

# 平移不变模式双基地SAR频率变标算法

蔡复青, 何友, 宋杰

(海军航空工程学院信息融合研究所 山东烟台 264001)

**【摘要】**针对双基地SAR距离徙动受发射和接收二维距离变化影响的问题, 提出了一种提取平移不变模式双基地SAR频率变标因子的新方法。该方法将距离徙动随二维距离的变化转化为随一维距离量的变化, 然后通过合理的线性近似得到了不受距离参数影响的变标因子; 在此基础上, 将线性频率变标算法推广到了双基地SAR领域; 最后通过仿真验证了该算法的有效性。

**关键词** 双基地合成孔径雷达; 频率变标因子; FS成像算法; 平移不变

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.02.002

## Frequency Scaling Algorithm for Translational Invariant Bistatic SAR

CAI Fu-qing, HE You, and SONG Jie

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University Yantai Shandong 264001)

**Abstract** A new approach to the range-independence frequency scaling (FS) factor of translational invariant bistatic synthetic aperture radar (SAR) is presented to solve the problem that the range cell movement (RCM) of bistatic SAR is influenced by transmitter and receiver range histories. The change of the RCM with two dimensional ranges is translated into that with one dimensional range, so the independent FS factor is acquired with the linear approximation of range migration. And based on this new approach, the FS algorithm is extended into translational invariant bistatic SAR. Finally, the new approach is validated by point target simulations.

**Key words** bistatic synthetic aperture radar; frequency scaling factor; FS imaging algorithm; translational invariable

双基地SAR的发射机和接收机分置在不同的平台上, 可以有不同的空间位置和速度<sup>[1]</sup>。由于收发分置, 双基地SAR的系统配置更加灵活, 通过合理的配置仍可以具有理想的分辨能力<sup>[2]</sup>。其中平移不变模式是一种发射系统和接收系统以相同的速度沿着平行(或相同)的航迹匀速直线飞行的空间配置模式, 在飞行过程中, 发射系统和接收系统的相对空间几何关系不发生改变。这种模式的双基地SAR编队构形相对简单, 较容易实现, 在地面运动目标检测和干涉SAR等方面有着很大的潜力<sup>[3]</sup>, 因此是多个国家雷达研究机构非常重视的一种双基地SAR体制<sup>[4-8]</sup>, 以这种模式为背景的算法研究也是当前双基地SAR算法研究的热点<sup>[9-12]</sup>。

FS(frequency scaling)算法与CS(chirp scaling)算法一样, 适用于需要考虑场景中距离徙动差的应用场合, 通过相位相乘替代插值来完成距离徙动补偿(RCMC), 因此大大提高了运算效率, 又能保证聚焦精度。不同之处在于CS算法是以线性调频信号为基

础进行的, 而FS算法可以对解线频调后的回波信号进行变标处理。但是由于双基地SAR回波信号距离徙动量同时受收、发距离影响, 不能直接提取出不受距离参数影响的频率变标因子, 无法在频率域对距离徙动差进行统一校正, 因此影响了FS算法在双基地SAR领域的推广应用。

本文根据平移不变双基地SAR回波信号的距离徙动特点, 提出了对平移不变模式双基地SAR回波信号的距离徙动进行合理的线性近似, 然后提取出不受距离参数影响的变标因子的方法。在此基础上根据线性FS算法原理, 推导出新的双基地SAR匹配函数, 将线性FS成像算法推广应用到了平移不变双基地SAR领域。该算法适用于需要考虑场景中距离徙动差的双基地SAR场合, 变标对象为解线频调后的回波信号。该算法不但能保证双基地SAR解线频调后回波信号距离徙动补偿的精度, 而且计算流程和计算效率与单基地SAR的FS算法完全相同, 在斜视角不大的情况下, 具有很好的成像精确度。

收稿日期: 2008-10-08; 修回日期: 2009-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(60672140、60672139); 全国优秀博士学位论文作者专项基金(200237)

