

利用二维结构稀疏信息的 调频步进 ISAR 高分辨成像新方法

吕明久¹, 李少东², 杨 军¹, 马晓岩¹

(1. 空军预警学院, 湖北武汉 430019; 2. 解放军 93253 部队, 辽宁大连 116000)

摘 要: 针对已有利用压缩感知理论进行逆合成孔径(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像方法在低信噪比、欠采样率条件下性能下降严重等问题, 依托调频步进波形独有特征并充分利用目标分布的二维结构稀疏信息, 提出一种“先方位聚焦后距离分辨”的调频步进 ISAR 高分辨成像新方法. 首先, 对回波进行子脉冲脉压, 在分析调频步进 ISAR 回波方位向特有的结构稀疏特征基础上, 构建方位向的分布式压缩感知稀疏重构模型; 其次, 采用分布式压缩感知算法对该模型重构, 从而获得低信噪比条件下的方位高分辨成像; 最后, 利用距离维的回波特征构建任意稀疏重构模型, 实现距离向快速成像. 由于该方法先进行方位聚焦, 再进行距离分辨, 并充分利用了目标的结构稀疏性, 因此不仅具有抗噪性能强、重构精度高以及采样率低等特点, 且避免了越距离单元走动对方位聚焦的影响. 仿真与实测数据实验验证了本文方法的有效性.

关键词: ISAR 成像; 联合稀疏模型; 任意稀疏模型; 调频步进信号; 分布式压缩感知

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)12-2905-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.12.012

A New High Resolution Chirp Frequency Stepped ISAR Imaging Algorithm by Using Two-Dimensional Sparse Structure Information

LÜ Ming-jiu¹, LI Shao-dong², YANG Jun¹, MA Xiao-yan¹

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019, China; 2. The Unit 93253 of PLA, Dalian, Liaoning 116000, China)

Abstract: In order to improve the performance of the ISAR imaging method based on compressed sensing under sub-sampling and low SNR, a new high resolution ISAR imaging method for chirp frequency stepped signal is proposed, based on the unique characteristics of the stepped frequency waveform, and the two-dimensional sparse structure information of the target. The proposed method is deal with the cross range focusing first and then the range resolution. Firstly, the pulse compression is performed on the sub-pulse echo, and then based on the analysis of the sparse structure of the stepped frequency ISAR echo in cross range dimension, a distributed compressed sensing model is constructed; Secondly, the DCS-SOMP algorithm is used to reconstruct the model, then the high cross range resolution imaging in low SNR is obtained; Finally, an arbitrary sparse representation model is constructed by using the echo characteristics in range dimension. Because the proposed method, which is cross range focusing first and then the range resolution, makes full use of the target structure, it not only avoids the migration through range resolution cell effect on the cross range resolution, but also has strong anti-noise performance, high reconstruction accuracy and low sampling rate. The validity of the proposed method is verified by simulation and experimental data.

Key words: ISAR imaging; joint sparse model; arbitrary sparse model; chirp frequency stepped; distributed compressive sense

1 引言

调频步进(Chirp Frequency Stepped, CFS)信号作为一种大宽带波形,通过发射多个窄带线性调频子脉冲得到大的合成带宽,具有硬件要求低、实现难度小等优势,已运用于现代逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)系统中^[1,2]. CFS ISAR 回波通过传统的 IFFT-FFT 算法即可得到目标的二维图像.然而,这种处理方法的成像分辨率并不高,且在有限频率、有限孔径条件下,成像效果将会变差,难以满足现代目标识别对成像精度的要求.因此,如何在频率有限、方位短孔径以及低信噪比等条件下获得目标的高分辨率图像值得进一步研究.

近年来,众多学者将压缩感知(Compressive Sense, CS)理论与 CFS 信号相结合,获得了稀疏频率、稀疏孔径条件下的高分辨率 ISAR 图像^[3].目前,基于 CS 的 CFS ISAR 成像方法大都是利用散射点稀疏分布这一特性进行重构^[4].这种处理方式简单,但是重构的质量主要依赖于 CS 算法的性能,因而抗噪性能较差,对量测个数的要求也较高.另外,这种基于 CS 的 ISAR 高分辨成像方法,距离向存在的越距离单元走动(Migration Through Range Resolution Cell, MTRC)也会影响方位向的分辨性能^[5].实际上,目标散射点分布通常具有“聚焦性”等三维稀疏特征,通过对这些三维稀疏特征利用,可大大提高成像精度以及抗噪性能^[6].目前利用目标散射点结构稀疏性的成像方法主要有三类:一是基于模式耦合稀疏结构的重构方法^[7].这种方法主要优势是提高了重构精度,但存在运算量大的问题^[8].二是基于任意稀疏结构的重构方法^[9].这类方法主要考虑目标的散射点分布具有任意性的特点,旨在提高重构效率以及精度.但事实上,目标散射点分布通常还具有联合稀疏的特征.基于此,学者提出了第三类方法,即基于联合稀疏结构的重构方法.文献[10,11]通过充分利用目标的联合稀疏特征实现了低信噪比、低量测数条件下的距离向高分辨成像.但是,目前基于联合稀疏特征的高分辨率成像方法都只考虑了目标距离向的联合稀疏重构,而对于方位向重构问题,均采用传统单量测量模型进行处理,因而方位向的重构性能仍有待提升.此外,现代多功能 ISAR 系统不仅仅需要实现成像功能,还需同时完成检测、跟踪等多种任务,这就使得用于方位成像的脉组数十分有限,方位孔径变得不连续,因此如何实现低信噪比、稀疏孔径条件下方位高分辨成像具有更重要的实际应用价值.

