

一种多通道 SAR 高分辨率宽测绘带成像算法

郭振永^① 袁新哲^{①②} 张平^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(国家卫星海洋应用中心 北京 100081)

摘要: 合成孔径雷达采用多个天线可以实现高分辨率、宽测绘(HRWS)带成像, 增强信噪比, 改善动目标检测时的模糊抑制性能。以 HRWS 成像为目的, 该文提出了一种将接、收阵元的双通道数据映射成单通道数据的算法。该算法在二维频域可以根据平台速度变化, 进行相位校正。并且在方位向只需一次傅里叶变换, 因而具有较高的运算效率。性能分析和仿真结果表明了算法的有效性。

关键词: 多通道合成孔径雷达; 高分辨率; 宽测绘带

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0310-04

An Algorithm of Multichannel SAR High-Resolution and Wide-Swath Imaging

Guo Zhen-yong^① Yuan Xin-zhe^{①②} Zhang Ping^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

^②(National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

Abstract: Synthetic Aperture Radar (SAR) with multiple antennas can realize High-Resolution Wide-Swath (HRWS) imaging, improve Signal to Noise Ratio (SNR) and improve ambiguity suppression for Moving Target Indication (MTI). This paper proposes an algorithm can realize HRWS imaging based on conversion bi-static data into mono-static data. The algorithm can correct phase according to velocity fluctuation of platform change. Furthermore the algorithm has high efficiency, for azimuth data need only one time FFT operation. Performance analysis and computer simulation are presented to illustrate the validity of the algorithm.

Key words: Multichannel SAR; High Resolution; Wide Swath(HRWS)

1 引言

传统合成孔径雷达(SAR)提高方位分辨率和增加测绘带宽度之间存在固有矛盾。这种矛盾表现为 SAR 天线有最小面积的限制^[1]。采用多个小天线组成的 SAR 系统, 即多通道 SAR, 可以突破传统 SAR 最小天线的限制。

Griffiths 和 Mancini^[2]首先提出了利用位于不同高度上的多个接收孔径, 采用自适应阵列处理技术, 抑制距离向模糊, 从而提高测绘带宽度的方法。基于同样的技术, Callaghan 和 Longstaff^[3]提出了采用四元天线阵实现。Currie 和 Brown^[4]提出了分离相位中心多波束技术, 采用方位向上多个接收阵元, 在不降低方位向样本数量的基础上, 通过降低系统的脉冲重复频率(PRF), 从而实现 HRWS 成像。同时用方位向上的多个接受孔径, 保证方位向的采样率满足奈奎斯特采样定律, 从而实现高分辨、宽测绘带成像。文献[5-7]对多通道 SAR 系统算法进行进一步了研究。

本文对于方位向分布的多个接收阵元, 提出了一种双站数据映射成单站数据的方法。从而提高了处理的效率。

2 多通道 SAR 工作原理

以 3 个阵元组成的多通道 SAR 系统为例, 其成像几何关系如图 1 所示。

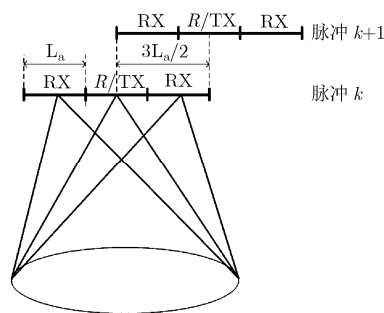


图 1 多通道 SAR 成像原理

阵列中间的阵元发射/接收信号, 其余阵元只接收信号。每个阵元接受的信号可以表示为

$$s_i(t, t_m) = \iint \sigma_n P \left[t - \frac{R_{TX} + R_{RXi}}{c} \right] dt dt_m \quad (1)$$