作者简介: 蔡复青(1972-), 男, 博士生, 主要从事雷达信号处理、合成孔径雷达成像等方面的研究。

# 1 平移不变结构双基地SAR回波信号模型

平移不变结构的双基地SAR空间几何关系如图1所示<sup>[7]</sup>。图中, 下标T和R分别代表发射机和接收机, 载体匀速直线飞行, 并且飞行速度相同( $V_T = V_R = v$ ), 航迹线距离为 $d$ ,  $P$ 为地面点目标, 雷达天线斜视角为 $\theta_{T0}$ 和 $\theta_{R0}$ , 合成孔径期间, 雷达到目标的视角分别表示为 $\theta_T$ 和 $\theta_R$ ,  $R_{T0}$ 和 $R_{R0}$ 分别表示发射和接收载体与参考点 $P$ 的最远距离。

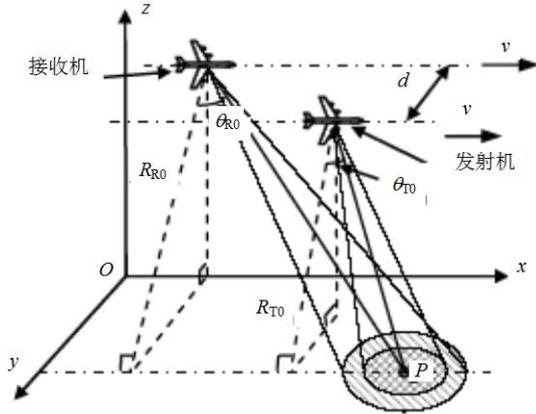


图1 平移不变结构双基地SAR空间几何关系

以发射机和接收机波束中心同时指向参考点 $P$ 的时刻为时间零点, 在任意时刻 $t$ , 发射机经目标到接收机的距离为<sup>[7]</sup>:

$$R(t; R_{R0}, R_{T0}) = R_R(t; R_{R0}) + R_T(t; R_{T0}) = \sqrt{R_{R0}^2 \sec^2 \theta_{R0} + (vt)^2 - 2R_{R0} \tan \theta_{R0} (vt)} + \sqrt{R_{T0}^2 \sec^2 \theta_{T0} + (vt)^2 - 2R_{T0} \tan \theta_{T0} (vt)} \quad (1)$$

利用式(1), 可以得到双基地SAR方位多普勒中心频率 $f_{dc}$ 和方位多普勒调频率 $f_{dr}$ 分别为:

$$f_{dc}(R_{R0}, R_{T0}) = -\frac{1}{\lambda} [R'_R(0, R_{R0}) + R'_T(0, R_{T0})] = \frac{1}{\lambda} (v \sin \theta_{R0} + v \sin \theta_{T0}) \quad (2)$$

$$f_{dr}(R_{R0}, R_{T0}) = -\frac{1}{\lambda} [R''_R(0, R_{R0}) + R''_T(0, R_{T0})] = -\frac{1}{\lambda} \left[ \frac{v^2 \cos^3 \theta_{R0}}{R_{R0}} + \frac{v^2 \cos^3 \theta_{T0}}{R_{T0}} \right] \quad (3)$$

式中  $R'$  和  $R''$  分别表示  $R$  的一阶和二阶导数;  $\lambda$  为波长。

假设双基地SAR发射信号为线性调频信号:

$$S(\hat{t}, t) = \text{rect} \left( \frac{\hat{t}}{T_p} \right) \exp \{ -j2\pi f_0 \hat{t} \} \exp \{ j\pi k \hat{t}^2 \} \quad (4)$$

式中  $k$  为调频率;  $\hat{t}$  为距离时间;  $t$  为方位时间;

$f_0$  为中心频率;  $c$  为光速;  $T_p$  为脉冲宽度;  $\text{rect}(\hat{t})$  为矩形函数。

解线频调是用时间固定, 而频率、调频率相同的线性调频信号作为参考信号, 用它和回波作差频处理。设参考距离为:

$$R_{\text{ref}} = \frac{R_{R0} \sec \theta_{R0} + R_{T0} \sec \theta_{T0}}{2}$$

则参考信号为:

$$S_{\text{ref}}(\hat{t}, t) = \text{rect} \left( \frac{\hat{t} - 2R_{\text{ref}}/c}{T_p} \right) \times \exp \left\{ -j2\pi f_0 \left[ \hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right] \right\} \exp \left\{ j\pi k \left[ \hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right]^2 \right\} \quad (5)$$

