

基于压缩感知的多角度 SAR 特征提取

周汉飞, 李 禹, 粟 毅

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 为提高目标属性散射中心参数估计的精度和鲁棒性, 利用多角度 SAR 数据作为输入, 将参数估计问题转化为稀疏向量重构问题, 使用分步估计算法提高计算效率, 从而实现多角度 SAR 特征提取. 研究内容包括两方面, 一是论证多角度 SAR 的角度和频率分集特性对字典矩阵性能的改善. 另外, 为提高算法效率, 本文提出分步参数估计算法. 首先用理想点目标模型得到初步估计的图像表示, 然后通过图像分割和能量中心计算估计模型阶次、位置和散射类型, 最后以初步估计为先验信息重新构造字典矩阵, 得到最终估计. 实验验证了算法鲁棒性以及分辨率的改善.

关键词: 多角度 SAR; 压缩感知; 属性散射中心; 特征提取

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)03-0543-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.021

Multi-Aspect SAR Feature Extraction Based on Compressive Sensing

ZHOU Han-fei, LI Yu, SU Yi

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: In order to improve the precision and robustness of parameter estimation, the multi-aspect SAR data is applied to estimate model parameter of attributed scattering center. We consider the parameter estimation as a sparse signal reconstruction problem, and propose parameter-sequential algorithm to relieve the computational complexity. Two factors are studied. First, the aspect and frequency diversity can improve the performance of dictionary matrix. Second, in order to reduce the algorithm complexity, the parameter estimation procedure is realized sequentially. The initial imagery is reconstructed by dictionary matrix which is built up by the ideal point scattering model. The model order, location and type of scattering center are established primarily by energy segment of initial imagery. Then all parameters are estimated over again based on the dictionary matrix which is built up by the prior estimation. The feasibility and robustness of algorithm is validated by numeric simulation.

Key words: multi-aspect SAR; compressive sensing; attributed scattering center; feature extraction

1 引言

高频区雷达目标散射可近似为少量属性散射中心响应之和. 属性散射中心为雷达目标识别提供了简明精炼、物理含义明确的特征向量^[1~3]. 属性散射中心参数估计对雷达目标识别具有重要价值^[2,4].

多角度 SAR 从不同角度对目标进行探测, 包含更丰富的目标特征信息. 随着雷达探测能力的发展, 如何利用多角度 SAR 数据^[5]估计属性散射中心参数迫切需要研究.

经典属性散射中心参数估计以图像切片为输入, 通过逐个拟合能量集中区域估计属性散射中心参数^[6]. 由于多角度 SAR 空间采样不连续, 经典 SAR 成像算法不能实现多角度 SAR 成像^[7]. 因此经典属性散射中心参数估计算法不能应用于多角度 SAR 特征提取.

压缩感知(CS)理论^[8~10]的发展为多角度 SAR 特征提取提供了思路. 首先通过压缩感知字典矩阵建立测量数据与目标向量的联系, 然后利用稀疏重构算法重构目标, 最后根据目标离散规则得到属性散射中心参数估计. 雷达目标高频散射的稀疏性为压缩感知理论在雷达信息处理中的应用奠定了基础^[3]. 基于压缩感知的雷达成像已经取得了丰富的研究成果^[11~16], 而利用雷达数据估计属性散射中心参数目前还未见诸报道.

本文将参数估计与压缩感知理论相结合, 利用多角度 SAR 测量数据估计目标属性散射中心参数. 研究内容主要围绕字典矩阵开展, 具体分为两个方面, 一是分析多角度 SAR 测量模式对字典矩阵性能的影响, 证明多角度 SAR 的角度和频率分集特点能够改善字典矩阵性能. 二是通过分步估计降低字典矩阵维数, 提高算法效率.

