

doi: 10.7690/bgzdh.2023.05.019

面向复杂地形应用的星载 SAR 成像能力仿真分析

周 校¹, 李春海¹, 余松林¹, 王吉军¹, 李兴凯²

(1. 军事科学院国防工程研究院, 北京 100850; 2. 陆军研究院, 北京 100042)

摘要: 针对复杂地形对星载合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 成像产生较大影响的问题, 提出一种顾及目标区域地形参数的卫星成像时长估算方法。利用 3 维仿真软件进行模拟分析, 编程实现目标区域地形因素对雷达成像影响的仿真分析。结果表明: 该方法可有效提高星载 SAR 成像时长解算精度, 为优化目标成像进行轨道调整设计提供重要依据。

关键词: 地形; 合成孔径雷达; 成像; 仿真

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Simulation Analysis of Spaceborne SAR Imaging Capability for Complex Terrain Applications

Zhou Xiao¹, Li Chunhai¹, Yu Songlin¹, Wang Jijun¹, Li Xingkai²

(1. Institute of Defence Engineering, Academy of Military Science, Beijing 100850, China;

2. Army Research Institute, Beijing 100042, China)

Abstract: In order to solve the problem that complex terrain has a great impact on spaceborne synthetic aperture radar (SAR) imaging, an estimation method of satellite imaging duration considering the terrain parameters of the target area is proposed. Simulation analysis is carried out by using 3D simulation software, and the simulation analysis of the influence of terrain factors on radar imaging in target area is realized by programming. The results show that this method can effectively improve the accuracy of spaceborne SAR imaging duration calculation, and provide an important basis for optimizing target imaging and orbit adjustment design.

Keywords: terrain; SAR; imaging; simulation

0 引言

合成孔径雷达 (SAR) 作为一种主动式遥感探测技术, 具有全天候、全天时成像能力, 在灾害监测、地质测绘、军事侦察等领域得到了广泛应用^[1-3]。星载 SAR 可自由运行于预定轨道上, 通过对卫星轨道的设计调整, 实现对关注目标的雷达成像, 具有其他载体探测手段无法比拟的优势。雷达影像不同于光学影像, 主要通过雷达回波信号的幅值和相位信息进行目标识别, 受雷达侧视成像角度固定的影响, 在一些地形起伏较大的区域, 无法避免出现阴影和叠掩现象^[4]。在对关注目标成像观测时, SAR 有效成像时长是重要的指标之一^[5-6], 通过调整卫星轨道或雷达传感器参数, 可使成像时长最大化, 便于提高雷达影像成像质量^[7-10]。特别是对山区目标成像探测时, 山体对雷达信号遮挡较为严重, 需要考虑目标区域山体对 SAR 成像的影响, 才能准确计算成像时长, 进而优化卫星成像时运行轨道, 达到对目标的最佳成像条件。

笔者采用航天仿真软件对卫星轨道姿态调整、卫星信号覆盖能力、卫星与地面站通信等功能开展了模拟分析, 利用卫星轨道与目标间的可见性, 结合目标区域地形数据, 编程实现了目标区域地形因素对雷达成像影响的仿真分析。结果表明: 笔者所提方法可靠性高, 可为卫星轨道参数调整提供参考依据。

1 星载 SAR 几何模型

星载 SAR 系统几何模型主要包括卫星轨道几何模型和雷达成像几何模型^[11]。

1.1 卫星轨道几何模型

卫星几何模型如图 1 所示, 主要有地心坐标系和轨道坐标系, 地面目标常用地心坐标系 XYZ 表示, 卫星位置常采用轨道坐标系 $X_0Y_0Z_0$, 两者之间可通过欧拉转换参数进行转换。卫星搭载 SAR 传感器在预定轨道上运动, SAR 天线按照预先设定的下视角、极化方式、工作模式等参数照射地球表面某区

