

一种低信噪比下稳健的 ISAR 平动补偿方法

李 东^{1,2}, 赵 婷¹, 宋 伟¹, 刘庆华², 曾 浩³, 张成祥¹

(1. 重庆大学通信与测控中心, 重庆 400044; 2. 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西桂林 541004;
3. 重庆大学通信工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 远距离小目标/隐身目标逆合成孔径雷达成像在目标检测系统中具有重要作用, 然而由于回波信号存在信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)低等问题, 使得传统基于距离包络对齐的平动补偿方法失效; 导致后续初相校正和方位聚焦处理性能急剧下降. 针对该问题, 本文提出一种低信噪比下参数化平动补偿方法. 首先, 将回波信号建模为多成分的多项式相位信号, 并通过挖掘运动目标上所有散射体具有相同的平动历程这一先验信息, 利用相位差分(Phase Differencing, PD)和Keystone变换将目标上所有散射体能量聚集到同一距离单元. 然后, 通过相干积累三次相位函数将该距离单元内的所有散射体能量集中到一个强点, 进而估计出目标平动参数实现低SNR下平动补偿. 最后, 理论分析和实测数据实验验证了该方法的有效性.

关键词: 逆合成孔径雷达; 低信噪比; 相位差分; Keystone变换; 相干积累三次相位函数

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)09-2049-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.001

A Robust Translational Motion Compensation Method for ISAR Imaging Under Low SNR Environment

LI Dong^{1,2}, ZHAO Ting¹, SONG Wei¹, LIU Qing-hua², ZENG Hao³, ZHANG Cheng-xiang¹

(1. Center of Communication and Tracking Telemetry Command, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Wireless Wideband Communication and Signal Processing, Guilin 541004, China;
3. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging for long range small/stealthy target plays an important role in the field of national defense surveillance. However, the performances of the traditional envelop-based range alignment method dramatically degrade due to low signal-to-noise ratio (SNR) of received echo signal, which leads to the inapplicability for the subsequent phase adjustment or azimuth focus. In this paper, a parametric-based approach is proposed to perform joint range alignment and phase adjustment. To that end, translational motion is modeled as multi-component polynomial phase signal (PPS), and inspired by the fact that all the scatterers in the moving target experience the same translational range history, the phase difference (PD) operation and Keystone transform (KT) are utilized to transform the energy of all the scatterers into one range cell. Second, a coherently integrated cubic phase function (CICPF) is developed to focus the energy of all the scatterers onto a peak point, from which the polynomial coefficients can be obtained accurately to realize the translational motion compensation in low SNR environment. Finally, theoretical analysis and experimental results are also provided to validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); low signal-to-noise ratio (SNR); phase differencing (PD); Keystone transform (KT); coherent integrated cubic phase function (CICPF)

收稿日期: 2017-04-17; 修回日期: 2017-10-11; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61501068); 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室 2017 年主任基金(No. GXKL06170202); 广西自然科学基金(No. 2016GXNSFAA380036); 上海航天科技创新基金(No. SAST2017041); 中央高校基本科研业务费(No. 106112016CDJZR165508)

1 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)是一种重要的高分辨率成像雷达,它可以全天候、全天时、远距离的获取非合作目标的图像,具有重要的军事和民用价值^[1,2].在 ISAR 成像中,由于传输损耗或发射能量的限制,导致小尺寸或隐身的运动目标回波信号存在信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)低等问题,给准确和有效的平动补偿带来了很大的挑战.

在 ISAR 成像中,平动补偿一般包括包络对齐和初相校正两个主要步骤^[3,4].传统的包络对齐方法主要有基于相邻脉冲相关性最大的包络对齐(MCRA)方法^[3];和基于信息熵和对比度优化的包络对齐方法^[4-7];然而,当 SNR 低时,噪声也会破坏相邻脉冲之间的相关性,以及信息熵或对比度准则很难有效地评估包络对齐质量.近年来,国内外学者提出了联合包络对齐和初相校正的参数化平动补偿方法^[8,9].文献[8]把平动轨迹建模为一个多项式相位信号,并提出利用图像质量评价指标(IQEM)为代价函数来估计多项式系数;然而,基于 IQEM 的代价函数是非凸函数,因此算法陷入局部最小值是不可避免的,尤其是在低信噪比的情况下.为了克服文献[8]的局部最优问题,文献[9]提出了基于粒子群(PSO)的全局最优平动系数求解方法,也称为 IQEM-PSO 方法.然而,在实际情况下,由于该方法涉及多维搜索存在计算负担高等问题,不利于实时处理;并且当图像在强噪声背景下,IQEM 很难有效地评估图像质量导致不能有效的实现平动补偿.

针对上述问题,本文通过挖掘运动目标上所有散射体具有相同的平动历程这一先验信息,提出了一种低 SNR 下稳健的 ISAR 平动补偿方法.利用相位差分(PD),Keystone 变换(KT)以及相干积累三次相位函数(CICPF)将运动目标上的所有散射体能量集中到一个强点,从而估计出运动目标平动参数.相比于上述方法,本文方法同时探索利用了目标所有散射体能量以及二维相干积累增益来提高输出信噪比,且避免多维搜索;因此,提出的方法能在低 SNR 下实现平动补偿;并具有较低的计算复杂度.最后,理论分析和实测数据实验验证了该方法的有效性.