针对上述问题,本文依托调频步进波形独有特征,充分利用目标分布的二维结构稀疏信息,提出一种“先方位聚焦后距离分辨”的调频步进 ISAR 高分辨成像新

方法.首先构建方位向基于分布式压缩感知的稀疏表示模型,并利用分布式压缩感知算法(DCS-SOMP)实现方位向的联合高分辨重构;其次,将距离向构建为任意稀疏重构模型,从而实现距离向的高效率重构.该方法充分利用了 CFS 信号的特点,首先进行方位向联合处理,实现方位向散射点的聚焦,从而克服了传统方法中越距离单元走动对方位分辨的影响,得到方位向的联合高分辨重构.再利用距离向任意稀疏特征进行距离向高效重构,最终实现了低信噪比、稀疏孔径条件下的高分辨率成像.理论分析与仿真实验进一步验证了本文所提方法的有效性.

2 CFS 回波二维结构稀疏性分析

文献[10]中对 CFS 回波信号进行了详细分析,因此,此处假设回波信号已完成平动补偿,此时 CFS 回波经子脉冲压缩后的采样信号可以表示为:

$$s_r(t_m, n; n_a) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \exp[-j4\pi f_n R_k(t_m)/c] \quad (1)$$

其中 $n=0, 1, 2, \dots, N-1$, N 为子脉冲个数; N_a 为脉组数, $n_a=1, 2, \dots, N_a$; $f_n=f_0+n\Delta f$ 为第 n 个子脉冲的载频; t_m 为方位向慢时间; K 为散射点个数; 假设 x_k, y_k 分别为第 k 个散射点在目标参考系中的坐标, 则 $\sigma_k = \sigma(x_k, y_k)$ 为第 k 个散射点强度; R_k 为第 k 个散射点与雷达之间的距离. 在成像的时间内, R_k 可近似表示为:

$$R_k(t_m) \approx R_0 + y_k - x_k n_a \Delta \theta \quad (2)$$

其中 $\Delta \theta$ 为角转动步长; R_0 为参考距离.

将式(2)代入式(1)中可得到:

$$s_r(n; n_a) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \exp\left[-j4\pi \frac{f_n(R_0 + y_k)}{c}\right] \cdot \exp\left[j4\pi \frac{f_n x_k n_a \Delta \theta}{c}\right] \quad (3)$$

式中第一个指数项与距离向成像有关,第二个指数项主要与方位向成像有关.传统的 ISAR 二维成像首先进行距离向处理,再进行方位向成像处理,即可得到最终的二维成像结果.这种方法虽然简单,但是由于距离向的高分辨率导致的越距离单元走动往往不能忽略,将会影响方位向的成像精度^[5],且距离向处理后,方位向的联合稀疏信息也将被破坏,无法进行方位向联合高分辨重构^[10].为充分利用回波信号的二维结构稀疏信息,本节首先对 CFS ISAR 回波信号的结构特性进行分析.

2.1 方位向联合稀疏特性分析

在 CFS ISAR 成像过程中,方位像主要由成像持续时间内目标的转动引起.因此为便于方位向成像机理分析,将经过子脉冲压缩后的回波信号(式(3))表示为

$$s_r(n; n_a) = \sum_{k=1}^K \delta_{k,n} \exp\left[j4\pi \frac{(f_0 + n\Delta f)x_k n_a \Delta \theta}{c}\right] \quad (4)$$

其中 $\delta_{k,n} = \sigma_k \exp\left[-j4\pi \frac{f_n(R_0 + y_k)}{c}\right]$.

从式(4)可以看出,对于载频为 $f_0 + n\Delta f$ 的脉冲串,方位向成像主要由散射点的横向距离 x_k 以及成像时间内的转动角度决定.此时,对于方位向上存在的 N 个不同载频对应的脉冲串将可以得到 N 组方位向成像结果.如果将这 N 个不同载频对应的子脉冲串视为 N 个具有不同载频的“虚拟”雷达对同一目标的持续观测,则由上述分析可知 N 个“虚拟”雷达回波信号携带相同的方位向信息,即具有方位向联合稀疏特征,具体过程如图 1 所示(图中的白色部分为缺失的子脉冲, $\delta_{k,n}$ 表示方位向第 n 个方位像信息).

从图 1 中可以看出,由于转动角度以及载频的不同,所得到的重构结果 $\delta_{k,n}$ 的幅度大小会有所差异,但是由于观测的目标相同,因而所重构的方位向散射点位置信息相同.这一特性可以在重构过程中加以利用,从而提高重构的精度.

2.2 距离向任意稀疏特性分析

经过方位向处理后,方位向存在的 K 个散射点已经被成功分开.由于方位重构时无法对距离向散射点进行分辨,因此需进一步考虑距离成像问题.如图 2 所示,对每个方位向分辨单元分别进行处理即可得到最终的距离

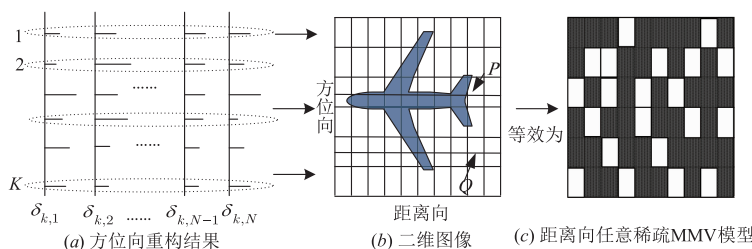


图2 距离向成像示意图

基于上述分析,为充分利用回波信号的二维结构稀疏信息,本文首先基于回波信号的方位向联合稀疏特征,进行方位向联合重构.在方位向处理完毕后,可以将距离向构建为任意稀疏 MMV 模型进行距离向重构,提升距离向重构速度.下面具体分析基于 CFS ISAR 回波二维结构稀疏信息的高分辨成像方法.

