基于稀疏贝叶斯学习的稀疏信号表示 ISAR 成像方法

成 萍[1], 司锡才[1], 姜义成[2], 许荣庆[2]
(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学电子工程技术研究所, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 作为一种新的稀疏信号表示算法, SBL(稀疏贝叶斯学习)方法没有 BP 方法的结构错误, 也比 FOCUSS 方法具有少的多的局部最小点. ISAR 成像问题可以转化为稀疏信号表示的问题, 因此本文首次将 SBL 用于 ISAR 成像. 真实数据的成像结果表明 SBL 是一种比 BP 和 FOCUSS 更有效的 ISAR 成像算法.

关键词: 逆合成孔径雷达; 稀疏信号表示; 稀疏贝叶斯学习; 基寻踪; FOCUSS
中图分类号: TN958 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2008) 03-0547-04

Sparse Signal Representation ISAR Imaging Method Based on Sparse Bayesian Learning

CHENG Ping[1], SI Xi-cai[1], JIANG Yi-cheng[2], XU Rong-qing[2]
(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;
2. Research Institute of Electronic Engineering Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjing 150001, China)

Abstract: As a new sparse signal representation algorithm, SBL (sparse Bayesian learning) method has no structural error as BP and has much fewer local minima than FOCUSS. ISAR imaging problem can be transformed into a sparse signal representation problem, therefore in the paper SBL is first applied in ISAR imaging. Imaging results of real data show SBL is a more effective ISAR imaging algorithm than BP and FOCUSS.

Key words: ISAR(inverse synthetic aperture radar); sparse signal representation; SBL(sparse Bayesian learning); BP(Basis Pursuit); Focal underdetermined system solver

1 引言

在 ISAR(逆合成孔径雷达) 中, 传统的距离-多普勒算法对机动目标成像结果不太理想. 此时一般采用时频分析的方法或超分辨的方法. 但是时频分析的方法总是需要在保持分辨率和抑制交叉项之间进行折衷[1]. 基于现代谱估计的超分辨方法如 MUSIC 和 ESPRIT[2] 需要估计回波数据的协方差矩阵, 计算量很大, 而且超分辨能力有限. 因此, 必须寻求新的成像方法.

由于稀疏信号表示在与信号结构匹配方面具有很大的灵活性, 它已成为近年来的研究热点[3~5]. ISAR 超分辨成像可以转化为稀疏信号表示的问题, 因此稀疏信号表示是一种很有潜力的 ISAR 成像方法. SBL(稀疏贝叶斯学习), 作为一种新的稀疏信号表示算法, 首次被用于 ISAR 真实数据的超分辨成像. 成像结果显示了这种新算法的有效性.

2 ISAR 的稀疏信号表示成像

2.1 ISAR 成像模型

转台目标成像中, 雷达和目标的空间关系如图 1. 坐标 x 沿雷达视线方向, 即距离轴, 坐标 y 是方向轴; 坐标 G 和 N 固定在目标上. 点 o 是目标的旋转中心, H 是目标相对雷达转过的角度. 目标散射函数 g(N, G) 和散射函数的空间谱 G(k_x, k_y) 是一对傅立叶变换[2]

