

# 主星带伴随分布式小卫星雷达系统的波束同步分析\*

刘建平 梁甸农

(国防科技大学 电子科学与工程学院 湖南 长沙 410073)

**摘要** :波束同步是主星带伴随分布式小卫星雷达系统的同步问题之一,分析了主星带伴随分布式小卫星雷达系统的波束同步问题。根据主星带伴随分布式小卫星雷达系统的特点,结合小卫星天线俯仰向可扫描、姿态可调节,提出了三种波束指向同步方法;分析了分布式小卫星雷达系统的波束覆盖同步问题,分别建立了主星和伴随分布式小卫星的波束覆盖数学模型;仿真分析“干涉车轮”结果不仅证明这些模型的正确性,同时发现波束指向同步方法 2 有较好的优越性。

**关键词** :分布式小卫星;卫星姿态;天线指向;波束扫描

中图分类号 :TN958 文献标识码 :A

## Analysis of Beam Synchronization for Spaceborne Parasitic Radar System

LIU Jian-ping, LIANG Dian-nong

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

**Abstract** :Beam synchronization is one of synchronizations for spaceborne parasitic radar system, and this paper mainly analyzes this problem. Firstly, based on characteristics of spaceborne parasitic radar system and combined with scannable antenna and adjustable attitude of micro-satellite, three methods for beam pointing synchronization were presented. Then, beam area synchronization was analyzed, the models of beam area for the transmitting satellite and micro-satellites were established. Finally, the simulation of interferometric cartwheel as an example not only proves that these models are valid, but also indicates that the second method for beam pointing synchronization is much better.

**Key words** :distributed micro-satellite; satellite attitude; antenna pointing; beam scanning

基于小卫星编队的雷达系统是国外最近提出的一类新的 SAR 系统<sup>[1-3]</sup>,它是由编队飞行的若干颗小卫星协同完成一个任务,相当于一个虚拟的大卫星。这类系统具有多功能、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。主星带伴随分布式小卫星雷达系统是一个“一发多收”的多站雷达系统,其中主星是一个在轨的单站 SAR 系统,离主星具有一定距离的伴随分布式小卫星编队构成了多个仅具有接收功能的雷达系统,如图 1 所示。从图 1 可以看到,波束同步是分布式小卫星雷达系统完成对照射区域 SAR 成像必须解决的问题。波束同步包括波束指向同步与波束覆盖同步。波束指向同步就是使分布式小卫星的波束照射中心对准主星的波束照射中心,而波束覆盖同步是指在波束指向同步的条件下,分布式小卫星与主星的波束覆盖区域要有足够的重叠区域,以保证主星 SAR 的测绘带被完全覆盖。

关于主星带伴随分布式小卫星雷达系统的波束同步问题,国内目前还没有文献报道,国外文献主要是针对法国提出的“干涉车轮”系统,文献[4]从定性的角度分析了该系统对天线波束指向的要求,以及对于完成干涉 SAR 任务的影响,而文献[5]主要讨论了轨道“平行”的星载双站 SAR 系统的波束同步问题,给出了三种同步策略以及相应的数学模型。

