

# ScanSAR 的 Scalping 辐射误差研究

明峰 洪峻 吴一戎  
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要** 由于在观测带内采用了多波束扫描的工作模式,使得 ScanSAR 产生了固有的周期性的 scalping 效应,影响了 ScanSAR 的辐射特性。该文基于 ScanSAR 工作模式的特点,研究了 scalping 产生的机理和性质,定量地分析了 scalping 引起的辐射误差以及多普勒中心误差与 scalping 的关系,并研究了对 scalping 进行校正后的剩余误差问题。

**关键词** ScanSAR, Scalping, 多普勒中心, 辐射误差  
**中图分类号:** TN959.74 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2006)10-1806-03

## Study on Scalping Radiometric Error in ScanSAR

Ming Feng Hong Jun Wu Yi-rong  
(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Because of the multiple-beam scanning strategy in swath, the intrinsic periodic scalping exists in ScanSAR, which affects the radiometric property of ScanSAR. Based on the character of ScanSAR, the mechanism and property are studied, radiometric error caused by scalping and relation between Doppler centroid error and scalping are quantificationally analyzed. The residual error after correction is also studied.

**Key words** ScanSAR, Scalping, Doppler centroid, Radiometric error

### 1 引言

星载 ScanSAR 是星载 SAR 的重要发展方向,它通过在较宽的角度范围内改变其观测视角来大大扩展其一次通过观测地区时的观测带宽度。这对改进成像效果和对变化较快的大规模地表现现象的观测,例如土壤水分的确定、农作物生长变化、洪水灾害和大规模海洋现象的监测等,以及缩短全球覆盖的重复观测周期都是很重要的。图 1 为 ScanSAR 工作模式的空间几何关系,在每个波束上,天线都要驻留固定的时间来发射和接收一系列的脉冲串,并将其称为 burst<sup>[1-3]</sup>。

由于在观测带内采用了多波束扫描不连续的工作模式,使得 ScanSAR 图像产生了严重的不均匀现象,这种不均匀现象意味着 SAR 系统的传递函数随空间和时间的变化很严重。其中,scalping 是引起 ScanSAR 图像不均匀的主要原因之一,也是 ScanSAR 模式所固有的现象<sup>[4]</sup>。本文基于 ScanSAR

工作模式的特点,分析了 scalping 产生的机理和性质,定量地分析了 scalping 引起的辐射误差以及多普勒中心误差与 scalping 的关系,同时研究了对 scalping 进行校正后的剩余误差。

### 2 Scalping 产生机理

导致 scalping 效应的原因比较复杂,其中最主要的原因如图 2 所示。A, B, C 是同一子条带内不同方位的 3 个目标,由于 ScanSAR 在某一子观测带内的不连续工作模式,使得每个点目标只能被方位向天线波束的一部分覆盖,因此 A, B, C 3 个目标受到天线方向图方位向不同位置的增益加权,造成图像的辐射特性沿方位向发生变化,也就是 ScanSAR 特有的 scalping 效应<sup>[1]</sup>。为了对 ScanSAR 系统目标增益在方位向的变化进行校正,比较有效的方法是采用校正函数对其进行处理。采用的校正函数通常为方位向天线方向图的某种变化形式,如果方位向天线方向图的形状或方位指向不准确,将使图像中具有剩余 scalping 误差。

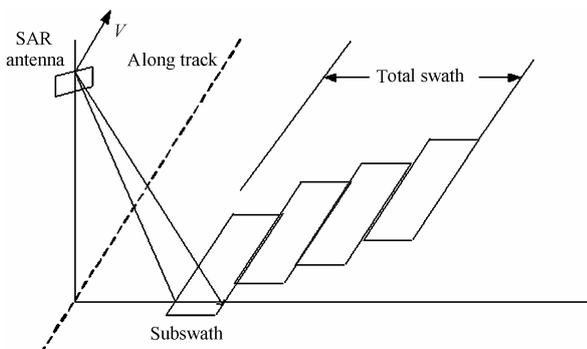


图 1 ScanSAR 工作模式的空间几何关系  
Fig.1 Geometry for ScanSAR mode

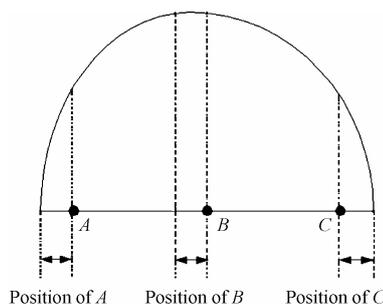


图 2 不同目标对应天线方向图中的位置  
Fig.2 Positions of different targets according to antenna pattern

ScanSAR 模式下点目标方位向回波数据的形式为

$$s_{\text{raw}}(t; t_0) = A[\text{kr}(t - t_0 - t_c)] \sum_n \text{rect}\left(\frac{t - nT_p}{T_B}\right) \cdot \exp[j\pi\text{kr}(t - t_0)^2] \quad (1)$$

