

滑动聚束 SAR 成像模式研究

唐禹^{①②} 王岩飞^① 张冰尘^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 滑动 SAR 是一种新颖的 SAR 成像模式,它通过控制辐照区在地面移动的速度来增加方位向相干累积的时间,从而提高 SAR 方位向的分辨率。该文从成像机理、回波方程、分辨率、天线扫描以及测绘带宽等方面对滑动聚束 SAR 进行了详细分析,并且给出了滑动聚束 SAR 的波数域成像算法。通过对条带 SAR,聚束 SAR,滑动聚束 SAR 的比较,可以看出条带 SAR 和聚束 SAR 都是滑动聚束 SAR 的一种特例。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 滑动聚束 SAR; 高分辨率成像

中图分类号: TN958, TN951

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0026-04

A Study of Sliding Spotlight SAR Imaging Mode

Tang Yu^{①②} Wang Yan-fei^① Zhang Bing-chen^①

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

^②(*Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Sliding spotlight SAR is a novel mode of SAR imaging, which can improve azimuth resolution by controlling the speed of antenna footprint to increase coherent accumulation time. This paper analyzes the sliding-spotlight mode at the aspects of imaging principle, echo model, resolution, antenna operational mode, swath width, etc. And it presents the “wavenumber domain” algorithm of sliding-spotlight SAR. Compared with stripmap and spotlight SAR imaging, both stripmap and spotlight are special forms of sliding-spotlight mode.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Sliding spotlight SAR; High resolution imaging

1 引言

在机载合成孔径雷达(SAR)系统中,条带成像模式和聚束成像模式是合成孔径雷达两种最常用的工作模式。条带成像模式能够进行连续大面积成像,但是受到天线增益等方面的限制,系统的方位向分辨率不能随着天线尺寸的减少而任意提高。为了适应高分辨率成像的要求,后来产生了聚束成像模式。该模式通过控制天线的扫描速度使其固定指向某一场景来提高方位向的累积时间,使方位向能够达到很高的分辨率,但是该模式只能对一小块地区成像,成像的最大范围为天线的波束宽度。如果要求大面积的高分辨率成像,这两种模式都有些无能为力了。本文介绍的滑动聚束 SAR 是一种新颖的 SAR 工作模式,它通过控制天线辐照区在地面移动的速度来控制方位向的分辨率,其成像的面积要比聚束 SAR 大,并且其分辨率可以高于相同尺寸天线的条带 SAR 的分辨率。它可以在高分辨率和大面积成像中做出很好的权衡。目前国外先进的 SAR 系统,如 PAMIR^[1,2]、TerraSAR-X^[3] 等都采用了这种成像模式。并且 Jisef Mittermayer 给出 TerraSAR-X 系统滑动模式的改进的 CS 成像算法^[3,4]。

本文首先分析了滑动聚束 SAR 的成像机理,并在此基础上对滑动聚束 SAR 的回波方程、分辨率、天线扫描以及测绘宽度等方面进行了详细分析,并且给出了滑动聚束 SAR 成像的波数域成像算法。

2 滑动聚束 SAR 成像机理

滑动聚束 SAR 通过控制辐照区在地面移动的速度来增加方位向相干累积的时间,从而提高了 SAR 方位向的分辨率。滑动聚束 SAR 的成像机理如图 1 所示。由图可以看出聚束和条带模式可以看成是滑动聚束模式的特例;当辐照区在地面上的移动速度为零时,即为聚束成像模式;当辐照区在地面移动的速度为飞机的速度时,即为条带成像模式。当辐照区的移动速度在零与飞机速度之间时,用同样尺寸的天线,由于方位向相干累积的时间要比条带 SAR 长,因此其方位向的分辨率大于条带 SAR 的分辨率。由于在扫描过程中辐照区移动的速度不为零,所以其方位向成像尺寸要比聚束模式下方位向成像尺寸要大。

2.1 回波方程分析

2.1.1 点目标回波方程 在分析中,只考虑斜平面成像,设载机的飞行方向为 x 轴,与 x 轴垂直的为 r 轴,在起始时刻,飞机位于原点,天线的波束中心指向 (x_0, r_0) 。如图 2 所示。

