

基于复数信息传递的结构稀疏宽角合成孔径雷达成像算法

蒋成龙^{*①②③} 张冰尘^{①②} 王正道^④ 洪文^{①②}

^①(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

^④(爱荷华州立大学 美国)

摘要: 传统相关处理算法不能完全解决宽角合成孔径雷达(WASAR)成像中目标的散射特性随观测角度变化的问题。稀疏信号处理为该问题提供一种新思路,各向异性问题可以建模成欠定方程组。随角度增大,未知量的规模以观测孔径数目的线性规模增长,导致成功重建难度增大,甚至是重建失败。该文提出一种基于信息传递原理的宽角合成孔径雷达成像方法。根据宽角合成孔径雷达的观测几何及目标散射特性在不同角度之间存在的相关性,建立基于结构稀疏的成像模型;然后利用信息传递原理,提出基于结构稀疏复数信息传递(GCAMP)的成像算法求解该成像模型。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 宽角合成孔径雷达成像; 各向异性散射特性; 结构稀疏; 信息传递

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)08-1793-08

DOI: 10.11999/JEIT141300

Group-sparse Complex Approximate Message Passing Algorithm for Wide Angle Synthetic Aperture Radar Imaging

Jiang Cheng-long^{①②③} Zhang Bing-chen^{①②} Wang Zheng-dao^④ Hong Wen^{①②}

^①(*Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China*)

^②(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^③(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

^④(*Iowa State University, USA*)

Abstract: Conventional matched filtering based algorithms are not sufficiently good at dealing with the anisotropic backscattering behavior of targets in Wide Angle SAR (WASAR) imaging. Sparse signal processing provides a new idea for this problem, the anisotropic problem is modeled as a group of under-determined linear equations. However, the scale of unknowns in the under-determined equations is in linear order of the number of the observation angle. As the observation angle increases, the anisotropic problem becomes more and more difficult to be solved, even failed for conventional sparse signal processing algorithms. This paper presents a Group-sparse Complex Approximated Message Passing (GCAMP) algorithm for WASAR imaging. Firstly, a group sparse based WASAR imaging model is provided according to the structured property of backscattering coefficients across different observation angles. Secondly, the GCAMP algorithm is derived from the imaging model using message passing theory. Results of simulation demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: SAR; Wide Angle SAR (WASAR) imaging; Anisotropic backscattering; Group sparse; Message passing

1 引言

宽角合成孔径雷达(Wide Angle SAR, WASAR)^[1]指的是合成孔径角度满足使方位向分辨率大于距离向分辨率要求的一类合成孔径雷达成像模式。为实现这类大角度观测,除了需要所观测的

回波数据在较长持续时间内保持相干特性之外,同时还要求获得这段时间内雷达平台的精确位置信息,这得益于现代高精度实时的全球定位系统、惯性导航系统。目前主流的WASAR成像算法包括后向投影算法、极坐标格式算法等。由于收集了很大角度范围内观测目标的雷达后向散射信息,所以WASAR可以得到高分辨率的雷达图像,从而提供了常规SAR所不具备的目标识别与可视化的潜力。

2014-10-11 收到, 2015-05-11 改回, 2015-06-09 网络优先出版

国家 973 计划项目(2010CB731905)资助课题

*通信作者: 蒋成龙 chenglong.j@gmail.com

WASAR成像需要考虑目标随观测角度变化的散射特性。由于叠掩、闪烁现象以及目标非理想几何特性等因素,目标的散射信息在WASAR观测角度范围内存在较大变化,使用常规成像算法难以发挥WASAR的潜在优点。目前有一系列方法被提出以解决该问题。文献[2]提出基于滤波器的方法,将目标散射特性函数作为卷积核对方位向回波信号进行滤波,从而得到目标散射系数的峰值,但是由于目标的散射类型并非精确已知,非理想滤波造成信噪比损失以及分辨率降低;另外相干累积时间减少,各向同性目标的信噪比也会下降,图像的动态范围减小。文献[3]提出改进的滤波器方法,采用矩形窗函数作为卷积核,并设定门限对各向异性目标采用自适应方法成像、对其他目标采用全孔径方法成像。这种方法提高了各向同性目标的成像信噪比,保持了图像的动态范围,同时计算复杂度从 $O(N \cdot \log N)$ 降为 $O(N)$,但是依然面临分辨率降低的问题。上述这些方法都是通过相关处理完成成像过程,并不能充分实现WASAR模式的优点。

稀疏微波成像^[4]为解决WASAR成像的各向异性问题提供另一种思路。文献[5]在子孔径成像中利用稀疏正则化方法增强目标分辨能力的思路,在一定程度上解决了子孔径成像导致分辨率降低的问题,但该方法未充分利用整个观测孔径内目标的散射信息。文献[6]通过建立过完备字典的方式结合稀疏信号处理方法进行成像。过完备字典中包含了目标散射特性的所有组合。由于实际目标散射特性只是字典中子集,所以问题的解是稀疏的,能够利用稀疏方法求解,但该方法所求问题存在较严重的欠定性,且未知量是方位向观测数的平方量级,只适合处理非常稀疏的场景。文献[7,8]假定目标散射特性在局部观测角度内的具有一定相关性且变化较小,提出了一种联合稀疏恢复的方法。该方法针对子孔径方法和过完备字典方法都有所改进,但是其所构建模型存在一定的矛盾性,且所求解问题仍具有病态性,没有较高效的求解算法。文献[9]将WASAR成像的各向异性问题等效成SAR视频成像问题,利用隐性马尔科夫过程对各向异性目标的散射特性建模,并提出利用动态压缩感知的方法进行成像。该方法可在一定程度上降低问题的病态性,但是其散射模型在限制了对整个观测孔径内目标的散射信息的利用。WASAR的理想平台轨迹可以是直线或者圆弧。圆迹合成孔径雷达(Circular SAR, CSAR)^[10,11]是一种典型的WASAR观测模式,雷达平台相对观测目标作近似圆周运动,雷达波束始终照射目标场景区域,形成目标2维孔径,可实现对目