收稿日期: 2023-01-21; 修回日期: 2023-02-19

作者简介: 周 校(1985—), 男, 河北人, 博士, 工程师, 从事雷达数据处理研究。E-mail: 38597960@qq.com。

域，即成像场景。在实际应用中，星载 SAR 常根据目标探测需求，对轨道参数进行编程调整，进而达到最佳的成像效果，卫星轨道主要涉及半长轴、偏心率、升交点赤经、轨道倾角、近地点幅角和近地点时刻^[12]6 个参数。综合考虑 SAR 探测范围、信噪比和动力续航能力等因素，SAR 卫星轨道多位于倾角约 90°，相对高度在 500~800 km 之间的太阳同步轨道。

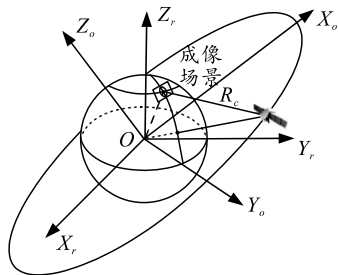


图 1 卫星几何模型

1.2 雷达成像几何模型

SAR 图像不同于光学图像，主要通过雷达天线发射线性调频信号，接收地物反射后的雷达回波信号，对发射接收信号进行信号处理后，生成目标场景的 SAR 图像^[13-14]。由于卫星与目标之间的距离较远，接收的回波信号窗口通常为前 6~10 个回波周期发射的雷达信号；因此，雷达成像需要一定观测时长，雷达发射的脉冲线性调频信号为^[15]：

$$s_p(t_r) = \text{rect}(t_r/T_p) \exp\{2\pi f_0 t_r + \pi \gamma t_r^2\} \quad (1)$$

式中： f_0 为雷达工作频率； t_r 为距离向时间； γ 为信号调频率。

雷达成像几何模型如图 2 所示： θ_s 为斜视角； θ_d 为下视角； R_o 为目标到卫星轨道之间的垂直距离； t_0 为雷达信号零多普勒时刻； t_c 为雷达天线相位中心经过点目标的时刻； R_s 为该时刻雷达与目标之间距离； $R(t_a)$ 为卫星到目标点的瞬时距离，该值与卫星位置相关^[16]。

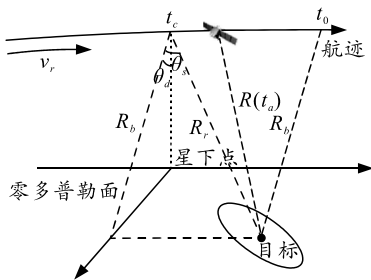


图 2 成像几何模型

2 地形对目标成像影响

选取塞北某处位于山谷的居民区作为 SAR 成

像测试区域，区域周边有高山遮挡，地形对 SAR 信号传输影响较大。提取测试区域周边地形数据，计算地形对目标成像的影响，结果如图 3 所示，图中高度角是以测试区域为中心，不同方位的地形最高点引起的遮挡高度角，当卫星与目标之间高度角小于最大遮挡高度角时，雷达信号将被遮挡。由图 3 可知，地形对目标区域的成像影响与方位相关，沿山谷方向约 20°的范围，对目标的影响较小，影响值小于 5°，其他方向影响值均大于 15°，其中在正对山体 40°范围，影响值达到 25°以上。通常情况下，星载 SAR 成像高度角多为 10°~60°；因此，当地形遮挡较严重时，在卫星成像高度角范围内，雷达仍无法对目标区域进行有效成像，需要调整卫星运行轨道，才能对目标进行有效探测。

