

文章编号: 1001-2486(2004)03-0078-05

主星带伴随微小卫星编队 SAR 系统的空间分辨率分析^{*}

刘建平, 梁甸农, 何峰

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:根据主星带伴随微小卫星编队 SAR 系统的结构特点,建立了双站 SAR 系统的几何模型,然后推导分析了距离分辨率和方位向分辨率的解析表达式,最后仿真分析了以 ENVISAT 作为主星、“干涉车轮”的距离分辨率和方位向分辨率随主星到编队小卫星的距离、相对轨道高度的变化情况,并且与主星 SAR 的分辨率进行了比较。结果表明:(1)空间分辨率大小随波束入射角的变化基本上与主星一致;(2)空间分辨率随主星与伴随小卫星的距离增大而增大;(3)空间分辨率之差随微小卫星相对椭圆轨道短轴的增加而增加。

关键词:微小卫星编队;双站合成孔径雷达;空间分辨率

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

Analysis of Spatial Resolution for Spaceborne Parasitic SAR System

LIU Jian-ping, LIANG Dian-nong, HE Feng

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the framework of spaceborne parasitic SAR system and considering spaceborne bi-static SAR configuration formed by the existing satellite and each micro-satellite, a geometrical model is established, and formulations of spatial resolution in range and in azimuth are deduced. Finally varieties of the spatial resolution in range and in azimuth along with the angle of incidence, height of the relative orbit and the range between the existing satellite and micro-satellite are simulated and analyzed. The results indicate: (1) the spatial resolution in range and in azimuth are very similar to the existing satellite's; (2) the range between the existing satellite and micro-satellite is longer, the spatial resolution is bigger; (3) the height of the relative orbit is greater, the differences of spatial resolutions of each micro-satellite are bigger.

Key words: satellite cluster; bi-static SAR; spatial resolution

高分辨率和大测绘带合成孔径雷达(SAR)成像、运动目标指示(MTI)、干涉合成孔径雷达(InSAR)测高是航天军事应用对天基雷达系统的迫切需求。基于单星的天基雷达受各种条件的约束,很难满足上述需求。例如,不能提供合适长度的基线,实现运动目标指示和高精度干涉测高;由于受功率、分辨率、距离和方位模糊、测绘带宽间的约束关系,同时实现高分辨率和大测绘带 SAR 成像有相当难度。随着微小型航天器技术的迅速发展,基于微小卫星编队的雷达系统可望满足这些需求,并具有多功能、生存力和抗干扰能力强、周期短、成本低等优点,正成为国内外关注的热点。

主星带伴随微小卫星编队 SAR 系统就是其中一种实现形式。主星由传统的在轨单星 SAR 系统构成,发射雷达脉冲信号,而若干个微小卫星以一定的分布形状编队飞行在主星前或后一定距离处,同时接收从地面目标返回的信号,图 1 给出了系统的示意图。法国的“干涉车轮”就是其中的一个典型代表^[1]。关于主星带伴随微小卫星编队 SAR 系统空间分辨率的问题,目前还没有文献讨论过这个问题,而是直接以主星 SAR 的分辨率代替来分析系统性能^[2-4]。这种代替也许是一种近似考虑,但是为什么可以近似,什么情况下可以近似,微小卫星编队 SAR 系统的分辨率到底与哪些系统参数有关系?这就是本文要解决的问题。

* 收稿日期:2004-01-16

作者简介:刘建平(1975—),男,博士生。

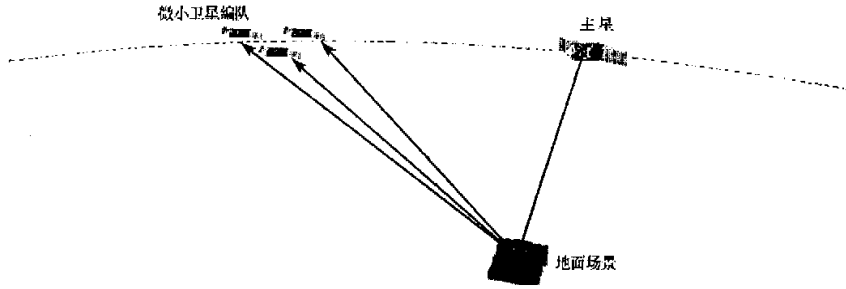


图1 主星带伴随微小卫星编队系统示意图
Fig.1 Spaceborne parasitic SAR System

1 主星带伴随微小卫星编队 SAR 系统的几何模型

从图1可以看出,单站发射、多站接收是主星带伴随微小卫星编队 SAR 系统的一个主要特点。主星具有完整的单星 SAR 系统功能,而其它 N 颗微小卫星相当于 N 个 SAR 接收通道。因此,主星带伴随 N 颗微小卫星编队系统可以看成 N 个双站合成孔径雷达系统。那么,对于主星与微小卫星构成的每一个双站合成孔径雷达系统,它的几何模型如图2所示。

