基于改进型快速双线性参数估计的复杂运动目标 ISAR 成像

吕倩*苏涛

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要:针对复杂运动目标的逆合成孔径雷达(ISAR)成像中多普勒扩散导致的成像质量下降,该文在建立方位回 波信号为立方相位信号(CPS)的基础上,提出一种基于改进型快速双线性参数估计的复杂运动目标 ISAR 成像方法。 该方法通过利用双线性立方相位函数,非均匀快速傅里叶变换(NUFFT),基于 Chirp-z 的尺度变换以及快速傅里 叶变换(FFT)等操作,能够快速实现 CPS 参数估计和复杂运动目标的 ISAR 成像。由于实现过程均采用 NUFFT 和 FFT 快速实现,该方法计算量小,并且双线性操作可以保证其具有较好的抗噪声性能和交叉项抑制性能。理论 分析和仿真结果验证了该 ISAR 成像算法的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 立方相位信号; 参数估计; 非均匀快速傅里叶变换
 中图分类号: TN957.52
 文献标识码: A
 文章编号: 1009-5896(2016)09-2301-08
 DOI: 10.11999/JEIT151359

ISAR Imaging of Targets with Complex Motion Based on the Modified Fast Bilinear Parameter Estimation

LÜ Qian SU Tao

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In view of image defocus caused by Doppler frequency shift in ISAR imaging of targets with complex motion, this paper characterizes the azimuth echoes as Cubic Phase Signal (CPS) and proposes an ISAR imaging algorithm for targets with complex motion based on the modified fast bilinear parameter estimation. This algorithm can achieve parameter estimation of CPS and ISAR imaging quickly by employing the cubic phase bilinear function, NonUniform Fast Fourier Transform (NUFFT), scale transform based on Chirp-z transform and Fast Fourier Transform (FFT). The computational cost is low due to the NUFFT and FFT in implementation procedure, and bilinearity guarantees a high anti-noise performance and a good suppression on cross-terms. The theoretical analysis and simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed ISAR imaging algorithm. Key words: Inverse SAR (ISAR); Cubic Phase Signal (CPS); Parameter estimation; NonUniform Fast Fourier Transform (NUFFT)

1 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像因其在民用和军事应用中的重要作用,一直以来都是国内外研究的热点^[1-8]。当目标匀速转动时,传统的方法直接采用傅里叶变换来实现基于距离-多普勒(RD)算法的 ISAR 成像。但对于复杂运动的目标,如海面上的舰船或空中高机动目标,方位回波的高阶相位项将导致多普勒扩散,降低 ISAR 方位成像质量,因此,传统的 RD 算法和 LFM 模型^[9]已不再适用,必须将方位回波信号建

模为立方相位信号(Cubic Phase Signal, CPS)的形 式^[3-8]。

相比于 LFM 信号模型, CPS 模型在复杂运动 目标的 ISAR 成像中具有更广泛的应用。CPS 参数 估计算法可细分为线性估计算法,双线性估计算法 以及非线性估计算法。线性估计算法具有较好的抗 噪声性能,但计算量太大,并不适合 ISAR 成像处 理^[4-6]。非线性 CPS 参数估计算法主要有 HAF-ICPF^[7], PGCPF^[10], PHMT^[11], DechirpClean^[12], KTCRD^[3], CRQCRD^[8], MLVD^[13]以及文献[14]提出 的基于 SCFT 参数估计算法。然而非线性变换会造 成抗噪声性能和交叉项抑制性能的损失,从而影响 该类算法在 ISAR 成像中的实用性。双线性参数估 计算法,由于其较好的抗噪声性能和交叉抑制性能 而备受关注。文献[15,16]提出的 LPWD 算法是通过 搜索方式实现信号参数估计的,运算量大,不易实 现^[17]。文献[17]提出基于参数空间转换(Parameter

收稿日期: 2015-12-03; 改回日期: 2016-05-04; 网络出版: 2016-07-14 *通信作者: 吕倩 lvqian@stu.xidian.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(61271024,61201283),新世纪优秀人 才支持计划(NCET-09-0630)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271024, 61201283), Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-09-0630)

Space Switching Method, PSSM)的快速双线性 CPS 参数估计算法,虽然改善了抗噪声性能,但参 数空间转换操作使得该算法的计算量高达 $O(N_{t_m}^3)$, 并不易于实时处理。

针对以上问题,本文提出了基于改进型快速双 线性参数估计的复杂运动目标 ISAR 成像方法。该 方法在对雷达原始回波数据完成距离脉压和运动补 偿后,首先利用 NUFFT 得到信号的慢时间-多普勒 频 率 分 布 (Slow Time-Doppler Frequency Distribution, STDFD),再沿多普勒轴求其逆傅里 叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT),将 其转换回慢时间-伪时间空间。最后,利用基于 Chirp-z 的尺度变换(Scale Transform, ST)和快速傅 里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)快速实现 信号去耦处理和能量积累,进而实现快速 CPS 参数 估计和实时 ISAR 成像。最后,利用仿真数据对算 法的有效性进行了验证和分析。