3 基于二维结构稀疏信息的 CFS ISAR 高分辨成像方法

当信号具有联合稀疏特性,即具有相同的稀疏结构时,在重构过程中如果能够充分利用这一信息,可以基于分布式压缩感知^[12](Distributed Compressive Sense, DCS)理论得到低信噪比条件下的高精度重构结果,并降低对量测个数的需求^[10].基于上节分析,为充分利用 CFS ISAR 回波二维结构稀疏信息,本节给出方位向基于分布式压缩感知的稀疏重构模型,距离向基于任意

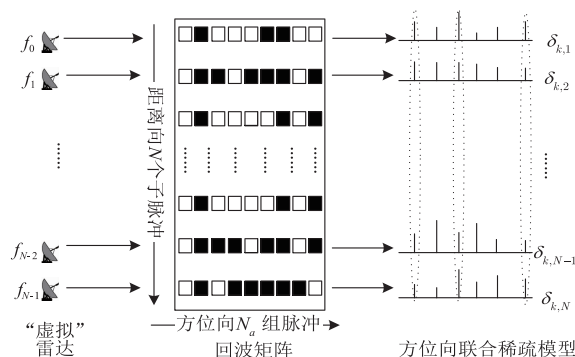


图1 方位向联合稀疏模型

向成像结果(二维图像).然而,由于 ISAR 目标的结构特征造成在不同距离单元的散射点个数与位置显然不同(如图 2(b)中, P 和 Q 方位单元中的散射点个数和位置具有明显区别),因此可以将图 2(b)中方位向成像模型等效为图 2(c)所示的数据矩阵(其中灰色方格表示零元素位置,白色方格代表非零元素位置),可以看出图 2(c)所示的矩阵中非零元素位置是随机分布的.文献[9]将这种结构称之为任意稀疏多量测向量(Multiple Measurement Vectors, MMV)模型.基于上述 MMV 模型进行距离向重构可以提升重构的效率以及成像精度^[9].

稀疏 MMV 模型的 CFS ISAR 高分辨成像方法.

3.1 基于 DCS 的方位向成像方法

对应于式(3),用于方位向成像的指数项为第二项.此时将其他项并入幅度可得到同式(4)的 N 组方位向重构模型为

$$s_r(n; n_a) = \sum_{k=1}^K \delta_{k,n} \exp\left[j4\pi \frac{f_n x_k n_a \Delta \theta}{c}\right] \quad (5)$$

式中 $\delta_{k,n}$ 为第 n 组方位向散射点幅度信息.对于方位向第 n 组子脉冲串回波,基于 CS 的重构模型可以表示为

$$\mathbf{S}'_n = \mathbf{H}_n \boldsymbol{\delta}_n + \mathbf{E}'_n \quad (6)$$

其中 $\mathbf{S}'_n \in \mathbb{C}^{N_a \times 1}$ 表示方位向第 n 组子脉冲串回波,即 $\mathbf{S}'_n = [s_r(n; 1) \cdots s_r(n; n_a) \cdots s_r(n; N_a)]^T$; \mathbf{E}'_n 为噪声序列; $\boldsymbol{\delta}_n \in \mathbb{C}^{N_a \times 1}$ 为重构的第 n 个方位像信息; $\mathbf{H}_n \in \mathbb{C}^{N_a \times N_a}$ 为方位向重构稀疏基,且 \mathbf{H}_n 的构造方式为

$$\mathbf{H}_n = \exp\left[-j2\pi \frac{(n_a - 1)(n_a - 1)(f_0 + n\Delta f)}{N_a f_0}\right] \quad (7)$$

当发射的方位向子脉冲组较少或回波数据不全时,可等效为式(6)乘上一个随机降采样矩阵,可以得到

$$S_n = \Phi^a S'_n = \Phi^a H_n \delta_n + \Phi^a E'_n = \Theta_n^a \delta_n + E_n \quad (8)$$

其中 $S_n \in \mathbb{C}^{N_a \times 1}$, $N'_a < N_a$ 为方位向降采样数据; $\Phi^a \in \mathbb{C}^{N_a \times N_a}$ 为方位向随机降采样矩阵,且 Φ^a 由 0、1 元素组成,当数据缺损时将会在对应的位置出现 0; E_n 为噪声。

对于 N 个载频分别为 $[f_0, f_1, f_2, \dots, f_{N-1}]$ 的回波脉冲串,都可以得到与式(8)类似的方位向重构模型,将 N 组方位向重构模型写成矩阵形式为

$$S = \Theta^a \delta + E \quad (9)$$

其中 $S = [S_1, S_2, \dots, S_N]$; $\Theta^a = [\Theta_1^a, \Theta_2^a, \dots, \Theta_N^a]$; $\delta \in \mathbb{C}^{N_a \times N}$ 且 $\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N]$; E 为噪声矩阵。

如上节分析,将 N 组方位向对应载频的子脉冲视为 N 部载频不同的“虚拟”雷达对目标的持续观测,得到 N 个方位向的成像结果 $\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N]$ 具有联合稀疏特征,因此方位向可基于式(9)的联合稀疏表示模型进行高分辨重构。