2 ISAR 成像几何模型

图 1 描述的是一个典型的机动目标的三维 ISAR 成像几何模型,XYZ 构成笛卡尔坐标系,坐标原点 O 为目标转台轴心.向量 \mathbf{R} 和 \mathbf{w} 构成成像平面 Ω ,其中向量 \mathbf{R} 为雷达视线方向(LOS)向量,向量 \mathbf{w} 为目标在三维坐标空间中的转动角速度向量,且向量 \mathbf{w} 可以分解为与视线方向平行分量 \mathbf{w}_r 和垂直分量 \mathbf{w}_e ,其中向量 \mathbf{w}_r 与向

量 \mathbf{R} 平行不会引起目标方位的多普勒频率变化;而向量 \mathbf{w}_e 为有效的旋转向量.

设 $P(x_k, y_k)$ 为运动目标上任意一个散射体中心,则散射点 P 到雷达的瞬时距离为

$$R_k(t_a) = R_{\text{trans}}(t_a) + y_k \cos(\theta(t_a)) + x_k \sin(\theta(t_a)) \quad (1)$$

其中, t_a 为方位慢时间变量, $\theta(t_a) = \omega t_a$ 代表瞬时旋转角, ω 是有效旋转向量 \mathbf{w}_e 的标量值, $R_{\text{trans}}(t_a)$ 是雷达和沿 LOS 方向的目标中心之间的平动量.在 ISAR 成像中,相干积累时间内旋转角一般很小($3^\circ \sim 5^\circ$)^[1,2],故可取如下近似值

$$\begin{cases} \cos(\theta(t_a)) \approx 1 \\ \sin(\theta(t_a)) \approx \omega t_a \end{cases} \quad (2)$$

为了获得距离维高分辨率, ISAR 系统常用的发射信号为线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号;假设运动目标在某个距离单元上由 K 个散射点组成,则经过基带解调后的回波信号在距离频域-方位时域^[8-10]可以表示为

$$\begin{aligned} S(f_r; t_a) &= \sum_{k=1}^K A_k \text{rect}\left[\frac{f_r}{B_r}\right] \exp\left[-j \frac{4\pi(f_r + f_c)R_k(t_a)}{c}\right] \\ &= \text{rect}\left[\frac{f_r}{B_r}\right] \exp\left[-j \frac{4\pi(f_r + f_c)R_{\text{trans}}(t_a)}{c}\right] \\ &\quad \sum_{k=1}^K A_k \exp\left[j \frac{4\pi(f_r + f_c)(y_k + x_k \omega t_a)}{c}\right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中,式中 A_k 为第 K 个散射中心的反射系数, f_r 是距离快时间 t_r 对应的频率变量, f_c 为载波频率, $\lambda = c/f_c$ 为光速 c 的波长, B_r 为发射信号带宽, γ 为线性调频斜率.由式(3)可知, $\exp[-j4\pi(f_r + f_c)R_{\text{trans}}(t_a)/c]$ 是与目标平动相关的相位项,它与目标散射中心位置无关.

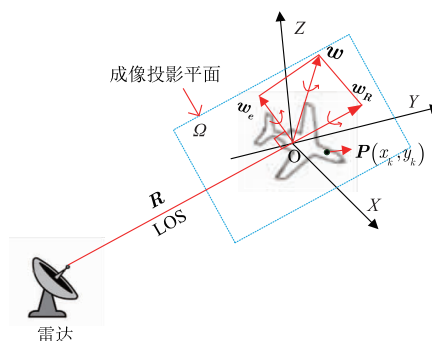


图1 ISAR成像几何模型

为了补偿平动影响,首先我们把平动历程建模为多项式信号.考虑到在较短的相干积累时间内平动的高阶项不会带来性能影响,本文将平动距离轨迹建模为三阶多项式,其表达式为

$$R_{\text{trans}}(t_a) = R_0 + vt_a + \alpha t_a^2 + \beta t_a^3 \quad (4)$$

其中, R_0 , v , α 和 β 分别代表运动目标的初始径向距离、

径向速度、径向加速度和径向加速度率. 由式(3)可知, 平动多项式系数与运动目标散射体的位置相互独立, 即运动目标上的所有散射体具有相同的距离平动轨迹. 通过探索这一重要的先验信息, 本文提出一种低 SNR 下的平动补偿方法.

3 提出的 ISAR 平动补偿方法

3.1 基于 PD 和 KT 的平动轨迹补偿

由式(3)可知, 对每个给定的距离频率, 回波信号沿着慢时间 t_a 维可视为多成分多项式相位信号 (Polynomial Phase Signal, PPS). 而 PPS 系数决定了距离平动轨迹历程. 因此, 若该 PPS 的阶数降低, 则可减缓距离平动轨迹和降低相位的阶数. 在参数估计领域中, PD 是一种常用的 PPS 降阶方法, 例如其应用在高阶模糊度函数的参数估计中^[10]. 本文引入 PD 操作来降低距离平动轨迹 PPS 的阶数, 将式(4)代入式(3), 并对式(3)沿方位慢时间域内进行一次 PD 操作, 整理可得

$$S_{\text{PD}}(f_r; t_a) = S(f_r; t_a + \tau_1) \cdot [S(f_r; t_a - \tau_1)]^* = \sum_{k=1}^K A_k^2 \exp \left[\frac{-j4\pi(f_r + f_c)}{c} (2\tau_1(v + x_k w) + 2\beta\tau_1^3 + 4\tau_1\alpha t_a + 6\tau_1\beta t_a^2) \right] + \text{PD}_{l,c\text{-terms}}(f_r; t_a) \quad (5)$$

