

星载 SAR 方位向频率与多普勒频率的差异 及其对成像分辨率的影响

李 树^{1,2}, 赵晓林¹, 李 枫³

(1. 清华大学 电子工程系, 北京 100084; 2. 空军装备研究院, 北京 100085; 3. 西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘 要:为研究一种典型双基地结构 SAR 的精细成像算法。通过精确的方位频率表达式,详细比较了多普勒频率与方位频率的区别和联系。以往在合成孔径成像处理中通常以成像单元的多普勒频率代替方位频率,对实际精细成像的方位分辨率影响不大,误差一般都在 4% 以内;但是,在大的斜视角、大的发射信号调频率、波长较长等参数条件下如果忽略 2 种频率的差异有可能引起高达 10% 甚至 27% 以上的方位分辨率误差。只有针对不同参数的 SAR 系统和不同的成像精度要求,才能确定是否可以用多普勒频率代替方位频率。仿真结果验证了本文方法的有效性。

关键词:双基地;合成孔径雷达;多普勒频率;方位频率;方位分辨率

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.03.007

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)03-0032-05

双(多)基地 SAR 与传统的单基地体制相比具有明显的“四抗”优点,国内外关于多基地系统的研究在理论和工程 2 方面正在兴起^[1-3]。在经典的成像算法 RD 算法^[4-6]和 Chirp Scaling 算法^[7-9]及其推广应用,都不加区别地用 Doppler 频率取代方位频率进行方位匹配滤波,这在一般参数条件下对实际成像的方位分辨率影响不大,分辨率误差通常小于 4%,如果系统的某些参数如调频率、斜视角和波长的取值较大,不考虑这种差异将使实际分辨率具有高达 10% 甚至 27% 以上的误差。因此,本文对此类问题进行了详细研究。

1 双基地 SAR 的信号模型

双基地的空间布局结构种类有许多^[1-3],本文选择同轨卫星双基地结构,采用沿轨道飞行方向发射天线在前、接收天线跟随而且 2 天线具有相同斜视模式并满足冗余照射的布局,见图 1。分析点目标 $D(x_0, y_0, 0)$, 设 θ_{ST} 和 θ_{SR} 、 β_T 和 β_R ($\beta_T \leq \beta_{T(3dB)}$, $\beta_R \leq \beta_{R(3dB)}$) 分别为发射、接收天线的斜视角与波束角,两天线的俯角大约都等于 α_{pitch} , 卫星轨道高为 H 。冗余照射必须满足式(1)。

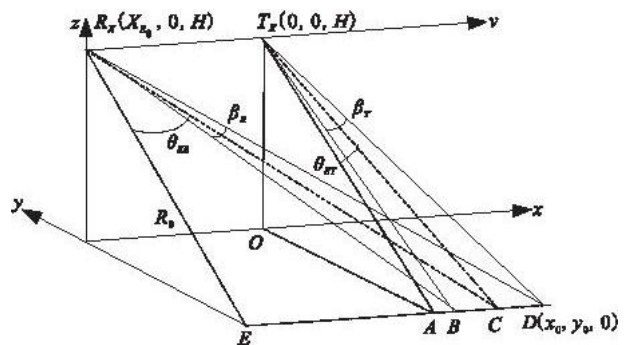


图 1 同轨双基地合成孔径雷达的几何模型

Fig.1 The geometric model of bistatic SAR in the same trajectory

$$R_0 [\tan(\theta_{ST} + \beta_T/2) - \tan(\theta_{ST} - \beta_T/2)] \geq R_0 [\tan(\theta_{SR} + \beta_R/2) - \tan(\theta_{SR} - \beta_R/2)] = L_s \quad (1)$$

式中: L_s 为合成孔径长度; R_0 为点目标 D 至平台轨线的最短斜距。式(1)的右边可写为:

* 收稿日期:2007-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60572151)

