

文章编号: 1001- 2486(2007) 03- 0056- 05

ISAR 成像包络对齐性能评估*

肖 顺平, 魏建功, 冯德军, 王雪松
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 运动补偿是 ISAR 成像中的关键技术, 通常包括 包络对齐和相位补偿, 而包络对齐是相位补偿的基础。现有包络对齐方法较多, 在无法直观判断包络对齐效果的情况下, 需要进行定量评估, 以选择最优的对齐方法用于 ISAR 成像。提出基于距离单元方差的包络对齐评估方法: 以对齐后各距离单元方差的加权和作为评估指标, 对包络对齐结果直接进行评估。进行了相应的仿真实验, 结果证明了该评估方法的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 运动补偿; 包络对齐; 评估

中图分类号: TN958 文献标识码: A

Evaluation of Range Alignment Methods in ISAR Imaging

XIAO Shun-ping, WEI Jian-gong, FENG De-jun, WANG Xue-song
(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Motion compensation, which usually includes range alignment and phase compensation, plays a key role in ISAR imaging. As the basis of phase compensation, range alignment has been investigated comprehensively and multifarious range alignment methods have been proposed. When the impact of range alignment cannot be judged directly, it is necessary to choose the optimal range alignment method. An evaluation method based on variance of range bins is proposed. It makes use of weighted sum of range bins' variance from range alignment to evaluate impact of range alignment method directly. The results of simulation verify the effectiveness of the method.

Key words: ISAR; motion compensation; range alignment; evaluation

ISAR 成像目标一般是非合作目标, 其运动过程未知, 因此, 运动补偿成为 ISAR 成像的关键^[1- 6]。运动补偿通常包括包络对齐和相位补偿。包络对齐是相位补偿的基础, 在运动补偿中占有重要地位。研究者提出了各种包络对齐方法, 如峰值法, 最大相关法, 频域法, 最小熵法^[1- 6]等。最大相关法应用广泛, 根据回波利用情况的不同又可分为相邻相关对齐法^[1]、积累相关对齐法^[2]和幅度相关全局最优对齐法^[3]等。在实际成像中, 由于目标散射特性和运动特性的差异, 各种包络对齐方法性能有所不同, 这就要求对各种包络对齐方法性能进行评估, 以选择较好的包络对齐方法, 达到最优的成像效果。

包络对齐方法的性能可根据对齐结果或成像结果直观判断。某些情况下, 如果无法直观地看出其差别, 就需要定量评估。图像的熵是目前唯一定量评估包络对齐性能的指标^[4- 5], 但是该指标需将包络对齐结果进行相位补偿和方位向聚焦, 而不是利用包络对齐结果直接进行评估。本文提出基于距离单元方差的评估方法, 用对齐后目标回波各距离单元方差的加权和作为准则, 对包络对齐方法直接进行评估。在仿真数据和实测数据两种情况下, 给出了基于图像熵和目标回波各距离单元方差的加权和对相邻相关对齐法、积累相关对齐法和幅度相关全局最优对齐法三种对齐方法的评估结果。

1 ISAR 成像中的包络对齐

转台目标成像是 ISAR 成像的理想模式, 然而实际目标除了成像所需的等效转动外还存在相对于雷达的平动。平动分量的存在不仅使相邻的一维像在距离向错开, 而且引入附加的相位分量, 在方位向造

* 收稿日期: 2006- 10- 14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60672033); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET- 04- 0997)

作者简介: 肖顺平(1964-), 男, 教授, 博士生导师。

成散焦, 必须进行补偿。运动补偿通常包括包络对齐和相位补偿, 以消除平动对成像造成的这两方面的影响。但是由于相位补偿必须在包络对齐后进行, 因此, 包络对齐是相位补偿的基础。

对于平动信息未知的非合作目标, 包络对齐通常基于相邻回波包络的相似性。现有包络对齐方法较多, 差别主要在于对齐所用回波的选取及对齐准则不同。相关函数最大是比较常用的对齐准则, 根据对齐时回波利用情况的不同, 研究者先后提出了基于相邻回波的相邻相关对齐法^[1]、基于部分回波加窗处理的积累相关对齐法^[2]和基于全部回波的幅度相关全局最优对齐法^[3]这三种典型的对齐方法。

