个具有 79 个散射点的仿真飞机模型来验证本文提出的相位聚焦方法。仿真时采用频率步进雷达信号,其主要参数为:发射载频起始频率 $f_0 = 9$ GHz,频率步进 $\Delta f = 1.5$ MHz,频率步进数 $N = 256$,发射脉冲数 $M = 256$,脉冲重复频率 $f_p = 1.5$ kHz。目标各散射点的几何关系如图 1 所示。

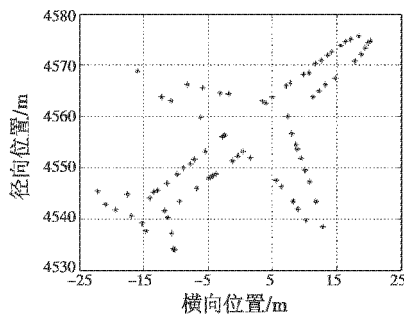


图 1 目标散射点模型

Fig. 1 Model of scatterers

在仿真实验中,假定目标沿雷达视线方向作匀加速直线运动,起始速度为 30 m/s,加速度为 2 m/s²,同时绕几何中心作匀加速旋转,起始角速度为 0.01 rad/s,角加

速度为 0.002 rad/s²。

图 2 给出了对目标作包络对齐之后的成像结果,其 ISAR 像在方位向有很大程度的散焦,这是由目标平动和非均匀转动引起的。

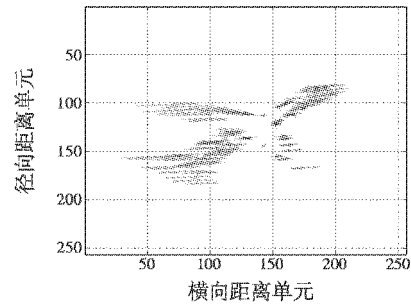


图 2 包络对齐后的 ISAR 像

Fig. 2 ISAR image after aligning the envelope

为方便讨论,图 3 给出了第 105 个距离单元的时频图,这是由短时 Fourier 变换得到的。从图中可以看出,此距离单元内包含两个散射点,各散射点子回波均为线性调频信号,这是造成方位向散焦的根本原因。

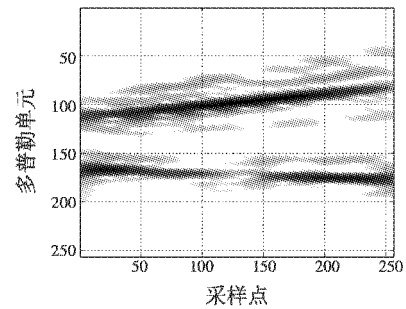


图 3 包络对齐后第 105 个距离单元回波信号的时频谱图

Fig. 3 Time-frequency spectrum of the 105th range bin after envelope alignment

对第 105 个距离单元的回波做 AGCD 分解,提取出其中一个较强散射点的回波信号。按照步骤 1,由分解得到的初始频率 f_{01} 和调频斜率 γ_1 构造径向运动补偿基函数 h_{PT} ,对目标做平动补偿。图 4 所示为经平动补偿后第 105 个距离单元内回波信号的时频谱图。

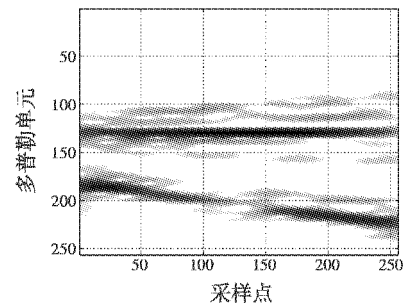


图 4 平动补偿后第 105 个距离单元回波信号的时频谱图

Fig. 4 Time-frequency spectrum of the 105th range bin after translational compensation

从图中可以看出,其中一个散射点已经被补偿到

了转台中心,其多普勒频率恒为0。图5是经平动补偿后得到的ISAR像,方位向散焦比较严重,这是由目标的非均匀转动引起的。

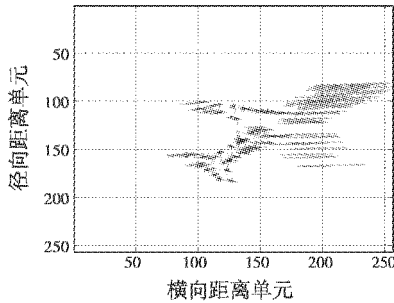


图5 平动补偿后的ISAR像

Fig. 5 ISAR image after translational compensation

任意选取另外一个距离单元,并对其回波做AGCD分解,得到此距离单元内一个较强散射点回波的初始频率 f_{02} 和调频斜率 γ_2 。按照步骤2),定义一个新的时间变量 t' ,沿慢时间对回波数据进行重采样,以补偿由非均匀转动造成的相位误差。图6是经重采样处理后的第105个距离单元回波信号的时频谱图,此距离单元内所有子回波都被校正成为单频信号。图7是经非均匀转动补偿后得到的聚焦良好的ISAR像。

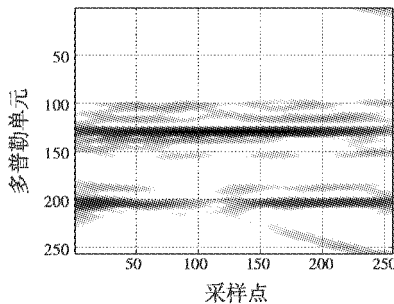


图6 非均匀转动补偿后第105个距离单元回波信号的时频谱图

Fig. 6 Time-frequency spectrum of the 105th range bin after translational compensation