其中  $t_0$  为零多普勒位置,  $t_c$  为波束中心位置的偏差,  $A(\cdot)$  为由多普勒频率表示的方位向天线方向图,  $\text{kr}$  是方位向多普勒斜率,  $T_B$  为子波束的驻留时间,  $T_p$  为 burst 周期。从该表达式可以看出 ScanSAR 的 burst 特性, 在条带的基础上进行了  $A(\cdot) \cdot \sum \text{rect}(\cdot)$  的加权, 造成了不同方位向位置的点目标回波形式不同。

经过高精度成像算法(RD 算法)处理后, 系统相干传递函数的形状具有下面近似的表达式:

$$H_c(f; t_0) = \hat{A}(f) \sum_n \text{rect}\left(\frac{f - t_0|\text{kr}| - nB_p}{B_B}\right) \quad (2)$$

其中  $\hat{A}(f) = A(f - f_{\text{DC}})W_1(f - \hat{f}_{\text{DC}})$ ,  $f_{\text{DC}}$  为多普勒中心,  $W_1(\cdot)$  为处理器加权函数,  $\hat{f}_{\text{DC}}$  为多普勒中心估计值,  $B_B = |\text{kr}| \cdot T_B$ ,  $B_p = |\text{kr}| \cdot T_p$ 。从式(2)中可以看出该传递函数取决于点目标在方位向的位置, 它是以  $T_p$  为周期进行时变的。

### 3 ScanSAR 模式的方位向增益变化研究

前面分析了对于 ScanSAR 模式, 由于方位向不同的点目标被波束不同的部分扫描, 使得方位向的增益发生变化。目前的 ScanSAR 系统多采用方位向多视(每个点目标在一个成像周期内被多次扫描)的方法来降低这种方位向的增益变化。假设方位向上采用二视的扫描策略, 如图 3 所示。

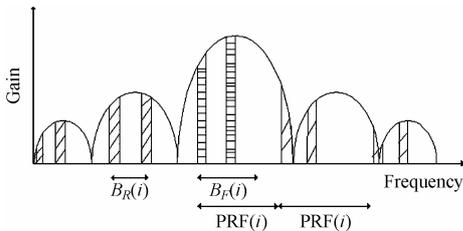


图 3 二视 ScanSAR 系统的方位向能量

Fig.3 Azimuth power for a 2-looks ScanSAR system

对于子观测带  $i$  来说, 非模糊能量可以表示为<sup>[5]</sup>

$$S_i(f_R; \Delta f_{\text{DC}}) = \sum_{k=1}^n \int_{f_{\text{DC}} - \frac{B_F(i) + (k-1)B_R(i)}{2}}^{f_{\text{DC}} - \frac{B_F(i) + (k-1)B_R(i)}{2} + B_D^{\text{eff}}(i)} G(f - \Delta f_{\text{DC}} - f_{\text{DC}} + f_R) df, \quad f_R \in [0, B_R(i)] \quad (3)$$

其中  $f_R$  为回归带宽内的频率,  $f_{\text{DC}}$  为多普勒中心频率,  $\Delta f_{\text{DC}}$  为多普勒中心误差,  $G(f)$  为以频率表示的双程方位向天线方向图,  $B_D^{\text{eff}}(i)$  为有效驻留带宽,  $B_F(i)$  为成像带宽,  $B_R(i)$  为回归带宽,  $n$  为波束在该子观测带内一个合成孔径时间的返回次数。

对于子观测带  $i$ , 方位向增益可以表示为

$$\text{AG}_i(f_R; \Delta f_{\text{DC}}) = \frac{S_i(f_R; \Delta f_{\text{DC}})}{n_i} \quad (4)$$

其中  $n_i$  为方位向视数, 则方位向增益变化量可表示为

$$\text{AGV}_i = \max(\text{AG}_i) - \min(\text{AG}_i) \quad (5)$$

采用表 1 中的参数对 4 个波束、方位向二视的 ScanSAR 系统进行仿真, 得到了图 4 中的方位向增益变化结果。

表 1 仿真采用的参数

Tab.1 Parameters used in simulation

| 参数        | 数值              |
|-----------|-----------------|
| PRF       | 1320(Hz)        |
| $\lambda$ | 0.0566(m)       |
| 驻留时间      | 53 54 54 55(ms) |
| 方位向视数     | 2               |
| 子条带个数     | 4               |
| 卫星高度      | 776(km)         |
| 赤道地球半径    | 6396(km)        |
| 飞行速度      | 7538(m/s)       |
| 回归时间      | 216(ms)         |
| 成像时间      | 432(ms)         |
| 视角        | 26.5(°)         |
| 方位向天线长度   | 15(m)           |

