

低信噪比下双基地ISAR一维距离成像分辨率增强方法

陈文峰* 吕明久 夏赛强 向龙 杨军 马晓岩
(空军预警学院 武汉 430019)

摘要: 针对双基地角使双基地ISAR(B-ISAR) 1维距离成像分辨率下降的问题, 该文提出基于多量测向量(MMV)模型的复数近似消息传递(MCAMP)的B-ISAR 1维距离成像分辨率增强算法。首先, 建立距离联合稀疏模型。然后, 通过向量化处理将联合稀疏问题转换为块稀疏复数基追踪去噪问题, 利用Kronecker积提出MCAMP算法进行求解, 以得到不受双基地角影响的1维距离像。最后, 通过快速傅里叶变换(FFT)代替矩阵与矩阵相乘进一步减少了计算复杂度, 进而提高了算法的实现效率。仿真成像结果验证了所提方法在重构精度和重构时间方面的优势。

关键词: 双基地逆合成孔径雷达; 高分辨距离像; 复数近似消息传递; 压缩感知

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2484-07

DOI: 10.11999/JEIT180081

Resolution Enhancement Method for Bistatic ISAR One-dimensional Range Profile Under Low SNR

CHEN Wenfeng LÜ Mingjiu XIA Saiqiang XIANG Long
YANG Jun MA Xiaoyan

(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: To solve the problem of declined resolution of Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar (B-ISAR) imaging by bistatic angle, a B-ISAR range profile resolution enhancement algorithm is put forward based on Multiple Measurement Vector (MMV) Complex Approximate Message Passing (MCAMP). The range joint sparse model is established. By utilizing vectorization operation, the joint sparse problem is converted into a block complex basis pursuit denoising problem. To achieve the range profile which is immune to bistatic angle influence, the MCAMP algorithm is proposed by using the Kronecker product. The Fast Fourier Transform (FFT) is introduced to instead of multiplication between matrix and matrix, which improves the efficiency of the proposed algorithm by reducing the computational complexity further. Simulation imaging results verify the effectiveness and efficiency of the proposed method.

Key words: Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar (B-ISAR); High resolution range profile; Complex Approximate Message Passing (CAMP); Compressive Sensing (CS)

1 引言

双基地逆合成孔径雷达(Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar, B-ISAR)相比单基地逆合成孔径雷达(Monostatic ISAR, M-ISAR)能够获得更多的目标信息, 具有更灵活的部署方式和更强的电子对抗能力, 因而得到了众多研究者的关注^[1-8]。B-ISAR的距离分辨率不但受限于信号带宽, 而且

受双基地角制约, 且双基地角越大距离分辨率越低, 导致B-ISAR的距离分辨率低于同等带宽的M-ISAR, 因此, 研究如何降低乃至消除双基地角对距离分辨率的影响具有重要意义。

由于双基地角是B-ISAR中固有的物理量, 因此, 其引起的分辨率下降的问题难以通过硬件的提升来缓解, 只能通过信号处理的方法来解决^[9]。近年来, 稀疏表示和压缩感知(CS)理论^[10]已在B-ISAR成像中广泛应用, 能够显著提高B-ISAR分辨率。例如, 文献^[9]首先研究了双基地角造成B-ISAR距离分辨率下降的问题, 但是该文方法在低信噪比条件下并不稳健, 且计算量较大; 文献^[4]将压缩感知分别应用于距离向和方位向B-ISAR成

收稿日期: 2018-01-19; 改回日期: 2018-05-22; 网络出版: 2018-07-30

*通信作者: 陈文峰 chenwf925@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671469)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61671469)

像, 相比仅在距离维和方位维利用CS进行成像的效果都好, 但是该方法并没有分析双基地角对分辨率的影响。

可以看出, 目前基于CS理论的B-ISAR 1维距离像成像方法主要集中在单量测向量(Single Measurement Vector, SMV)模型, 而实际的1维距离像具有联合稀疏结构特征, 更适用于多量测向量(Multiple Measurement Vector, MMV)模型, 模型相比MMV模型存在以下缺点: 由于SMV模型并未充分利用距离像的联合稀疏结构, 因此算法在低信噪比下的稳健性较差及重构效率较低。

本文在充分考虑回波联合稀疏结构特征的基础上, 提出了基于MMV模型的复数近似消息传递(MMV Complex Approximate Message Passing, MCAMP)算法的高分辨B-ISAR 1维距离成像方法。在构建B-ISAR联合稀疏1维距离成像模型的基础上, 首先通过向量化处理将联合稀疏1维距离成像问题转换为块稀疏复数基追踪去噪(Complex Basis Pursuit DeNoising, C-BPDN)问题^[1]; 其次利用矩阵乘积的向量化与Kronecker积的关系提出算法的矩阵迭代结构; 最后为进一步减少每次迭代的运算量, 将算法中的矩阵乘法用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)来实现。仿真数据验证了本文方法的有效性。

