

# ISAR 成象中包络对齐的幅度相关全局最优法<sup>1</sup>

王 琨 罗 琳

(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** 在 ISAR 成象运动补偿过程中, 运用幅度相关法进行包络对齐时, 以相邻的回波作为包络对齐的基准, 无法避免由于误差积累带来的漂移误差以及由于严重的闪烁现象带来的突跳误差。这些误差可以大到几个距离单元的长度。本文提出全局最优法, 考虑某次回波的偏移量时, 不只依据邻近的一次回波, 而以整个观测期的回波为依据, 从而避免了常规幅度相关法的漂移误差和突跳误差, 提高了包络对齐的精度, 减小了包络对齐时包络位置的漂移和突跳现象, 改善了 ISAR 成象质量。对实测数据的处理结果清楚地表明, 与常规方法相比, 本方法具有明显的优越性。

**关键词** 逆合成孔径雷达, 运动补偿, 全局最优, 幅度相关法

**中图分类号** TN958

## 1 前 言

运动补偿是 ISAR 成象的关键, 分为粗补偿和精补偿两步。目前人们对于精补偿所作的研究要多一些, 相继提出了孤立点聚焦、多点综合聚焦、散射中心聚焦等多种方法<sup>[1-3]</sup>。粗补偿即为包络对齐, 一般仍沿用 80 年代初提出的幅度相关法<sup>[4]</sup>, 即将相邻两次回波所得到的纵向距离单元作平移相关处理, 而以相关值最大作为对齐的准则。一次幅度相关对齐的误差一般不超过 0.1 ~ 0.2 个距离单元, 若全过程整体上能保持这样的精度, 可以满足 ISAR 成象的要求。由于幅度相关法以相邻回波为基准, 逐次比较获得距离单元的平移量, 这实质上是选取局部范围内的最优值。与相邻回波的相关性强并不说明与其它各次回波的相关性都强, 因而以幅度相关法获得的距离剖面的整体分布并非最优。经相关法处理后得到的包络位置往往存在因误差累积而产生的漂移, 有时还由于严重的闪烁现象使回波包络在少数几个(1 ~ 3 个)周期里突发性发生大的变化, 而使包络平移产生突跳。这两种误差有时可使总的对齐误差超过几个单元。包络对齐虽然是粗补偿, 但它是精补偿的基础, 以参差不齐排列的距离剖面划分成的距离单元, 不可能完成好的初相补偿。因而需要一种更加行之有效的包络对齐方法。本文提出了包络对齐的全局最优法; 给出了应用文中方法处理雅克-42 飞机实测数据所得的结果。

## 2 多变量全局寻优法

用于包络对齐的幅度相关法到最近提出的最小熵法, 包络对齐已经取得了相当大的进展。但是, 这些方法都是在一定范围内寻找局部最优解, 因而不可避免地会产生由于误差积累引起的漂移误差以及严重模型闪烁引起的突跳误差。为了提高包络对齐的精度, 改善粗补偿的效果本文提出一种多变量全局寻优的包络对齐方法。具体思想如下:

<sup>1</sup> 1996-12-03 收到, 1997-07-15 定稿

由于目标的散射点模型在成象的小观测角域里是不变的,但微小视角变化使散射点子回波的向量和有所改变,从而各次回波包络有起伏变化,但它们之间均有强的相关性。因此,考虑某次回波的偏移量时,不应只依据邻近的一次回波,而应以整个观测期的回波为依据。

构造目标函数,各次包络的偏移量为  $dx_i (i = 1, \dots, M)$ , 以第一个包络为基准,即  $dx_1 = 0$ , 其中  $M$  为用以作成象处理的回波次数。

$$J(dx_2, dx_3, \dots, dx_M) = \sum_{i=1}^M J_i(dx_i, dx_{i+1}, \dots, dx_M), \quad (1)$$

其中

$$J_i(dx_i, \dots, dx_M) = \sum_{j=i+1}^M \sum_{k=1}^N (m_{ik}(dx_i) - m_{jk}(dx_j))^2, \quad (2)$$