从式(9)可以看出,对于每个方位向重构模型,所需要的感知矩阵 Θ_n^a 都不相同(每组方位向子脉冲串对应不同的稀疏基 H_n),基于传统的 CS 理论,只能对每个方位向模型进行分别重构,没有利用方位向之间的联合稀疏信息。而根据 DCS 重构理论^[12],此时上式(9)所示的联合稀疏表示模型可以转化为下式(10)进行求解。

$$\hat{\delta} = \arg \min \|\delta\|_{2,0}, \text{ s. t. } S = \Theta^a \delta + E \quad (10)$$

其中 $\|\delta\|_{2,0}$ 表示 δ 中非零行个数。

式(10)中,利用分布式压缩感知算法进行重构时,在寻找每个支撑集位置时考虑了所有 N 组方位向回波的联合稀疏信息,因此大大增加了重构的准确性,此时可得到更为精确的方位向联合重构结果 $\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N]$ 。

3.2 基于任意稀疏 MMV 模型的距离向成像方法

实现方位向联合处理后,需再进行距离向的成像处理。依据式(4)、式(10),对于方位向重构结果 δ ,可以写成

$$\delta_{n_a} = \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{n,n_a} \exp\left[-j4\pi \frac{f_n(R_0 + y_k)}{c}\right] \quad (11)$$

式中 σ_{n,n_a} 即为第 n_a 个距离像合成结果。此时第 n_a 个距离像重构模型可以表示为

$$\delta_{n_a} = \Omega_{n_a} \sigma_{n_a}^H + W'_{n_a} \quad (12)$$

其中 $\Omega_{n_a} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 为距离像稀疏基,且构造方式 $\Omega_{n_a} = \exp[-j2\pi(n-1)(n-1)/N]$; $\sigma_{n_a}^H \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为第 n_a 个距离像信息; W'_{n_a} 为噪声。

同理,对距离向进行降采样的成像模型可以表示为

$$\Gamma_{n_a} = \Phi \delta_{n_a}^H = \Phi \Omega_{n_a} \sigma_{n_a}^H + \Phi W'_{n_a} = \Theta_{n_a} \sigma_{n_a}^H + W_{n_a} \quad (13)$$

其中 $\Gamma_{n_a} \in \mathbb{C}^{N' \times 1}$, $N' < N$ 为距离向降采样数据; $\Phi \in \mathbb{C}^{N' \times N}$ 为距离向随机降采样矩阵,且 Φ 的构造方式可参考距离向降采样矩阵 Φ_n^a 的设计; W_{n_a} 为噪声。

将距离向 N_a 组重构模型写成矩阵形式为

$$\Gamma = \Theta \sigma^H + W \quad (14)$$

其中 W 为噪声矩阵; $\Theta = [\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N_a}]$; $\Gamma = [\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{N_a}]$; $\sigma^H = [\sigma_1^H, \sigma_2^H, \dots, \sigma_{N_a}^H]$;

式(14)可以等效为任意稀疏结构的 MMV 模型^[9],通过求解最小 0-范数问题进行并行重构,具体过程可以表示为

$$\hat{\sigma} = \arg \min \|\sigma\|_0, \text{ s. t. } \Gamma = \Theta \sigma^H + W \quad (15)$$

通过对式(10)和式(15)的求解,最终便可以得到相应的二维成像结果 $\hat{\sigma}$ 。

最后,总结本文基于二维结构稀疏信息的 CFS ISAR 成像方法主要处理过程如图 3 所示。其中调频步进信号的平动补偿方法可以参考文献[2],由于篇幅限制,此处不再赘述。

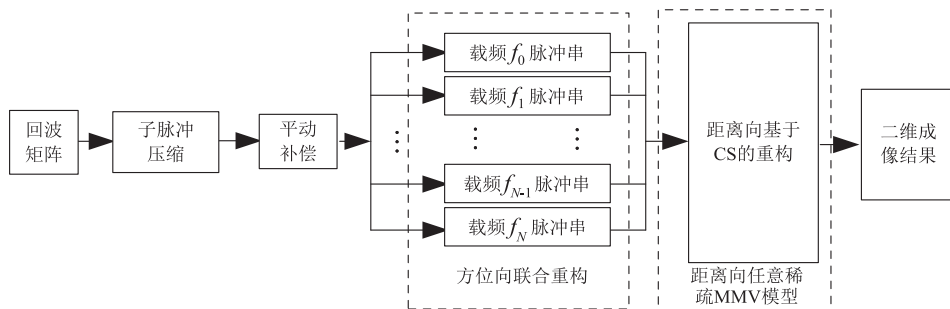


图3 基于二维结构稀疏信息的CFS ISAR成像处理流程

4 性能分析

4.1 量测数分析

文献[13]中给出了联合稀疏 MMV 模型条件下, K

稀疏信号能够准确重构的条件为

$$M \geq K + 1 \quad (17)$$

因此,在本文方位向联合高分辨重构时,方位孔径数需满足式(17)的要求。文献[]中给出了保证稀疏信

号可以准确重构的条件下,量测个数 M 与信号稀疏度需满足的关系为

$$M \geq 2K \quad (18)$$

因此,本文距离向高分辨重构时,子脉冲个数需满足式(17)的要求.

对比式(16)与式(17)可以看出,利用回波信号的联合稀疏特征还可以大大减少方位向量测值的个数,文献[10]的分析也验证了上述结论.因此在 CFS ISAR 方位向重构中,通过本文基于方位向联合稀疏模型的 CFS ISAR 成像方法可以大大降低方位向所需的脉组数,从而节省了时间资源,这对于现代 ISAR 雷达系统来说是有利的.

