

分布式卫星双基 SAR 分辨特性分析

闫鸿慧^{①②} 王岩飞^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 由于分布式卫星的轨道特点及 SAR 成像特点所致,分布式卫星双基 SAR 在一定条件下可近似认为是一种信号发射器与接收器平行运动的双(多)基 SAR。该文结合分布式卫星双基 SAR 的这一特点,应用梯度的概念就分布式卫星双基 SAR 几何分辨率、分辨方向、分辨单元几何特性等问题进行了研究;以视角、斜视角函数的形式给出了任意基线构型下分布式卫星双基 SAR 的几何分辨率、分辨方向的表达式;并研究了分布式卫星基线对分辨特性的影响。

关键词 分布式卫星,合成孔径雷达(SAR),双基 SAR,分辨率

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)03-0522-04

Analysis of Geometry Resolution Characteristics of Distributed Satellites Bistatic SAR

Yan Hong-hui^{①②} Wang Yan-fei^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Distributed satellites bistatic SAR can be considered as a kind of bistatic/multi-static SAR system, whose transmitters and receivers move in parallel. Based on this, in this paper, the geometry resolution of distributed satellites SAR is analyzed using the concept of gradient. The formulas of resolution characteristics, such as geometry resolution, the direction of resolution vector and the area of resolution cell, are deduced in the form of look angle and squint angle's functions. In addition, the influence of satellite's baselines on the geometry resolution is also discussed, and the simulated results are also provided here.

Key words Distributed satellites, Synthetic Aperture Radar (SAR), Bistatic SAR, Resolution

1 引言

分布式卫星 SAR 是指一组小卫星雷达系统协同工作,共同完成 SAR 的成像功能。可用于干涉测量、运动目标检测、高分辨率成像、宽测绘带成像等。几个小卫星 SAR 既可协同工作共同实现 SAR 的成像功能(如 TechSat21 中有关构型),也可与一颗传统的大卫星组成一个主从模式的分布式系统(如 Cartwheel, Pendulum 等构型)。分布式卫星的信号发射器与接收器一般分布在不同的卫星上,这就组成了一个双(多)基 SAR 系统。分布式卫星双基 SAR 的基线依分布式卫星工作模式、编队构形及所实现功能的不同可分布在几十米至几百千米范围,当基线较短时,其分辨特性与单基 SAR 类似;而当基线较长时,其分辨特性就表现出不同于单基 SAR 的一些特点。分布式卫星双基 SAR 是分布式卫星 SAR 的基本组成单位,研究其分辨特性可为分布式 SAR 系统性

能指标的设计提供一定的参考。

文献[1]研究了在 2D 情况下(即在双基平面内)双基雷达的分辨率。文献[2,3]考虑了 3D 的情形,但仅给出双基 SAR 在一些特殊情况下的分辨率。文献[4]研究了接收机静止不动情况下的 3D 构型双基 SAR 的分辨特性。与文献[1-4]分析方法不同,文献[5]利用梯度的概念阐述了双基 SAR 的几何分辨率问题。利用梯度的概念,以数学解析的方法,可方便地对地面任意点的分辨特性进行精确的分析,并可直观地给出分辨率的表达式。此外,采用这种分析方法还可方便地进行地面目标分辨特性的计算机模拟仿真。

本文应用梯度的概念就分布式卫星双基 SAR 的几何分辨率、分辨方向、分辨单元几何特性等问题进行了研究,以视角、斜视角函数的形式给出了任意基线构型下分布式卫星双基 SAR 的几何分辨率、分辨方向的表达式,并讨论了分布式卫星基线对分辨特性的影响。

2 双基 SAR 的分辨率

2.1 地距分辨率

双基 SAR 示意图如图 1 所示, 图中卫星 T 发射信号, 卫星 R 接收信号, 卫星 T, R 至地面一点 P 的距离分别为 r_T, r_R , 卫星 R 所接收的回波信号的传播时间为 $t = (r_T + r_R)/c$ 。

