

同航线双基聚束式 SAR 宽场景成像算法

张磊 井伟 邢孟道 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文在现有双基 SAR 成像研究的基础上, 提出了同航线双基聚束式 SAR 成像的算法。该算法首先对回波信号进行方位预处理实现信号支撑区的不模糊, 然后利用传统波数域的成像算法聚焦。该算法较双基极坐标算法有更高的聚焦精度并且没有几何形变。它不仅适用于平行航线的双基成像, 其思路也完全适用于其它聚束模式的成像处理。最后通过仿真验证了算法的正确性。

关键词: 聚束式 SAR; 同航线双基; 宽场景成像

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)07-1679-05

An Algorithm for Repeated Trajectory Bistatic Spotlight SAR Widefield Imaging

Zhang Lei Jing Wei Xing Meng-dao Bao Zheng

(National Lab for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on the current research on bistatic SAR image, a new algorithm to process data of repeated trajectory bistatic spotlight SAR system is proposed. The algorithm first suppress azimuth aliasing with an azimuth preprocess step, and focus image with traditional wavenumber domain algorithm. It is with high focusing accuracy without distortion involved, by which well focused image over large scene can be obtained. The principal of the azimuth preprocess is also suited to deal with other spotlight SAR mode. And a numeric simulation confirms the validity of the algorithm.

Key words: Spotlight SAR; Repeated trajectory bistatic; Widefield image

1 引言

近十年来, 分布式小卫星雷达由于其多种优点受到广泛关注。一种已投入运用的方案是用一组小卫星跟随某一在轨卫星, 并接收在轨卫星发射的信号。由于小卫星与主星的间距达数千米或更远, 其回波数据成像和传统的单基SAR成像是有区别的。文中以沿航向排列的Tandem-X为例, 提出基于方位预处理消除方位模糊的同航线双基聚束式SAR宽场景成像算法。

双基SAR成像算法已在许多文献中讨论, 文献[1]讨论了双基SAR的R-D(距离-多普勒)算法, 文献[2]提出了双基SAR的Chirp-Scaling算法, 这两种算法都是基于菲涅尔近似, 适用于正侧视分辨率较低的情况; 文献[3]提出了收发平台与目标共面情况下的双基SAR距离徙动算法(RMA); 文献[4-6]对更一般的双基工作模式的距离徙动算法(RMA)进行了研究, 具有较高的适用性。文献[7]从瞬时频率和

瞬时的斜距出发可以精确推导同航线双基SAR的波数域表达, 并结合RMA实现成像。以上双基成像算法都要求高的方位采样频率以保证回波信号方位频率不模糊, 而这在高方位分辨的聚束模式中是困难的。文献[8]提出的双基极坐标算法(BPFA)对双基构型几何配置没有限制且方位采样并不要求大于回波方位合成带宽, 对双基聚束模型SAR成像是较为适用的, 但和单基极坐标算法(PFA)类似, 由于平面波假设在大的成像场景中是不成立的, 仅能对较小场景的范围内较好的聚焦。文献[8]推导了该算法的成像场景限制公式。单基宽场景聚束式成像在文献[9]中首先被提出, 基本思路为先利用ATAFS(Along-Track Alignment and Formatting System)得到变形拉伸后不模糊支撑区, 然后通过插值实现理想支撑区的恢复, 最后二维IFFT聚焦, 较极坐标格式算法而言, 宽场景成像算法能实现更大场景的高精度成像, 其中单基宽场景聚束式成像算法中的捺粉多普勒算法(DDA)流程和Two-Step算法^[10]是一致的。

本文算法将沿用并改进单基宽场景聚束成像算法的思路, 提出了同航线双基聚束成像算法。该算

2008-01-29 收到, 2009-01-21 改回

新世纪优秀人才支持计划项目和国家自然科学基金(60502044)资助课题

法推导过程仅在成像处理中对半双基角^[7]存在近似处理, 文章对此近似进行了详细讨论, 对聚焦影响相对较小, 因而本文算法较BPFA能实现更大场景更高精度的聚焦成像。

