

ISAR 成像快速最小熵相位补偿方法¹

邱晓晖 Heng Wang Cheng Alice* Yeo Siew Yam*

(南京邮电学院信息工程系 南京 210003)

*(新加坡 DSO(防卫科学机构) 国家实验室雷达研究中心 新加坡 118230)

摘要: 针对逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像, 该文提出一种快速运动补偿算法, 该算法基于二维图像熵, 并通过相位补偿的快速迭代, 使图像熵逐渐达到最小, 从而实现雷达像的自聚焦。实测数据处理结果表明, 同现有方法相比, 该方法不仅保证熵意义上的最佳聚焦效果, 而且还具有较高收敛速度。

关键词: 逆合成孔径雷达 (ISAR), 自聚焦, 相位补偿, 最小熵

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)10-1656-05

Fast Minimum Entropy Phase Compensation for ISAR Imaging

Qiu Xiao-hui Heng Wang Cheng Alice* Yeo Siew Yam*

(Dept of Info. Eng., Nanjing Univ. of Posts and Telecom., Nanjing 210003, China)

*(Radar Research Center, DSO(Defense Science Organization) National Lab., Singapore 118230, Republic of Singapore)

Abstract A novel fast phase compensation approach based on two-dimensional minimal image entropy is presented in this paper for Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) imaging. Compared with the other methods, the proposed approach has better effect of autofocusing, better computation efficiency, global minimal entropy as well as explicit expression applied easily, and these advantages are demonstrated by the analysis and data processing results.

Key words Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR), Autofocus, Phase compensation, Minimum entropy

1 引言

逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像是一门有效的运动目标微波成像技术。它可以通过发射宽带信号获得目标雷达像的较高距离分辨率, 同时通过对回波的相干积累可获得较高的横向距离分辨率, 其中相位补偿是距离-多普勒成像方法的关键技术之一。然而, 当目标运动方程含有高阶项或随机项时, 进行目标与雷达之间的平动补偿则无法提供足够的精度^[1-4]。为解决上述问题, 本文引入最小熵思想, 通过非参数估计方法实现 ISAR 成像的相位补偿。

需要指出, 尽管最小熵在 ISAR 中的应用在文献 [5] 中已报道, 然而这些工作仅在理论上给出了优化方法原理, 关于算法本身尚未给出有效的实现方法。特别是, 在进行多维搜索时需要庞大计算量, 故而实际 ISAR 成像中并不适用。鉴于此, 本文提出了一种二维快速最小熵相位补偿 (Fast Minimum Entropy Phase Compensation, FMEPC) 方法, 具有经济、高效的优点, 即仅需很小计算量就可达到较高收敛速度、较好自聚焦效果, 同时还具有显式表达特点, 易于实际应用。

¹ 2003-04-14 收到, 2003-11-25 改回

新加坡 DSO(防卫科学机构) 国家实验室“舰船 ISAR 成像”项目和江苏省教育厅科学基金资助课题

本文第 2 节对 FMEPC 方法进行了理论分析和算法描述, 推导了显式表达式, 并指出应用 FFT 可进一步加速算法运算速度. 在第 3 节, 用 FMEPC 和其它自聚焦方法进行 ISAR 实测数据处理, 从而验证了本文方法的有效性和优越性. 此外, 计算效率数据表明, FMEPC 是一种非常快速的方法. 在第 4 节, 得出了一些结论供 ISAR 相位补偿参考.

2 快速最小熵相位补偿 (FMEPC) 方法

FMEPC 方法是一种基于对比度优化的非参数评估方法. 由于 FMEPC 对模型没有限制, 譬如运动轨迹的噪声模型, 或高阶多项式模型, 因此 FMEPC 适用于任意目标运动, 而且它甚至不需要像改进的多普勒中心跟踪法^[6]一样需要一个初始像.