2 基于压缩感知的多角度 SAR 特征提取

2.1 多角度 SAR 测量模型

多角度 SAR 是指多个 SAR 传感器从不同角度对目标进行探测. 本文假设不同 SAR 传感器处于同一平面, 其等效二维模型如图 1 所示. 目标散射函数用 $g(\theta)$ 表示, θ 表示模型参数向量.

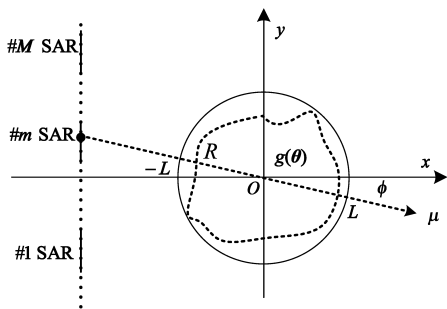


图1 多角度SAR二维模型

假设 # m SAR 发射脉冲宽度为 T_m 的线性调频 (LFM) 信号 s_m , 载频为 f_m , γ_m 为调频率, 则:

$$s_m(t) = \begin{cases} e^{j(2\pi(f_m t + \frac{1}{2}\gamma_m t^2))}, & |t| \leq \frac{T_m}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

发射信号沿 μ 传播, μ 与 x 轴的夹角为 ϕ , c 为电磁波传播速度, 则回波信号为:

$$r(t, \varphi) = \int_{-L}^L q_\varphi(u) e^{j\frac{4\pi u}{c}(f_m + \gamma(t - \tau_0))} du \quad (2)$$

其中 $\tau_0 = 2R/c$, $q_\varphi(u)$ 表示 $g(\theta)$ 在 μ 上的投影:

$$q_\varphi(u) = \iint \delta(u - x \cos \phi - y \sin \phi) g(\theta) dx dy \quad (3)$$

令 $f = f_m + \gamma(t - \tau_0)$ 并将式(3)代入式(2), 有:

$$R(f, \phi) = \iint_{x^2 + y^2 \leq L^2} g(\theta) e^{j\frac{4\pi f}{c}(x \cos \phi + y \sin \phi)} dx dy \quad (4)$$

对多角度 SAR, (f, ϕ) 的空间分布如图 2. 图 2 也称为多角度 SAR 的谱支撑 (Spectral Support).

假设目标由 S 个属性散射中心组成, 则式写成离散形式为^[2,3]:

$$R(f, \phi) = \sum_{s=1}^S a_s g(f, \phi; \theta_s) \quad (5)$$

其中,

$$g(f, \phi; \theta_s) = \left(\frac{j f}{f_m} \right)^{\alpha_s} \exp(-2\pi f \gamma_s \sin \phi) \cdot \text{sinc} \left(\frac{2\pi f}{c} L_s \sin(\phi - \phi_s) \right) e^{j\frac{4\pi f}{c}(x_s \cos \phi + y_s \sin \phi)} \quad (6)$$

这里, a_s 表示散射强度, $\theta = [x, y, \alpha, L, \phi, \gamma]^T$ 表示属性散射中心参数. (x, y) 表示散射中心位置, α 表示频率依赖, L 和 ϕ 表示分布式散射中心长度和方向. γ 表示局部散射中心方位依赖. 本文根据多角度测量数据

$R(f, \phi)$, 利用压缩感知理论估计模型参数 $\{\theta_s\}_{s=1}^S$ 和 $\{a_s\}_{s=1}^S$.

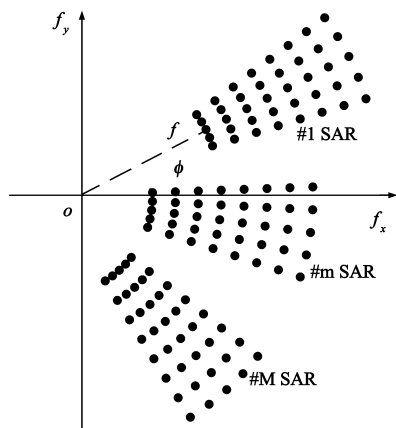


图2 多角度SAR测量点分布(频率-角度空间)

2.2 基于压缩感知的属性散射中心参数估计

测量空间采样点如图 2 所示. 排序测量空间采样点, 得到测量向量 $f = [f_1, f_2, \dots, f_K]^T$, 其中 $f_k = [f_k, \phi_k]^T$ 表示第 k 个测量点.