相邻相关对齐法比较简单, 由当前回波与前一回波的相关函数最大求得当前回波的移位置, 即

$$\tau = \arg \max_{\tau} |s_{n-1}(t) || s_n(t - \tau)| \quad (1)$$

式中, τ 为所求的移位置, $s_{n-1}(t)$, $s_n(t)$ 为相邻两次回波。这种方法会产生误差积累, 并且有可能由于相邻回波的较大变化而产生突跳误差, 在有些情况下不能很好地完成包络对齐。

针对相邻相关对齐的误差特性, 文献[2]提出基于部分回波加窗处理的积累相关对齐法, 选取前面多次已对齐回波的加权和与当前回波进行相关对齐, 即

$$\tau = \arg \max_{\tau} |s_n(t - \tau)| \left| \sum_{i=1}^{n-1} a(i) s_i(t) \right| \quad (2)$$

式中, τ 为所求的移位置, $\sum_{i=1}^{n-1} a(i) s_i(t)$ 为已对齐回波的加权和, $s_i(t)$ 为第 i 次回波, $a(i)$ 为加权系数。这种方法由于利用了前面多次回波的信息, 多数情况下可以避免突跳误差, 取得较好的对齐效果。

为了更充分地利用回波信息, 提高对齐精度, 文献[3]提出基于全部回波的幅度相关全局最优法, 以各次包络移位置作为参量, 将包络对齐转化为一个多变量全局寻优问题, 即

$$(\tau_2, \tau_3, \dots, \tau_M) = \arg \max_{\tau_2, \tau_3, \dots, \tau_M} \sum_{i=1}^M \sum_{j=i+1}^M |s_i(t - \tau_i) || a(j) s_j(t - \tau_j)| \quad (3)$$

式中, τ_i 为第 i 次回波的移位置 ($\tau_1 = 0$), $s_i(t)$ 为第 i 次回波, $a(j)$ 为加权系数, M 为参与对齐的回波数目。这种方法从整体上考虑所有回波之间的相关性, 受个别回波突变的影响较小, 并能避免积累误差产生的漂移, 能够有效地提高对齐精度。但是这种方法的缺点是计算量较大。

2 包络对齐方法评估

ISAR 成像中, 由于目标运动的复杂性以及目标散射特性的差异, 各种包络对齐方法的效果也有所不同。为了选择有效的包络对齐方法, 需要对包络对齐效果进行评估。一般可通过观察对齐结果进行直观判断, 也可根据最终所成图像的聚焦情况间接判断对齐效果。在某些情况下, 从各种包络对齐方法对齐的结果和所成图像无法直观地看出其差别, 因此, 需要对包络对齐效果进行定量评估。

2.1 基于图像熵的评估方法

熵可用于测量图像的聚焦质量^[4-5]。如果包络对齐效果较好, 经过相位补偿及方位向聚焦之后, 所成图像的聚焦质量也较好, 图像的熵较小, 反之则较大。因此, ISAR 图像的熵可用于定量评估包络对齐方法的性能。图像的熵定义如下:

$$\varepsilon = - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M |g(n, m)|^2 \ln |g(n, m)|^2 \quad (4)$$

其中, $g(n, m)$ 为所成的复图像, n, m 分别为距离向和方位向的序号。评估时, 首先用不同方法完成包络对齐, 然后用同一相位补偿方法和方位向聚焦方法得到不同的 ISAR 图像, 由式(4)得出各图像的熵, 根据熵的大小即可对相应包络对齐方法的性能进行评估。

2.2 基于距离单元方差的评估方法

图像的熵是评价包络对齐方法的有效指标, 但需将包络对齐结果进行相位补偿和方位向聚焦两次处理, 而不是根据包络对齐的结果直接进行评估。针对这种情况, 提出基于距离单元方差的包络对齐评估方法, 即用目标回波各距离单元方差的加权和作为准则, 对包络对齐的结果直接进行评估。

目标在非机动情况下相对转动较为缓慢,较高的横向采样使得相邻回波间目标姿态变化较小,这就意味着相邻回波包络的相似性较高,文献[6]用回波的相关系数度量回波之间的相似性,研究了实测飞机数据回波相邻一维距离像的相关性,说明相邻回波之间的相似性很强,包络的变化不大。因此,当包络对齐效果较好时,同一距离单元内不同回波的幅度变化较小,则该距离单元的方差较小,所有距离单元的方差和也较小;当对齐效果不好时,同一距离单元内的不同回波的幅度变化较大,则该距离单元的方差较大,所有距离单元的方差和也较大。理论上应该以目标所占据的各距离单元的方差情况衡量包络对齐效果,但是一维像中目标单元的提取并不容易,可用该距离单元的均值作为各距离单元方差求和的加权值,由于包含目标信息的距离单元均值较大,只含噪声的距离单元均值较小,加权的结果是提高了目标所占距离单元方差的作用,抑制了只含噪声的距离单元方差的作用。各距离单元方差加权和定义如下:

$$c = \sum_{n=1}^N E[|s_n(m)|] \sigma[|s_n(m)|] \tag{5}$$

其中, $s_n(m)$ 为第 n 个距离单元内的数据, m 为回波序号 ($m=1, 2, \dots, M$, M 为参与对齐的回波次数), N 为总的距离单元数, $E[|s_n(m)|]$ 为 $|s_n(m)|$ 的均值, $\sigma[|s_n(m)|]$ 为 $|s_n(m)|$ 的方差。对不同包络对齐方法进行评估时,首先用不同方法完成包络对齐,然后由式(5)计算出各距离单元方差的加权和,即可对相应包络对齐方法的性能进行评估。

3 仿真实验及结果分析

基于相邻回波的相邻相关对齐法、基于部分回波的积累相关对齐法和基于全部回波的幅度相关全局最优法是三种较有代表性的包络对齐方法。下面在仿真数据和实测数据两种情况下,利用基于图像熵和基于距离单元方差两种评估方法对三种包络对齐方法进行评估。其中,积累相关对齐法中用矩形窗对已对齐回波加权综合;幅度相关全局最优法由于运算量较大,在实际运算时转化为一维搜索与多次迭代的组合。成像处理中,用特显点法进行相位补偿,用傅里叶变换进行方位向压缩。

3.1 仿真数据处理结果

仿真目标由 6 个散射点构成,呈三角形分布,每个散射点散射强度相等。雷达工作在 X 波段,波长为 3cm,带宽为 1GHz,由此可计算出其距离分辨率为 15cm。仿真目标匀速转动,方位向均匀采样 256 次回波,总转角为 6°,可知方位向分辨率也为 15cm。图 1 为各包络对齐方法对齐和成像结果,表 1 为各种包络对齐方法对齐后各距离单元方差的加权和及成像后图像的熵。

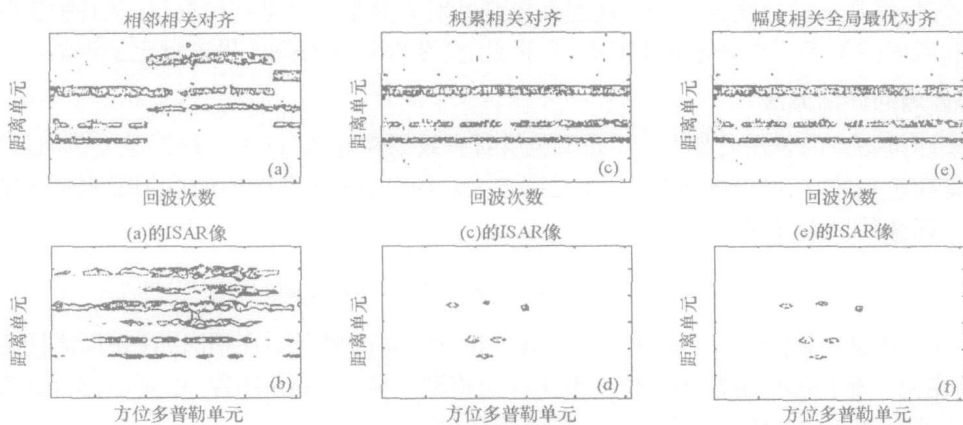


图 1 仿真数据包络对齐和成像结果

Fig. 1 Range alignment and imaging results of simulation data

表 1 仿真数据图像的熵及各距离单元方差的加权和

Tab. 1 Entropies of images and weighted sum of range bins' variance of simulation data		
包络对齐方法	成像后图像的熵	各距离单元方差加权和
相邻相关对齐	4.5398e+ 3	1.4846e- 3
积累相关对齐	2.1348e+ 3	0.8208e- 3
幅度相关全局最优对齐	2.0241e+ 3	0.8029e- 3

由图 1 可直观看出, 相邻相关对齐法在对齐时产生突跳, 无法完成包络对齐, 导致不能成像; 积累相关对齐和幅度相关全局最优对齐都能很好地完成包络对齐, 但从对齐结果和成像结果无法直观地看出差别。由表 1 数据可知, 以图像的熵进行评估, 幅度相关全局最优对齐后所成图像的熵比积累相关对齐后所成图像的熵小, 即幅度相关全局最优对齐的对齐效果较好; 以对齐后数据各距离单元方差加权和进行评估, 幅度相关全局最优对齐后各距离单元方差加权和比积累相关对齐后各距离单元方差加和小, 即幅度相关全局最优对齐的对齐效果较好。两种方法的评估结果一致。

