

# 低信噪比条件下一种迭代加权拟合的 ISAR 包络对齐方法

刘志凌, 廖桂生, 杨志伟

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘要:** 针对低信噪比条件下传统包络对齐算法性能下降问题, 提出基于迭代加权最小二乘拟合的逆合成孔径雷达(ISAR)包络对齐方法(ICWLS; Iterative Cleaning and Weighted Least Squares). 该方法利用目标的平稳运动特性, 对目标走动量和加权矩阵采用迭代交替更新方式, 在估计出目标运动参数的基础上实现包络对齐. 仿真结果表明所提方法能有效抑制突跳误差的传播和缓解积累误差所导致的参数估计精度下降问题, 具有良好的包络对齐性能.

**关键词:** 逆合成孔径雷达; 包络对齐; 加权最小二乘; 迭代更新

**中图分类号:** TN957.51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 04-0799-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.04.029

## A Range Alignment Method with Iterative Weighted Least Squares Fitting for ISAR Under Low SNR

LIU Zhi-ling, LIAO Gui-sheng, YANG Zhi-wei

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

**Abstract:** To deal with the degradation of the conventional range alignment algorithm under low SNR, an ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) range alignment method is proposed based on iterative weighted least squares fitting. Utilizing the stationary moving characteristic of the target, the proposed method make alternatively iterative update of both the range migration and the weighted matrix, thus realizing the range alignment based on the estimation of the parameters of the target motion. The simulation demonstrates that the proposed method can effectively restrain the transmission of the jump error and relieve the decline of the parameter estimation precision caused by the drift error, which shows a good performance in range alignment.

**Key words:** ISAR; range alignment; weighted least squares; iterative update

### 1 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)利用雷达和目标的相对运动获得方位向高分辨率<sup>[1]</sup>, 是雷达成像的重点发展方向之一, 在战略防御、反卫星、战术武器以及雷达天文学中有着重要的应用价值. 运动补偿是 ISAR 成像技术中的关键步骤, 分为包络对齐和初相校正两步, 而包络对齐是初相校正的基础. 传统的包络对齐方法有最小熵法<sup>[2~4]</sup>、相关法<sup>[5~10]</sup>和基于向量范数的包络对齐法<sup>[11]</sup>等. 其中相关法的应用较为广泛, 根据算法实现时参与求相关的脉冲不同可以分为互相关法<sup>[5~7]</sup>、积累相关法<sup>[8,9]</sup>和全局最优法<sup>[10]</sup>等.

以天基雷达监视空间目标为例, 由于星载雷达发射功率孔径积受限, 作用距离远(几百公里~几千公里), 导致回波信噪比低, 上述传统包络对齐算法均基于回波包络的相关性, 没有充分利用目标的运动特性, 在低信噪比条件下易受突跳误差和积累误差影响, 包络对齐误差增大. 事实上, 目标在较短的观察期间内通常具有平稳运动特性, 采用多项式拟合回波包络走动量能有效提高对齐精度. 文献[12, 13]提出一种整体包络对齐(Global Range Alignment, GRA)算法, 通过衡量已对齐回波包络和的锐化程度估计多项式系数, 该方法需要多次循环搜索和小范围寻优, 运算量大; 文献[14, 15]采用粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)求解拟合多项式系数, 避免参数估计陷入局部最优, 但需要局部和整体寻

优,具有较高的运算复杂度.此外,文献[12~15]没有考虑剔除突跳误差,事实上,存在突跳误差的情况下,拟合多项式的参数估计精度将会受到较大影响.

本文针对低信噪比条件下传统包络对齐算法性能下降问题,提出基于迭代加权最小二乘拟合的逆合成孔径雷达(ISAR)包络对齐方法.该方法利用目标的平稳运动特性,对目标走动量和加权矩阵采用迭代交替更新方式,在估计出目标运动参数的基础上实现包络对齐.仿真结果表明所提方法能有效抑制突跳误差的传播和缓解积累误差所导致的参数估计精度下降问题,具有良好的包络对齐性能.