在地平面, 目标至信号发射机、接收机距离(时间)相等的点构成多组距离(时间)等值线(如图 2 所示)。根据梯度的定义, 在各时间等值线 $t(x, y) = C$ (C 为任意常数)上, 变化率最大的方向为其梯度方向。

由雷达的分辨原理知, 雷达对距离的分辨实际上是对信号在雷达与目标之间传播时间的分辨来实现的^[6]。雷达接收机能分辨的最小时间间隔为脉冲宽度 T_p (若发射信号为调频信号, 则 T_p 为脉冲压缩后的宽度)。因此, 在地平面上, 双基 SAR 的地距分辨矢量可表示为

$$\rho_{rg} = \frac{\text{grad} t(x, y)}{|\text{grad} t(x, y)|} \cdot \frac{T_p}{|\text{grad} t(x, y)|} = \frac{\text{grad} t(x, y)}{|\text{grad} t(x, y)|^2} \cdot \frac{1}{B_r} \quad (1)$$

其中 $B_r = 1/T_p$ 为发射信号的带宽。 $\text{grad} t(x, y)$ 为地平面上时间等值线的梯度, $|\cdot|$ 表示矢量的模。 $\frac{\text{grad} t(x, y)}{|\text{grad} t(x, y)|}$ 为梯度的单位矢量, 用以表征分辨矢量的方向, $|\rho_{rg}|$ 即为雷达在点 (x, y) 处的地距分辨率。

式(1)也可以用信号传播路径的距离和 $r(x, y)$ 的梯度形式来表示:

$$\rho_{rg} = \frac{\text{grad} r(x, y)}{|\text{grad} r(x, y)|^2} \cdot \frac{c}{B_r} \quad (2)$$

地距分辨矢量的方向指向时间(或距离)等值线增长最快的方向, 由式(1), 式(2)知, 它指向分辨率值减小最快的方向。地距分辨矢量的方向可用地距分辨矢量的角度, 即分辨矢量与 x 轴所成的角度 φ_{rg} 来表征(如图 2 所示), 其中

$$\varphi_{rg} = \arctan \left[\frac{\partial t}{\partial y} / \frac{\partial t}{\partial x} \right] \quad (3)$$

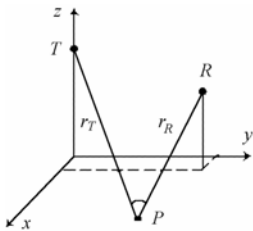


图 1 双基 SAR 示意图

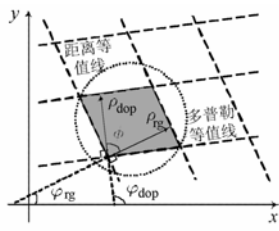


图 2 双基 SAR 分辨单元示意图

2.2 多普勒分辨率

雷达所能检测的频率差异反比于信号的相干积累时间^[6], 若接收机的信号相干积累时间为 T_{int} , 则雷达的多普勒频率分辨矢量可表示为

$$\rho_{dop} = \frac{\text{grad} f_{dop}(x, y)}{|\text{grad} f_{dop}(x, y)|} \cdot \frac{1/T_{int}}{|\text{grad} f_{dop}(x, y)|} = \frac{\text{grad} f_{dop}(x, y)}{|\text{grad} f_{dop}(x, y)|^2} \cdot \frac{1}{T_{int}} \quad (4)$$

其中 $f_{dop}(x, y)$ 为双基雷达的多普勒频率, $\text{grad} f_{dop}(x, y)$ 为多普勒等值线的梯度。分辨矢量的模 $|\rho_{dop}|$ 即为雷达在点 (x, y) 处的多普勒分辨率。