2 B-ISAR联合稀疏1维距离成像模型

B-ISAR目标成像经过平动补偿后^[12], 即可等效为转台目标成像。图1为B-ISAR目标转台模型示意图。图中, β 为双基地角, ω 为转速, 设发射站 T 距目标坐标系原点 O 的距离为 R_T , 接收站 R 距目标坐标系原点 O 的距离为 R_R , 目标上某一散射点 P 在初始时刻位于目标坐标系的坐标为 (x_P, y_P) , 散射点 P 到目标坐标系原点 O 的距离为 $r_P = \sqrt{x_P^2 + y_P^2}$, P 点初始相位为 α , 观测时间为 T_a , 观测时间内共发射 N_a 个脉冲, t_n 时刻 P 点到发射站与接收站的瞬时距离和为^[4]:

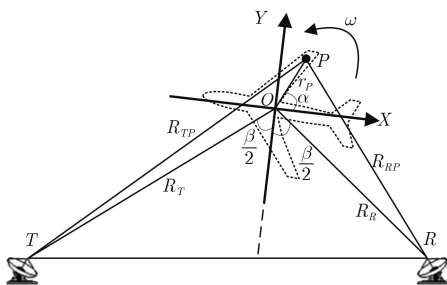


图1 B-ISAR转台成像模型

$$R_p = R_{TP} + R_{RP} \approx R_T + R_R + 2 \cos \frac{\beta}{2} (y_p + x_p \omega t_n) \quad (1)$$

假设雷达发射线性调频信号

$$s(t) = \text{rect} \left(\frac{t_f}{T_p} \right) \exp \left(j2\pi \left(f_c t + \frac{1}{2} k_r t_f^2 \right) \right) \quad (2)$$

其中, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数, f_c 为载率, k_r 为调频率, t_f 为距离向快时间, T_p 为脉冲重复周期。回波信号的复包络为

$$s_r(t_f, t_n) = \sigma_p \text{rect} \left(\frac{1}{T_p} \left(t_f - \frac{R_p}{C} \right) \right) \exp \left[j2\pi f_c \left(t_f - \frac{R_p}{C} \right) \right] \exp \left[j\pi k_r \left(t_f - \frac{R_p}{C} \right)^2 \right] \quad (3)$$

其中, t_n 为方位向慢时间, σ_p 为 P 点散射系数。

设参考点的回波信号为 $s_{\text{ref}}(t_f, t_n)$, 差频输出为

$$\begin{aligned} s_d(t_f, t_n) &= s_r(t_f, t_n) s_{\text{ref}}^*(t_f, t_n) \\ &= \sigma_p \text{rect} \left(\frac{1}{T_p} \left(t_f - \frac{R_p}{C} \right) \right) \cdot \exp \left[\frac{-j2\pi f_c}{C} R_{\Delta} - \frac{j2\pi k_r}{C} \left(t_f - \frac{R_{\text{ref}}}{C} \right) R_{\Delta} + \frac{j\pi k_r}{C^2} (R_{\Delta})^2 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

其中, R_{ref} 为 t_n 时刻参考点到发射站与接收站的距离和, T_{ref} 为参考信号脉冲宽度, 且 $T_{\text{ref}} > T_p$ 。“*”表示共轭运算。

$$R_{\Delta} = R_p - R_{\text{ref}} = 2 \cos \frac{\beta}{2} (y_p + x_p \omega t_n) \quad (5)$$

以参考点的时间为基准, 对式(4)在快时间上做傅里叶变换, 并去除RVP项, 有

$$\begin{aligned} \text{sif}(f_i, t_n) &= \sum_{p=1}^K \sigma_p T_p \text{sinc} \left[T_p \left(f_i + \frac{k_r}{C} R_{\Delta} \right) \right] \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi}{C} R_{\Delta} (f_c + f_i) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, K 为强散射中心个数, f_i 为距离频率, 分辨率为 $1/T_p$, 利用 $f_i = -k_r R_{\Delta}/C$, 结合式(5)可得相应的距离分辨率为 $\rho_r = C/(2B \cos(\beta/2))$ 。可以看出, 利用傅里叶变换得到的B-ISAR 1维距离像的分辨率不但与信号带宽有关, 并且还与双基地角有关, 且双基地角越大分辨率越低。

