

## 利用一发多收的双基 SAR 构型解多普勒模糊成像

张磊 贺柏森 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:** 该文以方位平移不变的双基 SAR 为研究对象, 分析了双基回波多普勒的距离空变性, 提出了一种考虑多普勒空变性的双基解多普勒模糊算法。解模糊过程中利用数值计算得到不同距离对应各个多普勒频点模糊分量的导向矢量, 然后进行空域滤波实现全多普勒谱的重构。最后结合已有的双基成像算法实现大场景高分辨率成像。数值仿真验证了算法的有效性。

**关键词:** 双基 SAR; 多普勒解模糊; 单发多收; 导向矢量

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2009)09-2044-04

## Using STMR Configuration for Doppler Ambiguity Resolving Bistatic SAR Imaging

Zhang Lei He Bo-sen Xing Meng-dao Bao Zheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** This paper focuses on the translation-invariant bistatic SAR Doppler ambiguity resolving by using Single-Transmitter-Multiply-Receiver (STMR) mounted on different platforms. The range dependent Doppler in the bistatic configuration is analyzed, based on which a bistatic Doppler ambiguity suppression algorithm is proposed. The approach obtains the range dependent steering vectors of ambiguous signal components in the same Doppler bins by numerical calculation, and the spatial domain filtering is used to reconstruct the full bandwidth Doppler spectrum. Finally, the available bistatic imaging algorithms can be used to obtain the wide swath and high resolution SAR image. Simulation confirms the validity of the approach.

**Key words:** Bistatic SAR; Doppler ambiguity resolving; STMR; Steering vector

### 1 引言

相比传统的单基地 SAR, 收发双置的双基地 SAR 在机动性和隐蔽性, 以及抗干扰和抗截获性能等方面具备更强的优势。利用星载、空载或混合双基 SAR 对地面进行测绘或战场监测等在未来具有广阔的发展前途。本文结合双基 SAR 回波的特性, 研究利用一天线发射多天线接收的双基构型实现大场景高分辨率 SAR 成像。利用多通道体制实现大场景成像的技术主要是利用阵列的多空间自由度对信号在图像域或者多普勒域对各个模糊分量进行空域滤波实现不模糊以及高分辨率。利用波束形成的方法实现对不同方向回波的选择抑制多普勒模糊的方法在文献[1]中较早地提出, 现已有较多文献对此问题进行了讨论, 如文献[2]提出了多普勒域自适应多普勒解模糊算法, 其利用等效相位中心假设对一发多收的小卫星阵列等效为小卫星自发自收的阵列, 然后自适应计算滤波权矢量实现多普勒模糊分量的分离, 具有较高的容噪性; 文献[3]中对存在垂直航线基线的 3 维阵列进行了分析和讨论, 并提出利用

导向矩阵的伪逆空域滤波的空时频成像算法。目前, 结合双基构型特征的多普勒解模糊算法的讨论较少。

在单基构型中, 回波多普勒仅和目标点的瞬时斜视角有关而和距离无关, 不同距离目标点的回波多普勒空时谱是重合的, 解模糊操作中可以根据多普勒频率和斜视角的对应关系直接得到模糊分量对应导向矢量然后进行滤波处理。但在双基构型中, 由于发射、接收平台分置, 回波多普勒为发射和接收多普勒之和。本文研究方位平移不变的单发多收双基构型, 在场景平面假设下, 多普勒谱是距离空变的<sup>[4]</sup>但和目标点方位位置无关。本文结合双基构型的几何特点分析了多普勒谱的空变性, 在此基础上利用数值计算得到不同距离对应每个多普勒频点模糊分量的导向矢量, 然后利用空域滤波实现全带宽多普勒谱的重构。最后可结合现有的双基成像算法实现大场景高分率成像。

### 2 单发多收双基 SAR 信号模型

如图 1 所示设平面场景有一点目标位于  $P_n(X_n, Y_n, 0)$ , 发射和接收雷达分别位于  $(x_T, y_T, z_T)$  和  $(x_R, y_R, z_R)$ , 设基线为  $M(h_x, h_y, h_z)$ 。假设单个天线发射

