

SAR 渐进扫描模式波位线性设计方法

杨 威¹, 李春升¹, 陈 杰¹, 薛伶玲²

(1. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191;

2. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘要: 针对星载合成孔径雷达渐进扫描模式系统波位设计流程复杂、效率较低的问题, 首先对星载合成孔径雷达渐进扫描模式系统波位设计中一些尚未被关注的问题开展研究及论证, 包括方位向分辨率随距离向变化的特性、天线方位向偏扫引入栅瓣对方位模糊度的影响以及时序关系同观测效率之间的关系。在此基础上提出线性流程的波位设计方法, 该方法根据方位模糊度指标要求对脉冲重复频率进行优化选择, 增加了系统设计的自由度, 避免了迭代运算的过程, 提升了系统波位设计的能力。最后通过仿真验证了本文方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 波位设计; 线性流程; 方位向模糊度

中图分类号: TP 951

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.10.11

TOPSAR beam position design method based on linear flow

YANG Wei¹, LI Chun-sheng¹, CHEN Jie¹, XUE Ling-ling²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: Tackling the complexity and inefficiency in the system design of spaceborne terrain observation by progressive scans (TOPSAR) mode, this paper analyses some beam position design problems unattended before, including the variation of azimuth resolution with slant-range, the effects on azimuth ambiguity to the signal ratio (AASR) of antenna pattern grating lobes introduced by beam steering, and the relationship between timeline and observation efficiency. Then a novel system beam position design method is presented based on the linear flow, in which the selection of pulse repetition frequency is optimized according to the required AASR. The proposed method adds freedom and avoids iteration, thus improving the efficiency of system design. Finally, the validity of the method is justified by simulation results.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR); beam position design; linear flow; azimuth ambiguity to signal ratio (AASR)

0 引言

星载合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 近年来发展迅速, 伴随着天线波束形成技术的不断进步^[1-3], 各种新体制、新概念不断被提出。其中, 渐进扫描模式 (terrain observation by progressive scans, TOPSAR) 是近几年诞生的一种新的广域对地遥感观测模式, 和传统的 ScanSAR 模式相比较^[4], 其最大的优势在于缓解了“扇贝效应”及方位模糊度 (azimuth ambiguity to signal ratio, AASR)、等效噪声系数 (noise equivalent sigma zero, $NE\sigma_0$) 性能随方位向“空变”的现象, 提高了 SAR 图像的整体质量, 具备重要的应用前景^[5], 因此成为 SAR 领域研究的新的热点之一。

文献[6]首次提出了 TOPSAR 工作模式, 并对 TOPSAR 的工作方式和数据处理方法进行了分析。文献[7-8]对

TOPSAR 工作模式进一步开展了深入的研究, 并提出了一种基于扩展线性变标算法 (extended chirp scaling, ECS) 的成像算法。文献[9]首次利用 TerraSAR-X 的真实数据实现了 TOPSAR 数据的成像及干涉处理。之后, 文献[10-11]针对 TOPSAR 数据的处理方式, 对基于 ECS 的 TOPSAR 数据成像算法进行完善, 称之为方位基带变标算法 (baseband azimuth scaling, BAS) 算法。文献[12]提出的三步成像算法进一步丰富了 TOPSAR 数据的处理方式。但上述文献偏重于数据的获取和数据处理研究, 没有涉及系统设计等方面的研究。目前, 有关星载 TOPSAR 工作模式总体性能分析与设计的文献很少, 文献[13]首次对 TOPSAR 模式的系统总体性能和波位设计方法进行了分析, 提出一种迭代的系统波位设计方法, 但这种迭代方法在设计效率上具有不确定性。针对星载 TOPSAR 系统波位设计流程复杂、效率较

收稿日期: 2010-09-21; 修回日期: 2011-04-29。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2010CB731902) 资助课题

作者简介: 杨威 (1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为星载合成孔径雷达总体设计及处理。E-mail: yangweigigi@ee.buaa.edu.cn