设某点目标到发射机和接收机的距离分别为 $R_{Ti}$ 和 $R_{Ri}$ , 天线增益和点目标反射系数为1, 用式(5)对该点目标回波进行解线频调变换, 如果令 $R_A(t) = R(t; R_{Ri}, R_{Ti}) - 2R_{\text{ref}}$ ,  $\tau = \hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}$ , 经化简后解线频调输出为:

$$S(\tau, t) = \text{rect} \left[ \frac{t}{T_a} \right] \text{rect} \left[ \frac{\tau - \frac{R_A}{c}}{T_p} \right] \exp \{ j\varphi(\tau, t) \} \quad (6)$$

式中

$$\varphi(\tau, t) = -\frac{2\pi}{c} k \tau R_A - \frac{2\pi}{c} f_0 R_A + \frac{2\pi}{c^2} k^2 R_A^2 \quad (7)$$

$T_a$  为合成孔径时间长度。

令  $k\tau = f$ , 再将式(6)写为卷积形式<sup>[13]</sup>:

$$S(f, t) = \text{rect} \left[ \frac{t}{T_a} \right] \text{rect} \left[ \frac{f}{kT_p} \right] \times \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{c} (f + f_c) R_A \right\} \otimes \exp \left\{ -j\pi \frac{f^2}{k} \right\} \quad (8)$$

式中  $\otimes$  表示卷积。

采用“驻定相位法”对式(8)做方位FFT变换, 并省略常数相位项和相位系数, 解线频调后回波信号的二维频域表达式为(中间推导过程, 可参考文献[7]中式(4)~式(9)):

$$S(f, f_a) = \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} (f + f_c) R_{\text{ref}} \right\} \times \exp \left\{ -j2\pi \frac{R_{Ri} \sec(\theta_{R0}) + R_{Ti} \sec(\theta_{T0})}{\lambda} \right\} \times \exp \left\{ -j\pi \frac{(\lambda f_a)^2}{c^2} \frac{f^2}{f_{dr}(R_{Ri}, R_{Ti})} \right\} \times \exp \left\{ -j2\pi \frac{R(f_a; R_{Ri}, R_{Ti})}{c} f \right\}$$

$$\exp\left\{-j\pi\frac{(f_a - f_{dc})^2}{f_{dr}(R_{Ri}, R_{Ti})}\right\} \otimes \exp\left\{-j\pi\frac{f^2}{k}\right\} \quad (9)$$

式中 第1、2项为常数相位相；第3项为二次距离压缩项；第4项为距离徙动项；第5项为方位多普勒项；第6项为发射信号的频域形式； $R$ 为目标回波在方位频域的距离延迟，且：

$$R(f_a; R_{Ri}, R_{Ti}) = R_{Ri} \sec \theta_{Ri} + R_{Ti} \sec \theta_{Ti} - \frac{\lambda}{2f_{dr}(R_{Ri}, R_{Ti})}(f_a^2 - f_{dc}^2) \quad (10)$$

## 2 提取频率变标因子

由式(10)可以看出，在频率域双基地SAR点目标回波的延迟时间是点目标到载机距离和方位多普勒频率的函数。对于确定的方位多普勒频率，不同距离单元的点目标，其回波延迟时间不同，是距离变量  $R_{Ri}$  和  $R_{Ti}$  的二维函数，因此不能像单基地SAR那样直接得到不受距离参数影响的变标因子。但是对于平移不变双基地SAR，点目标到载机的距离变化量  $\Delta R$  是相同的，因此如果能将点目标回波的延迟时间转化为  $\Delta R$  和方位多普勒频率的函数，那么就有可能得到不受距离参数影响的变标因子。

$$\text{令 } K(f_a; R_{Ri}, R_{Ti}) = -\frac{\lambda}{2f_{dr}(R_{Ri}, R_{Ti})}(f_a^2 - f_{dc}^2) \text{ 表示}$$

