#### doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.03.001

引用格式:谢矿生. 基于回波数据压缩的 MIMO-SAR 成像方法[J]. 电讯技术,2015,55(3):233-237. [XIE Kuangsheng. An Imaging Method of MIMO-SAR with Compressed Echo Data[J]. Telecommunication Engineering,2015,55(3):233-237. ]

# 基于回波数据压缩的 MIMO-SAR 成像方法\*

#### 谢矿生\*\*

(武警工程大学装备工程学院,西安710086)

摘 要:针对多发多收合成孔径雷达(MIMO-SAR)高分辨成像的回波数据量过大问题,提出了一种基于数据压缩的 MIMO-SAR 成像方法。通过对 MIMO-SAR 回波数据的分析,补偿了由于 MIMO 雷达收发分置导致的相位误差;其次利用距离徙动算法(RMA) 对回波数据进行预处理并分析了其稀疏性;然后针对预处理后的回波数据进行压缩传输,在接收端利用压缩感知重构算法获得回波数据 在距离多普勒域的稀疏表示并进行成像处理。仿真结果表明,所提方法可以在大幅压缩 MIMO-SAR 回波数据的基础上实现准确成像。

关键词:MIMO-SAR 成像;回波数据;压缩感知;距离徙动算法;等效相位中心 中图分类号:TN957 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2015)03-0233-05

# An Imaging Method of MIMO-SAR with Compressed Echo Data

#### XIE Kuangsheng

(College of Equipment Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract: The amount of echo data is huge in multiple input multiple output synthetic aperture radar(MI-MO-SAR) imaging with high resolution. To solve this problem, an imaging method of MIMO-SAR based on compressed echo data is proposed. Firstly, the echo signal model of MIMO-SAR system is analyzed and the phase error induced by MIMO radar is compensated. Secondly, the echo signal is preprocessed by the Range Migration Algorithm(RMA), and also the sparsity of the processed data is analyzed. Then the preprocessed data is compressed and transmitted. In the ground receiver, the sparse expression of echo data in Range-Doppler(RD) domain is reconstructed. Finally, the simulation result shows that the amount of the transmitted data by the proposed method is less than that by the conventional MIMO-SAR imaging method. Key words:MIMO-SAR imaging;echo data; compressed sensing;range migration algorithm; displace phase center

### 1 引 言

多发多收合成孔径雷达(Multiple Input Multiple Output Synthetic Aperture Radar, MIMO-SAR)采用空间并行采样技术能够提供丰富的空间自由度,从而可有效解决传统单通道 SAR 成像过程中方位向高分辨与大测绘带之间的矛盾问题,具有十分广阔的发展与应用前景<sup>[1-4]</sup>。然而,由于机载平台的资源和硬件处理能力有限,无法完成较为复杂和精确的成像处理,

只能对雷达回波数据进行一些简单的预处理,然后传输给地面接收端或者预警机进行更为复杂的运算和数据分析处理。考虑到 MIMO-SAR 成像系统多通道的特点,其回波数据量在同等条件下是单通道 SAR 成像系统的数倍,这对数据传输信道和实时传输提出了严峻的挑战。因此,如何减少 MIMO-SAR 成像系统的回波数据量是值得研究的问题。

近年来,由美国科学家 Donoho 提出的压缩感知

<sup>\*</sup> 收稿日期:2014-11-04;修回日期:2015-02-06 Received date:2014-11-04;Revised date:2015-02-06

<sup>\*\*</sup> 通讯作者:xiekuan\_cn@sina.com Corresponding author:xiekuan\_cn@sina.com