多普勒分辨矢量的方向指向多普勒等值线增长最快的方向, 即指向多普勒分辨率值减小最快的方向。多普勒分辨矢量的方向可用多普勒分辨矢量的角度, 即分辨矢量与 x 轴所成的角度 φ_{dop} 来衡量(如图 2 所示), 其中

$$\varphi_{dop} = \arctan \left[\frac{\partial f_{dop}}{\partial y} / \frac{\partial f_{dop}}{\partial x} \right] \quad (5)$$

2.3 分辨单元的几何特性

在双基 SAR 中, 距离分辨矢量不一定垂直于多普勒分辨矢量。一般情况下二者之间有一定的夹角(如图 2 所示), 该夹角的大小为

$$\phi = \arccos \left(\frac{\rho_{rg} \cdot \rho_{dop}}{|\rho_{rg}| |\rho_{dop}|} \right) \quad (6)$$

其中 “ \cdot ” 表示点乘。

双基 SAR 分辨单元的面积 A_{cell} (图 2 阴影部分所示)可表示为

$$A_{cell} = \frac{|\rho_{rg}| |\rho_{dop}|}{\sin \phi} = \frac{|\rho_{rg}|^2 |\rho_{dop}|^2}{|\rho_{rg} \times \rho_{dop}|} \quad (7)$$

其中 “ \times ” 表示矢量积。

双基 SAR 在某一点的最低几何分辨率可用分辨单元的直径(即图 2 中圆形的直径)来表示, 其值为

$$d_{cell} = \frac{\sqrt{|\rho_{rg}|^2 + |\rho_{dop}|^2 + 2|\rho_{rg}| |\rho_{dop}| |\cos \phi|}}{|\sin \phi|} \quad (8)$$

分辨矢量的夹角、分辨单元的面积及其直径反映了分辨单元的形状及大小。在分布式 SAR 系统分辨性能指标设计中, 除考虑距离分辨率及多普勒分辨率外, 还应考虑由于分辨单元几何构形而导致的最低几何分辨率的问题, 要对系统参数进行合理设计以使实际图像几何分辨率满足设计指标。

3 分布式卫星双基 SAR 分辨特性

以 $t=0$ 时刻发射信号卫星的位置为原点建立坐标系(如图 3 所示), y 轴方向为分布式卫星相对于地面的运行方向。卫星 $T(0, 0, 0)$ 发射并接收信号, 卫星 $R(X_R, Y_R, Z_R)$ 只接收信号。设由基线 TR 与卫星运行方向(y 轴)构成的平面与卫星垂直轨道平面($y-z$ 平面)的夹角为 φ , 基线 TR 与飞行方向的夹角为 θ , 基线长 $|TR| = r$ 。卫星 R 位置的坐标可表示为

$$R(-r \sin \theta \sin \varphi, r \cos \theta, r \sin \theta \cos \varphi)。$$

为简化分析, 忽略地球曲率, 假设测绘区域为一平面。设 $P(x, y, -Z_0)$ 为地面波束覆盖区内一点, 卫星 T 的视角为 θ_T , 斜视角为 θ_{ST} , 卫星 R 的视角为 θ_R , 斜视角为 θ_{SR} 。

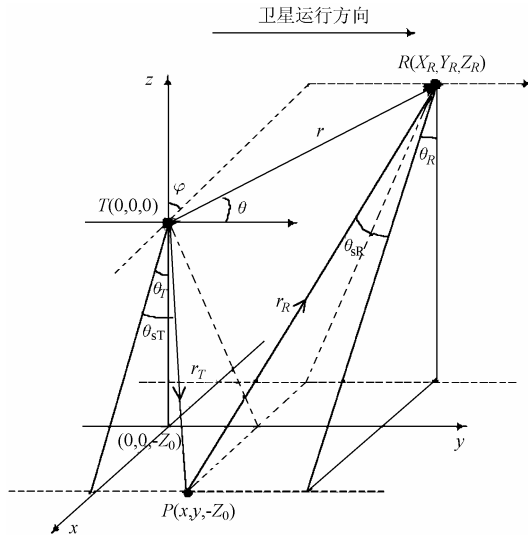


图3 分布式卫星 SAR 示意图

由式(1)及图3几何关系可计算得分布式卫星双基 SAR 的地距分辨率表达式:

$$|\rho_{rg}| = \frac{c}{B_r \sqrt{(\sin \theta_T \cos \theta_{sT} + \sin \theta_R \cos \theta_{sR})^2 + (\sin \theta_{sT} + \sin \theta_{sR})^2}} \quad (9)$$

