

基于频域合成方法的多发多收 SAR 技术研究

黄平平*^① 邓云凯^② 徐 伟^{②③} 齐维孔^{②③}

^①(内蒙古工业大学信息工程学院 呼和浩特 010051)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 多孔径子带合成技术是目前技术条件下多发多收 SAR 系统可工程实现的技术方案。该文深入研究了基于频域合成的子带合成技术,建立了相应的数学模型。并结合数学推导详细给出了该方法的原理和实现步骤,提出了适用于多发多收 SAR 系统的滤波器构建方法和算法流程,最终通过计算机仿真验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 多发多收; 频域合成; 高分辨率; 宽测绘带

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)02-0401-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01409

The Research of Multiple-input and Multiple-output SAR Based on Frequency Synthetic

Huang Ping-ping^① Deng Yun-kai^② Xu Wei^{②③} Qi Wei-kong^{②③}

^①(College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

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

^③(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Multiple aperture sub-band synthetic technique can be realized for Multiple-input and Multiple-output SAR at the state-of-the-art level. The frequency sub-band synthetic technique is researched; The mathematical model is proposed. Combining mathematical deduction, the principle and implementation steps are presented in detail, the method for getting the filter and the image algorithm are proposed. The computer simulations show the effectiveness and feasibility of the method.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO); Frequency synthetic; High resolution; Wide swath

1 引言

在常规的星载 SAR 设计中,方位分辨率和测绘带宽是一对矛盾。为解决这个问题,近年来出现了一种新的合成孔径雷达体制——多波束合成孔径雷达^[1,2],并逐渐开始了对多发多收合成孔径雷达^[3,4]的研究。

目前研究较多的多发多收 SAR 系统方案,主要是采用发射同载频的编码信号^[5],但是所有几乎研究方案都是假设信号间的互相关噪声为零,但在实际中这是不可能的,在没有找到合适发射波形的前提下,多孔径同载频的多发多收方案是无法实现的。因此有的学者对多孔径分载频的情况进行了研究^[6,7],并从各个方面验证了方案的可行性。

时域合成(波形合成)方式在文献[7-10]中均有论述,但该方式要对回波信号进行频移、相位校正、时移等 3 步操作,计算量较大,同时该方法要对各子带信号进行过采样^[11],效率较低,而频域合成(频谱合成)仅需将子脉冲频谱拼接起来,即将信号在距离频域内进行平移叠加,在性能上与时域合成相当,综合比较,频域合成比时域合成更有效。文献[12]简述了单发单收 SAR 系统应用步进频信号得到距离高分辨率的频域合成方法,但该方法仍需时移和频移操作。本文研究了针对多发多收 SAR 系统的频域合成方式,对其合成过程进行了完整的推导,并给出了应用该技术的成像算法流程以及成像结果。

2 频域子带合成技术基本原理

2.1 基本原理

子带合成技术获得宽测绘带和方位高分辨率的原理与单发多收 SAR 技术相同,但为了能够同时获

得距离向高分辨率, 要求各子孔径同时发射带宽相同频谱相连的子带脉冲信号, 回波处理时先用带通滤波器组对各个子孔径接收的混合回波信号进行分离, 并将其排列到对应的等效相位中心处, 实际系统中由于很难满足采样点均匀的条件: $v_s \cdot \text{PRT} = N \cdot L_a / 2$, 其中 L_a 为子天线方位向长度。因此一般要对得到的实际数据先要进行距离向傅里叶变换, 然后进行方位解模糊处理^[13], 再将多个子脉冲频谱相互拼接合成一个宽带信号。若采用与常规 SAR 相同的 PRT, 子带合成多发多收 SAR 一个 PRT 内的空间采样点数为常规 SAR 的 N 倍, 同时距离向信号带宽也为子脉冲带宽的 N 倍。

考虑到实际系统中接收机的滤波器特性, 子脉冲频带间要设置一定的重叠度, 重叠量一般为 5%~10%, 德国 PAMIR 系统子带间重叠度为 6.5%^[9]。频域子带合成过程如图 1 所示。