\* 收稿日期 2005 - 08 - 12

作者简介:刘建平(1977—),男,博士。

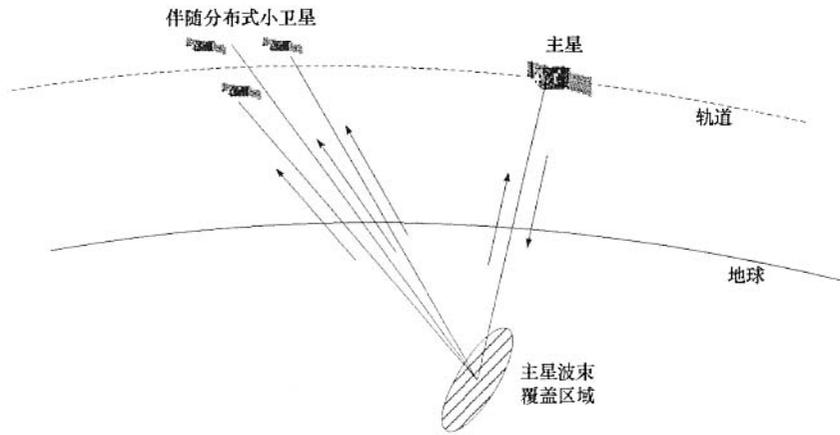


图1 主星带伴随分布式小卫星雷达系统示意图

Fig.1 Spaceborne parasitic SAR system

### 1 波束指向同步

主星带伴随分布式小卫星雷达系统的特点之一,就是主星与分布式小卫星之间是非合作的,比较而言,分布式小卫星是完全被动的。因此,波束同步主要针对分布式小卫星,调节其波束使它与主星波束同步。波束指向调节主要有三种方式:一是天线可扫描,直接改变天线指向,这种方式使卫星的有效载荷变得复杂;二是天线不动,改变卫星姿态,这种方式使卫星的结构总线变得复杂;三是前两种方式的结合。根据小卫星的实际能力,本文选择第三种方式。

从图1可以看到,分布式小卫星编队中心与主星之间有一定距离的顺轨分离,如果主星 SAR 处于正侧视情况,那么分布式小卫星就处于斜视情况。不失一般性,假定分布式小卫星接收天线的俯仰向可扫描而方位向不动,则主星带伴随分布式小卫星雷达系统的波束指向同步可以通过下面三种方法来实现:

(1)先调节卫星偏航姿态,再扫描天线俯仰向。如图 2(a)所示,坐标  $xyz$  是卫星平台坐标系( $x$  轴指向天顶, $y$  轴指向卫星运行方向, $z$  轴满足右手规则)。旋转  $x$  轴调节卫星偏航姿态  $yaw_1$ ,使得  $y$  轴旋转到  $y'$  轴, $z$  轴旋转到  $z'$  轴,使平面  $xz'$  经过主星波束照射地面中心  $c$ ;扫描天线俯仰向  $el_1$ ,使得天线波束指向  $c$  点。

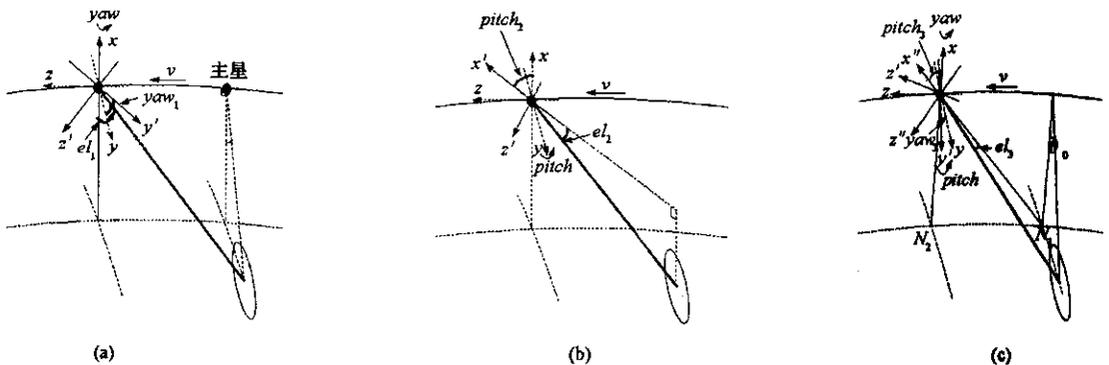


图2 三种波束指向同步方法

Fig.2 Three methods for beam pointing synchronization

(2)先调节卫星俯仰姿态,再扫描天线俯仰向。如图 2(b)所示,旋转  $z$  轴,调节卫星俯仰姿态  $pitch_2$ ,使得  $x$  轴旋转到  $x'$  轴, $y$  轴旋转到  $y'$  轴,使得平面  $x'z'$  经过  $c$  点和  $c$  点在平面  $xy$  的投影  $c'$  点;再扫描天线俯仰向  $el_2$ ,使得天线波束指向  $c$  点。