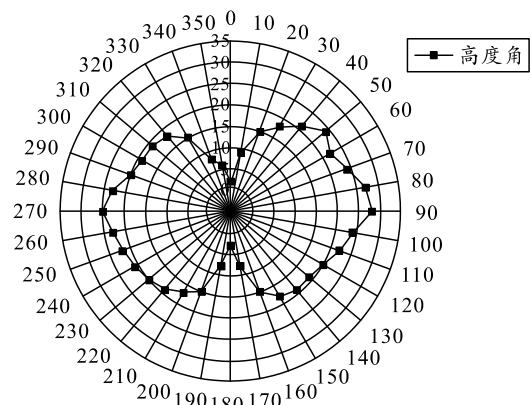


图 3 地形对目标成像影响

笔者提出顾及地形参数的星载 SAR 成像时长计算方法，首先读取目标区域中心位置及周边 DEM 模型数据，计算不同方位地物最高点引起的遮挡高度角，将该值作为地形截止高度阈值；随后利用自主开发软件联合仿真方法，动态设置卫星轨道参数、传感器成像角度范围，获取卫星与目标之间的瞬时几何信息；之后分析卫星与目标之间的瞬时高度角是否同时满足传感器成像角度和地形截止高度阈值，采用线性内插的方式，计算满足高度角条件的临界时刻，利用临界时刻计算目标区域雷达成像有效时长。

3 仿真分析

采用 3 维仿真软件对笔者提出 SAR 成像时长计算方法进行仿真分析，卫星轨道参数如表 1 所示。雷达成像角度设定为 10°~60°，仿真时长为 24 h，时间采样为 30 d，3D 和 2D 仿真效果如图 4 所示，其中，2D 效果图中亮色线条为卫星与目标通信可见的运动轨迹。由图 4 可知，仅考虑卫星运行轨迹的

情况下, 1 天中卫星与目标共有 6 个时段通信可见, 通信时刻如表 2 所示, 其中, 第 3 和 6 时段通信可见时间较长、高度角变化较大, 其他 4 条轨道可见时间较小, 高度角变化较小。

表 1 卫星轨道参数

半长轴/ km	偏心率	升交点赤 经/(°)	轨道倾 角/(°)	近地点 幅角/(°)	近地点 时刻
6 883.5	0.001	88.617	97.44	90	0

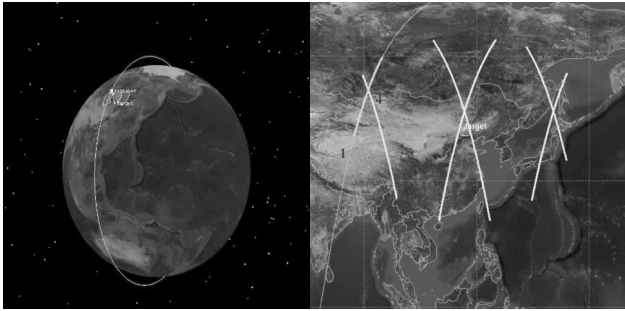


图 4 仿真效果

表 2 卫星与目标通信可见时刻

轨道序号	起始时刻	终止时刻
1	04:48:36.617	04:56:53.666
2	12:24:12.018	12:33:30.047
3	13:56:19.398	14:07:55.045
4	15:32:28.353	15:40:42.690
5	01:22:06.709	01:30:31.108
6	02:54:57.740	03:06:33.517

采用自主编程软件, 得到不同时刻下, 卫星与目标之间的距离、方位角和高度角等几何信息, 以具有代表性的第 2、3 时段为例, 分析卫星与目标之间几何关系, 详细参数如表 3、4 所示。

由表 4 可知, 第 2 时段内, 卫星与目标高度角变化范围为 $0^{\circ} \sim 12^{\circ}$, 距离变化范围 1 600~2 600 km, 角度和距离变化幅度较小, 第 3 时段内, 卫星与目标高度角变化范围 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$, 距离变化范围 532~2 622 km, 角度和距离变化幅度较大。

表 3 第 2 时段卫星与目标几何关系

时间	方位角/(°)	高度角/(°)	距离/km
12:24:12.018	112.742	0	2 600.069
12:24:42.000	109.496	1.571	2 432.498
12:25:12.000	105.761	3.179	2 273.148
12:25:42.000	101.457	4.806	2 124.208
12:26:12.000	96.497	6.421	1 988.220
12:26:42.000	90.806	7.975	1 868.198
12:27:12.000	84.342	9.392	1 767.561
12:27:42.000	77.128	10.571	1 689.914
12:28:12.000	69.283	11.402	1 638.637
12:28:42.000	61.039	11.786	1 616.315
12:29:12.000	52.711	11.675	1 624.181
12:29:42.000	44.636	11.084	1 661.810
12:30:12.000	37.093	10.089	1 727.229
12:30:42.000	30.258	8.799	1 817.380
12:31:12.000	24.197	7.321	1 928.714
12:31:42.000	18.898	5.744	2 057.687
12:32:12.000	14.297	4.130	2 201.075
12:32:42.000	10.312	2.519	2 356.106
12:33:12.000	6.858	0.935	2 520.479
12:33:30.047	5.001	0	2 623.061