(Compressed Sensing, CS)理论为解决上述问题提供 了较为有效的途径与方法<sup>[5]</sup>。该理论指出,如果信 号具有稀疏性,那么可以从严重降采样的数据中实 现该信号的高概率重构。可以说,CS 理论利用了信 息采样取代了信号采样,这样采样速率由信息在信 号中的结构和内容决定,而不是信号的带宽。基于 该特性,国内外的研究人员已经将 CS 理论应用于 雷达数据的压缩与成像中<sup>[6-9]</sup>。文献[6-7]利用 CS 理论对二维傅里叶处理之后的 SAR 数据进行一维 的解编码,从而减少了 SAR 系统的传输数据量。文 献[8]提出了稀疏孔径 SAR 成像方法,利用稀疏孔 径降低了回波数据量。目前的研究成果大多都集中 于单站点雷达的数据压缩处理,而对于多站点 MI-MO 雷达的数据处理应用还比较少。本文将压缩感 知理论引入到 MIMO-SAR 的数据压缩处理中,提出 了在 MIMO 雷达载机传输端利用压缩感知理论将预 处理后的回波数据压缩并传输,然后在地面接收端 利用 CS 重构算法直接重构得到距离多普勒域数 据,进而进行方位向成像处理的方法,这样可大幅减 少 MIMO-SAR 传输的数据量,从而有效提高回波数 据的传输效率。

#### 2 MIMO-SAR 回波数据分析

假设天线阵元沿着载机的航线方向排列,一共 包含 P 个天线阵元,分别记为  $X_1, X_2, \dots, X_P$ 。载机 的飞行速度为 v,其高度为 H,设定观测场景具有 N个散射点,其中第  $P_n$  个散射点的位置坐标为( $x_n$ ,  $y_n, z_n$ ), $n=1,2,\dots,N$ 。该散射点到航线的垂直距离 为  $R_n$ 。MIMO-SAR 成像的几何构型图如图 1 所示。



· 234 ·

考虑到 MIMO 雷达的回波信号需要进行分集处 理,因此发射的信号应该具有正交性。本文采用正 交频分线性调频(Orthogonal Frequency Division Linear Frequency Modulation, OFD-LFM)<sup>[10]</sup>信号作为 MIMO-SAR 系统的发射信号,那么第p个天线阵元 发射的信号为

$$s_{p}(\hat{t}, t_{m}) = \operatorname{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_{r}}\right) \exp[j2\pi f_{0}(p)t_{m} + j\pi u\hat{t}^{2}],$$
$$p = 1, 2, \cdots, P_{\circ}$$
(1)

式中,rect(t) 是矩形窗函数, 当-1/2  $\leq t \leq 1/2$  时, 其 值为1;u 为信号的调频率; $T_r$  为发射脉冲宽度; $\hat{t}$  为 快时间; $t_m$  为慢时间,并且中心频率为

$$f_0(p) = f_0 + \left(p - \frac{1}{2} - \frac{P}{2}\right) B_s, p = 1, 2, \cdots, P_o \quad (2)$$

式中, f<sub>0</sub>为发射信号的初始载频, B<sub>s</sub>为两个相邻阵 元发射信号的步进带宽。那么第 q个接收天线收到 所有发射天线的信号表达式为

$$s_{q}(\hat{t}, t_{m}) = \sum_{n=1}^{N} \sum_{p=1}^{P} \sigma_{n} \operatorname{rect}\left(\frac{\hat{t} - (R_{pn} + R_{qn})/c}{T_{r}}\right) \cdot \exp\left(j\pi u \left(\hat{t} - \frac{R_{pn} + R_{qn}}{c}\right)^{2}\right) \cdot \exp\left(j2\pi f_{0}(p) \left(t - \frac{R_{pn} + R_{qn}}{c}\right)\right)_{\circ}$$
(3)

