

方位向电扫描 SAR 系统参数设计与仿真验证*

陈 祺, 黄海风, 董 臻, 梁甸农, 何 峰
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:方位向电扫描 SAR (Terrain Observation by Progressive Scans, TOPSAR) 是星载 SAR 的一种全新工作模式, 这种工作模式通过天线波束在方位向扫描, 在保持 ScanSAR 宽测绘带优点的同时, 解决了扇贝效应 (scalloping) 问题。针对这种工作模式要求天线在方位向和距离向都进行扫描的特点, 推导了方位分辨率与扫描周期的具体关系, 进而分析了系统参数的约束关系, 提出了适于工程设计的系统参数设计方法。最后, 用 TerraSAR-X 的参数进行了一组设计, 以该设计结果为输入参数, 运用 SBRAS (SpaceBorne Radar Advance Simulator) 进行了信号仿真, 仿真结果验证了方法的有效性。

关键词:扫描合成孔径雷达; 方位向电扫描合成孔径雷达; 参数设计; 仿真

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)05-0068-05

System parameter design of spaceborne TOPSAR and simulation verification

CHEN Qi, HUANG Haifeng, DONG Zhen, LIANG Diannong, HE Feng

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: TOPSAR (Terrain Observation by Progressive Scans) is a novel spaceborne SAR mode for wide-swath observation, which solves the scalloping problem of ScanSAR though steering antenna beam in azimuth direction. The relationship between azimuth resolution and cycle time of TOPSAR was derived. Furthermore, the constraint of parameters was analyzed and the flow of engineering parameter design was presented. Finally, a TerraSAR-X like sample was provided and a simulation was conducted with the design result in SBRAS (SpaceBorne Radar Advance Simulator). The results show the effectiveness of the design.

Key words: ScanSAR; TOPSAR (Terrain Observation by Progressive Scans); parameter design; simulation

ScanSAR 是星载 SAR 实现宽测绘带的重要工作模式, 而传统的 ScanSAR 由于方位向天线加权不均匀, 会受到扇贝效应的影响, 对扇贝效应进行补偿比较困难, 限制了传统的 ScanSAR 的应用^[1-2]。方位向电扫描 SAR 是星载 SAR 的一种全新工作模式, 该模式通过天线在方位向上扫描, 解决了传统 ScanSAR 系统的扇贝效应等问题。这种工作模式自从 2006 年由欧洲航天技术中心的 Attema 和意大利米兰理工大学的 Rocca 提出以后, 受到了广泛的关注。目前, 这种工作模式已经在 TerraSAR-X 上实验成功, 所得到的图像几乎完全没有扇贝效应。据报道, 这种工作模式也将计划用于欧空局 Sentinel-1 的 Interferometric Wide Swath (IWS) 工作模式^[3]。

在国内, 这种工作模式也受到了相关单位的重视, 纷纷展开了研究。早在 2005 年, 南京航空航天大学朱岱寅就曾经做过相关研究并进行了

机载实验, 但当时只考虑到可以通过扫描扩大成像区域, 并未考虑到通过在距离向多子带扫描可以扩展测绘带宽, 限制了以后的发展^[4]。在 TOPSAR (Terrain Observation by Progressive Scans) 概念提出以后, 国内许多学者也进行了研究, 但主要集中于单子带成像算法方面的研究^[5-8]。而这种工作模式分辨率较低, 对成像算法要求并不高, 其最大特点在于时序和系统性能方面的特点, 对其系统参数设计问题进行研究是很有意义的。

本文推导了方位分辨率与扫描周期的具体关系, 进而分析了系统参数间的约束关系, 根据约束关系, 得出了这种新模式的系统参数设计流程, 并以一组与 TerraSAR-X 相近的参数^[3], 对流程进行了说明, 给出了设计结果, 并用 SBRAS (SpaceBorne Radar Advance Simulator) 仿真系统进行了仿真^[9], 验证了设计方法的有效性。

* 收稿日期: 2012-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61101187)

作者简介: 陈祺 (1984—), 男, 云南嵩明人, 博士研究生, E-mail: jy02051161@163.com;