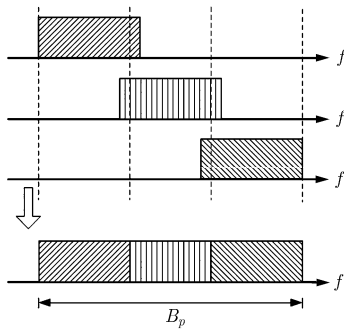


图 1 子频带合成宽带示意图

2.2 合成信号选择方式分类

按照合成一个宽带信号所选子脉冲信号是否来自同一个 PRT 或是同一相位中心, 可将合成信号选择方式分为: 同步子脉冲合成和同相位中心合成。采用时域合成时, 不同的信号选择方式会影响到频移、相位校正和时移参考函数的表达式。而频域合成方式没有以上 3 个步骤, 不存在上述问题, 只是同步子脉冲合成方式需要对不同相位中心的回波信号进行相位补偿, 因此在本文后续说明和仿真中选用的均是同相位中心合成方式。

3 频域子带合成技术数学模型及分析

3.1 几何模型

以地面为 XY 平面建立坐标系, Y 为沿航迹方向, X 为垂直航迹方向, Z 与 X, Y 满足右手坐标系, 系统的 N 个子孔径沿方位向排列, 其空间位置分别为 $(X_1, Y_1, Z_1), (X_1, Y_2, Z_1), \dots, (X_1, Y_N, Z_1)$, 以下分析以 3 个子孔径为例。假设地面有 M 个散射点, 其

位置分别为 $(x_1, y_1, z_2), \dots, (x_m, y_m, z_2), \dots, (x_M, y_M, z_2)$ 。如图 2 所示。

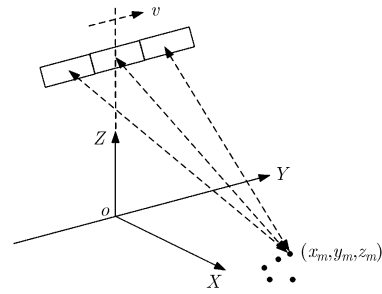


图 2 多发多收几何构形

假设系统有 N 个子孔径, 每个子孔径发射的信号带宽为 $B_e = kT_e$, 其中 k 为调频斜率, T_e 为子脉冲脉宽, 子带间重叠信号带宽为 ΔB , 则系统信号重叠度可以表示为 $\alpha = \Delta B / B_e$, 假设第 1 子孔径发射信号载频为 $f_c(1)$, 则子孔径载频可依次表示为

$$f_c(n) = f_c(1) + (n-1)(1-\alpha)B_e, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中 n 为子孔径序号。由此可推得最终合成后得到的宽带信号中心载频为

$$f_c = f_c(n) - (n-1/2 - N/2)(1-\alpha)B_e, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

假设 t 为全时间, $\tau = t - mT$ 为快时间, m 为整数, T 脉冲重复周期, $\eta = mT$ 为慢时间, 则第 n 个子孔径发射信号可以表示为

$$s_n(\tau, \eta) = \text{rect}(\tau/T_e) \exp(j2\pi f_c(n)t + j\pi k\tau^2) \quad (3)$$

第 n 个子孔径发射信号, 其余孔径接收时, 为双站模式, 当基线较短时, 可等效为各子孔径自发自收, 等效相位中心移至发、收两子孔径中心处。得到 N 个等效相位中心坐标为

$$(X_1, (Y_1 + Y_n)/2, Z_1), (X_1, (Y_2 + Y_n)/2, Z_1), \dots, (X_1, Y_n, Z_1), \dots, (X_1, (Y_N + Y_n)/2, Z_1)$$

为简洁, 将第 n 子孔径发射所得第 w 个等效相位中心表示为 (X_1, Y'_{wn}, Z_1) , $w = 1, \dots, N$ 。

假设 N 个子孔径同时发射各自的调频信号, 可以得到 $N \times N$ 个等效相位中心(部分等效相位中心位置重合), 如图 3 所示(图中画出连续两个 PRT 所得等效相位中心及同相位中心处信号合并所得信号位置)。利用每个子孔径对应的 N 个子带信号进行解模糊后可以得到 N 个不模糊的子带信号, 再对处于同一等效相位中心处的 N 个子带信号进行合成就可得到大带宽不模糊回波信号。

