

广域观测圆轨迹环扫 SAR 成像模式研究

孙 兵 周荫清 陈 杰 李春升
(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘 要: 圆轨迹环扫 SAR 是一种能够实现广域观测的新模式合成孔径雷达, 具有高时空分辨率、短重访周期、广域成像的特点, 特别是对于低速运动平台, 能在短时间内实现对大面积区域的快速观测, 观测效率高。该文建立了圆轨迹环扫 SAR 的运动模型, 进而得到 SAR 回波信号距离模型, 在此基础上分析了圆轨迹环扫 SAR 的信号多普勒特性以及方位分辨率特性, 最后探讨了圆轨迹环扫 SAR 的成像处理方法。计算机仿真结果验证了该文分析结论和成像方法的正确性, 圆轨迹环扫 SAR 是一种可行的广域观测成像模式。

关键词: 合成孔径雷达; 圆轨迹环扫; 广域观测; 成像模式

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)12-2805-04

Operation Mode of Circular Trace Scanning SAR for Wide Observation

Sun Bing Zhou Yin-qing Chen Jie Li Chun-sheng

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: Circular Trace Scanning Synthetic Aperture Radar (CTS-SAR) is a new operation mode radar, which can be used for wide observation. CTS-SAR have the characteristic of high time-space resolution, short repetition visit period and wide observation area. It can observe wide area in a short time with great efficiency for slow platform specially. The moving model and range model of CTS-SAR are advanced, and the Doppler characteristic and azimuth resolution characteristic of CTS-SAR are analyzed base on the above models. Then the imaging method of CTS-SAR is discussed. The computer simulation results validate the analyzed conclusions and the imaging method. CTS-SAR is competent for wide observation.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); Circular Trace Scanning(CTS); Wide observation; Operation mode

1 引言

合成孔径雷达(SAR)作为一种全天时、全天候的高分辨率微波成像雷达, 从上世纪 50 年代开始就越来越受到各国的重视, SAR 技术的发展取得长足进步。随着应用领域的扩大, 除了经典的条带模式之外, 聚束模式、扫描模式等新模式相继出现。聚束模式方位分辨率较高, 但成像区域较小, 而且不能进行连续观测; 扫描模式通过距离扫描增加观测带宽实现大面积观测, 然而在机载以及某些低速平台条件下, 即使距离向理论观测带宽度很大, 但方位向图像输出速度取决于平台速度, 实际观测效率仍然不高。近年来曲线 SAR^[1]作为一个研究热点出现, 圆迹 SAR^[2]作为曲线 SAR 的一种典型特例往往只是针对局部区域作多角度观测, 以提高分辨率或者获取三维高程信息。

本文提出一种在低速平台上能够实现快速广域观测的新成像模式, 这种模式的载荷平台作圆轨迹巡航运动, 因而形成广域环状成像区域。该模式通过提高方位向的图像输出速度以提高观测效率, 较之条带模式和聚束模式, 成像区域

更广, 特别需要指出的是每运动一周即可对同一区域重复观测一次。星载平台的重访周期通常为几天, 本模式的重访周期可降至几分钟, 重访周期较短, 时间分辨率高, 越能及时获得信息^[3]。当然圆轨迹环扫实现的条件是要求平台作圆周运动, 虽然严格达到这种状态较为困难, 但是当无人机等平台盘旋工作时, 是能够很好地逼近本文研究的圆轨迹巡航运动。

本文首先建立圆轨迹运动的几何模型, 并推导 SAR 回波信号的等效距离模型, 由于发射线性调频信号脉冲, 距离向的压缩处理以及性能和经典模式相同, 文中不再赘述, 重点分析圆轨迹环扫模式的方位向性能参数, 包括多普勒参数、合成孔径时间以及方位分辨率, 并与经典模式的参数计算公式对比, 揭示圆轨迹环扫模式与经典模式的内在联系。论文最后讨论了该模式下的成像处理方法, 并给出计算机仿真结果以验证本文的模式可行性及正确性。