(3)先调节卫星偏航姿态,再调节卫星俯仰姿态,最后扫描天线俯仰向。如图 2(c)所示,调节偏航姿态  $yaw_3$  的目的是使俯仰姿态  $pitch_3$  调节后, $x$  轴旋转到  $x'$  轴, $y$  轴旋转到  $y''$  轴, $z$  轴旋转到  $z'$ ,使得平

面  $x'z'$  经过  $c$  点和主星星下点  $N_1$  ;再扫描天线俯仰向  $el_3$  ,使得天线波束指向  $c$  点。

## 2 波束覆盖同步

波束覆盖同步是波束同步分析中另一个重要的问题,就是解决主瓣波束覆盖重叠区域是否满足要求。对于主星带伴随分布式小卫星雷达系统来说,波束覆盖同步就是小卫星的主瓣波束照射区域完全覆盖主星的主瓣波束照射区域,这主要取决于小卫星的接收天线的孔径大小。一般而言,小卫星的接收天线孔径由于受到卫星体积、重量的约束而相对较小,因此波束覆盖同步问题比较容易解决。波束覆盖同步分析的关键就是建立波束覆盖模型,考虑到主星与小卫星的波束覆盖模型的建立方法基本相同,下面仅给出了主星的波束覆盖模型。

参考图 3(a),  $S_1$  表示主星位置矢量,  $R_1$  表示天线波束照射矢量,  $T$  表示目标矢量,可以建立关系

$$T = S_1 + R_1 \tag{1}$$

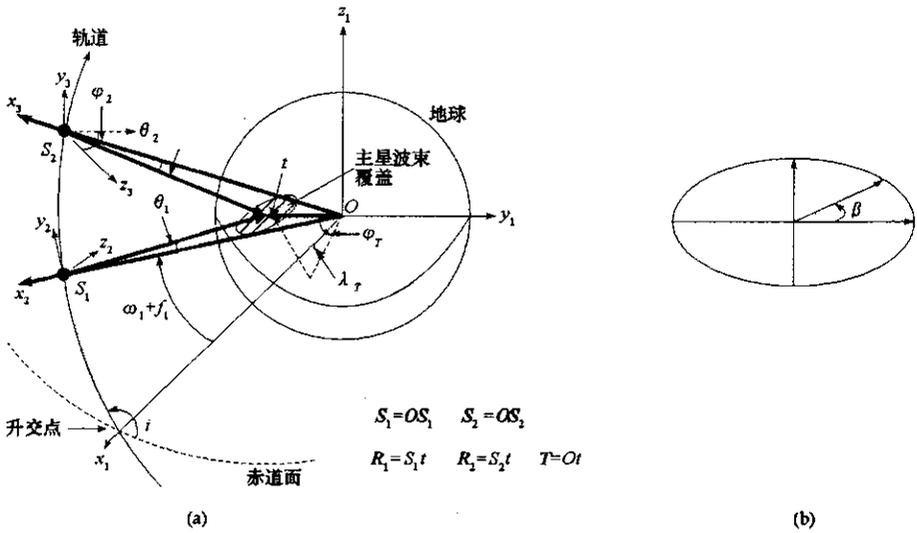


图3 波束覆盖同步几何图

Fig.5 Geometry of beam area synchronization

由于坐标系  $Ox_1y_1z_1$  是由地球惯性坐标系  $Oxyz$  绕  $z$  轴逆时针旋转主星升交点赤经  $\Omega_1$  ,则目标矢量  $T$  可写为

$$T = R(\cos\phi_T \cdot \cos\lambda_T \cdot x_1 + \cos\phi_T \cdot \sin\lambda_T \cdot y_1 + \sin\phi_T \cdot z_1) \tag{2}$$