其中, $(^*)$ 表示复杂共轭操作, τ_1 是延迟变量, $A_k = A_k \text{rect}[f_r/B_r]$ 是常数项, $\text{PD}_{l,c\text{-terms}}(f_r; t_a)$ 是 PD 操作后的交叉项. 在 ISAR 系统中, 延迟变量 τ_1 应该满足 $\tau_1 = mT_{\text{PRT}}, m = 1, 2, \dots, N, T_{\text{PRT}}$ 是脉冲重复间隔时间. 由式(5)可知, 经过 PD 操作后, 所有散射点的距离平动历程得以减缓且相位也降到二阶. 然而, 由 $4\tau_1\alpha$ 项引起的线性距离走动仍然存在. 幸运的是, KT 可以在低 SNR 环境下有效地消除线性距离平动轨迹^[11] 的影响. KT 定义为 $t_a = (f_c/f_r + f_c)t_m, t_m$ 表示新的慢时间变量.

对式(5)进行 KT 变换, 整理得

$$S_{\text{PD-KT}}(f_r; t_m) = \sum_{k=1}^K A_k^2 \exp \left\{ \underbrace{-\frac{j4\pi(f_r + f_c)}{c} (2\tau_1(v + x_k w) + 2\tau_1^3\beta)}_{\text{auto-terms}} - \frac{j4\pi f_c}{c} (4\tau_1\alpha t_m) - j \frac{4\pi}{c} 6\tau_1\beta \frac{f_c^2}{f_r + f_c} t_m^2 \right\} + \text{PD-KT}_{l,c\text{-terms}}(f_r; t_m) \quad (6)$$

由式(6)可知, 一阶系数 $4\tau_1\alpha$ 和 f_r 之间的耦合项已被消除, 然而, 距离频率 f_r 与方位时间变量 t_m 仍然存在高阶耦合. 由于 $f_r \ll f_c$, 在距离频率变量 $f_r = 0$ 处进行泰勒级数展开, 可以得到

$$\frac{f_c^2}{f_r + f_c} \approx \left(1 - \frac{f_r}{f_c}\right) f_c = f_c - f_r \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 并对式(6)沿距离频率 f_r 做逆傅里叶变换, 整理得

$$s_2(t_r; t_m) = \sum_{k=1}^K A_k^2 \sqrt{B_r T_p} \text{sinc} \left[B_r \left(t_r - \frac{2[2\tau_1(v + x_k w) + 2\tau_1^3\beta + 6\tau_1\beta t_m^2]}{c} \right) \right] \times \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (2\tau_1(v + x_k w) + 2\tau_1^3\beta + 4\tau_1\alpha t_m + 6\tau_1\beta t_m^2) \right] + \text{PD-KT}_{l,c\text{-terms}}(t_r; t_m) \quad (8)$$

由式(8)可知, 经过 PD 和 KT 后, 平动目标所有散射体的能量都集中到距离单元 $R(t_m) = R_0(x_k) + R_{\text{qrcm}}(\beta)$, 其中 $R_0(x_k) = 2\tau_1(v + x_k w) + 2\tau_1^3\beta$ 和 $R_{\text{qrcm}}(\beta) = 6\tau_1\beta t_m^2$ 分别为初始距离单元和新的平动二次项. $R_0(x_k)$ 取决于运动目标沿方位维的尺寸大小, 为了更清晰地观察到目标方位尺寸 x_k 对 $R_0(x_k)$ 的影响, 图 2 给出了 $\Delta R(x_k)$ 随目标方位尺寸 x_k 变化曲线, 其仿真参数如表 1 所示, 延迟变量选择为 $\tau_1 = T_{\text{PRT}}$. 由图 2 可知, x_k 引起的距离变化量 $\Delta R(x_k)$ 远远小于二分之一距离分辨单元 $\rho_r = \frac{c}{2B_r} = 1\text{m}$.

而且, 二次距离走动项 $R_{\text{qrcm}}(\beta)$ 由加速度率 β 决定, $R_{\text{qrcm}}(\beta)$ 最大值是 $\max\{R_{\text{qrcm}}(t_m)\} = |6\tau_1\beta t_m^2|_{t_m = \pm \frac{T}{2}; \tau_1 = T_{\text{PRT}}} = 0.0073\text{m}$, T_a 为合成孔径时间, 其值足够小可以忽略. 因此, 根据上述分析, 经过 PD 和 KT 变换后, 目标的所有散射体能量聚集到同一个距离单元.