2 圆轨迹环扫 SAR 原理

2.1 几何模型

圆轨迹环扫 SAR 是在正侧视条带模式的基础上, 通过限定载荷平台在某一高度平面内做圆轨迹巡航运动, 同时天线指向在地面的投影背离圆心方向, 平台运动一周即形成一

个环状成像区域。圆轨迹环扫 SAR 示意图如图 1 所示。雷达天线相位中心在高度为 H_0 的平面内作以 O_a 点为圆心, r_a 为半径, 角速度为 ω 的匀速圆周运动, 同时波束指向始终与飞行速度方向垂直, 且保持中心视角 θ_L 不变。当雷达平台巡航一周时, 可形成内径为 \overline{OB} , 外径为 \overline{OC} 的环形成像区域。

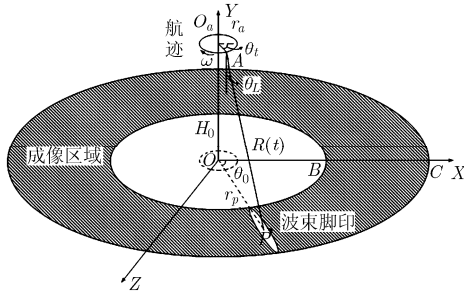


图1 圆轨迹环扫 SAR 工作示意图

2.2 距离模型和回波数学模型

在图 1 所示的北天东坐标系中, 设在 $t = 0$ 时刻波束中心照射点位于以 O 点为圆心, 半径为 r_p , 方位角(定义为水平面内与正北方向的夹角)为 θ_0 的目标点 P , P 点坐标可表示 $(r_p \cos \theta_0, 0, r_p \sin \theta_0)$ 。雷达天线相位中心 A 点在 t 时刻的坐标为 $(r_a \cos \theta_t, H_0, r_a \sin \theta_t)$, 其中表达式中角度和半径之间存在如下的关系:

$$\theta_t = \theta_0 + \omega t \quad (1)$$

$$r_p = r_a + H_0 \tan \theta_L \quad (2)$$

令 $R_0 = (r_a^2 + H_0^2 + r_p^2 - 2r_a r_p)^{\frac{1}{2}}$, 则不难求得 AP 的斜距表达式为

$$\begin{aligned} R(t) &= (r_a^2 + H_0^2 + r_p^2 - 2r_a r_p \cos \omega t)^{\frac{1}{2}} \\ &= R_0 + \frac{\omega^2 r_a r_p}{2R_0} t^2 - \left(\frac{\omega^4 r_a^2 r_p}{24R_0} + \frac{\omega^4 r_a^2 r_p^2}{8R_0^3} \right) t^4 + o(t^4) \end{aligned} \quad (3)$$

忽略四次及高次项, 斜距按二次曲线规律变化。进一步可得点目标 P 回波信号表达式^[3]为

$$\begin{aligned} S(\tau, t; R_0) &= \sigma W_a(t) a \left[t - \frac{2R(t; R_0)}{C} \right] \\ &\cdot \exp \left\{ -j\pi \left[\frac{4}{\lambda} R(t; R_0) + b \left(\tau - \frac{2R(t; R_0)}{C} \right)^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 C 为光速, λ 为波长, b 为调频率, σ 为目标后向散射特性, τ 和 t 分别为距离向和方位向时间。 $W_a(t)$ 是方位向天线方向性函数, $a(\tau)$ 发射脉冲包络, $R(t; R_0)$ 是点目标到雷达斜距。可见圆轨迹环扫 SAR 的点目标信号模型在形式上和经典模式回波模型没有区别。

3 圆轨迹环状条带 SAR 性能分析

3.1 多普勒参数性能

通过对式(3)求导和简单换算, 可得到 P 点的多普勒中

心频率 $f_{d0} = 0$ 以及调频率 $f_{r0} = \frac{2\omega^2 r_a r_p}{\lambda R_0}$ 。令天线相位中心的

