

一种提高 ISAR 成像质量的新方法

李 奎¹, 倪晋麟², 刘国岁¹, 顾 红¹

(1. 南京理工大学电子工程系, 南京 210094; 2. 南京电子工程技术研究所, 南京 210013)

摘 要: 传统的 ISAR 成像基于理想散射点模型, 实际情况中的非理想散射点因素会导致成像质量劣化. 本文提出采用基于松弛 (RELAX) 思想的精确自适应高斯基表示方法 (AGR) 在时频域对信号进行分解, 清除掉非理想散射点成分以提高成像质量. 实测数据的成像结果表明了本方法的可行性和新算法的有效性.

关键词: ISAR; 非理想散射点; AGR; RELAX

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 02-0139-03

A New Method of Improving the Quality of ISAR Image

LI Xi¹, NI Jir lin², LIU Guo sui¹, GU Hong¹

(1. Dept of Electronic Eng. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: Conventional ISAR image technique is based on the presumption of ideal scatterer model of the target. In practical situation, however, the non ideal scatterers usually exist which will degrade the final image by traditional method. In this paper, we develop a new method to improve the image quality by removing the effect of non ideal scatterers via AGR method. We introduce the RELAX technique into AGR to improve its estimation accuracy. The quality of the image of the experimental data is evidently improved by our new method.

Key words: ISAR; non ideal scatterer model; AGR; RELAX

1 引言

逆合成孔径雷达基于距离-多普勒原理对运动目标成像^[1]. 成像时, 将目标视为理想散射点模型. 在实际中, 随着雷达对目标观测角度的变化, 目标上散射点的反射强弱都会存在一定的起伏, 当这种起伏是一个渐变过程时, 对最终成像质量影响不大, 而当反射强弱变化剧烈, 甚至存在突变时, 若再采用传统方法成像, 就会使这种散射点的像展宽、模糊. 对于理想散射点或准理想散射点, 其在时频域上的分布为一条沿时间轴的窄带, 而对于瞬时反射强度有明显突变的非理想散射点, 其在时频域上将沿频率轴纵向展宽. 因此, 如果能在成像之前, 在时频域上找出非理想散射点的成分, 然后将它们清洁掉, 再采用传统的成像方法, 就能有效地提高成像质量.

本文提出基于 RELAX 思想的精确 AGR 信号分解方法. 采用该方法, 先对原始信号进行分解, 通过鉴别各分量信号的不同特征参数以区分非理想散射点成分, 然后将其剔除, 之后, 再将信号重组, 并利用傅氏变换, 得到清洁后的 ISAR 像.

2 问题的提出

设观测目标的转动轴心位于原点 O , 目标转动的角速度为 Ω . 若在第 n 个纵向距离分辨单元内, 包含有 K 个散射点, 其横坐标记为: $x_i, i = 0, 1, \dots, K-1$. 则各散射点引入的多普

勒频率为: $f_{di} = 2x_i\Omega/\lambda$ 其中 λ 为雷达发射信号的载频波长.

设每个散射点在观测时间内的反射率为: $\sigma_i(t), -T/2 < t < T/2, T$ 为观测时间, 则该距离单元总的观测信号为:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{K-1} \sigma_i(t) \exp(j2\pi f_{di}t) \quad (1)$$

通过傅氏变换, 得到该距离单元的横向像. 即:

$$S(f) = F[s(t)] = T \sum_{i=0}^{K-1} \xi_i(f) \odot \text{sinc}[\pi T(f - f_{di})] \quad (2)$$

其中: sinc 为 $\sin(x)/x$, $\xi_i(f)$ 为 $\sigma_i(t)$ 的傅里叶变换. \odot 表示卷积.

若 $\sigma_i(t)$ 存在由非理想散射点产生的突变或尖峰, 则会导致其频域形式 $\xi_i(f)$ 沿谱域展宽, 经卷积后, 会使最终的横向像模糊.

3 AGR 算法

对于信号 $s(t)$, 自适应高斯基表示 (Adaptive Gaussian Representation AGR) 方法采用一组高斯基函数的组合来加以

表示. 即:

$$s(t) = \sum_{i=1}^{\infty} B_i g_i(t) \quad (3)$$

其中 $g_i(t)$ 为高斯基函数, 定义为:

$$g_i(t) = (\pi\sigma_i^2)^{-\frac{1}{4}} \exp[-((t - t_i)^2/2\sigma_i^2)] \exp(j2\pi f_{di}t) \quad (4)$$

式(4)中基函数的可调参数有三个, 即: t_i, f_i 和 σ_i . 其中 (t_i, f_i) 反映了基函数在时频域上的中心位置, σ_i 反映在时频域上的形状特征. 当 σ_i 增大时, 基函数沿时间轴展宽, 沿频率轴收缩. 当 σ_i 减小时, 基函数沿时间轴收缩, 沿频率轴展宽.