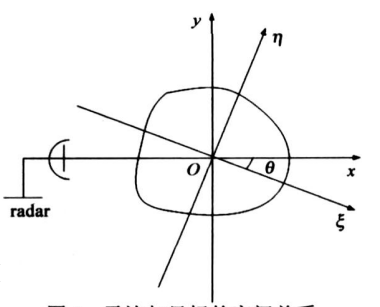


图 1 雷达与目标的空间关系

收稿日期: 2007-06-28; 修回日期: 2007-10-16
基金项目: 教育部博士点基金(No. 20060213009)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\begin{cases} g(N,\theta) = \int_{\Omega} G(k_x,k_y)\exp(j2P(k_xN+k_y\theta))\,dk_x\,dk_y \\ G(k_x,k_y) = \int_{s} g(N,\theta)\exp(-j2P(Nk_x+\theta k_y))\,dN\,d\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中 $k_x = 2f\cos\theta/c$, $k_y = 2f\sin\theta/c$, $j = \sqrt{-1}$ (c 是光速, f 是信号频率); Ω 是空间谱的范围, s 是目标在成像平面上的投影. 当 θ 较小, 并且 $f_0 \gg 10B$ (f_0 是载频, B 是信号带宽), 则有 $k_x = 2f/c$, $k_y = 2f_0\theta/c$.

令 $G_N(k_y) = \int_{\Omega k_x} G(k_x,k_y)\exp(j2Pk_xN)\,dk_x$, 则有[2]

$$g_N(\theta) = g(N,\theta) = \int_{\Omega k_y} G_N(k_y)\exp(j2Pk_y\theta)\,dk_y = \int_{\Omega\theta} G_N(\theta)\exp\left(j\frac{4P}{c}f_0\theta\right)d\theta \quad (2)$$

其中 $\Omega\theta$ 是总转角; $G_N(\theta)$ 是当旋转角为 θ 时目标的距离像. 式(2)表明, 在得到各个旋转角度下距离像的基础上使用傅立叶变换可以得到方位上的分辨, 分辨率为 $D_c = c/(2f_0\Omega\theta)$. 这就是传统的基于傅立叶变换的距离多普勒方法. 可见使用传统方法时方位上的分辨率与旋转角度有关. 当目标机动飞行时, 可用于成像的角度很小. 这样基于傅立叶变换的成像方法就不能得到高分辨率的图像. 此时, 为得到高质量的图像, 可将稀疏信号表示的方法用于 ISAR 成像.

2.1.2 稀疏信号表示

M 维信号空间 V 中, 任意 M 个线性无关的信号(或原子) $\{h_1, h_2, \cdots, h_M\}$ 都是空间 V 的一组基. 于是, V 中任何一个信号 s 都可以表示成这组基的线性组合, 而且表达式是唯一的. 即

$$s(t) = \sum_{k=1}^{M} c_k h_k(t) \quad (3)$$

用矩阵表示为:

$$s = Hc \quad (4)$$

其中 $H = [h_1, h_2, \cdots, h_M]^T$ 可逆. c 是展开系数, 可以由下式求解:

$$c = H^{-1}s \quad (5)$$

为了能够对信号更灵活、更经济地分解, 可以将信号在过完备原子库上进行分解, 即在 $N(N > M)$ 个原子上分解. 但信号在过完备原子库上的分解不是唯一的. 在没有任何先验信息时, 解的稀疏性是唯一可以用于选取解的标准. 这种信号分解的方法称之为稀疏信号表示.

目前常用的稀疏信号表示算法有 BP 和 FOCUSS. BP 具有结构错误[5], FOCUSS 经常收敛到目标函数的局部最小点[5], 因此它们在实际应用中受到了限制. SBL 的方法用于稀疏信号表示[5], 没有 BP 的结构错误, 局部最小点也比 FOCUSS 少的多, 所以更适合解决稀疏信号表示的问题.

2.1.3 ISAR 的稀疏信号表示模型

为将稀疏信号表示的方法用于 ISAR 成像, 可将式(2)作进一步推导. 由式(2)得

$$G_N(\theta) = \int_{\Omega\theta} g_N(\theta)\exp\left(-j\frac{4P}{c}f_0\theta\right)d\theta \quad (6)$$