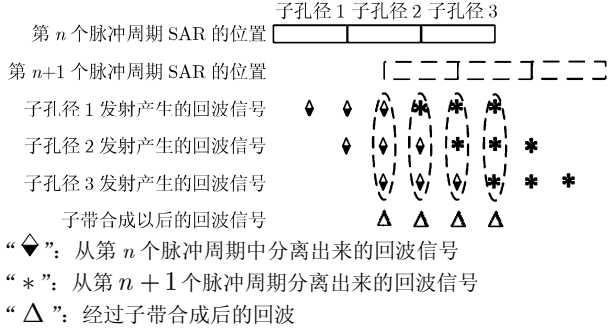


图 3 各子孔径对应的等效相位中心图

3.2 回波信号及其合成

第 n 个子孔径对应的第 q 个等效相位中心接收到的回波数据为

$$s_{wn}(\tau, \eta) = \sum_{m=1}^M \sigma_m \text{rect} \left(\left(\tau - \frac{2R_{m,wn}}{c} \right) / T_e \right) \cdot \exp \left(j\pi k \left(\tau - \frac{2R_{m,wn}}{c} \right)^2 \right) \cdot \text{rect} \left(\frac{y - y_m}{L_a} \right) \exp \left(j2\pi f_c(n) \left(t - \frac{2R_{m,wn}}{c} \right) \right) \quad (4)$$

其中 σ_m 为常数表示第 m 个点目标回波的幅度值, $R_{m,wn}$ 为第 m 个散射点到第 n 个子孔径对应的第 w 个等效相位中心的距离, 表示为

$$R_{m,wn}(\eta, R_m) = \sqrt{(x_m - X_1)^2 + (y_m - Y'_{wn} - v\eta)^2 + (z_m - Z_1)^2} = \sqrt{R_m^2 + (y_m - Y'_{wn} - v\eta)^2}$$

其中第 m 个散射点到航向的垂直距离表示为 $R_m = \sqrt{(x_m - X_1)^2 + (z_m - Z_1)^2}$ 。

对上述回波信号的基带信号进行变换到距离频域, 然后进行多普勒解模糊操作可得

$$s'_{wn}(f_r, \eta) = \sum_{m=1}^M \sigma_m \text{rect} \left(\frac{f_r}{T_e k} \right) \text{rect} \left(\frac{y - y_m}{L_a} \right) \exp \left(-j\pi \frac{f_r^2}{k} \right) \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} R'_m(\eta, R_m)(f_r + f_c(n)) \right) \quad (5)$$

其中

$$R'_m(\eta, R_m) = \sqrt{(x_m - X_1)^2 + (y_m - v\eta)^2 + (z_m - Z_1)^2} = \sqrt{(y_m - v\eta)^2 + R_m^2}$$

此时 $s'_{wn}(f_r, \eta)$ 表示第 n 个子孔径发射的信号在第 q 个等效相位中心处得到的解多普勒模糊后的回波信号, 并将其表示为距离频域的形式, 对某一等效相位中心处的回波信号进行频域合成时, 采用的是对该等效相位中心处的距离频域方位时域信号的求和运算, 表示为

$$S'_n(f_r, \eta) = \sum_{n=1}^N s'_{wn}(f_r, \eta) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sigma_m \text{rect} \left(\frac{f_r - f_c(n)}{T_e k} \right) \cdot \text{rect} \left(\frac{y - y_m}{L_a} \right) \exp \left(-j\pi \frac{f_r^2}{k} \right) \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} R'_m(\eta, R_m)(f_r + f_c(n)) \right) = \sum_{m=1}^M \sigma_m \text{rect} \left(\frac{f_r}{NT_e k} \right) \text{rect} \left(\frac{y - y_m}{L_a} \right) \cdot \exp \left(-j\pi \frac{f_r^2}{k} \right) \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} R'_m(\eta, R_m) f_r \right) \quad (6)$$

3.3 滤波器的实现

线性调频信号的精确幅度谱在顶部存在菲涅耳起伏, 并且幅度谱并不严格限制在带宽之内, 同时多发多收 SAR 系统的回波间有一个常数相位误差^[7], 因此在距离频谱叠加产生联合谱时, 两个子频谱拼接的边缘会产生起伏的波纹, 最终在距离像中会产生成对回波。因此需要设计一个距离压缩滤波器, 来消除联合谱中的波纹。