线速度为 $v_a = \omega r_a$, 波束扫过 P 点的视在线速度为 $v_p = \omega r_p$, 进而多普勒调频率可表示为

$$f_{r0} = \frac{2v_a v_p}{\lambda R_0} = \frac{2v_a (v_a + \omega H_0 \tan \theta_L)}{\lambda R_0} \quad (5)$$

从上式可知圆轨迹环扫 SAR 与经典正侧视条带模式的多普勒参数表达式 ($f_{d0} = 0$, $f_{r0} = \frac{2v_a^2}{\lambda R_0}$) 十分相似。实际上, 当

环扫角速度 $\omega \rightarrow 0$ 时, $f_{r0} \rightarrow \frac{2v_a^2}{\lambda R_0}$, 即当雷达巡航角速度为

零时圆轨迹环扫模式退化为条带模式。由于 $r_p \gg r_a$ 则有

$f_{r0} \gg \frac{2v_a^2}{\lambda R_0}$, 即圆轨迹环扫的多普勒调频率远大于正侧视时的调频率。

3.2 方位分辨率性能

圆轨迹环扫 SAR 的方位向和经典条带有所不同, 不同方位角处的方位向均不相同, 但仍然和距离向垂直、和瞬时线速度方向垂直, 因而环扫 SAR 也可称之为环状条带 SAR。以下从多普勒角分辨和经典条带的公式两个方面分析方位分辨率。

设 P' 点是和 P 点位于同一半径, 方位角差为 $\Delta\theta$ 的另一目标, 则 t 时刻对应的斜距

$$R_{p'}(t) = (r_a^2 + H_0^2 + r_p^2 - 2r_a r_p \cos(\omega t + \Delta\theta))^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

它们对应的多普勒频差为

$$\Delta f = \frac{2\omega r_a r_p \sin \Delta\theta}{\lambda R_0} \approx \frac{2\omega r_a r_p}{\lambda R_0} \Delta\theta \quad (7)$$

如果方位向采样率(即脉冲重复频率)为 f_p , N 点方位积累时间为 T_d , 并采用 N 点傅里叶变换, 设 P' 点是距离 P 点最小分辨率的目标, 则有

$$\Delta f = \frac{f_p}{N} = \frac{2\omega r_a r_p}{\lambda R_0} \Delta\theta \quad (8)$$

则对应的角分辨和方位分辨率分别为

$$\Delta\theta = \frac{\lambda R_0 f_p}{2N\omega r_a r_p} \quad (9)$$

$$\rho_a = r_p \Delta\theta = \frac{\lambda R_0 f_p}{2N\omega r_a} = \frac{\lambda R_0 f_p}{2Nv_a} = \frac{\lambda R_0}{2v_a T_d} \quad (10)$$

如果直接参照经典条带方位分辨率计算公式^[4], 则圆轨迹环扫 SAR 的方位分辨率为

$$\rho_a = \frac{v}{B_a} = \frac{v_p}{f_r T_d} = \frac{\lambda R_0}{2v_a T_d} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可知两种方式计算得到的分辨率一致, 但是式(11)分子的速度不再是雷达速度而是波束扫过目标的视在速度。由于信号积累时间 T_d 最大不超过合成孔径时间

$$T_s = \frac{\theta_a R_0}{\omega r_p} \ll \frac{\theta_a R_0}{v_a} \text{ (其中 } \theta_a \text{ 为方位向波束宽度), 因而最大方位带宽 } B_{a \max} = \frac{2v_a \theta_a}{\lambda}, \text{ 方位分辨率不优于 } \rho_{a \min} = \frac{\lambda r_p}{2\theta_a R_0}.$$

