

超分辨方法在多普勒波束锐化中的应用¹

程玉平 孙长印

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要 Relax 超分辨算法基于信号和噪声参数化模型的谐波恢复方法, 具有比傅里叶变换更高的分辨率。本文讨论了 Relax 超分辨方法, 并把它应用于实测数据多普勒波束锐化 (DBS) 成像中; 提出了一种基于 Relax 超分辨算法的目标特征提取方法。实验表明 Relax 超分辨算法比传统的基于傅里叶变换的多普勒波束锐化 (DBS) 方法具有较好的效果。

关键词 超分辨, 雷达成像, 多普勒波束锐化成像

中图分类号 TN957.7

1 引 言

雷达成像已经广泛应用于军事和国民经济的许多领域, 如军事侦察、环境监测、土地资源管理等方面^[1]。雷达成像的方法有许多种, 按雷达工作模式可分为多普勒波束锐化 (DBS) 成像、合成孔径雷达 (SAR) 成像、逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像等。

由于多普勒波束锐化技术^[2]对雷达系统的要求较低、尤其是其实时成像的能力, 已广泛应用于机载雷达中。它能实时地提供远距离处局部地面的较为清晰的雷达地图, 可用于飞行器导航、地图匹配制导、战斗机的精确攻击判断和武器投放等方面。传统的基于傅里叶变换的多普勒波束锐化技术, 由于其分辨力低, 使目标轮廓模糊, 已越来越不能满足实际的要求。利用超分辨的方法可以提高分辨率, 进行特性目标的提取, 并能精确地提供目标的位置信息。

超分辨方法成功地应用于 SAR 成像和 ISAR 成像中^[3-6]。本文建立了 DBS 成像与 SAR 成像的相互联系, 指出 DBS 成像是合成孔径雷达 (SAR) 成像的一种特例。并把 Relax 超分辨算法应用于 DBS 成像, 提出了一种基于 Relax 超分辨算法的目标特性提取的方法。

2 多普勒波束锐化

雷达成像中距离分辨力都是通过发射大的时宽带宽信号进行压缩成窄脉冲得到的, 方位分辨力通过对散射点回波信号的多普勒历程进行匹配得到。SAR 成像中高的方位分辨力是通过对多普勒历程进行精确匹配得到的, 当满足一定的近似条件时散射点回波信号的多普勒历程退化为单频信号, 这样方位分辨转换为信号谱的分辨。

设雷达数据收集的几何模型如图 1 所示, 设雷达发射的信号为

$$p(t) \cdot \exp\{j \cdot \omega_0 \cdot t\} \quad (1)$$

其中 $p(t)$ 为窄脉冲包络, ω_0 为信号载波频率。

设雷达如图直线方向, 飞行速度为 v , 并在如图中的 M 位置进行观测, 点目标空间上的坐标为 (x_0, r_0) 散射点的回波经过相干解调后为

¹ 1998-07-15 收到, 1999-04-08 定稿
国家自然科学基金资助项目

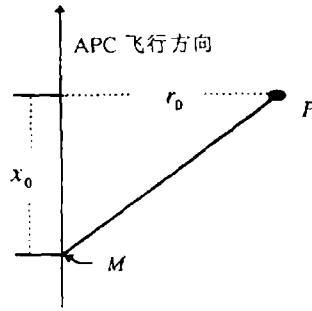


图 1

$$p(t - 2R(t)/c) \cdot \exp\{-j \cdot \omega_0 \cdot 2R(t)/c\}, \quad (2)$$

其中 R 是雷达相位中心 (APC) 与散射点之间的距离, 并按照下式变化:

$$R(t) = \sqrt{r_0^2 + (x_0 - vt)^2}.$$

作近似变换有

$$R(t) \approx \sqrt{r_0^2 + x_0^2} - \frac{vx_0}{\sqrt{r_0^2 + x_0^2}}t + \frac{1}{2} \left\{ \frac{v^2}{\sqrt{r_0^2 + x_0^2}} - \frac{v^2 x_0^2}{(\sqrt{r_0^2 + x_0^2})^3} \right\} \cdot t^2. \quad (3)$$

在成像的相干积累时间内散射点距离的变化一方面使包络发生走动, 并有可能走动超过一个或多个分辨单元; 另一方面使回波相位发生变化. SAR 成像必须沿着包络走动的轨迹, 并随变化的相位进行相干积累.