式(10)中点目标回波在参考距离基础上的距离徙动，再将式(3)代入并化简即可得到：

$$K(f_a; R_{Ri}, R_{Ti}) = \lambda^2 \left[ \frac{(R_{R0} + \Delta R) + (R_{T0} + \Delta R)}{v^2 \cos \theta_{R0}(R_{R0} + \Delta R) + v^2 \cos \theta_{T0}(R_{T0} + \Delta R)} \right] \times (f_a^2 - f_{dc}^2) \quad (11)$$

在  $\Delta R = 0$  附近，对  $K(f_a; R_{Ri}, R_{Ti})$  进行泰勒展开，并保留线性项：

$$K(f_a; R_{Ri}, R_{Ti}) = K(f_a; R_{R0}, R_{T0}) + K_1(f_a; R_{R0}, R_{T0}) \Delta R \quad (12)$$

$$K_1(f_a; R_{R0}, R_{T0}) = \left. \frac{dK(f_a; R_{Ri}, R_{Ti})}{d(\Delta R)} \right|_{\Delta R=0} = \frac{\lambda^2}{2} \frac{(R_{R0} + R_{T0})D_0 - R_{R0}R_{T0}D_1}{D_0^2} \quad (13)$$

式中

$$D_0 = v^2 \cos \theta_{R0} R_{T0} + v^2 \cos \theta_{T0} R_{R0}$$

$$D_1 = v^2 \cos \theta_{R0} + v^2 \cos \theta_{T0}$$

根据式(12)，目标回波在方位频域的距离延迟  $R(f_a, R_{Ri}, R_{Ti})$  可以重写为：

$$R(f_a; R_{Ri}, R_{Ti}) = 2R_{ref} - \frac{\lambda}{2f_{dr}(R_{R0}, R_{T0})} \times$$

$$(f_a^2 - f_{dc}^2) + \frac{\Delta R}{A} (\sec \theta_{R0} + \sec \theta_{T0}) \quad (14)$$

$$\text{式中 } A = 1 / \left[ 1 + \frac{K_1(f_a; R_{R0}, R_{T0})}{(\sec \theta_{R0} + \sec \theta_{T0})} \right].$$

从式(14)可以看出，平移不变双基地SAR的点目标回波的距离延迟可以分解为两个部分， $2R_{ref} - \frac{\lambda}{2f_{dr}(R_{R0}, R_{T0})}(f_a^2 - f_{dc}^2)$  为点目标回波距离延迟曲线中与参考点的回波距离延迟曲线完全重合的部分，而  $\frac{\Delta R}{A} (\sec \theta_{R0} + \sec \theta_{T0})$  则表示距离徙动差，变标工作的中心问题就是在频率域补偿掉该部分。此时系数  $A$  只是方位多普勒频率的函数，而与距离变化量无关， $A$  即为平移不变双基地SAR的频率变标因子。

将式(14)代入式(9)，并省略常数相位项和相位系数，回波信号的二维频域表达式可重写为：

$$S(f, f_a) = \exp\left\{-j\pi\frac{(\lambda f_a)^2}{c^2} \frac{f^2}{f_{dr}(R_{Ri}, R_{Ti})}\right\} \times \exp\left\{-j\frac{2\pi}{c} \left[ \frac{\Delta R (\sec \theta_{R0} + \sec \theta_{T0})}{A} \right] f\right\} \times \exp\left\{-j\frac{2\pi}{c} \left[ -\frac{\lambda}{2f_{dr}(R_{R0}, R_{T0})} (f_a^2 - f_{dc}^2) \right] f\right\} \times \exp\left\{-j\pi\frac{(f_a - f_{dc})^2}{f_{dr}(R_{Ri}, R_{Ti})}\right\} \otimes \exp\left\{-j\pi\frac{f^2}{k}\right\} \quad (15)$$

## 3 双基地SAR频率变标算法

将得到的平移不变双基地SAR的频率变标因子应用于FS算法，再根据平移不变双基地SAR的回波信号模型推导出新的双基地SAR匹配函数，就可以将线性FS成像算法推广应用到平移不变双基地SAR领域。