假设某距离单元内, 用于成像的总转角离散成 M 个点, 得到的散射强度有 N 个采样点, 式(6)可写成离散的形式(同时加入噪声的影响)

$$G_N(m) = \sum_{i=0}^{N-1} g_N(i)\exp(jm\chi_i) + E(m) \quad (7)$$

其中 $m = 0, 1, \cdots, M-1$, $\chi_i = -4Pf_0\theta_i/c$, E 是噪声. 式(7)可看作是 M 维信号空间中的信号 G_N 在 N 个原子上进行分解. 当 $M < N$ 时, G_N 就是在过完备原子上分解, 即对 G_N 进行稀疏信号表示. 设

$$\begin{cases} b = [G_N(0), G_N(2), \cdots, G_N(M-1)]^T \\ x = [g(0), g(1), \cdots, g(N-1)]^T \\ e(\chi_i) = [1, \exp(j1\chi_i), \cdots, \exp(j(M-1)\chi_i)]^T \end{cases} \quad (8)$$

这样式(7)可写成矩阵形式

$$b = Ax + E \quad (9)$$

其中 $A = [e(\chi_0), e(\chi_1), \cdots, e(\chi_{N-1})]$ 是一个 $M \times N$ 的矩阵, 它将某距离单元内未知的散射强度 $x \in \mathbb{C}^N$ 映射成有限的雷达数据 $b \in \mathbb{C}^M$. 矩阵 A 的每一列代表某个频率的采样值. 如果对每一个距离单元, 都从雷达数据估计出散射强度分布, 就可以得到目标的 ISAR 图像. 这就是 ISAR 成像的稀疏信号表示模型.

现在问题的关键是: 如何从雷达数据 b 估计出 x, 也就是如何求解式(9). SBL 是求解式(9)的一种有效方法.

3 稀疏贝叶斯学习算法

下面简单介绍一下稀疏贝叶斯学习方法. 假设式(9)中噪声 E 服从方差为 R^2 的高斯分布, 则 b 的似然函数(PDF)为

$$p(b|x) = (2PR^2)^{-M/2}\exp\left(-\frac{1}{2R^2}\|b-Ax\|_2^2\right) \quad (10)$$

使用最大似然法求上式的 x 会导致过学习. 为避免这种情况, 稀疏贝叶斯方法对权值 x 赋予先验的条件概率分布

$$p(x;C) = \prod_{i=1}^{N}(2PC_i)^{-1/2}\exp\left(-\frac{x_i^2}{2C_i}\right) \quad (11)$$

其中 $C = [C_1, \cdots, C_N]^T$ 是一个控制权值先验方差的 N 维向量. 如果能求得 C, 就很容易得到 x. C 可通过最小化下面的代价函数而得到[8]

$$L(C) = -\log\int p(b|x)p(x;C)\,dx \propto \log|\Sigma_b| + b^T\Sigma_b^{-1}b \quad (12)$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

使用 EM 算法求解上式, 得到的第(k+ 1) 步的迭代公式如下[8]

$$\hat{x}_{(k+1)} = E[x \mid b; C_{(k)}] = (A^{T}A + R^{2}\#_{(k)}^{-1})^{-1}A^{T}b$$

$$C_{(k+1)} = E[\mathrm{diag}(xx^{T}) \mid b; C_{(k)}] = \mathrm{diag}[\hat{x}_{(k)}\hat{x}_{(k)}^{T} + (R^{2}A^{T}A + \#_{(k)}^{-1})^{-1}] \quad (13)$$

其中 #= diag(C) . 尽管 SBL 最初用于回归和分类问题, 当 R2 y 0 时, 也很容易应用于稀疏信号表示. 对于稀疏信号表示的问题, 以上迭代算法可写成

$$\hat{x}_{(k+1)} = \#_{(k)}^{1/2}(A\#_{(k)}^{1/2})^{+}b$$

$$C_{(k+1)} = \mathrm{diag}[\hat{x}_{(k)}\hat{x}_{(k)}^{T} + [I - \#_{(k)}^{1/2}(A\#_{(k)}^{1/2})^{+}A]\#_{(k)}) \quad (14)$$

文献[5, 8] 给出了 SBL 算法中出现局部最小值的条件, 可看出 SBL 的局部最小点的数目比 FOCUSS 方法少得多.