低的问题,本文提出一种线性的系统波位设计方法,首先对方向分辨率随距离向变化特性、方位向天线偏扫产生的栅瓣对方位模糊度的影响以及 TOPSAR 方位向时序拼接同观测效率之间的联系等一些尚未被关注的问题进行了分析论证,在此基础上详细阐述了基于线性流程的系统设计方法,尤其是脉冲重复频率的优化选择方法,最后采用 TerraSAR 系统参数进行仿真实验,验证了方法的有效性。

1 TOPSAR 模式性能指标分析

文献[6]分析了 TOPSAR 模式分辨率的计算方法以及测绘带个数同方位向波束旋转角速率之间的限制关系。文献[13]较为详细地分析了分辨率、模糊度、测绘带等总体性能指标。但上述文献并没有关注方位向分辨率随距离向的空变特性、天线偏扫对方位模糊度的影响以及方位向时序拼接同观测效率之间的联系等问题,而这些问题和卫星战技术指标的实现及系统波位设计密切相关,因此本文首先针对上述问题进行分析。

1.1 方位向分辨率随距离向的空变特性

如图 1 所示,在 TOPSAR 工作模式下,波束沿方位向以一定的角速度 ω 由后至前进行主动扫描^[4],导致了两个结果:一是处于不同方位向位置的目标受到了整个天线方位向天线方向图的调制,抑制了 Scalloping 效应;二是方位向波束的主动扫描使方位向每一个点被照射的时间变短,方位向分辨率下降。图 2 给出了 TOPSAR 模式下方位向时频关系图,明显看出方位向波束由后至前的扫描导致目标积累时间变短,带宽变小。

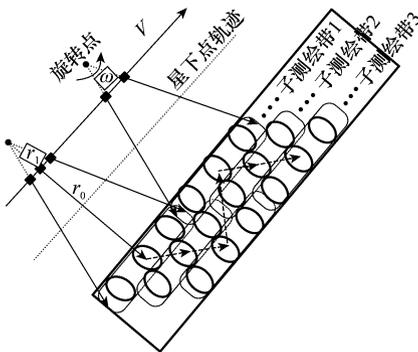
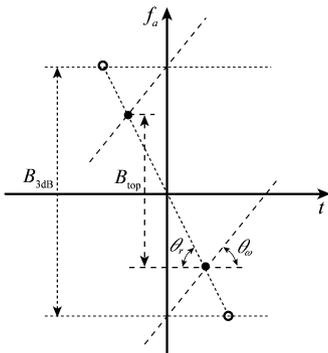


图 1 TOPSAR 模式工作示意图



.....: 方位向波束不扫描; ---: 方位向波束扫描。

图 2 TOPSAR 模式方位向时频关系图

令 $k_r = \tan \theta_r = 2v^2 / (\lambda r)$ 为多普勒调频率; $k_\omega = \tan \theta_\omega = 2v^2 / (\lambda r_1)$ 为波束旋转所引起的多普勒变化率; $B_{3dB} = 2v/L$ 为方位向 3 dB 波束宽度所对应的多普勒带宽, L 为天线的长度; r_1 为传感器和旋转点的最短距离, v 为等效速度。则由图 2 可知, TOPSAR 模式下每一点多普勒带宽 B_{top} 为

$$B_{top} = \frac{B_{3dB} \cos(\theta_\omega)}{\sin(\pi - \theta_\omega - \theta_r)} \sin(\theta_r) = \frac{B_{3dB}}{(1 + r/r_1)} = \frac{B_{3dB}}{B(r)} \tag{1}$$

定义 $B(r)$ 为 TOPSAR 因子, 则有

$$B(r) = \frac{(r + r_1)}{r_1} \tag{2}$$

式中, $B(r)$ 由斜距 r_0 及传感器和旋转点的最短距离 r_1 所决定, 理论上, 当 $r_1 \rightarrow \infty$ 时, $B(r) = 1$, 此时即为条带模式。

