

星载 SAR 广义聚束模式天线波束控制研究

高祥武*** 杨汝良*

*(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

***(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文介绍了广义聚束概念并建立了星载 SAR 广义聚束模式简化空间几何模型。在此基础上研究了天线波束指向角的控制方法, 得出了在合成孔径时间内实时控制天线波束指向角的理论依据。最后结合一组系统参数给出了波束指向控制的实验结果, 验证了理论公式。

关键词: 合成孔径雷达, 聚束式合成孔径雷达, 波束控制

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)12-1876-03

Study on the Antenna Beam Control of Spaceborne Broad-Sense Spotlight SAR

Gao Xiang-wu*** Yang Ru-liang*

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

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

Abstract The concept of broad-sense spotlight is put forward and the simplified space geometry model of spaceborne broad-sense spotlight SAR is built in this paper. On the base of the simplified model, the control method of antenna beam direction angle is studied. The theory for computing the real-time beam direction angle is deduced. Finally, some experimental results are presented by a group of system parameters and the theory formula is validated.

Key words Synthetic Aperture Radar(SAR), Spotlight SAR, Beam control

1 引言

聚束模式合成孔径雷达是对小区域高分辨率成像的一种有效手段, 天线波束始终指向成像场景中心, 以便在合成孔径期间, 成像场景时刻都被天线波束所覆盖^[1,2]。我们称这种传统意义上的聚束模式为“狭义聚束”。狭义聚束在提高方位分辨率的同时限制了成像场景区域的方位向尺寸, 为了克服这一现象, 一种方法是对地面目标连续进行聚束成像, 这对惯性导航系统和波束控制系统的精度提出了苛刻的要求; 另一种可能的解决方案是采用一种介于条带模式和狭义聚束模式之间的成像模式, 我们称之为“广义聚束”^[3]。

广义聚束模式可以根据应用要求在成像场景面积和图像分辨率之间进行权衡, 增加了系统工作的灵活性。但是这种灵活的工作模式对天线系统提出了更高的要求, 增加了波束控制系统的复杂性。广义聚束在星载 SAR 中应用比较普遍, 国外已有成熟的系统, 但关于波束指向控制这一关键技术还从未公开, 本文将对这一问题进行理论探索性研究。

2 广义聚束模式

广义聚束模式的合成孔径长度要比条带模式长, 即超过天线真实波束宽度, 但也不像狭义聚束那样整个场景目标始终在天线波束的覆盖之中。实质上, 广义聚束的天线波束中心始终指向的位置要远于成像场景中心的位置。为了能够说明, 图 1 给出了直观的解释

从图 1 可以看出, O 点为天线波束中心的聚交点。当 O

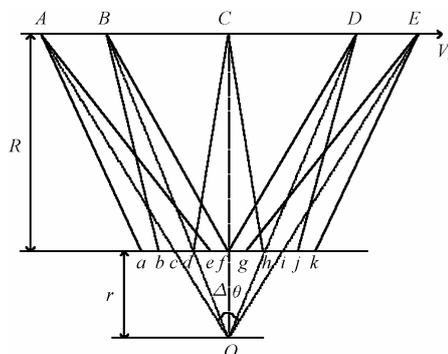


图 1 广义聚束模式示意图

点位于场景中心 f 点时, 成为狭义聚束模式; 当 O 点位于无穷远处时, 成为条带模式。为了进行比较, 图 2, 图 3 给出了对应狭义聚束模式和条带模式的方位波束指向示意图。

从图 1 可以看出, 随着 O 点距离场景越来越近, 成像几何关系也越来越接近狭义聚束模式, 为了能够定量表示广义聚束的聚束程度, 我们定义聚束因子 η 为

$$\eta = \frac{R}{R+r} \quad (1)$$

式中 R 和 r 如图 1 所示。当 $r=0$ 时, $\eta=1$ 为狭义聚束模式; 当 $r=\infty$ 时, $\eta=0$ 为条带模式; 当 $0 < r < \infty$ 时, $0 < \eta < 1$, 为广义聚束模式。

