

## 星载双基地 SAR 系统模糊性\*

何 峰,梁甸农,董 臻

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘 要** 针对星载双基地 SAR 由双基地几何关系引入的新问题,提出了计算其模糊比的新方法和近似分解方法。利用此方法通过仿真计算对星载双基地 SAR 模糊性变化规律做了进一步研究。结果表明,因接收天线的面积限制,与其伴随飞行的大卫星 SAR 相比,模糊性问题更为严重,但变化规律基本一致。比较而言,由于小卫星天线尺寸在高度上更接近大卫星天线,在距离模糊比上相对大卫星 SAR 抬高得不多,而在方位模糊比上抬高较大。

**关键词** 星载双基地 SAR;合成孔径雷达;模糊;模糊比

中图分类号:TN958 文献标识码:B

## Ambiguity in Spaceborne Bistatic SAR

HE Feng, LIANG Dian-nong, DONG Zhen

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

**Abstract** A new method for evaluation of ambiguity-to-signal ratio in spaceborne bistatic SAR was proposed in terms of bistatic geometry. Based on that, the ASR of the new system was analyzed in different cases. Simulation results show that due to the limited size of antenna onboard small satellite, the ASR of bistatic SAR is much higher than that of monostatic spaceborne SAR, though their changing trends are similar. Compared with the ASR in azimuth, the ASR in range is closer to that of the monostatic case because the size in height dimension of small antenna is closer to that of the big antenna than the length dimension is.

**Key words** spaceborne bistatic SAR; synthetic aperture radar; ambiguity; ambiguity to signal ratio(ASR)

星载双/多基地 SAR(synthetic aperture radar,合成孔径雷达)是近年来提出的一种新的天基雷达系统<sup>[1-2]</sup>。其中的一种典型形式是装载了接收雷达设备的小卫星群伴随一颗传统 SAR 大卫星飞行,接收大卫星雷达回波。由于小卫星接收天线面积受限,双基地 SAR 系统存在模糊性更为严重的问题。

模糊比(ambiguity-to-signal ratio, ASR)是表征 SAR 模糊性的基本参数,也是评价雷达图像质量的重要指标,定义为一个 SAR 图像分辨单元内模糊功率与主信号功率之比。模糊比的计算是定量评价系统模糊性及进一步寻求抑制模糊性方法的基础。星载 SAR 模糊比的计算已有充分的研究<sup>[3-4]</sup>,但由于星载双基地 SAR 在几何关系等方面的特殊性,模糊比计算方法比单基地 SAR 复杂。已有的研究中,文献[5]直接借用单基地 SAR 模糊比的计算公式,文献[6]则直接将模糊比分解为距离和方位模糊比并分别分析,并没有考虑模糊比分解本身存在的问题。

