

一种基于频域子带合成的多发多收高分辨率 SAR 成像算法

邓云凯^① 陈倩^{*①} 祁海明^① 郑慧芳^① 刘亚东^②

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国空间技术研究院总体部 北京 100094)

摘要: 针对传统单通道 SAR 系统无法同时实现方位向高分辨率和大测绘带宽的不足, 该文研究了一种基于多载频 LFM 波形的方位多孔径 MIMO SAR 系统, 建立了相应的几何模型, 详细推导了其回波表达式, 并提出了一种基于频域子带合成的 MIMO SAR 高分辨率成像算法。该算法将方位向多普勒解模糊, 改进的距离向频域子带合成和 CS 成像算法相结合, 能够同时实现 2 维高分辨率和大测绘带宽, 且提出的频域子带合成法较传统时域和频域合成法更高效实用。理论分析和计算机仿真结果验证了其有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 多发多收; 高分辨率宽测绘带; 多普勒模糊; 频域子带合成

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)05-1082-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01067

A High-resolution Imaging Algorithm for MIMO SAR Based on the Sub-band Synthesis in Frequency Domain

Deng Yun-kai^① Chen Qian^① Qi Hai-ming^① Zheng Hui-fang^① Liu Ya-dong^②

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Considering the contradiction between the azimuth resolution and the swath width for the traditional SAR, a MIMO SAR system with multiple-carrier-frequency LFM waveform is researched. The corresponding geometrical model is built, and the expressions of the echo signals are derived in detail. A novel imaging algorithm based on the sub-band synthetic technology in frequency domain is proposed. This algorithm which integrates the removing of azimuth ambiguities, the synthesis of the sub-band and the CS imaging can realize 2-D high resolution and wide swath simultaneously. And the improved sub-band synthetic algorithm has more efficiency and practicality than the traditional sub-band synthetic algorithms in time frequency domain. The effectiveness of this method is verified with the theoretical analysis and the computer-based simulations.

Key words: SAR; MIMO; High Resolution Wide Swath (HRWS); Doppler ambiguities; Sub-band synthetic technology in frequency domain

1 引言

随着合成孔径雷达(SAR)系统和信号处理技术的不断发展, 同时实现高分辨率宽测绘带已成为新一代 SAR 系统的研制目标。为解决传统单通道 SAR 方位分辨率和测绘带宽之间的矛盾^[1], 近年来提出了一种多发多收(MIMO)SAR 系统^[2-6], 其采用正交发射波形, 利用方位向或距离向的收发多波束^[7-9]同时实现高分辨率宽测绘带。本文研究一种基于多载频 LFM 发射波形^[10-13]的方位向多孔径 MIMO SAR 系统, 其采用多载频 LFM 波形实现波形分离, 利用方位向多波束有效降低 PRF 要求, 采用子带合

成技术在距离向合成一个宽带 LFM 信号提高距离分辨率。文中建立了多载频 LFM 波形方位向多孔径 MIMO SAR 系统的几何模型, 详细推导了其回波表达式, 深入研究了适用于该系统的高分辨率成像算法, 首先利用频谱重构法解方位向多普勒模糊, 随后提出一种新的距离向频域子带合成算法对距离向多频带信号进行处理, 提高距离向分辨率, 该算法较传统时频域合成算法更为高效与稳健。最后, 本文还提出了一种结合方位向多普勒解模糊, 改进距离向频域子带合成和 CS 成像算法的 MIMO SAR 高分辨率成像算法, 并通过仿真验证了其有效性。

2 基于多载频 LFM 发射波形的 MIMO SAR 系统

建立图 1 所示的空间坐标系, SAR 平台高度为

2010-10-08 收到, 2011-01-19 改回

*通信作者: 陈倩 chenqian19860123@sina.com

H ，速度为 v_a 。 K 个发射孔径分别发射不同载频的 LFM 信号， N 个接收孔径同时接收，收发孔径间距均为 d ， η 为方位慢时间，中心子孔径在 $\eta = 0$ 时刻位于 $(0, 0, H)$ 处。地面分布有 N_c 个散射点，坐标分别为 $(x_i, y_i, 0)$, $i = 1, 2, \dots, N_c$ 。