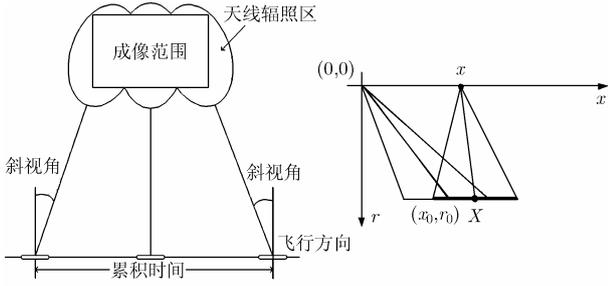


图 1 滑动聚束 SAR 成像示意图 图 2 滑动聚束 SAR 回波模型

假设发射调频斜率为 K_r 的调频信号, 其载频为 f_c , T_s 是发射信号的持续时间, 则当飞机位于 x 时位于点 (X, R) 处的点目标的回波为

$$S_{\text{re}}(t, x) = \exp(j \cdot K_r \cdot (t - t_0)^2) \text{rect}\left(\frac{t - t_0}{T_s}\right) \cdot \exp(-j \cdot 2\pi f_c t_0) \text{rect}\left(\frac{X - (v_f/v_a)x - x_0}{L_s}\right) \quad (1)$$

其中 $t_0 = \left(2\sqrt{(x - X)^2 + R^2}\right)/c$, $L_s = r_0 \cdot (\lambda/D)$, v_f 为天线辐照区移动的速度, v_a 为飞机飞行的速度。由于 $x \ll R$, 在上式中忽略了在天线移动过程中 L_s 的变化。将 $2\pi f_c t_0$ 在 $x = 0$ 处用泰勒级数展开, 可以得到滑动聚束 SAR 的方向向调频斜率为

$$k_a = 2v_a^2/(\lambda \cdot R) \quad (2)$$

则滑动聚束 SAR 的方向向多普勒带宽为

$$B_{\text{aw}} = k_a \cdot T_s = \frac{2v_a^2}{\lambda R} \cdot \frac{\lambda R}{D \cdot v_f} = \frac{2 \cdot v_a^2}{D \cdot v_f} \quad (3)$$

由式(5)可知, 滑动聚束 SAR 的方向向多普勒带宽是条带 SAR 多普勒带宽的 v_a/v_f 倍。

下面比较滑动 SAR 的回波方程与条带 SAR 和聚束 SAR 的回波方程的异同。条带 SAR 下点目标的回波方程为^[5]

$$S_{\text{stripmap}} = \exp(j \cdot K_r \cdot (t - t_0)^2) \text{rect}\left((t - t_0)/T_s\right) \cdot \exp(-j \cdot 2\pi f_c t_0) \text{rect}\left((X - x)/L_s\right) \quad (4)$$

聚束 SAR 的点目标的回波方程为^[6,7]

$$S_{\text{spotlight}} = \exp(j \cdot K_r \cdot (t - t_0)^2) \text{rect}\left((t - t_0)/T_s\right) \cdot \exp(-j \cdot 2\pi f_c t_0) \quad (5)$$

比较式(1), 式(4), 式(5), 可以看出滑动聚束 SAR 的回波方程与条带 SAR 和聚束 SAR 的回波方程非常相似, 其主要区别在于最后的 $\text{rect}(\bullet)$ 函数。当 $v_f = v_a$ 时, 滑动聚束 SAR 的回波方程就是条带模式下点目标的回波方程; 当 $v_f = 0$ 时, 滑动聚束 SAR 回波方程即为聚束时的回波方程。

2.1.2 滑动聚束 SAR 成像算法

滑动聚束 SAR 可以看成一种变多普勒中心的条带 SAR, 因此, 滑动 SAR 成像的难点在于校正由于多普勒中心改变而导致的距离迁徙现象。用改

进的 CS 算法可以校正此类的距离迁移^[3,4], 但改进的 CS 算法运用了分块近似的方法来校正此类的距离迁移现象, 分块的大小直接影响着成像的质量。下面直接从滑动聚束 SAR 得回波方程来讨论滑动聚束 SAR 的成像的波数域算法, 该算法在推导时除了运用驻定相位定理外, 没有做任何近似, 因此非常精确。

由上节分析可知滑动聚束 SAR 的回波方程是斜距和飞机位置的函数式(1)可以写为

$$S_{\text{re}}(t, x) = p(t - t_0) \exp(-j \cdot 2\pi f_c t_0) \text{rect}\left(\frac{X - (v_f/v_a)x - x_0}{L_s}\right) \quad (6)$$