对实际多发多收 SAR 系统, 需要利用一个真实点目标(一般为角反射器, 设其方位时间为 η_0)的回波来得到各子频带的频谱, 按照上述信号回波合成步骤得到联合谱 $S_F(f_r, \eta_0)$, 再根据式(7)就可以得到系统的距离压缩滤波器。使用真实点目标来获得距离压缩滤波器的目的是为了系统发射机和接收机内所有的噪声都被包含在滤波器内。

$$\left. \begin{aligned} \arg(H_F(f_r, \eta_0)) &= \arg(S_F^*(f_r, \eta_0)) \\ |H_F(f_r, \eta_0)| &= \frac{1}{|S_F(f_r, \eta_0)|} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中“ $\arg(\bullet)$ ”表示相位角, “ $*$ ”表示取共轭操作。

滤波器可表示为

$$H_F(f_r, \eta_0) = |H_F(f_r, \eta_0)| \cdot \exp(j \arg(S_F^*(f_r, \eta_0))) \quad (8)$$

(实际系统的滤波器表达式应该添加一个噪声项, 为简洁表示, 在以下的数学推导的过程中忽略该项), 按照 3.2 节的步骤完成频谱合成的距离频域信号可以表示为

$$S_F(f_r, \eta_0) = \sigma_0 \text{rect} \left(\frac{f_r - f_c}{NT_e k} \right) \exp \left(-j\pi \frac{f_r^2}{k} \right) \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} R'_m(\eta_0, R_m) f_r \right) \quad (9)$$

σ_0 为设定点目标回波的幅度值, 根据式(7), 式(8)可得滤波器的精确表达式为

$$H_F(f_r, \eta_0) = \frac{1}{\sigma_0} \text{rect} \left(\frac{f_r - f_c}{NT_e k} \right) \exp \left(j\pi \frac{f_r^2}{k} \right) \cdot \exp \left(j \frac{4\pi}{c} R'_m(\eta_0, R_m) f_r \right) \quad (10)$$

将合成频谱与滤波器相乘, 表示为

$$S_n(f_r, \eta) = S'_n(f_r, \eta) \cdot H_F(f_r, \eta_0) \\ = \sum_{m=1}^M \frac{\sigma_m}{\sigma_0} \left\{ \text{rect} \left(\frac{f_r - f_c}{NT_e k} \right) \text{rect} \left(\frac{y - y_m}{L_a} \right) \right. \\ \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} R'_m(\eta) f_r \right) \\ \left. \cdot \exp \left(j \frac{4\pi}{c} R'_m(\eta_0, R_m) f_r \right) \right\} \quad (11)$$

因为滤波器是提前对一个固定点目标的回波频谱合成得到的, 所以式(11)的操作不会抵消回波信号中的相位信息。对 $S_n(f_r, \eta)$ 进行距离向的傅里叶逆变换得

$$S_n(\tau, \eta) = \sum_{m=1}^M \frac{\sigma_m}{\sigma_0} \left\{ 2\pi NT_e k \cdot \left[\sin \left(\pi NT_e k \left(\tau - \frac{2}{c} (R'_m(\eta) - R'_m(\eta_0)) \right) \right) \cdot \text{rect} \left(\frac{y - y_m}{L_a} \right) / (\pi NT_e k \tau) \right] \right\} \quad (12)$$

式(12)即为距离向压缩结果, 同时保留了方位信息, 在具体成像时应根据所选成像算法适当调整, 有时在对合成谱滤波后并不直接进行距离向的逆傅里叶变换, 需先进行其他操作。

4 频域子带合成技术的实现步骤

由实际点目标的回波数据求得距离压缩滤波器是频域子带合成技术关键性的一步, 由频域合成技术得到高分辨率的 SAR 图像的步骤可以简述如下:

(1)对经带通滤波器组分离后的子带回波信号分别做距离向的傅里叶变换, 然后将同一等效相位中心上的多个回波信号按照系统预设的重叠度进行合成处理;

(2)将合成处理得到的联合谱与求得的距离压缩滤波器相乘, 得到经滤波器后的联合谱;