## 2 信号模型

平稳运动目标在观测时间内相对雷达的运动可以近似为直线运动.如图1所示,目标以速度  $V_t(t)$  沿  $U$  轴作直线运动,为分析方便,设目标近似作匀速直线运动,即  $V_t(t) \approx V_t$ .

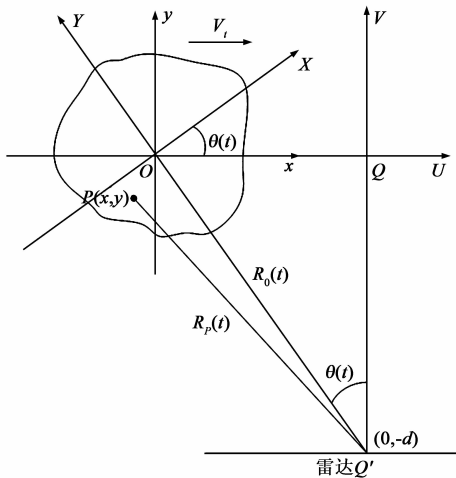


图1 直线运动目标几何示意图

设雷达发射线性调频信号,则回波信号  $s_R(\hat{t}, t_m)$  为各散射点回波信号的叠加,混频后为:

$$s_R(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^Q A_i \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - t_{ri}}{T_p}\right) \exp(-j2\pi f_0 t_{ri}) \exp\left[\frac{1}{2} k (\hat{t} - t_{ri})^2\right] \quad (1)$$

其中,  $Q$  为目标散射点个数,  $A_i$  为第  $i$  个散射点的振幅,  $T_p$  为时宽,  $f_0$  为中心频率,  $k$  为调频率,  $\hat{t} = t - t_m$  为快时间,  $t_m = mT$  为慢时间,  $T$  为脉冲重复周期,  $m$  为整数,  $t_{ri} = \frac{2}{c} R_i(t_m)$  为第  $i$  个散射点回波时延,  $c$  为光速. 由于目标散射点的回波是独立相加的,可以先分析上图中散射点  $P$  的回波时延  $t_{rp} = \frac{2}{c} R_p(t_m)$ , 根据图中几何关系可得:

$$R_p(t_m) = \sqrt{R_0^2(t_m) + x^2 + y^2 - 2xR_0(t_m)\sin\theta(t_m) + 2yR_0(t_m)\cos\theta(t_m)} \quad (2)$$

如果  $R_0(t_m)$  远远大于目标尺寸,则式(2)近似为:

$$R_p(t_m) \approx R_0(t_m) - x\sin\theta(t_m) + y\cos\theta(t_m) \quad (3)$$

当  $\theta(t_m)$  很小时,  $\cos\theta(t_m) \approx 1$ ,  $\sin\theta(t_m) \approx \frac{V_t t_m}{d} =$

$\Omega t_m$ ,  $\Omega = \frac{V_t}{d}$ , 此时有:

$$R_p(t_m) \approx R_0(t_m) - x\Omega t_m + y \quad (4)$$

其中,  $R_0(t_m) = \sqrt{d^2 + (V_t t_m)^2}$ , 将  $R_0(t_m)$  泰勒展开并忽略高次项可得:

$$R_0(t_m) = R_0(t_0) + \sum_{n=1}^M \frac{R_0^{(n)}(t_0)}{n!} (t_m - t_0)^n \quad (5)$$

散射点方位向多普勒频率为  $f_d = \frac{2f_0}{c} x\Omega = \frac{2x\Omega}{\lambda}$ , 其中  $\lambda$  为对应  $f_0$  的波长,故散射点多普勒频率与其位置坐标  $x$  成正比,  $x\Omega t_m$  项决定方位向多普勒信息的同时还可能导致散射点越距离单元走动,各次回波中散射点沿距离向分布发生变化,使相距较远的两次回波包络相关性下降.

