

文章编号: 1001-2486(2006)05-0063-05

一种基于最大似然估计的 ISAR 自聚焦算法*

韩兴斌, 胡卫东, 郝文贤

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 自聚焦是 ISAR 成像中的一项关键技术, 其目的是消除目标和雷达的径向运动引起的相位误差。从 ISAR 信号模型出发, 推导得到了相位误差的最大似然估计, 并给出了一种基于最大似然估计的 ISAR 自聚焦算法。该算法采用了相位梯度算法(PGA)的处理结构, 利用了多个距离单元上的散射点信号。算法中没有孤立散射点的要求, 不需要相位解模糊, 并且消除了相位误差估计中积累误差的影响, 提高了相位误差的估计精度。将该算法应用于实测数据的 ISAR 成像中, 得到了较好的聚焦结果。

关键词: ISAR; 运动补偿; 自聚焦; 最大似然估计

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A

An Autofocus Algorithm for ISAR Based on the Maximum Likelihood Estimation

HAN Xing-bin, HU Wei-dong, YU Wen-xian

(ATR Key lab, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: As one of the key techniques in inverse synthetic radar (ISAR), autofocus is to eliminate the phase errors caused by the target radial motion. The maximum likelihood (ML) estimation of phase errors was derived from the ISAR signal model, and an autofocus algorithm based on the ML estimation was proposed. In the algorithm, the phase gradient algorithm (PGA) was performed, and the signals of multiple scatters on a few range bins were utilized. Hence, the scatters might not be well isolated, and the troublesome phase unwrapping was avoided. Moreover, the algorithm also eliminated the accumulation errors in the phase error estimation. The imaging results based on the measured ISAR data demonstrate a good performance of the autofocus algorithm.

Key words: ISAR; motion compensation; autofocus; the ML estimation

在 ISAR 成像中, 由于目标通常为非合作目标, 运动补偿成为 ISAR 成像的关键技术。目标相对雷达的径向运动会给 ISAR 成像带来两方面的影响: 纵向距离像的包络平移和横向上的相位误差。其中, 横向相位误差严重影响了各个散射点横向转动多普勒的提取, 最终使得目标 ISAR 像变得模糊, 甚至散焦。

在完成包络对齐之后, 需要通过自聚焦去除横向相位误差。随着 ISAR 运动补偿研究的不断深入, 已有很多自聚焦方法被提出。这些方法大致可以分为两类。第一类方法认为相位误差函数为三阶或更高阶的多项式, 在 ISAR 图像域建立评价函数, 通过最优化的方法估计相位误差^[1-2]。这类方法适用于相位误差可以用低阶多项式近似的情况, 若雷达回波信号具有高阶相位误差, 维数的增加会给最优化求解带来困难。第二类是基于散射点信号模型的自聚焦算法, 在目标回波信号中提取单个或多个散射点信号, 根据目标上散射点具有相同相位误差的特性, 进行相位误差校正。这类方法有单散射点跟踪法^[3], 为克服实测数据中难以找到孤立散射点的困难, 可以提取多个散射点信号, 利用多个散射点信号中的相位误差, 进行相位误差校正^[4,5]。其中文献[5]把 SAR 中的相位梯度算法(PGA)引入 ISAR 中, 提高了相位误差估计的性能。文献[6-7]利用时频技术更好地逐个提取散射点信号, 从而提高相位校正的性能。由于不需要相位误差的模型假设, 从原理上说, 这类算法不仅可以消除低阶相位误差, 而且可以消除高阶相位误差。

第二类自聚焦算法的关键是从 ISAR 信号中获得良好的相位误差估计。文献[5]给出了一种改进的

* 收稿日期: 2006-04-01

作者简介: 韩兴斌(1977-), 男, 博士生。

多普勒中心跟踪法,并证明了算法中的估计结果是相邻回波相位误差的最大似然估计。该算法估计得到的是相邻回波的相位误差,难以避免多个脉冲估计误差的积累。我们的仿真试验表明,算法通常需要四、五次迭代后,才会收敛,得到较清晰的 ISAR 像。