现有的文献[6-9]在分析方位向分辨率时, 均忽略了其随距离向的空变特性, 即取测绘带中心处的 TOPSAR 因子作为整个测绘带内的 TOPSAR 因子。但 TOPSAR 作为一种广域观测模式, 具有较宽的测绘带, 分辨率随测绘带变化的现象比较明显, 因此需要考虑方位向分辨率随距离向的空变特性。

对于 TOPSAR 模式, 当传感器和旋转点的最短距离 r_1 设定后, 测绘带内波束扫描速度 ω 唯一确定, 即

$$\omega = \frac{v_s}{r_1} \tag{3}$$

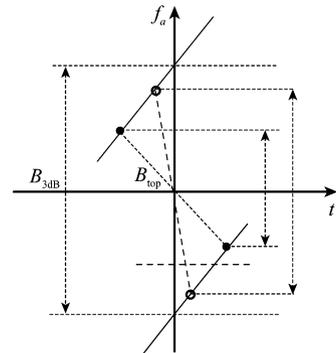
式中, v_s 为卫星速度。因此方位向的天线方向图^[6] $G_a(t)$ 可修正为

$$G_a(t) \cong G_0 \text{sinc}^2 \left(\frac{L}{\lambda} \left(\frac{v_s t}{r} + \omega t \right) \right) = G_0 \text{sinc}^2 \left(\frac{L}{\lambda} \frac{v_s t}{r} \left(1 + \frac{r}{r_1} \right) \right) \tag{4}$$

式中, G_0 为天线增益。由式(2)和式(4), TOPSAR 模式下方位向分辨为

$$\rho_{top}(r) = K_1 \frac{v_g}{B_{3dB}} B(r) \tag{5}$$

式中, 系数 K_1 为天线方向图调制所引入的展宽系数; v_g 为卫星的地面速度。方位向分辨率随斜距变化的现象由时频关系图可更直观地看出。如图 3 所示, 测绘带近端目标的多普勒调频率大, 其积累的带宽大、分辨率高; 而远端处目标的多普勒调频率小, 积累带宽小、分辨率低。



.....: 测绘带远端; ---: 测绘带近端。

图 3 测绘带近端和远端目标的时频关系图

通过上述分析可知, TOPSAR 模式下, 方位向的分辨率随距离向测绘带具有空变特性, 因此为保证图像质量的一致性, TOPSAR 模式下每一个子带的测绘带不可过宽, 如果要求测绘带内分辨率变化不超过 $k\%$, 则每一个子测绘带宽需小于 X_{s_max}

$$X_{s_max} = R_e \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (6)$$

$$\varphi_{1,2} = \arccos \left[\frac{R_e^2 + (R_e + H)^2 - \left(\frac{(200 \pm k)r_0 \pm kr_1}{200} \right)^2}{2R_e(R_e + H)} \right] \quad (7)$$

式中, r_0 为传感器和测绘带中心的最短距离; R_e 为地球轨道半径; H 为卫星高度。系统设计时为满足全场景内分辨率达到指标要求, 需以测绘带远端为标准进行方位向分辨率设计。

1.2 天线偏扫对方位模糊度的影响

相控阵雷达天线通过配相可灵活地控制波束的指向, 然而, 天线波束的偏扫不可避免地造成栅瓣的出现。假设方位向天线有 N 个收发组件 (TR 组件), 每一个 TR 组件有 n 个馈元, 通常情形下, 不同 TR 组件之间可进行配相, 而同一 TR 组件的不同馈元不能配相, 因此天线偏扫时, 合成的方位向天线方向性函数为

$$W(\gamma) = \sum_{p=0}^{(N-1)(n-1)} \sum_{q=0}^{(n-1)} \exp \left\{ \frac{2\pi d}{\lambda} ((pm + q) \sin \gamma - pm \sin \beta) \right\} \quad (8)$$