其中  $x_1, y_1$  和  $z_1$  分别是  $x_1$  轴、 $y_1$  轴和  $z_1$  轴的单位矢量,而  $\phi_T, \lambda_T$  表示目标的纬度和“相对”经度,这里的“相对”表示相对于主星升交点所在的经度。波束覆盖模型就是要确定主瓣波束照射地面区域的经纬度。

矢量  $S_1$  是由坐标系  $Ox_1y_1z_1$  先绕  $x$  轴逆时针旋转  $i_1$  ,再绕  $z$  轴旋转  $\omega_1 + f_1$  得到,表示为

$$S_1 = a \sqrt{1 - e_1^2} (1 + e_1 \cos f_1) [\cos(\omega_1 + f_1) \cdot x_1 + \cos i_1 \sin(\omega_1 + f_1) \cdot y_1 + \sin i_1 \sin(\omega_1 + f_1) \cdot z_1] \tag{3}$$

主瓣波束照射地面区域可以近似为一个椭圆,这个椭圆可以由三个参量决定:波束中心、3dB 方位向波束宽度和 3dB 俯仰向波束宽度。根据这个近似,矢量  $R_1$  可以表示为

$$R_1(\beta) = R \left( \theta_1 + \frac{\Delta\theta}{2} \cos\beta \right) \cdot \cos \left( \frac{\Delta\theta}{2} \cos\beta \right) \left( -x_2 + \frac{\Delta\varphi}{2} \cos\beta \cdot y_2 + \frac{\Delta\theta}{2} \cos\beta \cdot z_2 \right) \quad 0 \leq \beta \leq 2\pi \tag{4}$$

其中  $\beta$  如图 3(b) 所示,  $\Delta\theta, \Delta\varphi$  分别表示主星天线的 3dB 俯仰向波束宽度和 3dB 方位向波束宽度;  $R(\theta)$  表示波束俯仰角为  $\theta$  时,目标到卫星的距离,  $\theta_1$  为天线波束中心的俯仰角;  $x_2, y_2$  和  $z_2$  分别是主星天线坐标系  $S_1x_2y_2z_2$  的  $x_2$  轴、 $y_2$  轴和  $z_2$  轴的单位矢量,它们与矢量  $x_1, y_1$  和  $z_1$  的关系为

$$\begin{cases} x_2 = \cos(\omega_1 + f_1) \cos\theta_1 \cdot x_1 + [\cos i_1 \sin(\omega_1 + f_1) \cos\theta_1 - \sin i_1 \sin\theta_1] y_1 + \\ \quad [\sin i_1 \sin(\omega_1 + f_1) \cos\theta_1 + \cos i_1 \sin\theta_1] z_1 \\ y_2 = -\sin(\omega_1 + f_1) \cdot x_1 + \cos i_1 \cos(\omega_1 + f_1) \cdot y_1 + \sin i_1 \cos(\omega_1 + f_1) \cdot z_1 \\ z_2 = -\cos(\omega_1 + f_1) \sin\theta_1 \cdot x_1 - [\cos i_1 \sin(\omega_1 + f_1) \sin\theta_1 + \sin i_1 \cos\theta_1] y_1 - \\ \quad [\sin i_1 \sin(\omega_1 + f_1) \sin\theta_1 - \cos i_1 \cos\theta_1] z_1 \end{cases} \quad (5)$$

结合式(4)(5)就可以将矢量  $R_1$  用矢量  $x_1, y_1$  和  $z_1$  表示。

由式(1)~(5),主星波束覆盖地面的经纬度就可以确定下来了。

### 3 仿真分析“干涉车轮”

主星的轨道参数:半长轴  $a_1 = 6000\text{km}$ ,倾角  $i_1 = 89^\circ$ ,离心率  $e_1 = 0.001$ ,升交点赤经  $\Omega_1 = 200^\circ$ ,近地点辐角  $w_1 = 100^\circ$ ,平近点角  $M_1 = 0$ ,则真近点角  $f_1 = M_1 + 2e_1 \sin M_1 + e_1^2 \sin(2M_1) = 0$ 。