1 ISAR 信号模型

ISAR 的宽带回波信号经去斜率混频 (dechirp) 和距离向压缩后,得距离压缩域信号。理想情况下,距离压缩域各个距离单元上的信号为多个谐波信号的和,每个谐波信号对应一个散射点,谐波信号的频率和散射点的横向距离成正比。但由于目标的径向运动,在各个目标回波上会增加一个相位误差项。考虑信号中的噪声项,则第 n 个距离单元上的距离压缩域信号可表示为

$$g_n(t_m) = \sum_{k=1}^K a_n^k \exp(-j2\pi f_k t_m) \exp[j\varphi(t_m)] + n(t_m) \quad (1)$$

其中 $\varphi(t_m)$ 为相位误差项。式(1)中各个散射点的横向多普勒频率不为零。在相位误差的估计中,若采用与相位梯度算法(PGA)^[5]相似的处理结构,将 ISAR 信号进行移频和加窗处理,滤除其它散射点信号,各个距离单元内只保留单个散射点的信号,并且将保留的散射点移至横向多普勒的中心位置,使得该散射点的多普勒频率为零,则第 n 个距离单元上的信号,表现为直流分量乘以相位误差项,写成向量的形式为

$$\begin{cases} g_{n1} = a_n + n_{n1} \\ g_{n2} = a_n e^{j\varphi_2} + n_{n2} \\ \vdots \\ g_{nM} = a_n e^{j\varphi_M} + n_{nM} \end{cases} \quad (2)$$

其中 g_{nl} 为第 n 个距离单元上的第 l 个回波复信号, a_n 为与散射点强度有关的复数,并包含了散射点的起始相位。 n_{nl} 为复数形式的高斯白噪声,均值为零,方差为 σ_n^2 ,且假定各个噪声之间相互独立。模型中认为该距离单元内的第一个回波信号的相位为零, φ_M 为第 M 个回波相对第一个回波的相位误差。

2 相位误差的最大似然估计

自聚焦是从 ISAR 信号数据本身出发,消除相位误差的过程。若能够从 ISAR 信号中得到相位误差的估计值,然后进行相位校正,也就完成了自聚焦的过程。从前面给出的距离压缩域信号模型出发,对噪声作适当的假设,可以得到相位误差的最大似然估计。

在式(2)给出的信号模型中,假定噪声项为高斯白噪声,并且认为 a_n 是整个横向距离上的常量。用向量形式表示第 n 个距离单元内的回波信号 $X_n^T = [g_{n1}, g_{n2}, \dots, g_{nM}]$,并用向量形式表示待估计的相位参数 $V^T = [1, e^{j\varphi_2}, \dots, e^{j\varphi_M}]$,则 X_n^T 服从高斯分布

$$p(X_n | V) = (2\pi)^{-\frac{M}{2}} |C|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(X_n - U)^H C^{-1}(X_n - U)\right\} \quad (3)$$

其中随机向量 X_n 的均值 $U = a_n V$,方差 $C = \sigma_n^2 I$,其中 I 为 M 阶单位矩阵。由最大似然估计的定义,求得向量 V 的估计,使得函数 $\ln p(X_n | V)$ 值最大。经推导可知,函数 $\ln p(X_n | V)$ 最大等效为使下列函数最小:

$$\phi_1 = (X_n - a_n V)^H (X_n - a_n V) \quad (4)$$

但函数 ϕ_1 中的 a_n 也是未知参数,为得到向量 V 的估计,需要先估计 a_n 。观察函数 ϕ_1 ,不难发现,若向量 V 已知,则函数 ϕ_1 为关于 a_n 的最小二乘准则表达式。根据最小二乘估计的公式,得到参数 a_n 的估计

$$\hat{a}_n = (V^H V)^{-1} V^H X_n = \frac{1}{M} V^H X_n \quad (5)$$

将 a_n 的估计代入式(4)得

$$\phi_1 = \left(X_n - \frac{1}{M} V^H X_n V\right)^H \left(X_n - \frac{1}{M} V^H X_n V\right) = X_n^H X_n - \frac{1}{M} X_n^H V V^H X_n \quad (6)$$