式中, $\sigma_n$  表示目标的后向反射系数,c 为光速, $R_{pn}$ 为 第 p 个发射阵元到第 n 个点目标的距离, $R_{qn}$ 为第 n个点目标到第 q 个接收阵元的距离。对回波信号  $s_q(\hat{t},t_m)$ 进行去载频处理,并进行分离处理,得到来 自第 p 个发射天线的回波基频信号为

$$s_{pq}(\hat{t},t_m) = \sum_{n=1}^{N} \sigma_n \operatorname{rect}\left(\frac{\hat{t} - (R_{pn} + R_{qn})/c}{T_r}\right) \cdot \exp\left(j\pi u \left(\hat{t} - \frac{R_{pn} + R_{qn}}{c}\right)^2\right) \exp\left(-j2\pi \frac{R_{pn} + R_{qn}}{\lambda_p}\right)_{\circ}$$
(4)

式中, $\lambda_p = c/f_0(p)$ 。考虑到 MIMO-SAR 系统收发分 置的特点,在进行成像处理之前需要先补偿由收发分 置阵元转换为收发同置阵元而导致的相位误差<sup>[11]</sup>。 文献[12]针对这一问题,给出了较为详细的分析,因 此公式(4)经过相位误差补偿后,可重新写为

$$\tilde{s}_{pq}(\hat{t}, t_m) = \sum_{n=1}^{N} \sigma_n \operatorname{rect}\left(\frac{\hat{t} - (R_{pn} + R_{qn})/c}{T_r}\right) \cdot \exp\left(j\pi u \left(\hat{t} - \frac{R_{pn} + R_{qn}}{c}\right)^2\right) \exp\left(-j4\pi \frac{R_{pqn}}{\lambda_p}\right) \circ$$
(5)

式中, $R_{pqn}$ 为等效相位中心 $X_{pq}$ 到目标点 $P_n(xn, yn, zn)$ 的距离。其次对式(5)做距离向和方位向傅里 叶变换,得回波信号的二维频域表达式为

$$S'_{pq}(f_r, f_a) = \sum_{n=1}^{N} \sigma_n \operatorname{rect}\left(\frac{f_r}{uT_r}\right) \cdot \exp\left\{-jR_n\sqrt{K_R^2 - K_x^2} - j\pi \frac{f_r^2}{u}\right\} \cdot \exp(-jK_x x_n) \cdot \exp(jK_x X_{pq}) \circ (6)$$
  

$$\overrightarrow{c} + K_R = 4\pi (f_0(p) + f_r)/c \quad K_x = 2\pi f_a/v \circ$$

# 3 基于数据压缩的成像方法

#### 3.1 回波数据预处理及稀疏性分析

为便于数据补偿,按照文献[13]和距离徙动算法(Range Migration Algorithm, RMA),考虑到实际运动误差补偿的需要,按照文献[13]的方法首先将式(6)第一个指数项按照参考距离 *R*<sub>0</sub>分为不依赖距离和依赖距离两部分,即

$$\varphi_i(f_r, f_a, R_0) = -R_0 \sqrt{K_R^2 - K_x^2} - \pi \frac{f_r^2}{u}, \qquad (7)$$

 $\varphi_d(f_r, f_a, R_n - R_0) = -(R_n - R_0)\sqrt{K_R^2 - K_x^2}, \quad (8)$ 那么,构造的一致压缩的参考函数为

$$H_{i}(f_{r}, f_{a}, R_{0}) = \exp\left[-j\varphi_{i}(f_{r}, f_{a}, R_{0})\right]_{\circ}$$
(9)

将式(6)与式(9)相乘完成一致压缩处理,这样 参考距离  $R_0$ 处的数据完全聚焦,而其他距离处的目 标有残余的相位  $\varphi_d(f, f_a, R_n - R_0)$ 。由于式(6)中的 残余相位是  $f_r$ 的非线性函数,若直接对信号做距离 向快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT),当( $R_n - R_0$ )  $\neq 0$ 时,目标就会出现散焦 现象。对式(6)做插值处理,通过尺度变换操作将 式(6)的根式替换为  $4\pi(f_0(p) + f_h)/c$ ,即

$$\sqrt{K_R^2 - K_x^2} \rightarrow 4\pi \left(\frac{f_0(p) + f_b}{c}\right)_{\circ}$$
(10)