上式中 $p(t) = \exp(jK_r \cdot t^2) \text{rect}(t/T)$ 。

对式(6)做关于变量 t 的 Fourier 变换可得

$$S_{\text{re1}}(\omega, x) = P(\omega) \cdot \exp(-j\omega t_0) \cdot \exp(-j\omega_c t_0) \text{rect}\left(\frac{X - (v_f/v_a)x - x_0}{L_s}\right) \quad (7)$$

上式中 $P(\omega)$ 为调频信号 $\exp(jK_r \cdot t^2) \text{rect}(t/T)$ 的 Fourier 变换, $\omega_c = 2\pi f_c$ 。

令 $x_1 = x - (v_a/v_f - 1) \cdot X + (v_a/v_f)x_0$, 式(7)可以写为

$$S_{\text{re2}}(\omega, x_1) = |P(\omega)|^2 \cdot \exp\left(-j \cdot 2k \sqrt{x_1 + \left((v_a/v_f) - 2\right)X - (v_a/v_f)x_0\right)^2 + R^2}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{X - x_1}{L_s(v_a/v_f)}\right) \quad (8)$$

式(8)中 $k = \frac{2(\omega + \omega_c)}{c}$ 。

用驻定相位定理求式(8)的 Fourier 变换:

$$S_{\text{re3}}(\omega, k_{x1}) = \int |P(\omega)|^2 \cdot \exp\left(-j \cdot 2k \sqrt{x_1 + \left((v_a/v_f) - 2\right)X - (v_a/v_f)x_0\right)^2 + R^2}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{X - x_1}{L_s(v_a/v_f)}\right) \cdot \exp^{-jk_x x_1} dx_1$$

因此可以求出其驻定相位点为

$$x^* = -\frac{k_{x1} R}{\sqrt{4k^2 - k_{x1}^2}} - \left(\frac{v_a}{v_f} - 2\right) \cdot X - \frac{v_a}{v_f} x_0 \quad (9)$$

根据驻定相位定理可以求出 $S_{\text{re3}}(k, k_{x1})$:

$$S_{\text{re3}}(k, k_{x1}) = |P(\omega)|^2 \exp\left(-j\sqrt{4k^2 - k_{x1}^2} \cdot R + j\left(\left(\frac{v_a}{v_f} - 2\right) \cdot X \cdot k_{x1} + jk_{x1} \cdot \left(\frac{v_a}{v_f} x_0\right)\right)\right) \quad (10)$$

用下面的二维匹配滤波函数对上式进行匹配:

$$S_{mf} = \exp\left(j\sqrt{4k^2 - k_{x1}^2} \cdot R_c - jk_{x1}(v_a/v_f)x_0\right) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} S_{re4}(k, k_{x1}) &= S_{re3}(k, k_{x1}) \cdot S_{mf} \\ &= |P(\omega)|^2 \exp\left(-j\sqrt{4k^2 - k_{x1}^2} \cdot (R - R_c) - jk_{x1} \right. \\ &\quad \left. \cdot (2 - (v_a/v_f))X\right) \end{aligned} \quad (12)$$

对式(12)做 $k_r = \sqrt{4k^2 - k_{x1}^2}$, $k_x = (2 - (v_a/v_f))k_{x1}$ 的变量代换可得

$$S_{re5}(k_r, k_x) = |P(k_r, k_x)|^2 \exp(-jk_r(R - R_c) - jk_x X) \quad (13)$$

对式(13)做二维逆 Fourier 就可以重建图像。因此滑动 SAR 成像处理的流程如图 3 所示:

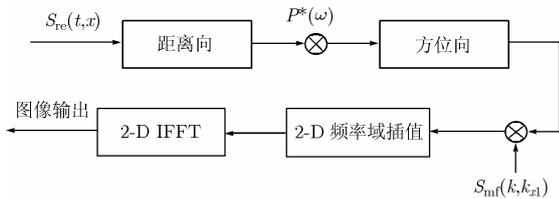


图 3 滑动聚束 SAR 成像处理流程

2.2 分辨率分析

由 SAR 的分辨理论可知, 距离向频谱带宽越大, 距离向分辨率越高; 方位向频谱带宽越大, 方位向分辨率越高。由上节分析可知, 滑动 SAR 的多普勒带宽为 $2 \cdot v_a^2 / (D \cdot v_f)$, 它是条带模式多普勒带宽的 v_a/v_f 倍, 因此滑动 SAR 模式的方位向分辨率是条带模式 v_a/v_f 倍。

$$\rho_a = \frac{v_a}{B_{aw}} = \frac{v_a}{2v_a^2 / (D \cdot v_f)} = \frac{D \cdot v_f}{2 \cdot v_a} \quad (14)$$