2 改进型快速双线性参数估计算法

本文采用文献[5,17]提出的复杂运动目标的 ISAR 成像模型。假设距离脉冲压缩和运动补偿已完 成,这里只关注由目标转动所引起的多普勒扩散。 第 *k* 个距离单元的回波信号包含多个分量 CPS,具 有式(1)形式:

$$s_{k}(t_{m}) = \sum_{p=1}^{p} \sigma_{p} \exp\left[j2\pi\left(\phi_{1,p}t_{m} + \frac{1}{2}\phi_{2,p}t_{m}^{2} + \frac{1}{6}\phi_{3,p}t_{m}^{3}\right)\right] + n(t_{m})$$
(1)

式中, t_m 表示慢时间,P为第k个距离单元的散射 点总数, $n(t_m)$ 为高斯白噪声。另外, σ_p , $\phi_{1,p}$, $\phi_{2,p}$ 以及 $\phi_{3,p}$ 分别表示第p个散射点的幅度,中心频率 (Centroid Frequency, CF),调频率(Chirp Rate, CR) 以及二次调频率(Quadratic Chirp Rate, QCR)。在 实际 ISAR 成像中,正是由调频率和二次调频率所 引起的多普勒扩散,导致 ISAR 成像质量下降。因 此,寻求快速有效的 CPS 参数估计算法是十分必要 的。

2.1 单分量 CPS 的改进型快速双线性参数估计

考虑单个无噪声 CPS, 如

$$s(t_m) = \sigma_p \exp\left[j2\pi \left(\phi_{1,p}t_m + \frac{1}{2}\phi_{2,p}t_m^2 + \frac{1}{6}\phi_{3,p}t_m^3\right)\right]$$
(2)

对式(2)求取双线性立方相位函数(Cubic Phase Bilinear Function, CPBF),得到

$$R(t_{m},\tau_{m}) = s(t_{m} + \tau_{m})s(t_{m} - \tau_{m})$$

$$= \sigma_{p}^{2} \exp\left[j2\pi\left(2\phi_{1,p}t_{m} + \phi_{2,p}t_{m}^{2} + \frac{1}{3}\phi_{3,p}t_{m}^{3}\right)\right]$$

$$\cdot \exp\left[j2\pi\left(\phi_{2,p} + \phi_{3,p}t_{m}\right)\tau_{m}^{2}\right]$$
(3)

式中,时间变量 t_m 和延时变量 τ_m 之间存在着非线性 耦合,直接对时间变量或延时变量做相干积累都无 法达到信号能量的完全积累。沿着延时变量 τ_m^2 轴做 傅里叶变换,可以得到其 STDFD,然而对于非均 匀数据的 DFT 计算量高达 $O(N_{t_m}^3)$ 。因此,这里采 用 NUFFT^[18,19]实现非均匀采样轴的傅里叶变换,具 体如式(4):

$$Q(t_{m}, f_{\tau_{m}^{2}}) = \text{NUFFT}_{\tau_{m}^{2}} \left\{ R(t_{m}, \tau_{m}) \right\}$$
$$= \sigma_{p}^{2} \exp\left[j2\pi \left[2\phi_{1,p}t_{m} + \phi_{2,p}t_{m}^{2} + \frac{1}{3}\phi_{3,p}t_{m}^{3} \right] \right]$$
$$\cdot \delta\left(f_{\tau_{m}^{2}} - \phi_{2,p} - \phi_{3,p}t_{m} \right)$$
(4)

式中,NUFFT 所需的计算量仅为 $O(2N_{t_m}^2 \log_2 N_{t_m})$ 。 可以看到,因为 $t_m n \tau_m$ 之间的非线性耦合,信号能 量是沿直线 $f_{\tau_m^2} = \phi_{2,p} + \phi_{3,p}t_m$ 分布的,且该直线的 截距和斜率与 CPS 的 CR 和 QCR 直接相关。根据 文献[17]可知,基于 PSSM 参数估计算法中的循环 移位累加操作只利用了式(4)中的幅度信息,而丢弃 了相位信息。受到基于 PSSM 参数估计算法的启发, 本文提出一种改进型快速双线性参数估计算法,其 实现过程如下:

步骤1 对单个 CPS 求其双线性立方相位函数 (CPBF)

$$R(t_{m},\tau_{m}) = s(t_{m}+\tau_{m})s(t_{m}-\tau_{m})$$

= $\sigma_{p}^{2} \exp\left[j2\pi\left(2\phi_{1,p}t_{m}+\phi_{2,p}t_{m}^{2}+\frac{1}{3}\phi_{3,p}t_{m}^{3}\right)\right]$
 $\cdot \exp\left[j2\pi\left(\phi_{2,p}+\phi_{3,p}t_{m}\right)\tau_{m}^{2}\right]$ (5)