黄海风 (通信作者), 男, 副研究员, 博士, E-mail: h_haifeng@163.com

1 系统参数约束关系分析

在对方位向电扫描 SAR (Synthetic Aperture Radar) 进行工程设计时,距离向性能与传统条带模式和扫描模式类似,主要关注方位分辨率、方位模糊度(Azimuth Ambiguity to Signal Ratio, AASR)和系统灵敏度(Noise-Equivalent Sigma Zero, NESZ),对天线的要求主要关注扫描时序和扫描角度,本部分通过对时序关系的分析推导了分辨率与扫描周期的关系,说明了在信号处理角确定以后,方位分辨率与系统需要的扫描角度、沿方位向方位模糊度恶化程度和沿方位向的系统灵敏度恶化程度是一一对应的,进而分析了系统参数与系统性能的约束关系。

1.1 时序关系分析

为保证连续测绘,需要保证方位测绘带间有一定的重叠,设重叠率为 e ,可得

$$V_g^{(i)} T_B^{(i)} + k_\varphi^{(i)} T_B^{(i)} R_c^{(i)} - \vartheta_0^{(i)} R_c^{(i)} = V_g^{(i)} T(1 + e) \tag{1}$$

其中, V_g 卫星地速, k_φ 为天线转动角速率, T_B 为子测绘带的 burst 持续时间, R_c 为中心斜距离, ϑ_0 表示信号处理带宽对应的信号处理角,上标 i 表示第 i 个子带。 T 为扫描周期:

$$T = \sum_{i=1}^{N_s} T_B^{(i)} + T_C \tag{2}$$

其中, T_C 为考虑到星载雷达工作的阶数所需的切换时间。结合式(1)、(2)及方位分辨率公式^[10]

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\vartheta_0^{(i)}} \frac{V_g^{(i)}}{V_s} \left(1 + \frac{k_\varphi^{(i)} R_c^{(i)}}{V_g^{(i)}} \right) \tag{3}$$

可得

$$\rho_a = \left[(1 + e) \sum_{i=1}^{N_s} \rho_{a,strip}^{(i)} + \frac{\lambda}{2V_s T} \sum_{i=1}^{N_s} R_c^{(i)} \right] \frac{T}{T - T_C} \tag{4}$$

其中, $\rho_{a,strip}$ 为雷达在条带模式工作时的分辨率, λ 为雷达波长, V_s 为卫星速度。由于考虑各子测绘带方位分辨率一致,方位分辨率不区分于子测绘带。

上式说明,随着扫描周期的不同,方位向电扫描 SAR 系统的分辨率在很大一个范围内是可调的;不论周期多长,方位分辨率都存在一个极限

$\rho_{a,lim} = (1 + e) \sum_{i=1}^{N_s} \rho_{a,strip}^{(i)}$,因此分辨率不可能无限提高;另外,在信号处理角确定以后,方位分辨率与扫描时序将一一对应,方位分辨率的提高需要增加扫描周期,也就是在每个子带上工作的时间

增加,这样会使天线的扫描角度增加,扫描角度增加会导致天线波束不理想,从而使方位向图像存在轻微的不均匀,burst 边缘的方位模糊度和系统灵敏度与 burst 中心相比有一定的恶化。

1.2 方位模糊度和系统灵敏度分析

方位向电扫描 SAR 的方位模糊度可以用下式计算:

$$AASR(\varphi) = \frac{\sum_{m \neq 0} \int_{f_\varphi - \frac{B_a}{2}}^{f_\varphi + \frac{B_a}{2}} G_\varphi^2(f + m \cdot PRF) df}{\int_{f_\varphi - \frac{B_a}{2}}^{f_\varphi + \frac{B_a}{2}} G_\varphi^2(f) df} \tag{5}$$