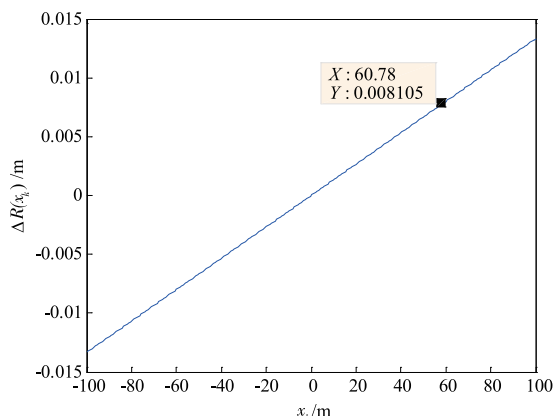
表 1 雷达仿真参数

载波频率	10GHz	角速度	0.02rad/s
传输带宽	150MHz	采样频率	200MHz
脉冲频率	300Hz	有效回波脉冲	256
平动系数	速度	加速度	加速度率
	40m/s	5m/s ²	2m/s ³

根据上述分析, 式(8)可以写成

$$s_{\text{PD-KT}}(t_r; t_m) = \sum_{k=1}^K A_k^2 \sqrt{B_r T_p} \text{sinc} [B_r(t_r + N_0)] \exp(j2\pi(b_{k,0} + b_{k,1}t_m + b_{k,2}t_m^2)) + \text{PD}_{l,c\text{-terms}}(t_r; t_m) \quad (9)$$

其中 $N_0 = -2[2\tau_1 v + 2\tau_1^3\beta]/c$, $b_{k,1} = -8\tau_1\alpha/\lambda$, $b_{k,0} = -2[2\tau_1(v + x_k w) + 2\tau_1^3\beta]/\lambda$, $b_{k,2} = -12\tau_1\beta/\lambda$ 分别为第 k 个散射体所对应的幅度、初相、中心频率和调频率. 由式(9)可知, 经过 PD 和 KT 处理后, 目标散射体能量聚焦在一个距离门内, 且为多成分 LFM 信号, 其中系数 $b_{k,i}, i = 0, 1, 2$ 决定目标的平动轨迹. 因此, 为了实现平动补偿, 需要精确地估计出 LFM 信号的系数.

图2 $\Delta R(x_k)$ 随目标方位尺寸 x_k 变化曲线

3.2 基于 CICPF 的平动多项式系数估计

根据上述分析,运动目标中所有散射体的能量经过 PD 和 KT 操作后聚集到同一距离单元内.不失一般性,假设能量聚集在第 l 个距离单元,式(9)可表示为多成分的 LFM 信号,即

$$s_l(t_m) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \exp(j2\pi(b_{k,0} + b_{k,1}t_m + b_{k,2}t_m^2)) + \text{PD}_{l,c\text{-terms}}(t_m) + n(t_m) \quad (10)$$

其中 $\sigma_k = A_k^2 \sqrt{B_r T_p} \text{sinc}[B_r(t_r + N_0)]$, $n(t_m)$ 表示方差为 δ^2 的加性复高斯白噪声.下面,我们利用 CICPF 来实现在低 SNR 环境下平动系数的估计.对于一个多成分 LFM 信号,三次相位函数(Cubic Phase Function, CPF)定义为^[12-14]

$$\begin{aligned} \text{CPF}(t_m; f_{\tau_m}^2) &= \int s_l(t_m + \tau_m) s_l(t_m - \tau_m) \exp(-j2\pi f_{\tau_m}^2 \tau_m^2) d\tau_m^2 \\ &= \underbrace{\sum_{k=1}^K \sigma_k^2 \exp[j4\pi(b_{k,0} + b_{k,1}t_m + b_{k,2}t_m^2)] \delta_{\tau_m^2}(f_{\tau_m}^2 - 2b_{k,2})}_{\text{auto-terms}} \\ &\quad + \underbrace{\text{CPF}_{l,c\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_m}^2)}_{\text{cross-terms}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, τ_m 为延迟时间变量, $f_{\tau_m}^2$ 为关于 τ_m 的频率变量和 $\delta(\cdot)$ 为狄拉克 δ 函数. $\text{CPF}_{l,c\text{-terms}}(t_m; f_{\tau_m}^2)$ 表示傅里叶变换

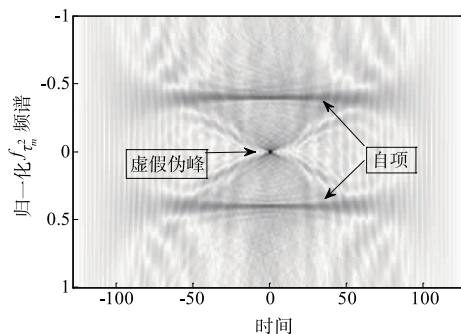
(Fourier Transform, FT)操作后的交叉项.由式(11)可知, LFM 信号的能量在 $(t_m, f_{\tau_m}^2)$ 域内沿着 $f_{\tau_m}^2 = 2b_{k,2}$ 直线聚集.

然而,对多成分 LFM 信号而言, CPF 的非线性特性将导致交叉项和虚假伪峰出现,使得参数估计性能急剧下降;从而如何抑制交叉项和虚假伪峰是一个亟待解决的问题.图 3(a) 给出两成分的 LFM 信号的 CPF, 其仿真参数为 $\sigma_1 = 1, \sigma_2 = 1, (b_{1,0}, b_{1,1}, b_{1,2}) = (2, 0.5, 2 \times 10^{-3}), (b_{2,0}, b_{2,1}, b_{2,2}) = (-2, 1, -2 \times 10^{-3})$, 可以看出, 自项能量分别沿直线 $f_{\tau_m}^2 = 2b_{1,2}$ 和 $f_{\tau_m}^2 = 2b_{2,2}$ 分布, 出现一个强的虚假伪峰点, 且交叉项杂乱地分布在 $(t_m, f_{\tau_m}^2)$ 域内. 因此, 在多成分 LFM 信号参数估计时, 必须首先抑制交叉项和虚假伪峰.