式中 i 表示通道数, t 为快时间, t_m 为慢时间, c 是光速, σ_n

是散射点的复反射率, $p(t)$ 表示发射信号的复包络, R_{TX} 是发射阵元到散射点的距离, R_{RX_i} 为散射点至第 i 个接收阵元的距离, R_n 为平台至散射点的最短距离距离。

$$R_{TX} = \sqrt{R_n^2 + (y_n - v_{st}t_m)^2} \quad (2)$$

$$R_{RX_i} = \sqrt{R_n^2 + (y_n - v_{st}t_m - d_i)^2} \quad (3)$$

$$d_i = \frac{i-1}{2} \times l_r, \quad i \in (1, 3) \quad (4)$$

式中 x_n , y_n 为散射点在成像区域的坐标, v_{st} 为平台的运动速度, d_i 为阵元相位中心之间的空间距离, l_r 为阵元方位向长度。

多通道 SAR 发射阵元的发射脉冲重复时间(PRT)即发射天线的慢时间采样间隔 Δt_m 为

$$\Delta t_m = \left[l_r / (2v_{st}) \right] i \quad (5)$$

由于接收阵元保持方位向无模糊采样的慢时间采样间隔为 $\Delta t'_m$:

$$\Delta t'_m = l_r / (2v_{st}) \quad (6)$$

因此对于每个阵元, 接收的方位向信号存在 i 次的模糊。本文采用的方法是先将每个接收阵元的双站数据映射成每个阵元的等效单站数据。然后对 i 个阵元的等效单站数据在方位向进行重排, 组合成等效单个阵元数据。由于组合成的单个阵元数据慢时间采样数, 为实际接收阵元慢时间采样数的 i 倍, 方位向采样率满足采样定理, 因而可以消除方位向信号的模糊。由此在条带成像模式下, 多通道 SAR 理论上可以在保持单个阵元方位分辨率的情况下, 增加测绘带斜距范围 i 倍。

3 多通道 SAR 成像算法

3.1 双站数据映射成单站数据

双站数据映射成单站数据的几何关系如图 2 所示:

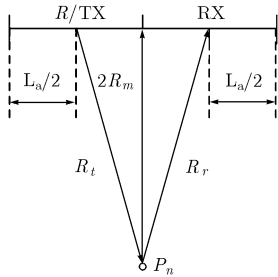


图 2 双站数据→单站数据映射

图 2 中, R_m 为接收阵元等效为单站工作模式时, 阵元与散射点 P_n 之间的距离。

$$R_{mi} = \sqrt{R_n^2 + (y_n - v_{st}t_m - \alpha d_i)^2} \quad (7)$$

式(5)中 $\alpha \in (0, 0.5]$, $v_{st}t_m + \alpha d_i$ 为等效单站工作模式时阵元方位向的收/发位置。与文献[8]类似, 式中采用 α 为相位校正因子。采用相位校正因子 α 的好处为, 可以根据平台速度的变化, 调整样本等效自发收阵元的位置, 从而实现慢时

间均匀采样。

阵元方位向等效单站工作模式时, 等效收/发位置与实际双站工作时的双程距离之差为

$$\Delta R = R_{TX_i} + R_{RX_i} - 2R_{mi} \quad (8)$$

对式(7) $d_i = 0$ 点展开成泰勒级数, 并忽略三次以上高次项, 得

$$\begin{aligned} \Delta R \approx & -\frac{(y_n - v_{st}t_m)(1-2\alpha)}{\left[R_n^2 + (y_n - v_{st}t_m)^2 \right]^{1/2}} d_i \\ & + \frac{R_n^2(1-2\alpha^2)}{\left[R_n^2 + (y_n - v_{st}t_m)^2 \right]^{3/2}} d_i^2 \end{aligned} \quad (9)$$

则双站工作模式阵元表达式可以近似为

$$\begin{aligned} s_i(f, t_m) = & \iint \sigma_n \exp\left(-j\frac{2\pi f}{c} 2R_{mi}\right) \\ & \cdot \exp\left(j\frac{2\pi f}{c} \frac{(y_n - v_{st}t_m)(1-2\alpha)}{\left[R_n^2 + (y_n - v_{st}t_m)^2 \right]^{1/2}} d_i\right) \\ & \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi f}{c} \frac{R_n^2(1-2\alpha^2)}{\left[R_n^2 + (y_n - v_{st}t_m)^2 \right]^{3/2}} d_i^2\right) df dt_m \end{aligned} \quad (10)$$