标的3维观测。文献[12]提出了利用稀疏信号处理方法进行CSAR成像。考虑目标各向异性时,利用稀疏方法求解CSAR成像问题的难度更大。

由上可知,现有基于稀疏信号处理的WASAR成像中各向异性问题的未知量数目以观测孔径的线性规模增长,随着WASAR合成孔径角度增大,问题出现严重的欠定性,难以使用常规稀疏微波成像算法处理该类问题。为了解决上述问题,本文提出一种基于信息传递原理的WASAR成像方法。首先根据WASAR观测模型及目标散射特性随角度变化的特点,建立基于结构稀疏的WASAR成像模型;利用信息传递原理,提出基于结构稀疏复数信息传递(Group-sparse Complex Approximately Message Passing, GCAMP)的WASAR成像算法;再对GCAMP算法的具体实施提出了一种基于逆成像算子的有效实现方法。本文安排如下:第2节介绍基于结构稀疏的WASAR成像模型;第3节根据成像模型提出基于GCAMP的WASAR成像算法;第4节利用实验结果说明所提算法的有效性;最后给出总结。

2 基于结构稀疏的宽角SAR成像模型

假定目标的散射特性随角度变化,则WASAR的回波可以表示为

$$r(\tau_m, \theta_i) = \sum_{\mathbf{p}_n \in \mathcal{A}} s(\mathbf{p}_n, \theta_i) \cdot w(\mathbf{p}_n, \theta_i) e^{-j4\pi f_0 \frac{d(\mathbf{p}_n, \theta_i)}{c}} \cdot s_t \left(\tau_m - \frac{2d(\mathbf{p}_n, \theta_i)}{c} \right) + z(\tau_m, \theta_i)$$

其中, τ_m 表示距离向时间; $s(\mathbf{p}_n, \theta_i)$ 表示在雷达平台位于观测角度 θ_i 时,所观测到的位于矢量 \mathbf{p}_n 处目标的反射系数,当且仅当目标各向同性时, s 是关于 θ_i 的常量; \mathcal{A} 表示观测场景的区域范围; i 表示观测角度的序号, $i = 0, 1, \dots, I-1$, I 为观测角度总数; $w(\cdot)$ 是天线加权; f_0 表示发射信号载频; $d(\cdot)$ 表示平台与目标的视线距离; c 是光速; $s_t(\cdot)$ 是基带形式的发射信号; $z(\cdot)$ 是热噪声。

雷达平台位于观测角度 θ_i 时的回波 $\mathbf{r}_{\theta_i} = (r(\tau_1, \theta_i); r(\tau_2, \theta_i); \dots; r(\tau_M, \theta_i))$ 用矩阵形式可以表示为

$$\mathbf{r}_{\theta_i} = \hat{\Phi}_{\theta_i} \cdot \mathbf{s}_{\theta_i} + \mathbf{z}_{\theta_i}$$

其中, 目标的反射系数 $\mathbf{s}_{\theta_i} = (s(\mathbf{p}_1, \theta_i); s(\mathbf{p}_2, \theta_i); \dots; s(\mathbf{p}_N, \theta_i))$; $\hat{\Phi}_{\theta_i}$ 表示观测角度 θ_i 时的观测矩阵。假如目标的反射系数随观测角度变化而改变,则综合所有观测角度的回波可以得到各向异性目标的WASAR观测模型:

$$\begin{pmatrix} r_{\theta_1} \\ r_{\theta_2} \\ \vdots \\ r_{\theta_I} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\Phi}_{\theta_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \hat{\Phi}_{\theta_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \hat{\Phi}_{\theta_I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{s}_{\theta_1} \\ \hat{s}_{\theta_2} \\ \vdots \\ \hat{s}_{\theta_I} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} z_{\theta_1} \\ z_{\theta_2} \\ \vdots \\ z_{\theta_I} \end{pmatrix}$$

简写为

$$\mathbf{r} = \hat{\Phi} \cdot \mathbf{s}_\theta + \mathbf{z}$$

其中，全孔径回波矢量 \mathbf{r} ，全孔径观测矩阵 $\hat{\Phi}$ ，全孔径热噪声矢量 \mathbf{z} ，目标反射系数系数矢量 \mathbf{s}_θ 。从上述成像模型中也可以看出，目标各向异性与合成孔径原理相矛盾，对全孔径回波进行相干处理无法适应各向异性问题。另外，回波数据 \mathbf{r} 的维度保持不变，然而未知量 \mathbf{s}_θ 的维数增加 I 倍。

考虑到实际场景中，并非所有目标的反射系数都随观测角度变化而改变，均匀球体、某些自然地物以及背景杂波等目标的散射特性可以视为各向同性的；而大多数人造目标的散射特性则可合理地视为各向异性。所以，观测模型中可以包含此类信息。WASAR 的观测模型最终可表示为

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} \hat{\Phi} & \bar{\Phi} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{s}_\theta \\ \bar{\mathbf{s}} \end{pmatrix} + \mathbf{z} = \Phi \cdot \mathbf{s} + \mathbf{z}$$