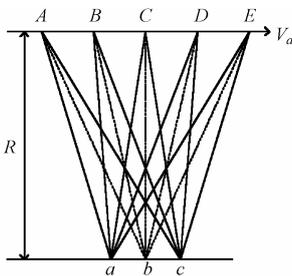


图 2 狭义聚束模式示意图

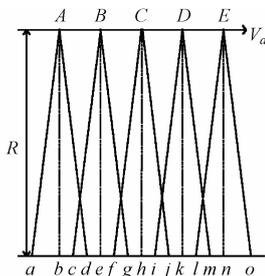


图 3 条带模式示意图

3 简化空间几何模型

一般情况下, 星载合成孔径雷达的空间几何关系比较复杂, 为了简化分析, 假设卫星轨道为圆轨道, 地球模型为球形, 轨道和地球都以地球球心为对称中心。可以通过坐标变换将复杂的星地几何关系进行简化, 具体步骤如下。

第 1 步 把卫星轨道在地球表面的投影作为新的经线圈, 这就相当于将地轴旋转了一个角度, 这个角度与卫星轨道倾角互为余角, 这样地轴就落在了轨道平面内。这一过程相当于将轨道坐标系变换成不转动的地心坐标系。

第 2 步 以经过目标场景中心和地心两点并且垂直于轨道面的平面与地球表面的交线作为新的赤道, 这就相当于目标场景中心位于赤道上。

第 3 步 将目标场景中心点的运动速度进行分解, 得到在新的赤道上的速度分量。

经过分析不难得出: 任意卫星轨道对任意目标成像的空间几何关系, 都可以通过定义新的经线和赤道得到与极轨对赤道目标成像相同的空间几何关系(也可以通过 3 次坐标旋转来实现^[4,5]), 唯一的不同的是目标的速度需要重新计算。因此, 为了简化问题, 我们选择极轨轨道和赤道目标来建立星载聚束合成孔径雷达简化空间几何模型, 如图 4 所示。

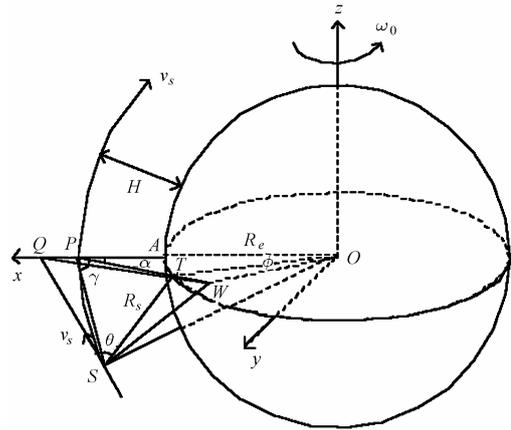


图 4 星载广义聚束 SAR 简化空间几何模型

卫星运行在高度为 H 的圆形轨道上, 雷达正侧视视角为 α , 此时对应的地心角为 ϕ , 目标 T 位于场景中心, 卫星和目标运动速度分别为 v_s 和 ω_0 , O 为地心, A 为星下点, x, y, z 构成右手系直角坐标系。图 4 为广义聚束 SAR 波束指向控制原理图。图中波束中心不是指向场景中心 T 点, 而是指向更远处 PT 延长线上的 W 点。

4 天线波束指向控制

在图 4 中, 建立时间坐标系, 当 $t=0$ 时, 卫星位于 P 点, 时间轴正轴沿着卫星速度 v_s 方向, 在 t_0 时刻, 卫星运动到 S 点, 瞬时波束指向角为 θ , 波束指向控制就是实时计算 θ 角, 然后波控系统调整天线波束中心指向, 使波束中心指向与雷达运动速度方向的角度等于 θ 。

在球坐标系下, 假设 $t=0$ 时刻, 雷达位于赤道上空, 雷达和场景中心目标的坐标分别为 $S(R_e+H, \pi/2 - \Omega t, 0)$ 和 $T(R_e, \pi/2, \phi + \omega_0 t)$, 其中 Ω 为星载雷达围绕地球运转的角速度, ω_0 为地球自转的角速度, ϕ 对应正侧视时天线波束中心对应的地心角。各量分别为

$$\Omega = \frac{v_s}{R_e + H} \quad (2)$$

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{H + R_e \sin \alpha}{R_e} \right) - \alpha \quad (3)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{24 \times 60 \times 60} \quad (4)$$

式中 v_s 为卫星运行速度, R_e 为地球半径 α 为雷达正侧视视角。

S, T 两点的距离随时间变化关系为

$$R_{ST}(t) = \sqrt{R_e^2 + (R_e + H)^2 - 2R_e(R_e + H)\cos(\Omega t)\cos(\omega_0 t + \phi)} \quad (5)$$