令函数 $\phi_2 = \mathbf{X}_n^H \mathbf{V} \mathbf{V}^H \mathbf{X}_n = \mathbf{V}^H \mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^H \mathbf{V}$ 。函数 ϕ_1 中的 $\mathbf{X}_n^H \mathbf{X}_n$ 和估计向量 \mathbf{V} 无关,所以函数 ϕ_1 最小等效为函数 ϕ_2 最大。

若考虑多个距离单元,则 N 个距离单元内的回波信号组成一个矩阵 \mathbf{X} ,其中矩阵的第 n 列为第 n 个距离单元的信号 \mathbf{X}_n 。多个距离单元回波的似然函数为

$$p(\mathbf{X} | \mathbf{V}) = \prod_{n=1}^N p(\mathbf{X}_n | \mathbf{V}) \quad (7)$$

不难发现,为求得向量 \mathbf{V} 的最大似然估计,要使得下列函数最大

$$\phi_3 = \sum_{n=1}^N \mathbf{V}^H \mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^H \mathbf{V} = \mathbf{V}^H \sum_{n=1}^N \mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^H \mathbf{V} \quad (8)$$

经推导可知,当向量 \mathbf{V} 为矩阵 $\sum_{n=1}^N \mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^H$ 最大特征值对应的特征向量时,函数 ϕ_3 取得最大值。所以,最后得出结论,在如式(2)的信号模型假设下,相位误差的最大似然估计为矩阵 $\sum_{n=1}^N \mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^H$ 最大特征值对应的特征向量。

若仅考虑相邻两个回波,则 $\mathbf{X}_n^i = [g_{n,l}, g_{n,l+1}]$,需要估计的向量 $\mathbf{V}^i = [1, e^{j\varphi}]$,

$$\sum_{n=1}^N \mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^H = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N |g_{n,l}|^2 & \sum_{n=1}^N g_{n,l} g_{n,l+1}^* \\ \sum_{n=1}^N g_{n,l}^* g_{n,l+1} & \sum_{n=1}^N |g_{n,l+1}|^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

最后得到

$$\phi_3 = \mathbf{V}^H \sum_{n=1}^N \mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^H \mathbf{V} = \sum_{n=1}^N |g_{n,l}|^2 + \sum_{n=1}^N |g_{n,l+1}|^2 + \sum_{n=1}^N g_{n,l} g_{n,l+1}^* e^{j\varphi} + \sum_{n=1}^N g_{n,l}^* g_{n,l+1} e^{-j\varphi} \quad (10)$$

为使函数 ϕ_3 最大,相邻回波之间的相位误差应满足

$$\varphi_l = \angle \sum_{n=1}^N g_{n,l}^* g_{n,l+1} \quad (11)$$

式中符号 \angle 表示取复数 $\sum_{n=1}^N g_{n,l}^* g_{n,l+1}$ 的相位。式(11)的结果与文献[5]给出的相位误差估计公式相同。这种相位误差的估计形式,是最大似然估计的一种特例,估计中仅考虑了相邻两个脉冲的回波信号。