已知“干涉车轮”伴随分布式小卫星中心在主星前方  $100\text{km}$  处<sup>[6]</sup>。

仿真 I:主星天线俯仰向扫描从  $20^\circ$  到  $50^\circ$  ;“干涉车轮”编队轨道中心波束指向同步方法比较。仿真结果如图 4 所示。可以看到,方法 2 和方法 3 的姿态变化幅度明显减少,小于  $1^\circ$ ;而三种方法的天线俯仰向扫描角度基本相同。因此,方法 2 和方法 3 明显优于方法 1。

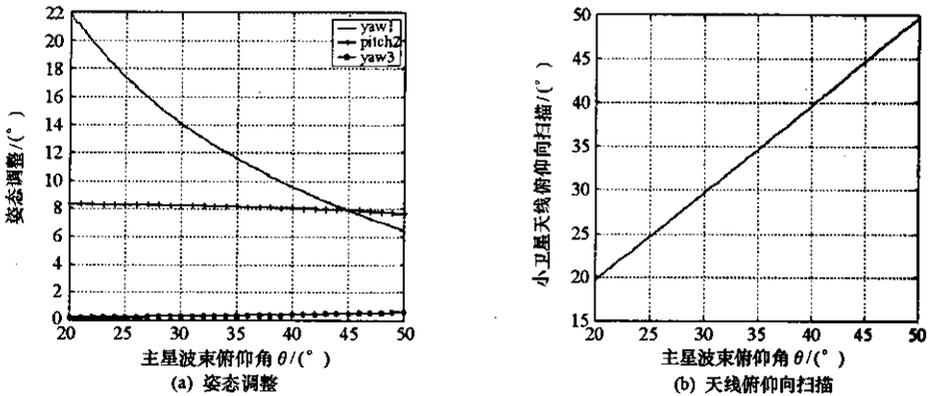


图 4 “干涉车轮”编队轨道中心波束指向同步方法比较

Fig.4 The compares of three methods of beam pointing synchronization for the interferimetric cartwheel

仿真 II:主星天线俯仰向角度为  $35^\circ$  ;“干涉车轮”编队小卫星波束指向同步方法比较。仿真结果如图 5 所示。可以看到,三种方法姿态变化幅度差别不大,只是方法 3 既需要偏航姿态调整,又需要俯仰姿态调整,而三种方法的天线俯仰向扫描变化幅度基本相同。因此,方法 1 和方法 2 优于方法 3。

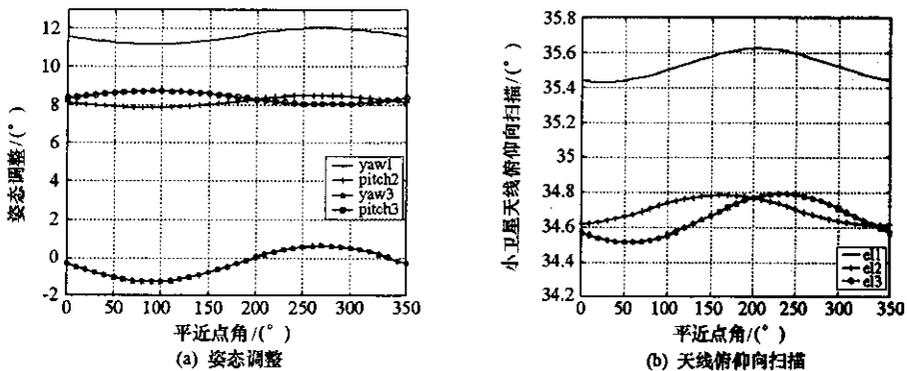


图 5 “干涉车轮”编队轨道中心波束指向同步方法比较

Fig.5 The compares of three methods of beam pointing synchronization for the interferimetric cartwheel