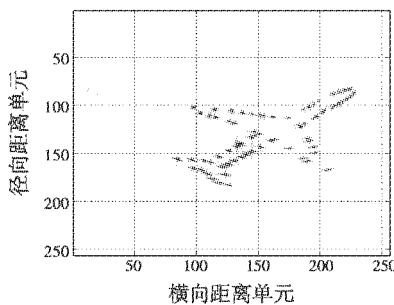


图7 非均匀转动补偿后的ISAR像

Fig. 7 ISAR image after nonuniform rotation compensation

5 结论

本文结合多特显点处理模型,提出了一种基于

AGCD快速算法的非均匀转动目标ISAR相位聚焦方法。该方法针对飞机一类惰性较大的目标,采用AGCD快速算法估计两个较强散射点的起始频率和调频斜率,并结合多特显点技术来补偿由平动和非均匀转动造成的相位误差。该方法的主要优点是:1)没有孤立散射点的要求;2)能够通过解析方法准确估计出单个散射点的起始频率和调频斜率,不需要对参数进行搜索,计算量小;3)对成像观测期间所有的回波进行方位向聚焦,能够获得比时频分析方法更高的多普勒分辨率。仿真实验结果表明了它的有效性。

本文提出的相位聚焦算法是基于二维转动模型的,即假定目标在成像期间不具有三维转动。但是,对于高速机动的飞机和舰船来讲,这个假设并不总是成立。研究三维转动目标的相位补偿问题是下一步的主要工作。

参考文献

- [1] STEINBERG B D. Microwave imaging of aircraft[J]. Proceedings of IEEE, 1998, 76(12):1578-1592.
- [2] YE Wei, YEO T S, BAO Z. Weighted least-squares estimation of phase error for SAR/ISAR autofocus [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2487-2494.
- [3] WAHL D E, EICHEL P H, GHIGLIA D C, et al. Phase gradient autofocus—A robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3):827-835.
- [4] DENG Yuan, ZHANG Yunhua. Improved PGA algorithm based on adaptive range bins selection [C]//International Conference on Image Analysis and Signal Processing (IASP), Fujian, China, April 9-11, 2010;232-235.
- [5] MUNOZ-FERRERAS J M, PEREZ-MARTINEZ F, DATCU M. Generalisation of inverse synthetic aperture radar autofocusing methods based on the minimisation of the Renyi entropy[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2010, 4(4): 586-594.
- [6] CAO Pan, XING Mengdao, SUN Guangcai, et al. Minimum entropy via subspace for ISAR autofocus [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2010, 7(1):205-209.
- [7] LI Yuntao, CHAN Yongguang, YIN Canbin. ISAR imaging with linear array-antenna [C]//The 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Oct. 26-30, 2009;656-659.
- [8] 徐刚,杨磊,张磊,等.一种加权最小熵的ISAR自聚焦

- 方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1809-1815.
- [9] 金光虎, 高勋章, 黎湘, 等. 基于扩展距离序列的 ISAR 成像相位补偿方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 58-63.
- [10] 刘爱芳, 朱晓华, 陆锦辉, 等. 基于离散匹配傅里叶变换的逆合成孔径雷达成像算法[J]. 兵工学报, 2004, 25(7): 458-461.
- [11] 罗贤全, 尚朝轩, 和强, 等. 基于参数化时频分析的机动目标 ISAR 成像方法[J]. 微波学报, 2008, 24(1): 76-79.
- [12] 王虹现, 李亚超, 全英汇, 等. 一种高效的非均匀转动目标成像方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(5): 829-834.
- [13] 付耀文, 胡杰民, 黎湘. 基于调频傅里叶变换的匀加速转动目标的 ISAR 成像[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2608-2612.
- [14] 包敏, 周鹏, 李亚超, 等. 基于乘积型高阶相位函数的复杂运动目标 ISAR 成像[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(5): 1088-1022.
- [15] 彭石宝, 许稼, 夏斌, 等. ISAR 非平稳目标成像时间和转速联合估计方法[J]. 航空学报, 2011, 32(4): 702-709.
- [16] 彭石宝, 许稼, 向家彬, 等. 基于相位线性度的 ISAR 非平稳目标成像时间选择新方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2795-2801.
- [17] WERNES S, CARRARA W, JOYCE L, et al. Moving target imaging algorithm for SAR data [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(1): 57-67.
- [18] WANG Yuanxun, HAO Ling, CHEN V C. ISAR motion compensation via adaptive joint time-frequency technique [J]. Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 670-677.
- [19] LI J, HAO Ling. Use of genetic algorithm in ISAR imaging of target with higher order motions [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 343-351.
- [20] THAYAPARAN T, LAMPROPOULOS G, WONG S K, et al. Application of adaptive joint time-frequency algorithm for focusing distorted ISAR images from simulated and measured radar data [J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 213-220.
- [21] BRINKMAN W. Focusing ISAR images using fast adaptive time-frequency and 3D motion detection on simulated and experimental data [D]. Monterey, California, Naval Postgraduate School, 2005.
- [22] YIN Qinye, QIAN Shie, FENG Aigang. A fast refinement for adaptive Gaussian Chirplet decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(7): 1298-1306.
- [23] CHEN V C, HAO Ling. Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis [M]. Artech House, Boston, MA, USA, 2002.
- (上接第 33 页)
- [13] 高晓光. 航空军用飞行器导论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004: 94-98.
- [14] 辛亭. 多无人机协同作战关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [15] PONGPUNWATTANA A, TRIPLETT B I, MORGANSEN K A. Target tracking control with limited communication and steering dynamics [C]//Innovation in Intelligent Machines, Studies in Computational Intelligence Series, Springer-Verlag Berlin, 2007, 70: 113-145.

欢 迎 投 稿 欢 迎 刊 登 广 告