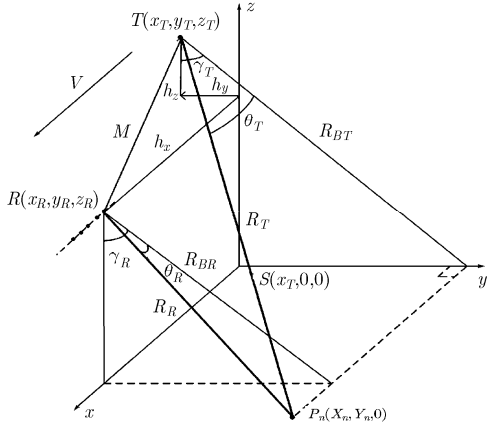


图1 单发多收双基几何

信号,  $K$  个天线接收, 且接收天线沿航向等间隔  $d$  分布。发射和接收平台平行于  $x$  轴移动, 而  $M$  点由  $0$  移至  $x_M^*$  时(即发射和接收站分别由  $-h_x/2, h_x/2$  移至  $x_M^* - h_x/2, x_M^* + h_x/2, h_x$  为收发航向基线), 发射天线和接收参考天线至点目标的斜距和斜视角分别为  $R_T(x_M^* - h_x/2), R_R(x_M^* + h_x/2)$  和  $\theta_T, \theta_R$ 。

此时的瞬时多普勒波数为  $k_X$  为

$$\begin{aligned} k_X &= k_R \sin \theta_T + k_R \sin \theta_R \\ &= k_{XT} + k_{XR} \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $k_{XT} = k_R \sin \theta_T$  和  $k_{XR} = k_R \sin \theta_R$  分别为发射和接收多普勒波数。由几何关系发射以及第  $k$  接收天线斜距分别表达为

$$\begin{aligned} R_T(x_M^* - h_x/2) &= R_{BT} \cos \theta_T + (X_n - x_M^* + h_x/2) \sin \theta_T \\ R_R(x_M^* - h_x/2, k) &= R_{BR} \cos \theta_R + (X_n - x_M^* - h_x/2 - k \cdot d) \sin \theta_R \end{aligned} \quad (2)$$

利用瞬时多普勒波数法, 当  $x_M = x_M^*$  时, 设瞬时多普勒波数为  $k_X$ , 可直接写出  $x_M^*$  处, 第  $k$  接收通道的回波相位的波数域表达式为

$$\begin{aligned} G(k_X, k_R) &= \exp[-jk_R(R_T(x_M^* - h_x/2) \\ &\quad + R_R(x_M^* + h_x/2, k)) - k_X x_M^*] \\ &= \exp[-jk_R(R_{BT} \cos \theta_T + R_{BR} \cos \theta_R)] \\ &\quad \cdot \exp[-jk_R(X_n - x_M + h_x/2) \sin \theta_T] \\ &\quad \cdot \exp[-jk_R(X_n - x_M - h_x/2) \sin \theta_R] \\ &\quad \cdot \exp(jk_R \sin \theta_R k \cdot d) \\ &= \exp(-j2k_R R_B) \cdot \exp[-jk_{XT}(X_n - x_M \\ &\quad + h_x/2)] \cdot \exp[-jk_{XR}(X_n - x_M - h_x/2)] \\ &\quad \cdot \exp(jk_{XR} k \cdot d) \end{aligned} \quad (3)$$

等式右边第 1 项为收发斜距  $R_T, R_R$  为回波延迟的相位项, 而第 2 项为保持双基构形, 平移  $x_M^*$  对应于波数  $k_X$  的线性相位项,  $R_B = (R_{BT} \cos \theta_T + R_{BR} \cos \theta_R) / 2$  为对应斜距。基于几何和瞬时多普勒

的对应关系, 在文献[5]中给出了更一般的  $G(k_X, k_R)$  表达。单发多收的双基构型中, 沿航向分布的接收天线阵列提供空间自由度。假设发射载频远大于信号带宽时,  $k_{XR} = 2\pi(\sin \theta_R) / \lambda$ 。则接收通道对应的空域导向矢量可定义为

$$\begin{aligned} \mathbf{z} &= \left[ 1 \exp\left(j2\pi \frac{d \sin \theta_R}{\lambda}\right) \cdots \exp\left(j2\pi \frac{k \cdot d \sin \theta_R}{\lambda}\right) \right. \\ &\quad \left. \cdots \exp\left(j2\pi \frac{K \cdot d \sin \theta_R}{\lambda}\right) \right]^T \end{aligned} \quad (4)$$