作者简介:李 树(1970-),男,山西大同人,高级工程师,博士(后),主要从事合成孔径雷达成像理论,数据融合技术研究. E-mail:lishooon@sina.com

$$L_s = R_0 \frac{\sin\beta_R}{\cos(\theta_{SR} + \beta_R/2) \cos(\theta_{SR} - \beta_R/2)} \quad (2)$$

当 $\theta_{SR} \gg \beta_R/2$ 且 β_R 较小时,式(2)可简化为:

$$L_s \approx \frac{R_0 \beta_R}{\cos^2 \theta_{SR}} = \frac{H\beta_R}{\cos^2 \theta_{SR} \cos\alpha_{pitch}} \quad (3)$$

设一个合成孔径内的时间 $t \in [-T_s/2, T_s/2]$, R_{mT} 、 R_{mR} 和 R_T 、 R_R 分别表示发射和接收天线在一个合成孔径内的中心斜距和瞬时斜距, $R_{sum}(t, R_0)$ 表示双基地天线在 t 时刻的距离和。接收天线和发射天线的瞬时斜距为 $R_R(t; R_0) = \sqrt{R_{mR}^2 + (vt)^2 - 2R_{mR}vt\sin\theta_{SR}}$, $R_T(t; R_0) = \sqrt{R_{mT}^2 + (vt)^2 - 2R_{mT}vt\sin\theta_{ST}}$ 。

设发射 chirp 信号,接收信号混频后得到的中频信号为:

$$S_s(\tau, t; R_0) = \exp\left[-j\pi k_R \left[\tau - \frac{R_{sum}(t; R_0)}{c}\right]^2\right] \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda} R_{sum}(t; R_0)\right] \quad (4)$$

2 瞬时方位频率的分析

式(4)中回波的相位记为 $\Phi_0(\tau, t)$, 则回波的瞬时方位频率为:

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_0(\tau, t)}{dt} = \left\{ 1 - \frac{k_R \lambda}{c} \left[\tau - \frac{R_{sum}(t; R_0)}{c}\right] \right\} f_d \quad (5)$$

双基地系统在 t 时刻的距离和为:

$$R_{sum}(t; R_0) \approx (R_{mT} + R_{mR}) - \lambda(f_{dT} + f_{dR})t - \frac{\lambda}{2}(f_{RT} + f_{RR})t^2 - \frac{\lambda}{6}(f_{RT} + f_{RR})t^3 = R_m - \lambda f_{dc}t - \frac{\lambda}{2}f_R t^2 - \frac{\lambda}{6}f_R t^3 \quad (6)$$

式中 $R_m = R_{mT} + R_{mR} = R_0 \left(\frac{1}{\cos\theta_{ST}} + \frac{1}{\cos\theta_{SR}}\right)$, 因此可得:

$$\tau = \frac{R_{sum}(t, R_0)}{c} \approx \tau - \frac{1}{c} \left[R_m - \lambda f_{dc}t - \frac{\lambda}{2}f_R t^2 \right] = \left(\tau - \frac{R_m}{c} \right) + \frac{\lambda}{c}f_{dc}t + \frac{\lambda f_R}{2c}t^2 \quad (7)$$

而 $f_d \approx f_{dc} + f_R t + 0.5f_R t^2$ 中的多普勒参数容易求得^[3,6] $f_{dc} = \frac{v}{\lambda}(\sin\theta_{SR} + \sin\theta_{ST})$, $f_R = \frac{v^2}{\lambda R_0}(\cos^3\theta_{SR} + \cos^3\theta_{ST})$,

$f_R = -\frac{3v^3}{\lambda R_0^2}(\cos^4\theta_{SR}\sin\theta_{SR} + \cos^4\theta_{ST}\sin\theta_{ST})$, 定义 $\tau - \frac{R_m}{c} = \Delta\tau$, 并忽略 t 的3次及以上次项, 可由式(6)得出方位频率为:

$$f_a \approx \left(1 - \frac{\lambda k_R}{c} \Delta\tau\right) f_{dc} + \left[\left(1 - \frac{\lambda k_R}{c} \Delta\tau\right) f_R - \frac{\lambda^2 k_R}{c^2} f_{dc}^2 \right] t + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\lambda k_R}{c} \Delta\tau\right) f_R - \frac{3\lambda^2 k_R}{c^2} f_{dc} f_R \right] t^2 \quad (8)$$