## 3 包络对齐

针对式(5)中  $R_0(t_m)$  产生的包络延时,传统包络对齐算法均利用回波包络的相关性对其进行估计和补偿.以相关法为例,互相关法利用相邻回波包络相关函数估计包络延时;积累相关法利用已对齐回波的包络加权和为参考计算待对齐回波的包络延时.在低信噪比条件下,相邻回波相关性大幅下降,互相关算法走动量估计会产生突跳误差和积累误差;积累相关法可以抑制突跳误差和积累误差的影响,但是对于复杂目标,多散射点越距离单元走动导致目标散射点结构随观测视角变化,使得单次脉冲与脉冲加权和的相关性降低,进而导致走动量估计精度下降.事实上,利用目标参考点相对于雷达的平稳运动特性,可以对包络走动量进行多项式拟合,在估计出目标运动参数的基础上实现包络对齐.

记采用互相关法计算的相邻回波走动量为  $\delta = [\delta_{12}, \delta_{23}, \dots, \delta_{(N-1)N}]^T$ , 其中  $N$  表示回波脉冲数.相应地,以第1次回波为参考,各次回波的绝对走动量为  $D = [D_1, D_2, \dots, D_N]^T$ , 能够用  $M$  阶多项式近似,即:

$$D = T \cdot \theta \quad (6)$$

其中  $D_n = \sum_{i=2}^n \delta_{(i-1)i}$ ,  $n = 2, \dots, N$  且  $D_1 = 0$ ,  $T = [t_m^M \ t_m^{M-1} \ \dots \ \mathbf{e}]$ ,  $t_m = [t_1, \dots, t_N]^T$ ,  $\mathbf{e} = [1, \dots, 1]^T$ ,  $\theta = [\theta_M, \theta_{M-1}, \dots, \theta_1, \theta_0]^T$  为多项式的系数向量.特别地,在

误差独立同分布条件下,基于最小二乘的多项式系数向量估计值  $\hat{\theta}_{LS}$  为:

$$\hat{\theta}_{LS} = (T^T T)^{-1} T^T D \quad (7)$$

事实上,一方面考虑相邻走动量  $\delta$  的估计误差虽然相互独立,但是绝对走动量由  $\delta$  累加得到,  $D$  的估计误差具有相关特性;另一方面,低信噪比条件下互相关法可能存在突跳误差,进而导致较大的积累误差,使得最小二乘的性能恶化.为此本文从两个方面着手提出一种综合解决途径:通过对可能存在较大误差的包络走动量估计值施加惩罚,即采用加权最小二乘拟合来提高相关误差条件下的参数估计精度;通过采用自适应误差剔除处理来降低突跳误差对多项式参数估计的影响.具体实现流程如图 2 所示.

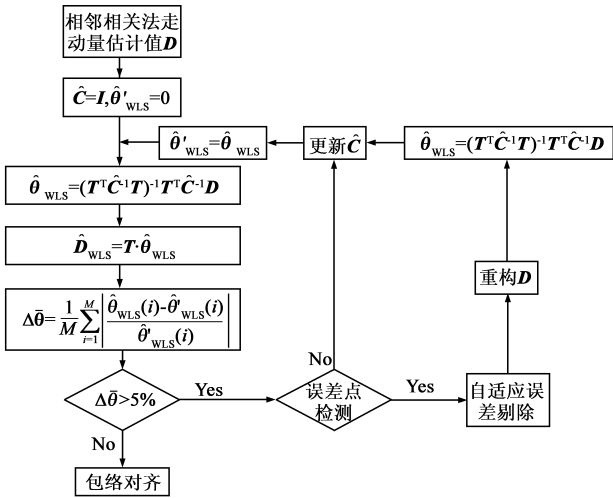


图2 基于迭代加权拟合的包络对齐方法流程

(1)对互相关法走动量估计值  $D$  进行加权最小二乘拟合,其中,  $\hat{C}$  为加权矩阵,初始值为单位阵  $I$ ,  $\hat{\theta}_{WLS}$  为  $\hat{\theta}_{WLS}$  前一次估计值,初始值为 0,且:

$$\hat{\theta}_{WLS} = (T^T \hat{C}^{-1} T)^{-1} T^T \hat{C}^{-1} D \quad (8)$$

(2)通过  $\hat{C}$  的更新和误差剔除操作对目标走动量  $D$  和拟合多项式系数  $\hat{\theta}_{WLS}$  进行迭代交替更新,直至拟合多项式系数平均变化量  $\Delta\bar{\theta}$  小于给定门限为止;

(3)计算走动量的加权拟合值  $\hat{D}_{WLS} = T \cdot \hat{\theta}_{WLS}$ ,并根据  $\hat{D}_{WLS}$  对各回波的包络走动进行补偿.