4.2 抗噪性能分析

当前,已有多种用于求解联合稀疏模型的重构算法.为方便讨论,以 DCS-SOMP 算法为例进行分析.对于传统的单量测向量模型,只能对每组回波分别进行方位向支撑集搜寻,利用的是内积最大原理,即

$$l_{k,n} = \arg \max |\langle r_n, \Theta_n^k \rangle| \quad (19)$$

其中 r_n 为残差信号, $l_{k,n}$ 为第 n 组回波信号第 k 个支撑集位置.

在噪声存在的条件下,当弱信号的内积值小于噪声值时,此时将发生错误重构.在本文方位向联合稀疏的条件下,由于所有信号支撑集是相同的,即 $l_{k,1} = \dots = l_{k,n} = \dots = l_{k,N}$.因此在每次求取支撑集位置时,利用的是 N 次观测信号的内积和最大原则,即

$$l_k = \arg \max \sum_{n=1}^N |\langle r_n, \Theta_n^k \rangle| \quad (20)$$

由于 N 组信号的内积值得到积累,尤其对于弱信号而言,内积值得到提高,因此信噪比下仍然可以较好的实现重构,降低重构误差.

4.3 抑制越距离单元走动分析

传统基于 CS 的 ISAR 成像方法均是首先进行距离分辨,再进行方位重构^[1,3,6,10].该方法首先将散射点划分至不同的距离分辨单元,再对每个距离单元进行方位聚焦.这种方法在距离分辨率较低的情况下效果较好,但是当距离分辨率较高时(分辨率为 $c/(2N\Delta f)$),利用 CS 重构时还可进行超分辨,目标的越距离单元走动的影响往往不能忽略,相同的散射点将会被划分到不同的距离分辨单元,此时再进行方位聚焦,将会影响方位成像的精度.由于本文方法在进行方位向处理时,子脉冲串信号的带宽只有 $c/(2\Delta f)$ (式(4)),因此散射点均处于同一个距离粗单元,距离走动完全可以忽略,不会影响方位聚焦的效果.另外本文还利用了联合稀疏信息进行方位向成像,因而可以得到精确的方位成像结果,消除了传统基于 CS 的 ISAR 成像方法由于越距离单元走动导致的方位向成像质量下降的问题.后

续的仿真结果亦验证了上述结论将会对上述结论进行.

5 仿真与分析

本节实验中,假设采样率定义为 $\alpha = M'/M$,其中 M' 为重构利用的量测值个数, M 为所有的量测值个数;重构误差计算公式为 $E_r = \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|_F^2 / \|\mathbf{x}\|_F^2$,式中 \mathbf{x} 为原信号, $\hat{\mathbf{x}}$ 为重构结果;信噪比添加方式同文献[10].由于本文方法在方位向重构时利用了联合稀疏特征,因此本节首先分析方位向基于联合稀疏模型的重构性能,再进行二维成像性能分析.

5.1 方位向重构性能实验

为分析方位向重构性能,设置方位向存在四个强度分别为 $[1, 0.1, 0.5, 0.8]$ 的散射点,仿真 CFS 信号载频 $f_0 = 10\text{GHz}$;子脉冲数 $N = 256$;载频步进量 $\Delta f = 2\text{MHz}$;脉组数 $N_a = 256$.图 4 为不同采样率下方位向重构结果,其中传统方法表示基于 OMP 算法的重构方法,本文方法表示基于 DCS-SOMP 算法的重构方法,信噪比设置为 20dB.图 5 为不同信噪比下的方位向重构结果,采样率设置为 $\alpha = 0.5$.

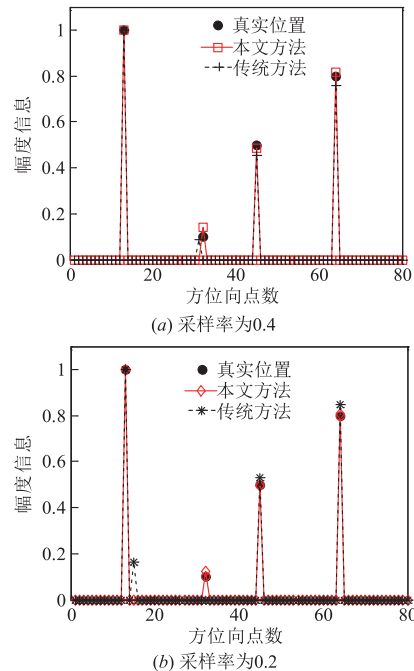


图4 不同采样率条件下方位向重构结果示意图

可以看出对于幅度较弱的散射点,本文方法可以实现精确的重构,而传统方法在重构弱散射点时存在误差,尤其是在采样率为 $\alpha = 0.2$ 时,弱散射点重构错误.从图 5 可以看出,在相同的信噪比条件下,本文方法重构精度明显高于传统方法,且在信噪比低至 0dB 时,本文方法仍可较精确重构出所有散射点,具有较强抗噪性能.

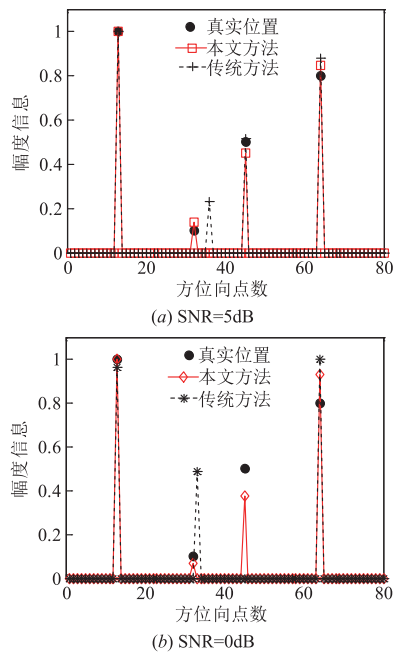


图5 不同信噪比条件下方位向重构结果示意图

5.2 不同采样率成像实验

采用 Mig25 回波数据来验证本文算法在不同信噪比条件下的成像性能. 该实测数据为步进频形式, 部分雷达参数如表 1 所示, 仿真中截取前 96 组信号进行仿真实验, 且距离向、方位向分别进行 2 倍超分辨率.