式中, λ 为工作波长; d 为馈元间隔; γ 为目标和波束中心指向的夹角; β 为方位向波束中心的扫描角度。

由于不同方位向位置的目标所对应的方位向扫描角度 β 不同, 因此方位模糊度随方位向位置不同略有变化, 但这种变化较扫描模式小很多。通常情形下, 方位向边缘处对应的波束偏扫角度大, 引起的栅瓣高, 方位模糊度最差。因此, 为保证图像的质量, 系统设计时要保证方位向边缘处的模糊度满足系统设计指标要求, 如不作特殊说明, 下文所提到的方位模糊度均为方位向边缘处的模糊度, 即测绘带内最差方位模糊度。

为更好地分析栅瓣对方位模糊度的影响, 首先对栅瓣的位置进行分析。假设在场景边缘处方位向波束旋转角度为 β_{max} , 则栅瓣出现的位置为

$$\theta(i) = \arcsin \left(\sin(\beta_{max}) \pm i \frac{\lambda}{L} N \right) \quad (9)$$

式中, i 表示第几栅瓣。为改善方位模糊度性能, 在设计脉冲重复频率时, 需要避开这些栅瓣出现的位置, 否则将引起方位模糊度恶化。图 4 按照文献[13]中 TerraSAR 卫星的 TOPSAR 工作模式参数, 分别分析了方位向测绘带宽度为 10 km、20 km、30 km 时方位模糊度随脉冲重复频率的变化规律。由图可看出, 选择合适的方位向脉冲重复频率, 可实现方位模糊度的优化。同时还发现, 图 4 的计算结果和 TerraSAR 卫星所选取的实际脉冲重复频率相符, 如图 4 中黑线所示, 验证了系统设计时考虑天线偏扫对实现方位模糊度优化的必要性。

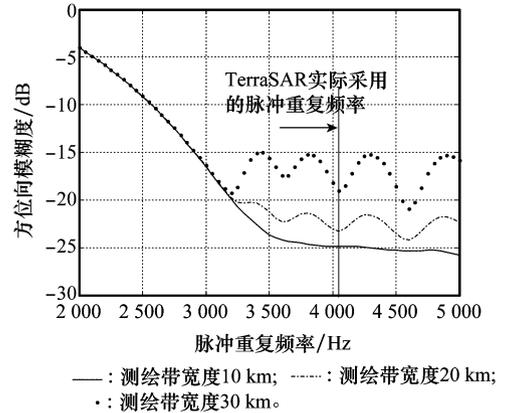


图 4 方位模糊度随脉冲重复频率变化规律

1.3 TOPSAR 时序关系的分析

TOPSAR 模式除在方位向进行波束扫描外, 在距离向上和扫描模式同样需要进行距离向波束视角的切换, 以满足距离向测绘带宽度的要求, 因此 TOPSAR 模式同样涉及不同子测绘带之间时序关系的设计问题。文献[6]利用时频关系图给出了方位向波束旋转角速率同子测绘带数目之间的约束关系, 但文献中并没有详细分析 TOPSAR 时序关系同其他参数的约束关系, 本节将从空间几何关系分析 TOPSAR 模式的时序关系, 并得到相应的结论。

如图 5 所示, 为保证子观测带内在方位向的衔接, 则必须满足式(10)要求:

$$T_i \cdot B_{mid} \geq \sum_{i=1}^{N_s} T_i + T_a \quad (10)$$

式中, T_i 为每一个子测绘带的驻留时间; T_a 为 3 dB 波束对应的照射时间, 假设每个子测绘带的驻留时间相等, 且 T_i 远大于 T_a , 则式(10)进一步化简为

$$B_{mid} \geq N_s \quad (11)$$

式(11)揭示了子测绘带数目同 TOPSAR 因子之间的关系, 进一步将式(2)代入式(11), 可得

$$k_\omega \geq k_s (N_s - 1) \quad (12)$$

由式(11)可知: TOPSAR 模式下, 子测绘带数目 N_s 越多, 则要求 TOPSAR 因子越大, 导致方位向分辨率越低。同时由式(12)可看出, 当子测绘带数目 N_s 越多, 则要求波束旋转角速度越大, 等效旋转点离卫星越近。