但是当成像的相干积累时间内散射点距离的变化没有超过分辨单元, 且相位随时间变化的二次和高次项可以忽略, 则成像问题退化为所谓的 DBS 成像问题. 设相干积累时间为 $[0, T]$, 即满足 (4), (5) 式

$$\Delta R = |R(0) - R(T)| < \delta r, \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} \left\{ \frac{v^2}{\sqrt{r_0^2 + x_0^2}} - \frac{v^2 x_0^2}{(\sqrt{r_0^2 + x_0^2})^3} \right\} \cdot T^2 \approx 0 \quad (5)$$

时, 成像问题变为所谓的 DBS 成像问题. 这里 δr 为距离单元大小. 这时散射点回波信号相位变为

$$\exp \left\{ j \cdot \frac{4\pi vx_0}{\lambda \sqrt{r_0^2 + x_0^2}} t - j \frac{4\pi \sqrt{r_0^2 + x_0^2}}{\lambda} \right\}. \quad (6)$$

这样同一距离单元不同方位的散射点的方位位置可以由多普勒频率唯一确定. 这就是 DBS 成像的根据所在. 传统的多普勒波束锐化技术中多普勒频率的确定基于方位傅里叶变换. 基于傅里叶变换的多普勒锐化技术由于采用快速傅里叶变换使其处理非常简便; 但其分辨力低, 使目标轮廓模糊. 本文利用 Relax 算法进行多普勒锐化和目标特征提取, 下面我们介绍 Relax 超分辨方法.

3 Relax 超分辨方法及其应用

Relax 算法是 Li Jian 和 P.Stoica 在文献 [5] 中提出的。其基本思想是利用 CLEAN^[6] 迭代进行信号分离。CLEAN 的方法已在射电天文学和微波成像中使用。设数据模型为

$$y_n = \sum_{k=1}^K \alpha_k e^{j\omega_k n} + e_n, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (7)$$

e_n 可能为色噪声。我们所关心的是求出信号的幅度 α_k 和频率 ω_k 。

设 $\vec{a}(\omega_k) = [1, e^{j\omega_k}, \dots, e^{j(N-1)\omega_k}]^T$, $\vec{y} = [y_0, y_1, y_2, \dots, y_{N-1}]^T$, $\vec{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K]^T$, $\Omega = [\vec{a}(\omega_1), \vec{a}(\omega_2), \dots, \vec{a}(\omega_K)]$ 。按照最小二乘准则, 则有

$$\{\hat{\omega}_k, \hat{\alpha}_k\} = \arg \min_{\{\omega_k, \alpha_k\}} \|\vec{y} - \Omega \vec{\alpha}\|^2. \quad (8)$$

(8) 式是一个多维寻优问题。假设 $\{\omega_k\}$ 已知, 对 (8) 式极小化, 可得 $\vec{\alpha}$ 的估计值:

$$\hat{\alpha} = (\Omega^H \Omega)^{-1} \Omega^H \vec{y}. \quad (9)$$

回代到 (8) 式可得

$$\{\hat{\omega}_k, \hat{\alpha}_k\} = \|P_{\Omega}^{\perp} \vec{y}\|^2, \quad (10)$$

其中 P_{Ω}^{\perp} 是向 Ω^H 的零空间上的投影矩阵, $P_{\Omega}^{\perp} = I - \Omega(\Omega^H \Omega)^{-1} \Omega^H$ 。对于 (10) 的求解, 文献 [3] 给出了一个简单的解耦迭代算法。假设我们已经知道了 $\{\omega_i, \alpha_i\}_{i=1, i \neq k}^k$ 的估计值 $\{\hat{\omega}_i, \hat{\alpha}_i\}_{i=1, i \neq k}^K$, 构造

$$\vec{y}_k = \vec{y} - \sum_{i=1, i \neq k}^K \hat{\alpha}_i \vec{a}(\hat{\omega}_i), \quad (11)$$

由 (9) 和 (10) 式得

$$\hat{\omega}_k = \arg \max_{\omega_k} |\vec{a}^H(\omega_k) \vec{y}_k|^2, \quad (12)$$

$$\hat{\alpha}_k = \vec{a}^H(\hat{\omega}_k) \vec{y}_k / N. \quad (13)$$

Relax 算法如下:

第一步 假设 $K=1$, 利用 (12), (13) 式求出 $\hat{\omega}_1$ 和 $\hat{\alpha}_1$ 。

第二步 假设 $K=2$, 由 (11) 计算 \vec{y}_2 , 由 (12), (13) 式计算 $\hat{\alpha}_2$ 、 $\hat{\omega}_2$ 。再由得到的 $\hat{\alpha}_2$, $\hat{\omega}_2$ 由 (11), (12), (13) 式计算 \vec{y}_1 , $\hat{\omega}_1$ 和 $\hat{\alpha}_1$ 。交替迭代, 直到“收敛”。