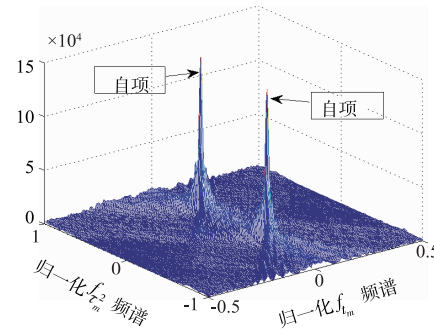
利用自项能量沿平行于时间轴分布这一特性, 文献[12, 13] 分别提出了乘积型 CPF(PCPF) 和积分型 CPF(ICPF) 两种算法来抑制交叉项和虚假伪峰. 但这两种方法只利用了部分自项能量, 且都是非相干积累的; 因此, 噪声抑制能力有限. 针对以上两种算法的不足, 在文献[14] 中我们通过进一步挖掘同时利用信号的幅度和相位信息, 提出一种相干积累的 CPF(CICPF) 算法^[14]. 对式(11)进行 CICPF 变换可得

$$\begin{aligned} \text{CICPF}(f_{t_m}; f_{\tau_m}^2) &= \Gamma_{t_m}[\text{CPF}(t_m; f_{\tau_m}^2)] \\ &= \underbrace{\sum_{k=1}^K \sigma_k^2 \exp(j4\pi b_{k,0}) \delta_{\tau_m^2}(f_{\tau_m}^2 - 2b_{k,2}) \delta_{t_m}(f_{t_m} - 2b_{k,1})}_{\text{auto-terms}} \\ &\quad + \underbrace{\text{CICPF}_{l,c\text{-terms}}(f_{t_m}; f_{\tau_m}^2)}_{\text{cross-terms}} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, Γ_{t_m} 为 CICPF 操作, f_{t_m} 为关于 t_m 的频率变量; 由式(12)可知, 在经过 CICPF 处理后, 各散射体自项能量在 $(f_{t_m}, f_{\tau_m}^2)$ 平面内 $(2b_{k,1}, 2b_{k,2})$ 处聚焦为一个高分辨的强点, 而交叉项和虚假伪峰得到有效抑制, 如图 3(b) 所示, 根据强点位置即可得到 LFM 信号参数估计值. 由于 CICPF 是一种相干积累操作, 因此, CICPF 进一步提高了输出 SNR, 为低 SNR 下平动多项式参数估计提供了一个好的选择.



(a) 两成分 LFM 信号的 CPF



(b) 两成分 LFM 信号的 CICPF

图3 两成分 LFM 信号的 CPF 和 CICPF

3.3 基于 PD-KT 和 CICPF 的平动补偿和 ISAR 成像

基于上述分析,本节给出一种基于 PD-KT 和 CICPF 的低 SNR 环境下平动补偿和 ISAR 成像方法.详细的实现步骤如下所示

(1) 将回波数据转换到距离频域-方位时域,移除距离调制项,得到回波信号,如式(3)表示;

(2) 对回波信号进行 PD 和 KT,将运动目标的所有散射体能量聚集在同一个距离单元,然后沿距离频率进行逆 FT 获得信号,如式(9)所示;

(3) 检测散射体能量所在的距离门.根据步骤(2)可知,所有散射体有能量所在的距离单元的能量远远大于其他距离单元的能量;因此,只要进行简单的幅度检测就能找到相应的距离门,其可以表示为

$$R_{\text{Gate}} = \arg \max_{t_m} \sum_{t_r} |s_{\text{PD-KT}}(t_r; t_m)| \quad (13)$$

(4) 对所有散射体能量所在的距离门数据 $s_{\text{PD-KT}}(R_{\text{Gate}}; t_m)$ 进行 CICPF 操作,得到 CICPF 输出为 $\text{CICPF}(f_{t_m}; f_{\tau_m}^z)$,如式(12)所示;然后通过峰值检测即可得到估计的平动系数 b_1 和 b_2

$$[f_{t_m} = 2b_1; f_{\tau_m}^z = 2b_2] = \arg \max_{f_{t_m}, f_{\tau_m}^z} |\text{CICPF}(f_{t_m}, f_{\tau_m}^z)| \quad (14)$$

根据估计系数 b_1 和 b_2 以及式(9),很容易获得运动目标的平动加速度 α 和加速度率 β

$$\hat{\alpha} = -\frac{\lambda}{8b_1 T_{\text{RFT}}}; \hat{\beta} = -\frac{\lambda}{12b_2 T_{\text{RFT}}^2} \quad (15)$$

(5) 根据估计获得的 α 和 β 值,运用 Dechirp 技术对原始回波数据进行解调处理,补偿目标平动中加速度的影响.

(6) 利用 KT 移除剩余的线性平动项;然后,沿方位时间和距离频率进行二维快速 FT,则可以聚焦良好的 ISAR 图像.

基于以上给出的平动补偿和 ISAR 成像过程,详细的算法实现流程图如图 4 所示.