采样参数空间, θ_n 表示参数空间第 n 个采样点, 则参数向量表示为 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$. 令

$$\varphi_n = g(f; \theta_n) \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

$$\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N] \quad (8)$$

假设 $a = [a_1, a_2, \dots, a_n, \dots, a_N]^T$, 其中 a_n 表示参数点 θ_n 对应的散射强度. 如果测量数据用向量 r 表示, 即:

$$r = [R(f_1), R(f_2), \dots, R(f_K)]^T \quad (9)$$

则式(5)用矩阵向量形式表示为:

$$r = \Phi a \quad (10)$$

实际情况中, 噪声不可避免, 因此有:

$$r = \Phi a + \varepsilon \quad (11)$$

ε 表示方差为 σ^2 的噪声向量.

在压缩感知理论中, a 和 r 分别称为目标向量和测量向量, Φ 称为字典矩阵. 根据 r 和 Φ , 得到 a 的重构向量 \hat{a} , 对 \hat{a} 进行阈值操作, 有:

$$\hat{a}_n = \begin{cases} 0, & \text{if } 20 \log_{10} \left(\frac{|\hat{a}_n|}{\max_j |\hat{a}_j|} \right) < \tau \\ \hat{a}_n, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (12)$$

其中 τ 为阈值.

假设 $\{i_s\}_{s=1}^{\hat{S}}$ 表示 \hat{a} 中非零元素索引集, 则 \hat{S} 为模型阶次估计, 其它参数通过以下两式得到:

$$\hat{\theta}_s = \theta_{i_s} \quad (s = 1, 2, \dots, \hat{S}) \quad (13)$$

$$\hat{a}_s = \hat{a}_{i_s} \quad (s = 1, 2, \dots, \hat{S}) \quad (14)$$

2.3 压缩感知基本理论

向量 a 的重构精度和稳定性是参数估计性能的决

定因素.压缩感知理论指出,如果目标向量具有稀疏性,当字典矩阵满足约束等距性(Restricted Isometry Property, RIP)要求时,则可用远少于目标向量维数的测量次数重构目标.引入如下定理.

定理 1^[17] (字典矩阵性能) 设 \mathbf{a} 是任意 S -稀疏信号(只有至多 S 个非零元素),字典矩阵 $\Phi \in \mathbb{C}^{K \times N}$ 的约束等距常数 δ_S 是指满足下式的最小 δ :

$$(1 - \delta) \|\mathbf{a}\|_2^2 \leq \|\Phi \mathbf{a}\|_2^2 \leq (1 + \delta) \|\mathbf{a}\|_2^2 \quad (15)$$

如果 $\delta_S \in (0, 1)$, 则矩阵 Φ 具有约束等距性.

因为矩阵的 RIC 很难计算, 因此经常用容易计算的互相关替代(MC)^[18]. 字典矩阵 MC 定义为:

$$\mu = \max_{i \neq j} \frac{|\langle \phi_i, \phi_j \rangle|}{\|\phi_i\|_2 \|\phi_j\|_2} \quad (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (16)$$

其中, ϕ_i 表示 Φ 的第 i 列(第 i 个原子). μ 越小, 表示传感矩阵越不相干.