对加权矩阵  $\hat{C}$  的更新和自适应误差剔除两个核心步骤的具体描述如下:

(1) $\hat{C}$  的更新.最优加权矩阵为包络对齐误差的协方差矩阵,由于该矩阵未知,考虑根据相关函数锐化程度衡量数据潜在误差水平,并采用基于数据惩罚的加权最小二乘法计算  $\hat{\theta}_{WLS}$ ,抑制潜在大误差数据对参数估计的影响.因此,选择加权矩阵  $\hat{C}$  为对角形式,相应的主对角线权值按照式(9)计算:

$$w_i = p_i \cdot \frac{1}{m-n+1} \sum_{k=n}^m \sigma_k, 1 \leq n \leq i \leq m \leq N \quad (9)$$

其中,  $\sigma = |D - T \cdot \hat{\theta}_{WLS}|$  为最小二乘拟合误差绝对值,  $\sigma = [\sigma_1, \dots, \sigma_N]^T$ ,  $m, n$  为相邻分界点,认为相邻分界点之间绝对走动量估计误差水平近似相当,施以相同权值,  $p_i$  为惩罚因子,对平均误差水平过高的区间加重惩罚.分界点和惩罚因子的具体计算方法为:记  $R_{k(k+1)}(n)$ ,  $k=1, \dots, N-1$  为相邻回波相关函数,  $H(k) = -\sum_j h_j \log h_j$  为函数值序列的熵,其中  $h_j = R_{k(k+1)}(j) / \sum_j R_{k(k+1)}(j)$ ,  $H$  的均值为  $\mu_\eta$ ,标准差为  $\sigma_\eta$ .熵值越小,相关函数越尖锐,走动量估计精度越高,若  $H(k) - \mu_\eta > 2\sigma_\eta$ ,则  $k$  为分界点;确定分界点后,计算各区间的惩罚因子,其中

$$\bar{H} = \frac{1}{m-n+1} \sum_{k=n}^m H(k);$$

$$p_i = \begin{cases} \frac{\bar{H}}{\mu_\eta}, & \bar{H} - \mu_\eta > \sigma_\eta, 1 \leq n \leq i \leq m \leq N \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

(2)误差剔除.平稳运动目标相邻回波走动量缓变,走动量的变化量在均值附近集中分布,若变化量偏离均值较远,相应走动量估计值可能存在突跳误差.由  $\hat{D}_{WLS}$  得对应相邻走动量  $\hat{\delta} = [\hat{\delta}_{12}, \hat{\delta}_{23}, \dots, \hat{\delta}_{(N-1)N}]^T$ ,设  $\Delta\delta = [\Delta\delta_{12}, \Delta\delta_{23}, \dots, \Delta\delta_{(N-1)N}]^T$ ,其中  $\Delta\delta_{(i-1)i} = \hat{\delta}_{(i-1)i} - \hat{\delta}_{(i-1)i}$ ,  $i=2, \dots, N$ ,且  $\Delta\delta$  标准差  $\text{std}(\Delta\delta) = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=2}^N (\Delta\delta_{(i-1)i} - \Delta\bar{\delta})^2}$ ,其中  $\Delta\bar{\delta} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N \Delta\delta_{(i-1)i}$ ,若  $|\Delta\delta_{(k-1)k}| > 3 \cdot \text{std}(\Delta\delta)$ ,则认为  $\delta_{(k-1)k}$  存在突跳误差,并用拟合值  $\hat{\delta}_{(k-1)k}$  替换  $\delta_{(k-1)k}$ .