表 4 第 3 时段卫星与目标几何关系

时间	方位角/(°)	高度角/(°)	距离/km
13:56:19.398	168.480	0	2 590.234
13:56:49.000	168.779	1.988	2 379.954
13:57:19.000	169.129	4.209	2 167.190
13:57:49.000	169.541	6.703	1 955.160
13:58:19.000	170.041	9.568	1 744.410
13:58:49.000	170.667	12.953	1 535.749
13:59:19.000	171.486	17.090	1 330.444
13:59:49.000	172.624	22.363	1 130.613
14:00:19.000	174.344	29.417	940.041
14:00:49.000	177.316	39.344	765.951
14:01:19.000	183.820	53.707	622.589
14:01:49.000	208.002	72.378	535.438
14:02:19.000	302.818	73.549	532.926
14:02:49.000	330.066	54.925	616.077
14:03:19.000	337.014	40.290	757.096
14:03:49.000	340.126	30.167	929.894
14:04:19.000	341.915	22.991	1 119.700
14:04:49.000	343.097	17.643	1 319.020
14:05:19.000	343.954	13.457	1 523.940
14:05:49.000	344.614	10.039	1 732.278
14:06:19.000	345.149	7.151	1 942.733
14:06:49.000	345.598	4.641	2 154.478
14:07:19.000	345.987	2.409	2 366.956
14:07:49.000	346.331	0.387	2 579.771
14:07:55.045	346.396	0	2 622.665

结合目标区域地形数据, 以第 2、3 时段为例, 分析地形截止高度角和卫星与目标瞬时高度角信息, 结果如图 5 所示。第 2 时段内, 卫星与目标的瞬时高度角均小于地形截止高度角, 该时段内, 虽然卫星与目标通信可见, 但雷达无法对目标成像; 第 3 时段内, 部分时刻卫星与目标瞬时高度角大于地形截止高度角, 同时考虑雷达传感器 $10^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的成像角度阈值, 可得该时段内仅部分时刻满足雷达传感器成像几何要求。因此, 对目标进行雷达探测时, 如不考虑地形影响, 仅考虑目标与卫星之间的几何参数计算时长, 会出现与实际成像条件不符, 无法对目标有效成像探测的情况。

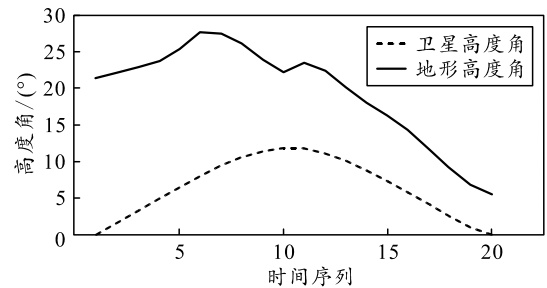


图 5 第 2 时段地形高度截止角与瞬时高度角关系

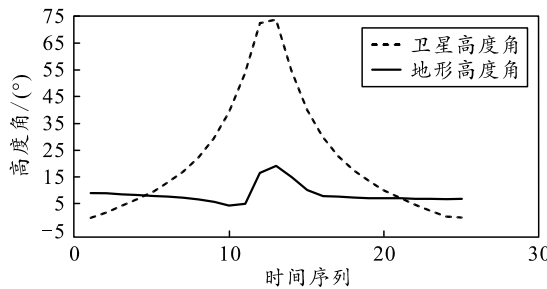


图 6 第 3 时段地形高度截止角与瞬时高度角关系

利用笔者提出的数据处理方法，对 6 个时段的星载 SAR 成像时长进行统计分析，结果如表 5 所示，表中可视时长表示卫星与目标通信可见时长、几何参数成像时长为考虑雷达成像角度阈值得到的雷达成像时长，本文中方法计算的成像时长为顾及地形后的雷达成像时长。