其中, $B_a = \frac{4V_s}{\lambda} \sin(\frac{\vartheta_0}{2})$ 为处理带宽,与信号处理角 ϑ_0 对应, φ 为不同方位目标对应的扫描角, f_φ 为该扫描角对应的中心频率, $G_\varphi(\cdot)$ 为该扫描角对应的双程天线方向图,与天线的配置有关。在天线电扫描时,会受到栅瓣的影响而造成天线方向图不理想。因此,影响方位模糊度的主要因素是信号处理角和扫描角度,信号处理角主要影响方位 burst 中心的方位模糊度,扫描角度主要影响 burst 边缘方位模糊度的恶化程度,在进行设计时,需要对这两部分都进行考虑。

与条带模式相比,方位向电扫描 SAR 系统的系统灵敏度也主要受到天线扫描的影响。随着扫描角度的增大,天线的主瓣增益将会下降,从而影响 burst 边缘的系统灵敏度。在进行工程设计时,必须考虑由扫描带来的系统灵敏度恶化。

1.3 系统参数约束关系分析

通过以上分析可以看出,对方位向电扫描 SAR 参数进行设计时,扫描角度会影响到 burst 边缘方位模糊度和系统灵敏度的恶化程度,在工程设计时,需要重点加以考虑。对方位向电扫描 SAR 的 PRF 选择可以与聚束模式类似,只选择高于瞬时带宽的 PRF 即可,所以可以同条带模式和传统 ScanSAR 类似地选择波位,再通过信号处理的手段来解混叠^[1,11-12],主要需要考虑在波位选定以后的设计。在波位选定后,系统参数与系统性能之间的约束关系可以用图 1 来表示。

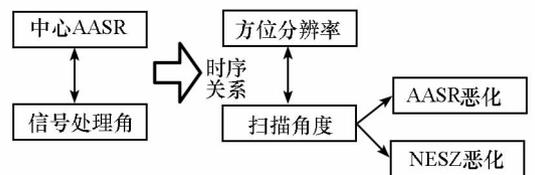


图 1 系统参数与系统性能的约束关系
Fig.1 Constraints between system parameters and performance

通过前面的分析可知,信号处理角对方位分辨率,方位模糊度和系统灵敏度都有一定的影响,但如果只考虑 burst 中心的方位模糊度,与常规条带模式一样,信号处理角与方位模糊度是一一对应的。在信号处理角确定的情况下,方位分辨率与扫描时序一一对应,从而与各波位的扫描角度一一对应,也就对应于 burst 边缘方位模糊度恶化情况和系统灵敏度恶化情况。也就是说,方位分辨率在一定范围内是可调的,但其调整都与方位向电扫描 SAR 需要的方位扫描角度、burst 边缘的方位模糊度恶化程度和系统灵敏度恶化程度相关。注意在一般情况下,要求方位向电扫描 SAR 这两个性能在 burst 边缘的恶化都小于 1dB^[3],这个恶化程度与 ScanSAR 相比要小得多,所以方位向电扫描 SAR 在系统性能的均匀程度仍然要比 ScanSAR 好得多。

2 系统参数设计流程

2.1 设计流程

由图 1 列出的关系可以看出,在系统参数设计时,以波位信息、卫星参数和雷达参数作为输入,首先需要根据中心方位模糊度要求确定信号处理角,从而确定了方位分辨率与扫描角度、burst 边缘方位模糊度和系统灵敏度恶化程度的对应关系;然后,在一定方位分辨率范围内,分析方位分辨率与扫描角度、burst 边缘方位模糊度和系统灵敏度的恶化程度的关系,就可以根据需求选择合适的分辨率以满足需要的系统性能;最后,根据选择的分辨率与时序要求,设计扫描速率和工作时间参数,从而完成设计。设计流程可以用图 2 表示。

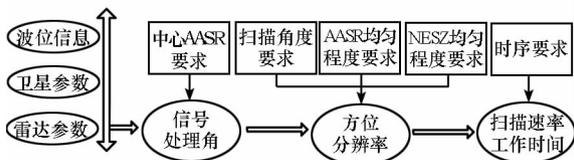


图 2 方位向电扫描 SAR 系统参数设计流程图

Fig. 2 Flowchart of TOPSAR system parameter design

2.2 设计实例

下面以一个与 TerraSAR-X 参数近似的实例来对方位向电扫描模式设计的具体方法进行介绍,该实例的卫星平台参数如表 1 所示,各子测绘带的参数如表 2 所示。