### 3 双基 SAR 多普勒特性

当基线  $M = 0$  时, 发、收斜视角  $\theta_R = \theta_T$ , 构型退化为单发多收的单基构型, 回波多普勒和斜视角关系表示为

$$f_d = (2v/\lambda) \sin \theta_R \quad (5)$$

在单基构型中, 对同一目标点发、收斜视角相等, 回波多普勒仅和斜视角成正比关系和目标点距离无关。

在双基构型中由于发、收平台分置, 每一瞬时候对应不同的发、收斜视角, 且发、收斜视角在不同的等最短斜距线上的耦合关系不同, 也即双基回波多普勒是距离空变的。

$$f_d = (v/\lambda) \sin \theta_R + (v/\lambda) \sin \theta_T \quad (6)$$

为对比单、双基构型下多普勒特性的距离空变性不同, 分别数值计算两构型下的不同距离  $Y_n$  对应空时谱(即多普勒和接收斜视角的关系曲线)如图 2 和图 3。构型参数如表 1。

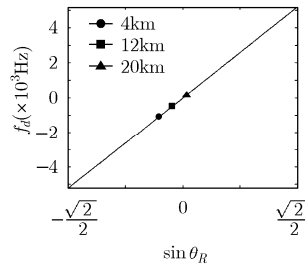


图2 单基多普勒

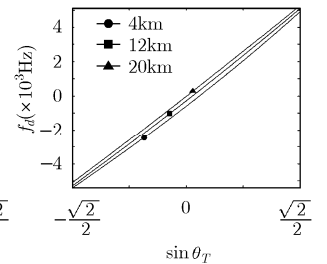


图3 双基多普勒

表1 构型参数

参数	单基	双基
发射平台高度	4 km	4 km
发、收平台速度	110 m/s	110 m/s
基线矢量	(0,0,0)	(1 km, 1 km, 0)

在单基构型下, 不同距离点的多普勒直线重合, 这表明单基多普勒的距离非空变性; 而在双基构型下, 多普勒表现为曲线且各个距离的多普勒曲线不

重合,这说明双基构型下的多普勒是距离空变的。在单基 SAR 多普勒解模糊时,对每个多普勒频点建立的导向矢量是一致的,而在双基解模糊中则要根据距离确定各个多普勒频点的导向矢量。考虑平行双基 SAR 成像中雷达侧视工作,在场景平面假设下场景中各等距离线上所有点对应的空时谱重合,  $\sin \theta_R$  为  $f_d$  的单值函数,定义  $r = R_{BT} + R_{BR}$ , 则对每个距离可数值计算空时谱为

$$\sin \theta_R = \sin \theta_R(f_d, r) \quad (7)$$

则在双基构型下不同距离多普勒模糊的空时谱如图 4。

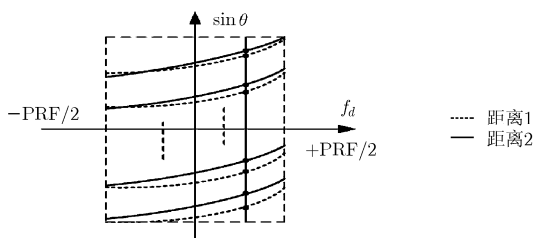


图4 双基模糊空时谱

#### 4 双基多普勒解模糊

由以上分析可见,双基 SAR 中由于多普勒的距离空变性,在多普勒域滤波前需要对回波信号做距离脉冲压缩,然后对每个多普勒频点构建距离空变的空域滤波器实现对完整空时谱的重构。假设发射信号带宽  $B_r$ , 则第  $k$  接收通道距离脉压信号为

$$S_k(r, k_X) = G(r, k_X) \exp(jk_{XR}kd) \quad (8)$$

其中,  $G_r(r, k_X)$  为  $G(k_r, k_X)$  对应逆傅里叶变换,在距离上是聚焦的,且对于各个通道相同。将各个通道接收信号写成矢量形式为

$$\mathbf{S}(r, k_X) = G(r, k_X) \mathbf{z}[\sin \theta(f_d, r)] \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{z}[\sin \theta(f_d, r)]$  如式(4)为接收阵型的空域导向矢量,需要根据距离不同数值计算其表达。假设有  $L$  次多普勒模糊,设接收信号的重复频率为 PRF, 则各模糊的频率中心表示为

$$\mathbf{f} = \text{PRF} \cdot [-(L-1)/2, -(L-1)/2 + 1, \dots, (L-1)/2 - 1, (L-1)/2]^T \quad (10)$$