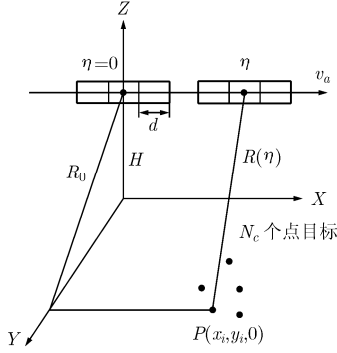


图1 MIMO SAR 系统几何模型

第 k 个发射孔径的发射信号为 $s_k(\tau, \eta) = \text{rect}(\tau/T_r) \exp[j2\pi f_k \tau + j\pi K_r \tau^2]$ ， τ 表示快时间， T_r 和 f_k 分别表示脉宽和载频。令 $C_t = (K + 1)/2$ ， $C_r = (N + 1)/2$ ，则 η 时刻第 k 个发射子孔径到第 i 个散射点的斜距为 $R_{tki}(\eta) = \sqrt{(x_i - v_a \eta - (k - C_t)d)^2 + y_i^2 + H^2}$ ，同一时刻第 n 个接收子孔径到第 i 个散射点的斜距为 $R_{rni}(\eta) = \sqrt{(x_i - v_a \eta - (n - C_r)d)^2 + y_i^2 + H^2}$ ，利用 Taylor 公式对其展开，并由 $d \ll x_i$ 可得

$$\left. \begin{aligned} R_{tki}(\eta) &\approx R_i(\eta) + \frac{(k - C_t)d}{R_{0i}} v_a \eta, \\ R_{rni}(\eta) &\approx R_i(\eta) + \frac{(n - C_r)d}{R_{0i}} v_a \eta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $R_{0i} = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + H^2}$ ， $R_i(\eta) = R_{0i} - (x_i/R_{0i})v_a \eta + [1/(2R_{0i})]v_a^2 \eta^2$ 。令 $r_{nki}(\eta) = 2R_i(\eta) + v_a \eta \cdot (n + k - C_t - C_r)d/R_{0i}$ ，则 η 时刻第 n 个接收子孔径接收到的第 k 个发射孔径的回波信号为

$$x_{nk}(\tau, \eta) = \sum_{i=1}^{N_c} A_{nki} \text{rect} \left(\frac{\tau - r_{nki}(\eta)/c}{T_r} \right) \cdot \exp \left[-j2\pi f_k \frac{r_{nki}(\eta)}{c} \right] \exp \left[j\pi K_r \left(\tau - \frac{r_{nki}(\eta)}{c} \right)^2 \right] \quad (2)$$

其中 A_{nki} 表示第 i 个散射点回波幅值，与收发天线方向图和后向散射系数有关， c 为光速。

3 基于频域子带合成的 MIMO SAR 成像处理

本文提出的多载频 LFM 发射波形方位多孔径 MIMO SAR 成像算法主要包括以下几个步骤：(1)

方位向解多普勒模糊；(2)距离向匹配滤波后频域子带合成；(3)后续 CS 成像处理。

3.1 基于频谱重构算法解多普勒模糊

与 SIMO SAR 相同，MIMO SAR 采用较低的 PRF，各子带分别进行方位多波束^[8]处理实现多普勒解模糊。实际应用中脉冲重复周期 T ，平台速度 v_a ，子孔径个数 N 及间距 d 往往不能满足理想关系 $v_a T = Nd/2$ ，于是造成方位向的非均匀采样。本文采用频谱重构法进行方位向解模糊处理，有效解决了方位向非均匀采样的问题。

假设频谱模糊 N 次，令 $L = (N - 1)/2$ ， $f_a = \text{PRF}$ ， $T = 1/f_a$ ，同一子带 N 路回波模糊的多普勒谱在频点 $f_0 \in [-f_a/2, f_a/2]$ 处的值构成向量 $\mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_N]$ ， $f_l = f_0 + l \cdot f_a$ 表示相应的模糊频点，其中 $l = -L, -L + 1, \dots, L$ 。而 $\mathbf{Y}_0 = [Y_0^{-L}, Y_0^{-L+1}, \dots, Y_0^L]$ 表示第 1 个通道的理想无模糊多普勒谱在 f_l 处的值，由各个通道信号的时移关系和多普勒模糊原理可得 \mathbf{Y} 和 \mathbf{Y}_0 满足：