表 1 卫星平台参数

Tab. 1 Satellite platform parameters

参数名称	数值
卫星高度(km)	514
卫星速度(km/s)	7.608
中心频率(GHz)	9.65
天线长度(m)	4.8
方位模糊度要求(dB)	-25
重叠率	10%

表 2 子带相关参数

Tab. 2 Swath-dependent parameters

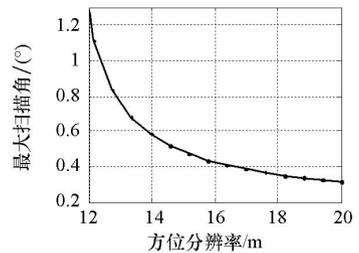
子带相关参数				
波位号	S1	S2	S3	S4
下视角(°)	35.3	37.13	38.85	40.48
PRF(Hz)	4096	3716	4096	3742
测绘带宽(km)	30.0	30.1	30.1	30.0
中心斜距(km)	643.1	660.4	678.3	696.9

2.2.1 信号处理角选择

信号处理角根据 burst 中心方位模糊要求进行选择,可以画出不同信号处理角下的方位模糊度,再进行选择^[1]。选择时,还需要注意,信号处理角不能过大,否则由于天线方向图的衰落,不能得到设计的分辨率,也会影响积分旁瓣比的峰值旁瓣比,一般设计需限制信号处理角要小于天线方向图的 3dB 宽度。

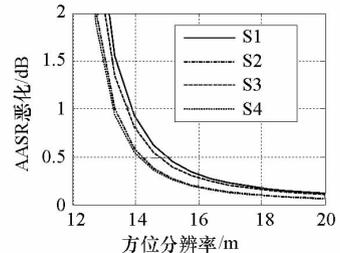
2.2.2 方位分辨率选择

根据(3)式,可以确定在不同扫描周期下可以达到的分辨率,并解出相关参数,从而确定分辨率与最大扫描角、burst 边缘的方位模糊度和系统灵敏度恶化程度的曲线如图 3 所示。



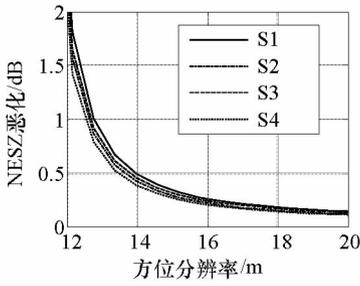
(a) 最大扫描角

(a) max steering angle



(b) AASR 恶化

(b) AASR deterioration



(c) NESZ 恶化

(c) NESZ deterioration

图3 不同分辨率下的扫描角和性能

Fig.3 Need steering angles and performance in different resolutions

从图3可以看出,如果按照 TerraSAR-X 系统的最大扫描角度 0.75° ,burst 边缘方位模糊度和系统灵敏度恶化都在 1dB 以内的要求^[3],那么分辨率要大于 14.0m;如果要使 burst 边缘方位模糊度和系统灵敏度恶化在 0.5dB 以内,则分辨率要大于 15.1m。本文按照 TerraSAR-X 选择的 16m 分辨率进行设计,则需要的扫描角在 0.45° 以内,burst 边缘方位模糊度恶化在 0.35dB 以内,系统灵敏度恶化在 0.3dB 以内。

2.2.3 时序设计

在选定分辨率以后,时序设计是一个确定的过程。首先按分辨率公式求出扫描速率:

$$k_\varphi^{(i)} = \left(\rho_a \frac{2\vartheta_0^{(i)}}{\lambda} \frac{V_s}{V_g^{(i)}} - 1 \right) \frac{V_g^{(i)}}{R_c^{(i)}} \quad (6)$$