压缩感知的另一个基本问题是重构算法性能. 基追踪去噪(BPDN)是求解式(11)的经典算法, 是其它各类型算法重构性能的参考^[19]. BPDN 通过求解如下最优化问题得到:

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a}} \|\mathbf{a}\|_1 \text{ s.t. } \|\mathbf{r} - \Phi \mathbf{a}\|_2 \leq \zeta \quad (17)$$

BPDN 的重构性能有如下定理^[18]:

定理 2 (算法重构性能). 设 \mathbf{a} 是任意 S -稀疏信号, 字典矩阵互相关为 μ , $\hat{\mathbf{a}}$ 表示 BPDN 重构向量. 如果 S 和 μ 的关系满足:

$$S < (\mu^{-1} + 1)/4 \quad (18)$$

则有:

$$\|\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{a}\|_2 \leq (\sigma + \zeta) / \sqrt{1 - \mu(4S - 1)} \quad (19)$$

定理 2 建立了目标重构性能、向量稀疏度以及字典矩阵性能三者之间的关系.

3 分步参数估计算法

3.1 分步估计算法流程

本文提出分步估计算法降低矩阵维数. 首先用点散射模型描述目标, 在此基础上构造点散射字典矩阵. 如此可估计模型阶次、散射中心位置及散射类型, 称为粗估计. 然后根据粗估计值, 利用属性散射中心模型重新构造属性散射字典矩阵, 再次估计目标参数, 称之为精估计. 算法流程如图 3 所示.

3.2 点散射和属性散射字典矩阵的构造

点散射字典矩阵的参数空间为 $\theta = [x, y]^T$. 对属性散射字典矩阵而言, 尽管其参数空间 $\theta = [x, y, \alpha, L, \phi, \gamma]^T$ 为六维空间, 但是因为已经有散射中心个数、类型以及位置的初步估计, 实际采样为二维到三维空间. 这大大降低了字典矩阵维数.

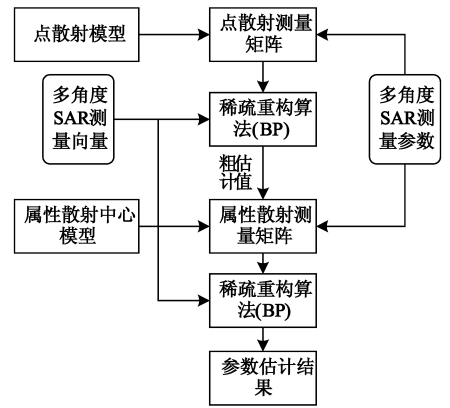


图3 分步参数估计算法流程

3.3 粗估计值的确定

分步参数估计算法的核心是粗估计值的确定, 包括模型阶次、属性散射类型以及散射中心位置. 首先将稀疏重构向量转换为图像. 为了更清晰地表现散射中心空间结构, 利用傅里叶变换对图像进行插值.

3.3.1 模型阶次估计

通过分割图像上的能量区域实现模型阶次估计. 在本文中, 能量区域分割通过分水岭算法实现. 分割区域数目即模型阶次.

3.3.2 属性散射中心类型判断

散射中心类型有分布式和局部型两种, 它们的空间结构不同. 图 4 是理想散射点与属性散射中心的空间结构. (a) 为理想散射点, (b) 为局部型散射中心, (c) 和 (d) 为分布式散射中心. (c) 和 (d) 的区别在于测量角与散射中心方向的差角不同, 其中 (c) $|\phi - \phi_s| = 10^\circ$, (d) $|\phi - \phi_s| \rightarrow 0$. 可以看出, 局部型散射中心具有近似正方形的能量分布, 而分布式散射中心具有长条形结构.