3.2 实测数据处理结果

实测数据为我国实验 SAR 雷达录取的雅克-42 飞机的部分数据, 雷达工作在 C 波段, 带宽为 400MHz, 距离向分辨率为 0.4m, 抽取 256 次回波, 总转角为 4°, 方位向分辨率约为 0.4m。图 2 为各方法对齐和成像结果, 表 2 为各方法对齐后各距离单元方差加权和及成像后图像的熵。

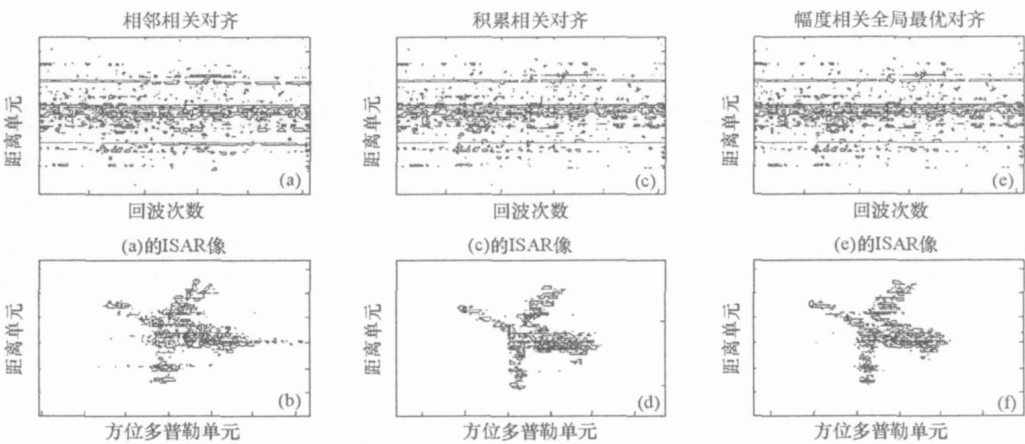


图 2 实测数据包络对齐和成像结果

Fig. 2 Range alignment and imaging results of real data

表 2 实测数据图像的熵及各距离单元方差的加权和

Tab. 2 Entropies of images and weighted sum of range bins' variance of real data		
包络对齐方法	成像后图像的熵	各距离单元方差加权和
相邻相关对齐	- 0.5430e+ 12	1.0213e+ 11
积累相关对齐	- 0.8486e+ 12	0.8719e+ 11
幅度相关全局最优对齐	- 1.1454e+ 12	0.8642e+ 11

由图 2 可直观看出, 相邻相关对齐后的成像质量较差, 在方位向存在散焦现象; 积累相关对齐和幅度相关全局最优对齐都能很好地完成对齐, 而且由成像结果也无法直观看出差别。由表 2 数据可知, 以成像后图像的熵进行评估, 幅度相关全局最优对齐后所成图像的熵比积累相关对齐后所成图像的熵小, 即幅度相关全局最优对齐的对齐效果较好; 以对齐后各距离单元方差加权和进行评估, 幅度相关全局最优对齐后各距离单元方差的加权和比积累相关对齐后各距离单元方差的加和小, 即幅度相关全局最优对齐的对齐效果较好。两种方法的评估结果一致。

3.3 评估指标分析

SAR 成像常常受到噪声的影响, 随着信噪比的不同, 包络对齐的效果也有所差异。因此, 选取的评估指标应具有较好的稳健性, 不仅要能反映同一信噪比条件下不同对齐方法的差异, 而且还要能够反映

出同一包络对齐方法的性能随不同信噪比的变化情况。对于 ISAR 这样的高分辨雷达, 较合适的是引入平均 RCS 和平均信噪比的定义^[7-8]。文献[7]中定义平均 RCS 为 $\sigma = m\sigma_c$, 其中, m 为距离分辨单元数, σ 为目标的窄带 RCS, σ_c 为各个距离分辨单元的平均 RCS。文献[8]在高分辨雷达平均 RCS 基础上提出了一维像平均信噪比的定义: 一维像的平均信噪比定义为目标总能量与目标所占区域的所有噪声能量之比。图 3 给出了不同一维像平均信噪比条件下利用基于图像熵和基于各距离单元方差加权和两种评估方法对三种包络对齐方法的评估结果。仿真条件同 3.1 节中仿真条件。