第三步 假设 $K=3$, 由第二步得到的 $\{\hat{\omega}_k, \hat{\alpha}_k\}_{k=1,2}$ 利用 (11), (12), (13) 式计算出 $\hat{\alpha}_3$, $\hat{\omega}_3$ 。再利用 $\{\hat{\omega}_k, \hat{\alpha}_k\}_{k=2}^3$ 计算 $\hat{\omega}_1$ 和 $\hat{\alpha}_1$, 利用 $\{\hat{\omega}_k, \hat{\alpha}_k\}_{k=1,3}$ 计算 $\hat{\alpha}_2$, $\hat{\omega}_2$, 交替迭代, 直到“收敛”。

以上步骤持续进行。这里的“收敛”指的是相临两次迭代之间最小二乘误差小于某阈值, 如 $\delta = 10^{-3}$ 。当 K 等于待估计的谐波数时 Relax 算法结束。Relax 算法正是利用了 CLEAN 算法加迭代使得其具有比只利用傅里叶变换更高的分辨率。

实际应用时, 最小二乘误差阈值和谐波数要针对实际情况进行选取。最小二乘误差阈值太高或太低都不好, 太高影响收敛速度; 太低影响精度。在下面的实验中我们选择 $\delta = 10^{-6}$ 。由于实际中信杂比较小, 谐波数的选择不能太大, 否则将使估计发生偏差。实时处理时运算量可估计如下, 假设谐波总数为 K , 则由 Relax 算法的计算过程知: 如设 n_k 为第 k 步的叠代次数, 则第 k 步共需作 $k \times n_k$ 次 FFT 运算。这样总共所需 $1 + 2 \times n_2 + \dots + K \times n_k$ 次的 FFT 运算量。而实际中每步仅需叠代 $n_k = 3 \sim 5$ 次就可收敛。由于 FFT 的运算是很快的, 因此 Relax 算法的运算量并不大, 是可以实时实现的。

4 基于超分辨的目标提取方法

超分辨方法具有较高的分辨率, 但同时也具有较大的运算量。在实际应用中我们可以用传统的基于傅里叶变换的 DBS 方法对整个景物进行粗略成像; 然后利用超分辨方法对感兴趣的区域进行成像或特征提取。

为了对感兴趣的区域进行成像或特征提取; 我们必须把感兴趣区域的回波信号从整个景物回波信号中分离出来。本文提出了一种基于复图像域的“CLEAN”技术。其方法为 (1) 用传统的基于傅里叶变换的 DBS 方法对整个景物进行粗略成像; (2) 对感兴趣的区域以外的复图像置零; (3) 沿方位对复图像作逆傅里叶变换; 这样就把感兴趣的区域的回波信号从整个景物回波信号中分离出来了。然后我们对分离出来的感兴趣的区域的回波信号在其每个距离单元上作超分辨处理。

5 成像结果和分析

我们利用某型机载火控雷达的实测数据进行实验分析, 所用的超分辨方法为 Relax 方法。每帧数据方位向为 32 位, 距离向为 255 位。图 2 为傅里叶变换的方法对整个景物进行的 DBS 成像等高线图。其中我们把方位数据作 Sinc 插值到 200 位。