步骤 2 对 $R(t_m, \tau_m)$ 沿着延时变量 τ_m^2 轴进行 NUFFT,并求其模值,得到 STDFD

$$Q\left(t_m, f_{\tau_m^2}\right) = \left| \text{NUFFT}_{\tau_m^2} \left\{ R\left(t_m, \tau_m\right) \right\} \right|$$
$$= \sigma_p^2 \delta\left(f_{\tau_m^2} - \phi_{2,p} - \phi_{3,p} t_m \right)$$
(6)

步骤 3 对式(6)沿多普勒 $f_{\tau_m^2}$ 轴做 IFFT, 得到 慢时间-伪时间函数

$$D(t_m, \hat{t}) = \mathrm{IFFT}_{f_{\tau_m}^2} \left\{ \left| \mathrm{NUFFT}_{\tau_m^2} \left\{ R(t_m, \tau_m) \right\} \right| \right\}$$
$$= \sigma_p^2 \exp\left[\mathrm{j} 2\pi \left(\phi_{2,p} + \phi_{3,p} t_m \right) \hat{t} \right]$$
(7)

步骤 4 利用 ST 来消除慢时间 t_m 与伪时间 \hat{t} 间的线性耦合, 定义 $t_n\hat{t} = t'_n \Rightarrow t_n = t'_n(\hat{t}, 得到)$

$$T\left(t'_{m}, \hat{t}\right) = \operatorname{ST}_{t_{m}\hat{t}} \left\{ \sigma_{p}^{2} \exp\left[j2\pi \left(\phi_{2,p} + \phi_{3,p}t_{m}\right)\hat{t}\right] \right\}$$
$$= \sigma_{p}^{2} \exp\left(j2\pi \phi_{2,p}\hat{t}\right) \exp\left(j2\pi \phi_{3,p}t'_{m}\right) \tag{8}$$

步骤 5 分别沿 t'_m 轴和 \hat{t} 轴进行 FFT,得到该 CPS 的调频率-二次调频率分布(CRQCRD)

$$W\left(f_{t'_{m}}, f_{\bar{t}}\right) = \operatorname{FFT}_{\bar{t}}\left\{\operatorname{FFT}_{t'_{m}}\left[T\left(t'_{m}, \tilde{t}\right)\right]\right\}$$
$$= \sigma_{p}^{2}\delta\left(f_{\bar{t}} - \phi_{2,p}\right)\delta\left(f_{t'_{m}} - \phi_{3,p}\right)$$
(9)

从式(9)可以看出, $W(f_{t_m'}, f_{t}) \dot{\Phi}(f_{t} = \phi_{2,p}, f_{t_m'} = \phi_{3,p})$ 处有唯一峰值点,可以利用峰值检测完成参数估计, 即

$$\hat{\phi}_{2,p} = f_{\hat{t}}, \ \hat{\phi}_{3,p} = f_{t'_m}$$
 (10)

因此,本文提出的改进型快速双线性 CPS 参数 估计算法实现过程如式(11):

 $W\left(f_{t_{m}^{'}},f_{\widehat{t}}
ight)$

$$= \operatorname{FFT}_{t_m, \tilde{t}} \left\{ \operatorname{ST}_{t_m \tilde{t}} \left[\operatorname{IFFT}_{f_{\tau_m^2}} \left\{ \left| \operatorname{NUFFT}_{\tau_m^2} \left\{ R(t_m, \tau_m) \right\} \right| \right\} \right] \right\}$$
(11)

及基于 Chirp-z 的 ST 变换即可,由于基于 Chirp-z 的尺度变换可以使用 FFT 快速实现,降低了计算量。

2.2 多分量 CPS 的改进型快速双线性参数估计

如上所述,为获得目标的高分辨 ISAR 图像, 各距离单元的回波信号必然同时存在多个 CPS,如 式(1)。因此,验证该算法适合不适合用于高分辨 ISAR 成像,必须对其处理多分量 CPS 的能力予以 验证。下面以两分量 CPS 进行分析,其他多分量情 况类似,这里不再详述。假设

$$s(t_m) = \sigma_p \exp\left[j2\pi\left(\phi_{1,p}t_m + \frac{1}{2}\phi_{2,p}t_m^2 + \frac{1}{6}\phi_{3,p}t_m^3\right)\right] + \sigma_q \exp\left[j2\pi\left(\phi_{1,q}t_m + \frac{1}{2}\phi_{2,q}t_m^2 + \frac{1}{6}\phi_{3,q}t_m^3\right)\right] (12)$$