其中，目标的雷达后向散射系数矢量 \mathbf{s}_θ 代表场景中目标散射特性为各向异性的部分； $\bar{\mathbf{s}}$ 代表场景中目标散射特性为各向同性的部分；矩阵 $\hat{\Phi}$ 与 $\bar{\Phi}$ 分别代表各向异性部分的观测矩阵和各向同性部分的观测矩阵。假如 N 表示目标总数， N' 表示各向异性目标的数目，则由 WASAR 观测模型可知， $\Phi \in \mathbb{C}^{MI \times (N+N'(I-1))}$ ， $\hat{\Phi} \in \mathbb{C}^{MI \times N'I}$ ， $\bar{\Phi} \in \mathbb{C}^{MI \times (N-N')}$ ， $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{(N+N'(I-1)) \times 1}$ ， $\mathbf{s}_\theta \in \mathbb{C}^{N'I \times 1}$ ， $\bar{\mathbf{s}} \in \mathbb{C}^{(N-N') \times 1}$ 。为了叙述简便，本文后续将采用符号 r_a 表示回波中的第 a 个元素，其中 $a = M \cdot (i-1) + m$ 。采用符号 $s_{n,i}$ 表示第 n 个目标在第 i 次观测角度下的反射系数，当目标各向异性时， $s_{n,i} = \hat{s}(\mathbf{p}_n, \theta_i)$ ；当目标各向同性时， $s_{n,i} \equiv \bar{s}(\mathbf{p}_n)$ ；并记 $\mathbf{s}_n = (s_{n,1}, s_{n,2}, \dots, s_{n,I})$ 。

文献[7,8]指出目标散射特性在小范围观测角度内的变化较小，在相邻观测角度 θ 内 $s_{n,i}$ 存在一定相关性，成像时可利用这种信息降低稀疏重建难度。事实上，对 \mathbf{s} 的这种信息可以利用结构稀疏性来描述。结构稀疏性是传统信号稀疏性的扩展，其针对对象是组并且允许组内元素存在广泛的结构性特征。WASAR成像中的未知量 \mathbf{s} 相比于传统SAR成像的未知量多了观测角度这一维度。对 \mathbf{s} 按照不同目标分组，记 \mathbf{s}_n 为同一目标在不同观测角度下的反射系数，则基于结构稀疏的WASAR成像模型表示为

$$\arg \min_{\mathbf{s}} \|\mathbf{r} - \Phi \cdot \mathbf{s}\|_2^2 + \lambda \Omega_y(\mathbf{s}) \quad (1)$$

$$\Omega_y(\mathbf{s}) = \|\mathbf{g}\|_1, \quad \mathbf{g}(n) = \|\mathbf{B}_n \mathbf{s}_n\|_2 \quad (2)$$

其中， $\Omega_y(\mathbf{s})$ 表示 \mathbf{s} 的结构稀疏正则化惩罚项， λ 为正则化参数。 \mathbf{s}_n 的结构性体现在矩阵 \mathbf{B}_n 中，不同的结构性约束对应不同的取值。最简单 \mathbf{B}_n 是单位阵，此时对 \mathbf{s}_n 内的元素并不具有严格的结构模式约束； \mathbf{B}_n 可以是循环卷积矩阵，其加权系数为 1，长度与各向异性目标的散射特性有关。

3 基于 GCAMP 的 WASAR 成像算法

稀疏信号处理中的信息传递 (Approximate Message Passing, AMP) 算法的技术细节可以参考文献[13, 14]。其中文献[13]较早提出 AMP 算法，文献[14]提出复数的 AMP 算法并进行相应的性能分析。本节根据基于结构稀疏的 WASAR 模型，利用信息传递原理给出 GCAMP 算法。

3.1 算法推导

假定 \mathbf{B}_n 为正定矩阵，并且与对角阵 $\sqrt{\gamma_n} \mathbf{I}$ 相似，则 GCAMP 算法的推导如下。根据信息传递原理，当且仅当式(1)中的未知量 \mathbf{s} 取到最优解时，关于多维随机变量 \mathbf{s} 的联合概率在渐进意义上 ($\beta \rightarrow \infty$) 取到 1:

$$\mu(\mathbf{s}) = \frac{1}{A(\beta, \mathbf{r})} \prod_{n=1}^N e^{-\beta \lambda \sqrt{\sum_i |b_{n,i} s_n|^2}} \cdot \prod_{a=1}^{MI} \exp \left\{ -\frac{\beta}{2} |r_a - (\Phi \cdot \mathbf{s})_a|^2 \right\} \quad (3)$$

其中， $A(\beta, \mathbf{r})$ 是归一化系数，使概率归一化 $\int_{\mathbf{s}_n} \mu(\mathbf{s}) d\mathbf{s} = 1$ ； $\mathbf{b}_{n,i}$ 是矩阵 \mathbf{B}_n 的行向量。根据信息传递原理，为计算出 \mathbf{s} 最优解，需迭代计算下述传递概率：

$$\begin{aligned} v_{n,i \rightarrow a}^{t+1}(s_{n,i}) &\cong \exp \left\{ -\beta \lambda \sqrt{\sum_i |b_{n,i} s_n|^2} \right\} \prod_{b \neq a} \hat{v}_{b \rightarrow n,i}^t(s_{n,i}) \\ \hat{v}_{a \rightarrow n,i}^t(s_{n,i}) &\cong \int \exp \left\{ -\frac{\beta}{2} |r_a - (\Phi \cdot \mathbf{s})_a|^2 \right\} \\ &\cdot \prod_{l, k \neq n,i} dv_{l,k \rightarrow a}^t(s_{l,k}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中，符号“ \cong ”表示取等号时忽略归一化常量；上标“ t ”表示迭代次数；符号“ d ”表示取微分。假定 $s_{n,i}$ 之间相互独立，当其传递到节点 a 时，假定的 $s_{n,i}$ 均值为 $x_{n,i \rightarrow a}^t$ ，方差为 $\tau_{n,i \rightarrow a}^t / \beta$ ，并且实部与虚部独立不相关。令 $w_{n,i} = r_a - \sum_{l, k \neq n,i} \Phi_{a,(l,k)} s_{l,k}$ ，则根据中心极限定理可知， $w_{n,i}$ 满足分布 $\text{CN} \left(w_{a \rightarrow n,i}^t, \frac{2}{\beta} \hat{\tau}_{a \rightarrow n,i}^t, 0 \right)$ ，其中， $w_{a \rightarrow n,i}^t = r_a$