采用本文方法进行走动量估计的计算量集中在对  $\hat{\theta}_{WLS}$  的求解及对  $\hat{C}$  的更新,设拟合多项式阶数为  $M$ ,回波脉冲数为  $N$ ,距离向采样点数为  $L$ ,并对单次迭代的计算量分析如下:

(1)求解  $\hat{\theta}_{WLS}$  的计算量:根据计算公式  $\hat{\theta}_{WLS} = (T^T \hat{C}^{-1} T)^{-1} T^T \hat{C}^{-1} D$ ,一般有  $N \gg M$  时,可得计算  $\hat{\theta}_{WLS}$  所需运算复杂度为  $o(N^3)$ ;

(2)更新  $\hat{C}$  的计算量:更新  $\hat{C}$  时计算量主要集中在对熵值  $H(k)$  的求解,其中  $k=1, \dots, N-1$ ,则根据相应计算公式可得更新  $\hat{C}$  所需的运算复杂度为  $o(NL^2)$ .

由上述分析可得本文方法单次迭代的运算复杂度约为  $o(N^3) + o(NL^2)$ .

经过上述操作,有望消除突跳误差并抑制积累误差的影响,在低信噪比条件下获得较高的包络对齐精度和较好的成像效果.仿真表明通常经过 2~3 次迭代估计,本文方法就可获得较好的结果.

## 4 仿真结果

以天基雷达监视空间目标为仿真背景,用本文方法对仿真数据进行成像处理,以验证其有效性.平稳运动目标在观测时间内相对雷达的运动可以近似为直线运动,设目标相对雷达作方位向平动,且雷达视线方向与目标相对运动速度方向处于同一平面内,相对运动速度为 10km/s,仿真时间中点目标与雷达距离为 200km,成像积累时间 1s,雷达载频 10GHz,信号带宽 600MHz,脉冲重复频率 1kHz.对于方位向平动目标,拟合多项式阶数  $M$  取 2~3 即可,本仿真中取  $M=2$ ,且回

波信号脉压后信噪比约为 5dB,分别用传统方法和采用迭代加权拟合的 ISAR 包络对齐方法对上述脉压信号进行运动补偿并成像.仿真结果中,LS 为最小二乘拟合,WLS 为加权最小二乘拟合,ICLS 为引入迭代自适应误差剔除的最小二乘拟合,ICWLS 为本文方法.

图 3 给出了采用不同方法的走动量估计误差曲线;图 4 是对应方法所得成像结果,同时采用图像方差和图像熵值作为评估成像效果的量化标准.其中方差能够反映图像对比度,通常方差越大,图像对比度越高;图像熵值反映图像强度分布的均匀程度,熵值越小,图像聚焦效果越好.

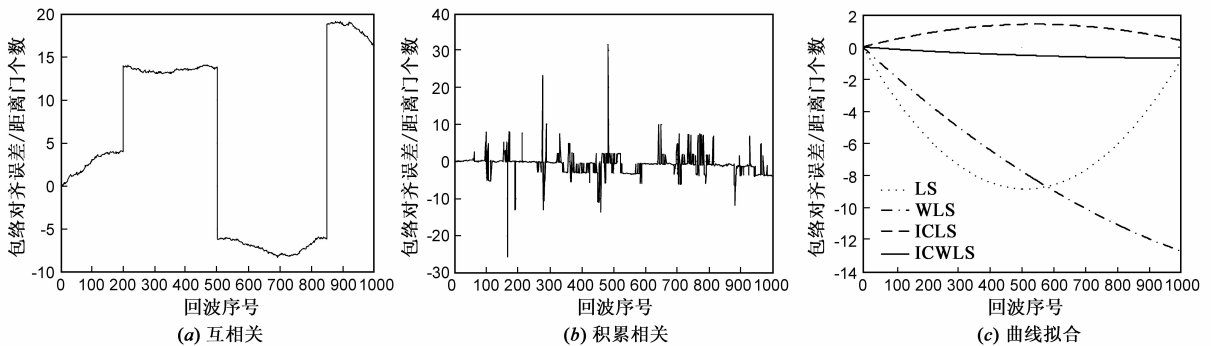


图3 低信噪比条件下不同方法包络对齐误差曲线(回波信号脉压后SNR=5dB)