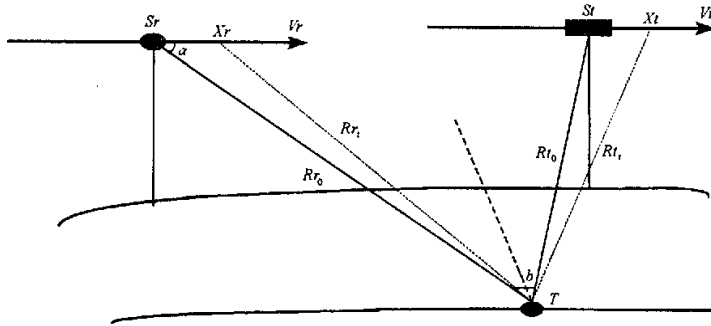


图2 主星与微小卫星的空间几何关系
Fig.2 Spatial geometry of master satellite and micro-satellite

不失一般性,假定主星与微小卫星运行的轨道都近似圆形轨道,地球为理想球体,忽略地球自转。主星 S_t 处于正测视下,飞行速度为 V_t ,而微小卫星 S_r 处于斜测视下,飞行速度为 V_r ,飞行方向与接收波束中心方向夹角为 α 。

2 方位向分辨率和距离向分辨率分析

2.1 方位分辨率

参考图2, t 时刻回波信号所经历的路程可以表示为

$$R_t = R_{t_0} + R_{r_t} \tag{1}$$

其中,

$$R_{t_0} = \sqrt{R_{t_0}^2 + X_t^2} \tag{2}$$

$$R_{r_t} = \sqrt{R_{r_0}^2 + X_r^2 - 2R_{r_0}X_r \cos \alpha} \tag{3}$$

不失一般性, $|X_t| \ll R_{t_0}$ 和 $|X_r| \ll R_{r_0}$, 因此近似处理得到

$$R_{t_i} \approx R_{t_0} + \frac{Xt^2}{2R_{t_0}} \quad (4)$$

$$R_{r_i} \approx R_{t_0} - Xr \cos a + \frac{Xr^2}{2R_{t_0}} \quad (5)$$

由于卫星在很微小的时间内做匀速直线运动,则

$$Xt = Vt \cdot t \quad (6)$$

$$Xr = Vr \cdot t \quad (7)$$

将以上近似处理代入(1)式,得

$$R_i = R_{t_0} + R_{r_0} - Vr \cdot t \cos a + \frac{(Vt \cdot t)^2}{2R_{t_0}} + \frac{(Vr \cdot t)^2}{2R_{r_0}} \quad (8)$$

回波的多普勒频率

$$fd_1 = -\frac{1}{\lambda} \frac{dR_i}{dt} = \frac{Vr \cos a}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \left(\frac{Vt^2 \cdot t}{R_{t_0}} + \frac{Vr^2 \cdot t}{R_{r_0}} \right) \quad (9)$$

则多普勒中心频率和多普勒带宽分别为

$$fd_c = \frac{Vr \cos a}{\lambda} \quad (10)$$

$$Bd = \frac{T_s}{\lambda} \left(\frac{Vt^2}{R_{t_0}} + \frac{Vr^2}{R_{r_0}} \right) \quad (11)$$

其中, T_s 是合成孔径时间,则方位向分辨力为

$$\rho_a = \frac{Vr}{Bd} = \frac{\lambda Vr R_{t_0} R_{r_0}}{T_s (R_{r_0} Vt^2 + R_{t_0} Vr^2)} \quad (12)$$

考虑到实际情况,伴随微小卫星与主星轨道具有相同的轨道周期,因而它们具有相同的轨道运行速度,所以方位分辨力可以进一步简化为:

$$\rho_a = \frac{\lambda \cdot R_{t_0}}{Vt \cdot T_s \left(1 + \frac{R_{t_0}}{R_{r_0}} \right)} \quad (13)$$