从式(8)可以看出,方位频率并不等同于多普勒频率,见图2。二者有如下主要差别:①若 $\Delta\tau \neq 0$, 对应的距离和单元不在波束照射中心,其方位中心频率相当于从 f_{dc} 移到了 $\left(1 - \frac{\lambda k_R}{c} \Delta\tau\right) f_{dc}$; ②方位 chirp 率从 f_R 变为 $\left[\left(1 - \frac{\lambda k_R}{c} \Delta\tau\right) f_R - \frac{\lambda^2 k_R}{c^2} f_{dc}^2 \right]$, 其值与距离 chirp 率、多普勒中心频率以及 $\Delta\tau$ 密切相关。

对于单基地 SAR, 前2项的结论与式(8)完全相同。容易计算出双基地系统的多普勒带宽和方位频率带宽分别为:

$$B_d \approx |f_R T_s|, B_a \approx \left| \left[\left(1 - \frac{\lambda k_R}{c} \Delta\tau\right) f_R - \frac{\lambda^2 k_R}{c^2} f_{dc}^2 \right] T_s \right| \quad (9)$$

对于双基地 SAR, 2种方位向频率导致的方位分辨率差异为:

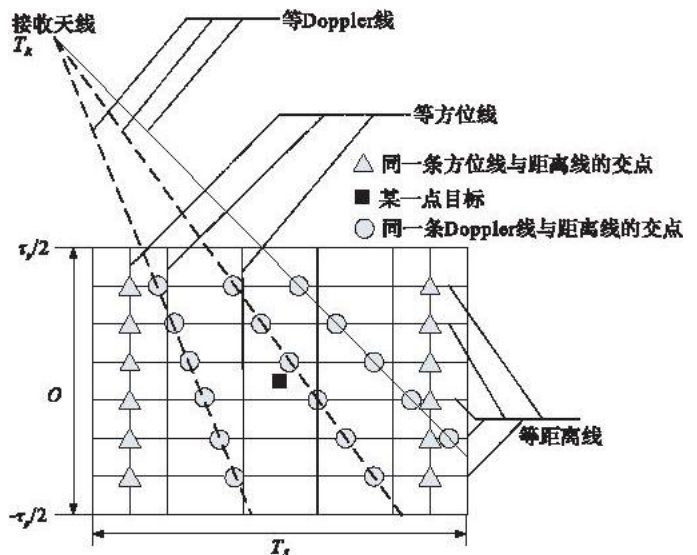


图2 合成孔径雷达方位线与 Doppler 线关系示意图
Fig. 2 The relationship of Iso-azimuth line and Iso-Doppler line

$$\Delta\rho = v \left| \frac{1}{B_d} - \frac{1}{B_a} \right| \approx \rho_d \left| \frac{\frac{\lambda k_R}{c} \Delta\tau + \frac{\lambda k_R H}{c^2 \cos \alpha_{\text{pitch}} (\cos^3 \theta_{SR} + \cos^3 \theta_{ST})^2}}{1 - \frac{\lambda k_R}{c} \Delta\tau + \frac{2\lambda k_R H}{c^2 \cos \alpha_{\text{pitch}} (\cos^3 \theta_{SR} + \cos^3 \theta_{ST})^2}} \right| \quad (10)$$

容易求出传统的以多普勒频率计算的方位分辨率 $\rho_d = \frac{\lambda H}{L_s (\cos^3 \theta_{SR} + \cos^3 \theta_{ST}) \cos \alpha_{\text{pitch}}}$ 。