$$\mathbf{Y} = (1/T) \mathbf{Y}_0 \mathbf{W}_0 \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{W}_0 = \begin{bmatrix} \exp \left[j2\pi(-Lf_a + f_0) \frac{d}{2v_a} \right] \\ \exp \left[j2\pi((-L+1)f_a + f_0) \frac{d}{2v_a} \right] \\ \vdots \\ \exp \left[j2\pi(Lf_a + f_0) \frac{d}{2v_a} \right] \\ \dots \\ \exp \left[j2\pi(-Lf_a + f_0) \frac{Nd}{2v_a} \right] \\ \dots \\ \exp \left[j2\pi((-L+1)f_a + f_0) \frac{Nd}{2v_a} \right] \\ \vdots \\ \dots \\ \exp \left[j2\pi(Lf_a + f_0) \frac{Nd}{2v_a} \right] \end{bmatrix} \quad (4)$$

若 \mathbf{W}_0 是可逆的，则

$$\mathbf{Y}_0 = \mathbf{Y} (\mathbf{T} \mathbf{W}_0^{-1}) \quad (5)$$

由此可求得 $[-f_a/2, f_a/2]$ 上任一频点对应的 \mathbf{Y}_0 ，从而实现了信号的无模糊重构。解多普勒模糊后的子带 k 信号为

$$x_k(\tau, \eta') = \sum_{i=1}^{N_c} B_{ki} \text{rect} \left(\frac{\tau - 2r_i(\eta')/c}{T_r} \right) \cdot \exp \left[-j4\pi f_k \frac{r_i(\eta')}{c} \right] \exp \left[j\pi K_r \left(\tau - \frac{2r_i(\eta')}{c} \right)^2 \right] \quad (6)$$

其中 B_{ki} 为信号加权值,与天线方向图和目标后向散射系数有关。 η' 为重排后新的慢时间,满足 $\eta' = mT/N, m = 0, 1, \dots$ 。 $r_i(\eta')$ 为瞬时斜距, $r_i(\eta') = \sqrt{(x_i - v_a \eta')^2 + y_i^2 + H^2}$ 。

3.2 距离向改进的频域子带合成算法

子带并发模式下方位多孔径 MIMO SAR 存在大量重叠的等效相位中心,由于采用多载频的 LFM 发射波形,可将同一相位中心的不同子带信号合成一个大带宽 LFM 信号,提高距离向分辨率。文献[10]给出了一种时域子带合成法,主要包括频移、相位校正和时移 3 个步骤,运算量较大且在子带重叠时该方法是失效的;文献[14]给出了一种距离压缩前的频域子带合成算法,此方法对于单个点目标的效果非常理想,但是对于场景目标是不理想的。本节提出了一种距离向匹配滤波后的频域子带合成算法,该方法对于点目标和场景目标均适用,且允许子带重叠,比传统时域和频域合成算法更为高效和实用。图 2 和图 3 分别给出了该算法的流程图和原理图。

(1)子带距离向匹配滤波 对式(6) N 个子带信号进行距离向 FFT 变换和频域匹配滤波后得到式

(7),其中 B'_{ki} 为第 i 个散射点第 k 个子带的频谱幅值,与天线方向图和后向散射系数有关, f_r 为距离向频率。

$$g_k(f_r, \eta') = \sum_{i=1}^{N_c} B'_{ki} \text{rect} \left(\frac{f_r}{K_r T_r} \right) \exp \left[-j4\pi \frac{r_i(\eta')}{c} (f_k + f_r) \right] \quad (7)$$