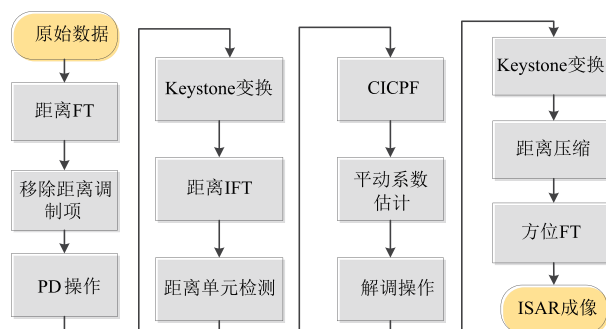


图4 提出算法的实现流程图

3.4 计算复杂度分析

在这部分,我们将分析提出方法的计算复杂度,并

与传统基于相邻脉冲相关的平动补偿方法 MCRA^[3],以及最新提出的自适应平动补偿算法 IQEM-PSO^[9] 进行比较.假设距离维采样点数为 N_r ,方位维采样点数为 N_a 和插值核长度为 N_{ker} .则 MCRA 方法^[3] 的计算复杂度为

$$C_{\text{MCRA}} = O(4N_a N_r \log_2 N_r + N_r N_a \log_2 N_a + 2N_r N_a) \quad (16)$$

文献[9]提出的自适应平动补偿算法 IQEM-PSO 总的计算复杂度由粗估计和精细估计二步构成,其总的计算复杂度为

$$C_{\text{IQEM-PSO}} = O(P_{\text{final}} I_p e_{\text{max}} N_a N_r (\log_2 N_a + \log_2 N_r) + N_a N_r \log_2 N_r + \sum_{P=1}^{P_{\text{final}}} N_a P^2) \quad (17)$$

其中, P_{final} 是最终确定的平动多项式的阶数, I_p 粒子数, e_{max} 为最大迭代次数.

根据图 4 提出的算法实现流程图,提出的平动补偿方法总共需要 $3N_a$ 次 N_r 维快速 FT (FFT), $2N_r$ 次 N_a 维 FFT, N_r 次 N_a 维非均匀 FFT; 以及两次 KT, 其相应的计算复杂度为 $4(2N_{\text{ker}} - 1)N_a N_r$, 和 $4N_a N_r$ 次复数乘法.因此,提出的算法总的计算复杂度为

$$C_{\text{proposed}} = O(3N_a N_r \log_2 N_r + 3N_r N_a \log_2 N_a + 4N_r N_a + 4(2N_{\text{ker}} - 1)N_a N_r) \quad (18)$$

根据式(16),式(17)和式(18)可知,MRCA 方法的计算复杂度最低;虽然 IQEM-PSO 方法能够在低 SNR 环境下实现平动补偿,但由于其在估计平动系数时需要多维搜索;因此,计算复杂度是三种方法中最高的.提出的方法计算复杂度略微大于 MRCA 方法,但远低于 IQEM-PSO 方法由于避免了多维搜索,并且能在低 SNR 下保持良好的平动补偿性能;因此,本文提出的方法在工程实现中具有一定的优势.

4 实验结果与分析

为了验证本文提出算法的有效性,参照文献[9]的算法验证方法,用 Yak-42 飞机的实测数据来生成不同 SNR 环境下的验证数据,其仿真加入的平动三阶多项式系数为 $[v, \alpha, \beta] = [10.24, 4.92, -0.63]$. 实测数据采集的雷达系统工作在 C 波段(5.52GHz),发射信号带宽为 400MHz,脉冲宽度为 25.6 μ s,脉冲重复频率为 100Hz.

图 5(a) 给出了 SNR = 5dB 下直接距离压缩后目标平动轨迹.在下文中,图 5(b) ~ (d) 分别描述了本文提出的方法的处理结果,验证了提出方法的有效性.由图 5(b) 可知,经过 PD 和 KT 处理后, Yak-42 飞机的所有散射体的能量几乎完全聚集到同一距离门内.然后,运用 CICPF 将所有散射体的能量相干积累到一个强点,如图 5(c) 所示;在二维平面内通过一个简单的峰值检测就可获得平动系数.用估计获得的平动系数对原始回波数据进行 Dechirp 解调和 KT 处理,则实现了对距

离包络对齐. 最后, 对平动补偿后的数据进行方位 FT 即可获得聚焦良好的 ISAR 图像, 如图 5(d) 所示.

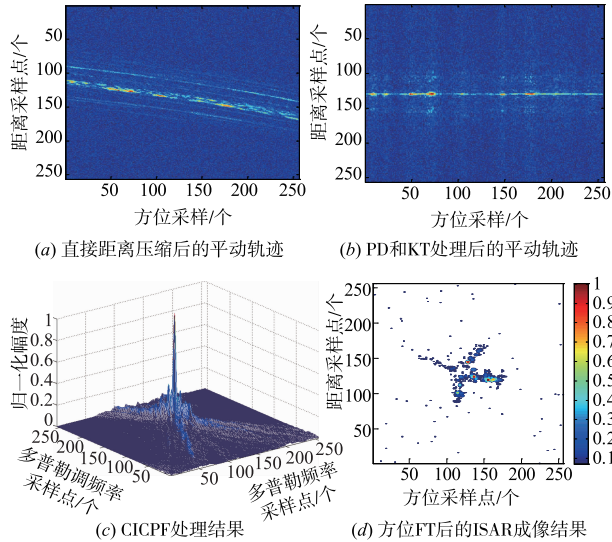


图5 提出方法平动补偿和ISAR成像结果

为了验证提出算法在低信噪比下成像性能, 图 6 ~ 图 8 中给出了在输入 SNR = 0dB, -5dB 以及 -10dB 下, MCRA 方法^[3], IQEM-PSO 方法^[9] 和本文提出的算法的平动补偿和 ISAR 成像结果. 图 6(a) ~ (c) 给出了不同 SNR 环境下, 用 MCRA 平动补偿方法得到的 ISAR 图像; 可以看出, 由于在低 SNR 环境下破坏了相邻脉冲的