3.3.3 位置估计

位置估计通过计算分割区域能量中心确定. 因为

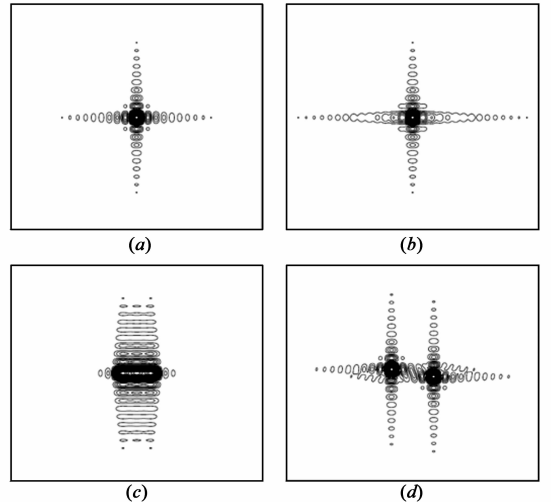


图4 理想散射点与属性散射中心结构差异. (a)理想散射点, (b)局部型散射中心, (c)和(d)分布式散射中心.

模型失配影响,位置估计存在误差.因此在构造属性散射字典矩阵时,需要采样粗估计值及邻域.

3.4 精估计值的确定

首先利用粗估计重新构造字典矩阵,降低矩阵维数.然后使用 BPDN 算法得到非零元素的位置.最后由式和式即可得到精确参数估计结果.

4 多角度 SAR 字典矩阵性能影响因素分析

原子 ϕ_i 和 ϕ_j 的归一化相干系数表示为:

$$\mu_{ij} = \frac{|\langle g(\mathbf{f}, \boldsymbol{\theta}_i), g(\mathbf{f}, \boldsymbol{\theta}_j) \rangle|}{\|g(\mathbf{f}, \boldsymbol{\theta}_i)\|_2 \|g(\mathbf{f}, \boldsymbol{\theta}_j)\|_2} \quad (20)$$

当向量 \mathbf{f} 一定时,有 $\mu_{ij} \propto 1/\|\boldsymbol{\theta}_i - \boldsymbol{\theta}_j\|_1$,其中:

$$\|\boldsymbol{\theta}_i - \boldsymbol{\theta}_j\|_1 = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| + |\alpha_i - \alpha_j| + |L_i - L_j| + |\bar{\phi}_i - \bar{\phi}_j| + |\gamma_i - \gamma_j| \quad (21)$$

本文以 3 角度 SAR 为例,研究角度和频率分集以及采样间隔对字典矩阵性能的影响.假设 3 个角度信号载频都为 10GHz,带宽为 500MHz,方位合成角为 3°.方位向测量中心角分别为:0°, $\Delta\phi_1$ 和 $-\Delta\phi_2$.则 $\Delta\phi_1$ 、 $\Delta\phi_2$ 对 μ 的影响如图 5(a)所示.图 5(b)描述频率分集对字典矩阵性能的改善.第一种情况,发射信号频率一致,载频为 5GHz,带宽为 500MHz.另一种为频率分集,带宽为 500MHz,发射信号载频分别为 2、5 和 7GHz.可以看出,角度和频率分集可以改善字典矩阵性能.

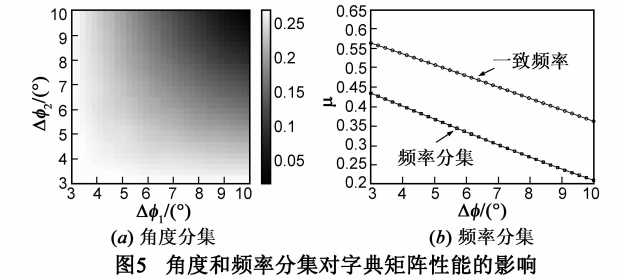


图5 角度和频率分集对字典矩阵性能的影响

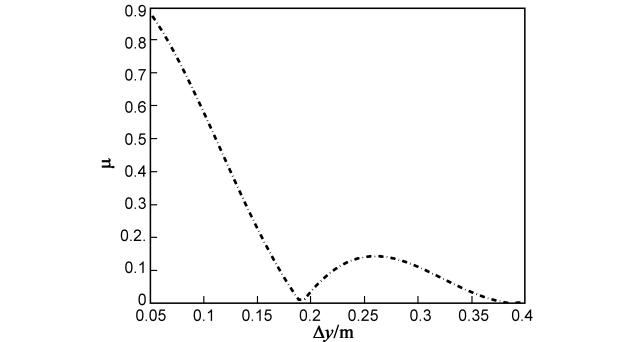


图6 采样间隔对字典矩阵性能的影响

图 6 表示方位向采样间隔对字典矩阵的影响.增大采样间隔可降低字典矩阵互相干,但是同时会降低参数估计分辨率.因此,采样间隔选择必须同时考虑参数估计分辨率和字典矩阵性能.