本文首先介绍同航线双基 SAR 的信号模型, 然后对同航线双基聚束 SAR 宽场景成像算法原理和实现步骤进行详细介绍, 最后数据仿真验证算法的有效性。

2 同航线双基聚束 SAR 信号模型

本文讨论的同航线双基聚束式 SAR 模型如图 1 所示, 收发平台沿同一航线等速 v 飞行, 波束始终指向成像场景。沿航线方向基线长为 $2h$, 平台高度 H , 以航线在地面投影为 X 轴建立直角坐标系, 场景中心点坐标为 $(x_c, y_c, 0)$, 收发平台 0 时刻坐标分别为 (x_{t0}, y_{t0}, H) 和 (x_{r0}, y_{r0}, H) , 基线中点为 (x_m, y_m, H) 。地面任一点 $P(x_n, y_n, 0)$ 收发斜距分别以 R_t 和 R_r 表示。假设发射一线形调频信号, 对接收信号距离 Dechirp 并消除残余视频相位(RVP), 距离波数域信号为

$$s(K_r, X) = \sigma \cdot \text{rect}\left(\frac{2(K_r - K_{rc})}{b \cdot T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{X - x}{L}\right) \cdot \exp\left[-j \frac{K_r}{2} (R_t + R_r - 2R_c)\right] \quad (1)$$

其中 $X = vt_m$, t_m 为方位慢时间, $b = (8\pi\alpha)/c^2$, $K_{rc} = (4\pi f_c)/c$, α 发射信号调频率, R_c 为场景中心线对应最短斜距, σ 为目标散射系数, L 为合成孔径, T_p 为发射信号脉宽。令场景点目标坐标为 $P(x_n, y_n, 0)$, r 为 P 点最短斜距。简便起见, 后续都以 $x_n = x_n - x_m$ 表示目标相对方位位置, 则收发平台对应斜距为

$$R_t = \sqrt{r^2 + (X - h - x_n)^2}, R_r = \sqrt{r^2 + (X + h - x_n)^2} \quad (2)$$

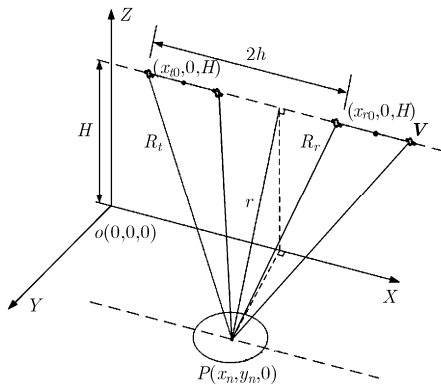


图 1 同航线双基几何

3 同航线聚束式 SAR 宽场景算法

3.1 卷积方位去模糊

为实现方位去模糊, 首先对回波信号进行 SPECAN 操作然后补偿一个二次相位, 整个过程为一个卷积的过程, 本小结将对此过程作详细地分析。假设处理的数据距离上已经沿场景中心线作 Dechirp 处理, 将信号和参考相位函数的卷积实现, 等效地提高方位采样频率, 实现方位不模糊。同航线双基 SAR 中, 相位参考函数为

$$\varphi_{\text{ref}} = \exp\left\{j \frac{K_{rc}}{2} \left(\frac{(X-h)^2}{2R_c} + \frac{(X+h)^2}{2R_c}\right)\right\} \quad (3)$$

其中以 R_{tc} , R_{rc} 分别为收发参考距离。将信号与相位参考函数进行卷积, 则有

$$\begin{aligned} s_1(K_r, X') &= \int s(K_r, z) \exp\left\{j \frac{K_{rc}}{2} \left(\frac{(z - X' - h)^2}{2R_c} + \frac{(z - X' + h)^2}{2R_c}\right)\right\} dz \\ &= \exp\left\{j \frac{K_{rc} X'^2}{2R_c}\right\} \int s(K_r, z) \exp\left\{j \frac{K_{rc}}{2} \left(\frac{(z-h)^2}{2R_c} + \frac{(z+h)^2}{2R_c}\right)\right\} \exp\left\{-j \frac{K_{rc} X'}{R_c} z\right\} dz \end{aligned} \quad (4)$$

从式(4)可见整个卷积包括在距离波数中心进行方位去调频, 然后进行傅里叶变换, 由于补偿了方位大部分二次调频相位, 傅里叶变换后方位上实现了粗聚焦, 这和传统距离 Dechirp 聚焦的原理一样, 可认为是“时频变换”聚焦。且变换前后的时频标度有如下关系:

$$X' = \frac{K_x R_c}{K_r}, X = \frac{K'_x R_c}{K_{rc}} \quad (5)$$

其中 K'_x 定义为和 X' 对应方位波数。傅里叶变换后的二次相位 $\exp\left\{j \frac{K_{rc} X'^2}{2R_c}\right\}$ 对数据支撑区进行了拉伸