在方位波数域里,各响应的模糊多普勒矢量为

$$\mathbf{f}_d = \mathbf{f} + f_d \quad (11)$$

且有多普勒  $f_d$  频点对应  $L$  个模糊信号,其导向矢量表示为

$$\mathbf{Z}(\mathbf{f}_d) = [\mathbf{z}(\mathbf{f}_d(1), r), \mathbf{z}(\mathbf{f}_d(2), r), \dots, \mathbf{z}(\mathbf{f}_d(l), r), \dots, \mathbf{z}(\mathbf{f}_d(L), r)]^T \quad (12)$$

相应的  $f_d$  在  $[-\text{PRF}/2, \text{PRF}/2]$  区间范围内。对

$f_d$  多普勒频点,为滤出第  $l$  多普勒模糊分量并同时抑制其他方向的模糊分量,构造 Capon 权矢量约束<sup>[6]</sup>为

$$\mathbf{W}_l^H(\mathbf{f}_d) \mathbf{z}(\mathbf{f}_d(l), r) = 1, \min_W \mathbf{W}_l^H(\mathbf{f}_d) \mathbf{R}(\mathbf{f}_d) \mathbf{W}_l(\mathbf{f}_d) \quad (13)$$

解得

$$\mathbf{W}_l = \frac{\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{f}_d) \mathbf{z}(\mathbf{f}_d(l), r)}{\mathbf{z}^H(\mathbf{f}_d(l), r) \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{f}_d) \mathbf{z}(\mathbf{f}_d(l), r)} \quad (14)$$

其中  $\mathbf{R}(\mathbf{f}_d)$  协方差矩阵,实际中通过一定的样本协方差平均估计得<sup>[6]</sup>。  $\mathbf{Z}(\mathbf{f}_d) = [\mathbf{z}(\mathbf{f}_d(1), r), \mathbf{z}(\mathbf{f}_d(2), r), \dots, \mathbf{z}(\mathbf{f}_d(l), r), \dots, \mathbf{z}(\mathbf{f}_d(L), r)]^T$  为各模糊多普勒频率点导向矢量矩阵。  $\mathbf{H}_l = [h_1, h_2, \dots, h_l, \dots, h_L]^T$ ,  $h_l = 1$ ,  $h_{l \neq l} = 0$ , 为对应多普勒点  $l$  输出矢量。由于各相位中心接收某多普勒频率点信号为多个模糊多普勒信号之和,式(9)可写成

$$\mathbf{S}(r, k_X) = \sum_{l=1}^L G(r, k_X(l)) \mathbf{z}(\mathbf{f}_d(l)) \quad (15)$$

于是将  $l$  从 1 变到  $L$ , 将式(12)各矢量和各多普勒频率滤波矢量权  $\mathbf{W}_l$  相乘,可得不同距离各模糊多普勒频率的信号,即

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(r, k_X)^T \mathbf{W}_l &= \sum_{l=1}^L G(r, k_X(l)) \mathbf{z}(\mathbf{f}_d(l)) \mathbf{W}_l \\ &= G(r, k_X(l)) \end{aligned} \quad (16)$$

将解模糊信号多普勒谱根据顺序拼接即可得到全带宽的不模糊信号。结合双基多普勒的分析,以上给出的是一种自适应的空域滤波方法,较非自适应滤波方法自适应滤波在较低信噪,以及阵列构型不均匀的条件下有明显的优势<sup>[7]</sup>。

#### 5 仿真

下面利用仿真结果验证本文方法的正确性,双基航向基线为 1 km,主要仿真参数如表 2。仿真 9 个点在场景坐标分别为  $[0 \ 3850 \ 0]$ ,  $[0 \ 4150 \ 0]$ ,  $[0 \ 3925 \ 0]$ ,  $[0 \ 4000 \ 0]$ ,  $[0 \ 4075 \ 0]$ ,  $[70 \ 4000 \ 0]$ ,  $[-70 \ 4000 \ 0]$ ,  $[140 \ 4000 \ 0]$ ,  $[-140 \ 4000 \ 0]$ , 单位为 m。