即使各次回波之间的距离和最小。这里  $N$  为一次回波中包含的距离单元数,  $m_{ik}(dx_i)$  为第  $i$  次回波平移  $dx_i$  后第  $k$  个距离单元的幅度。这实质上就是一个以包络偏移量为参数的多变量全局寻优的问题。

下面就全局寻优方法能够很好地解决包络漂移和突跳现象,提高包络对齐的精度,改善成象质量的机理作一简要说明。由于全局寻优法不仅考虑相邻两次回波的相关性,而是从整体上考虑所有回波间的相关性。因而,全局寻优法的稳健性强,受个别存在模型突变的回波的影响小,从而能够有效地避免由于模型突变带来的突跳误差。同时,由于不是逐次计算相邻回波间的相关系数,而是通盘考虑一次回波与其他各次回波间的相关性,从而避免了由于逐次相关所带来的包络漂移。

但是由于多参数的优化算法的运算量非常大,无法实际应用于包络对齐中。为了解决这一问题,我们将多维寻优问题转化为迭代的一维寻优问题。具体实现过程如下:

- (1) 初始化信号处理过程: 用幅度相关法得到的  $dx_i (i = 2, \dots, M)$  作为初值。
- (2) 对应某一  $dx_i (i = 2, \dots, M)$ , 令其余  $dx_j (j = 2, \dots, M; j \neq i)$  固定, 计算  $J(dx_2, dx_3, \dots, dx_M) = \sum_{i=1}^M J_i(dx_i, dx_{i+1}, \dots, dx_M)$ , 并且寻找全局最小值。
- (3) 根据 (2) 中最小值位置分别调整  $dx_i$  值。
- (4) 判断是否满足算法终止准则。如果不满足, 返回到步骤 (2); 否则, 结束算法。这里可以采用两种终止算法的准则:

- (1)  $|dx_i^k - dx_i^{k-1}| < \varepsilon$ , 即对齐误差小于给定的容许偏差。
- (2) 超过了给定的迭代次数。

一般取  $i$  从 2 变到  $M$ , 再迭代两到三次就可以收敛。

ISAR 成象主要的运算量集中在包络相关对准上, 一般要分别计算  $dx_i$  从  $-160$  单元到  $160$  单元时的包络相关值, 然后选取最大相关值对应的移动量作为平移量。利用 TMS320C40 信号处理芯片, 可在  $4.1s$  内完成常规算法的成象处理过程。在幅度相关全局最优法的迭代过程中, 就不需要有如此大的搜索范围, 一般取  $-10$  到  $10$  单元就能够满足精度要求。因而, 完成一次迭代需要  $1min$  的时间。如果利用多片 C40 并行处理, 完全可以在不足  $1min$  的时间内完成成象过程。

采用本文提出的一维多变量全局寻优方法, 不仅很好地克服了由于误差积累引起的漂移误差以及模型突变引起的突跳误差, 而且兼顾了实际应用中的运算量问题, 用于进行包络对齐能够取得很好的对齐精度。

### 3 实测数据处理结果

下面给出应用文中所述方法对我国实验 ISAR 雷达录取的雅克-42 飞机的实测数据进行处理的结果。

图 1(a) 所示为常规的幅度相关法进行包络对齐得到的距离剖面二维分布图, 图 1(b) 为采用全局寻优方法进行包络对齐后获得的距离二维分布图。从图 1(a)、1(b) 的比较可见, 前者存在误差达几个距离单元的慢漂移。而后者中明显的消除了包络漂移误差。对比两者的特显点单元情况, 图 1(b) 中幅度的归一化起伏方差最小的单元仅为  $\sigma^2 = 0.05$ , 而图 1(a) 的为  $\sigma^2 = 0.101$ 。