平移不变双基地SAR FS算法流程图如图2所示，其计算流程和效率与单基地SAR FS算法<sup>[13]</sup>完全相同，各步骤匹配函数如下。

(1) 频率变标函数。以  $A$  为变标因子，引入频率变标函数为：

$$H_{IF}(f, f_a) = \exp\left\{j\pi\frac{f^2}{k}(1-A)\right\} \quad (16)$$

(2) 剩余视频相位校正函数为：

$$H_{RVPC}(y, f_a) = \exp\left\{-j\pi\frac{ky^2}{A}\right\} \quad (17)$$

即可消除置斜处理项。

(3) 逆频率变标函数为：

$$H_{\text{IFS}}(f, f_a) = \exp\left\{j\pi \frac{Af^2}{k}(A-1)\right\} \quad (18)$$

用以消除频率变标引入的二次相位误差项。

频率变标后的信号处理主要有4步, 距离徙动校正、二次距离压缩和方位压缩函数分别为:

$$H_{\text{RCMC}}(f, f_a) = \exp\left\{-j\frac{2\pi}{c}\left[\frac{\lambda A}{2f_{\text{dr}}(R_{R0}, R_{T0})}(f_a^2 - f_{\text{dc}}^2)\right]f\right\} \quad (19)$$

$$H_{\text{SRC}}(f, f_a) = \exp\left\{j\pi \frac{(\lambda f_a)^2}{c^2} \frac{A^2 f^2}{f_{\text{dr}}(R_{R1}, R_{T1})}\right\} \quad (20)$$

$$H_a(y, f_a) = \exp\left\{j\pi \frac{(f_a - f_{\text{dc}})^2}{f_{\text{dr}}(R_{R1}, R_{T1})}\right\} \quad (21)$$

然后作逆方位傅里叶变换, 从而得到场景图像。

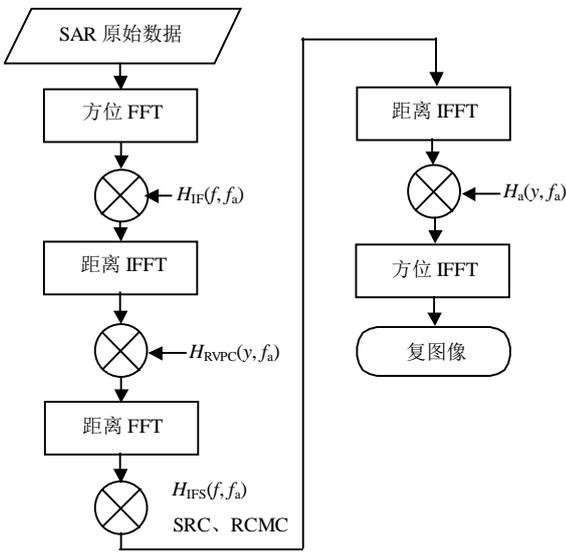
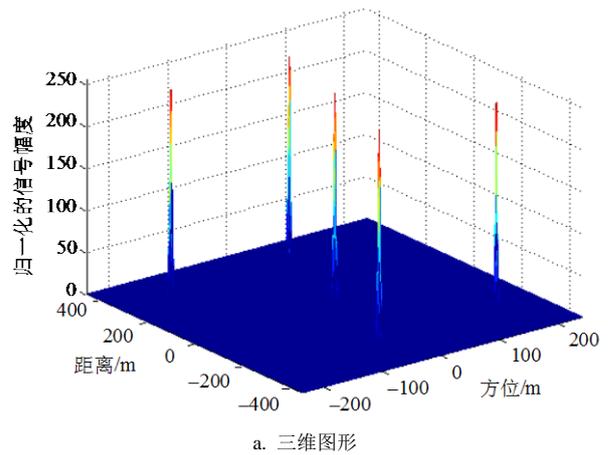