5 实验及分析

5.1 仿真目标实验

多角度 SAR 参数如表 1 所示.仿真目标由 7 个散射中心组成,1~5 是局部型散射中心,6、7 是分布式散射中心,散射中心参数如表 2 所示.

表 1 多角度 SAR 系统参数				
编号	载频	带宽	方位向中心角	合成孔径
# 1 SAR	10GHz	1GHz	0°	2°
# 2 SAR	5GHz	600MHz	-6°	2°
# 3 SAR	7GHz	1GHz	4°	2°

表 2 仿真目标属性散射中心模型参数								
编号	类型	a	x	y	α	L	$\bar{\phi}$	γ
1	局部型	1	0	0	0	—	—	0
2	局部型	1	1.0	1.0	0	—	—	0
3	局部型	1	1.2	1.0	0	—	—	0
4	局部型	1	1.0	1.2	0	—	—	0
5	局部型	0.75	-1.0	-1.0	1	—	—	2.0e-10
6	分布式	4	1.0	-1.0	1	0.2	-8°	—
7	分布式	7	-1.0	1.0	0	0.15	10°	—

图 7 用图像表示初步估计结果.首先根据 7 个分割区域的形状估计散射中心类型,然后通过计算分割区域质心估计散射中心位置.最后根据粗估计值重新构造字典矩阵,最终估计结果如表 3 所示.可以看出,除散射强度存在一定误差外,基于压缩感知的参数估计能够取得很好的估计效果.

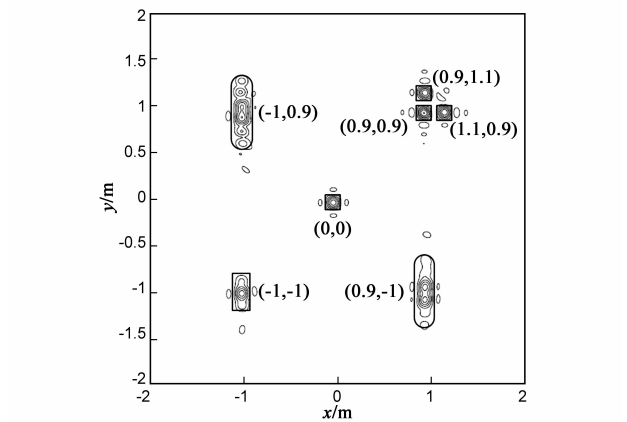


图7 仿真目标初步估计结果

表 3 仿真目标属性散射中心参数估计							
编号	估计类型	\hat{a}	\hat{x}	\hat{y}	$\hat{\alpha}$	\hat{L}	$\hat{\gamma}$
1	局部型	0.8	0	0	0	—	0
2	局部型	1.05	1.0	1.0	0	—	0
3	局部型	1.1	1.2	1.0	0	—	0
4	局部型	1.08	1.0	1.2	0	—	0
5	局部型	0.84	-1.0	-1.0	1	—	3.0e-10
6	分布式	5.0	1.0	-1.0	1	0.24	-8°
7	分布式	6.9	-1.0	1.0	0	0.15	10°

5.2 SLICY 目标测量数据实验

SLICY 目标是由多个标准散射体组成的简单目标.使用电磁计算软件对目标散射进行计算,计算参数同表 1.

初步估计结果如图 8 所示,一共找到 5 个能量区域.利用粗估计值为先验信息,得到最终估计如表 4 所列.根据参数估计结果,可判断属性散射中心对应的标准散射体类型(如图 8).