地距分辨矢量的角度 φ_{rg} (如图2所示)可表达为

$$\varphi_{rg} = \arctan \left[\frac{\sin \theta_{sT} + \sin \theta_{sR}}{\sin \theta_T \cos \theta_{sT} + \sin \theta_R \cos \theta_{sR}} \right] \quad (10)$$

由文献[7]关于分布式卫星运行特点的论述可知,分布式卫星 SAR 的信号发射器与接收器与在一定条件下可近似认为以相同的速度在空间平行运动。因此,结合分布式 SAR 的几何关系可求得分布式卫星双基 SAR 多普勒频率的表达式为

$$f_{dop}(x, y) = \frac{v}{\lambda} \left(\frac{y}{r_T} + \frac{y - Y_R}{r_R} \right) = \frac{v}{\lambda} (\sin \theta_{sT} + \sin \theta_{sR}) \quad (11)$$

若接收机的信号相干积累时间为发射信号 SAR 的合成孔径时间,设发射信号卫星的方位向天线长度为 D_T ,则信号相干积累时间可表示为 $T_{int} = \frac{r_T \lambda / D_T}{v}$ 。由式(4),式(11)可得分布式卫星双基 SAR 的多普勒分辨率表达式:

$$|\rho_{dop}| = D_T \left\{ r_T \left[\frac{\sin \theta_T \cos \theta_{sT} \sin \theta_{sT} + \sin \theta_R \cos \theta_{sR} \sin \theta_{sR}}{r_T} + \frac{\sin \theta_T \cos \theta_{sT} \sin \theta_{sT} + \sin \theta_R \cos \theta_{sR} \sin \theta_{sR}}{r_R} \right]^2 + \left(\frac{\cos^2 \theta_{sT}}{r_T} + \frac{\cos^2 \theta_{sR}}{r_R} \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (12)$$

多普勒分辨矢量的角度可表示为

$$\varphi_{dop} = -\arctan \left[\frac{r_R \cos^2 \theta_{sT} + r_T \cos^2 \theta_{sR}}{r_R \sin \theta_T \cos \theta_{sT} \sin \theta_{sT} + r_T \sin \theta_R \cos \theta_{sR} \sin \theta_{sR}} \right] \quad (13)$$

当两卫星处于平行轨道,且均正侧视($\theta_{sT} = \theta_{sR} = 0$)时,由式(9),式(12)可求得分布式卫星双基 SAR 的地距分辨率为

$$|\rho_{rg}| = \frac{c}{B_r (\sin \theta_T + \sin \theta_R)}, \text{ 多普勒分辨率为 } |\rho_{dop}| = \frac{r_R D_T}{r_T + r_R},$$

这正是Moccia在平行轨道模式下导出的结论^[2]。

如图3所示,假设卫星 T, R 距地高度为 492 km, 基线长 40 km; 发射信号的中心频率为 9.3 GHz, 带宽为 100 MHz, 发射信号天线方位向长度为 6 m。若天线波束覆盖范围足够大,图4为该参数条件下在地平面上的距离等值线(实线)及多普勒等值线(虚线),图5为在地平面上的地距分辨率等高线图(实线)及多普勒分辨率(虚线)等高线图,由此可看出地面不同区域的分辨情况(图4,图5中“*”“。”分别为发射信号卫星、接收信号卫星的星下点位置,“☆”为发射信号 SAR 正侧视,视角 30° 时地面波束覆盖区中心点)。