为克服双基地角的影响, 得到高分辨的1维距离像, 下面构建回波在距离向上的联合稀疏表示模型。假设差频之后的采样率为 $f_s (f_s \geq 2k_r R_{\text{target}}/C)$, R_{target} 为目标的最大长度), 那么快时间序列可表示

为 $t_n = [0 : N - 1]^T / f_s$, 其中 N 为快时间采样点数。由式(6)可知, 每一个散射点都对应一个距离频率 f_i , 如果对距离频率划分网格, 令距离频率分辨率为 $\Delta f = -k_r \rho_r / C$, 此时, $f_i = -k_r R_\Delta / (C \cos(\beta/2))$, 则对应的距离分辨率为 $\delta_r = C/2B$, 那么距离频率序列可表示为 $F_r = [0 : Q - 1] \times f_s / Q$, 其中 $Q = f_s / \Delta f$ 为划分的频率网格点数, 与网格点数 Q 相比, 显然散射点的个数 K 是稀疏的。令 $\Psi = \exp(-j2\pi t_n F_r)$, 考虑加性噪声的影响, 可将回波在距离向表征为式(7)的矩阵形式:

$$\mathbf{S} = \Psi \mathbf{X} + \mathbf{E} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{N \times N_a}$ 为回波信号矩阵, $\Psi \in \mathbb{C}^{N \times Q}$ 为距离频域稀疏基矩阵, $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{Q \times N_a}$ 为1维距离像, $\mathbf{E} \in \mathbb{C}^{N \times N_a}$ 为复高斯白噪声矩阵, 式(7)即是B-ISAR联合稀疏1维距离成像模型。可以看出, 通过构建距离频域稀疏基 Ψ , 此时重构得到的1维距离像的分辨率不受双基地角的影响。在目标相对于雷达的散射点模型基本不变情况下(一般为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 以内), 可认为各距离像散射点对应的峰值位置不发生变化, 仅幅度存在起伏, 因此 \mathbf{X} 具有共享支撑集联合稀疏特性。

3 基于MCAMP算法的联合稀疏1维距离成像

为快速有效地重构B-ISAR联合稀疏1维距离成像模型, 本文提出MCAMP算法进行求解, 包括以下3个关键步骤: 首先通过向量化处理将联合稀疏1维距离成像问题转化为块稀疏复数基追踪去噪问题; 然后利用矩阵乘积的向量化与Kronecker积的关系提出矩阵形式块稀疏复数近似消息传递算法的基本迭代结构; 最后利用FFT实现矩阵乘法进一步提升算法实现效率。

令 $\mathbf{s} = \text{vec}(\mathbf{S}^T)$, $\mathbf{A} = (\Psi \otimes \mathbf{I}_{N_a})$, $\mathbf{x} = \text{vec}(\mathbf{X}^T)$, $\mathbf{e} = \text{vec}(\mathbf{E}^T)$, 上述联合稀疏1维距离成像问题式(7)可以转化为如式(8)向量化形式:

$$\mathbf{s} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{e} \quad (8)$$

其中, $\text{vec}(\cdot)$ 表示矩阵的列向量化操作, 符号 \otimes 表示Kronecker积, $\mathbf{I}_{N_a} \in \mathbb{R}^{N_a \times N_a}$ 为单位矩阵, \mathbf{x} 是每个块为 $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^{N_a \times 1}$ 的块稀疏信号, 即 $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_Q^T]^T$, 也就是将 \mathbf{x} 分为 Q 个块, 每个块的大小为 N_a , 每个块信号对应1维距离像的每个距离单元。

式(8)的块稀疏解可由式(9)块稀疏复数近似消息传递(Block Complex Approximate Message Passing, BCAMP)算法^[13]求得

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{v}^t &= \mathbf{A}^H \mathbf{z}^{t-1} + \mathbf{x}^{t-1} \\ \mathbf{z}^t &= \mathbf{s} - \mathbf{A} \mathbf{x}^{t-1} + \mathbf{z}^{t-1} \frac{1}{2\delta} (\langle \partial \eta_u^{\text{Re}}(\mathbf{v}^t; \gamma^t) \rangle \\ &\quad + \langle \partial \eta_v^{\text{Im}}(\mathbf{v}^t; \gamma^t) \rangle) \\ \mathbf{x}^t &= \eta(\mathbf{v}^t; \gamma^t) \end{aligned} \right\} (9)$$