然后,可按与文献[1,10]类似的方法,再把(1)、(2)式列方程组,求解时序;或直接按(4)式解出扫描周期,并代入(1)式求解出工作时间,就可以得到设计结果。

3 设计结果及仿真验证

3.1 设计结果

根据上述设计方法,考虑到阶数的影响,取

$$T_G = \sum_{i=1}^{N_s} N_{rank}^{(i)} / PRF^{(i)},$$

得到最后的设计结果及性能分析如表3所示。

从设计结果看,该设计方法既可以满足方位分辨率的要求,又可以满足方位模糊要求,同时单个 burst 的测绘范围都大于波束中心扫过的距离,满足连续测绘的要求,因此设计与优化方法是有效的。

表3 设计结果

Tab.3 Design results

子带	S1	S2	S3	S4
信号处理角($^\circ$)	0.32	0.28	0.32	0.28
扫描速率($^\circ/s$)	3.78	3.14	3.58	2.98
burst 时间(s)	0.2240	0.2476	0.2279	0.2516
回波数	912	920	928	942
阶数	17	16	18	17
中心 AASR(dB)	-25.0	-25.0	-25.0	-25.0
方位分辨率(m)	16	16	16	16
最大扫描角($^\circ$)	0.42	0.39	0.41	0.38
最大 AASR 恶化(dB)	0.33	0.2	0.29	0.19
最大 NESZ 恶化(dB)	0.26	0.22	0.24	0.2
单 burs 测绘长度(km)	7.49	7.49	7.48	7.48
波束中心扫过长度(km)	6.81	6.81	6.80	6.80
重叠率	10%	10%	10%	10%
扫描周期(s)		0.9686		
测绘带宽(km)		111.03		

3.2 仿真结果

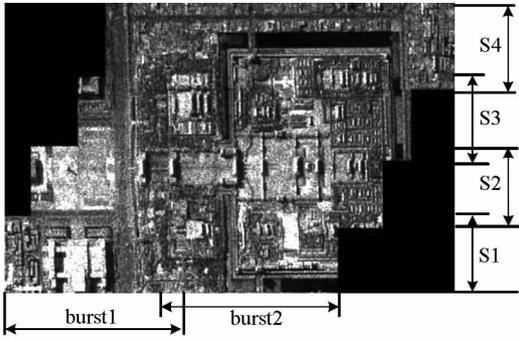
SBRAS 是本课题组研发的多任务分布式星载 SAR 仿真平台,可支持分布式星载 SAR 系统的电磁建模、回波仿真、信号处理和性能评估等功能^[9]。为验证设计结果,本文按照设计参数,用某地区光学图像的缩略图作为输入,场景大小为 $25\text{km} \times 100\text{km}$ (方位向 \times 距离向),场景采样间隔为 $10\text{m} \times 10\text{m}$ (方位向 \times 距离向),依托 SBRAS 仿真系统按设计结果进行了一组仿真,每个子带仿真了 2 个 burst,使用文献[12-13]中的子孔径 ECS 成像算法处理,拼接后结果如图4所示。

图中,(a)为原场景图片,(b)为经过 SBRAS 仿真,再进行处理和拼接后的结果,图中标出了各子带的图像和第一子带上两个 burst 成像的区域。拼接结果除了有一定的相干斑效应外,图像明暗与原图片保持一致,在方位向没有扇贝效应,说明了 TOPSAR 与 ScanSAR 相比的优势;整个图像的分辨率一致,距离向各子带有一定的重叠,方位向各 burst 之间有约 10% 的重叠,说明了本文设计结果的正确性。