## 1 模糊比计算问题

赤道惯性坐标系下星载双基地 SAR 发射星、接收星和目标的几何关系示意图如图 1 所示,其中  $R_s$ 、 $R_r$ 、 $R_t$  分别

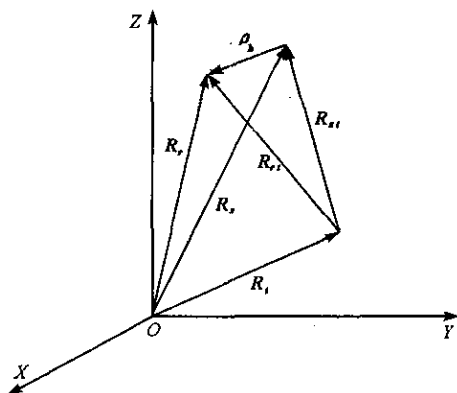


图 1 星载双基地 SAR 空间几何关系  
Fig.1 Geometry of spaceborne bistatic SAR

\* 收稿日期 2005 - 09 - 15

作者简介:何峰(1976—),男,讲师,博士。

表示发射星、接收星、目标对地心的位移向量。由于星载双基地 SAR 不同于单星 SAR 的空间几何关系, 计算模糊比在以下几点上与单基地 SAR 不同 (1) 计算模糊比首先需要利用距离多普勒信息对目标定位<sup>[3-4]</sup>, 而从双基地 SAR 图像获得的是发射、接收距离之和及双基地多普勒频率, 这两个参数与发射、接收卫星的运动状态均密切相关<sup>[7]</sup>。距离多普勒定位方法不同于单星 SAR。(2) 确定目标位置后, 需分别确定其对发射卫星和接收卫星的相对几何关系。(3) 小卫星接收功率需要用双基地 SAR 雷达方程来计算。(4) 为便于实际应用, 一般将模糊比分解为只与延迟有关的距离模糊比和只与多普勒频率有关的方位模糊比之和的形式<sup>[4,8]</sup>。实际模糊在延迟和多普勒频率上存在耦合, 分解只是一种近似。双基地 SAR 中这种耦合关系更为复杂, 将其进行分解需要重新考虑。

### 1.1 星载双基地 SAR 距离—多普勒信息定位

在星载单基地 SAR 中, 已知目标到雷达的距离及多普勒频移, 可列出三个基本方程, 解方程组可得出目标的定位信息<sup>[8]</sup>。类似于单基地星载 SAR, 也可由三个条件列出以下三个方程:

$$|R_s - R_t| + |R_r - R_t| = c\tau \quad (1)$$

$$f_d = -\frac{(\omega_e \times R_s - V_s) \cdot R_t + V_s \cdot R_s}{\lambda |R_s - R_t|} - \frac{(\omega_e \times R_r - V_r) \cdot R_t + V_r \cdot R_r}{\lambda |R_r - R_t|} \quad (2)$$

$$(x_t^2 + y_t^2)/R_e^2 + z_t^2/R_p^2 = 1 \quad (3)$$

式(1)为距离方程, 式(2)为双基地多普勒方程<sup>[7]</sup>, 式(3)为地球模型方程。当卫星运动状态已知时, 联立方程(1)~(3)可求得目标的位置 $(x_t, y_t, z_t)$ , 这样从原理上解决了星载双基地 SAR 的目标定位问题。但由于式(1)(2)较单基地 SAR<sup>[8]</sup>更复杂, 即使式(3)采用更简单的地球模型也无法得到解析解, 只能通过迭代方法得到数值解, 这将使其应用受到限制。

若令  $k_R = |R_s - R_t|/|R_r - R_t|$ , 则在测绘带不同距离处有不同的  $k_R$  值,  $k_R$  可认为是主要随延迟  $\tau$  变化的函数。当星载双基地 SAR 空间几何参数确定时, 这种函数关系可通过计算确定, 但函数关系较为复杂。一般情况下,  $k_R$  在测绘带范围内与  $\tau$  近似成线性关系, 即使考虑模糊区域, 用二阶函数可得到很好的近似, 因此可用泰勒展开法近似得到:

$$k_R(\tau) = k_{R0} + b_1\tau + b_2\tau^2, \quad \tau_0 - \tau_1 < \tau < \tau_0 + \tau_1 \quad (4)$$

将  $k_R = |R_s - R_t|/|R_r - R_t|$  的关系引入式(1)、(2), 再将地球近似为以当地半径  $R_t$  为半径的球体时, 可以得到  $x_t, y_t, z_t$  各自的一元二次方程, 从而求得解析解。

### 1.2 星载双基地 SAR 模糊比

在确定目标的绝对位置后, 可进一步确定它与发射、接收雷达的相对几何关系, 计算双基地模糊比时需要确定的参数有: 发射距离  $R_{st}$ 、发射仰角  $e_s$ 、发射方位角  $a_s$ 、发射入射角  $\theta_i$  以及接收距离  $R_{rt}$ 、接收仰角  $e_r$ 、接收方位角  $a_r$ 、接收散射角  $\theta_d$ 。因为目标位置是  $\tau$  和  $f_d$  的函数, 因此以上 8 个参数也是  $\tau$  和  $f_d$  的函数。根据双基地雷达方程, 对应  $\tau$  和  $f_d$  的面积为  $A(\theta_i, \theta_d)$  的分辨单元的散射功率为:

$$\mathcal{S}(f_d, \tau) = k \frac{G_s(e_s, a_s) G_r(e_r, a_r) \sigma_0(\theta_i, \theta_d) A(\theta_i, \theta_d)}{R_{st}^2 R_{rt}^2} \quad (5)$$