(3)对步骤(2)得到的联合谱进行距离向逆傅里叶变换, 即可得到高分辨率的距离像, 或是将滤波后的联合谱与频域滤波器相乘, 经距离向逆傅里叶变换到原始回波域;

(4)应用相应的成像算法进行后续处理, 最终得到高分辨率的 SAR 图像。

5 频域子带合成技术的成像算法

频域合成方法是先将回波信号变换到距离频域进行操作, 因此它应用于 SAR 成像时需要考虑算法的选择和调整问题。由于频谱合成完然后进行距离逆傅里叶变换就完成了距离向压缩, 因此本文选择 RD 算法来进行成像处理, 后续直接进行方位向的压缩即可。

若采用 CS 算法进行处理时, 应首先对滤波后

的合成谱乘以频域滤波器 $H(f) = \exp(-j\pi f_r^2/k)$, 然后进行距离向的逆傅里叶变换, 使数据回到原始回波域, 然后按照经典 CS 算法的一般流程进行成像操作。具体操作流程如图 4 所示。

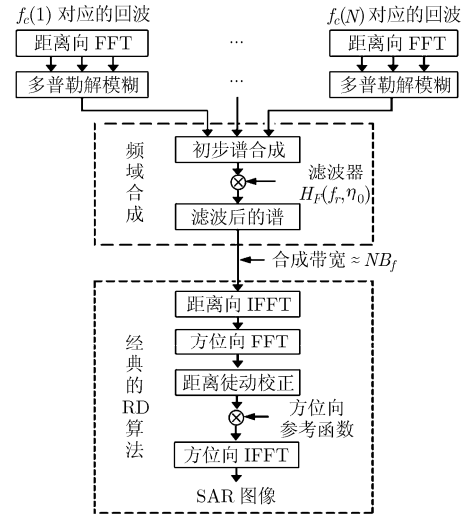


图 4 子带合成后与经典 RD 算法结合的成像算法

6 仿真结果

利用表 1 仿真参数按照第 3 节的步骤对某 3 发 3 收 SAR 系统的一个点目标回波(并以该回波为基础生成滤波器)进行距离向傅里叶变换, 得到的 3 个子频谱如图 5 所示。

经过合成后的频域如图 6 所示。

可见由于菲涅耳起伏和相位误差的存在, 子带拼接的边沿有明显的波纹, 且幅度较高, 如不对其进行滤波处理将在距离压缩结果中出现幅度较高的成对回波, 并最终导致虚假目标出现。在初步合成谱的基础上, 根据式(7)可以求的滤波器的谱如图 7 所示, 为模拟真实 SAR 系统, 仿真中按照 SNR = 30 dB 添加了噪声, 模拟滤波器中包含的接收机干

表 1 仿真参数

卫星高度 H (km)	675.19	各个子带工作频率 f_c (GHz)	9.175, 9.65, 10.125
地球半径 R_e (km)	6371	子带重叠度(%)	5
卫星等效速度 v_s (km/s)	7.5175	合成后工作频率 f_c (GHz)	9.65
系统方位子孔径个数	3	合成后信号带宽 (MHz)	1450
脉冲重复频率 (Hz)	833	方位向分辨率 (m)	0.3
各个子带信号带宽 (MHz)	500	距离向分辨率 (m)	0.1

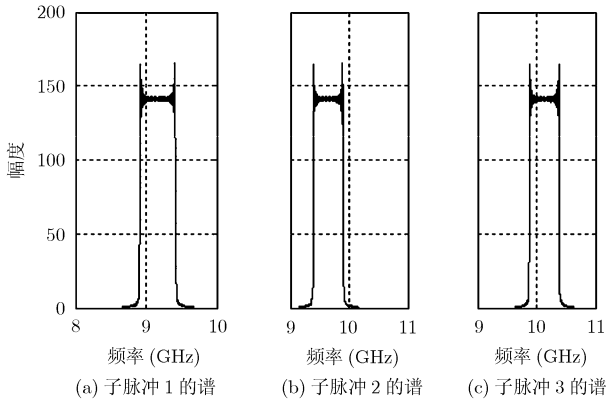


图 5 子脉冲的频谱

扰等系统噪声。

由上述可知, 该滤波器是由一个实际点目标得到的, 在实际应用中无论是对点目标、点阵目标还是分布目标的回波进行成像处理, 都使用该滤波器, 后续仿真结果将证明这一点。将得到的滤波器与子带初步合成的频谱按照第 4 节中的步骤(2)进行操