并偏移。考虑到此时方位上是聚焦的, 二次相位对方位位置不一样的目标点数据支撑区的作用是不一样的, 如对方位零点不进行操作, 而对方位远点起较大的作用。以上操作实现了时频变换后数据支撑区的不模糊。图2, 图3分别为仿真中心点卷积处理前后的分别在 (K_r, K_x) 域和 (K_r, K'_x) 域的支撑区。可见, 支撑区模糊被很好地去除。

3.2 支撑区二次相位补偿

对 $s_1(K_r, X')$ 作方位傅里叶变换到二维波数域, 只要满足原方位采样率大于瞬时带宽的条件, 就可以得到不混叠的二维波数谱。信号经过傅里叶变换

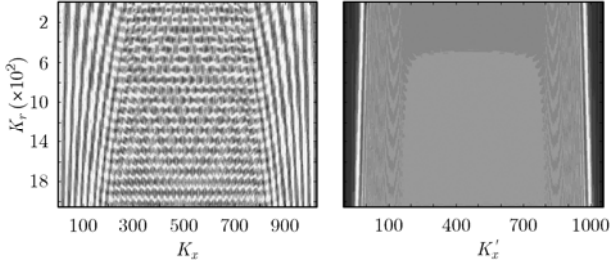


图2 (K_r, K_x) 域模糊支撑区 图3 (K_r, K'_x) 域不模糊支撑区

后可以表示为 $s_2(K_r, X)$:

$$\begin{aligned}
 s_2(K_r, K'_x) &= \int s_1(K_r, X') \cdot \exp(-jK'_x X') dX' \\
 &= \int \left[\exp\left(jK_{rc} \frac{X'^2}{2R_c}\right) \cdot \int s(K_r, z) \right. \\
 &\quad \cdot \exp\left(j \frac{K_{rc}}{2} \left(\frac{(z-h)^2}{2R_c} + \frac{(z+h)^2}{2R_c} \right)\right) \\
 &\quad \cdot \exp\left(-jK_{rc} \frac{X'}{R_c} z\right) dz \left. \cdot \exp(-jK'_x X') \right] dX' \\
 &= \int s(K_r, z) \exp\left(j \frac{K_{rc}}{2} \left(\frac{(z-h)^2}{2R_c} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{(z+h)^2}{2R_c} \right)\right) dz \cdot \exp\left(-j \frac{K'_x{}^2 R_c}{2K_{rc}}\right) \\
 &\quad \cdot \exp\left(-j \frac{K_{rc} z^2}{2R_c}\right) \cdot \exp(-jK'_x z) \\
 &= \int s(K_r, z) \exp(-jK'_x \cdot z) dz \\
 &\quad \cdot \exp\left(-j \frac{K'_x{}^2 R_c}{2K_{rc}}\right) \cdot \exp\left(j \frac{K_{rc} h^2}{2R_c}\right) \quad (6)
 \end{aligned}$$

由式(6)可见, 由于 3.1 节中的时域卷积操作, 在波数域引入了二次相位。构造二次补偿相位函数:

$$\varphi_c = \exp\left(j \frac{K'_x{}^2 R_c}{2K_{rc}}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{K_{rc} h^2}{2R_c}\right) \quad (7)$$

经过二次相位补偿, 并结合同航线双基 SAR 波数域表达式^[7]可得:

$$\begin{aligned}
 s_3(K_r, K'_x) &= \int s(K_r, z) \exp(-jK'_x z) dz \\
 &= \text{rect}\left(\frac{2(K_r - K_{rc})}{b \cdot T_p}\right) \\
 &\quad \cdot \text{rect}\left(\frac{K'_x \cdot r}{L \sqrt{K_r^2 \cos^2 \beta - K_x'^2}}\right) \\
 &\quad \cdot \exp\left(-j(r + h \cdot \tan \beta) \sqrt{K_r^2 \cos^2 \beta - K_x'^2}\right) \\
 &\quad \cdot \exp(-jK'_x x) \cdot \exp(jK_r R_c) \quad (8)
 \end{aligned}$$

式(8)中双基角的计算表达式为^[7]:

$$\beta = \arccos \left[\sqrt{\frac{a^2 - h^2}{2a^2}} + \sqrt{\frac{(a^2 - h^2)^2}{4a^4} + \frac{h^2 K_x'^2}{4a^2 K_R^2}} \right] \quad (9)$$