这样通过 Stolt 插值的补余聚焦,实现了剩余距离徙 动的校正和残余相位的补偿,可记为 $S^*(f, f_a)$ 。在 实际的数字信号处理中, $S^*(f, f_a)$ 可看作一个二维 矩阵,大小为  $L \times N$ ,其中 L 为多普勒单元数,N 为距离 单元数。将矩阵  $S^*(f, f_a)$ 的第  $l(l=1,2,\dots,L)$ 行记 为  $S^*(f, f_l)$ ,那么  $S^*(f, f_l)$ 经过距离向的离散傅里 叶逆变换(Inverse Discrete Fourier Transform,IDFT)处 理,可得观测场景的一维距离像,其公式表示为

 $S^* (f_r, f_l)^{\mathsf{H}} = \boldsymbol{\Psi} \cdot S_r (\hat{t}, f_l)^{\mathsf{H}}.$  (11) 式中,矩阵 **\boldsymbol{\Psi}**为 DFT 变换矩阵,具体可写为

$$\boldsymbol{\Psi} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & W_N^1 & W_N^2 & \cdots & W_N^{(N-1)} \\ 1 & W_N^2 & W_N^4 & \cdots & W_N^{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W_N^{(N-1)} & W_N^{2(N-1)} & \cdots & W_N^{(N-1)^2} \end{bmatrix}, \\ W_N = \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}\right)_{\circ}$$
(12)

当观测场景满足稀疏性要求时,其一维距离像的峰值数相对于整个距离向上的采样点数是很少的,因此 *S<sub>r</sub>*(*î*,*f<sub>i</sub>*)在距离向上满足稀疏性要求,这样 MIMO-SAR 的回波数据经过预处理后能够得到其稀疏化表征。

#### 3.2 基于数据压缩的成像方法

为了实现对预处理数据的压缩,在 CS 理论中 即为通过构造低维观测矩阵实现对数据的降维处 理。构造的广义单位阵为降维矩阵,从而实现对预 处理数据  $S^*$  ( $f_r$ , $f_l$ )的压缩,降维观测矩阵记为  $\Phi^{M\times N}$ ,其中 $\Phi = \{\phi_{e,d}\}, \Phi$ 中的任意行向量 $\phi_e$ 除了 第 $m_e$ 个元素为1 外,其余元素均为0, $m_e$ 随机选取。 这样即可得到压缩后的数据 $S^*_{com}(f_m, f_l)$ ,其公式表 示为

$$\boldsymbol{S}_{\text{com}}^{*}(\boldsymbol{f}_{m},\boldsymbol{f}_{l})^{\text{H}} = \boldsymbol{\Phi} \cdot \boldsymbol{S}_{r} (\boldsymbol{f}_{r},\boldsymbol{f}_{l})^{\text{H}} = \boldsymbol{\Phi} \cdot \boldsymbol{\Psi} \cdot \boldsymbol{S}_{r} (\hat{\boldsymbol{t}},\boldsymbol{f}_{l})^{\text{H}}_{\circ}$$
(13)

考虑传输噪声的影响,式(13)可重新写为

 $S_{com}^{*}(f_{m},f_{l})^{H} =$ **Φ**·**Ψ** $· S_{r}(\hat{t},f_{l})^{H} +$ **n**. (14)对所有的 l = 1,2,...,L 均进行上述压缩处理,即可得到压缩后的预处理的 MIMO – SAR 数据 $<math>S_{com}^{*}(f_{m},f_{a})$ ,这样 MIMO 雷达载机的信号传输端只 需要  $S_{com}^{*}(f_{m},f_{a})$ 即可,该数据的大小为  $L \times M$ ,相比 于原始数据  $S^{*}(f_{r},f_{a})$  压缩了  $L \times (N-M)$ ,压缩比定 义为  $\eta = (N-M)/N$ ,其中,N 为原始数据量,M 为压 缩后剩余的数据量。在接收端,根据 CS 理论,利用  $S_{com}^{*}(f_{m},f_{l})$ 求解下述表达式即可得到  $S_{r}(\hat{t},f_{l})$ : min  $\|S_{r}(\hat{t},f_{l})^{H}\|_{0}$  s.t.  $S_{com}^{*}(f_{m},f_{l})^{H} =$ **ΦΨS** $_{r}(\hat{t},f_{l})^{H} +$ **n**. (15)