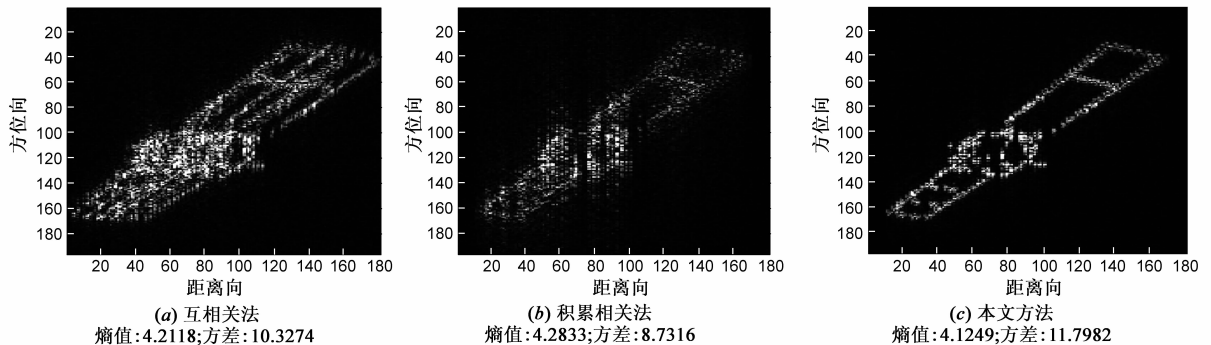


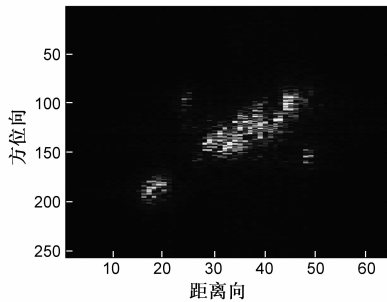
图4 不同方法成像结果

通过图 3、图 4 中的对比可知:存在突跳误差情况下,互相关法无法得到正确的成像结果;积累相关法可以在互相关法的基础上抑制突跳误差和积累误差,但由于单次走动量估计精度过低,成像效果并不理想;本文提出的采用迭代加权拟合的包络对齐方法能够在克服突跳误差的同时更好地抑制积累误差,大幅降低误差水平,在低信噪比条件下具有更高的走动量估计精度和更为稳健的处理性能,相比传统包络对齐算法成像质量得到显著提高.此外,图 4 中出现相邻相关法成像结果的对比度和聚焦效果优于积累相关法的情况,这是由于低信噪比条件下积累相关法的单次走动量估计精度低于互相关法,但积累相关法抑制了突跳误差的影响,从成像结果的直观判读效果来看,其整体性能仍然优于互相关法.

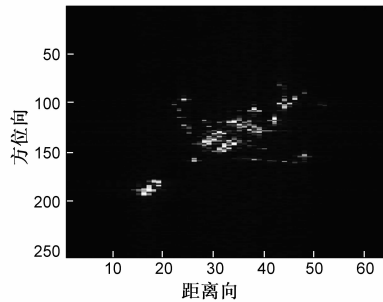
设  $\Delta = [\Delta_1, \dots, \Delta_N]^T$  为包络对齐误差,  $N$  为回波周期数,可用包络对齐误差的均方根值  $\bar{\Delta} = \sqrt{E[\Delta^2]}$  衡量其整体误差水平,其中  $E[\Delta^2] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i^2$ . 图 5 进一步给出采用 LS、ICLS 和 ICWLS 三种方法经 1000 次蒙特卡洛实验所获得的  $\bar{\Delta}$  随脉压后信噪比的变化曲线(由图 3 可知 WLS 方法误差过大,故不再作进一步分析).可以发现:在脉压后信噪比低于 4dB 时,LS 方法的包络对齐误差显著增大,无法完成包络对齐;相比 LS 方法而言,在低信噪比条件下 ICLS 方法和 ICWLS 方法均能有效缓解参数估计精度的恶化,表明自适应误差剔除步骤能有效检测出突跳,从而大幅提高低信噪比条件下的包络对齐精度;ICWLS 方法相比 ICLS 方法而言,在剔除突跳误差的同时通过加权最小二乘抑制积累误差,能够