则其 CPBF 为

$$R(t_{m},\tau_{m}) = R_{s}(t_{m},\tau_{m}) + 2\sigma_{p}\sigma_{q} \exp\left\{j2\pi\left[\left(\phi_{1,p} + \phi_{1,q}\right)t_{m} + \frac{1}{2}\left(\phi_{2,p} + \phi_{2,q}\right)t_{m}^{2} + \frac{1}{6}\left(\phi_{3,p} + \phi_{3,q}\right)t_{m}^{3}\right]\right\}$$

$$\times \cos\left\{2\pi\left[\left(\phi_{1,p} - \phi_{1,q}\right) + \left(\phi_{2,p} - \phi_{2,q}\right)t_{m} + \frac{1}{2}\left(\phi_{3,p} - \phi_{3,q}\right)t_{m}^{2}\right]\tau_{m} + \frac{1}{6}\left(\phi_{3,p} - \phi_{3,q}\right)\tau_{m}^{3}\right\}$$

$$\times \exp\left\{j2\pi\left[\frac{1}{2}\left(\phi_{2,p} + \phi_{2,q}\right) + \frac{1}{2}\left(\phi_{3,p} + \phi_{3,q}\right)t_{m}\right]\tau_{m}^{2}\right\}$$

$$(13)$$

式中, $R_{s}(t_{m}, \tau_{m})$ 代表自身项。可以看出,式(13)中的 cos 函数直接扰乱了信号能量的分布,并且只有当

$$\phi_{1,p} - \phi_{1,q} + \left(\phi_{2,p} - \phi_{2,q}\right) t_m + \frac{1}{2} \left(\phi_{3,p} - \phi_{3,q}\right) t_m^2 = 0$$

$$\phi_{3,p} - \phi_{3,q} = 0$$

$$(14)$$

满足时,该影响才可以被消除。即只有当 $\phi_{1,p} = \phi_{1,q}$, $\phi_{2,p} = \phi_{2,q}, \phi_{3,p} = \phi_{3,q}$ 同时满足时,交叉项才会扰乱 信号自身项的能量分布。而在实际 ISAR 成像应用 中,并不会出现这种情况^[17],因此,交叉项的存在 并不会影响自身项的检测。后面的章节中会用仿真 实验来证明上述公式推导。

3 改进型快速双线性参数估计算法性能分析

3.1 交叉项分析

仿真实验:两个 CPS *A*1和 *A*2,慢时间采样频 率 Fs 和信号长度分别为 256 Hz 和 512,信号参数置 为 $\sigma_1 = 1, \phi_{1,1} = 20$ Hz, $\phi_{2,1} = -40$ Hz/s, $\phi_{3,1} = 60$ Hz/s², $\sigma_2 = 1, \phi_{1,2} = -80$ Hz, $\phi_{2,2} = -70$ Hz/s, $\phi_{3,2} = -50$ Hz/s²。

图 1(a)为对 CPBF 沿着 τ_m^2 轴完成 NUFFT 后, 得到的慢时间-多普勒频率分布,由于慢时间变量 t_m 和延时变量 τ_m 之间的非线性耦合,使得信号能量沿 着直线 $f_{\tau_m^2} = \phi_{2,p} + \phi_{3,p} t_m$ 分布,并且在其周围会存在 一定程度的交叉项。图 1(b)为式(9)的结果,即两分量 CPS的 CRQCRD。可以看出,在经过式(5)~式(9)变换后,CPS A1和 A2的能量被很好地积累,而交叉项并没有被积累。在 CRQCRD 上,CPS A1和 A2分别对应着两个不同的尖峰,可以通过峰值检测方式实现 CPS 的 CR 和 QCR 快速估计。因此,本文所提的改进型快速双线性参数估计算法可以很好地抑制交叉项,并得到自身项的能量积累。

3.2 计算量分析

文献[14]所提的基于 SCFT 参数估计算法中, 四阶瞬时自相关函数的计算量为 $O(3N_{t_m}^2)$,基于 Chirp-z 的尺度变换计算量为 $O(3N_{t_m}^2 \log_2 N_{t_m})$,关 于非均匀采样轴的离散傅里叶变换的计算量为 $O(N_{t_m}^3)$ 。因此,基于 SCFT 参数估计算法的计算量 高达 $O(N_{t_m}^3)$ 。

文献[17]所提的基于 PSSM 参数估计算法中, 双线性立方相位函数的计算量为 $O(N_{t_m}^2)$,利用 NUFFT 关于非均匀采样轴的离散傅里叶变换的计 算量为 $O(2N_{t_m}^2 \log_2 N_{t_m})$,但是该算法中所使用的空 间转换操作需要高达 $O(N_{t_m}^3)$ 次循环累加操作。因 此,基于 PSSM 参数估计算法的计算量也为 $O(N_{t_m}^3)$ 。