为了验证 SBL 相对于 BP 和 FOCUSS 性能的提高, 文献[5] 对各种方法进行了仿真研究.

首先考虑随机字典, 设 M= 20, N= 40, 信号的稀疏度为 7, 1000 次独立实验的结果见表 1[5] . 可见, SBL 的性能优于 BP 和 FOCUSS.

表 1　随机字典的实验结果对比

	FOCUSS (p= 0. 001)	FOCUSS (p= 0. 9)	BP (p= 1)	SBL
收敛错误	34. 1%	18. 1%	0. 0%	11. 9%
结构错误	0. 0%	5. 7%	22. 3%	0. 0%
总错误	34. 1%	23. 8%	22. 3%	11. 9%

第二个实验是由两个正交字典合成的字典, 每个正交字典大小为 20 @20. 1000 次独立实验的结果见表 2[5] , 结果与随机字典的情况类似. 这说明, 不管字典类型如何, SBL 的性能都优于 BP 和 FOCUSS. 考虑噪声, 也可以得到类似的结果.

表 2　正交字典对的实验结果对比

	FOCUSS (p= 0. 001)	FOCUSS (p= 0. 9)	BP (p= 1)	SBL
收敛错误	31. 8%	17. 1%	0. 0%	11. 8%
结构错误	0. 0%	6. 0%	21. 8%	0. 0%
总错误	31. 8%	23. 1%	21. 8%	11. 8%

有必要指出的是: SBL 算法能够直接得到正则化参数的解析解, 而在 BP 方法和 FOCUSS 方法中难以得到类似 SBL 算法中的解析解, 因此通常利用其他方法实现或由一些先验知识事先确定下来.

4　实验结果

下面给出一个真实 ISAR 数据的成像例子来说明 SBL 用于 ISAR 成像的有效性.

雅克242 飞机, 雷达工作频率为 5. 52GHz, 带宽 400MHz, 每个脉冲有 256 个复采样值. 在目标飞行过程中, 连续取 32 个脉冲(脉冲重复频率为 400Hz, 作 4: 1 抽取) 成一幅像, 相应的旋转角度约为 015b. 由于旋转角度很小, 稀疏信号表示方法可用来提高 ISAR 图像质量. 取同样的 ISAR 数据, 分别用傅立叶变换, BP 方法, FOCUSS 方法和 SBL 方法得到的图像如图 2～ 5.

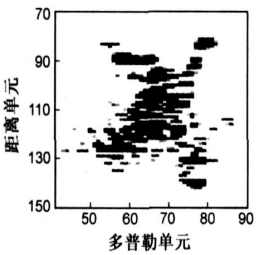


图 2　傅立叶变换的成像结果

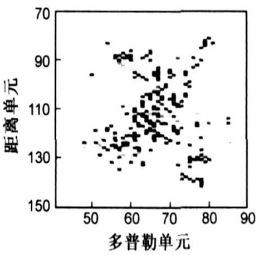


图 3　BP 的成像结果

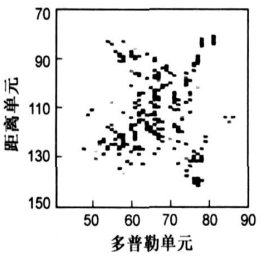


图 4　FOCUSS 的成像结果

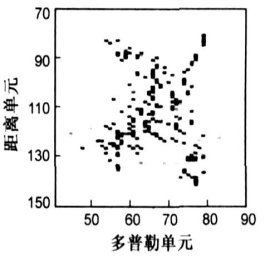


图 5　SBL 的成像结果

这里成像质量的比较, 采用主观评价和客观评价. 主观评价主要依靠人眼比较判断图像质量的优劣. SBL 成像结果中飞机的头部和尾部比 BP 和 FOCUSS 聚焦得更好, 因此 SBL 的成像结果优于 BP 和 FOCUSS. 客观评价采用图像熵作为图像质量评价的标准. 图像熵的定义见文献[9] . 对于一幅 ISAR 图像, 一般它的图像熵越小, 图像的质量就越好. 图 2～ 5 的图像熵分别为 710604, 517559, 517420 和 513390. 因此, 相对于傅立叶变换的方法, 稀疏信号表示的方法可以提高图像方向维的分辨率. 而且在稀疏信号表示的三种算法中, SBL 方法的成像质量最好.