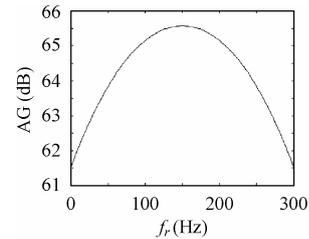


图 4 波束 1 的方位向增益

Fig.4 Azimuth gain for beam 1

从模拟结果可以看出, 方位向不同目标的双程增益最大变化可以达到 4 dB, 因此 scalping 引起了非常大的辐射不均匀性。方位向指向误差会引起多普勒中心估计不精确, 在式(3)建立的方位向增益数学模型中, 引入多普勒中心误差来进一步分析多普勒中心误差对方位向增益的影响, 得到的 ScanSAR 模式下多普勒中心误差与方位向平均增益误差的关系如表 2 所示:

表 2 多普勒中心误差与方位向平均增益误差的关系

Tab.2 Relationship between Doppler centroid error and azimuth gain error

| 多普勒<br>误差(Hz) | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 40   |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 误差(dB)        | 0.11 | 0.23 | 0.35 | 0.48 | 0.62 | 0.76 | 0.90 | 1.06 |

### 4 Scalping 剩余误差及其性质

由于 ScanSAR 模式下方位向不同目标的增益变化非常大, 需要采用校正函数对其进行校正, 在应用校正函数时, 多普勒中心误差的存在将引起辐射误差, 降低校正的精度。假设多普勒中心误差使得方位向天线方向图  $G(x)$  偏移了  $\Delta x$ , 那么最后得到的图像强度将出现剩余 scalping 误差。

$$S(x)=G(x-\Delta x)W(x) \quad (6)$$

其中  $S(x)$  为图像强度,  $W(x)$  为校正函数。

下面采用校正函数为  $W(x)=1/G(x)$  的形式分析多普勒中心误差引起的剩余 scalloping 误差, 当多普勒中心误差为 50Hz 时, 得到的结果如图 5, 图 6 所示。

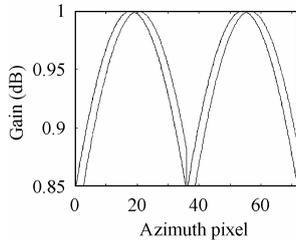


图 5 多普勒中心误差引起的方位向天线方向图偏移  
Fig.5 Offset of azimuth antenna pattern caused by Doppler centroid error

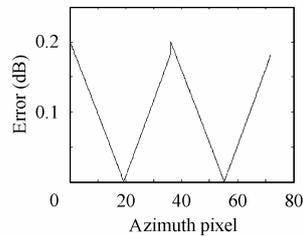


图 6 多普勒中心误差引起的剩余误差  
Fig.6 Residual error caused by Doppler centroid error

可以看出, 对 scalloping 进行校正可以大大降低方位向的不均匀性, 但还会存在剩余误差, 这主要是由多普勒中心误差引起的。通过以上的分析, 得到 scalloping 具有下面的特点: (1)scalloping 是沿方位向出现的, 在距离向上延伸的范围是整个或部分子观测带; (2)具有周期性, scalloping 的空间间隔等于 burst 周期内波束在方位向的移动距离; (3)在相邻两个 burst 转换处产生的 scalloping 误差最大; (4)scalloping 误差大小取决于多普勒误差大小和成像处理器的处理算法。

## 5 结束语

本文基于 ScanSAR 模式的特点研究了 scalloping 效应产生的机理, 通过分析得到 scalloping 引起的方位向增益变化可以达到 4dB。对 scalloping 进行校正可以大大降低方位向的不均匀性, 但还会存在剩余误差。定量研究了多普勒中心误差与 scalloping 误差的关系。最后总结了 scalloping 的特点。

## 参考文献

- [1] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001: 216-228.
- [2] 袁孝康. 星载合成孔径雷达的ScanSAR技术. 上海航天, 1997, 14(2): 52-56.
- [3] Luscombe A P. Taking a broader view: Radarsat adds ScanSAR to its operation. Proc. IGARSS'88, Edinburgh, Scotland, Sept, 1988: 1027-1032.
- [4] Martyn P, Williams J, Nicoll J, Guritz R. Calibration of the Radarsat SWB processor at the Alaska SAR facility. IGARSS 1999, Hamburg, Germany, June 28 - July 2, 1999: 2355-2359.
- [5] Eldhuset K, Valand PA. ScanSAR processing and simulation for ASAR using ERS-1 raw data. *Int. J. Remote Sensing*, 1995, 16(14): 2657-2674.

明 峰: 男, 1977 年生, 博士生, 专业方向为信号与信息处理。  
洪 峻: 男, 1960 年生, 研究员, 专业方向为信号与信息处理。  
吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 专业方向为信号与信息处理。