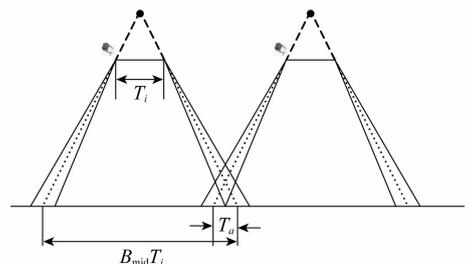


图 5 方位向相邻波束位置关系

通过上述分析会发现, TOPSAR 模式下的时序关系本质上是反映方位向分辨率和距离向测绘带之间相互制约的

关系, 但和扫描模式不同之处在于, 其对每个子带的驻留时间没有限制, 究其根本原因在于: TOPSAR 模式下方向分辨率同驻留时间基本无关(和条带模式类似), 而在扫描模式下, 方位向分辨率同每个子带的驻留时间密切相关。目前, 已有的文献[6-10]仅分析了方位向波束旋转角速率同子测绘带数目之间的约束关系, 并没有分析每个子带驻留时间的限制条件。事实上, 虽然和时序有关的式(10)~式(12)中没有对每个子带的驻留时间进行限制, 但每个子带驻留时间受到了其他系统性能参数的限制, 主要体现在两个方面: 一方面, 方位向边缘处积累不完全区域在每一次处理中都需要抛弃, 则过短的驻留时间将会导致观测效率降低; 另一方面, 过长的驻留时间意味着较大的方位向偏扫角度, 此时天线相位偏扫所引入的栅瓣将引起方位模糊度性能的变差, 故驻留时间不可过长。因此, 在进行 TOPSAR 时序设计时, 需综合考虑观测效率及方位模糊度的要求。

2 TOPSAR 系统参数设计方法

文献[13]中提出了一种迭代的系统波位设计方法和思路, 首先以方位向分辨率、目标模糊度(distributed target ambiguity ratio, DTAR)和信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)的指标为参考, 对系统的处理器带宽、旋转角速度和时序关系进行初步设计, 进而再对系统的模糊度和信噪比进行验证, 看是否满足设计指标要求, 如果不满足要求, 则重新开始进行设计。这种设计方法存在一个判断和再计算的迭代过程, 因此其处理效率存在不确定性。同时, 其对模糊度和信噪比性能的调整主要依靠处理器带宽, 调整能力有限。本文结合卫星总体及载荷关键指标性能计算方法^[15-17], 提出一种新的系统波位设计方法, 提高了系统波位的设计效率及系统设计的自由度。

本方法整个设计思路流程如下:

步骤 1 明确系统设计的输入参数, 如卫星平台性能指标参数、天线性能指标参数、SAR 载荷性能指标参数、轨道参数及技战术要求指标;

步骤 2 根据分辨率指标要求, 由式(5)确定 TOPSAR 因子大小, 进而由式(11)确定子测绘带个数;

步骤 3 由距离向测绘带指标要求确定每一个子测绘带的测绘带宽, 初步确定每个子测绘带的观测范围, 以及波束中心视角;

步骤 4 根据天线方位向最大扫描角计算每个子带的驻留时间;

步骤 5 根据天线参数, 分别绘制每个子带场景内最差方位模糊度随脉冲重复频率变化规律, 在此基础上根据方位模糊度性能指标的要求对脉冲重复频率进行优化;

步骤 6 根据步骤 5 中脉冲重复频率的选择范围及其他性能指标的要求进行波位设计, 确定脉冲重复频率以及每一个子测绘带的观测范围;