本文所提的改进型快速双线性参数估计算法 中,双线性立方相位函数的计算量为 $O(N_{t_{m}}^{2})$,利用 NUFFT 关于非均匀采样轴的离散傅里叶变换的计 算量为 $O(2N_{t_{u}}^{2} \log_{2} N_{t_{u}})$ 。两次快速傅里叶变换和基 于 Chirp-z 的尺度变换的计算量分别为 $O\left(2N_{t_m}^2\log_2 N_{t_m}\right)$ 和 $O\left(3N_{t_m}^2\log_2 N_{t_m}\right)$ 。因此基于本文 所提的参数估计算法的计算量仅为 $O(7N_{t_m}^2 \log_2 N_{t_m})$ 。表 1 为 3 种 CPS 参数估计方法 的计算量,相比于基于 SCFT 和基于 PSSM 的参数 估计算法,本文所提的改进型快速双线性参数估计 算法的运算量明显较低,有助于实时 ISAR 成像应 用。

需要强调的是, 文献[6]中利用 NUFFT 来加速 实现基于 SCFT 的 CPS 参数估计算法, 使得该算法 的计算量级也达到了 $O(N_{t_m}^2 \log_2 N_{t_m})$,但是其抗噪 声性能只有-3dB。

3.3 抗噪声性能分析

-10

本节将利用输入输出 SNR^[8]以及 MSE^[20]来衡量

基于 SCFT 基于 PSSM 快速双线性参数 算法 估计方法 算法 算法 $O(N_{t_m}^3)$ $O(N_{t_{m}}^{3})$ $O\left(7N_{t_m}^2\log_2 N_{t_m}\right)$ 计算量

4020输出信噪比(dB) 2010

CRB - 本文算法 调频率的MSE(dB) 0 匹配滤波 本文算法 PSSM算法 -20SCFT算法 0 -12-10-8 -6-4-2-12 -10 -8 -6 -4 输入信噪比(dB) 输入信噪比(dB) (a)输入-输出SNR比较 (b) CR估计的MSE

表1 计算量分析

改进型快速双线性 CPS 参数估计算法的抗噪声性 能。考虑单分量 CPS 并加入高斯白噪声,其中 CPS 的参数设置为 $\sigma = 1, \phi_1 = 20$ Hz, $\phi_2 = 40$ Hz/s, $\phi_3 =$ 60 Hz/s^2 。输入 SNR_{in} = [-14:1:0], 对每一个输入 SNR 做 200 次试验求平均。

图 2(a)给出了 3 种算法的输入输出 SNR 比较, 并且用匹配滤波的结果作为参考评价。由于基于 SCFT 参数估计算法使用了四阶非线性相关函数, 导致抗噪声性能相对较差,SNR 门限仅为-3 dB^[6]。 而基于 PSSM 参数估计算法与本文的快速双线性 CPS 参数估计算法,均使用了双线性变换,可以保 证较好的抗噪声性能,其 SNR 门限可以达到 -8 dB。CR和QCR可以同时被准确快速地估计, 有效缓解了误差传播,因此,该算法更适合于低信 噪比的情况下的 CPS 参数估计。

图 2(b)和图 2(c)为改进型快速双线性 CPS 参数 CR 和 QCR 估计的 MSE,同时给出了相对应的 CRB。可以看出,在SNR_{in} ≥ -8 dB时, CR和 QCR 估计的 MSE 接近其 CRB, 这同时也证明了图 2(a) 的结果。

同样需要强调的是,虽然基于 PSSM 参数估计 算法与本文提出的改进型快速双线性 CPS 参数估计 算法同样具有较好的抗噪声性能。但是,根据第3.2 节中的计算量分析可以看出,基于 PSSM 参数估计



CRB

图 2 抗噪声性能仿真结果

算法的计算量明显高于本文提出的快速算法,后面 的仿真实验也验证了本文的快速算法在计算效率上 的突出优势。

4 基于改进型快速双线性参数估计的复杂 运动目标 ISAR 成像算法

实际应用中,多分量 CPS 中幅度较弱的 CPS 会被交叉项淹没,需用 Clean 技术来对不同强度的

Clean 技术来对不同强度的 数)距离单元的数据 $s_k(t_m)$ $s_k(t_m) = \sum_{p=1}^{p} \sigma_p \exp\left[j2\pi \left(\phi_{1,p}t_m + \frac{1}{2}\phi_{2,p}t_m^2 + \frac{1}{6}\phi_{3,p}t_m^3\right)\right] + n(t_m)$ (15)

像算法,具体实现步骤为:

步骤 2 对第 k 个距离单元的数据 $s_k(t_m)$ 求其 CPBF, 有

$$R(t_{m},\tau_{m}) = \sum_{p=1}^{p} \sigma_{p}^{2} \exp\left\{j2\pi \left[\left(2\phi_{1,p}t_{m} + \phi_{2,p}t_{m}^{2} + \frac{1}{3}\phi_{3,p}t_{m}^{3}\right) + \left(\phi_{2,p} + \phi_{3,p}t_{m}\right)\tau_{m}^{2}\right]\right\} + R_{c}\left(t_{m},\tau_{m}\right) + R_{n}\left(t_{m},\tau_{m}\right) \quad (16)$$

式中, $R_{c}(t_{m},\tau_{m}), R_{n}(t_{m},\tau_{m})$ 分别代表交叉项和噪声项。

步骤 3 利用本文所提的快速参数估计方法得到其 CRQCRD,通过峰值检测手段完成 CR 和 QCR 的估计

$$W\left(\widehat{\phi}_{3,p} = f_{t_{m}^{'}}, \widehat{\phi}_{2,p} = f_{\widehat{t}}\right) = \underset{\left(f_{t_{m}^{'}}, f_{\widehat{t}}\right)}{\operatorname{arg\,max}} \left| \operatorname{FFT}_{t_{m}^{'}, \widehat{t}} \left\{ \operatorname{ST}_{t_{m}^{'}, \widehat{t}} \left\{ \operatorname{IFFT}_{f_{\tau_{m}^{'}}} \left\{ \left| \operatorname{NUFFT}_{\tau_{m}^{'}} \left\{ R\left(t_{m}, \tau_{m}\right) \right\} \right| \right\} \right| \right\} \right|$$
(17)

步骤 4 利用已估参数补偿高阶相位项,消除多普勒扩散,进而完成幅度和 CF 的估计,有

$$\widehat{\sigma}_{p}, \widehat{\phi}_{1,p} = \arg \max \left| \operatorname{FFT} \left(s_{k}\left(t_{m} \right) \exp \left[-j2\pi \left(\frac{1}{2} \,\widehat{\phi}_{2,p} t_{m}^{2} + \frac{1}{6} \,\widehat{\phi}_{3,p} t_{m}^{3} \right) \right] \right) \right|$$
(18)

步骤 5 从原始信号 $s_k(t_m)$ 中剔除已估计的信号,得到

$$s_k\left(t_m\right) = s_k\left(t_m\right) - \hat{\sigma}_p \exp\left[j2\pi\left(\hat{\phi}_{1,p}t_m + \frac{1}{2}\hat{\phi}_{2,p}t_m^2 + \frac{1}{6}\hat{\phi}_{3,p}t_m^3\right)\right]$$
(19)

步骤 6 重复步骤 2~步骤 5,直到 p = P 或剩 余信号的能量少于 TH (TH 为能量门限)。

步骤 7 更新 *k* = *k* + 1, 重复步骤 1~步骤 6, 直到 *k* = *K*。

5 基于改进型快速双线性参数估计的 ISAR 成像仿真结果分析

5.1 舰船目标的 ISAR 成像结果分析

本节将利用由理想散射点所构建的复杂运动的 舰船(如图 3(a))来验证基于改进型快速双线性参数 估计的 ISAR 成像算法。雷达工作参数为:发射信 号载频 $f_c = 15$ GHz,信号带宽 B = 100 MHz,采样 频率 $f_s = 150$ MHz,脉冲重复频率 PRF = 128 Hz, 回波个数为 256。目标的转动参数为 (0.01 rad/s, 0.012 rad/s²,0.02 rad/s³)。

成像前回波信号被加入高斯白噪声,其SNR = -6 dB。图 3(b)和图 3(c)为传统的 RD 成像结果。可以发现,由于存在多普勒扩散,传统的 RD 算法 已无法正确重建出清晰的舰船目标 ISAR 图像,特 别是在低信噪比的情况下,如图 3(c)。这里提取图 3(c)中的第 65 个距离单元的数据进行单独分析。 图 4(a)为第 65 个距离单元的 STDFD。可以看 出,由于变量间的耦合,4 个散射点的信号能量沿着 不同的直线分布,并且存在大量的交叉项。利用本 文所提的参数估计方法,可以快速得到该距离单元 的 CRQCRD,如图 4(b)。4 个散射点对应 4 个不同 的尖峰,可以轻易地分辨开,并且通过峰值检测, 可以得到 4 个散射点所对应的 CR 和 QCR 估计值。 图 4(c)中,4 个散射点均可以被很好地重构,但是对 于 RD 算法,由于存在多普勒扩散,信号能量分布 不集中,无法聚焦各个散射点。