表 5 利用笔者方法计算的成像时长统计 s

时段	可视时长	几何参数成像时长	本文中方法计算的成像时长
1	497.048	0	0
2	558.030	195.002	0
3	695.647	352.447	352.447
4	494.336	0	0
5	504.400	0	0
6	695.777	353.803	353.803
合计	3 445.238	901.252	706.250

由上表可知：在可视时长内，仅考虑雷达传感器成像角度阈值计算的成像时长存在一定的失真，如第 2 时段部分时刻虽然满足了传感器角度阈值；但是受地形影响该时段仍无法成像，在考虑地形影响条件下，SAR 有效成像时长由 901.252 s 缩短至 706.25 s，结果更符合目标成像实际情况，可作为目标雷达成像时，卫星轨道调整的重要参考指标，进而提升 SAR 成像质量。

4 结束语

随着低轨雷达卫星的可用数量不断增多、新体制雷达成像技术的不断发展，雷达探测成像能力不断增强。利用笔者所提成像时长解算方法，能够在关注目标雷达探测前，对成像能力进行准确评估，为卫星轨道运行、星座轨道设计提供重要参考依据，通过设定合理轨道和传感器参数，进而提升 SAR 成像成果质量。

参考文献：

- [1] 云焯, 吕孝雷, 付希凯, 等. 星载 InSAR 技术在地质灾害监测领域的应用[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 73-85.
- [2] 孙造宇, 梁甸农, 张永胜. 星载 InSAR 系统 DEM 重建

及其误差分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1336-1440.

- [3] FERRETTI A, MONTIGUARNIERI A, PRATI C, et al. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation[J]. Journal of Financial Stability, 2007, 10(10): 156-162.
- [4] 邓云凯, 禹卫东, 张衡, 等. 未来星载 SAR 技术发展趋势[J]. 雷达学报, 2020, 9(2): 1-33.
- [5] 梁泽浩, 王晋, 李广雪. 星载 SAR 技术的发展及应用浅析[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(2): 29-32.
- [6] 刘辉, 徐青, 靳国旺, 等. 基于 DEM 的单幅 SAR 影像直接定位[J]. 测绘科学, 2018, 43(10): 22-32.
- [7] 李志强, 吴曦, 荣明, 等. 基于信息系统体系对抗 STK 基础仿真应用[M]. 北京: 军事科学出版社, 2014: 122-130.
- [8] 韩双连, 施岩龙, 陈子昂. 基于 STK/Matlab 的预警系统探测能力分析[J]. 现代雷达, 2021, 43(11): 46-50.
- [9] 李磊, 孙君亮. 基于 STK 的某飞行器可视化仿真研究[J]. 自动化技术与应用, 2016, 35(5): 105-108.
- [10] 邓晶, 张明智, 李志强, 等. 基于 STK 的信息作战态势三维可视化表现方法研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11): 2654-2659.
- [11] 肖亚伦. 航天器飞行动力学原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1995: 89-96.
- [12] 高静, 刘小萌. 基于 STK 的混合星座性能仿真与分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 773-778.
- [13] 李春升, 于泽, 陈杰. 高分辨率星载 SAR 成像与图像质量提升方法综述[J]. 雷达学报, 2019, 8(6): 717-731.
- [14] WANG P B, LIU W, CHEN J, et al. A high-order imaging algorithm for high-resolution spaceborne sar based on a modified equivalent squint range model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(3): 1225-1235.
- [15] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 63-65.
- [16] KRIEGER G, MOREIRA A, FIEDLER H, et al. TanDEM-X: a satellite formation for high resolution SAR interferometry[C]//FRINCE 2005 Workshop, ESA ESRIN. Frascati, Italy, 2005.