进一步提高估计精度. 在脉压后信噪比为 4dB ~ 8dB 时, ICWLS 方法相比 ICLS 方法的包络对齐误差平均降低 20%. 当脉压后信噪比较高时, 例如大于 8dB, 几乎不存在突跳误差且相邻回波的相关特性趋于一致, ICWLS 方法中加权矩阵退化为单位阵, 三种方法具有相近的包络对齐误差.

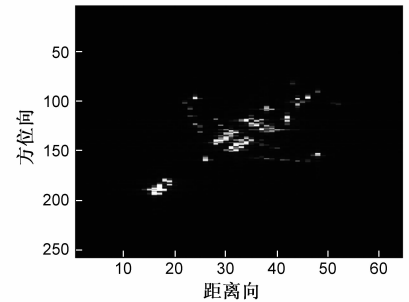
由于空间目标的 ISAR 实测数据难以获取, 这里采用地基雷达观测波音 727 飞机目标的实测数据来验证本文方法的有效性. 图 6 给出了采用互相关法、积累相关法和文中所提方法对波音 727 飞机实测数据进行包络对齐后的成像结果, 可以发现: 文中所提方法相比其它两种方法而言, 成像结



(a) 互相关法  
熵值: 3.4292; 方差: 4.4098



(b) 积累相关法  
熵值: 3.3447; 方差: 5.3473



(c) 本文方法  
熵值: 3.2215; 方差: 5.5710

图6 实测数据成像结果

## 5 结论

低信噪比条件下, 消除传统包络对齐算法的突跳误差并从整体上平滑、抑制积累误差是提高包络对齐精度的有效途径之一. 本文利用目标的平稳运动特性, 对目标走动量和加权矩阵采用迭代交替更新方式, 在估计出目标运动参数的基础上实现包络对齐, 有效抑制了突跳误差的传播并缓解了积累误差所导致的参数估计精度下降. 仿真结果表明本文方法具有良好的包络对齐性能, 在低信噪比条件下仍可以获得较好的成像结果. 本文方法基于数据惩罚构造加权矩阵且采用对角形式, 可显著提高包络对齐精度, 但尚未达到最优; 若观测时间内目标相对雷达的运动不能近似为直线运动, 则拟合多项式阶数未知. 如何获取最优加权矩阵及自适应确定拟合多项式阶数有待进一步分析研究.

## 参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[D]. 北京: 电子工业出版社, 2006. 1 - 18.
- [2] 王根原, 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, 26(6): 5 - 8.

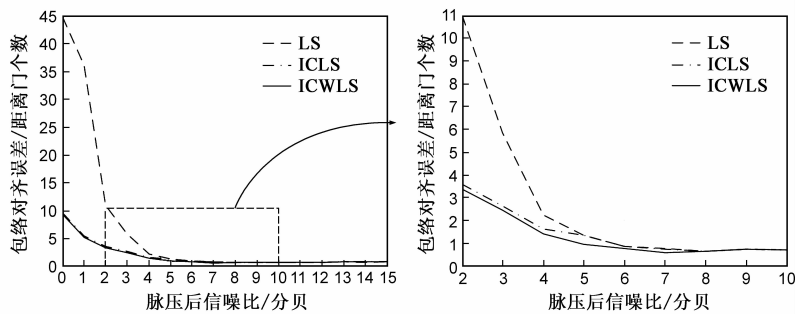


图5 包络对齐误差均方根值随脉压后信噪比变化曲线

果的直观判读效果更好; 同时文中所提方法具有最小的图像熵值和最大的图像对比度, 能够明显提高成像质量.