从多普勒参数和方位分辨率的分析可以看出,圆轨迹环扫 SAR 是一种较之于条带模式更为通用的成像模式,条带模式是圆轨迹环扫模式环扫角速度为零的特例。不难发现,波束扫过目标视在速度的引入,条带模式的多普勒调频率、合成孔径时间、多普勒带宽以及方位分辨率公式均可以推广至圆轨迹环扫模式的相应参数计算。

4 圆轨迹环扫 SAR 成像处理

4.1 信号处理流程

圆轨迹环扫 SAR 成像处理流程如图 2 所示。由于圆轨迹环扫 SAR 信号的最大积累时间远小于条带模式的合成孔径时间,所以对于每一个点目标的信号是子孔径信号。通常需要对全场景回波信号在方位向分批次进行,分批依据主要是保证批次内点目标积累完全,批次之间同时要保证一定的重叠度,距离向也根据实际需要分块完成。经过块数据成像处理后得到的图像存在几何失真,需要校正到同样的参考系中最终实现图像的拼接输出。

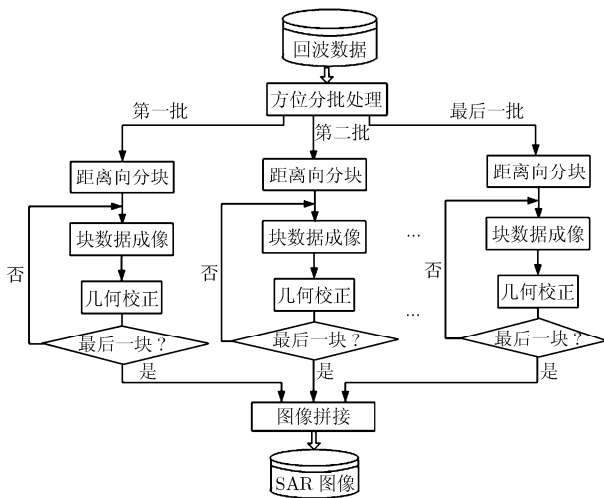


图2 圆轨迹环扫 SAR 成像处理流程图

4.2 块数据处理算法

由于块数据为子孔径信号,因而成像处理可以在经典子孔径算法的基础上加以改进来完成。常用的子孔径方法包括 SPECAN^[5], ECS^[6]以及文献[7]中提出的聚焦算法。从多普勒参数可以看出,信号模式等效为正侧视,信号处理难度有所降低,对于圆轨迹环扫 SAR 而言,由于成像批次和距离分块较多,在精度容许的前提下,计算量是更为重要的指标,因而成像算法需要结合模式本身的特点,可采取必要的近似以简化成像处理过程。本文利用时域校正距离徙动方位频谱

分析的方法进行快速近似成像处理。

4.3 校正和拼接处理方法

利用子孔径算法直接得到的图像通常是斜距图像,而且方位向也存在一定程度的失真,特别是图像的方位向随着方位角的变化时刻发生变化,因而不能直接将各块图像输出拼接作为最终图像输出。环扫 SAR 的几何校正算法是利用多普勒定位方程组完成图像校正的,校正过程中必须考虑到成像算法过程中的补偿以及像素间隔畸变等带来的影响。最后将各图像校正到同一参考系中,拼接处理可较方便地完成。

5 计算机仿真

5.1 仿真参数

为验证本文提出的圆轨迹环扫 SAR 模式可行,按表 1 所示的参数(波位参数选择与经典条带模式类似)进行单点和点阵目标的回波仿真以及成像处理。

表 1 圆轨迹环扫 SAR 仿真参数列表

λ (m)	f_p (Hz)	B_a (MHz)	f_s (MHz)	H_0 (m)	v (m/s)
0.03	200	60	66	10000	100
θ_L (°)	θ_a (°)	θ_r (°)	θ_0 (°)	ω (°/s)	T (s)
30	5	22	45	2	1.28

表 1 中 f_p 表示脉冲重复频率, B_a 为线性调频信号调频率, f_s 为采样率, θ_a 和 θ_r 分别为方位向和距离向波束宽度, θ_0 为起始方位方位角, T 为仿真时间。