$$-\sum_{l,k \neq n,i} \Phi_{a,(l,k)} x_{a \rightarrow l,k}^t, \frac{2}{\beta} \hat{\tau}_{a \rightarrow n,i}^t = \frac{2}{\beta} \sum_{l,k \neq n,i} |\Phi_{a,(l,k)}|^2 \tau_{l,k \rightarrow a}^t.$$

假定归一化观测矩阵能量 $\sum_{n,i} \|\Phi_{a,(n,i)}\|^2 = 1$, 并且忽略 $O(|s_{n,i}|^2 / (NI))$ 等小量, 可以得到

$$v_{n,i \rightarrow a}^{t+1}(s_{n,i}) \cong \exp \left\{ -\beta \lambda \sqrt{\sum_i |b_{n,i} s_n|^2} - \frac{\beta}{2(\hat{\tau}^t + 1)} \cdot \left| s_{n,i} - \sum_{b \neq a} \Phi_{b,(n,i)}^* w_{b \rightarrow n,i}^t \right|^2 \right\} \quad (6)$$

$$\hat{v}_{a \rightarrow n,i}^t(s_{n,i}) \cong \frac{1}{\hat{\tau}_{a \rightarrow n,i}^t + 1} \cdot \exp \left\{ -\frac{\beta}{2(\hat{\tau}_{a \rightarrow n,i}^t + 1)} \left| w_{a \rightarrow n,i}^t - \Phi_{a,(n,i)} s_{n,i} \right|^2 \right\} \quad (7)$$

利用 $s_{n,i}$ 关于观测角度之间存在的结构性, 可将其关于观测角度 i 的传递概率 $v_{n,i \rightarrow a}^{t+1}(s_{n,i})$ 合并考虑, 即

$$v_{n \rightarrow a}^{t+1}(s_n) \cong \exp \left\{ -\beta \lambda I \sqrt{\sum_i |b_{n,i} s_n|^2} - \frac{\beta}{2(\hat{\tau}^t + 1)} \cdot \sum_i \left| s_{n,i} - \sum_{b \neq a} \Phi_{b,(n,i)}^* w_{b \rightarrow n,i}^t \right|^2 \right\} \quad (8)$$

假定 B_n 为正定矩阵, 并且与对角阵 $\sqrt{\gamma_n} I$ 相似。上述概率传递表达式得到反射系数 s_n 的均值:

$$\mathbf{x}_{n \rightarrow a}^{t+1} = \eta(\mathbf{u}_{n \rightarrow a}^t; \lambda \sqrt{\gamma_n} I (\hat{\tau}^t + 1)) = \mathbf{u}_{n \rightarrow a}^t \cdot \max(1 - \lambda \sqrt{\gamma_n} I (\hat{\tau}^t + 1) / \|\mathbf{u}_{n \rightarrow a}^t\|_2, 0) \quad (9)$$

$$\mathbf{u}_{n \rightarrow a}^t = \begin{pmatrix} \sum_{b \neq a} \Phi_{b,(n,i)}^* w_{b \rightarrow n,1}^t \\ \sum_{b \neq a} \Phi_{b,(n,i)}^* w_{b \rightarrow n,2}^t \\ \vdots \\ \sum_{b \neq a} \Phi_{b,(n,i)}^* w_{b \rightarrow n,I}^t \end{pmatrix} \quad (10)$$

忽略 $x_{n,i \rightarrow a}^t$ 传递到不同观测数据 r_a 间信息的二阶以上误差项, 得到基于 GCAMP 的 WASAR 成像算法:

$$\mathbf{x}_n^{t+1} = \eta \left(\left(\Phi^H \mathbf{w}^t \right)_n + \mathbf{x}_n^t; \lambda \sqrt{\gamma_n} I (\hat{\tau}^t + 1) \right) \quad (11)$$

其中

$$w_a^{t+1} = r_a - \sum_{l,k} \Phi_{a,(l,k)} x_{l,k}^{t+1} + \sum_{l,k,i} \Phi_{a,(l,k)} \mathbf{J}_{k,i} \begin{pmatrix} \left(\Phi_{a,(l,i)}^* w_a^t \right)^R \\ \left(\Phi_{a,(l,i)}^* w_a^t \right)^I \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{J}_{k,i} = \left(\partial_i^R \eta_k, \partial_i^I \eta_k \right) \quad (13)$$

$$\left(\Phi^H \mathbf{w}^t \right)_n + \mathbf{x}_n^t = \begin{pmatrix} \sum_b \Phi_{b,(n,1)}^* w_b^t + x_{n,1}^t \\ \sum_b \Phi_{b,(n,2)}^* w_b^t + x_{n,2}^t \\ \vdots \\ \sum_b \Phi_{b,(n,I)}^* w_b^t + x_{n,I}^t \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中, 上标 $(\cdot)^R$ 和 $(\cdot)^I$ 分别表示取实部和取虚部操作。由式(9)可知阈值函数 $\eta(\cdot)$ 为多元函数组, 符号 $\partial_i^R \eta_k$ 表示对 $\eta(\cdot)$ 中第 k 个函数求关于其第 i 个自变量实部的偏导数, $\partial_i^I \eta_k$ 表示对 $\eta(\cdot)$ 中第 k 个函数求关于其第 i 个自变量虚部的偏导数。利用上述基于 GCAMP 的 WASAR 成像算法, 当算法迭代收敛或达到最大迭代步数时, 获得 \mathbf{s} 的最优估计:

$$s_{n,i} = x_{n,i}^{t+1} \quad (15)$$

3.2 参数设置

阈值门限 $\hat{\tau}^{(t+1)}$ 的取值可以由多种方法获得。其一是根据场景稀疏度估计值 $\tilde{\rho}$, 计算 $\tilde{\mathbf{x}}_n^{(t+1)}$ 中对应的目标反射系数门限, 进而得到阈值门限 $\hat{\tau}^{(t+1)}$:

$$\mathbf{v}^{(t+1)} = \text{S} \left(\left\| \hat{\mathbf{x}}_1^{(t+1)} \right\|_2 / I; \dots; \left\| \hat{\mathbf{x}}_{N'}^{(t+1)} \right\|_2 / I; \left| \hat{x}_{N'+1}^{(t+1)} \right|; \dots; \left| \hat{x}_N^{(t+1)} \right| \right) \quad (16)$$

$$\hat{\tau}^{(t+1)} = \mathbf{v}^{(t+1)} \left(\max(\lceil \tilde{\rho} N \rceil, N) \right) \quad (17)$$

其中, 函数 $\text{S}(\cdot)$ 表示降序排序; 符号 “ $\lceil \cdot \rceil$ ” 表示向上取整。当能够较为准确估计场景稀疏度时, 该方法可以获得最优的阈值门限。当需要考虑后向散射特性存在持续角度 $\theta_{I_{\text{sub}}}$ 时重建结果 $\tilde{\mathbf{x}}_n^{(t+1)}$ 对 $\hat{\tau}^{(t+1)}$ 的影响, 则此时的 $\mathbf{v}^{(t+1)}$ 应更新为

$$\mathbf{v}^{(t+1)} = \text{S} \left(\left\| \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{x}}_1^{(t+1)} \right\|_2 / I; \dots; \left\| \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{N'}^{(t+1)} \right\|_2 / I; \left| \hat{x}_{N'+1}^{(t+1)} \right|; \dots; \left| \hat{x}_N^{(t+1)} \right| \right) \quad (18)$$

$$\mathbf{B} = (b_{ik})_{I \times I}, b_{ik} = \begin{cases} 1, & |i - k| \leq I_{\text{sub}} / 2 \\ 0, & |i - k| > I_{\text{sub}} / 2 \end{cases} \quad (19)$$

另一种计算阈值门限 $\hat{\tau}^{(t+1)}$ 方法是利用信息传递原理, 可表示为^[13]

$$\hat{\tau}^{(t+1)} = \frac{\hat{\tau}^{(t)} + 1}{N} \left(\sum_n \tilde{\eta} \left(\tilde{\mathbf{x}}_n^{(t+1)}; \lambda_1 I (\hat{\tau}^{(t)} + 1) \right) + \sum_n \tilde{\eta} \left(\tilde{\mathbf{x}}_n^{(t+1)}; \lambda_2 (\hat{\tau}^{(t)} + 1) \right) \right) \quad (20)$$

$$\tilde{\eta}(\mathbf{u}, b) = \frac{b}{\|\mathbf{u}\|_2 - b} \max(\|\mathbf{u}\|_2 - b, 0) \quad (21)$$

3.3 快速计算

在 3.1 节算法实现时, 可利用逆成像算子替代矩阵构建, 实现有效计算, 其主要原理是利用逆成像算子替代矩阵与向量的乘法运算^[15,16], WASAR 成像中主要以逆后向投影(Back Projection, BP)算子构建。由于 GCAMP 算法的主要计算量来自于矩

阵与向量相乘运算，其计算复杂度约为 $O(MNI^2)$ 。利用逆成像算子进行快速计算后，可以利用离散傅里变换以及 1 维处理替代矩阵向量运算，虽然计算量接近于 $O(MNI^2)$ ，但是由于不需要构建观测矩阵 Φ ，可减少存储空间的需求。

本节主要利用了 AMP 算法原理解决实际 WASAR 的成像问题，所提算法与目前已发表的关于 AMP 算法的文献相比，存在如下两处主要的技术创新点：首先，所提算法需要求解如第 1 节所述的问题模型，该模型具有与已有文献的问题模型不同；其次，所提算法针对是复数未知量且实部与虚部是条件独立的随机变量，未知量之间采用结构稀疏性约束。

4 实验

实验主要目的是验证本文提出的 GCAMP 算法能够有效重建 WASAR 各向异性目标的雷达后向散射系数。主要参数为：发射信号载频 5.3 GHz，带宽 100 MHz，采样率 150 MHz，脉宽 1 μ s，天线长度 0.9 m，脉冲重复频率 91 Hz，平台飞行半径 1000 m，高度 3000 m，平台速度 200 m/s，实验观测角度 60°，重建时假定目标反射系数在 2° 范围内不变。