式(3)中的系数 B_i 是通过当前信号 $s_i(t)$ 在基上的投影得到, 即:

$$B_i = \int s_i(t) \cdot g_i^*(t) dt \quad (5)$$

且 B_i 的选取满足条件:

$$|B_i|^2 = \max_{t_i, f_i, \sigma_i} \left| \int s_i(t) \cdot g_i^*(t) dt \right|^2 \quad (6)$$

其中 $s_i(t)$ 为当前的剩余信号, 定义为:

$$s_i(t) = s(t) - \sum_{k=1, k \neq i}^K B_k g_k(t) \quad (7)$$

K 为高斯基的个数.

采用式(5)~(7)的方法, 可完成对信号 $s(t)$ 的分解.

4 基于 RELAX 思想的精确 AGR 优化算法

从逼近的角度讲, 只要增加基函数的个数 K , AGR 总能达到对给定信号的任意程度的逼近. AGR 对信号的分解并非唯一. 采用不同算法可能得到较大差别的分解结果. 因而, 就存在一个最优分解的问题. 这是因为, 采用 AGR 分解信号的主要目的不仅是希望分解后的信号能充分逼近原始信号, 而且还希望通过分解后各分量的估计参数, 主要是 σ_i 的大小, 来区分信号中的突变和缓变分量. 信号分解的合理与否, 关系到对信号中各分量判定的对错. 为此, 需研究更为合理的信号分解方法. 在本节, 首先讨论如何在给定信号条件下, 寻找当前最优基函数. 即单分量估计. 然后, 引入 RELAX 思想, 讨论如何在给定逼近条件下, 如何采用最少的基函数达到对信号的最优分解.

4.1 单分量估计

对于一给定的 σ_i , 可以通过在时频域上的二维搜索, 获得当前信号在高斯基上投影的最大值. 即:

$$|B_i(\sigma_i)|^2 = \max_{t_i, f_i} \left| \int s_i(t) \cdot g_i^*(t, t_i, f_i, \sigma_i) dt \right|^2 \quad (8)$$

在求解上式时, 时域上采用滑动移位搜索, 而频率方向的搜索可由 FFT 算法加快计算速度.

σ_i 的最佳估计值为:

$$\sigma_i = \arg \max_{\sigma_i} |B_i(\sigma_i)|^2 \quad (9)$$

文献[3, 4]采用的对 σ_i 的估计方法为取值减半搜索法. 即, σ_i 的候选解为: $\{\sigma_1, \sigma_1/2, \sigma_1/4, \dots, \sigma_1/2^N\}$, σ_1 为初始值, N 为递减的级数. 选择其中使式(9)获得最大值的那个 σ_i 为估计值. 可见, 该方法是用有限的近似解去估计实际未知解. 若实际解为 $\sigma_i = 3\sigma_1/4$, 则估计误差可达到 $\sigma_1/4$. 为了达到对 σ_i 更为精确的估计, 本文提出一种高精度的寻求 σ_i 的优化算法. 对于 $[0, 1]$ 区间的任意实数, 可表示为:

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} \zeta(n) \cdot \frac{1}{2^n} \quad (10)$$

其中: $\zeta(n) \in \{-1, 0, 1\}$, $n = 1, 2, \dots, \infty$. 因此, 可以通过采用由粗到精, 逐级减半搜索步长的方法, 以达到在可能的解空间

内, 对未知 σ_i 的精确估计. 算法的具体步骤为:

1. 令 $p = 1$, p 为当前估计的级数, 初值 $\sigma_{i,p=1} = \sigma_1/2$, σ_1 为估计信号最大时间展宽方差.

2. 若当前级数为 p , 则 $p+1$ 级候选值为 $\{\sigma_{i,p} - \sigma_1/2^{p+1}, \sigma_{i,p} + \sigma_1/2^{p+1}\}$, $p+1$ 级的估计值为:

$$\sigma_{i,p+1} = \arg \max |B(\sigma_i)|^2$$

$$\left\{ \sigma_{i,p} - \frac{\sigma_1}{2^{p+1}}, \sigma_{i,p} + \frac{\sigma_1}{2^{p+1}} \right\}$$

用上述方法, 对于 $[0, \sigma_1]$ 区域内, 任意一点, 该方法能保证最终估计误差小于 $\sigma_1/2^{N+1}$ 而计算量与传统方法相比, 在相同的级数条件下, 增加约一倍.