其中,

$$\eta(\mathbf{v}^t; \gamma^t) = \left[\left(\frac{\mathbf{v}_1^t}{\|\mathbf{v}_1^t\|_2} \max(\|\mathbf{v}_1^t\|_2 - \gamma^t, 0) \right)^T, \dots, \left(\frac{\mathbf{v}_Q^t}{\|\mathbf{v}_Q^t\|_2} \max(\|\mathbf{v}_Q^t\|_2 - \gamma^t, 0) \right)^T \right]^T \quad (10)$$

其中, \mathbf{v}_Q^t 表示 \mathbf{v}^t 的第 Q 个块; η^{Re} 和 η^{Im} 分别为 η 的实部和虚部, $\partial \eta_u^{\text{Re}}$ 为 η^{Re} 对实部 u 的偏导数, $\partial \eta_v^{\text{Im}}$ 为 η^{Im} 对虚部 v 的偏导数; $\langle \cdot \rangle$ 表示求平均, $\delta = N/Q$, 参数 $\gamma^t = \tau \sigma^t$ 为软阈值门限, τ 为调整参数, 可以通过状态演化的方式来调整; 每次迭代过程中 \mathbf{v}^t 可以看作精确解和复高斯白噪声的叠加, σ^t 为该次迭代中噪声的标准差, 可以利用中值进行估计, 具体方式为: $\sigma^t = \sqrt{1/\ln(2)} \text{median}(|\mathbf{v}^t|)$ 。

虽然得到了迭代式(9)的向量化形式, 但是其计算复杂度较高, 内存需求较大, 需要寻求计算复杂度较低的快速算法提升算法的实现效率。为提升算法实现效率, 降低每次迭代的计算复杂度, 同时避免出现规模过大的感知矩阵, 本文利用矩阵乘积的向量化与Kronecker积的关系将迭代(9)矩阵化, 依据式(11):

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}^H \mathbf{z}^t &= (\mathbf{I}_{N_a} \otimes \Psi)^H \mathbf{z}^t = (\mathbf{I}_{N_a} \otimes \Psi^H) \text{vec}(\mathbf{Z}^t) \\ &= \text{vec}(\Psi^H \mathbf{Z}^t (\mathbf{I}_{N_a})^T) = \text{vec}(\Psi^H \mathbf{Z}^t) \\ \mathbf{A} \mathbf{x}^t &= (\mathbf{I}_{N_a} \otimes \Psi) \mathbf{x}^t = (\mathbf{I}_{N_a} \otimes \Psi) \text{vec}(\mathbf{X}^t) \\ &= \text{vec}(\Psi \mathbf{X}^t (\mathbf{I}_{N_a})^T) = \text{vec}(\Psi \mathbf{X}^t) \end{aligned} \right\} (11)$$

可以得到矩阵化形式:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V}^t &= \Psi^H \mathbf{Z}^t + \mathbf{X}^t \\ \mathbf{Z}^t &= \mathbf{S} - \Psi \mathbf{X}^t + \mathbf{Z}^{t-1} \frac{1}{2\delta} (\langle \partial \eta_u^{\text{Re}}(\mathbf{V}^t; \gamma^t) \rangle \\ &\quad + \langle \partial \eta_v^{\text{Im}}(\mathbf{V}^t; \gamma^t) \rangle) \\ \mathbf{X}^t &= \eta(\mathbf{V}^t; \gamma^t) \end{aligned} \right\} (12)$$

其中,

$$\eta(\mathbf{V}^t; \gamma^t) = \left[\frac{\mathbf{V}_1^t}{\|\mathbf{V}_1^t\|_2} \max(\|\mathbf{V}_1^t\|_2 - \gamma^t, 0), \dots, \frac{\mathbf{V}_Q^t}{\|\mathbf{V}_Q^t\|_2} \max(\|\mathbf{V}_Q^t\|_2 - \gamma^t, 0) \right]^T \quad (13)$$

其中, \mathbf{V}_Q^t 表示矩阵 \mathbf{V}^t 的第 Q 行。由于 Ψ 为部分傅里叶矩阵, 因此 $\Psi\mathbf{X}^t$ 可以等效为先对 \mathbf{X}^t 作 Q 点FFT, 然后再取其前 N 行; 而 $\Psi^H\mathbf{Z}^t$ 可以等效为对 \mathbf{Z}^t 作 Q 点IFFT。从而达到减少每一步迭代计算量, 实现快速计算的目的。