实验场景分简单场景和复杂场景两组，如图 1 所示。简单场景仅包含点目标：4 个各向异性目标

和 1 个各向同性目标。各向异性目标的雷达后向散射系数响应为 sinc 形式，主瓣宽度 40°，其朝向分别与右侧水平线成 25°，30°，35° 和 40° 夹角，各向异性目标之间相互间距 8 m，构成正方形，中心是各向同性目标，所有目标的最大雷达后向散射系数均设置为 1。复杂场景包含了点目标和分布目标：方形围框状物体，其厚度为 0.4 m，向外呈现出二面角的特点，认为是各向异性目标，其幅度为 10，相位满足 0 到 2π 间的随机分布；其中包围着 (8 m \times 8 m) 的均匀的理想分布目标，幅度为 1，相位同样为 0 到 2π 间随机分布。各向异性目标的雷达后向散射系数响应为 sinc 形式。各向异性目标的朝向分别为 0° 和 90°。

图 2 是简单场景下，传统 BP 算法对全孔径数据成像的结果，利用常规稀疏成像 IST 算法对子孔径数据成像后利用信噪比最大原则得到的综合图像结果(迭代 100 次)，利用常规结构稀疏成像算法得到的综合图像结果(迭代 100 次)以及利用本文算法得到的综合图像结果(迭代 30 次)。由图可知利用本文算法可以提高重建质量，缩短重建时间。