3 算法的实现步骤和时间复杂度

该算法采用 PGA 算法相同的处理结构,并利用前边给出的最大似然估计的方法估计相位误差,进行相位校正,实现自聚焦。

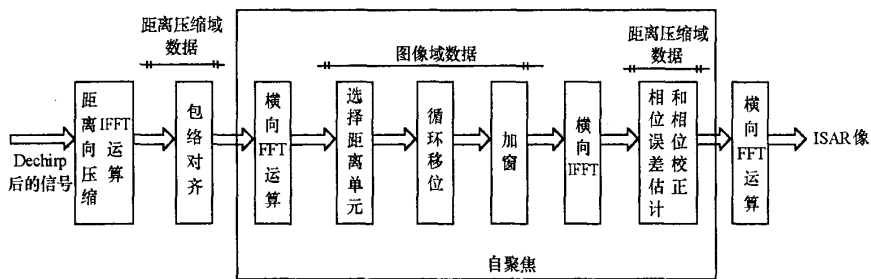


图 1 ISAR 信号处理框图

Fig.1 The signal processing in ISAR

图 1 给出了 ISAR 信号处理的框图,其中采用了基于最大似然估计的自聚焦算法。自聚焦算法大致

分为下面几步:(1)选择距离单元。根据熵和能量选择距离单元得到 ISAR 像域的部分复图像,使得该复图像中含有强散射点。(2)循环移位。将 ISAR 复图像中的各个距离单元上的信号分别进行循环移位,使得各个距离单元上的强散射点位于横向中心位置。(3)加窗。在各个距离单元的横向中心附近加窗,保留强散射点分量,去除其他散射点信号和杂波的影响。(4)将移频加窗后的图像域数据,沿慢时间作傅立叶反变换,得到复图像对应的距离压缩域信号,然后计算矩阵 $\sum_{n=1}^N \mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^H$,求得矩阵最大特征值对应的特征向量,得到相位误差的最大似然估计,根据估计值,校正原始距离压缩信号的相位误差。(5)若经相位校正后,没有得到聚焦的 ISAR 像,上述步骤可以重复进行。最后通过设定相位误差估计的均方根门限,终止迭代^[13]。上述算法和文献[5]的不同主要在于,用求矩阵特征值向量的方法一次求得相位误差的估计,而不是仅计算相邻脉冲之间的相位误差,从而避免了相位估计误差的传递和积累。

为了比较上述算法和 PGA 算法的计算量,分析最大似然估计算法中特征值分解的时间复杂度。假定使用乘幂方法经过 L 次迭代求得矩阵的最大特征值,并以乘法作为算法中的基本计算,则相位误差估计的时间复杂度为 $O(LM^2)$ 。而 PGA 算法中相位误差估计的时间复杂度为 $O(MN)$ 。一般在一次迭代过程中最大似然估计算法的时间复杂度大于 PGA 算法。但最大似然估计算法中一般会有较少的迭代次数,从而避免了多次的横向 FFT 和 IFFT 运算。

4 实测数据的试验结果

为了验证所提出的算法,采用雷达照射某飞机的实测数据进行实验。发射信号载频 $f_0 = 9.5\text{GHz}$,带宽 $B = 250\text{MHz}$,脉冲重复频率 $PRF = 200\text{Hz}$,脉冲数 $M = 128$,每个脉冲的采样数目 $N = 128$ 。为观察相位误差对成像的影响,我们将已经包络对齐但未进行自聚焦的数据直接进行成像处理,得到的目标 ISAR 如图 2(a)所示。应用最大似然自聚焦算法经过一次相位校正得到聚焦的 ISAR 像如图 2(b)。为了比较算法的性能,图 2(c)给出了应用 PGA 算法一次相位校正后的 ISAR 像,图 2(d)为 PGA 算法经四次迭代获得的聚焦 ISAR 像。为了定量地考察两种算法的性能,表 1 设定了两个衡量自聚焦性能的指标:ISAR 像的图像熵和某个距离单元上横向距离像的主瓣宽度。从表中可以看出,最大似然估计自聚焦算法的迭代次数明显少于 PGA 算法,且最后的聚焦性能略优于 PGA 算法。

表 1 自聚焦的性能分析

Tab.1 The performance analysis of autofocus

迭代次数	图像熵 (PGA)	主瓣宽度(PGA) (距离单元数)	是否聚焦 停止迭代(PGA)	图像熵 (PGA)	主瓣宽度 (距离单元数)(PGA)	是否聚焦 停止迭代(PGA)
1	9.2339	32	迭代	7.6766	6	停止
2	8.7508	26	迭代	×	×	×
3	7.8304	8	迭代	×	×	×
4	7.7688	6	停止	×	×	×

5 结论

提出的基于最大似然估计的 ISAR 自聚焦算法,利用多个距离单元上的信号,直接估计得到整个成像时间上的相位误差,避免了积累误差的影响。该聚焦算法具有以下优势:(1)不需要目标 ISAR 像中有孤立的散射点,并且不需要相位解模糊;(2)利用多个距离单元上散射点的信号,提高了相位误差估计的精度;(3)估计中各个脉冲上的相位误差一次完成,消除了相邻回波相关法中的积累误差。