步骤 7 计算 SAR 载荷性能指标, 形成系统波位设计参数表。

该方法具体设计流程如图 6 所示。

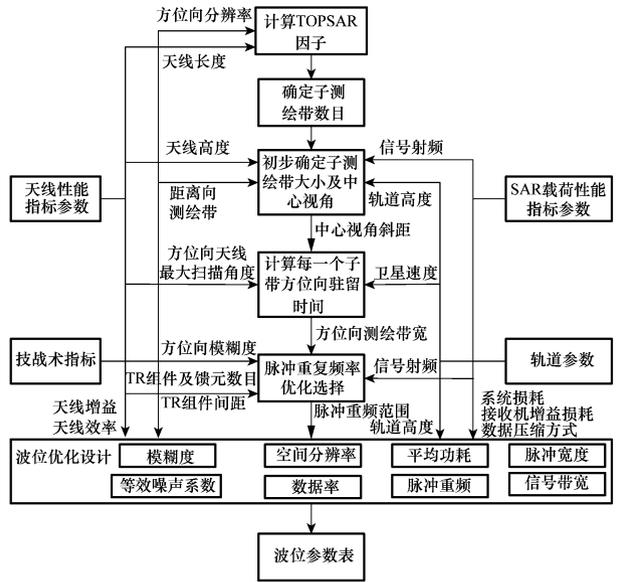


图 6 TOPSAR 模式波位设计方法

3 计算机仿真

为验证方法的有效性, 本文采用 TerraSAR 系统参数进行波位设计, 同时为提高观测效率, 方位向最大扫描角度为 $\pm 2.0^\circ$, 其观测效率高于 TerraSAR, 其中具体的参数如表 1 所示。

表 1 仿真输入参数

参数	参数值
轨道高度/km	514
波长/m	0.03
天线尺寸(长×宽)/m	4.8×0.704
最大的扫描角度/(°)	± 2.0
方位向天线收发组件数目	13
每个天线收发组件馈元个数	4
系统损耗/dB	1.5
接收机损耗/dB	3.5
峰值功率/W	10 000.0
天线效率/%	85
TOPSAR 因子	3.3
测绘带个数	3
方位向每次测绘带宽度/km	30
方位模糊度/dB	< -20.0
距离模糊度/dB	< -20.0
等效噪声系数/dB	< -20.0
测绘带内方位向分辨率变化/%	< 3

根据表 1 中的参数, 计算不同视角下方位模糊度随脉冲重复频率的变化曲线, 图 7 给出了不同波位下方位最差模糊度随脉冲重复频率变化的曲线。波位设计时尽可能选择曲线变化波谷处所对应的脉冲重复频率。同时, 为了保证方位向分辨率沿距离向的一致性, 其测绘带宽度均小于 40 km。

表 2 给出了具体的波位设计的结果, 虽然增加了每一次观测时方位向测绘带的宽度, 导致栅瓣的影响变大。但由于在系统设计时进行了脉冲重复频率的优化设计, 因此在提高系统观测效率的同时保证了系统各项指标仍满足设计指标要求。同时, 距离向测绘带近端和远端的方位向分辨率变化不超过 0.25 m, 满足系统指标要求。

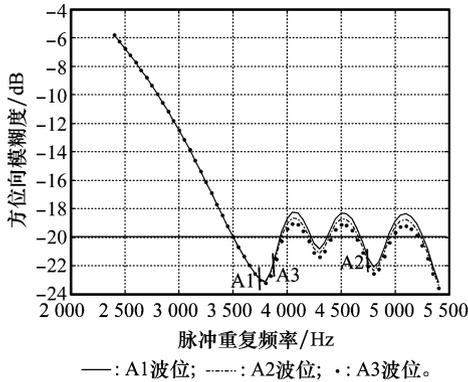


图 7 测绘带内最差方位模糊度随脉冲重复频率变化曲线

表 2 系统波位设计结果

波位	A1	A2	A3
中心视角/(°)	25.688	28.269	30.809
中心斜距/km	575.799	590.578	607.300
脉冲重复频率/Hz	3 790.0	4 700.0	3 820.0
子带持续时间/s	1.25	1.25	1.25
目标积累时间/s	0.132	0.135	0.139
信号带宽/MHz	90	80	70
信号脉冲宽度/s	30e-6	30e-6	30e-6
最差方位模糊度/dB	-23.06	-20.75	-23.01
平均距离模糊度/dB	-27.56	-26.84	-25.59
平均功耗/W	1 137.0	1 410.0	1 146.0
等效噪声系数/dB	-27.63	-31.29	-28.93
数据率/Mbps (8;3)	352.0	336.0	305.0
距离分辨率/m (两视)	8.0	8.0	8.0
方位向分辨率/m	8.0	8.0	8.0