5.2 成像仿真结果

对仿真数据进行成像处理,得到的单视复图像点目标的评估结果如图 3 所示。其中方位向分辨率指标测量值为 1.200m,理论值为 1.199m,误差小于 0.5%,表明本文的多普勒参数和分辨率计算公式(11)以及成像处理的正确性。

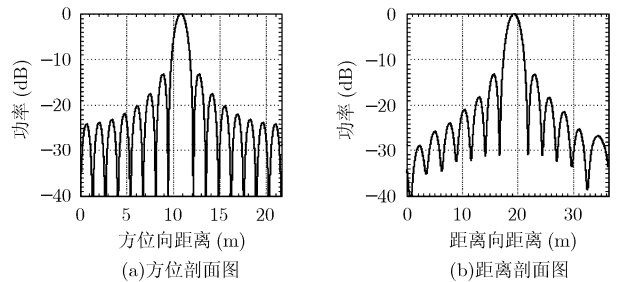


图 3 点目标三维效果图及方位向和距离向剖面图

此外将大面积点阵回波数据分批分块处理,分别对各块数据进行成像处理和几何校正,将各子块图像输出为以北天东坐标系原点为中心、像素间隔为 5m×5m 的图像,将各子块图像经过融合拼接,得到完整的结果。通过计算可以得到,圆环内外径分别为 6.3km 和 11.6km,实测结果与理论值一致,观测面积为 2.98×10⁸m²,相对于条带模式一个环扫周期

内的观测面积 $9.45 \times 10^7 \text{m}^2$, 观测面积增加了 2 倍多。

6 结束语

圆轨迹环扫 SAR 作为一种能够快速实现广域观测的新模式, 具有较高的时间和空间分辨率, 观测效率高, 在某些场合下具有通常的 SAR 模式无可比拟的优势。本文建立圆轨迹运动的几何模型和等效距离模型, 重点分析圆轨迹环扫模式的多普勒参数特性、方位分辨率等特性, 分析表明圆轨迹环扫模式是一种更为广义的正侧视条带模式 SAR。论文最后讨论了该模式下的成像处理方法, 并给出计算机仿真结果以验证本文的模式可行性及正确性。

参 考 文 献

- [1] LI J, Bi Z, Liu Z S, and Knaell K. Use of curvilinear SAR for three-dimensional target feature extraction [J]. *IEEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation*, 1997, 144(5) : 275-283.
- [2] 张祥坤. 高分辨率圆迹合成孔径雷达成像机理及方法研究. [博士论文], 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
Zhang Xiang-kun. Theoretical and technical study of high-resolution circular SAR [Ph.D. dissertation]. Beijing: Graduate school of Chinese Academy of Science, 2007.
- [3] 魏钟铨, 等. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 13-14.
Wei Zhong-quan. *et al.* Synthetic aperture radar satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001: 13-14.
- [4] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 45.
Zhang Cheng-bo. Synthetic aperture radar theory, system analysis and application[M]. Beijing: Science Press, 1989: 45.
- [5] Sack M, Ito M, and Cumming I G. Application of efficient linear FM matched filtering algorithms on synthetic aperture radar processing[J]. *IEEE Proc-F*, 1985, 132(1): 45-57.
- [6] Moreira A, Mittermayer J, and Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaging modes[J]. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123-1136.
- [7] 孙兵, 周荫清, 李天池, 等. 环扫 SAR 的快速聚焦算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 3(7): 803-806.
Sun Bing, Zhou Yin-qing, and Li Tian-chi, *et al.* Fast focused imaging algorithm for circular scanning SAR[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 3(7): 803-806.

孙 兵: 男, 1981 年生, 博士生, 从事高分辨率雷达成像处理、弹载 SAR 系统总体分析与仿真、SAR 图像质量评估方面的研究工作。

周荫清: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事信息获取与处理、高分辨率成像雷达和时变谱估计等方面的教学和科研工作。