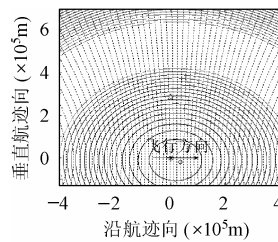


图4 分布式双基 SAR 等值线图

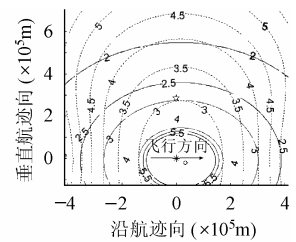


图5 分布式双基 SAR 分辨率等高线图

图6为基线与卫星运行方向的夹角为 30° , 发射信号 SAR 正侧视,视角 30° 时地面波束覆盖区中心点的双基 SAR 分辨率与单基 SAR (基线为 0 时)分辨率的比值,由图中可看出双基 SAR 的分辨率随基线长度的变化而变化。图7为该参数条件下地面波束覆盖区中心点的距离分辨矢量角度、多普勒分辨矢量角度及分辨矢量夹角随基线变化的情况,由图中可看出基线的变化对上述角度均有一定的影响。因此,由图6、图7可知,基线对双基 SAR 的距离分辨率、多普勒分辨率及二者的分辨方向等均有一定的影响。

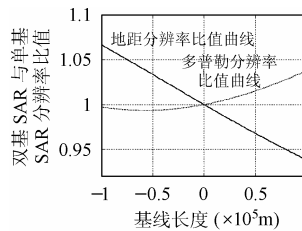


图6 双基 SAR 与单基 SAR 分辨率比值

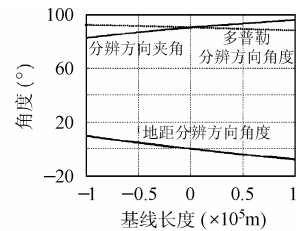


图7 随基线长度变化的角度关系图

4 基线对分辨特性的影响

双基 SAR 区别于单基 SAR 的一个重要的方面就是基线对其分辨特性的影响。当基线较短时,双基 SAR 的分辨特性与单基 SAR 近似,而当基线较长时,双基 SAR 的分辨特性就与单基 SAR 有较大的区别,因此讨论基线对分布式卫星双基 SAR 分辨特性的影响是很有必要的。

卫星的高度决定着其运行速度,分布式卫星为保持其编队构形,并使收发信号卫星有共同的波束覆盖区,系统中各卫星间垂直于地面方向的基线分量一般需控制在一定范围。因此,在本文中主要讨论在水平面内,基线沿航迹分量及垂直航迹分量对双基 SAR 分辨特性的影响。

图 8 为随基线长度及基线与航迹夹角变化的双基 SAR 分辨率与单基 SAR(基线为 0 时)分辨率的比值幅度图。由图 8(a), 8(b)中的幅度图及图下方的等高线图可看出,当基线垂直于航迹时(即图中基线与航迹的夹角为 90° , 270° 等时)距离分辨率和多普勒分辨率随基线的增加而迅速地增加或降低,而当基线平行于航迹时(即图中基线与航迹的夹角为 0° , 180° 等时)距离分辨率和多普勒分辨率随基线长度的变化而没有明显的改变。由此可知,分布式卫星双基 SAR 分辨率对沿航迹向的基线变化不敏感,而对垂直于航迹向的基线变化敏感。

图 9(a), 9(b)分别为随基线长度及基线与航迹夹角变化的分布式卫星双基 SAR 地距分辨方向角度于多普勒分辨方向角度的关系图。由图 9(a)可看出,当基线垂直于航迹时地距分辨方向角度 φ_{rg} 随基线的变化改变不大;而当基线平行于航迹时,随基线长度的变化迅速地改变。由图 9(b)可看出,当基线垂直于航迹时多普勒分辨方向角度 φ_{dop} 不随基线的变化而变化,分辨方向平行于航迹方向(即与 x 轴夹角为 $\pm 90^\circ$);而当基线平行于航迹时,随基线长度的变化迅速地