作, 得到如图 8 所示的谱。

经滤波的合成谱已经消除了波纹, 将其进行距离逆傅里叶变换得图 9 所示压缩结果, 表明经滤波处理得到的距离向压缩结果消除了成对回波。对图 6 所示的初步合成频谱直接进行距离逆傅里叶变换得到压缩结果如图 10 所示。

可见未经滤波处理的合成谱在距离压缩后有幅度很高的成对回波出现。对比图 9、图 10 可以看出滤波器 $H(f_r)$ 具有校正合成谱中相位误差的功能, 未用滤波器的合成频谱压缩结果中有相位误差引起的成对回波, 而合成谱经滤波处理后成对回波消失。图 11 为经过 16 倍插值处理的子带合成前、后距离向压缩结果比较, 可以看到子带合成后距离向分辨率变为原来的 3 倍, 从而证明子带合成技术在提高距离分辨率方面的可行性。

经 RD 算法处理得到的点目标和点阵目标图像如图 12、图 13 所示。

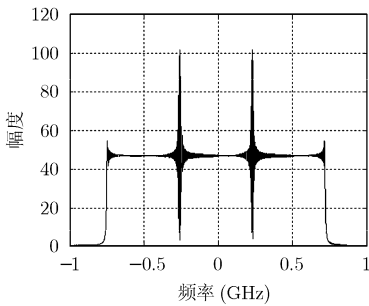


图 6 子带初步合成后的频谱

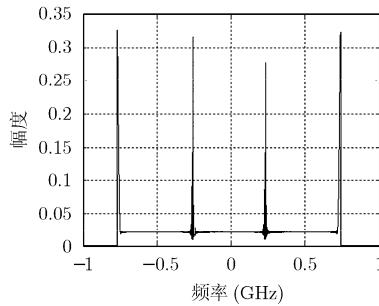


图 7 系统滤波器的频谱

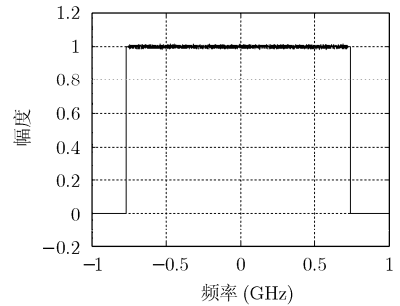


图 8 经过滤波操作后的合成频谱

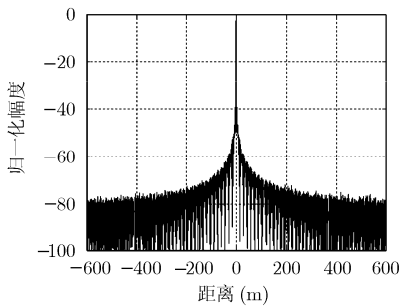


图 9 经滤波处理后的距离向压缩结果

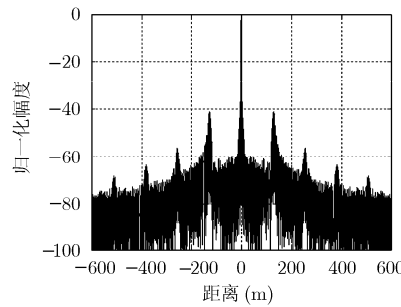


图 10 未经匹配滤波的距离向压缩结果

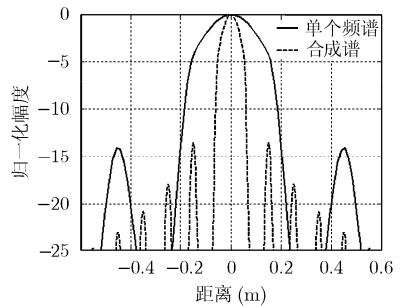


图 11 子带合成前、后距离向压缩结果局部放大比较

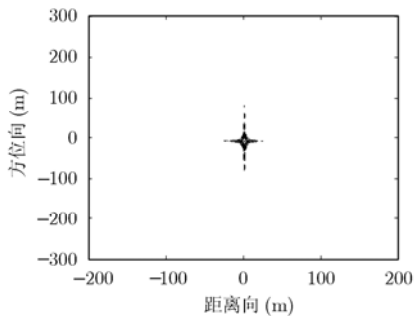


图 12 频域合成方法得到的点目标图像

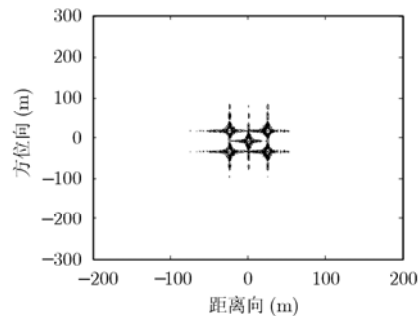


图 13 频域合成方法得到的点阵目标图像

7 结束语

对于星载 SAR 系统,受发射机带宽和回波采样器件的限制,单发多收 SAR 系统难以做到很大的发射信号带宽。而非子带合成的多发多收 SAR 系统又没有合适的发射波形,在这种情况下使用子带合成技术的多发多收 SAR 系统是实现两维高分辨率和宽测绘带的最佳选择,因此我们现在对多发多收 SAR 系统的研究是具有一定的工程意义的。

参 考 文 献

- [1] Gebert N, Krieger G, and Moreira A. Multi-channel scanSAR for high-resolution ultra-wide-swath imaging[C]. EUSAR 2008, Friedrichshafen, Germany, 2008: 79-83.
- [2] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Advanced synthetic aperture radar based on digital beamforming and waveform diversity[C]. IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 767-772.
- [3] Ossowska A, Kim Jung-hyo, and Wiesbeck W. Modeling of nonidealities in receiver front-end for simulation of multistatic SAR System[C]. Proceeding of the 4th European Radar Conference, Munich, Germany, 2007: 13-17.
- [4] 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.
- [5] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Multidimensional waveform encoding: a new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 31-46.
- [6] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Digital beamforming on receive: techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 564-592.