4 性能分析

4.1 计算复杂度分析

定义1次复数乘法运算为计算复杂度单位。作为对比, 首先分析常用MMV模型重构算法中MOMP^[14]算法和MFOCUSS^[15]算法的计算复杂度, MOMP算法的主要计算集中于新原子识别步和投影步, 假设一共迭代 L_1 次, 其总的计算量约为 $O(L_1^4 + NL_1^3 + L_1NQNa)$; 根据文献^[15]的迭代公式得到MFOCUSS算法的计算复杂度为 $O(L_2N^3 + L_2(N + N_a)(NQ + Q^2))$, 其中 L_2 为迭代次数。下面对本文算法的计算复杂度进行分析。本文算法每次迭代的计算量主要集中在计算 $\Psi\mathbf{X}^t$ 和 $\Psi^H\mathbf{Z}^t$, 由于可以利用FFT和IFFT进行快速计算, 因此其计算复杂度为 $O(N_aQ\log_2 Q)$, 假设迭代 L_3 次, 总的计算复杂度为 $O(L_3N_aQ\log_2 Q)$ 。表1给出了计算复杂度的对比。

表1 3种算法的计算复杂度对比

算法	计算复杂度
MOMP	$O(L_1^4 + NL_1^3 + L_1NQNa)$
MFOCUSS	$O(L_2N^3 + L_2(N + N_a)(NQ + Q^2))$
本文算法	$O(L_3N_aQ\log_2 Q)$

4.2 抗噪性能

算法的抗噪性能可以通过两方面来分析, 一是对联合稀疏特性的利用, 二是解的精确度。首先分析对联合稀疏特性的利用, 由于本文方法利用了1维距离像的联合稀疏特性, 即某些距离单元都为信号, 而某些距离单元都为噪声, 因此算法在阈值收缩时, 对矩阵 \mathbf{V}^t 的每一行进行处理, 相比对每一个元素处理能够更为精确地得到真实信号。然后对解的精确度进行分析, 这里定义 $\mathbf{H} = \mathbf{A}^H\mathbf{A} - \mathbf{I}$, $\hat{\mathbf{x}}$ 为所求的精确解, 则此时有 $\mathbf{y} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$, 且在第1次迭代时, 有 $\mathbf{v}^1 = \mathbf{A}^H\mathbf{y} + \mathbf{x}^0 = \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}$, 其中 $\mathbf{x}^0 = \mathbf{0}$, 且 \mathbf{v}^1 可以看作是精确解 $\hat{\mathbf{x}}$ 和复高斯白噪声的叠加, $\hat{\mathbf{x}}$ 是一个稀疏向量, 噪声项 $\mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}$ 则可以描述为一个独立同分布的高斯向量, 即 $\mathbf{v}^1 = \hat{\mathbf{x}} + \text{noise}$, σ^t 为该次迭代中噪声的标准差, 可以利用中值进行估计, 矩阵 \mathbf{H} 和 $\hat{\mathbf{x}}$ 以及 \mathbf{x}^1 都不相关, 所以 $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}^1)$ 也可以看作为高斯向量, 即 $\mathbf{v}^1 = \hat{\mathbf{x}} + \text{noise}$, $\sigma^1 = \text{std}(\mathbf{H}\hat{\mathbf{x}})$ 为该次迭代中噪声的标准差; 在第

2次迭代时, 有

$$\mathbf{v}^2 = \mathbf{A}^H(\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}^1) + \mathbf{x}^1 = \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}^1) \quad (14)$$

其中, $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}^1)$ 也可以看作为高斯向量, 也就是第2次迭代时 \mathbf{v}^2 中的噪声, $\sigma^2 = \text{std}(\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}^1))$ 为第2次迭代中噪声的标准差, 由于 \mathbf{x}^1 比 \mathbf{x}^0 更为接近精确解 $\hat{\mathbf{x}}$, 所以有 $\sigma^2 < \sigma^1$, 即第2次迭代时噪声强度比前一次迭代的小, 所以在第2次迭代对这个噪声的阈值处理能够产生更精确的结果。随着迭代的增加, 最终就能够得到精确解 $\hat{\mathbf{x}}$, 说明算法具有较好的抗噪性能。

5 实验与分析

本文所有实验都是在操作系统为Windows7的个人计算机上实现的, 仿真平台为Matlab R2013a, 计算机主要参数如下: 处理器为Intel酷睿E7500, 主频为2.93 GHz, 内存为3 GB。

为验证本文方法的有效性, 利用电磁计算软件FEKO7.0产生双基地的目标回波数据, 参数设置如表2所示。目标为VFY218飞机, 机身长度15.5 m, 翼展8.9 m, 高度为4.1 m, 外形图为图2所示。收发站与目标位置关系如图3所示。图4(a)—图4(e)分别给出了基于FFT, FOCUSS, MOMP, MFOCUSS以及本文MCAMP算法得到的HRRP。图5(a)—图5(e)分别给出了5种算法得到的第1个脉冲HRRP。