对所有的 l=1,2,...,L 均进行式(15)的求解, 即可得到观测场景的距离多普勒域数据  $S_r(\hat{t},f_a)$ , 再对其进行方位向的 IDFT 处理,即可得到观测场 景的成像结果。

# 4 仿真实验

以3发3收的 MIMO 雷达阵列为例,对 MIMO-SAR 系统的回波数据压缩成像过程进行仿真验证。

MIMO-SAR 系统正侧视模式工作,其与观测场景的 几何位置关系如图 1 所示。3 个天线阵元的位置分 别为0 m、0.5 m、1 m,其余的仿真参数如表 1 所示。

表1 雷达系统参数	
Table 1 Radar system parameters	
仿真参数	参数值
平台高度/km	3
载机速度/(m・s <sup>-1</sup> )	150
中心频率/GHz	10
子带宽度/MHz	350
脉冲重复频率/Hz	1000
距离分辨率/m	0.43
方位分辨率/m	0.15

30 20 10 方位向/m 0 -10 -20 -30 4120 4130 4140 4150 4160 4170 4180 距离向/m (a) 全数据的成像结果 30 20 10 方位向/m 0 -10 -20 -30 L 4120 4130 4140 4150 4160 4170 4180 距离向/m (c)压缩比 η=0.75 的成像结果

首先以单散射点目标为例进行验证,点目标的 坐标( $x_0$ , $y_0$ , $z_0$ )=(0 m,4150 m,0 m)。得到的点目 标成像结果如图 2 所示,其中(a)和(b)分别是 MI-MO-SAR 全数据的成像结果与其峰值旁瓣示意图, (c)和(d)分别是回波数据压缩比  $\eta$ =0.75 时利用 本文提出的方法得到的成像结果。对比可以看出, 图 2(d)的旁瓣明显低于全数据得到的结果,说明了 利用本文方法得到的结果具有较好的聚焦性能,从 而也说明了利用本文方法能够在大幅压缩回波的条 件下获得较好的成像结果,验证了所提方法的有 效性。





(d) 压缩比 η=0.75 的峰值旁瓣示意图

图 2 MIMO-SAR 单点目标成像结果 Fig. 2 The results of MIMO-SAR point target imaging

为了更能说明本文方法的有效性,下面采用 海面场景的面目标进行仿真验证。MIMO 雷达的 参数设置如上所述,仍然为3发3收。图3给出 了在全数据和压缩数据条件下的成像结果,其中 (a)是在全数据条件下得到的成像效果,(b)是 在压缩比η=0.75条件下利用本文基于 CS的方 法得到的结果,可以看出得到了较为理想的成像 结果,便于后续的目标识别处理,从而再次验证 了本文方法的有效性。



图 3 MIMO-SAR 面目标成像结果 Fig. 3 The results of MIMO-SAR surface target imaging

· 236 ·

# 5 结束语

本文针对 MIMO-SAR 回波数据量较大问题进 行研究,提出了回波数据压缩的 MIMO-SAR 成像方 法。在详细分析 MIMO-SAR 回波信号模型的基础 上,给出了基于 RMA 算法对 MIMO-SAR 回波信号 的预处理方法并进行了稀疏性分析,然后利用压缩 感知降维思想对预处理的数据进行了压缩采样并传 输,在地面接收端利用 CS 重构理论进行重构处理 并最终成像。最后利用海面场景的仿真实验验证了 本文方法在大幅压缩回波数据的基础上能够实现 MIMO-SAR 的准确成像。