图2 FS算法流程

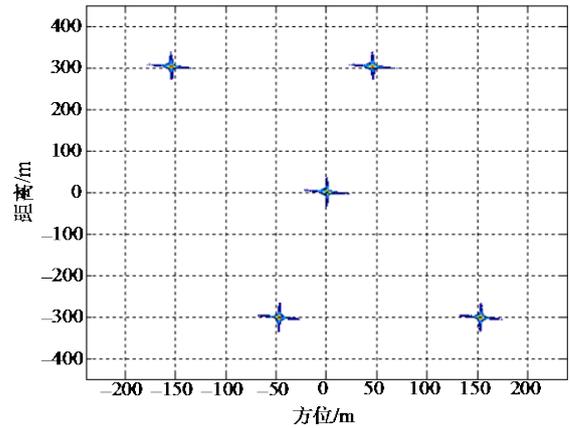
### 4 仿真结果及和误差分析

利用计算机仿真对本文提出的线性FS算法进行仿真验证。仿真中发射机天线跟随接收系统天线运动, 并完全覆盖发射系统的天线照射足迹。系统仿真参数如下: 载波频率为3.2 GHz, 脉冲重复频率为600 Hz, 信号带宽为50 MHz, 双基地角为15°, 发射机斜视角为20°, 接收机天线直径为2.8 m, 飞机速度都为140 m/s, 目标到发射机和接收机的距离分别为6 000 m和3 500 m。点目标以参考点为中心均匀分布, 距离向间隔300 m, 方位向间隔100 m。

采用本文的FS算法成像结果如图3所示, 从图3b中可以看出, 点目标相对位置正确。图4为图3中放大后的远端点目标, 可见远离参考点的点目标也都聚焦良好。



a. 三维图形



b. 俯视图

图3 FS算法多目标仿真结果

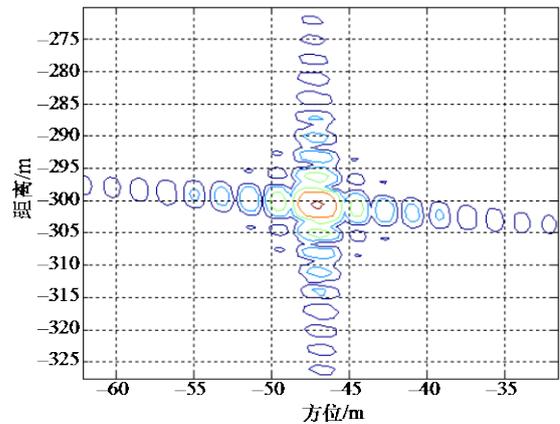


图4 放大的远端点目标

在对解线频调后的目标不进行频率变标处理的情况下, 相同坐标处的远端点目标的仿真结果如图5所示, 距离徙动差已经造成点目标的散焦。

表1列出了FS算法仿真中测绘带近端、中心和远端点目标的性能指标(单视), 表中“Res”表示实际仿真计算得出的分辨率。从表1中可以很明显地看出, 积分副瓣比(ISLR)和峰值副瓣比(PSLR)都在合理的范围之内, 能够很好地满足双基地SAR成像的要求, 测绘带近端点目标的性能与测绘带中心点目标的性能没有明显的差异, 这说明本文的双基地

SAR线性FS算法能很好地抑制雷达系统的距离空变特性。

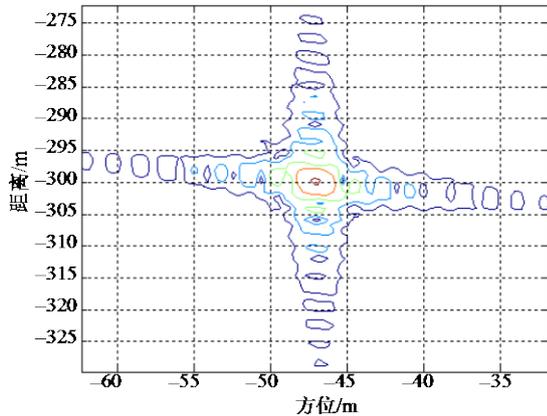


图5 没有采用频率变标的仿真结果

表1 点目标聚焦性能指标

目标	PSLR/dB		ISLR/dB		Res/m	
	距离	方位	距离	方位	距离	方位
近	-13.23	-13.10	-10.41	-11.53	3.23	1.86
中	-13.28	-13.44	-10.07	-11.84	3.12	1.75
远	-13.26	-13.15	-10.35	-11.68	3.20	1.86