值得说明的是,式(7)为近似表达式,事实上距离向频谱存在菲涅尔起伏^[5]。

(2)子带频谱搬移和叠加 对第 k 个子带距离频谱进行 Δf_k 的搬移,再将 N 个子带信号进行叠加得到

$$\begin{aligned} m(f_r, \eta') &= \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{N_c} B'_{ki} \text{rect} \left(\frac{f_r - \Delta f_k}{K_r T_r} \right) \\ &\quad \cdot \exp \left[-j4\pi \frac{r_i(\eta')}{c} (f_k + f_r - \Delta f_k) \right] \\ &= \sum_{i=1}^{N_c} \exp \left[-j4\pi \frac{r_i(\eta')}{c} (f_0 + f_r) \right] \\ &\quad \cdot \sum_{k=1}^N B'_{ki} \text{rect} \left(\frac{f_r - \Delta f_k}{K_r T_r} \right) \\ &= \sum_{i=1}^{N_c} W'_i \text{rect} \left(\frac{f_r}{B_r + (N-1)\Delta f} \right) \\ &\quad \cdot \exp \left[-j4\pi \frac{r_i(\eta')}{c} (f_0 + f_r) \right] \quad (8) \end{aligned}$$

式中 W'_i 为第 i 个散射点距离向子带合成后的幅度谱,与天线方向图、后向散射系数以及子带重叠度均有关。若存在子带交叠,则 W'_i 会在交叠处出现不平坦,但相位谱仍然是连续的。

(3)距离向 IFFT 变换 距离向匹配滤波并进行频域子带合成后,将 $m(f_r, \eta')$ 变换到距离时域方位时域得到

$$\begin{aligned} m(\tau, \eta') &= \sum_{i=1}^{N_c} W_i \text{sinc}((B_r + (N-1)\Delta f) \\ &\quad \cdot (\tau - 2r_i(\eta')/c)) \exp[-j4\pi f_0 r_i(\eta')/c] \quad (9) \end{aligned}$$

其中 W_i 表示距离压缩后旁瓣的加权效应,是由于式(9)中幅度谱 W'_i 的不规则性造成的, W_i 的影响在于导致距离向压缩旁瓣的抬高,不同散射点对应的 W_i 不同,因此针对场景目标进行校正时难度较大。