3 仿真及分析

不失一般性,卫星轨道选取^[5,10]在遥感中常用太阳同步近圆轨道,卫星无机动,假设卫星轨道摄动和姿态扰动已经经过良好的数据处理系统进行了保精度的补偿,运动模型服从二体运动 Kepler 轨道约束条件。主要仿真参数选择为(综合参考了 Radarsat-1 和 Carrara^[7]提供的部分数据):地球平均半径 $R_e = 6.378\ 145 \times 10^6$ m,地心引力常数(含大气质量) $\mu = 3.986\ 005 \times 10^{14}$ m³/s²,轨道高 $H = 792$ km,轨道倾角 $\theta_i = 98.6^\circ$,接收天线的斜视角 $\theta_{SR} = 15^\circ$,发射天线的斜视角 $\theta_{ST} = 5^\circ$,2 天线波束俯仰角约相同 $\alpha_{R\text{pitch}} \approx \alpha_{T\text{pitch}} = 45^\circ$,接收波束宽度 $\beta_R = 2^\circ$,发射信号波长 $\lambda = 25$ cm,发射 LFM 信号的 chirp 率 $K_R = 0.7 \times 10^6$ Hz/ μs ,发射信号的脉冲宽度 $\tau_p = 43$ μs 。

为了更详细了解 SAR 系统在不同的参数条件下 2 种频率的差异及其对方位分辨率的影响程度,以上述仿真条件作为一组基本参数进行变参数分析,把 SAR 的方位频率和多普勒频率在一个合成孔径内对方位分辨率的影响反映在表 1 和表 2 中。

表 1 方位频率与多普勒频率的差异对双基地 SAR 方位向分辨率的影响

Tab. 1 Azimuth resolution error caused by the differences of the two frequencies in a coherent integral interval for bistatic SAR

基本参数	双基地参数变化		
$\frac{\Delta\rho}{\rho_d} = (2.4 - 3.6)\%$	及其对分辨率的影响 ($\frac{\Delta\rho}{\rho_d}\%$)		
$H = 7.89 \times 10^5$ m	$H = 7.89 \times 10^5$ m (0.3)%	$H = 2 \times 10^5$ m (0.45 - 1.15)%	$H = 6 \times 10^5$ m (1.8 - 2.8)%
$\theta_{SR} = 15^\circ$	$\theta_{SR} = 20^\circ$ (4.75 - 5.69)%	$\theta_{SR} = 12^\circ$ (1.61 - 2.71)%	$\theta_{SR} = 8^\circ$ (0.8 - 1.7)%
$\theta_{ST} = 5^\circ$	$\theta_{ST} = 12^\circ$ (4.81 - 6.22)%	$\theta_{ST} = 10^\circ$ (4.12 - 5.43)%	$\theta_{ST} = 8^\circ$ (3.40 - 4.61)%
$\alpha_{\text{pitch}} = 45^\circ$	$\alpha_{\text{pitch}} = 50^\circ$ (2.88 - 3.75)%	$\alpha_{\text{pitch}} = 40^\circ$ (2.21 - 3.31)%	$\alpha_{\text{pitch}} = 30^\circ$ (1.95 - 3.02)%
$K_R = 0.7 \times 10^{12}$ Hz/s	$K_R = 0.7 \times 10^{13}$ Hz/s (20 - 27)%	$K_R = 0.7 \times 10^{11}$ Hz/s (0.25 - 0.37)%	$K_R = 0.7 \times 10^{10}$ Hz/s (0.025 - 0.038)%
$\tau_p = 43 \times 10^{-6}$ s	$\tau_p = 50 \times 10^{-6}$ s (2.42 - 3.65)%	$\tau_p = 30 \times 10^{-6}$ s (2.50 - 3.55)%	$\tau_p = 20 \times 10^{-6}$ s (2.61 - 3.51)%
$\lambda = 5.7$ cm	$\lambda = 2$ cm (0.87 - 1.28)%	$\lambda = 25$ cm (9.81 - 14.23)%	$\lambda = 10$ cm (4.22 - 6.25)%
$\beta_R = 2^\circ$	$\beta_R = 1^\circ$ (2.62 - 3.45)%	$\beta_R = 1.5^\circ$ (2.52 - 3.50)%	$\beta_R = 3^\circ$ (2.28 - 3.70)%