图 3 是图 2 中的 5 个目标在不同观测角的反射系数曲线。其中，图 3(a)是各向同性目标的反射系

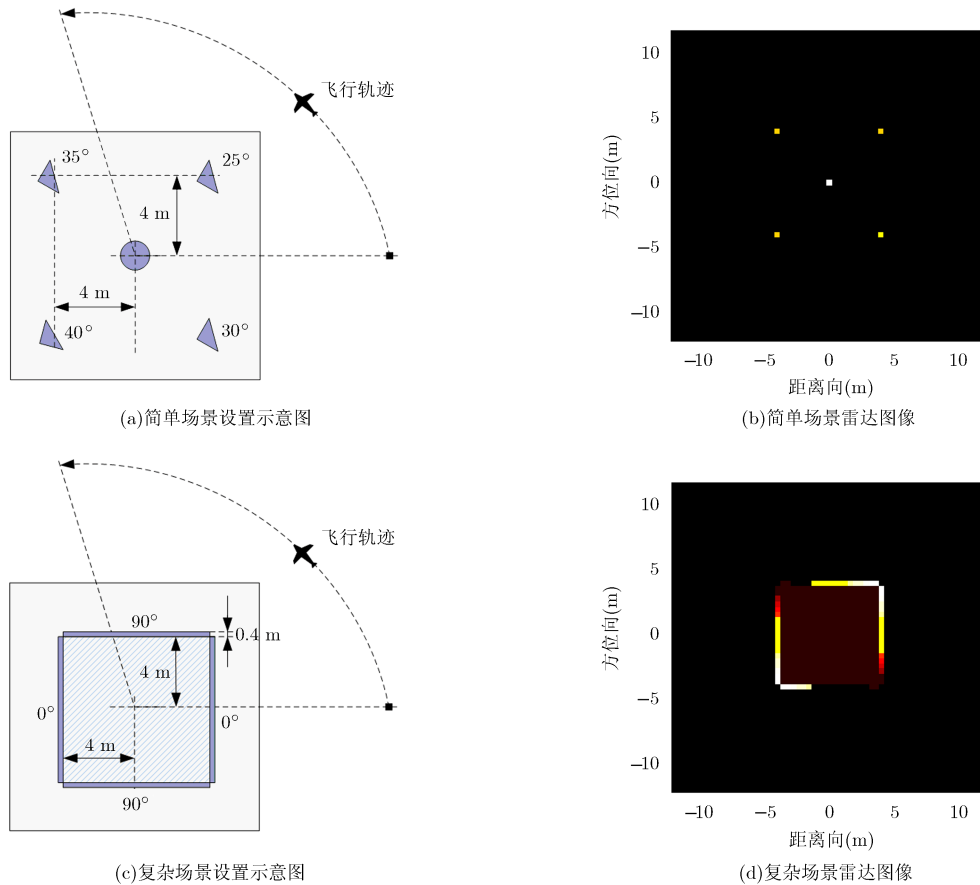


图 1 实验场景及目标真实值

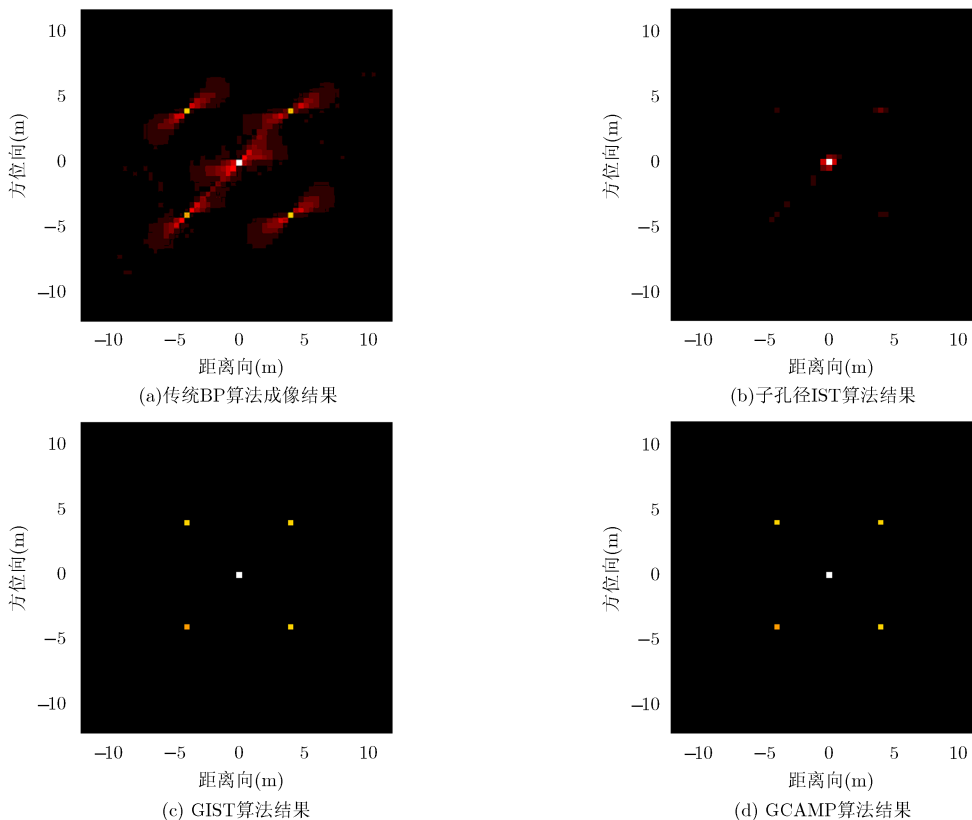


图 2 场景的重建结果(全部观测角度内的综合图像)

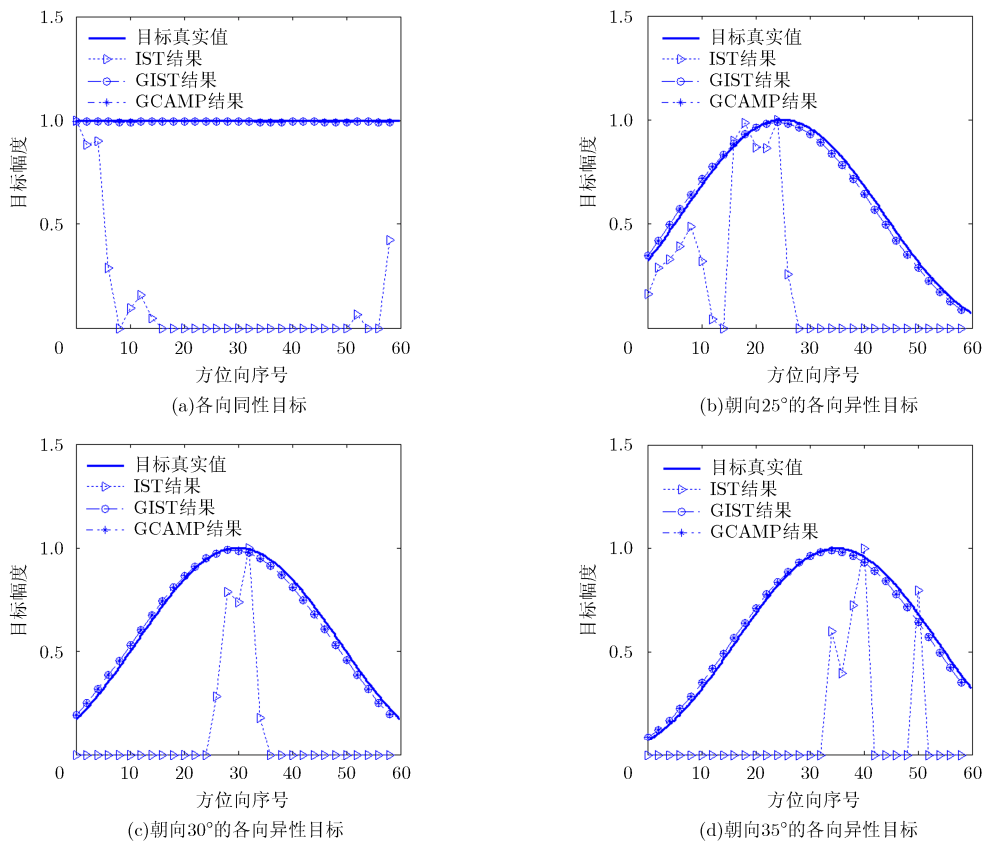


图 3 重构算法得到的目标反射系数随角度变化曲线

数曲线；图 3(b), 3(d)分别是中心与右水平线呈 25° , 30° , 35° 夹角的各向异性目标的反射系数曲线。粗实线代表真实值，右三角点线代表利用 IST 算法对子孔径数据成像结果，圆框线代表利用 GIST 算法得到的结果，星形点虚线代表利用 GCAMP 算法得到的结果。从图上可以看出，GCAMP 算法可以同时重建各向同性和各向异性目标的反射系数，与真实值相当吻合。

图 4 是复杂场景目标的重建结果。在分布式目标与各向异性目标都存在的情况下，采用结构稀疏建模和算法能构获得更好的成像效果。具体表现在：

在 GIST 算法和 GCAMP 算法的结果中，方形框状物体基本得到重建，而且目标的形状轮廓得到保持，在 BP 算法中存在的强旁瓣在 GIST 和 GCAMP 中基本被去除，取而代之的是类似随机噪声一般的点状干扰。在 IST 算法中，则基本不能重建出目标。

5 结束语

本文提出了基于结构稀疏的 WASAR 成像方法，可以针对性地解决 WASAR 中目标散射的各向异性问题，相比于常规方法，具有收敛速度快、重建误差小等优点。实验验证了所提方法的有效性。