CPS 进行分离, 依次估计出所有 CPS 的参数。本节

提出了基于改进型快速双线性参数估计的 ISAR 成

运动补偿,将所有的目标散射点都校正到其初始的 距离单元,得到第 $k \uparrow (1 \le k \le K, K)$ 距离单元总

步骤 1 对原始回波信号进行距离脉冲压缩和

这里用熵作为衡量 ISAR 成像质量的标准^[14], 图像的质量越好,其熵就越小^[13-17]。与图 5(a)相比, 图 5(b)和图 5(c)中,几乎所有的散射点都被完好地 重构,并且出现的伪散射点比较少。这是因为,基 于 SCFT 参数估计算法利用四阶自相关函数,其交 叉项较多,影响自身项的检测,而基于 PSSM 参数 估计算法和本文所提的参数估计算法均为双线性变 换,交叉项较少,有利于提高信噪比。表 2 中,图 5(c)的熵要比其他的图的熵值要小,这说明图 5(c) 的成像质量更好。同样,根据表 2 可知,尽管基于

电子与信息学报



表 2 图 5 中的熵和仿真时间

	图 5(a)	图 5(b)	图 5(c)
熵	4.3955	3.5918	3.5738
仿真时间(s)	105.92	113.47	23.87

PSSM 的 ISAR 成像算法可以得到与本文所提算法 相同的成像效果,但是其仿真时间明显高于本文所 提的 ISAR 成像算法。因此,本文所提的基于改进 型快速双线性参数估计的 ISAR 成像算法具有更广 泛,更实际的应用。

5.2 飞机目标的 ISAR 成像结果分析

本节中,复杂运动的飞机目标是由 141 个理想 散射点构建而成,如图 6(a),其转动速度,转动加 速度,以及转动加加速度分别为 (0.02 rad/s, 0.02 rad/s², 0.03 rad/s³)。仿真中的雷达参数为:发 射信号载频 $f_c = 10$ GHz,信号带宽 B = 100 MHz, 采样 频率 $f_s = 150$ MHz, 脉冲重复频率 PRF = 256 Hz,回波个数为 512。成像之前数据信噪比为 -6 dB,这里同样使用熵来评价图像的成像质量, 表 3 给出了仿真结果的熵和所用时间。

图 6(b)为基于 RD 算法的 ISAR 成像结果,可 以看出 CR 和 QCR 引起的多普勒扩散严重降低成像 质量。另外,在信噪比为-6 dB 时, RD 算法的 ISAR 成像结果已经完全淹没在噪声中,根本无法辨别, 如图 6(c)。这里提取第 162 个距离单元的数据进行 分析,该距离单元中两个散射点 *A* 和 *B* 相邻较近。

图 7(a)为相邻散射点 A 和 B 的 WVD 分布,可以得出,回波信号已不再适合 LFM 信号模型,而必



须构建为 CPS 模型。图 7(b)和图 7(c)分别为两个相 邻散射点的 CRQCRD 和补偿多普勒扩散后的结果, 在图 7(b)和图 7(c)中,即使散射点相邻较近,依旧 可以清晰地分辨出,并进行聚焦和重构。

图 8 中,相比基于 SCFT 的 ISAR 成像结果, 其他两种算法均可以得到清晰的图像。从表 3 也可 看出,图 8(c)的熵最小,虽然图 8(b)的熵接近于图 8(c),但仿真时间明显多于图 8(c)。以上分析和结果 都证明,本文提出的基于改进型快速双线性参数估 计的 ISAR 成像方法,不仅具有较高的分辨率,较 好的抗噪声性能和交叉抑制性能,而且计算量也相 对较少,更加适合实际的 ISAR 应用。

6 结束语

对空中或海面目标进行 ISAR 成像时,目标的

表3图8中的熵和仿真时间

	图 8(a)	图 8(b)	图 8(c)
熵	5.4903	5.4676	5.4473
仿真时间(s)	1091.91	1530.88	233.36

复杂运动所产生的方位高阶相位项,会导致方位像 的严重散焦,传统的RD算法和LFM模型不再适用。 本文在 CPS 模型的基础上,提出了一种基于改进型 快速双线性参数估计的复杂运动目标 ISAR 成像算 法。该算法首先利用双线性立方相位函数、NUFFT 以及 IFFT 运算,得到慢时间-伪时间函数,然后利 用基于 Chirp-z 的尺度变换操作消除变量间的线性 耦合,利用 FFT 进行能量积累,实现非搜索参数估 计并重构 ISAR 图像。该算法通过有效利用 NUFFT