由表 1 可知,多普勒频率与方位频率的差异对双基地成像分辨率的影响程度主要取决于发射信号的调频率和信号波长,当 $K_R = 0.7 \times 10^{13}$ Hz/s 时,分辨率误差高达 27%,而且调频率越大,这种误差越大;当 $\lambda = 25$ cm 时,分辨率误差高达 14.23%,而且波长越长,这种误差越大。

表 2 方位频率与多普勒频率的差异对单基地 SAR 方位向分辨率的影响

Tab.2 Azimuth resolution error caused by the differences of the two frequencies in a coherent integral interval for monostatic SAR

基本参数	双基地参数变化		
$\frac{\Delta\rho}{\rho_d} = (2.5 - 3.6)\%$	及其对分辨率的影响($\frac{\Delta\rho}{\rho_d}\%$)		
$H = 7.89 \times 10^5$ m	$H = 7.89 \times 10^5$ m (0 - 0.65)%	$H = 2 \times 10^5$ m (0.45 - 1.15)%	$H = 6 \times 10^5$ m (1.85 - 2.85)%
$\theta_{SR} = 10^\circ$	$\theta_{SR} = 20^\circ$ (12.2 - 13.8)%	$\theta_{SR} = 0^\circ$ (0 - 2.95)%	$\theta_{SR} = 25^\circ$ (20.3 - 22.1)%
$\alpha_{pitch} = 45^\circ$	$\alpha_{pitch} = 50^\circ$ (2.88 - 3.75)%	$\alpha_{pitch} = 40^\circ$ (2.21 - 3.31)%	$\alpha_{pitch} = 30^\circ$ (1.95 - 3.02)%
$K_R = 0.7 \times 10^{12}$ Hz/s	$K_R = 0.7 \times 10^{13}$ Hz/s (20.5 - 27.5)%	$K_R = 0.7 \times 10^{11}$ Hz/s (0.25 - 0.37)%	$K_R = 0.7 \times 10^{10}$ Hz/s (0.026 - 0.038)%
$\tau_p = 43 \times 10^{-6}$ s	$\tau_p = 50 \times 10^{-6}$ s (2.52 - 3.75)%	$\tau_p = 30 \times 10^{-6}$ s (2.58 - 3.57)%	$\tau_p = 20 \times 10^{-6}$ s (2.64 - 3.48)%
$\lambda = 5.7$ cm	$\lambda = 2$ cm (0.88 - 1.31)%	$\lambda = 25$ cm (10.2 - 14.2)%	$\lambda = 10$ cm (4.30 - 6.22)%
$\beta_R = 2^\circ$	$\beta_R = 1^\circ$ (2.65 - 3.48)%	$\beta_R = 1.5^\circ$ (2.55 - 3.55)%	$\beta_R = 3^\circ$ (2.35 - 3.75)%

由表 2 可知,多普勒频率与方位频率的差异对单基地成像分辨率的影响程度主要取决于斜视角大小、发射信号的调频率和信号波长,当 $\theta_{SR} = 25^\circ$ 时,分辨率误差高达 22.1%,而且斜视角越大,这种误差越大;当 $K_R = 0.7 \times 10^{13}$ Hz/s 时,分辨率误差高达 27%,而且调频率越大,这种误差越大;当 $\lambda = 25$ cm 时,分辨率误差高达 14.23%,而且波长越长,这种误差越大。同理,对正侧视情形可以方便地计算出, $\theta_{SR} = 0^\circ$, $K_R = 0.7 \times 10^{13}$ Hz/s, $\lambda = 25$ cm 时,分辨率误差高达 14.5%。