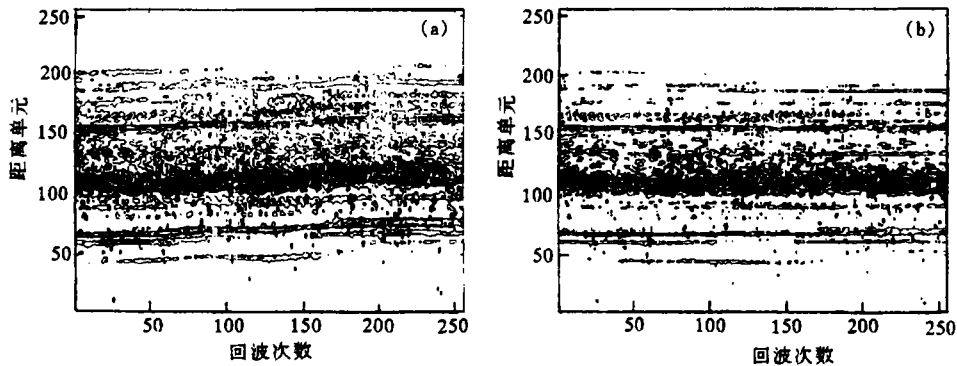


图 1 距离剖面二维分布图  
(a) 幅度相关方法 (b) 全局寻优方法

图 2 给出分别应用两种方法进行包络对齐后, 应用特显点法聚焦所得的成象结果。由于常规方法进行包络对齐时, 明显地存在包络位置的漂移, 因而图 2(a) 中所得的成象质量比较差; 图 2(b) 中是利用全局最优方法进行包络对齐后所得的成象结果, 由于此方法的包络对齐的精度高, 消除了包络位置的漂移现象, 成象质量明显提高。

我们也对原方法处理包络对齐存在突跳误差的情况, 用新方法进行处理, 发现新方法也能够取得很好的效果。图 3(a) 所示为常规的幅度相关法对数据进行包络对齐得到的距离剖面二维分布图, 图 3(b) 则给出应用多变量全局寻优法进行包络对齐获得的距离二维分布图。图 3(b) 中明显消除了包络突跳现象。