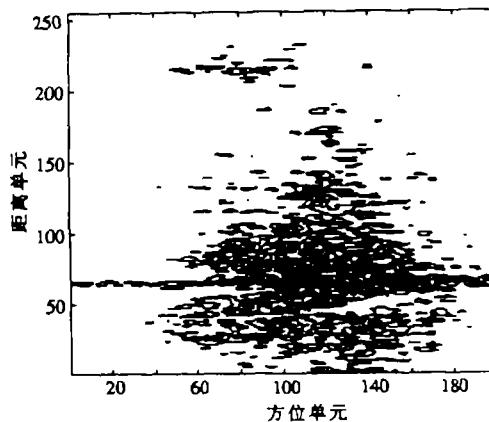


图 2

图 3 是对 50 ~ 79 距离单元进行传统多普勒锐化后的幅度 - 位置三维图; 图 4 是对 50 ~ 79 距离单元进行超分辨后的幅度 - 位置三维图。

图 5 是对 64 特征距离单元进行传统多普勒锐化后的方位图像; 图 6 是对 64 特征距离单元进行超分辨后的方位图像。

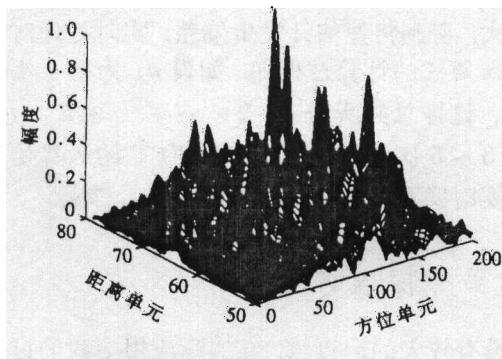


图 3

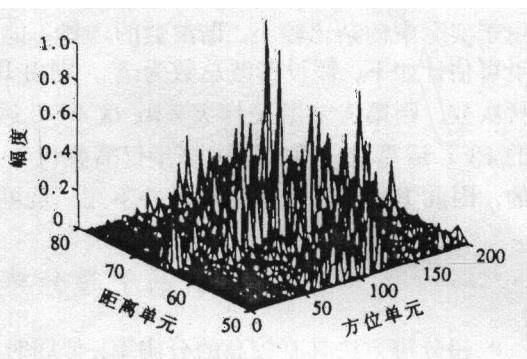


图 4

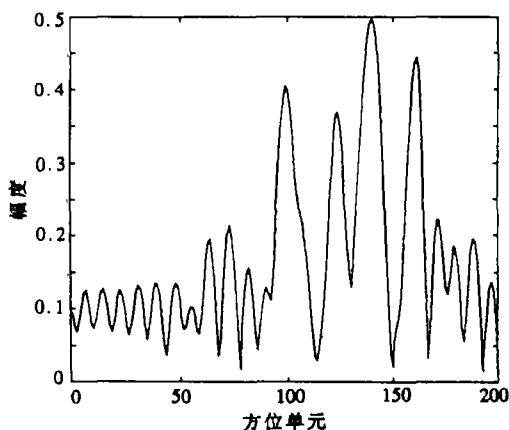


图 5

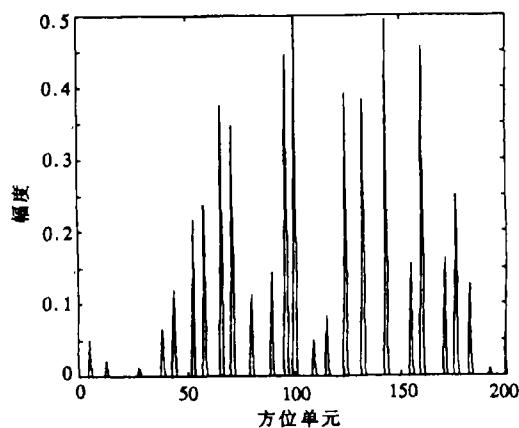


图 6

我们可以看出利用超分辨进行多普勒波束锐化所得到的分辨率比传统的多普勒锐化方法要高的多; 从而提高了对目标的定位精度。但是由于超分辨进行多普勒波束锐化所得到的分辨率很高, 使图像的平滑效果不很好, 从而使图像的视觉效果不很好, 但是对于特征目标的提取还是很有效的。

6 结 论

本文把基于 Relax 的超分辨应用于多普勒锐化成像中, 得到了较好的效果。与传统基于傅里叶变换的多普勒锐化成像技术相比具有较高的分辨率和定位精度。尤其是对特征目标的提取是很有效的。

参 考 文 献

- [1] Ausherman D A, Kozma A al. Developments in Radar Imaging. IEEE Trans. on AES, 1984, 20(4): 363-400.
- [2] 毛士艺, 张瑞生, 许伟武, 李少洪, 苗楠, 朱谷川. 脉冲多普勒雷达. 北京: 国防工业出版社, 1990, 179-190.
- [3] Zhu Z D, Ye Z R, Wu X Q, Yin J. Super-resolution range-Doppler imaging IEE Proc-F, 1995, 142(1): 25-32 .
- [4] Abatzoglou T J. Superresolution signal processing and its applications. SPIE, 1997, 2562: 88-98.
- [5] Li J, Stoica P. Efficient mixed-spectrum estimation with applications to target feature extraction. IEEE Trans. on Signal Processing, 1996, 44(2): 281-295.
- [6] Li J, Stoica P. An adaptive filtering approach to apectral estimation and SAR imaging. IEEE Trans. on Signal Processing, 1996, 44(6): 1469-1484.

APPLICATIONS OF SUPERRESOLUTION SIGNAL ESTIMATORS TO DOPPLER BEAM SHARPENED IMAGING

Cheng Yuping Sun Changyin

(Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract The superresolution method based on the models of both the signal and the noise leads to a superior accuracy than the FFT method. This paper presents applications of super-resolution signal estimators to Doppler beam sharpened imaging and proposes a method for target feature extraction. Experimental results show that the imaging quality are superior than that of traditional FFT method.

Key words Superresolution, Radar imaging, Doppler beam sharpened imaging

程玉平: 男, 1968 年生, 博士生, 主要研究方向: 数字信号处理, 雷达成像.

孙长印: 男, 1963 年生, 博士生, 主要研究方向: 阵列信号处理, 超分辨算法在成像中的应用.