相干特性, 得到的 ISAR 图像随着 SNR 变低越来越差. 图 7(a) ~ (c) 为 IQEM-PSO 方法的成像结果, 由于利用了距离和方位的二维相干增益, 当 SNR 为 0dB 和 -5dB 的时候, IQEM-PSO 方法能得到聚焦良好 ISAR 图像, 如图 7(a) 和图 7(b) 所示; 然而, 当输入 SNR 为 -10dB 时, 其距离包络完全淹没在强噪声里, 且 IQEM 作为代价函数已不能正确的估计平动多项式系数; 因此, 当 SNR 低至 -10dB 时, IQEM-PSO 方法不能获得聚焦良好的 ISAR 图像, 如图 7(c) 所示. 而本文提出方法在估计平动多项式系数时不仅利用了距离和方位二维相干积累增益, 也同时利用了成像目标上所有散射体能量; 因此, 本文在三种不同 SNR 环境下均能获得聚焦良好的 ISAR 图像, 如图 8(a) ~ (c) 所示, 充分验证了本文所提算法在低 SNR 环境的性能. 为定量的评估本文算法, 引入信息熵作为各算法成像质量好坏的一个判决标准, 熵值越低则成像质量越好^[14], 反之, 亦然. 根据表 2 中各成像算法的图像信息熵可以看出, 在低信噪比环境下, 本文提出的方法同样优于其他算法.

表 2 各算法信息熵对比

SNR	0dB	-5dB	-10dB
MCRA 方法 ^[3]	9.8326	10.5599	10.7211
IQEM-PSO 方法 ^[9]	9.7459	10.3760	10.7528
提出的方法	9.6891	10.2901	10.4806