4.2 基于 RELAX 思想的多分量估计

对于实际信号来说, 通常都含有多个分量. 下面将主要讨论对多分量信号, 如何在给定逼近误差的条件下, 采用最少的基函数达到对信号的最优分解. 换言之, 即为, 在限定了基个数的条件下, 如何逼近信号, 使得逼近误差最小. 即满足:

$$\{\Theta_{i=1}^K, B_{i=1}^K\} = \arg \min_{\{\Theta_{i=1}^K, B_{i=1}^K\}} \left[\int |s(t) - \sum_{i=1}^K B_i g_i(t, \Theta_i)|^2 dt \right] \quad (11)$$

其中: $\Theta_i = \{t_i, f_i, \sigma_i\}$, K 为基函数个数.

该问题属非线性优化问题, 对此, 引入 RELAX 技术. RELAX 技术的基本思想是: 在估计当前分量的参数时, 固定其余分量的参数, 逐个依次调整, 以达到内部收敛[5].

基于 RELAX 思想的 AGR 分解算法的具体步骤为:

1. 设 $K = 1$, 令 $s_1(t) = s(t)$, 从 $s_1(t)$ 中得到 Θ_1, B_1 . 注: 从给定信号中获得单分量信号的估计值的方法, 如本节第一部分所述, 以下同.

2. 设 $K = 2$, 由第一步得到的估计值 Θ_1, B_1 采用式(7)计算信号 $s_2(t)$, 从中得到 Θ_2, B_2 , 由 Θ_2, B_2 根据式(7)得到信号 $s_1(t)$, 由其再次得到 Θ_1, B_1 . 迭代直至内部收敛.

3. 设 $K = 3$, 由 $\Theta_1, B_1, \Theta_2, B_2$ 根据式(7)得到 $s_3(t)$, 从中得到 Θ_3, B_3 . 类似: 由 $\Theta_2, B_2, \Theta_3, B_3$ 得到 $s_1(t)$, 由其更新 Θ_1, B_1 , 由 $\Theta_1, B_1, \Theta_3, B_3$ 得到 $s_2(t)$, 由其更新 Θ_2, B_2 由 $\Theta_1, B_1, \Theta_2, B_2$ 得到 $s_3(t)$, 由其更新 Θ_3, B_3 . 迭代上述步骤, 直至内部收敛.

4. 增加基函数个数 K , 与前面步骤类似, 依次计算各分量, 直至内部收敛.

5. 当逼近误差小于一定常数后, 停止 K 的增加, 结束算法. 这里定义逼近误差为:

$$\epsilon = \frac{\int |s(t) - \sum_{i=1}^K B_i g_i(t, \Theta_i)|^2 dt}{\int |s(t)|^2 dt} \quad (12)$$

算法中每一步中的内部收敛可通过一次内部循环迭代后, 逼近误差的相对变化是否小于一常数来判定. 实际计算中, 取该常数为 10^{-3} . 由于 RELAX 技术增加了迭代机制, 与传统算法相比, 计算量有所增大. 但由于该算法在前面步骤中, 较好地保证了基函数对信号的逼近, 当逐步增加基函数的个数时, 并不会明显改变原估计值. 内部收敛相对较快.

5 实测数据的处理结果

实验 1. 选取一段过航雅克-42 飞机的 ISAR 数据. 飞机

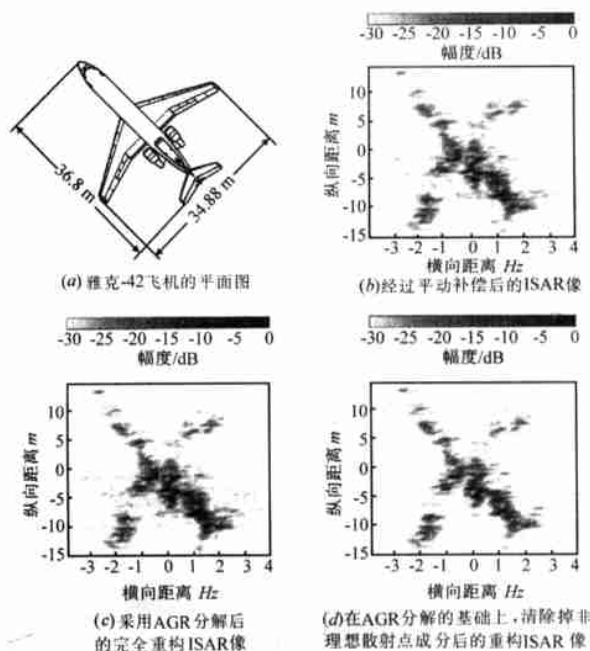


图 1

的平面图如图 1(a) 所示。此时的目标距离约为 15km, 观测时间 7.68s。图 1(b) 是经过运动补偿后得到的 ISAR 像。从图中可以看到, 在图像中部, 沿横向距离轴, 有较为明显的横条干扰。图 1(c) 是对图像各纵向距离单元进行 AGR 分解后, 综合所有信号分量得到的重构 ISAR 像。这里, 选取的逼近误差为 $\varepsilon = 0.02$ 。图 1(d) 是将图 1(c) 中, 各纵向距离单元 $\sigma_i \leq 0.24s$