## 5 结束语

本文利用平移不变模式双基地SAR回波信号距离徙动的特点,进行了距离徙动的线性近似,得到了不受距离空变性影响的平移不变模式双基地SAR的FS因子,提出了平移不变双基地SAR FS算法,分析了距离徙动线性近似误差对算法的影响。通过计算机仿真实现了算法的流程,验证了算法的有效性。本文的研究方法适用于使用解线频调操作的小斜视角和小场景双基地SAR成像。本文采用回波信号模型为二阶距离展开模型,文献[14]对该模型引起的误差进行了详细的讨论,在此仅将结论引用如下:“在双基地体制下,随着双基地角的迅速增大,距离误差将变得非常小。因此二阶距离展开模型对于双基地SAR成像处理,与单基地SAR相比同样适用。”

### 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.  
TANG Zi-yue, ZHANG Shou-rong. Principal of bistatic SAR system[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [2] SHAO T G, WANG J G. Analysis of resolution of bistatic SAR[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2007, 5(4): 255-259.

- [3] 何友,蔡复青,唐小明,等.双/多基地SAR发展评述[J].雷达科学与技术,2008,6(1):1-8.  
HE You, CAI Fu-qing, TANG Xiao-ming, et al. An overview of the development of bistatic/multistatic SAR[J]. Radar Science and Technology, 2008, 6(1): 1-8.
- [4] YATES G, HORNE A M, BLAKE A P, et al. Bistatic SAR image formation[C]//Proc EUSAR '04. Ulm, Germany: [s.n.], 2004: 581-584.
- [5] WALTERSCHEID I, ENDER J. Geometry and system aspect for a bistatic airborne SAR-experiment[C]// Proc EUSAR'04. Ulm, Germany: [s.n.], 2004: 567-570.
- [6] ENDER J, WALTERSCHEID I, BRENNER A R. New aspects of bistatic SAR: Processing and experiments[C]// Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium. Alaska, USA: [s.n.], 2004: 1758-1762.
- [7] XIAN Li, XIONG Jin-tao, HUANG Yu-lin, et al. Research on airborne bistatic SAR squint imaging mode algorithm and experiment data processing[C]//Proc 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. [S.l.]: NSTL, 2007: 618-621.
- [8] YANG Liu-en, WANG Jian-guo, XU San-yuan. Bistatic SAR imaging algorithm based on phase-tracing[C]//Proc. 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. [S.l.]: NSTL, 2007: 626-629.
- [9] HENDER J H G. A step to bistatic SAR processing[C]// Proc EUSAR '04. Ulm, Germany: [s.n.], 2004: 359-364.
- [10] ENDER J, WALTERSCHEID I, BRENNER A R. Bistatic SAR-translational invariant processing and experimental results[J]. Radar Sonar Navig, 2006, 153(3): 177-183.
- [11] WALTERSCHEID I, BRENNER A R, ENDER J. Bistatic SAB processing using an Omegar K type algorithm[C]// Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seoul, Korea: [s.n.], 2005: 1064-1067.
- [12] WALTERSCHEID I, ENDER J. New results on bistatic synthetic aperture radar[J]. IEE Electronics Letters, 2004, 40(19): 1224-1225.
- [13] 保铮,邢孟道,王彤.雷达成像技[M].北京:电子工业出版社,2005.  
BAO Zheng, XING Men-dao, WANG Tong. Radar imaging technique[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [14] 张升康,杨汝良.双基地合成孔径雷达扩展Chirp Scaling成像算法[J].中国科学院研究生院学报,2008,25(1):101-109.  
ZHANG Sheng-kang, YANG Ru-liang. An extended chirp scaling algorithm for bistatic synthetic aperture radar imaging formation[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008, 25(1): 101-109.

编辑 漆蓉