可以看到,主星和伴随微小卫星构成的双站合成孔径雷达的方位向分辨率不仅与目标到主星的距离、雷达波长、合成孔径时间、卫星运行速度有关,还与目标到伴随小卫星的距离与到主星的距离之比有关。

2.2 距离分辨率

参考双基地雷达的基本原理^[5],双基地雷达距离分辨率定义为双基地雷达能分辨的两个目标之间的最小距离。由于收发分置,在双基地接收机输出得到的时间间隔 τ 的两个回波,其对应实际空间距离不为 $c\tau/2$ (这一点与单基地雷达不同),但必定处于距离和之差等于 $c\tau/2$ 的两个等距椭圆上。

对于主星与伴随小卫星构成的双站合成孔径雷达来说,距离分辨率应该是发射视线上的双站雷达距离分辨率,其表达式为:

$$\rho_r \approx \frac{c\tau}{2\cos^2 b/2} \quad (14)$$

其中, b 为双基地角,如图 1 所示。这里的近似是一种保守估算,实际上大于 ρ_r 的两个目标在距离上是可以分的。

3 仿真分析“干涉车轮”

下面以“干涉车轮”为例分析主星带伴随微小卫星编队 SAR 系统的分辨率。

以 ENVISAT 作为主星,主星的雷达参数如下:

波长 $\lambda = 5.6\text{cm}$; 带宽 $B = 16\text{MHz}$; 脉冲重复周期 $PRF = 2000\text{Hz}$; 脉冲宽度 $\tau_p = 25\mu\text{s}$; 天线长度 $L = 10.0\text{m}$; 天线宽度 $W = 1.3\text{m}$; 发射功率 $P_t = 2.3\text{kW}$ 。

1. 仿真情形 1

假定主星与伴随微小卫星之间的距离取 40km,波束入射角从 20°到 60°变化,相对椭圆轨道短轴取 1.25km,结果如图 3、图 4。

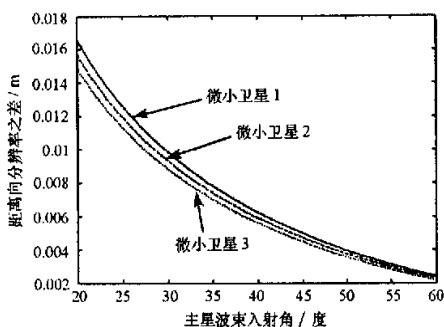


图 3 距离向分辨率之差
Fig.3 The difference of resolution in range

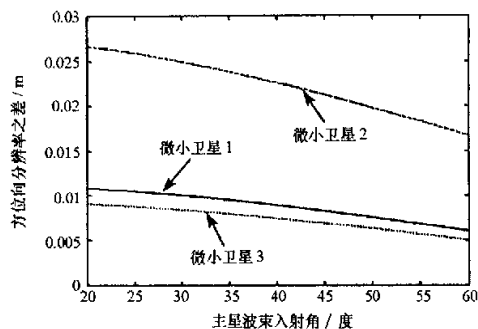


图 4 方位向分辨率之差
Fig.4 The difference of resolution in azimuth

从图 3、图 4 仿真结果来看,主星带伴随微小卫星构成的双站合成孔径雷达的分辨率随入射角的变化基本上与主星 SAR 一致,而且三颗伴随微小卫星与主星 SAR 的分辨率之差也随入射角增大而变小,距离分辨率之差小于 0.018m,方位向之差小于 0.03m。