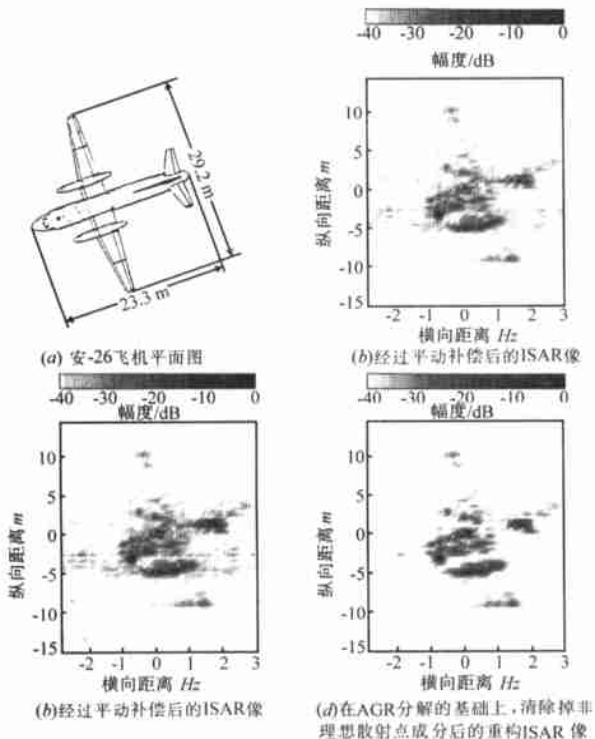


图 2

的信号成分去除, 剩余信号重构所得到的 ISAR 像。各图像的门限均为该图中最大值的 -30dB。

实验 2 选取的另一段的 ISAR 数据为安-26 飞机。飞机的平面图如图 2(a) 所示。此时的目标距离约为 7km, 观测时间为 10.24s。图 2(b) 是经过运动补偿后得到的 ISAR 像。图 2(c) 对图像各纵向距离单元进行 AGR 分解后, 综合所有信号分量得到的重构 ISAR 像。逼近误差取为 $\varepsilon = 0.02$ 。图 2(d) 是将图 2(c) 中的各纵向距离单元中, $\sigma_i \leq 0.32s$ 的信号成分去除, 剩余信号重构所得到的 ISAR 像。各图像的的门限均为该图中最大值的 -40dB。

6. 结 论

实际成像中, 由于理想散射点的假设条件通常不能满足, 因而, 采用传统方法成像会使成像质量劣化。非理想散射点影响成像质量的主要因素为反射点反射性能变化剧烈和突变成分。因此提出基于 RELAX 思相的精确 AGR 算法对信号进行分解, 然后清除掉突变起伏分量, 从而提高成像质量。实验证明经过新方法处理后的 ISAR 像质量有明显改善。

参 考 文 献

- [1] Ausherman, D. A., et al. Development in radar imaging. IEEE Trans on AES, July 1984, AES 20, 4: 363~400
- [2] 保铮, 朱兆达, 曹志道. ISAR 的进展和发展前景. 863 308 主题十周年汇报 逆合成孔径雷达论文集, 1996, 3: 1~18
- [3] V. C. Chen. Adaptive Time-Frequency ISAR Processing, SPIE 2845: 133~140
- [4] Luiz C. Trintinlia and Hao Ling. Joint Time-Frequency ISAR Using Adaptive Processing. IEEE Trans on AP, Feb 1997, 45(2): 221~227
- [5] J. Li and P. Stoica. Efficient mixed spectrum estimation with applications to target feature extraction. IEEE Trans on SP, Feb 1996, 44(2): 281~296



李 玺 1972 年生, 1995 年获南京理工大学学士学位。现为该校硕博连读研究生。主要研究方向为雷达信号处理, 雷达成像技术。



倪晋麟 1961 年生, 1989 年获东南大学博士学位, 现为南京电子技术研究所研究员, 天线与微波国防重点实验室(南京分部)主任, 电子学会高级会员。主要从事雷达系统和信号处理、相控阵天线、自适应阵列处理等领域的研究。曾获部级科技进步二、三等奖各两项, 发表论文 50 余篇。