表 1 Mig25 回波数据参数

参数	仿真值	参数	仿真值
载频 f_c	9GHz	总脉组数 N_a	512
合成带宽	512MHz	子脉冲个数 N	64
重频	15KHz	角速度	$10(^{\circ})/s$

为比较本文方法的成像性能, 采用距离向 IFFT, 方位向 CS 重构方法^[5] (方法 1); 传统 CS 方法, 即基于 CS 的先距离向后方位向成像方法^[3] (方法 2)、基于 CS 的先方位向后距离向成像方法 (方法 3) 以及文献^[10]中基于距离向联合稀疏模型的成像方法 (方法 4) 作为对比算法. 实验中, 基于联合稀疏模型的方法采用 DCS-SOMP 算法^[10]外, 其他均采用 MSL0 算法^[9]. 实验中距离向采样率统一设置为 0.75. 在不同的方位向采样率条件下的成像结果如图 6 所示, 图 7 为不同采样率条件下成像结果熵值以及对比度的对比.

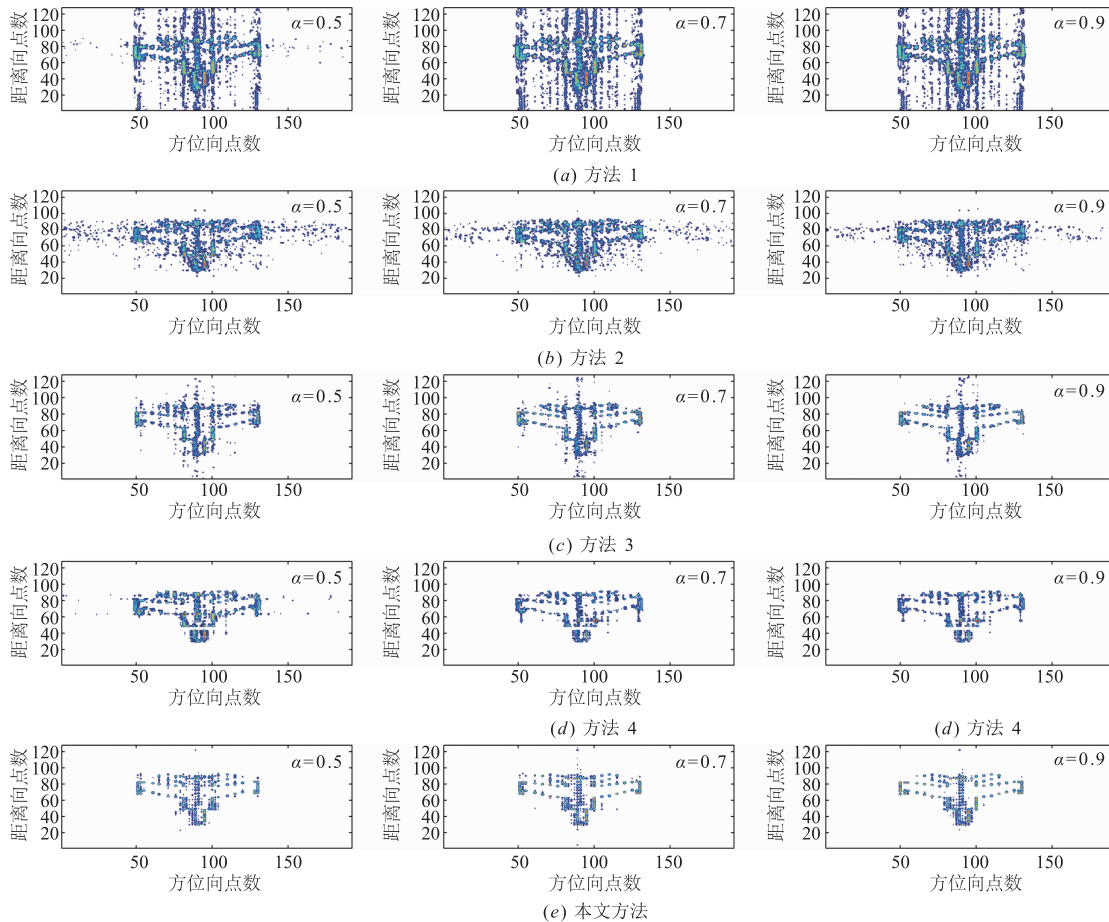


图6 不同采样率条件下成像质量对比

可以看出,在不同的方位向采样率条件下,本文方法的成像效果相对较好. 对于方法 1,由于距离向稀疏,导致在进行距离向 IFFT 处理时出现高的旁瓣,距离向重构结果出现较多虚假散射点. 但是由于 IFFT 算法成像精度不高,导致距离走动可以忽略,从而方法 1 的方位向成像精度相对较好. 对于方法 2,由于距离向采用了 CS 重构,距离向的重构精度较高,但是由于距离走动的存在,使得方位向重构受到较大影响,出现较多虚假重构. 方法 3 由于先进行方位向重构,再进行距离向处理,因此消除了距离走动对方位成像的影响. 通过上述分析验证了本文先方位聚焦再距离分辨方法在抑制越距离单元走动上的优势. 方法 4 利用了距离向的联合稀疏信息,因此距离向重构精度较好. 而本文方法首先进行方位联合成像,再进行距离分辨,避免了越距离单元走动对方位成像的影响,且由于充分利用了方位向联合信息,因此可以在较低的方位向采样率条件下得到质量较好的成像结果.