2. 仿真情形 2

波束入射角取 45°,主星与伴随微小卫星编队之间距离从 10 ~ 500km 变化,相对椭圆轨道短轴取 1.25km,结果如图 5、图 6。

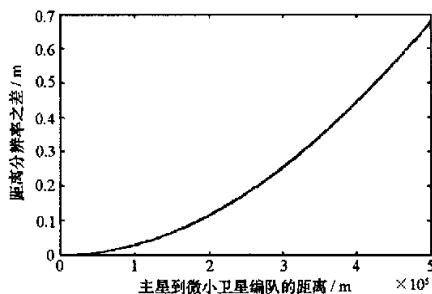


图 5 距离向分辨率之差
Fig.5 The difference of resolution in range

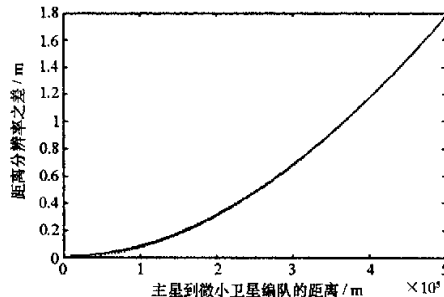


图 6 方位向分辨率之差
Fig.6 The difference of resolution in azimuth

从图 5、图 6 仿真结果来看,主星带伴随微小卫星构成的双站合成孔径雷达的分辨率随主星到微小卫星距离的增大而增大,而且三颗伴随微小卫星与主星 SAR 的分辨率之差也随主星到微小卫星距离的增大而增大,距离分辨率之差小于 0.7m,方位向之差小于 1.8m。

3. 仿真情形 3

波束入射角取 45°,主星与伴随微小卫星之间距离从 40km 变化,相对椭圆轨道短轴从 0.1 ~ 10km 变化,结果如图 7、图 8。

从以上这三种仿真情形来看,主星带伴随微小卫星编队 SAR 系统分辨率的基本特点有以下三点:

- (1) 空间分辨率大小随波束入射角的变化基本上与主星一致;
- (2) 空间分辨率大小随主星与伴随微小卫星的距离增大而增大;
- (3) 空间分辨率之间的差别大小随微小卫星相对椭圆轨道短轴的增加而增加。

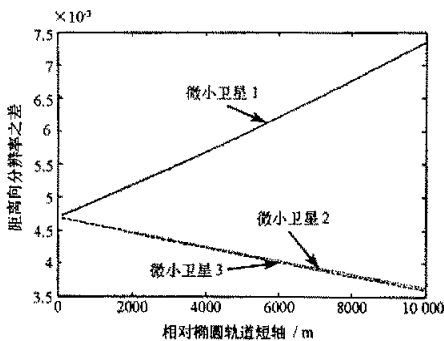


图7 距离向分辨率之差

Fig.7 The difference of resolution in range

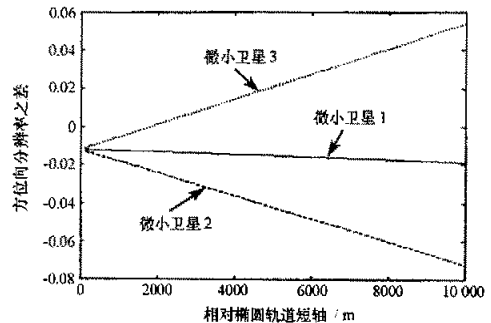


图8 方位向分辨率之差

Fig.8 The difference of resolution in azimuth

4 结论

通过以上微小卫星编队 SAR 系统分辨率的解析表达式的推导,以及对“干涉车轮”系统的仿真分析,可以发现微小卫星编队 SAR 系统分辨率不仅与主星的波束入射角有关,而且与主星到微小卫星编队的距离和相对椭圆轨道的短轴大小有关。因此,在考虑将主星的 SAR 系统分辨率代替微小卫星编队 SAR 系统分辨率的时候,必须要选择合适的主星到微小卫星编队的距离和相对椭圆轨道的短轴大小,否则在分析 SAR 系统性能时就会出现较大的偏差,从而影响系统设计。

另一个值得注意的问题是,本文的研究结论是基于主星与每颗微小卫星构成了一个双站合成孔径雷达这一几何模型,这个模型主要适合于整个系统执行干涉测量和地面动目标检测任务,而对于高分辨、大测绘带 SAR 成像任务并不适用。

参考文献:

- [1] Massonnet D. Capabilities and Limitation of the Interferometric Cartwheel[J]. IEEE Trans. on Geo. and Remote Sensing, 2001, 39(3):506-520.
- [2] Massonnet D. The Interferometric Cartwheel, a Constellation of Low Cost Receiving Satellites to Produce Radar Images that Can Be Coherently Combined[J]. Int J. of Remote Sens, in press.
- [3] Krieger G. Comparison of the Interferometric Performance for Spaceborne Parasitic SAR Configuration[J]. EUSAR 2002, 4-6.
- [4] Fiedler H. Analysis of Bistatic Configurations for Spaceborne SAR Interferometry[J]. EUSAR 2002.
- [5] 杨振起,张永顺,骆永军.双(多)基地雷达系统[M].北京:国防工业出版社,1998.