为简化表达式, 用 $w(t_m)$ 表示式(10)中第 2、3 项指数项。并将数据转换到慢时间多普勒域:

$$\begin{aligned} s_i(f, f_d) = & \iint \sigma_n \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f}{c} R_{mi} - j2\pi f_d t_m\right) \\ & \cdot w(t_m) df dt_m \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中, 第 1 项指数项为 t_m 的快变函数, $w(t_m)$ 为 t_m 的缓变函数。运用相位驻留原理求解式(9)积分, 首先求快变函数导数:

$$\frac{d}{dt_m} \left(-j\frac{4\pi f}{c} R_{mi} - j2\pi f_d t_m \right) = 0 \quad (12)$$

得到相位驻留点为

$$t_m^* = \left(\frac{y_n - \alpha d_i}{v_{st}} \right) \pm \frac{R_n}{v_{st}} \left(f_d / \sqrt{f_m^2 - f_d^2} \right) \quad (13)$$

将相位驻留点 t_m^* 代入式(11):

$$\begin{aligned} S_i(f, f_d) = & \sum_n \frac{\sigma_n 2\pi f \exp(-j\pi/4)}{c} \sqrt{\frac{2\pi y_n}{(f_m^2 - f_d^2)^{3/2}}} w(t_m^*) \\ & \cdot \exp\left(-j2\pi \sqrt{f_m^2 - f_d^2} \frac{R_n}{v_{st}} - j2\pi f_d \frac{y_n - \alpha d_i}{v_{st}}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)中慢变函数项 $w(t_m^*)$ 为

$$\begin{aligned} w(t_m^*) = & \exp\left\{ j\frac{2\pi f}{c} \frac{(1-2\alpha)d_i}{(1 + (R_n/\varepsilon)^2)^{1/2}} \right\} \\ & \cdot \exp\left\{ -j\frac{2\pi f}{c} \frac{x^2(1-2\alpha^2)d_i^2}{(2(R_n^2 + \varepsilon^2))^{3/2}} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} \varepsilon = & v_{st}t_m^* - \alpha d_i \\ = & \alpha d_i \pm R_n \left(f_d / \sqrt{f_m^2 + f_d^2} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

对于机载 SAR 和星载 SAR, 平台至成像区域散射点的距离远大于阵元之间的空间距离 d_i 。则式(16)可以近似为

$$\varepsilon = \pm R_n(f_d / \sqrt{f_m^2 + f_d^2}) \quad (17)$$

则式(15)为

$$w(t_m^*) = \exp \left\{ j \frac{2\pi f}{c} (1-2\alpha) d_i \frac{f_d}{f_m} \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi f}{c} \frac{(1-2\alpha^2) d_i^2}{2R_n} \left(\frac{f_m^2 - f_d^2}{f_m^2} \right)^{3/2} \right\} \quad (18)$$

用 S_{mi} 表示等效的常规单站 SAR 数据, 则由式(14)可得双站 SAR 数据映射成常规单站 SAR 的公式为

$$S_{mi}(f, f_d) = \frac{S_i(f, f_d)}{w(t_m^*)} \quad (19)$$

在平台飞行速度恒定的情况下, 当相位校正因子 $\alpha = 0.5$ 时, 由式(5), 式(6), 式(7)可知, 等效的单站的阵元收、发位置在方位向是均匀的。实际运用中, 平台的飞行速度往往是变化的, 如果不改变相位校正因子取值, 会导致方位向非均匀采样。其影响是目标的方位向图像旁瓣会升高, 甚至出现伪目标。因此相位因子需要根据速度变化而变化, 以保持等效的单站阵元收/发位置在方位向是均匀的。