4 结 论

本文对星载 TOPSAR 模式系统波位设计中尚未被关注的问题进行了分析论证,提出了一种基于线性流程的星载 TOPSAR 模式系统波位设计方法,得到如下结论:

(1) 方位向分辨率随距离向发生变化,远端处分辨率差,因此进行分辨率设计时应以测绘带远端为基准;

(2) TOPSAR 模式的拼接时序不同于扫描模式的拼接时序,分辨率基本不受驻留时间的影响,主要由波束扫描速率决定;

(3) 为提高观测效率,需要增加每个子测绘带的驻留时间,这将导致方位向旋转角度的增大,栅瓣效应更加明显。但通过脉冲重复频率的优化选择,可消除栅瓣对方位模糊度的影响,在不影响其他性能指标的基础上实现观测效率的提高;

(4) 星载 TOPSAR 模式下,子测绘带个数受 TOPSAR 因子制约,其更为本质的内涵是距离向测绘带宽仍然受方位向分辨率的限制。因此,星载 TOPSAR 模式仍然是一种中低分辨率、宽测绘带的工作模式。

参考文献:

[1] Younis M, Huber S, Patyuchenko A, et al. Digital beam-forming for spaceborne reflector-and planar-antenna SAR-a system performance comparison[C] // *Proc. of the International Geoscience and*

Remote Sensing Symposium, 2009:733 - 736.

[2] Gebert N, Krieger G, Moreira A. Digital beamforming on receive: techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2009,45(2):564 - 592.

[3] Xu W, Deng Y K. Multichannel SAR with reflector antenna for high-resolution wide-swath imaging[J]. *Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010,9(1):1123 - 1126.

[4] Meta A, Prats P, Steinbrecher U, et al. TerraSAR-X TOPSAR and scanSAR comparison[C]// *Proc. of the 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2008:277 - 280.

[5] Brown C G, Sarabandi K, Pierce L E. Model-based estimation of forest canopy height in red and austrian pine stands using shuttle radar topography mission and ancillary data: a proof-of-concept study[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2010,48(3):1105 - 1118.

[6] Zan F D, Guarnieri A M. TOPSAR: terrain observation by progressive scans[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2006,44(9):2352 - 2360.

[7] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, et al. A SAR processing algorithm for TOPS imaging mode based on extended chirp scaling[C]// *Proc. of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007:148 - 151.

[8] Prats P, Meta A, Scheiber R, et al. A TOPSAR processing algorithm based on extended chirp scaling: evaluation with terraSAR-x data[C]// *Proc. of the 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2008:141 - 144.

[9] Prats P, Marotti L, Wollstadt S, et al. Investigations on TOPS interferometry with terrasars-x[C]// *Proc. of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2010:2629 - 2632.

[10] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, et al. Processing multiple SAR modes with baseband azimuth scaling[C]// *Proc. of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2009:172 - 175.

[11] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, et al. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2):770 - 780.

[12] Yang W, Li C S, Chen J, et al. A novel three-step focusing algorithm for TOPSAR image formation[C]// *Proc. of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2010:4087 - 4091.

[13] Meta A, Prats P, Scheiber R, et al. TOPS imaging with terraSAR-x: mode design and performance analysis [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2010,48(2):759 - 769.

[14] Gebert N, Krieger G, Moreira A. Multichannel azimuth processing in scanSAR and TOPS mode operation[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2010,48(7):2994 - 3008.

[15] Zan F D, Prats P, Krieger G. Mission design and performance for systematic deformation measurements with a spaceborne SAR system[C]// *Proc. of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2009:793 - 796.

[16] Gebert N, Krieger G. Azimuth phase center adaptation on transmit for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009,6(4):782 - 786.

[17] Brautigam B, Gonzalez J H, Schwerdt M, et al. TerraSAR-x instrument calibration results and extension for tandem-x[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2010,48(2): 702 - 715.