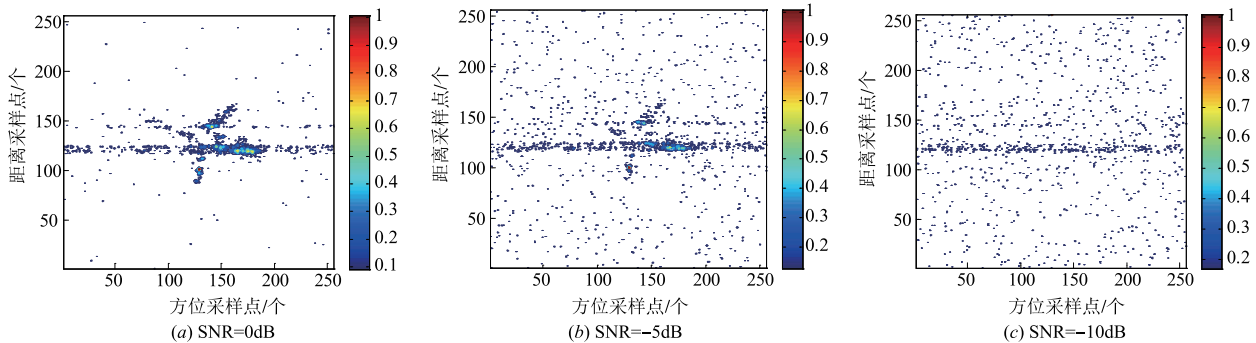


图6 传统MCRA方法^[3]ISAR成像结果

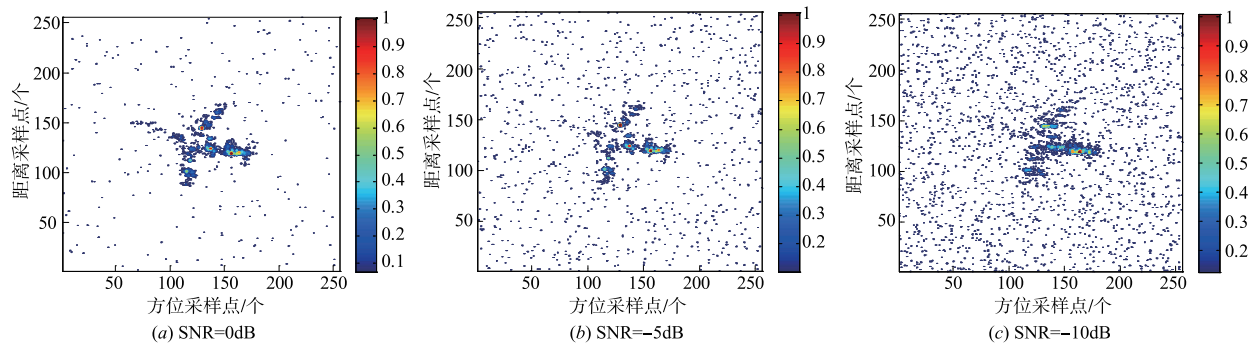


图7 IQEM-PSO方法^[9]ISAR成像结果

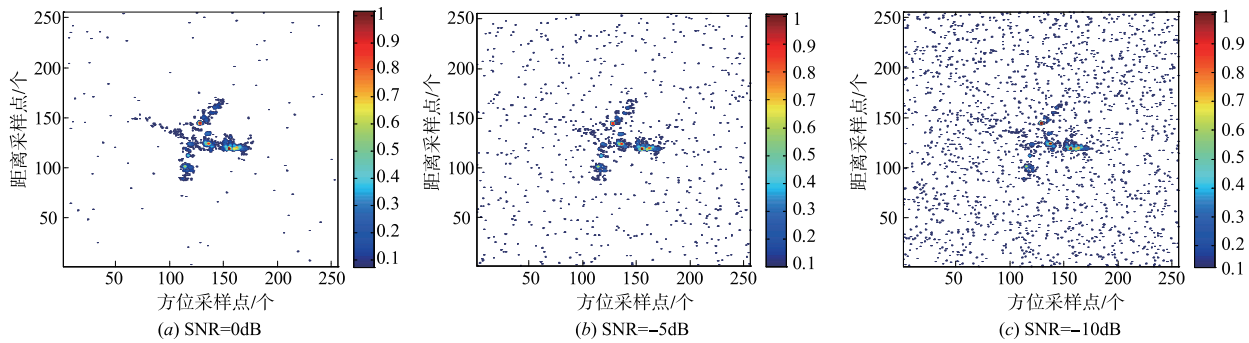


图8 本文提出的方法ISAR成像结果

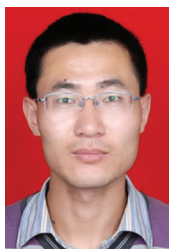
5 结论

本文提出了一种稳健的低 SNR 下平动补偿方法. 首先将距离平动历程模为一个多项式相位信号; 在此基础上, 运用 PD 和 KT 将所有散射体的能量集中到一个距离单元内; 然后, 运用 CICPF 方法将同一距离单元内的散射体能量集中到一个强点来进一步提高输出信噪比, 进而在低 SNR 环境下实现平动多项式系数的精确估计. 最后, 从计算复杂性和输出 SNR 角度对本文提出的方法和现有方法进行了对比分析, 并通过实测数据验证了提出的方法的有效性.

参考文献

- [1] Wang Y, Lin Y. ISAR imaging of non-uniformly rotating target via range instantaneous Doppler derivatives algorithm [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 7(1): 167 - 176.
- [2] Li D, Liu H, Gui X, et al. An efficient ISAR imaging method for maneuvering target based on Synchrosqueezing transform [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1317 - 1320.
- [3] Chen C, Andrews H. Target motion induced radar imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, 16(1): 2 - 14.
- [4] Wang J, Liu X. Improved global range alignment for ISAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 39(1): 351 - 357.
- [5] Wang J, Liu X. Improved global range alignment for ISAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 39(1): 351 - 357.
- [6] Zhu D, Wang L, Yu Y, et al. Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 204 - 208.
- [7] 刘志凌, 廖桂生, 杨志伟. 低信噪比条件下一种迭代加权拟合的 ISAR 包络对齐方法 [J]. 电子学报, 2012, 40(4): 799 - 804.
- [8] Liu Z, Liao G, Yang Z. An iterative weighted fitting method for ISAR envelope alignment under low SNR [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(4): 799 - 804 (in Chinese).
- [9] Zhang L, Sheng J L, Duan J, et al. Translational motion compensation for ISAR imaging under low SNR by minimum entropy [J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 2013, 2013(1): 33.
- [10] Liu L, Zhou F, Tao M, et al. Adaptive translational motion compensation method for ISAR imaging under low SNR based on particle swarm optimization [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(11): 5146 - 5157.
- [11] Barbarossa S, Scaglione A, Giannakis G. Product high-order ambiguity function for multicomponent polynomial-phase signal modeling [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 46(3): 691 - 708.
- [12] Zhu D, Li Y, Zhu Z. A Keystone transform without interpolation for SAR ground moving-target imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 18 - 22.
- [13] Wang P, Yang J. Multicomponent chirp signals analysis using product cubic phase function [J]. Digital Signal Processing, 2006, 16(6): 654 - 669.
- [14] Wang P, Li H, Djurović I, et al. Integrated cubic phase function for linear FM signal analysis [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(3): 963 - 977.
- [15] Li D, Gui X, Liu H, et al. An ISAR imaging algorithm for maneuvering targets with low SNR based on parameter estimation of multicomponent quadratic FM signals and non-uniform FFT [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(12): 5688 - 5702.

作者简介



李 东 男,1983 年生于内蒙古商都. 重庆大学飞行器测控与通信中心副教授,. 研究方向为 SAR/ISAR 成像算法设计, 动目标检测及参数估计等.

E-mail: lidongcuit@126.com



赵 婷 女,1993 年生于重庆忠县. 重庆大学飞行器测控与通信中心硕士研究生, 研究方向为 ISAR 成像算法设计以及参数估计.

E-mail: zzting410@163.com



宋 伟 男,1993 年生于湖北赤壁. 重庆大学飞行器测控与通信中心硕士研究生, 研究方向为 SAR 干扰抑制.

E-mail: blackiesong@163.com