5.3 不同信噪比成像实验

本节验证算法在不同信噪比下的成像性能. 其中距离向采样率为 0.8、方位向采样率为 0.7. 图 8 为不同信噪比条件下的成像结果,图 9 为不同信噪比下成

像结果熵值以及对比度值.

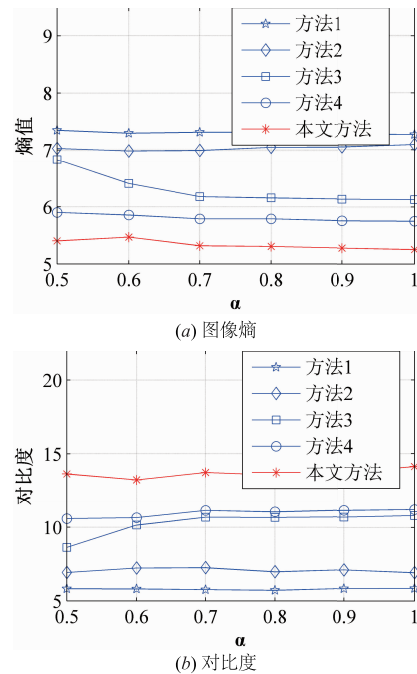


图7 不同采样率下实测数据成像性能对比

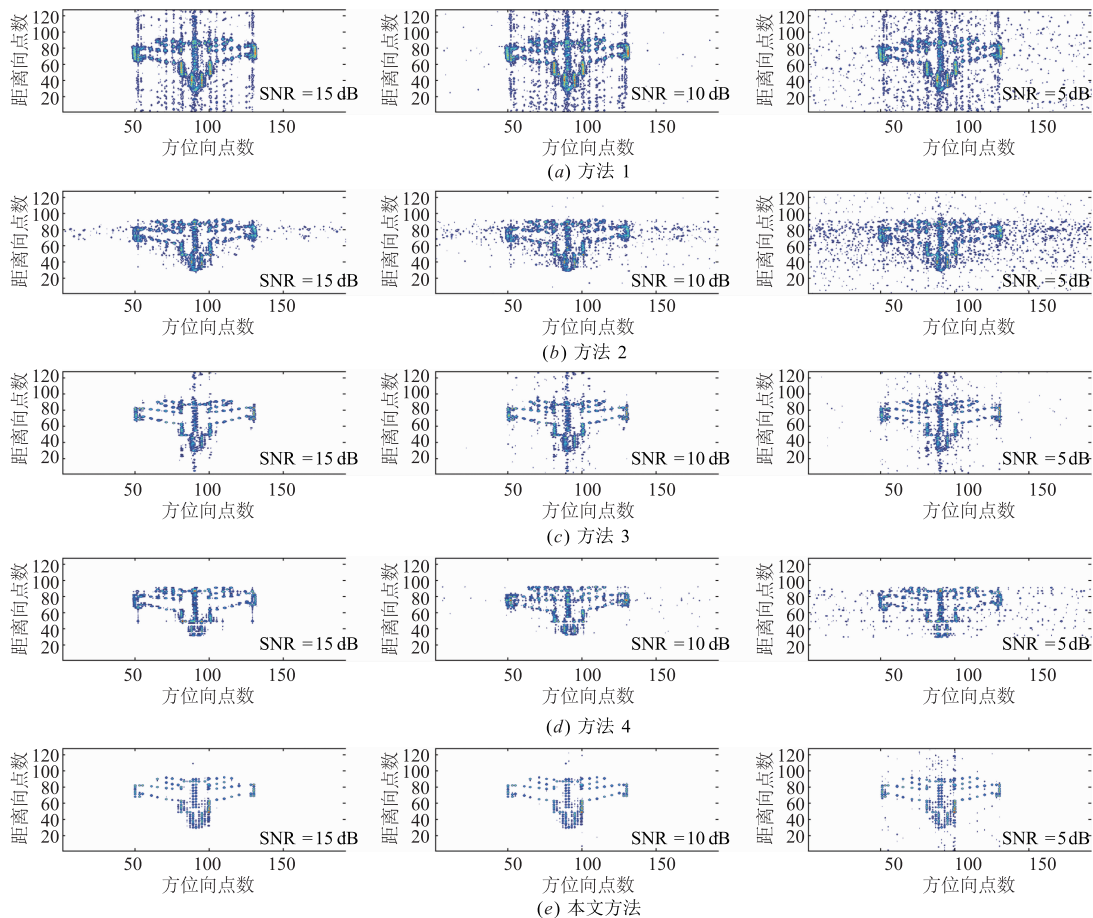


图8 不同信噪比条件下成像质量对比

从图 8 仿真结果可以看出:随着信噪比的降低,各种成像方法的成像质量都呈下降趋势,但是前三种方法成像质量下降的尤为明显.总的来看,在不同的信噪比条件下,前三种方法的成像质量均差于方法 4 以及本文方法,这是由于方法 4 以及本文方法在重构过程中存在积累过程,提高了低信噪比条件下的重构能力,因而本文方法更有利于低信噪比条件下的信号重构,这也验证了前文的分析结论.图 9 的图像熵值以及对比值也验证上述结论的正确性.