式(14)表明, 滑动聚束 SAR 的分辨率不仅与天线的方位向尺寸有关, 而且与飞机飞行速度和辐照区移动的速度有关, 可以通过控制 v_f 的大小, 可以根据需要调整滑动聚束 SAR 的分辨率。当 $v_f < v_a$ 时, 滑动 SAR 的分辨率比条带 SAR 要高; 当 $v_f > v_a$ 时, 滑动 SAR 的分辨率比条带 SAR 要低; 当 $v_f = v_a$ 时, 滑动 SAR 的方位向的分辨率为 $D/2$, 即为条带模式的情况; 当 $v_f = 0$ 时, 方位向的分辨率并不是无穷小, 而是受到天线扫描范围的限制, 为 $\lambda / [4 \cdot \sin(\Delta\theta_0/2)]$ [6,7] ($\Delta\theta_0$ 为天线扫描的范围)。条带 SAR 的方位向分辨率只由天线尺寸所决定, 而与飞机飞行状态无关; 聚束 SAR 的方位向分辨率只由天线扫描速度和范围决定, 而与天线尺寸无关; 滑动 SAR 方位向分辨率不仅与天线尺寸有关, 而且与天线辐照区在地面移动的速度有关。

2.3 天线扫描分析

在条带模式中天线的指向恒定, 在聚束 SAR 中天线要以固定的角速度扫描, 聚束 SAR 天线的扫描速度只与飞机飞行速度和测绘带中心的作用距离有关。滑动聚束 SAR 是通过控制天线扫描的速度来控制天线辐照区在地面移动的速度, 因此滑动 SAR 的扫描速度不仅与飞机飞行速度和测绘带中心距离有关, 而且与天线辐照区在地面移动的速度

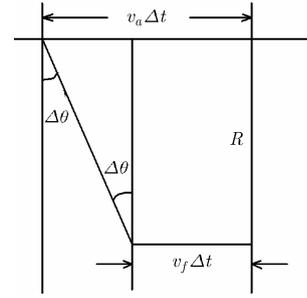


图 4 天线扫描示意图

有关。在滑动聚束 SAR 中, 假设天线照射的中心与天线的垂直距离为 R , 如图 4 所示, 则天线的扫描速度为

$$\omega = \Delta\theta/\Delta t \approx (v_a - v_f)/R \quad (15)$$

由于 $x \ll R$, 式(15)推导中忽略了在天线扫描过程中 R 和 L_s 的变化, 若考虑 R 和 L_s 的变化, 用(15)式的扫描速度扫描时, 则会引起辐照区在地面的移动速度并不是完全恒定。因此实际成像的分辨率与式(14)所计算的结果略有不同。由以上分析可知, 在天线扫描速度这方面, 条带 SAR 是滑动聚束 SAR 当 $v_f = v_a$ 时的特例; 常规聚束 SAR 时滑动聚束 SAR 当 $v_f = 0$ 时的特例。

设天线扫描范围是 $(-\theta_{max}, \theta_{max})$, 则滑动聚束 SAR 在方位向的测绘带宽为

$$W_a = \frac{2 \cdot \theta_{max}}{|\omega|} v_f + L_s \quad (16)$$

将式(15)代入式(16)可得

$$W_a = \frac{2 \cdot \theta_{max} \cdot R}{|v_a - v_f|} v_f + L_s \quad (17)$$

由式(17)可以看出, 在聚束模式下 ($v_f = 0$), 方位向测绘带宽为 L_s ; 在条带模式下 ($v_f = v_a$), 方位向的测绘带宽没有限制。当工作在滑动聚束模式时, 方位向的测绘带宽要比聚束模式要宽 $\frac{2\theta_{max} R}{|v_a - v_f|} v_f$ 。