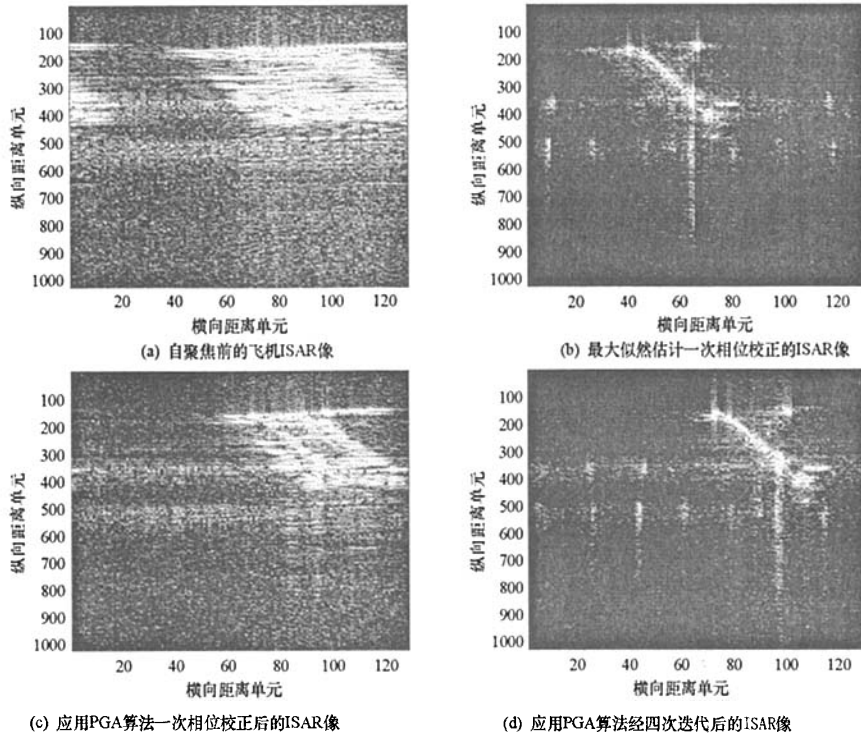


图 2 实测数据的试验结果

Fig.2 The imaging results based on measured data

参考文献:

- [1] Martorella M, Berizzi M F, Haywood B. Contrast Maximization Based Technique for 2-D ISAR Autofocusing [J]. Proceedings of IEE Radar, Sonar and Navigation, 2005, 152(4):253 - 262.
- [2] Benjimin C F. Choice of an Entropy-like Function for Range-Doppler Processing [A]. SPIE Automatic Object Recognition III[C]. 1993, 1960:36 - 46.
- [3] Steinberg B D, Carlson D L, Lee W. Microwave Imaging of Aircraft [J]. Proceedings of the IEEE, 1988, 76(12):1578 - 1592.
- [4] Wu H, Delisle G Y, Fang D G. Translational Motion Compensation in ISAR Image Processing [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(11):1561 - 1571.
- [5] 朱兆达,邱晓晖,余志舜. 用改进的多普勒中心跟踪法进行 ISAR 运动补偿[J]. 电子学报, 1997, 25(3):65 - 69.
- [6] Jian L, Renbaio W, Chen V C. Robust Autofocus Algorithm for ISAR Imaging of Moving Targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(3):1056 - 1069.
- [7] Thayaparan T, Lampropoulos G, Wong S K, et al. Application of Adaptive Joint Time-frequency Algorithm for Focusing Distorted ISAR Images from Simulated and Measured Radar Data [J]. Proceedings of IEE Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(4):213 - 20.
- [8] Chen C C, Andrews H C. Target-motion-induced Radar Imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, 16(1):2 - 14.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1999:267 - 277.
- [12] Eichel P H, Jr Jakowatz C V. Phase-gradient Algorithm as an Optimal Estimator of the Phase Derivative [J]. Optics Letters, 1989, 14(20):1101 - 1103.
- [13] Wahl D E, Eichel P H, Chiglia D C, et al. Phase Gradient Autofocus — a Robust Tool for High Resolution SAR Phase Correction [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3):827 - 834.
- [14] 郭微光,刘光平,董臻,等. 运动补偿与 UWB SAR 中 RD 成像算法结合的实现方法[J]. 国防科技大学学报, 2004, 16(1):56 - 59.