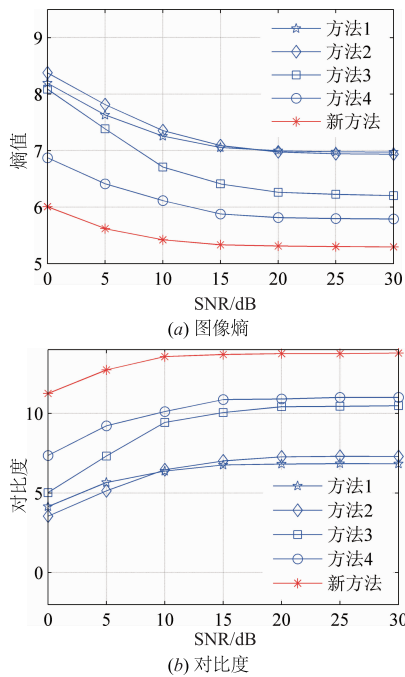


图9 不同信噪比条件下实测数据成像性能对比

6 结论

本文基于 CFS ISAR 发射信号特点以及目标回波的结构稀疏信息,提出了一种“先方位聚焦后距离分辨”的调频步进 ISAR 高分辨成像方法.由于在重构时充分利用了回波信号联合稀疏特征以及任意稀疏结构特征,最终提高了低信噪比的重构性能、大大降低了对方位向孔径的要求,且克服了传统方法越距离单元走动对方位聚焦的影响,更适于现代多功能 ISAR 成像系统.由于本文只利用了方位向联合稀疏特征,对于如何同时利用距离向、方位向联合稀疏特征将是下一步研究的重点.

参考文献

- [1] 吴亮,魏玺章,杨德贵,等.调频步进信号高速目标精确运动估计[J].电子学报,2010,38(12):2832-2838.
WU Liang, WEI Xi-fang, Yang De-gui, et al. Accurate motion estimation of high speed moving target about stepped-frequency chirp signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(12):2832-2838. (in Chinese)
- [2] 吕明久,李少东,杨军,等.基于全局最小熵的随机稀疏调频步进信号运动补偿方法[J].系统工程与电子技术,2016,38(8):1744-1751.
LÜ Ming-jiu, LI Shao-dong, YANG Jun, et al. Motion-compensation method based on global minimum entropy for random sparse stepped-frequency chirp signal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(8):1744-1751. (in Chinese)
- [3] ZHU Feng, ZHANG Qun, LEI Qiang, et al. Reconstruction of moving target's HRRP using sparse frequency-stepped chirp signal[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(10):2327-2334.
- [4] COTTER S F, RAO B D, ENGAN K, et al. Sparse solutions to linear inverse problems with multiple measurement vectors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(7):2477-2488.
- [5] GAO Xun-zhang, LIU Zhen, CHEN Hao-wen, et al. Fourier-sparsity integrated method for complex target ISAR imagery[J]. Sensors, 2015, 15(2):2723-2736.
- [6] FANG Jun, SHEN Yan-ning, LI Hong-bin, et al. Pattern-coupled sparse Bayesian learning for recovery of block-sparse signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(2):360-372.
- [7] DUAN Hui-ping, ZHANG Li-zao, FANG Jun, et al. Pattern-coupled sparse Bayesian learning for inverse synthetic aperture radar imaging[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(11):1995-1999.
- [8] FANG Jun, ZHANG Li-zao, LI Hong-bin. Two-dimensional pattern-coupled sparse Bayesian learning via generalized approximate message passing[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(6):2920-2930.
- [9] 李少东,陈文峰,杨军,等.任意稀疏结构的多量测向量快速重构算法研究[J].电子学报,2015,43(4):708-715.
LI Shao-dong, CHEN Wen-feng, YANG Jun, et al. Study on the fast sparse recovery algorithm via multiple measurement vectors of arbitrary sparse structure[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(4):708-715. (in Chinese)
- [10] 吕明久,李少东,杨军,等.基于随机调频步进信号的高分辨 ISAR 成像方法[J].电子与信息学报,2016,38(12):3129-3136.
LÜ Ming-jiu, LI Shao-dong, YANG Jun, et al. High resolution ISAR imaging method based on random chirp frequency-stepped signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(12):3129-3136. (in Chinese)
- [11] SUN Lin, LU Xin-fei, CHEN Wei-dong. Joint sparsity-

- based ISAR imaging for micromotion targets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(11): 1734 – 1738.
- [12] SUNDMAN D. Greedy algorithms for distributed compressed sensing [D]. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2014.
- [13] DAVIES M E, ELDARY C. Rank awareness in joint sparse recovery [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 58(2): 1135 – 1146.
- [14] DUARTE M F, ELDAR Y C. Structured compressed sensing: from theory to applications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(9): 4053 – 4083.

作者简介



吕明久 男, 1985 年出生, 安徽庐江人. 现为空军预警学院博士研究生, 主要从事信号检测与识别、雷达成像等研究.
E-mail: lv_mingjiu@163.com



李少东 男, 1987 年出生, 河北保定人. 现为解放军 93253 部队工程师. 主要研究方向为压缩感知在 ISAR 中的应用、雷达成像等.
E-mail: liying198798@126.com

杨军 男, 1973 年出生于云南大理. 空军预警学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为雷达系统、SAR/ISAR 成像等.

马晓岩 男, 1962 年出生于湖北赤壁. 空军预警学院教授、博士生导师, 主要研究方向为雷达系统、现代信号处理及其应用.