仿真Ⅲ:主星天线俯仰角分别为 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 和 $50^\circ$ ,孔径为 $10\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ ,L波段,小卫星天线孔径为 $5\text{m} \times 3.4\text{m}$ ,主星和小卫星波束覆盖如图6所示。可以看到,小卫星的波束覆盖区域明显大于主星的波束覆盖区域。但是,基于方法1波束指向同步的波束覆盖并没有达到要求,这主要由于小卫星偏航姿态调整,引起主星与小卫星波束覆盖区域相对于波束覆盖中心发生旋转,导致主星的部分区域未被小卫星覆盖,而方法2的波束指向同步方法避免了这个原因,因此从图6(b)可以看到,基于方法2波束指向同步的波束覆盖满足了要求。

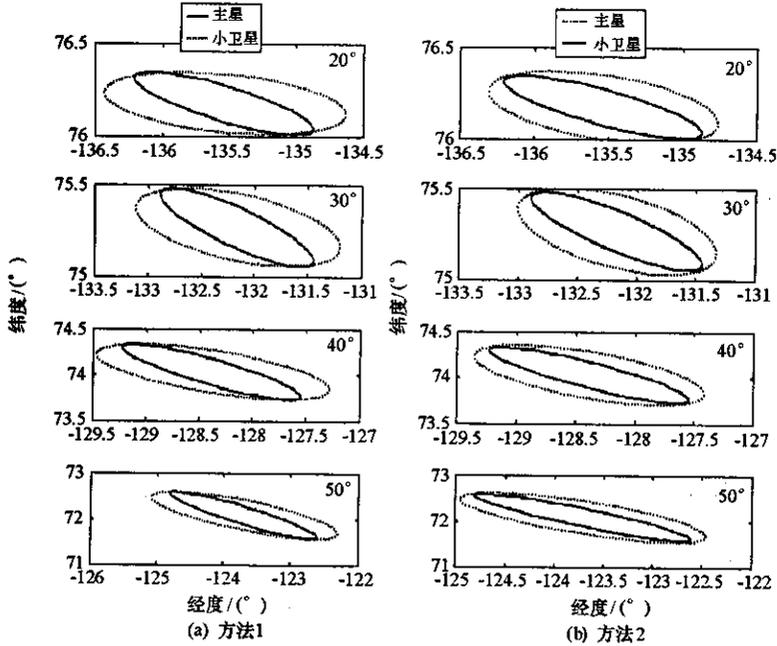


图6 波束覆盖同步

Fig.6 Beam area synchronization

## 4 结论

提出了三种主星带伴随分布式小卫星雷达系统的波束指向同步方法,建立了主星与小卫星波束覆盖模型,仿真分析了“干涉车轮”结果不仅证明了这些模型的正确性,同时发现波束指向同步方法2更为有效。

## 参考文献:

- [1] Air Force Research Laboratory-space Vehicles Directorate. TechSat 21-space Missions Using Satellite Clusters[R]. <http://www.vs.af.mil/factsheets/TechSat21.html>, June 1998.
- [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, 2006 (6).
- [3] Goodman N A. Processing of Multiple-receiver Spaceborne Arrays for Wide-area SAR[J]. IEEE Trans. on Geo. and Remote Sensing, 2002, 40(4).
- [4] Massonnet D. Capabilities and Limitation of the Interferometric Cartwheel[J]. IEEE Trans. on Geo. and Remote Sensing, 2001, 39(3) 506-520.
- [5] Errico M. Attitude and Antenna Pointing Design of Bistatic Radar Formations[J]. IEEE Trans. on Aes. 2003, 39 949-959.
- [6] 刘建平,梁甸农,何峰.主星 SAR 带伴随小卫星分布式雷达系统的分辨率分析[J].国防科技大学学报,2004,26(3).