式(9)中, a 代表目标点的斜距历程, 它可以表示为方位波数 K'_x 的函数。由于沿方位的平移不变性, 场景中 与雷达航迹平行的任一条线(如场景中心线)上, 所有点的 a 具有相同的频域表达式。其空变性是缓变的, 详细分析请参见文献[7]。在后续处理中将以场景中心线处双基角近似, 即 $\beta = \beta_0 =$

$$\arccos \left[\sqrt{\frac{R_c^2 - h^2}{2R_c^2}} + \sqrt{\frac{(R_c^2 - h^2)^2}{4R_c^4} + \frac{h^2 K_x'^2}{4R_c^2 K_R^2}} \right]$$

可见, 方位预处理相当于方位的变标操作, 变标操作后支撑区不模糊且相位特性理想。

方位预处理原理可用图4说明, 图中 a, b, c 分别表示 3 个位置区别的回波信号时频特性, 虚线表示对用步骤的二次相位函数, ΔT_a 表示方位补零。考虑到式(4)的时频变换表达, 图4的最后输出可表示为图5, 图5的结果和式(8)的表达式是对应的。可见, 在适当方位补零后, 等效提高了时频变换后的方位波数范围, 保证数据支撑区的不模糊, 同时注意到此时信号在对应的 X' 时域是模糊的。因而后续的处理只能在波数域中操作, 借鉴距离徙动算法(RMA)的思路, 后续将介绍使用插值的操作实现聚焦成像。

3.4 匹配滤波与插值成像

和传统RMA中一样, 本节讨论的同航线双基聚束成像算法同样以场景中心线为基准进行匹配滤波

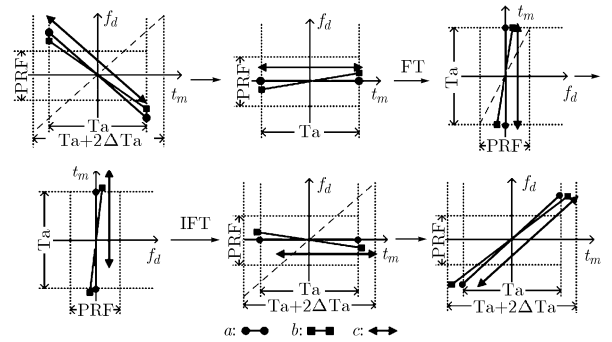


图4 宽场景成像方位预处理原理

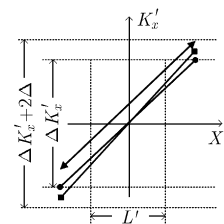


图5 坐标变换后输出

处理, 然后进行插值后逆傅里叶变换实现聚焦。构造场景中心线的匹配相位函数为

$$H = \exp\left(j\sqrt{K_r^2 \cos^2 \beta_0 - K_x'^2} (R_c + h \tan \beta_0)\right) \cdot \exp(-jK_r R_c) \quad (10)$$

经过匹配滤波后信号表达式为

$$s_4(K_r, K_x) = s_3'(K_r, K_x) \cdot H_{mf} = \text{rect}\left(\frac{2(K_r - K_{rc})}{b \cdot T_p}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{K_x' r}{L\sqrt{K_r^2 \cos^2 \beta_0 - K_x'^2}}\right) \cdot \exp\left(-j\sqrt{K_r^2 \cos^2 \beta_0 - K_x'^2} (r - R_c)\right) \cdot \exp(-jK_x' x) \quad (11)$$

然后利用插值 $\sqrt{K_r^2 \cos^2 \beta_0 - K_x'^2} \rightarrow K_y$ 实现距离波数的均匀后二维逆傅里叶变换就可实现距离方位的聚焦。

4 仿真结果

为验证算法有效性, 利用表 1 系统参数仿真。

合成孔径为 10.24 km, 定义场景中心点孔径带宽为方位带宽为 3584 Hz, 远大于 PRF, 体现聚束的工作模式。仿真点阵由 25 个点组成, 相邻两点距离方位均为 300 m。从仿真结果看出使用基于方位预处理的方法, 然后进行同航线双基 RMA 的插值成像步骤进行聚焦成像。根据公式^[8]计算在给定仿真参数的 BPFA 成像场景范围半径约为 700 m, 仿真点阵边缘点在成像平面坐标为(600 m, 600 m)在此场景范围以外, 数据仿真结果表明, 算法对场景中心点和远距点都能取得很好的聚焦效果, 可见本文算法相对 BPFA 有较高精度聚焦的优点。图 6 为仿真点阵聚焦结果, 图 7 和图 8 分别为场景中心点和点阵右上角边缘点聚焦。可见, 利用宽场景成像算法可以有效克服多普勒模糊并得到理想的聚焦。

$$r_{\max} < \sqrt{2\lambda} \left(\frac{L_t^2}{r_t^3} + \frac{L_r^2}{r_r^3} \right)^{-1/2} \quad (12)$$