2.1 FMEPC 方法分析

本工作^[7]已对 FMEPC 方法进行了研究, 假定目标 ISAR 像的复散射强度 $I(n, k)$ 构成二维像 I , 其中 k 是距离门标号, n 是横向距离门标号, 则图像优化时的代价函数可采用熵函数表示成 $E(I)$, 并定义为

$$E(I) = - \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K D(n, k) \cdot \ln[D(n, k)] \quad (1)$$

其中像的散射强度密度为

$$D(n, k) = \frac{|I(n, k)|^2}{s(I)} \quad (2)$$

总能量为

$$s(I) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K |I(n, k)|^2 \quad (3)$$

由于亮度均匀分布的一幅图像的熵比较大, 而一幅自聚焦较好的图像的熵比较小, 因此根据这个原理, 可以通过减小图像的熵从而使图像达到较好的自聚焦效果, 所以利用式 (1) 可进行二维 ISAR 像的聚焦效果估计.

通常 ISAR 成像包含两个步骤: 运动补偿和距离-多普勒成像. 运动补偿可以对目标与雷达之间的平动进行补偿, 且同时保留了多普勒分析成像过程所需的转动信息. 此外, 运动补偿也可以分成两个过程, 第一步是距离对准, 第二步是相位补偿^[6]. 这里假定距离对准过程已经完成, 并设第 n 次回波的对准后的距离像是

$$G(n) = [G(n, 1) \quad G(n, 2) \quad \cdots \quad G(n, K)]^T \quad (4)$$

在计算中未补偿的相位误差或平动误差用 $\theta(n)$ 表示, 并令 $\theta(1) = 0$, 相位补偿即意味着对 $\theta(n)$, $n = 2, \dots, N$ 进行估计, 估计量可以表示为

$$\hat{\theta}(n) = \arg \min_{\theta(n)} [E(I)] \quad (5)$$

当对 $\theta(n)$, $n = 2, \dots, N$ 进行补偿时, 采用如下算式:

$$G'(n) = G(n) \cdot \exp[-j \cdot \hat{\theta}(n)] \quad (6)$$

现在, 理想情况下应通过减小熵函数 $E(I)$ 来确定 $\theta(n)$ 值. 据此, 将熵函数 $E(I)$ 对 n 次距离像的未补偿相位 $\theta(n)$ 作偏导运算, 即

$$\frac{\partial E}{\partial \theta(n)} = - \sum_{q=1}^N \sum_{k=1}^K \{1 + \ln[D(q, k)]\} \cdot \frac{\partial [D(q, k)]}{\partial \theta(n)} \quad (7)$$

式 (5) 中的相位误差估计 $\hat{\theta}(n)$ 通过下式得到

$$\frac{\partial E}{\partial \theta(n)} = 0 \quad (8)$$

在式 (7) 中, 我们有

$$\frac{\partial D(q, k)}{\partial \theta(n)} = \frac{2}{s(I)} \cdot \text{Re}[I^*(q, k) \cdot \frac{\partial I(q, k)}{\partial \theta(n)}] \quad (9)$$

其中符号 “*” 表示共轭运算. 可以通过作 $G'(n)$ 关于 n 的离散傅里叶变换 (DFT) 得到每个距离门的 $I(q, k)$ 与 $\theta(n)$ 之间的关系, 具体为 [6]

$$I(q, k) = \sum_{m=1}^N \{G(m, k) \exp[-j \cdot \theta(m)]\} \cdot \exp[-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot (m-1) \cdot (q-1)] \quad (10)$$

由于 $\theta(n)$, $n = 1, 2, \dots, N$ 是非相干的, 因此有下式成立

$$\frac{\partial I(q, k)}{\partial \theta(n)} = -jG(n, k) \exp[-j\theta(n)] \exp[-j \frac{2\pi}{N}(n-1)(q-1)], \quad n = 1, \dots, N \quad (11)$$

考虑式 (7)~式 (9) 和式 (11), 可以得到

$$\exp[-j \cdot \hat{\theta}(n)] = \frac{w^*(n)}{|w(n)|} \quad (12)$$

其中

$$w(n) = \sum_{k=1}^K G(n, k) \cdot \left\{ \sum_{q=1}^N \ln(|I(q, k)|) \cdot I^*(q, k) \exp[-j \frac{2\pi}{N}(q-1)(n-1)] \right\} \quad (13)$$

至此发现, FMEPC 方法可以利用如式 (12) 的显式公式进行相位误差估计. 实际上, 式 (13) 中的 $\{\cdot\}$ 部分计算可以通过 FFT 算法实现, 这也是 FMEPC 较其它方法 [5] 运算速度更快的原因之一.