由于在一个合成孔径内, 地球转过的角度很小, 不做考虑,

因此式(5)近似为

$$R_{ST}(t) = \sqrt{R_e^2 + (R_e + H)^2 - 2R_e(R_e + H)\cos(\phi)\cos(\Omega t)} \quad (6)$$

假设广义聚束 SAR 的聚束因子为 η ，则

$$|TW| = |PT| \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (7)$$

其中

$$|PT| = \sqrt{R_e^2 + (R_e + H)^2 - 2R_e(R_e + H)\cos(\phi)} \quad (8)$$

则

$$|PW| = \frac{|PT|}{\eta} = \frac{\sqrt{R_e^2 + (R_e + H)^2 - 2R_e(R_e + H)\cos\phi}}{\eta} \quad (9)$$

由图中几何关系，可以得出

$$|QW|^2 = |QS|^2 + |SW|^2 - 2|QS||SW|\cos\theta \quad (10)$$

$$|QW|^2 = |QP|^2 + |PW|^2 + 2|QP||PW|\cos\alpha \quad (11)$$

$$|SW|^2 = |PS|^2 + |PW|^2 - 2|PS||PW|\cos\gamma \quad (12)$$

其中

$$|QS| = |SO| \operatorname{tg}(\Omega t_0) = (R_e + H) \operatorname{tg}(\Omega t_0) \quad (13)$$

$$|PS| = 2(R_e + H) \sin\left(\frac{\Omega t_0}{2}\right) \quad (14)$$

$$|QP| = (R_e + H) \left[\frac{1}{\cos(\Omega t_0)} - 1 \right] \quad (15)$$

由三面角关系，得

$$\cos\gamma = \cos\alpha \cdot \cos\beta = \cos\alpha \cdot \sin\left(\frac{\Omega t_0}{2}\right) \quad (16)$$

由式(9)到式(16)，我们可以计算出广义聚束 SAR 天线波束指向角。因此，只要知道轨道参数、视角、孔径位置时刻和聚束因子，即可计算出天线波束指向角。

5 实验结果

图 5 给出了对应正侧视角为 $\alpha = \pi/4$ ，聚束因子 $\eta = 0.5$ 时，不同轨道高度、不同孔径时间对应的天线波束指向角。

图 6 给出了轨道高度 $H = 600\text{km}$ ，正侧视角为 $\alpha = \pi/4$ 时，不同聚束因子、不同孔径时间对应的天线波束指向角。

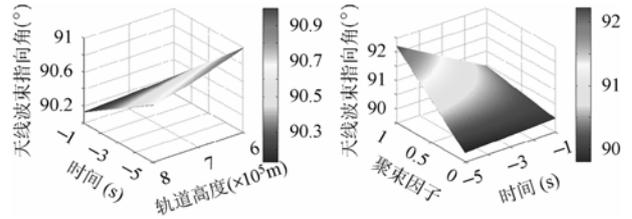


图 5 不同轨道波束指向角($\eta = 0.5$) 图 6 广义聚束模式波束指向角
可以看出，随着聚束因子 η 从 1 变到 0，即从狭义聚束模式经过广义聚束模式变化到条带模式，在合成孔径时间内天线波束指向的变化范围逐渐减小，这与实际情况完全相符。

6 结束语

本文介绍了广义聚束概念，推导了广义聚束因子，建立了星载 SAR 广义聚束模式简化空间几何模型。在此基础上计算了需要控制的天线波束指向角，得出了在合成孔径时间内实时控制天线波束指向角的理论依据。最后结合一组系统参数得出的实验结果进一步验证了理论公式的正确性，这将对星载 SAR 广义聚束模式天线波束控制有较大的实际工程意义。

参考文献

- [1] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms, Norwood, MA: Artech House, 1995, Chap. 1.
- [2] Jakowatz C V, Wahl D, Eichel P, Ghiglia D C, et al.. Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach, Norwell, MA: Kluwer Academic, 1996, Chap. 2.
- [3] Belcher D P, Baker C J. Hybrid strip-map/spotlight SAR, IEE Colloquium on Radar and Microwave Imaging, 1994, IEE p 2/1-7 0963 - 3308.
- [4] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论. 北京: 国防工业出版社, 2003: 274 - 275.
- [5] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001: 146 - 148.

高祥武: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为聚束模式合成孔径雷达信号处理。
杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事机载、星载合成孔径雷达系统研究工作。