表2 电磁计算参数设置

参数	数值
发射站与XOZ平面夹角	0°
发射站与YOZ平面夹角	105°
接收站与XOZ平面夹角	80°~85°
接收站与YOZ平面夹角	105°
扫掠频率	10~11 GHz
频率点数	300
脉冲数	256
平均双基地角	82.5°
脉冲压缩前信噪比	0 dB



图2 目标模型

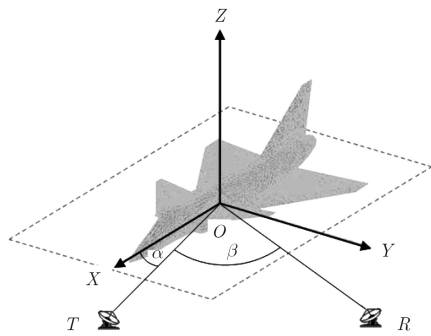


图3 收发站与目标位置关系

可以看出,受双基地角影响,基于FFT得到的HRRP分辨率较低,难以得到真实的HRRP。4种对比算法结果受噪声影响严重,虚假点较多,而本文MCAMP算法受噪声影响较小。

图6给出了基于电磁计算数据的不同信噪比算法重构误差和重构时间的对比,可以看出,本文算法在低信噪比下重构误差最小,而重构时间最短,电磁计算数据验证了本文方法的有效性。