2.2 算法描述

FMEPC 算法由如下步骤组成:

第 1 步 对相位误差估计值 $\hat{\theta}_l(n)$, $n = 1, \dots, N$, $l = 1$ 作初始化, l 为迭代次数.

第 2 步 根据式 (10), 采用 $\exp[-j \cdot \hat{\theta}_l(n)]$ 替代 $\exp[-j \cdot \theta(n)]$, $n = 1, 2, \dots, N$, 对每一个距离像函数 $G(n)$ 因平动产生的相位误差进行补偿. 然后对补偿后的距离像的每一距离门沿横向距离方向作一维 FFT 变换, 即多普勒分析, 从而获得二维 ISAR 图像 I_l .

第 3 步 计算像 I_l 的熵函数 $E_l(I)$. 如果 l 等于或大于 1, 并且 $E_l(I) - E_{l-1}(I)$ 大于临界值, 比如经验值 $10^{-4}/2$, 则转第 4 步; 否则运算停止.

第 4 步 对二维结果 $\ln(|I_l(n, k)|) \cdot I_l^*(n, k)$ 沿横向距离方向 (n) 作一维 FFT 计算, 并将计算结果表示为 $R_l(n, k)$.

第 5 步 根据公式 $w(n) = \sum_{k=1}^K G(n, k) \cdot R_l(n, k)$, 计算 $w_l(n)$. 该步骤与式 (13) 是一致的.

第 6 步 更新 l 为 $l = l + 1$. 同时更新相位补偿量 $\exp[-j \cdot \hat{\theta}_l(n)]$, $n = 1, 2, \dots, N$ 为 $\exp[-j \cdot \hat{\theta}_l(n)] = \frac{w_{l-1}^*(n)}{|w_{l-1}(n)|}$, $n = 1, 2, \dots, N$.

第 7 步 返回第 2 步。

3 数据处理结果

FMEPC 方法的有效性和高效性已经在 ISAR 数据处理中得到了验证。

3.1 ISAR 自聚焦特性

图 1 表示一个真实的舰船二维 ISAR 图像，其中图 1(a) 表示没有经过相位补偿的图像，图 1(b) 表示采用本文 FMEPC 处理后的图像，图 1(c) 是采用文献 [5] 所提出的最小熵方法处理后的结果。该图在横向距离向有 128 个单元，而在距离向上有 480 个单元。由图 1 可以看出，采用 FMEPC 和文献 [5] 的方法所得到的自聚焦特性是相同的，这就验证了 FMEPC 进行相位补偿的正确性，同时这两种方法的聚焦效果比没有进行相位补偿时要改善很多。

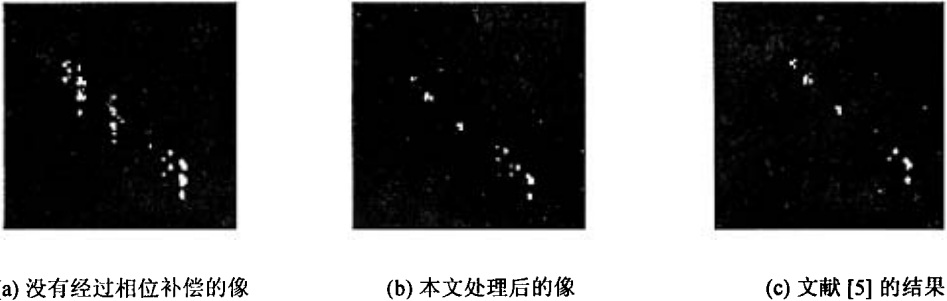


图 1 经过和未经相位补偿的 ISAR 图像 (横轴表示距离向、纵轴表示横向距离向)

更进一步，又一个例子给出 FMEPC 与其它方法在相位补偿上的效果对比。图 2 表示采用不同方法处理同一艘船的 ISAR 图像时，在最强散射点位置上的散射强度幅值的冲激响应特性，方法包括多普勒中心跟踪法 (DCT)^[8]、相位梯度自聚焦方法 (PGA)^[8] 和 FMEPC 方法。在对比中可以明显看出，与 DCT 和 PGA 方法相比，采用 FMEPC 方法后主瓣宽度更窄、旁瓣幅值更低。因此 FMEPC 可以达到更好的聚焦效果。