4 结束语

因为各种体制的合成孔径雷达的成像规律本质一致,不论单基地 SAR 还是多基地 SAR,也不论是否斜视,都存在 2 种频率的差异。波束横过点目标的历程从斜视开始,正侧视的历程是“斜视 - 正视 - 斜视”,斜视的历程都是斜视,点目标的方位频率和 Doppler 频率都随时间变化。从理论上讲,具有同一方位的点目标在同一时刻的方位频率不同,具有同一方位的点目标在同一时刻的多普勒频率也不同。由于斜视,在地域场景上波束横过处于同一坐标方位的点目标的时间不同,因而在同一条地域场景方位线上,各点目标的方位频率值不同,而波束同时横过的在同一条等 Doppler 线上的点目标却不在同一条方位线上。在方位频率的公式中, $\Delta\tau$ 的存在说明大时宽带宽积信号在远距收发路径中快时间和慢时间的耦合比较严重,经历的时延在精细成像中需要补偿“停 - 走”假设造成的平台方位向位移所占用的时间,即使在单基地正侧视体制中不存在斜视(见表 2),仍然存在 2 种频率的差异。成像时如果 2 种频率的差别对方位分辨率的影响很小,则这种差别可以忽略,否则,成像的精度会受到较大影响。从式(8)可以看出,利用方位频率构造方位向匹配滤波器,对算法的复杂度和计算量的增加不大,但是可以保证方位分辨率的精度。

参考文献:

- [1] 李 树. 双(多)基地合成孔径雷达系统理论研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2004.
LI Shu. Research on the System Theory of Bistatic(multistatic) Synthetic Aperture Radar [D]. Xi'an: Xidian University, 2004. (in Chinese)
- [2] 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 Ziyue, ZHANG Shourong. The Principle of Bistatic SAR System [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [3] 李 树, 王 鹰, 赵亦工. 多基地合成孔径雷达及其二维分辨率理论研究[J]. 系统工程与电子技术学报, 2004, 26(9): 1184 - 1188.

- LI Shu, WANG Ying, ZHAO Yigong. Theoretical Researches on Multi-static SARS Systems with Its Two Dimensional Resolution [J]. Systems Engineering & Electronics, 2004, 26(9): 1184-1188. (in Chinese)
- [4] Munson D C. A Signal Processing View of Strip-mapping Synthetic Aperture Radar [J]. IEEE Trans On Acoustics Speech, and Signal Processing, 1989, 37(12): 2131-2147.
- [5] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1991.
- [6] LI Shu, WANG Ying, ZHAO Yigong. An Exact Analysis of the Azimuth Resolution Characters of Squint SAR [J]. Journal of Systems Engineering & Electronics, 2004, 26(4): 1184-1188.
- [7] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms [M]. Boston: Artech House, 1996.
- [8] Raney R K, Runge H, Bamler R, et al. Precision SAR Processing Using Chirp Scaling [J]. IEEE Trans on GE, 1994, 32(4): 786-799.
- [9] Mittermayer J, Moreira A, Loffeld O. Spotlight SAR Data Processing Using the Frequency Scaling Algorithm [J]. IEEE Trans on GE, 1999, 37(5): 2198-2213.
- [10] 郗晓宁, 王威. 近地航天器轨道基础[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003.
QIE Xiaoning, WANG Wei. Fundamentals of Near-earth Spacecraft Orbit [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press House, 2003. (in Chinese)

(编辑:田新华)

Difference between Doppler Frequency and Azimuth Frequency and Its Influence on the Azimuth Resolution of Spaceborne SAR

LI Shu^{1,2}, ZHAO Xiao-lin¹, LI Feng³

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Air-defense Institute of Airforce Equipment Academy, Beijing 100085, China; 3. School of Electronics Engineering, Xidian University, Xi'an 710071 China)

Abstract: This paper compared the Doppler frequency and azimuth frequency in detail during the researching of a representative bistatic SAR imaging theory and found that using Doppler frequency instead of azimuth frequency in the general SAR processing with traditional imaging algorithms has little influence on the azimuth resolution of the fine imaging, the error is less than 4%. But if the differences between the two frequencies are neglected in the condition of larger squint angle, bigger transmit signal chirp rate, and longer wave length, the azimuth resolution error may reach as much as 10% even 27%. So, whether Doppler frequency can be used instead of azimuth frequency depends on the SAR systems with different specific parameters and the different requirements in specific imaging precision.

Key words: bistatic; SAR; Doppler frequency; azimuth frequency; azimuth resolution