# 参考文献:

- [1] 武其松,井伟,邢孟道,等. MIMO-SAR 大测绘带成像
  [J]. 电子与信息学报,2009,31(4):771-775.
  WU Qisong,JING Wei,XING Mengdao, et al. Wide swath imaging with MIMO-SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31 (4): 771 775. (in Chinese)
- [2] Ender J H G, Klare J. System architectures and algorithms for radar imaging by MIMO-SAR[C]//Proceedings of 2009 IEEE Radar Conference. Pasadena, CA: IEEE,2009:1-6.
- [3] 黄平平,邓云凯,徐伟,等. 基于频域合成方法的多发 多收 SAR 技术研究[J]. 电子与信息学报,2011,33
  (2):401-406.
  HUANG Pingning DENC Yunkai YU Wai at al. 75

HUANG Pingping, DENG Yunkai, XU Wei, et al. The research of multiple input and multiple output SAR based on frequency synthetic [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33 (2): 401 – 406. (in Chinese)

- Gebert N, Krieger G. Azimuth phase center adaptation on transmit for high – resolution wide – swath SAR imaging
   [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009,6(4):782–786.
- [5] Donoho D L. Compressed Sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4):1289–1306.
- [6] Bhattacharya S, Blumensath T, Mulgrew B, et al. Fast encoding of synthetic aperture radar raw data using compressed sensing [C]//Proceedings of 2007 IEEE Workshop on Statistical Signal Processing. Madison, USA: IEEE,2007:448-452.

- [7] Wang Min. Raw SAR data Compression by Structurally Random Matrixbased Compressive Sampling [C]// Proceedings of 2009 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Xi'an:IEEE,2009:1119-1122.
- [8] Herman M A, Strohmer T. High-resolution radar via compressed sensing[J]. IEEE Transaction on Signal Processing,2009,57(6):2275-2284.
- [9] Gu Fufei, Chi Long, Zhang Qun, et al. Single snapshot imaging for MIMO radar with sparse antenna array [J].
   IET Proceedings - Radar, Sonar & Navigation, 2013, 7 (5):535-543.
- [10] 刘波,韩春林,苗江宏. MIMO 雷达正交频分 LFM 信号设计及性能分析[J]. 电子科技大学学报,2009,38(1):28-31.
  LIU Bo,HAN Chunlin,MIAO Jianghong. OFD-LFM signal design and performance analysis for MIMO radar[J].
  Journal of University of Electronic Science and Technology of China,2009,38(1):28-31. (in Chinese)
- [11] Bellettini A, Pinto M A. Theoretical Accuracy of synthetic aperture sonar micro-navigation using a displaced Phase center antenna [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(4):780-789.
- [12] 王力宝,许稼,皇甫堪,等. MIMO-SAR 等效相位中 心误差分析与补偿[J]. 电子学报,2009,37(12): 2688-2693.

WANG Libao, XU Jia, HUANGFU Kan, et al. Analysis and compensation of equivalent phase center error in MI-MO-SAR[J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 37 (12):2688-2693. (in Chinese)

[13] 彭发祥,李宏伟,蔡斌,等. 基于运动补偿的机载 MI-MO-SAR 高分辨成像算法[J]. 空军工程大学学报 (自然科学版),2012,13(1):73-78.
PENG Faxiang,LI Hongwei,CAI Bin, et al. An imaging method of high resolution airborne MIMO-SAR based on motion compensation[J]. Journal of Air Force Engineering University:Natural Science Edition,2012,13(1):73 -78. (in Chinese)

# 作者简介:



谢矿生(1960—),男,河南温县人,教 授、硕士生导师。

XIE Kuangsheng was born in Wenxian, Henan Province, in 1960. He is now a professor and also the instructor of graduate students.

Email:xiekuan\_cn@ sina. com