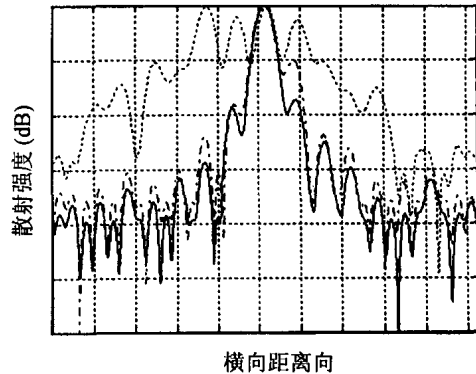


图 2 最强散射点位置上的散射强度的冲激响应特性 (--- DCT 法; - · - PGA 方法; — FMEPC 方法)

3.2 计算效率

为验证 FMEPC 的高效性，其计算效率作为新方法的一个重要指标，也已得到研究。表 1 给出了 FMEPC 和文献 [5] 方法的一些计算数据比较，这些数据来自图 1 的计算结果。并且两种方法的熵值都取作 5.9，从表 1 可以看到，FMEPC 的计算量大为减少，例如每次迭代时间仅有文献 [5] 方法的 0.48%；更进一步，FMEPC 的总时间消耗非常小，仅占文献 [5] 方法的 0.09%！这是由于文献 [5] 方法是基于多维搜索计算，而 FMEPC 则是基于一个显式公式，如式 (12)，(13) 所描述的那样，并同时保留了全局最优的要求。需要指出，尽管 PGA 方法通常具有更快的收敛速度，但它难以达到 FMEPC 的聚焦效果。

表 1 FMEPC 方法与文献 [5] 中方法计算量的对比

方法	每次迭代所用时间 (s)	迭代次数	总时间 (s)
FMEPC 方法 (t_1)	1.16	50	58
文献 [5] 中方法 (t_2)	242	250	60500
数据对比 *	0.48%	20%	0.09%

* 数据对比是指百分比值 $(t_1/t_2) \cdot 100\%$

4 结 论

本文提出了快速最小熵相位补偿方法 (FMEPC), 该方法的优点在于更好的相位补偿特性和较快的计算能力. 分析和数据处理结果表明, FMEPC 的自聚焦特性和计算效率都较好, 可以广泛、简便地应用于 ISAR 成像而受到很少限制, 因此是一种很有潜力的方法.

参 考 文 献

- [1] Prickett M J, Chen C C. Principle of inverse synthetic aperture radar (ISAR) Imaging. ESCON Record, 1980: 340-345.
- [2] Chen C C, Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, 16(1): 2-14.
- [3] Flores B C, Ugrate A, Kreinovich B. Choice of an entropy-like function for range-Doppler processing, SPIE(Automatic Object Recognition III), 1993, Vol.1960: 47-56.
- [4] Bocker R P, Henderson T B, Jones S A, Frieden B R. A new inverse synthetic aperture radar algorithm for translational motion compensation. SPIE (Stochastic and Neural methods in Signal processing, Image Processing, and Computer Vision), 1991, Vol.1569: 298-310.
- [5] Li X, Liu G S, Ni J L. Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(4): 1240-1251.
- [6] Zhu Z D, Qiu X H, She Z S. ISAR motion compensation using modified Doppler centroid tracking method. IEEE National Aerospace & Electronics Conference (NAECON), Dayton, Ohio, USA, 1996: 359-363.
- [7] Qiu X H. A fast implementation of two dimensional minimum entropy phase compensation method. DSO (Defense Science Organization) National Laboratory Tech. Report. 2000, Republic of Singapore.
- [8] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, Jakowatz C V. Phase gradient autofocus—A robust tool for high-resolution SAR phase correction. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 827-835.

邱晓晖:

女, 1968 年生, 副教授, 研究方向是雷达成像、智能信号处理及其应用等.

Heng Wang Cheng Alice:

女, 新加坡 DSO 雷达中心 ISAR 项目主管, 研究员, 研究方向为雷达信号处理等.

Yeo Siew Yam:

男, 新加坡 DSO 雷达中心主任, 研究方向为雷达系统等.