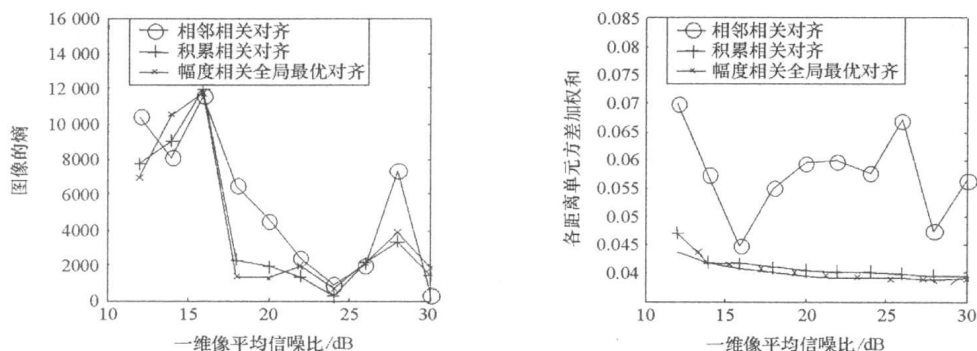


图 3 不同一维像平均信噪比仿真数据评估结果

Fig. 3 Evaluation results of simulation data with different range profile average SNR

由评估结果可知, 不同信噪比情况下, 图像的熵变化较大, 不稳健。利用各距离单元方差加权和评估时, 相邻相关对齐由于可能产生突跳, 因此其评估结果随一维像平均信噪比的变化产生波动, 并且与其他两种对齐效果较好的对齐方法的评估结果有明显差异。积累相关对齐和幅度相关全局最优对齐都能够较好地抑制噪声影响, 直观看其对齐及成像效果相当, 而评估结果在不同一维像平均信噪比下略有差异, 与直观观察相符, 但仍能定量反映两种方法对齐效果的差异。随着一维像平均信噪比的增大, 评估结果逐渐减小, 反映出对齐效果随着噪声影响的减小而变好。可见, 本文提出的基于距离单元方差加权和的评估指标是一个比较稳健的评估指标。

4 结束语

对包络对齐方法性能的评价一般通过观察对齐结果或成像结果进行直观判断。从各种包络对齐方法的对齐结果和成像结果无法直观看出其差别时, 需要定量评估包络对齐的效果。本文提出用目标回波各距离单元方差的加权和作为衡量包络对齐的准则, 对包络对齐的结果直接进行评估。通过采用实测数据和仿真数据, 对三种包络对齐方法的评估结果表明, 本文提出方法的评估结果与基于图像熵的评估结果相一致, 这说明了该方法的有效性。仿真试验还表明, 相对图像熵的评估方法, 本文提出的评估方法不但计算简便, 而且更为稳健。因此, 该方法可用于实际 ISAR 成像中, 以提高成像质量。

参考文献:

- [1] Chen C C, Andrews H C. Target-motion-induced Radar Imaging [J]. IEEE Trans. on AES, 1980, 16(1): 2- 14.
- [2] Delisle G Y, Wu H. Moving Target Imaging and Trajectory Computation Using ISAR [J]. IEEE Trans. on AES, 1994, 30(3): 887- 899.
- [3] 王琨, 罗琳. ISAR 成像中包络对齐的幅度相关全局最优法 [J]. 电子科学学刊, 1998, 20(3): 369- 373.
- [4] Wang J, Kasilingam D. Global Range Alignment for ISAR [J]. IEEE Trans. on AES, 2003, 39(1): 351- 357.
- [5] Li X, Liu G, Ni J. Autofocusing of ISAR Images Based on Entropy Minimization [J]. IEEE Trans. on AES, 1999, 35(4): 1240- 1251.
- [6] 邢孟道, 保铮. 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.
- [7] Wehner D R. High Resolution Radar [M]. London: Artech House, 1987.
- [8] Chen V C, Miceli W J. Time-varying Spectral Analysis for Radar Imaging of Maneuvering Targets [J]. IEE Proc. Sonar and Navigation, 1998, 145(5): 262- 268.
- [9] 黄小红, 姜卫东, 邱兆坤, 等. 基于时频的逆合成孔径雷达的距离- 瞬时多普勒成像方法 [J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(6): 34- 36.