3 仿真结果

机载 SAR 成像仿真参数如表 1 所示。由式(15)可知, 当天线的扫描速度为 0.0075 rad/s 时, 天线的辐照区在地面移动的速度约为 75 m/s , 由式(14)可知, 此时滑动聚束 SAR 的理论分辨率是 0.5 m 。

仿真时选取的地面场景的大小为 $700 \text{ m} \times 700 \text{ m}$, 坐标原点位于场景中心, 选取的 5 个点目标的坐标为 $(0, 0)$,

表 1 仿真参数

参数	值	参数	值
发射带宽 (MHz)	100	中心作用距离(m)	10000
采样频率 (MHz)	125	飞行速度(m/s)	150
波长(m)	0.0193	天线扫描速度(rad/s)	0.0075
天线方位向尺寸(m)	2	天线扫描范围(rad)	$(-0.07, 0.07)$

(200,200), (-200, 200), (200, -200), (-200, -200)。运用本文所介绍的滑动聚束 SAR 的波数域成像方法, 以上多点目标模拟数据的仿真结果如图 5(a)所示, 图中横向为距离向, 纵向为方位向。

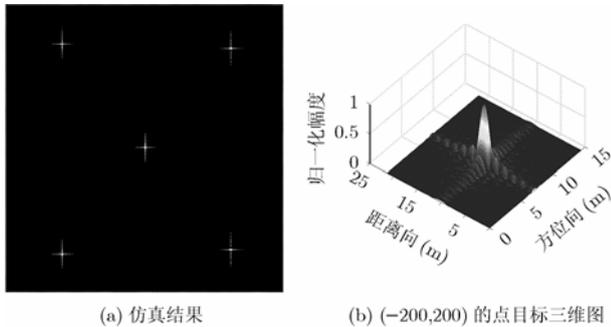


图 5

图 5(b)给出了位于(-200, 200)的点目标的三维图, 由图可知, 成像后点目标的 3dB 宽度为 0.51m。若用该参数进行条带模式成像, 其方位向理论分辨率为 1m, 验证了用滑动聚束 SAR 可以在天线尺寸不变的情况下提高方位向的分辨率, 并且仿真结果与理论推导一致。

4 结束语

滑动聚束 SAR 通过控制天线扫描速度来增加方位向相干累积的时间, 从而增加 SAR 的方位向分辨率。本文对滑动 SAR 的回波方程, 分辨率、天线扫描、测绘带宽等方面进行了分析, 并且给出了滑动聚束 SAR 的波数域成像算法。通过仿真实验表明, 滑动 SAR 可以得到比条带 SAR 分辨率更高, 测绘带宽比聚束 SAR 大的雷达图像。通过比较滑动聚束 SAR, 条带 SAR 和聚束 SAR, 可以把条带 SAR 和聚束 SAR 都看成滑动聚束 SAR 的一种特殊情况。

参 考 文 献

- [1] Ender J H G and Brenner A R. PAMIR: - a wideband phased array SAR/MTI system. *IEE Proc.Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(3): 165-172.
- [2] Ender J H G, Berens P, Brenner A R, Rossing L, and Skuptn U. Multichannel SAR/MTI system development at FGAN: From AER to PAMIR. *Proceedings of IGARSS, Toronto Canada, 2002: 1679-1701.*
- [3] Mittermayer Jisef, Lord Richard, and Borner Elke. Sliding spotlight SAR processing for TerraSAR-X using a new formulation of the extended chirp scaling algorithm. *Proceedings of IGARSS Toulouse France, 2003: 1462-1464.*
- [4] Moreira A, Mittermayer J, and Scheiber R. Extended chirp scaling SAR data processing in stripmap, ScanSAR and spotlight imaging modes. *EUSAR Munich Germany 2000: 749-752.*
- [5] 张澄波. 综合孔径雷达. 北京: 科学出版社, 1989, 第三章.
- [6] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms.* Boston: Artech House 1995: 31-43.
- [7] Jakowatz C V, Walhl Jr D E, Eichel P H, Ghiglia, Dennis C, and Thompson P A. *Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach.* Boston: Kluwer Academic publishers, 1996: 107-113.

- 唐 禹: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像理论及信号处理。
- 王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等。
- 张冰尘: 男, 1973 年生, 副研究员, 研究方向为 SAR 成像理论及信号处理。