$r_i(\eta') = \sqrt{(x_i - v_a \eta')^2 + y_i^2 + H^2}$ 表示瞬时斜距。

3.3 结合 CS 算法的后续成像处理

完成距离向子带合成处理后,可通过距离向滤波反变换到原始数据域,再利用经典 CS 算法对其进行成像处理。图 4 给出了具体的成像算法流程图。

4 仿真分析

假设载机工作在正侧视条带模式,方位向多孔

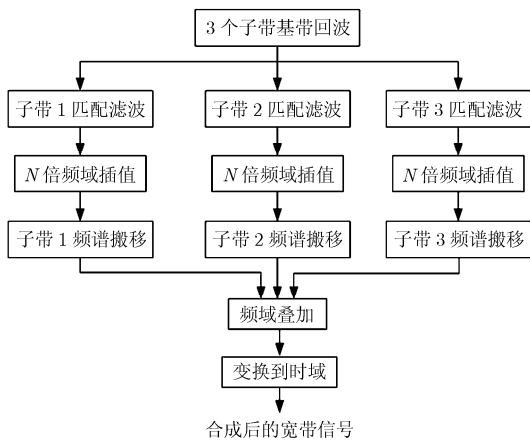


图 2 频域子带合成算法流程图

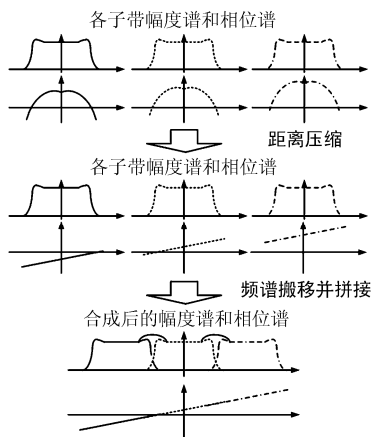


图 3 频域子带合成算法原理图

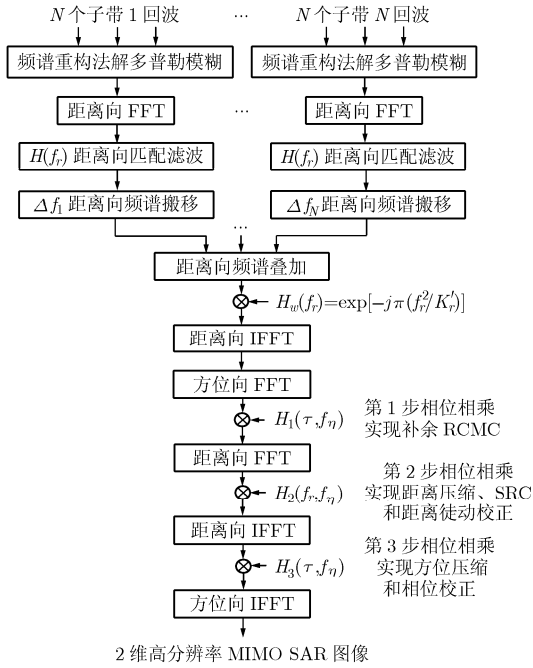
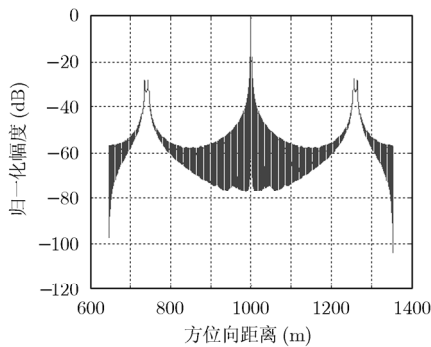


图4 基于频域子带合成的MIMO SAR成像算法流程图

径MIMO SAR系统采用子带并发的的工作方式。表1为仿真参数，平面相控阵天线沿方位向分为3个子孔径，分别发射载频为 f_1, f_2, f_3 ，带宽为350 MHz的LFM信号，并且同时接收3个子带的回波。

表1 机载MIMO SAR仿真参数列表

载机高度 H	5000 m	各个子带信号带宽 B_c	350 MHz
载机速度 v_a	200 m/s	各个子带工作频率 f_c (GHz)	9.265, 9.6, 9.935
系统方位子孔径个数 n	3	子带中心频率间隔	335 MHz
子孔径间距 d	0.3 m	合成后信号带宽	1020 MHz
脉冲重复频率 PRF	450 Hz	方位向分辨率 ρ_a	0.15 m
子带脉宽 T_r	20.4 μ s	距离向分辨率 ρ_r	0.15 m



(a) 解多普勒模糊前子带1图像方位向切片

图5为子带1解模糊前后的方位向压缩结果，由图可见，解模糊后由于频谱混叠造成的虚假目标不再存在。

图6为子带1解多普勒模糊前后的点阵目标成像结果，从图6(a)可以明显看到由于多普勒模糊造成的虚假目标，并且目标方位向聚焦性能较差，而解模糊后则不会出现虚假目标，且每一个目标都得到了较好的聚焦。

图7给出了子带合成后距离向的幅度谱和相位谱以及子带合成前后的距离向脉冲压缩结果，由图7(b)可见距离向分辨率提高了近3倍。表2给出了子带合成前后的距离压缩指标。

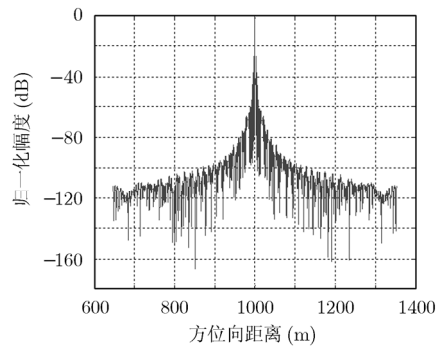
表2 子带合成前后的距离压缩指标

指标	分辨率 (m)	PSLR(dB)	ISLR1(dB)	ISLR2(dB)
单个子带	0.3785	-13.26	-9.6175	-9.8795
子带合成	0.1307	-12.93	-8.8011	-9.6049

注：定义ISLR1为全脉宽积分旁瓣比，ISLR2为20倍主瓣宽度的积分旁瓣比，后续定义相同。

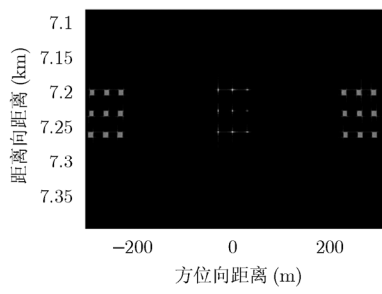
3.2节指出，子带重叠度的变化直接影响了合成后频谱结构的变化，从而影响成像性能。通过仿真得到距离向分辨率和积分旁瓣比随子带重叠度变化的性能曲线，分别见图8(a)和图8(b)。