5　结论

SBL 方法首次用于 ISAR 成像. 由于它没有 BP 方法的结构错误, 而且比 FOCUSS 方法的局部最小点少得多, 因而更适合用于稀疏信号表示. 真实 ISAR 数据的成像结果表明与 BP 和 FOCUSS 相比, SBL 是一种更有效, 更有潜力的成像方法.

参考文献:

[1] Chen V C, Qian S. Joint time2frequency transform for radar range2Doppler imaging[J] . IEEE Trans Aerospace and Elec2tronic System, 1998, 34(2) : 486- 499.

[2] 吴强, 王国林, 等. ESPRIT 超分辨 ISAR 成像[J] . 系统工程与电子技术, 1999, 21(7) : 33- 36.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Qiang Wu, Guolin Wang, et al. EPSRIT super2resolution ISAR imaging[J]. Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(7): 33- 36. (in Chinese)

[3] S Chen, D L Donoho, et al. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. SIAM Review, 2001, 43(1): 129- 159.

[4] I F Gorodnitsky, B D Rao. Sparse signal reconstruction from limited data using FOCUSS: A re2weighted minimum norm al2 gorithm[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1997, 45(3): 600- 616.

[5] D P Wipf, B D Rao. Sparse Bayesian learning of basis selection [J]. IEEE Trans Signal Processing, 2004, 52(8): 2153- 2164.

[6] G Zweig. Super2resolution Fourier transform by optimization, and ISAR imaging[J]. IEE Proc2Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 247- 252.

[7] 杜小勇, 胡卫东, 等. 基于稀疏成分分析的逆合成孔径雷达成像技术[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 491- 495.
Xiaoyong Du, Weidong Hu, et al. ISAR imaging techniques based on sparse component analysis[J]. Acta Electronica Sini2 ca, 2006, 34(3): 491- 495. (in Chinese)

[8] D P Wipf, B D Rao. l0 2norm minimization for basis selection [A]. Advances in Neural Information Processing Systems 17 [C]. MIT Press, USA, 2005. 1513- 1520.

[9] Junfeng Wang, D Kasilingam. Global range alignment for ISAR [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 351- 357.

作者简介:



成 萍 女, 1976 年 7 月出生于江苏省盐城市, 现工作于哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 已发表文章 10 余篇, 其中 EI 检索 7 篇. 曾参与国家重点预研项目, 国家 863 项目等. 曾获哈尔滨工业大学博士生奖学金和光华奖学金, 国防科工委优秀毕业生. 主要研究方向为 ISAR 成像算法和目标识别、稀疏信号表示、小波变换等. E2mail: chengping@hit. edu. cn

司锡才 男, 1940 年生, 现为哈尔滨工程大学教授, 博士生导师, 享受政府特殊津贴专家. 主要研究方向为宽频带系统的信号检测、处理与识别等. E2mail: sixical@hrbeu. edu. cn

姜义成 男, 1964 年出生于黑龙江省哈尔滨市, 现为哈尔滨工业大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为信号检测与目标成像识别技术、光电图像处理技术和高分辨成像雷达信息处理技术等.
E2mail: jiangyicheng@hit. edu. cn

许荣庆 男, 1958 年出生于黑龙江省, 现为哈尔滨工业大学教授, 博士生导师. 主要研究领域包括高频超视距雷达系统理论与技术、微波雷达成像理论与技术等. E2mail: xurongqing@hit. edu. cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net