- [7] 宋岳鹏, 杨汝良. 应用多收发孔径实现高分辨率宽测绘带的合成孔径雷达研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2110-2113. Song Yue-peng and Yang Ru-liang. Study on high resolution, wide swath synthetic aperture radar using multiple transmit-receive apertures[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(9): 2110-2113.
- [8] Jan W, Lord T R, and Wilkinson A. The use of a frequency domain stepped frequency technique to obtain high range resolution on the CSIR X-band SAR system. Africon Conference in Africa. Africa, 2002: 327-332.
- [9] Brenner A R and Ender J H G. First experimental results achieved with the new very wideband SAR system PAMIR[A]. Processing of EUSAR 2002[C]. Germany VDE, 2002: 81-86.
- [10] 白霞, 毛士艺, 袁运能. 时域合成宽带方法: 一种0.1米分辨率 SAR技术[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 472-477. Bai Xia, Mao Shi-yi, and Yuan Yun-neng. Time domain synthetic bandwidth methods: a 0.1 m resolution SAR technique[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(3): 472-477.
- [11] 丁海林, 李亚超, 高昭昭, 邢孟道. 线性调频步进信号的三种合成方法的对比与分析[J]. 火控雷达技术, 2007, 36: 10-16. Ding Hai-lin, Li Ya-chao, Gao Zhao-zhao, and Xing Meng-dao. Comparison and analysis to three synthesis methods of linear FM stepped — frequency signal[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2007, 36: 10-16.
- [12] Wilkinson A J, Lord R T, and Inggs M R. Stepped-frequency processing by reconstruction of target reflectivity spectrum. Proceeding of the 1998 IEEE South African Symposium on Communications and Signal Processing. Africa, 1998: 101-104.
- [13] 井伟, 邢孟道, 保铮. 双星同中心频率多发多收的方位解模糊[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1077-1082. Jing Wei, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. Removal of azimuth ambiguities with bi-satellite by multiple transmitting and multiple receiving[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(5): 1077-1082.

黄平平: 男, 1978年生, 博士, 研究方向为高分辨率宽测绘带 SAR 系统设计和信号处理。

邓云凯: 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达系统设计。

徐 伟: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为星载 SAR 系统设计和信号处理。