改变。由此可知,分布式卫星双基 SAR 分辨方向对沿航迹向的基线变化敏感,而对垂直于航迹向的基线变化不敏感。

综上所述,沿航迹的基线分量影响着分辨方向的角度,对分辨率的大小影响不大;而垂直航迹的基线分量影响着分辨率的大小,对分辨方向的影响不大。

5 结束语

本文采用梯度的概念对分布式卫星双基 SAR 的分辨特性进行了分析,以卫星视角、斜视角函数的形式给出了任意基线构型下分布式卫星双基 SAR 的几何分辨率、分辨方向的表达式,并研究了分布式卫星基线对分辨特性的影响,由文中分析可知,沿航迹的基线影响着分布式卫星双基 SAR 分辨方向的角度,而垂直航迹的基线影响着分辨率的大小。虽然当基线较短时(如 TechSat21 中有关构型)分布式卫星双基 SAR 分析特性可用单基 SAR 的分辨特性来近似,但这毕竟是一种近似的处理。通过对双基 SAR 系统的精确分析,有利于更深入地认识分布式 SAR 系统的分辨特性,同时对分布式 SAR 系统的总体设计也具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] Willis N J. Bistatic Radar. Boston: Artech House, 1991: 131 – 145.
- [2] Moccia A, Chiacchio N, Capone A. Spaceborne bistatic synthetic aperture radar for remote sensing applications. *Int. J. Remote Sensing*, 2000, 21(18): 3395 – 3414.
- [3] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理. 北京: 科学出版社, 2003: 31 – 40.
- [4] Homer J, Kubik K, Mojarrabi B, *et al.* Passive bistatic radar sensing with LEOS based transmitters. IGARSS'02, Toronto, Canada, June 2002, 1: 438 – 440.
- [5] Krieger G, Fiedler H, Hounam D. Analysis of system concepts for Bi- and Multi-static SAR missions. IGARSS'03, Toulouse, France, July 2003, 2: 770 – 772.
- [6] Skolnik M I. Radar Handbook (Second Edition). New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1990: Chapter 2.
- [7] 林来兴. 微小卫星编队飞行组成虚拟卫星研究. 微小卫星编队飞行及应用论文集. 北京, 2000.7: 1 – 35.

闫鸿慧: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像理论与信号处理。
 王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等。

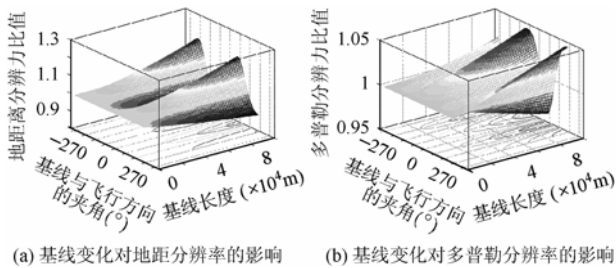


图 8 基线对分布式卫星双基 SAR 分辨率的影响

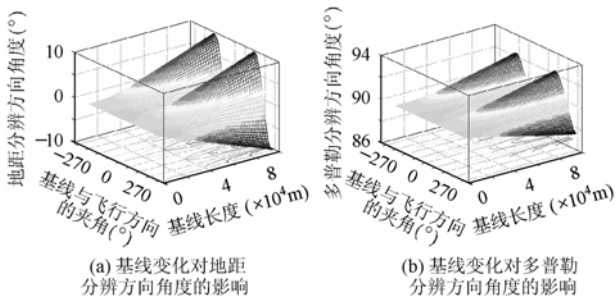


图 9 基线对分布式卫星双基 SAR 分辨方向角度的影响