5 结束语

针对B-ISAR 1维距离成像分辨率受双基地角

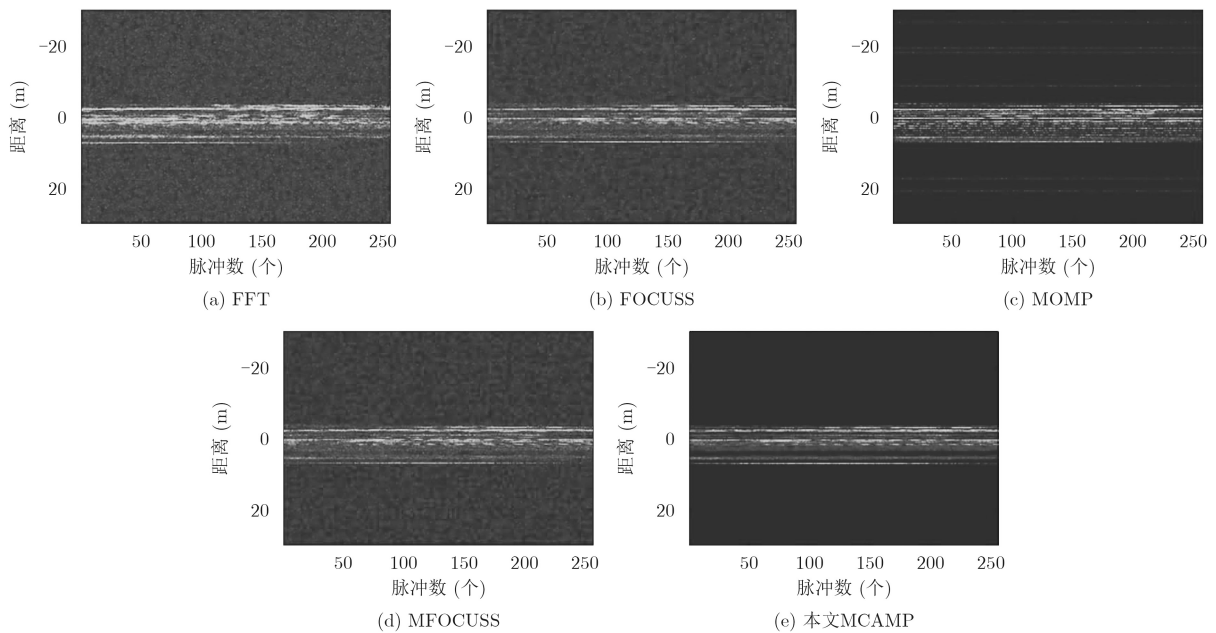


图4 基于电磁计算数据不同算法得到的HRRP对比

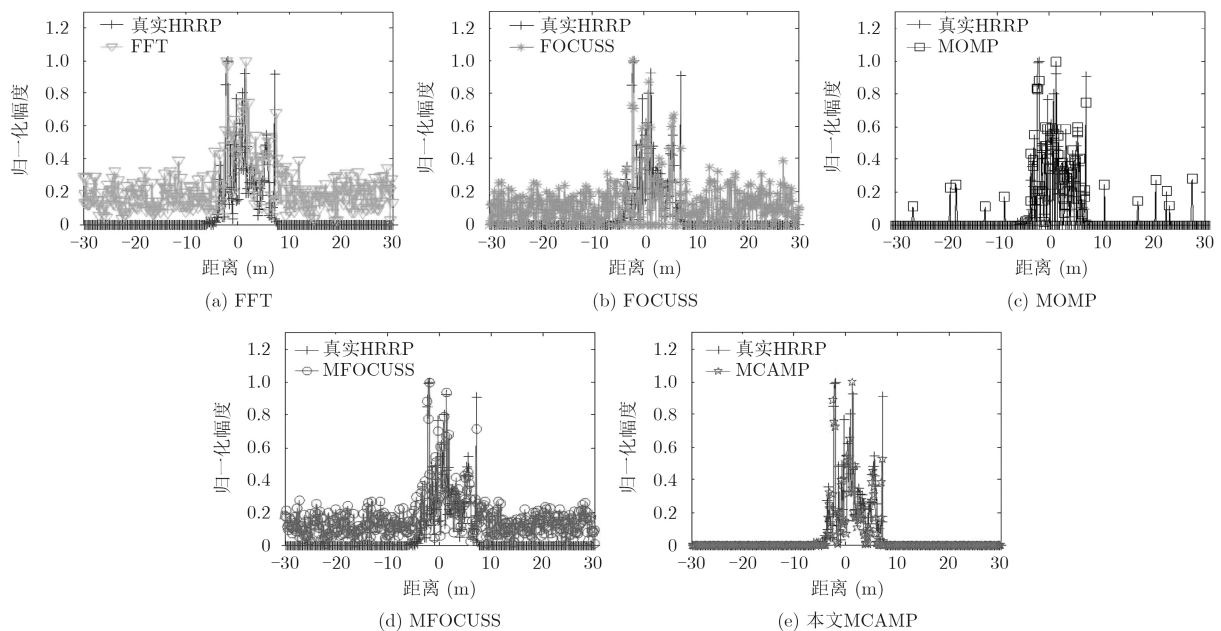


图5 基于电磁计算数据不同算法得到的第1个脉冲HRRP对比

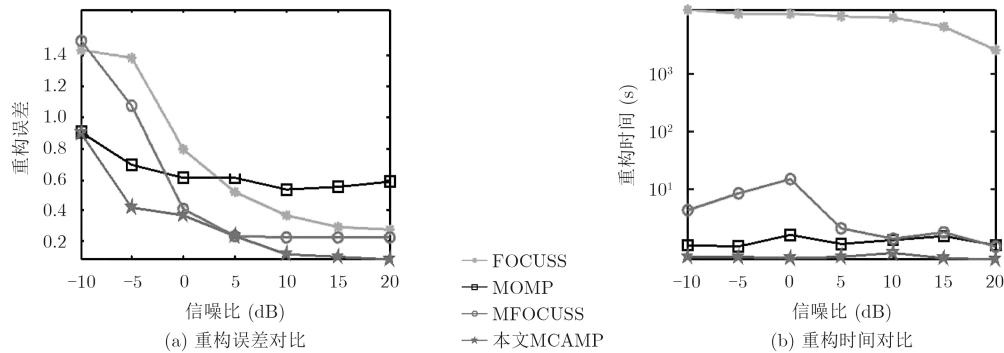


图6 基于电磁计算数据的不同信噪比算法性能对比

限制的问题，本文提出了基于MCAMP的B-ISAR 1维距离成像算法。建立了回波的联合稀疏B-ISAR回波模型，将联合稀疏1维距离成像问题转换为块稀疏复数基追踪去噪问题，然后通过Kronecker积提出求解MMV模型的MCAMP算法，得到了不受双基地角影响的1维距离像，仿真结果验证了本文方法在重构精度和重构时间方面的优势。本文方法也具有一定不足，一是计算复杂度相对于传统FFT的计算量还是比较大，距离工程应用还有一定距离；二是本文方法适用于目标在雷达观测时间内角度变化不大的情况，若角度变化较大时，就不具备联合稀疏的结构，需要研究新的方法。本文方法目前虽然不能直接工程应用，但是较好地解决了双基地角对HRRP分辨率影响的问题，在信噪比较低时具有一定的适用性，计算量相对较小，因此本文方法具备工程应用的潜力。本文方法是针对B-ISAR的1维距离成像，而B-ISAR的方位成像分辨率也受双基地角的影响，这将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 赵会朋, 王俊岭, 高梅国, 等. 基于轨道误差搜索的双基地ISAR包络对齐算法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(6): 1235–1243. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.06.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.06.08).
ZHAO Huipeng, WANG Junling, GAO Meiguo, et al. Bistatic ISAR envelope alignment algorithm based on orbit error search[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(6): 1235–1243. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.06.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.06.08).
- [2] JIANG Y, SUN S, YEO T S, et al. Bistatic ISAR distortion and defocusing analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(3): 1168–1182. doi: [10.1109/TAES.2016.140028](https://doi.org/10.1109/TAES.2016.140028).
- [3] 郭宝锋, 尚朝轩, 王俊岭, 等. 基于二体模型的空间目标双基地ISAR回波模拟[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(8): 1771–1779. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.08.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.08.10).
GUO Baofeng, SHANG Chaoxuan, WANG Junling, et al. Bistatic ISAR echo simulation of space target based on two-body model[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(8): 1771–1779. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.08.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.08.10).
- [4] ZHANG Shunsheng, ZHANG Wei, ZONG Zhulin, et al. High-resolution bistatic ISAR imaging based on two-dimensional compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(5): 2098–2111. doi: [10.1109/TAP.2015.2408337](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2408337).
- [5] ZHANG Shunsheng, SUN Sibao, ZHANG Wei, et al. High-resolution bistatic ISAR image formation for high-speed and complex-motion targets[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 8(7): 3520–3531. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2417192](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2417192).
- [6] SUN Sibao, YUAN Yeshu, and JIANG Yicheng. Bistatic inverse synthetic aperture radar imaging method for maneuvering targets[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(4): 045016. doi: [10.1117/1.JRS.10.045016](https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.045016).
- [7] KANG B S, BAE J H, KANG M S, et al. Bistatic-ISAR cross-range scaling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(4): 1962–1973. doi: [10.1109/TAES.2017.2677798](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2677798).