Wang Gen-yuan, Bao Zheng. A new algorithm of range alignment in ISAR motion compensation[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(6): 5 - 8. (in Chinese)

- [3] D Zhu, L Wang, Y Yu, Q Tao, Z Zhu. Rubust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 204 - 208.
- [4] H Liao, G Hu, J Xiang, S Peng. A fast range alignment approach for ISAR imaging based on minimum entropy criterion [A]. Proceedings of the Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar[C]. NJ, USA: IEEE Press, 2007. 189 - 191.
- [5] Chen C C, Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, 16(1): 2 - 14.
- [6] 朱宇涛, 郁文贤, 粟毅. 一种基于 MIMO 技术的 ISAR 成像方法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1885 - 1894.
- Zhu Yu-tao, YU Wen-xian, SU Yi. An ISAR imaging method based on MIMO technique[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1885 - 1894. (in Chinese)
- [7] J Hu, W Jiang, Y Fu, X Li. A novel range alignment algorithm for ISAR [A]. Proceedings of the International Conference on Computer Engineering and Technology [C]. NJ, USA: IEEE

Press, 2010. 358 – 362.

- [8] Delisle G Y, Wu H Q. Moving target imaging and trajectory computation using ISAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3): 887-899.
- [9] M Liu, M Gao, X Fu. A novel range alignment algorithm for real time ISAR imaging[A]. Proceedings of the International Conference on Signal Processing[C]. NJ, USA: IEEE Press, 2007. 1 – 5.
- [10] 邢孟道, 保铮, 郑义明. 用整体最优准则实现 ISAR 成像的包络对齐[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1807 – 1811.  
Xing Meng-dao, Bao Zheng, Zheng Yi-ming. Range alignment using global optimization criterion in ISAR imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12A): 1807 – 1811. (in Chinese)
- [11] 邢孟道, 保铮. 一种逆合成孔径雷达成像包络对齐的新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(1): 93 – 96.  
Xing Meng-dao, Bao Zheng. A new method for the range alignment in ISAR imaging[J]. Journal of Xidian University, 2000, 27(1): 93 – 96. (in Chinese)
- [12] Wang J, Kasilingam D. Global range alignment for ISAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 351 – 357.
- [13] Wang J, Liu X. Improved global range alignment for ISAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1070 – 1075.
- [14] S Park, H Kim, K Kim. Segmentation of ISAR images of targets moving in formation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(4): 2099 – 2108.
- [15] S Peng, J Xu, Y Peng, J Xiang. Parametric inverse synthetic aperture radar manoeuvring target motion compensation based on particle swarm optimizer[J]. IET Radar Sonar Navigation, 2011, 5(3): 305 – 314.

## 作者简介



刘志凌 男, 1987 年 4 月生于安徽滁州. 现为西安电子科技大学信号与信息处理专业博士生, 主要研究方向为空间目标监视.  
E-mail: lzl\_good@sina.com



廖桂生 男, 1963 年 6 月生于广西桂林. 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, IEEE 会员. 主持和承担了国防 973 项课题、国家“863”高技术项目、国防科技预研、国家自然科学基金等科研任务, 其中获省部级科技进步奖一等奖 1 项、二等奖 2 项、三等奖 1 项. 1999 年获教育部跨世纪优秀人才基金, 2004 年入选国家人事部颁发的首批“新世纪百千万人才工程国家级人选”, 2008 年获国家杰出青年科学基金. 在国内外发表学术论文 160 余篇. 现主要从事雷达探测系统信号处理, 包括空时自适应处理, 天基预警和阵列信号处理等研究领域. E-mail: gsliao@xidian.edu.cn



杨志伟 男, 博士, 1980 年 9 月生于四川南充. 现为西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室副教授, 中国电子学会会员. 主持了国家自然科学基金、国防预研基金、博士点基金和中央高校基本科研业务费等科研任务. 主要从事阵列信号处理、空时极化自适应处理、地面运动目标检测和天基预警领域的研究.  
E-mail: zwyang@mail.xidian.edu.cn