其中 r_{\max} 为成像场景最大半径, L_t 和 L_r 分别为收发孔径, r_t 和 r_r 分别为收发相对场景中心斜距。

表 1 仿真雷达参数

PRF	1400Hz	信号带宽	75MHz
方位带宽	3584Hz	航线高度	100km
载频	3GHz	x 基线长度	10km
脉冲宽度	30 μ s	平台速度	7000m/s

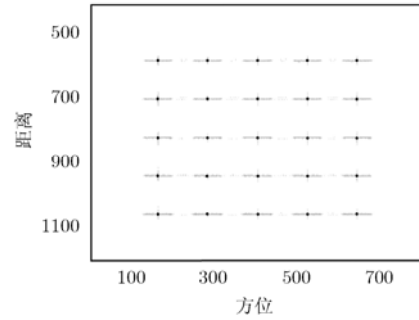


图 6 仿真结果

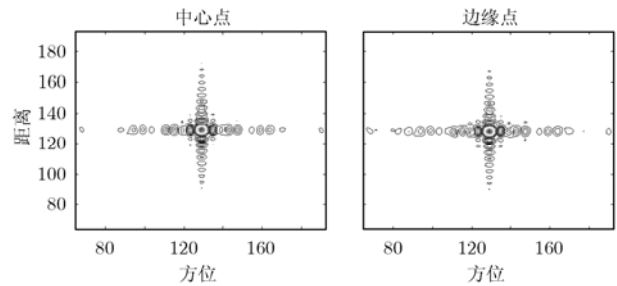


图 7 中心点成像

图 8 边缘点成像

5 结论

本文对同航线双基宽场景聚束式 SAR 成像算法进行了讨论, 该算法首先利用方位预处理对数据支撑区进行拉伸和平移实现去模糊和相位补偿, 然后利用类似于距离徙动算法的匹配滤波和插值算法实现后续聚焦成像, 为进一步提高精度可参考文献[11]中对类双基角的近似, 即考虑双基角距离空变的一次项。本文提出的利用方位预处理实现数据支撑区不模糊的方法不仅适用于同航线双基聚束式 SAR 成像, 同样适用于其它模式, 但得到非平行以及任意轨道双基的二维波数表达式是相对困难的, 如何实现复杂构型下的双基成像需要进一步研究。

参考文献

- [1] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 15-30.
- [2] 朱振波, 汤子跃, 蒋兴舟. 机载双站合成孔径雷达 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 977-981.
- [3] Soumekh M. Bistatic synthetic aperture radar inversion with application in dynamic object imaging[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, 39(9): 2044-2055.
- [4] 何峰, 梁甸农, 董臻. 适于大斜视角的星载双基地 SAR 波数域成像算法[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1011-1014.
- [5] Walterscheid I, Ender J, and Brenner A, et al. Bistatic SAR processing and experiments[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2710-2717.
- [6] Ender J, Walterscheid I, and Brenner A. Bistatic

- SAR-translational invariant processing and experimental results[J]. *IEE Proc.- Radar Sonar Navig.*, 2006, 153(3): 177-183.
- [7] 张振华, 保铮, 邢孟道等. 同航线双基合成孔径雷达成像的频域分析[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(6): 809-816.
- [8] Rigling B D and Moses R L. Polar format algorithm for bistatic SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(4): 1147-1159.
- [9] Carrara W G, Goodman R S, and Ricoy M A. New algorithms for widefield SAR image formation[C]. 2004 IEEE Radar Conference[C]. Philadelphia: PA, 2004: 38-43.
- [10] Lanari R, Tesauro M, Sansosti E, and Fornaro G. Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(9): 1993-2004.
- [11] Zhang Zhenhua, Xing Mengdao, Ding Jinshan, and Bao Zheng. Focusing the parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in wavenumber domain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3633-3647.
- 张 磊: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像.
- 井 伟: 男, 1978年生, 博士, 研究方向为合成孔径雷达成像.
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 研究方向为合成孔径雷达成像、目标识别等.
- 保 铮: 男, 1927年生, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为合成孔径雷达成像、目标识别、天波超视距、空时二维自适应等.