- [8] KANG M S, KANG B S, LEE S H, et al. Bistatic-ISAR distortion correction and range and cross-range scaling[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(16): 5068–5078. doi: [10.1109/JSEN.2017.2713804](https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2713804).
- [9] 韩宁, 尚朝轩, 何强, 等. 基于稀疏分解的双基地ISAR一维距离成像方法[J]. 信号处理, 2012, 28(1): 54–59. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2012.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2012.01.008).
HAN Ning, SHANG Chaoxuan, HE Qiang, et al. Method for bistatic ISAR one-dimensional range profile based on sparse decomposition[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(1): 54–59. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2012.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2012.01.008).
- [10] DONHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306. doi: [10.1109/TIT.2006.871582](https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582).
- [11] MALEKI A, ANITORI L, YANG Z, et al. Asymptotic analysis of complex LASSO via Complex Approximate Message Passing (CAMP)[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, 59(7): 4290–4308. doi: [10.1109/TIT.2013.2252232](https://doi.org/10.1109/TIT.2013.2252232).

- [12] 朱仁飞, 罗迎, 张群, 等. 双基地ISAR成像分析[J]. 现代雷达, 2011, 33(8): 33–38. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2011.08.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2011.08.009).
ZHU Renfei, LUO Ying, ZHANG Qun, *et al.* Analysis of bistatic inverse synthetic aperture radar imaging[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(8): 33–38. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2011.08.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2011.08.009).
- [13] DONHO D L, JOHNSTONE I M, and MPNTANARI A. Accurate prediction of phase transitions in compressed sensing via a connection to minimax denoising[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, 59(6): 3396–3433. doi: [10.1109/TIT.2013.2239356](https://doi.org/10.1109/TIT.2013.2239356).
- [14] CHEN Jie and HUO Xiaoming. Theoretical results on sparse representations of multiple-measurement vectors[J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 2006, 54(12): 4634–4643. doi: [10.1109/TSP.2006.881263](https://doi.org/10.1109/TSP.2006.881263).
- [15] SHANE F C, BHASKAR D R, KJERSTI E, *et al.* Sparse solutions to linear inverse problems with multiple measurement vectors[J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 2005, 53(7): 2477–2488. doi: [10.1109/TSP.2005.849172](https://doi.org/10.1109/TSP.2005.849172).
- 陈文峰: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为双基地逆合成孔径雷达成像和压缩感知.
- 吕明久: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为逆合成孔径雷达成像和压缩感知.
- 夏赛强: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为逆合成孔径雷达成像和压缩感知.
- 向 龙: 男, 1978年生, 讲师, 博士, 研究方向为雷达系统和雷达成像.
- 杨 军: 男, 1973年生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为雷达系统、雷达成像和压缩感知.
- 马晓岩: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统、目标检测和雷达成像.