图9给出了 3×3 的点阵目标在距离向子带合成前后的成像结果，目标距离向间距设为0.3 m。由于单个子带的距离向分辨率为0.38 m，因此图9(a)中沿距离向的3个目标不能清晰分开；而子带合成后距离向分辨率提高到0.13 m，此时沿距离向的3个目标清晰可分，如图9(b)所示。表3给出了点目标距离向和方位向的成像指标。

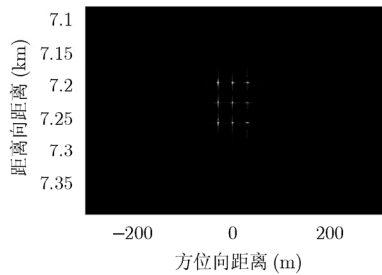


(b) 解多普勒模糊后子带1图像方位向切片

图5 解模糊前后的方位向多普勒谱和压缩结果

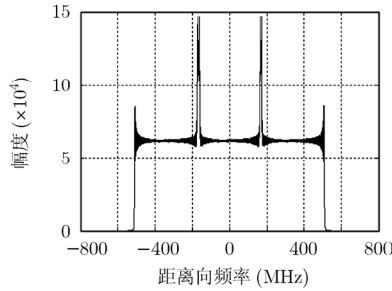


(a) 解多普勒模糊前子带 1 点阵图像

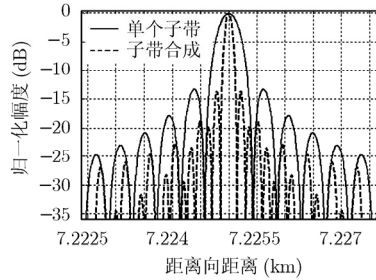


(b) 解多普勒模糊后子带 1 点阵图像

图 6 子带 1 点阵目标解模糊前后的成像结果

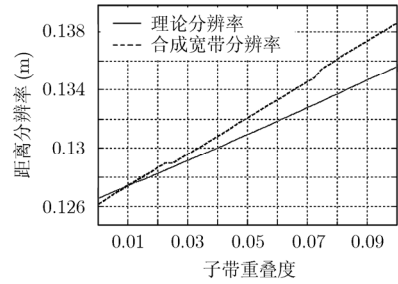


(a) 距离向子带合成后的幅度谱

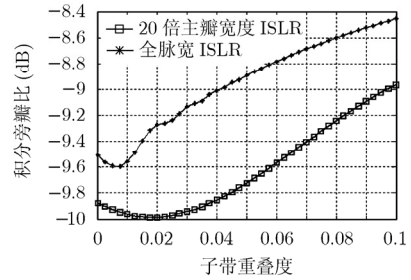


(b) 子带合成前后距离向脉冲压缩结果

图 7 子带合成后的频谱以及子带合成前后距离向的脉冲压缩结果

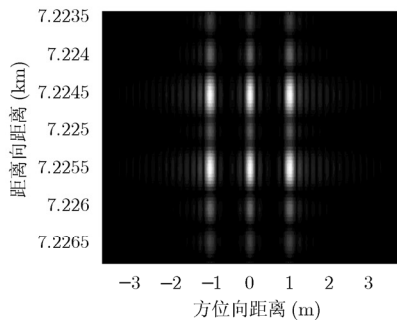


(a) 分辨率随子带重叠度的变化曲线

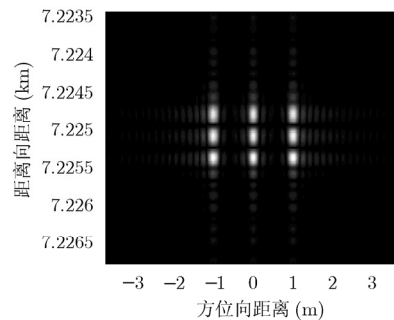


(b) 积分旁瓣比随子带重叠度的变化曲线

图 8 距离向分辨率和积分旁瓣比随子带重叠度变化的性能曲线



(a) 距离向子带合成前点阵目标图像



(b) 距离向子带合成后点阵目标图像

图 9 点阵目标在子带合成前后的成像结果

表 3 点目标子带合成成像指标

指标	分辨率 (m)	PSLR(dB)	ISLR1(dB)	ISLR2(dB)
距离向	0.1330	-11.96	-9.1602	-9.5506
方位向	0.1572	-13.54	-10.5733	-10.9002