参考文献

- BERIZZI F, MESE E D, DIANI M, et al. High-resolution ISAR imaging of maneuvering targets by means of the range instantaneous Doppler technique: modeling and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(12): 1880–1890. doi: 10.1109/83.974573.
- [2] XING Mengdao, WU R, LI Yachao, et al. New ISAR imaging algorithm based on modified Wigner-Ville distribution[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2009, 3(1): 70–80. doi: 10. 1049/iet-rsn:20080003.
- [3] ZHENG Jibin, SU Tao, ZHU Wentao, et al. ISAR imaging of targets with complex motions based on the keystone time-chirp rate distribution[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(7): 1275–1279. doi: 10.1109/LGRS. 2013.2291992.
- [4] WU Liang, WEI Xizhang, YANG Degui, et al. ISAR imaging of targets with complex motion based on discrete chirp fourier transform for cubic chirps[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(10): 4201–4212. doi: 10.1109/TGRS.2012.2189220.
- [5] WANG Yong and ZHAO Bin. Inverse synthetic aperture radar imaging of nonuniformly rotating target based on the parameters estimation of multicomponent quadratic frequency-modulated signals[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(7): 4053–4061. doi: 10.1109/JSEN.2015.2409884.
- [6] ZHENG Jibin, SU Tao, ZHU Wentao, et al. ISAR imaging of nonuniformly rotating target based on a fast parameter estimation algorithm of cubic phase signal[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(9): 4727-4740. doi: 10.1109/TGRS.2015.2408350.
- [7] WANG Yong. Inverse synthetic aperture radar imaging of manoeuvring target based on range-instantaneous-Doppler and range-instantaneous-chirp-rate algorithms[J]. *IET Radar*, *Sonar & Navigation*, 2012, 6(9): 921–928. doi: 10.1049/ietrsn.2012.0091.
- [8] ZHENG Jibin, SU Tao, ZHANG Long, et al. ISAR imaging of targets with complex motion based on the chirp ratequadratic chirp rate distribution[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(11): 7276–7289. doi: 10.1109/TGRS.2014.2310474.
- [9] LV Xiaolei, BI Guoan, WAN C, et al. Lv's distribution: principle, implementation, properties, and performance[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(8): 3576–3591. doi: 10.1109/TSP.2011.2155651.
- [10] WANG Yong and JIANG Yicheng. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering target based on the product generalized cubic phase function[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(5): 958–962. doi: 10.1109/ LGRS.2011.2143387.
- [11] WANG Yong and JIANG Yicheng. ISAR imaging of a ship target using product high-order matched-phase transform[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(4):

658-661. doi: 10.1109/LGRS.2009.2013876.

- [12] LI Yachao, WU R, XING Mengdao, et al. Inverse synthetic aperture radar imaging of ship target with complex motion[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2008, 2(6): 395–403. doi: 10.1049/iet-rsn:20070101.
- [13] LI Yanyan, SU Tao, ZHENG Jibin, et al. ISAR imaging of targets with complex motions based on modified Lv's distribution for cubic phase signal[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(10): 4775–4784. doi: 10.1109/JSTARS.2015. 2460734.
- [14] BAI Xia, TAO Ran, WANG Zhi-jiao, et al. ISAR imaging of a ship target based on parameter estimation of multicomponent quadratic frequency-modulated signals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 1418–1429. doi: 10.1109/TGRS.2013.2251348.
- [15] WANG Yong, KANG Jian, and JIANG Yicheng. ISAR imaging of maneuvering target based on the local polynomial wigner distribution and integrated high-order ambiguity function for cubic phase signal model[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(7): 2971–2991. doi: 10.1109/JSTARS.2014. 2301158.
- [16] WANG Yong, ZHAO Bin, and KANG Jian. Asymptotic statistical performance of local polynomial wigner distribution for the parameters estimation of cubic-phase signal with application in ISAR imaging of ship target[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth* Observations and Remote Sensing, 2015, 8(3): 1087–1098. doi: 10.1109/JSTARS.2014.2355219.
- [17] ZHENG Jibin, SU Tao, LIAO Guisheng, et al. ISAR imaging for fluctuating ships based on a fast bilinear parameter estimation algorithm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in* Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(8): 3954-3966. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2440911.
- [18] 田超,文树梁. 基于非均匀 FFT 的长时间相参积累算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1374-1380. doi: 10.3724/SP.J. 1146.2013.01264.
 TIAN Chao and WEN Shuliang. A long-term coherent integration algorithm based on non-uniform fast Fourier transform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(6): 1374-1380. doi: 10.3724/SP.J.1146. 2013.01264.
 [19] LIU Qinghuo and NGUYEN N. An accurate algorithm for non-uniform fast Fourier transforme (NUEET'a)[1]. IEEE
- non uniform fast Fourier transforms (NUFFT's)[J]. *IEEE* Microwave and Guided Wave Letters, 1998, 8(1): 18–20. doi: 10.1109/75.650975.
- [20] Peleg S and Porat B. The Cramer-Rao lower bound for signals with constant amplitude and polynomial phase[J] *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, 39(3): 749–752. doi: 10.1109/78.80864.
- 吕 倩: 女,1991年生,博士生,研究方向为雷达目标检测与参数估计、SAR/ISAR成像.
- 苏 涛: 男,1968年生,教授,研究方向为面向雷达、声呐、通 信的高速实时信号处理、认知雷达.