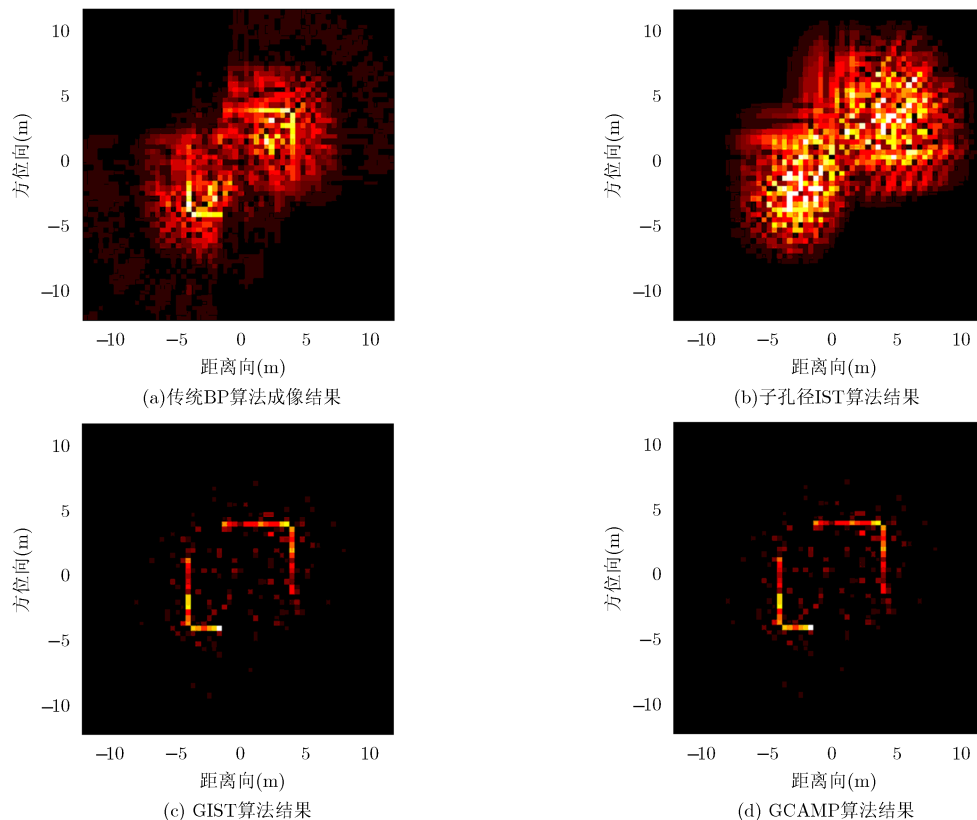


图 4 复杂场景的重建结果(全部观测角度内的综合图像)

参考文献

- [1] Jakowatz C V, Wahl D E, Eichel P H, *et al.*. Spotlight-mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach[M]. Norwell, MA, US, Kluwer Academic Publishers, 1996: 62–94.
- [2] Allen M R, Phillips S A, and Sofianos D J. Wide-angle SAR-matched filter image formation for enhanced detection performance[C]. Proceedings of the International Society for Optics and Photonics in Substance Identification Technologies, Innsbruck, Austria, 1993: 381–387.
- [3] Chaney R D, Willisky A S, and Novak L M. Coherent aspect-dependent SAR image formation[C]. Proceedings of the International Society for Optics and Photonics in SPIE's International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing, Orlando, FL, USA, 1994, 256–274.
- [4] Moses R L, Potter L C, and Cetin M. Wide-angle SAR imaging[C]. Proceedings of the International Society for Optics and Photonics in Defense and Security, Orlando, FL, USA, 2004: 164–175.
- [5] Zhang B C, Hong W, and Wu Y R. Sparse microwave imaging: principles and applications[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2012, 55(8): 1722–1754.
- [6] Varshney K R, Cetin M, Fisher J W, *et al.*. Joint image

- formation and anisotropy characterization in wide-angle SAR[C]. Proceedings of the International Society for Optics and Photonics in Defense and Security Symposium, Orlando, FL, USA, 2006: 62370D.
- [7] Stojanovic I, Cetin M, and Karl W C. Joint space aspect reconstruction of wide-angle SAR exploiting sparsity[C]. Proceedings of the SPIE Defense and Security Symposium, Orlando, FL, USA, 2008: 697005.
- [8] Cetin M, Stojanovic I, Onhon O, *et al.* Sparsity-driven synthetic aperture radar imaging: reconstruction, autofocusing, moving targets, and compressed sensing[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(4): 27-40.
- [9] Ash J, Ertin E, Potter L, *et al.* Wide-angle synthetic aperture radar imaging: models and algorithms for anisotropic scattering[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(4): 16-26.
- [10] 林贇, 谭维贤, 洪文, 等. 圆迹SAR极坐标格式算法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2802-2807.
- Lin Yun, Tan Wei-xian, Hong Wen, *et al.* Polar format algorithm for circular synthetic aperture radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2802-2807.
- [11] 洪文. 圆迹SAR成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 124-135.
- Hong Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 124-135.
- [12] Austin C D, Emre E, and Moses R L. Sparse signal methods for 3-D radar imaging[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(3): 408-423.
- [13] Donoho D L, Maleki A, and Andrea M. Message-passing algorithms for compressed sensing[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(45): 18914-18919.
- [14] Maleki A, Laura A, Yang Z, *et al.* Asymptotic analysis of complex LASSO via complex approximate message passing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, 59(7): 4290-4308.
- [15] Fang J, Xu Z B, Zhang B C, *et al.* Fast compressed sensing SAR imaging based on approximated observation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(1): 352-363.
- [16] Jiang, C L, Zhang B C, Fang J, *et al.* Efficient l_q regularisation algorithm with range-azimuth decoupled for SAR imaging[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(3): 204-205.
- 蒋成龙: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为SAR信号处理、稀疏微波成像系统设计与信号处理.
- 张冰尘: 男, 1973年生, 博士, 研究员, 研究方向为信号与信息处理、雷达信号处理与系统设计.
- 王正道: 男, 1974年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为通信信号处理、信息论、数据分析等.
- 洪文: 女, 1968年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为信号与信息处理、雷达信号处理与系统设计.