由式(5)知, 系统满足方位向均匀采样的 PRF 为

$$\text{PRF} = 2v_{str}/(l_r i) \quad (20)$$

此时发射阵元每个 PRF 之间方位向的位移分别为

$$\Delta u_t = v_{st}/\text{PRF} \quad (21)$$

则方位向均匀采样时, 接收阵元的方位向位移为

$$\Delta u_r = \Delta u_t / i \quad (22)$$

即任意两个接收天线相位中心之间的方位向距离

$$\begin{aligned} \Delta u_r &= (u_i + \alpha d_{i+1}) - (u_i + \alpha d_i) \\ &= (i+1)\alpha l_r - (i)\alpha l_r = \Delta u_t / i \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)中 u_i 为发射阵元方位向位置。综合式(20), 式(23)可以得到当平台速度变化时, 为了保持方位向均匀采样相位校正因子应取值为

$$\alpha = v_{st}/(i l_s \cdot \text{PRF}) \quad (24)$$

3.2 多通道数据重排

各阵元数据在二维频域校正相位后进行重排, 直接的方法是对各阵元数据校正相位后, 转换到慢时间域进行重排。然后将重排后的数据再装换到多普勒域, 进行方位匹配滤波处理。其处理流程如图3。

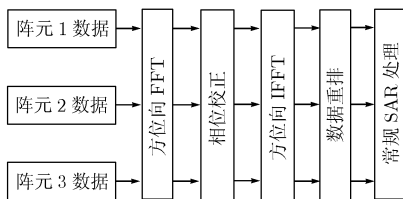


图3 传统相位校正处理流程

但是上述方法存在问题。首先, 由于各阵元数据方位向

存在模糊, 因而各阵元数据经相位补偿后, 会将模糊数据引入重排后的数据。其次, 上述方法需要对数据进行两次快速傅里叶变换(FFT)以及一次逆傅里叶变换(IFFT), 因此计算效率不高。

针对上述问题, 一个解决方法是将方位向数据的一维 FFT 变成二维 FFT^[9,10]计算。设每个阵元的方位向采样数为 n_e , i 为阵元数。方位向数据的等效离散傅里叶变换(DFT)为

$$S(n) = \sum_{p=0}^{P-1} s(p) \exp \left(-j \frac{2\pi}{P} pn \right) \quad (25)$$

表示为二维 DFT 的形式为

$$S(n_e \cdot m + k) = \sum_{q=0}^{i-1} \exp \left(-j \frac{2\pi}{i} qm \right) \cdot \left\{ \exp \left(-j \frac{2\pi}{i n_e} qk \right) \sum_{l=0}^{n_e-1} s(q, l) \exp \left(-j \frac{2\pi}{n_e} li \right) \right\} \quad (26)$$

式(26)中括号中的累加求和项即为对每个阵元接收数据进行 DFT, 指数项为相移项。括号外的累加项为对各阵元 DFT 之后的数据进行以 Δt_m 为采样间隔进行高阶 DFT。在每个阵元数据低阶 DFT 完成之后, 进行双站数据映射成单站数据的相位校正, 然后进行高阶 DFT。DFT 可以用 FFT 完成, 整个处理流程如图4所示。

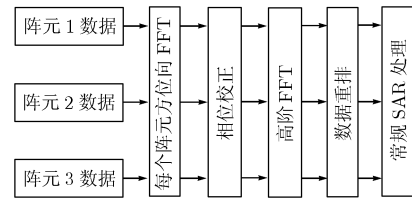


图4 相位校正处理流程

4 计算机仿真

本文采用表1中的仿真参数, 在条带成像模式下对天线面积相近的多通道 SAR 和常规 SAR 成像进行了仿真对比。

图5中3个点目标方位向之间相距2.8m。由图中可见,

表1 仿真参数

		常规 SAR	多通道 SAR
不同参数	天线长度 9m		校正因子 0.5
			阵元数 5/3
			发射阵元长度 2.8m
			接收阵元长度 2.8m
相同参数		载频 9.6G	
		带宽 100MHz	
		中心距离 10km	
		平台速度 60m/s	

由于多通道 SAR 的方位分辨率为单个阵元的方位分辨率 $\delta y_m = 1.4 \text{ m}$, 因而 3 个点目标在图 5 (a)中可以分辨。而常规 SAR 中方位分辨率为 4.5m , 因此图 5 (b)中 3 个点目标不能区分。