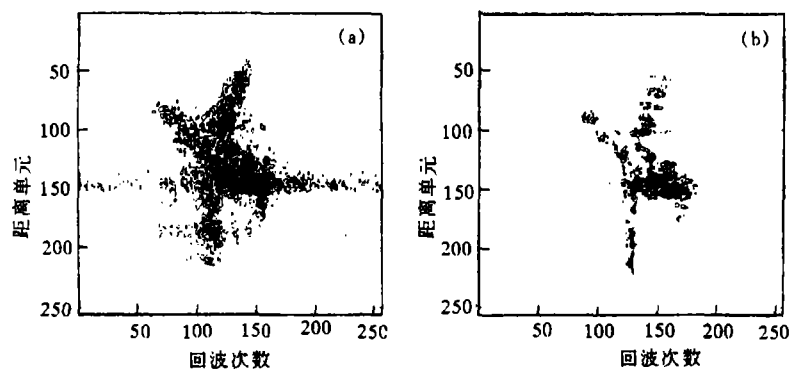


图2 成象结果比较  
(a) 幅度相关法 (b) 全局寻优方法

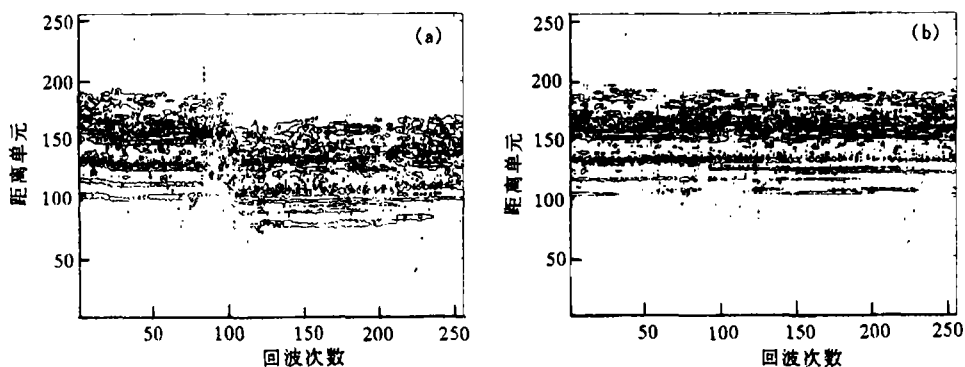


图3 距离剖面二维分布图  
(a) 幅度相关方法 (b) 全局寻优方法

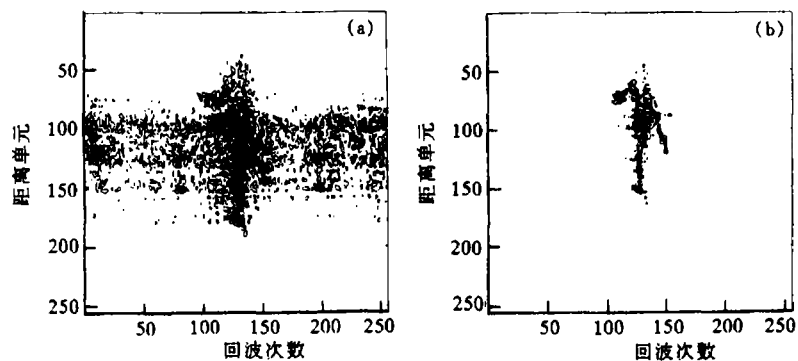


图4 成象结果比较  
(a) 幅度相关法 (b) 全局寻优方法

图4给出分别应用两种方法进行包络对齐后,应用特显点法聚焦所得的成象结果。由于幅度相关方法进行包络对齐时,明显地存在包络位置的突跳,因而图4(a)中所得的成象质

量差;图 4(b) 中是利用全局寻优方法进行包络对齐后所得的成象结果, 由于此方法稳健性强, 包络对齐的精度高, 消除了包络位置的突跳现象, 其成象质量明显提高。

## 4 结 论

本文提出的在 ISAR 成象中进行运动补偿过程时采用全局最优包络对齐的方法, 对齐的精度高, 与原有的幅度相关法比较, 避免了包络对齐的累积误差和突跳误差, 消除了常规方法包络对齐中发生的包络位置漂移和突跳的现象, 成象质量明显优于幅度相关方法。

## 参 考 文 献

- [1] 保 铮, 等. ISAR 成象处理中的一种运动补偿方法. 电子学报, 1992, 20(6): 1-6.
- [2] Bao Z, *et al.* Improvement of autofocus techniques for ISAR motion compensation. Chinese Journal of Electronics, 1995, 4(4): 1-8.
- [3] Steinberg B D. Radar imaging from a distorted array: The radio camera algorithm and experiment. IEEE Trans. on AP, 1981, AP-29(5): 740-748.
- [4] Chen C C, *et al.* Target-motion-induced radar imaging. IEEE Trans. AES, 1980, AES-16(1): 2-14.

## GLOBAL OPTIMUM METHOD FOR MOTION COMPENSATION IN ISAR IMAGERY

Wang Kun    Luo Lin

(*Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071*)

**Abstract** A method finding the global optimum value of misalignment is presented. It is used to increase the accuracy of range alignment. There exist the drift and jump errors when use the classical amplitude correlation method to align the envelope of the echoes. Sometimes, these errors are so great that they are as large as the width of several range bins. So the quality of image is badly affected. By using global optimum method, the range alignment is more accurate, the drift and jump phenomena of echo envelope are decreased and the quality of the image is improved. From the image result of real measured data, it can be seen that this method is much better than the classical method.

**Key words** ISAR, Motion compensation, Global optimum, Amplitude correlation

王 琨: 女, 1971 年生, 博士生, 研究方向为 ISAR 成象, 阵列信号处理.

罗 琳: 女, 1969 年生, 博士生, 研究方向为 ISAR 成象, 时频分布.