5 结束语

多载频 LFM 波形方位多孔径 MIMO SAR 系统一方面通过方位多波束提高空间采样率, 从而降低对 PRF 的要求, 增加测绘带宽; 另一方面通过距离向的子带合成技术提高距离向分辨率, 真正意义上实现了高分辨率宽测绘带的目标。本文详细推导了多载频 LFM 波形方位多孔径 MIMO SAR 系统子带并发模式下的回波表达式, 并提出一种将方位向解多普勒模糊、距离向频域子带合成以及 CS 算法相

结合的 MIMO SAR 高分辨率成像算法, 最后通过仿真验证了该方法的有效性。

参考文献

- [1] Freeman A, Johnson W T K, and Huneycutt B. The "Myth" of the minimum SAR antenna area constraint[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2000, 38(1): 320-324.
- [2] Savelyev T G, Zhuge X, Yarovoy A G, Lighthart L P, and Levitas B. Comparison of UWB SAR and MIMO-based short-range imaging radars[C]. *Radar Conference, EuRAD 2009, Rome, 2009*: 109-112.
- [3] Ender J H G and Klare J. System architectures and algorithms for radar imaging by MIMO-SAR[C]. *Radar Conference, 2009 IEEE. Pasadena, 2009*:1-6.
- [4] 武其松, 井伟, 邢孟道, 保铮. MIMO-SAR 大测绘带成像[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(4): 772-775.

- Wu Qi-song, Jing Wei, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. Wide swath imaging with MIMO-SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 772-775.
- [5] 黄平平, 邓云凯, 祁海明. 多发多收星载 SAR 回波处理方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1056-1060.
Huang Ping-ping, Deng Yun-kai, and Qi Hai-ming. The echo processing method for multiple-transit and multiple-receive space-borne SAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1056-1060.
- [6] Gebert N and 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.
- [7] Gebert N, Krieger G, and Moreira A. Digital beamforming on receive: techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 564-592.
- [8] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 260-264.
- [9] 齐维孔, 禹卫东, 黄平平. 基于 DBF 技术的星载 SAR 宽测绘带实现方法[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(3): 289-294.
Qi Wei-kong, Yu Wei-dong, and Huang Ping-ping. Digital Beamforming(DBF) technique to realize spaceborne synthetic aperture wide swath[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2010, 25(3): 289-294.
- [10] 井伟, 武其松, 邢孟道, 保铮. 多子带并发的 MIMO-SAR 高分辨大测绘带成像 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16): 4373-4378.
Jing Wei, Wu Qi-song, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. Image formation of wide-swath high resolution MIMO-SAR[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(16): 4373-4378.
- [11] Brenner A R and Ender J H G. First experimental results achieved with the new very wideband SAR system PAMIR[C]. Processing of EUSAR 2002, Germany VDE, 2002: 81-86.
- [12] Shibata O, Inagaki K, Yu Ji, and Karasawa Y. A multibeam receiving array antenna by means of spatial optical signal processing[C]. Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, Montreal, Que, 1997: 743-746.
- [13] Wu Qi-song, Xing Meng-dao, Bao Zheng, and Shi Hong-zhu. Wide swath, high range resolution imaging with MIMO-SAR [C]. 2009 IET International Radar Conference, Guillin, China, 2009: 1-6.
- [14] Willie Nel Jan, Tait Richard Lord, and Andrew Wilkinson. The use of a frequency domain stepped frequency technique to obtain high range resolution on the CSIR X-band SAR system[C]. African Conference in Africa, Africa, 2002: 327-332.
- 邓云凯: 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载 SAR 系统总体设计.
- 陈倩: 女, 1986年生, 博士生, 研究方向为多发多收合成孔径雷达系统与信号处理.
- 祁海明: 男, 1980年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为合成孔径雷达原始数据压缩.
- 郑慧芳: 女, 1984年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达抗干扰技术.
- 刘亚东: 男, 1983年生, 博士, 研究方向为星载 SAR 系统设计.