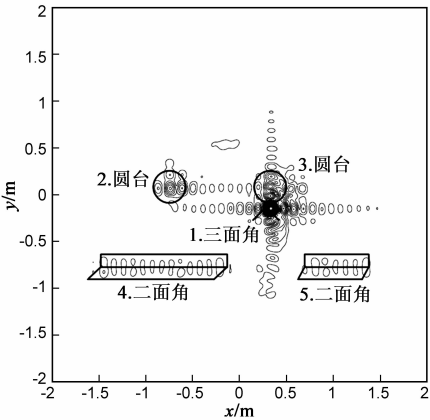


图8 SLICY目标估计结果

表 4 SLICY 目标属性散射中心参数估计

编号	估计类型	\hat{a}	\hat{x}	\hat{y}	$\hat{\alpha}$	\hat{L}	$\hat{\phi}$	$\hat{\gamma}$
1	局部型	2.2	0.4	-0.2	1	—	—	0
2	局部型	1.6	-0.7	0.3	1/2	—	—	1.5e-10
3	局部型	1.7	0.5	0.3	1/2	—	—	2.3e-10
4	分布式	3.1	-0.8	-0.8	1	1.2	0°	0
5	分布式	2.4	1.1	-0.8	1	0.7	0°	0

5.3 与传统多角度 SAR 成像算法的比较

利用多角度 SAR 数据提取目标特征,目前还未见相关研究见诸报道.福罗里达大学的 Larsson E G 等利用幅度相位估计(APES)实现了多角度 SAR 成像^[20].图 9 比较了该方位与本文算法.由于 APES 本质上是基于傅里叶的谱估计方法,因此不能克服采样不连续导致的高旁瓣(图 9(a)),而本文方法克服了高旁瓣问题,提高了分辨率(图 9(b)).

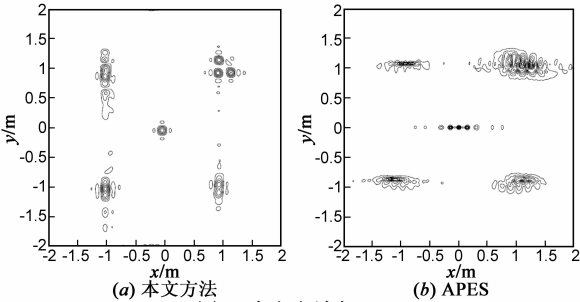


图9 本文方法与APES

5.4 噪声对估计性能的影响

图 10 表示测量数据信噪比(SNR)对部分参数的估计影响,参数估计正确率通过 200 次蒙特卡洛实验统计得到.通过比较看出,在低 SNR 条件下,对模型阶次、散射中心类型以及频率依赖因子 α 的估计正确率能达到 85% 以上,对分布式散射中心的长度估计正确率也能达到 75%.随着信噪比的提高,参数估计的正确率也有所上升.当 SNR = 20dB 时,模型阶次和类型的估计正确率能达到 95%.

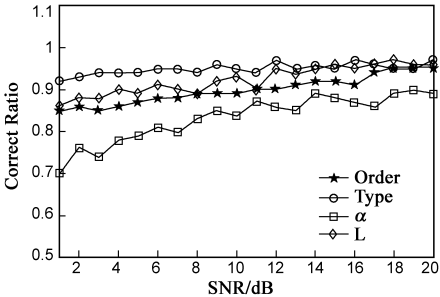


图10 SNR对部分参数估计性能的影响

6 结束语

利用压缩感知理论估计模型参数是一种新的参数估计思路.该思路的可行性及参数估计性能取决于字典矩阵设计.对多角度 SAR 测量而言,角度和频率分集改善了字典矩阵性能.

从实验结果看,本文的研究思路及方法是可行的.提取的参数特征对雷达目标识别具有十分重要的意义.