(a) 原场景图片

(a) The original image



(b) SBRAS 仿真成像结果

(b) SBRAS simulation results

图 4 场景仿真结果

Fig. 4 Simulation results

4 结论

方位向电扫描 SAR 是一种星载 SAR 的全新的工作模式,它保持了 ScanSAR 宽测绘带的优点,并有效地解决了扇贝效应等问题。在对方位向电扫描 SAR 系统参数进行设计时,由于避开了传统 ScanSAR 中合成孔径时间对 burst 持续时间的制约,方位分辨率的选择有了更多的自由,但也增加了系统设计的复杂度。本文通过对这种新模式的时序关系分析,指出在信号处理角确定以后,该模式的方位分辨率与所需扫描角度、burst 边缘方位模糊度和系统灵敏度是一一对应的,并总结了系统参数与系统性能的统带关系。在此基础上,提出了适于工程设计的方位向电扫描 SAR 系统参数设计方法,并以一个与 TerraSAR-X 近似的实例进行了设计,设计结果的性能分析指标能够使各子带的方位分辨率一致,burst 中心方位模糊性能满足要求,burst 边缘方位模糊度恶化在 0.35dB 以内,系统灵敏度恶化在 0.3dB 以内,并保证了方位向 burst 间的重叠率要求。最后,依托本课题组的 SBRAS 仿真系统对设计结果进行了信号仿真,仿真结果能够正确拼接,图像分辨率一致,方位向各 burst 之间有 10% 的重叠,与设计目标相符合,验证了设计方法的有效性。

参考文献 (References)

- [1] Zan F D, Guarnieri A M. Topsar: terrain observation by progressive scan[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2352 - 2360.
- [2] 明峰,洪峻,吴一戎. ScanSAR 的 Scalping 辐射误差研究

- [J]. 电子与信息学报, 2006, 28 (10): 1806 - 1808.
- MING Feng, HONG Jun, WU Yirong. Study on scalping radiometric error in scanSAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28 (10): 1806 - 1808. (in Chinese)
- [3] Meta A, Prats P, Steinbrecher U, et al. First TOPSAR image and interferometry results with TerraSAR - X [R]. DLR - Microwaves and Radar Institute, 2007.
- [4] 朱岱寅,朱兆达. 方位扫描 SAR 区域成像研究[J]. 航空学报, 2005, 26(2): 208 - 213.
ZHU Daiyin, ZHU Zhaoda. study on patch mapping by azimuth scanSAR [J]. ACTA Aeronautica ET Astronautica SINICA, 2005, 26(2): 208 - 213. (in Chinese)
- [5] Bai X, Sun J, Hong W. On the TOPS mode spaceborne SAR [J]. Science China (Information Sciences), 2010, 40(3): 468 - 480.
- [6] 徐伟,邓云凯. 基于方位向预处理和后处理的 TOPSAR 成像方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 798 - 804.
XU Wei, DENG Yunkai. An imaging approach for TOPSAR data based on azimuth pre-processing and post-processing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33 (4): 798 - 804 (in Chinese)
- [7] 徐伟,邓云凯. 星载 TOPSAR 方位变标成像算法[J]. 电子学报, 2011, 39(4): 913 - 918.
XU Wei, DENG Yunkai. Processing of spaceborne TOPSAR data Using azimuth scaling [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2011, 39(4): 913 - 918. (in Chinese)
- [8] Xu W, Huang P, Deng Y. TOPSAR data focusing based on azimuth scaling preprocessing [J]. Advances in Space Research, 2011, 48: 270 - 277.
- [9] Wang M, Liang D, Huang H, et al. SBRAS-an advanced simulator of spaceborne radar [C]//Proceedings of IGARSS 2007, Barcelona, Spain, 2007: 4942 - 4944.
- [10] 陈祺. 方位向电扫描 SAR 系统设计与成像算法研究[D]. 国防科学技术大学, 2009.
CHEN Qi. Research on the system design and the imaging algorithm of TOPSAR [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] D'Aria D, Giudici D, Guarnieri M, et al. Optimizing azimuth antenna steering: beyond TOPSAR [C]//Proceedings of Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland, 2007: 23 - 27.
- [12] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, et al. A SAR processing algorithm for TOPS imaging mode based on extended chirp scaling [C]//Proceedings of IGARSS 2007, Barcelona, Spain, 2007: 148 - 151.
- [13] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, et al. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing 2010, 48(2): 770 - 780.
- [14] Cumming I G, Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data [M]. Artech House, 2005.
- [15] Monti-Guarnieri A, Guccione P. Optimal "Focusing" for low resolution scanSAR [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2001, 39(3): 479 - 491.