表2 雷达参数

仿真参数	发射	接收
航向速度	110 m/s	110 m/s
载频		10 GHz
发射带宽		200 MHz
多普勒带宽		约 450 Hz
侧视角		45°
平台高度		4 km
相邻阵元间距		0.0244 m

由于脉冲重复频率为 150 Hz 约为多普勒带宽的 1/3, 利用单路信号成像出现 3 次模糊,如图 5(a)。

对每个距离点多普勒特性进行数值计算然后对 3 个接收通道数据进行空域滤波实现多普勒解模糊,解模糊前后多普勒谱如图 5 所示。解多普勒模糊后,利用双基距离徙动算法(RMA)<sup>[5]</sup>进行距离弯曲校正并成像,解模糊前后成像对比如图 6 所示。仿真可见,考虑双基构型多普勒的距离空变性解多普勒模糊算法是有效的。

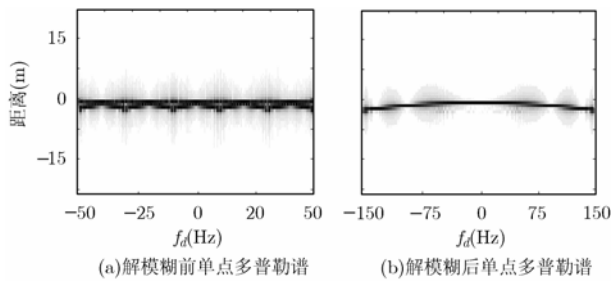


图 5 场景中心点解模糊前后的多普勒谱

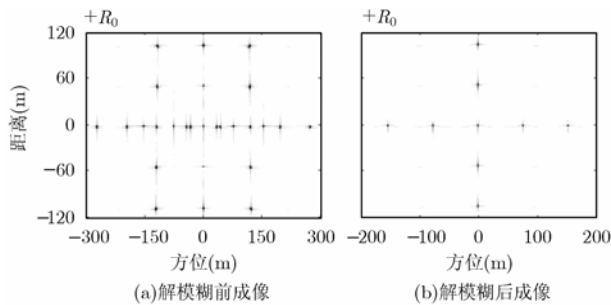


图 6 解模糊前后成像结果对比

## 6 结论

本文中,考虑双基多普勒距离空变特性,利用自适应空域滤波的方法实现一发多收双基构型下的多普勒解模糊算法。区别于单基的多普勒解模糊,双基构型中由于发、收平台分置,其回波多普勒为耦合的发、收多普勒之和。双基多普勒是距离空变的,在地面平坦假设下,可以对发、收多普勒进行解耦分离,然后构造空域滤波器对每个多普勒频点的模糊分量进行提取并拼接得到全带宽的多普勒

谱,最后利用双基成像算法实现高分率不模糊成像。小的距离弯曲可以忽略对多普勒的距离空变的影响,但在大斜视条件下则需要对多普勒走动在时域校正后才可进行多普勒解模糊。

## 参考文献

- [1] Aguttes J P. The SAR train concept: Required antenna area distributed over N smaller satellites, increase of performance by N. Proc. IGARSS, Toulouse, France, Jul. 2003: 542-544.
- [2] Li Zhen-fang, Wang Hong-yang, Su Tao, and Bao Zheng. Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82-86.
- [3] 邢孟道, 李真芳, 保铮, 王彤. 小卫星分布式雷达空时频成像方法. 宇航学报, 2005, 26(B10): 70-80.
- [4] Klemm R. Comparison between monostatic and bistatic antenna configuration for STAP. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2000, 36(2): 596-608.
- [5] Zhang Z, Xing M, Ding J, and Bao Z. Focusing the parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in wavenumber domain. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3633-3645.
- [6] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 126-130.
- [7] Kim Janghyo and Younis Marwan. Wiesbeck Werner: Experimental performance investigation of digital beamforming on synthetic aperture radar. IEEE International IGARSS, 2008, Barcelona, Spain, 7-11 July 2008, Vol.5: 176-179.

- 张 磊: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像、逆合成孔径雷达成像等。
- 贺柏森: 男, 1986年生, 硕士生, 研究方向为雷达成像。
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 研究方向为雷达成像、目标识别等。
- 保 铮: 男, 1927年生, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为雷达成像、目标识别、空时2维自适应信号处理等。