值得指出的是,雷达发射信号参数以及空间测量位置对字典矩阵性能的影响是一个复杂的数学问题.从定量方面建立它们的内在联系值得进一步研究,这对基于压缩感知的雷达信息获取具有重要指导意义.

参考文献

[1] Keller J B. Geometrical theory of diffraction[J]. Journal of the Optical of America, 1962, 52(2): 116 – 130.

[2] Potter L C, Moses R L. Attributed scattering centers for SAR ATR[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6 (1): 79 – 91.

[3] Gerry M J, Potter L C, Gupta I J, et al. A parametric model for synthetic aperture radar measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 4 (7): 1179 – 1188.

[4] Dudgeon D E, Lacoss R T. An overview of automatic target recognition[J]. Lincoln Lab J, 1993, 6(1): 3 – 10.

[5] 彭岁阳, 张军, 沈振康. 基于斜飞模式的双基地 SAR 成像算法[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 1967 – 1974.

- Peng Sui-yang, Zhang Jun, Shen Zhen-kang. The bistatic SAR imaging algorithm based on slanting flight mode[J]. Acta Electronic Sinica, 2011, 39(9): 1967 – 1974. (in Chinese)
- [6] Koets M A, Moses R L. Feature extraction using attributed scattering center models on SAR imagery[A]. SPIE Conference on Algorithms for SAR Imagry VI[C]. Orlando, Florida, USA; SPIE, 1999. 104 – 115.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [8] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289 – 1306.
- [9] Candes E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainly principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489 – 509.
- [10] Austin C D, Moses R L, Ash J N, et al. On the relation between sparse reconstruction and parameter estimation with model order selection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(3): 560 – 570.
- [11] Herman M, Strohmer T. High-resolution radar via compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(6): 2275 – 2284.
- [12] Patel V M, Easley G R, Healy D M, et al. Compressed synthetic aperture radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2): 244 – 254.
- [13] Alonso M T, Dekker P L, Mallorqui J J. A novel strategy for radar imaging based on compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12): 4285 – 4295.
- [14] Zhang Lei, Xing Mengdao, Qiu Chengwei, et al. Resolution enhancement for inversed synthetic aperture radar imaging under low SNR via improved compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 2010, 48(10): 3824 – 3838.
- [15] Zhang Lei, Qiao Zhijun, Xing Mengdao, et al. High-resolution ISAR imaging with sparse stepped-frequency waveforms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4630 – 4651.
- [16] Zhang Lei, Qiao Zhijun, Xing Mengdao, et al. High-resolution ISAR imaging by exploiting sparse apertures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 997 – 1008.
- [17] Baraniuk R G. Compressive sensing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118 – 121.
- [18] Donoho D L, Elad M, Temlyakov V N. Stable recovery of sparse overcomplete representation in the presence of noise[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(1): 6 – 18.
- [19] Chen S, Donoho D L, Saunders M. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. SIAM J Sci Comput, 1999, 20(1): 33 – 61.
- [20] Larsson E G, Stoica P, Li J. Amplitude spectrum estimation for two-dimensional gapped data[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(6): 1343 – 1354.

作者简介



周汉飞(通信作者) 男, 1981 年 7 月出生
于湖南涟源. 2004 年、2008 年在海军大连舰艇学
院获学士、硕士学位. 现为国防科技大学博士研
究生, 主要从事雷达信息处理、多角度 SAR 特征
提取以及压缩感知等方面的研究工作.

E-mail: hanfei_zhou@yeah.net



李 禹 男, 1975 年生, 河南南阳人, 博士,
副教授, 主要从事超宽带雷达信号处理、遥感技
术等的研究工作.

E-mail: spr_2003@163.com



栗 毅 男, 1961 年 11 月出生于山东泰安.
教授、博士生导师, IEEE 高级会员. 主要从事雷
达信号处理、雷达系统、遥感信息处理的研究.

E-mail: y. su@yeah.net