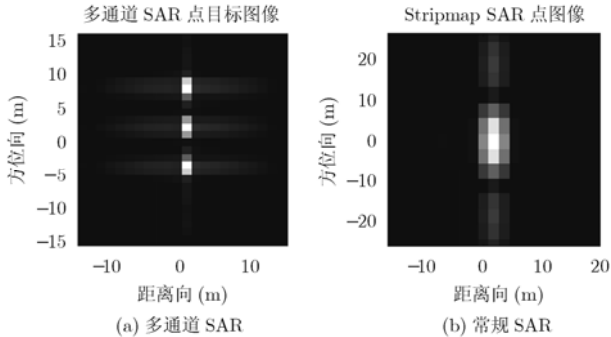


图 5 与分布点目标成像对比

图 6 中采用位于成像场景中心的点目标方位向匹配滤波后的图形, 比较了多通道 SAR 天线总面积不变, 而阵元数量变化以及相位校正因子 α 对方位向分辨率的影响。成像算法采用 RD 算法, 方位向海明加权。

慢变函数相位校正项式(13)中, 第 1 个指数项当 $\alpha = 0.5$ 时等于 1。此时经过相位校正后单站数据方位向可以等效为均匀采样。而 $\alpha \neq 0.5$, 第一个指数项不为 1, 因而在阵元数目相同的情况下, 图 6(a)与图 6(b)相比具有更高的旁瓣。

由于随着阵元数量的增加, 阵元方位向长度变短, 因而相应的合成孔长度增加。因此, 图 6(b) 与图 6(c)相比方位分辨率随阵元数增加而提高。

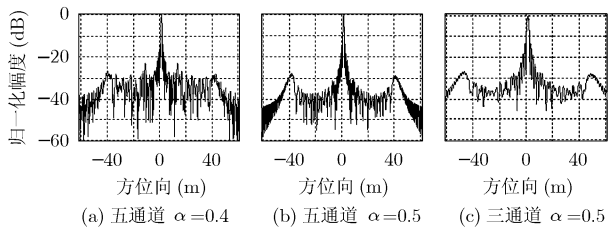


图 6 多通道 SAR 方位向点目标图像对比

5 结束语

本文提出了一种高分辨率宽测绘带多通道 SAR 成像算

法。该算法在二维频域进行相位校正, 通过将方位向数据的 FFT 转换为二维 FFT, 因而具有高的运算效率。通过仿真对算法的性能进行了验证。仿真结果表明了算法的有效性。

参考文献

- [1] Cantofio L J. Space-Based Radar Handbook. Boston, MA: Artech House, 1989: 127-132.
- [2] Griffiths H D and Mancini P. Ambiguity suppression in SARRS using adaptive array techniques in proc. IGARSS, London, UK., 1991: 1010-1018.
- [3] Callaghan G D. and Longstaff I D. Wide-swath space-borne SAR and range ambiguity. Proceedings of Radar 97, October 1997: 248-252.
- [4] Currie A and Brown M A. Wide-swath SAR. *Proc. Inst. Elect. Eng. F.*, 1992, 139(2): 122-135.
- [5] Stiles J M and Goodman N A. Processing of multi-aperture SAR to produce fine-resolution images of arbitrarily large extent. Radar Conference, 2001. Proceedings of the 2001, IEEE, 2001: 451-456.
- [6] Li Zhengfang, Wang Hongyang, Su Tao, and Bao Zheng. Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82-86.
- [7] Younis M and Wiesbeck W. Digital beamforming in SAR systems. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(7): 1735-1739.
- [8] Soumekh M. Bistatic synthetic aperture radar inversion with application in dynamic object imaging. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1991, 39(9): 2044-2055.
- [9] Franceschetti G, Mazzeo A, and Mazzocca N. An efficient SAR parallel processor. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 1991, 27(2): 356-366.
- [10] Brenner N M. Fast Fourier transform of externally stored data. *IEEE Trans. on Audio and Electroacoustics*, 2003, 41(7): 128-132.

郭振永: 男, 1972 年生, 博士, 从事 SAR 信号处理。

袁新哲: 男, 1971 年生, 博士, 从事 SAR 信号处理研究。

张平: 男, 1949 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事 SAR 信号处理及测控技术研究。