其中  $G_s(e_s, a_s)$  为发射天线增益,  $G_r(e_r, a_r)$  为接收天线增益,  $\sigma_0(\theta_i, \theta_d)$  为在入射角为  $\theta_i$ 、散射角为  $\theta_d$  时的散射系数。这样, 对应延迟时间  $\tau$  的模糊比为:

$$ASR(\tau) = \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{f_d \min}^{f_d \max} \mathcal{S}(f_d + mPRF, \tau + n/PRF) \Delta f_d - \int_{f_d \min}^{f_d \max} \mathcal{S}(f_d, \tau) \Delta f_d}{\int_{f_d \min}^{f_d \max} \mathcal{S}(f_d, \tau) \Delta f_d} \quad (6)$$

其中  $f_{d \min}$  和  $f_{d \max}$  分别为多普勒处理频率的下限和上限, 实际计算时模糊阶数  $m, n$  的取值范围可按经验来确定, 一般仅考虑 10 阶以内的模糊即可。

### 1.3 模糊近似分解

由式(1)(4)易知  $R_{st}$ 、 $R_{rt}$  可表示为仅是  $\tau$  的函数。在卫星轨道高度和目标区域确定时,  $e_s$ 、 $\theta_i$  可由  $R_{st}$  求得,  $e_r$  和  $\theta_d$  可由  $R_{rt}$  求出<sup>[8]</sup>。因此以上 6 个参数都可近似表示为  $\tau$  的函数而与  $f_d$  无关。下面分析方位角  $a_s$  和  $a_r$ 。当忽略卫星轨道小的偏心率, 且认为两颗卫星运行速度同等于  $v_s$  (角速度同等于  $\omega_s$ ) 时, 易知双基地多普勒频率可表示为<sup>[7]</sup>:

$$f_d(\gamma_s, \Psi_s, \gamma_r, \Psi_r) = (v_s/\lambda) \cdot \{ \sin \gamma_s \cos \Psi_s [ 1 - (\omega_e/\omega_s) \{ \tan \Psi_s \cos \alpha_s \sin \alpha_{is} + \cos \alpha_{is} \} ] + \sin \gamma_r \cos \Psi_r [ 1 - (\omega_e/\omega_s) \{ \tan \Psi_r \cos \alpha_r \sin \alpha_{ir} + \cos \alpha_{ir} \} ] \} \quad (7)$$

式中  $\gamma_s$ 、 $\Psi_s$  分别为发射天线视角和方位二面角<sup>[7]</sup>,  $\alpha_s$ 、 $\alpha_{is}$  为发射星的纬度辐角和轨道倾角,  $\gamma_r$ 、 $\Psi_r$ 、 $\alpha_r$ 、 $\alpha_{ir}$  则是接收星相应的参数。将  $f_d$  在天线波束中心处一阶展开, 得:

$$\begin{aligned} f_d(\gamma_s, \Psi_s, \gamma_r, \Psi_r) \approx & f_d(\gamma_{s_c}, \Psi_{s_c}, \gamma_{r_c}, \Psi_{r_c}) + (v_s/\lambda) \cos \gamma_s \cos \Psi_s \cdot \\ & [ 1 - (\omega_e/\omega_s) \{ \tan \Psi_{s_c} \cos \alpha_s \sin \alpha_{is} + \cos \alpha_{is} \} ] \Delta \gamma_s \\ & + (v_s/\lambda) \sin \gamma_s [ -\sin \Psi_{s_c} - (\omega_e/\omega_s) \cos \Psi_{s_c} \cos \alpha_s \sin \alpha_{is} + (\omega_e/\omega_s) \sin \Psi_{s_c} \cos \alpha_{is} ] \Delta \Psi_s \\ & + (v_s/\lambda) \cos \gamma_s \cos \Psi_{r_c} [ 1 - (\omega_e/\omega_s) \{ \tan \Psi_{r_c} \cos \alpha_r \sin \alpha_{ir} + \cos \alpha_{ir} \} ] \Delta \gamma_r \\ & + (v_s/\lambda) \sin \gamma_r [ -\sin \Psi_{r_c} - (\omega_e/\omega_s) \cos \Psi_{r_c} \cos \alpha_r \sin \alpha_{ir} + (\omega_e/\omega_s) \sin \Psi_{r_c} \cos \alpha_{ir} ] \Delta \Psi_r \end{aligned} \quad (8)$$

一般星载双基地 SAR 系统  $\Psi_{s_c}$ 、 $\Psi_{r_c}$  接近  $90^\circ$ , 因此  $\sin \Psi_{s_c} \gg \cos \Psi_{s_c}$ ,  $\sin \Psi_{r_c} \gg \cos \Psi_{r_c}$ ,  $\omega_e/\omega_s$  也是较小的量, 利用这些关系, 在上式中忽略次要量而保留主要量, 并记  $f_{dc} = f_d(\gamma_{s_c}, \Psi_{s_c}, \gamma_{r_c}, \Psi_{r_c})$ , 得:

$$f_d(\gamma_s, \Psi_s, \gamma_r, \Psi_r) \approx f_{dc} - (v_s/\lambda) \sin \gamma_s \sin \Psi_{s_c} \Delta \Psi_s - (v_s/\lambda) \sin \gamma_r \sin \Psi_{r_c} \Delta \Psi_r \quad (9)$$

易知  $a_s = \Delta \Psi_s \sin \gamma_{s_c}$ 、 $a_r = \Delta \Psi_r \sin \gamma_{r_c}$ , 代入式(9)得:

$$\sin \Psi_{s_c} a_s + \sin \Psi_{r_c} a_r = \frac{\lambda(f_{dc} - f_d)}{v_s} \quad (10)$$

又  $a_s$ 、 $a_r$  对应同一段圆弧, 而半径对应的收发距离不同, 所以角度之比等于半径的反比:  $a_r/a_s = k_R$ 。  $k_R$  是关于  $\tau$  的函数, 但对伴随 SAR 大卫星飞行的小卫星编队系统来说,  $k_R$  随  $\tau$  变化的幅度并不大, 始终是一个大小接近 1 的数, 若以测绘带中心对应的  $k_{Rc}$  代替  $k_R$ , 则有:

$$a_s = \frac{\lambda(f_{dc} - f_d)}{v_s(\sin \Psi_{s_c} + \sin \Psi_{r_c} k_{Rc})}, \quad a_r = \frac{\lambda(f_{dc} - f_d)}{v_s(\sin \Psi_{s_c}/k_{Rc} + \sin \Psi_{r_c})} \quad (11)$$

由此可见, 方位角  $a_s$ 、 $a_r$  可看成是由多普勒频率  $f_d$  决定的参数。对矩形平面口径天线或平面阵天线, 其远场辐射增益可分解为<sup>[8]</sup>:

$$G_s(e_s, a_s) = G_{se}(e_s) \cdot G_{sa}(a_s), \quad G_r(e_r, a_r) = G_{re}(e_r) \cdot G_{ra}(a_r) \quad (12)$$

则式(13)可分解为两个因子的积:

$$\begin{aligned} S(f_d, \tau) &= \frac{kG_{se}[e_s(\tau)]G_{re}[e_r(\tau)]\sigma[\theta_s(\tau), \theta_d(\tau)]A[\theta_s(\tau), \theta_d(\tau)]}{R_s^2(\tau)R_r^2(\tau)R_t^2(\tau)} G_{sa}[a_s(f_d)]G_{ra}[a_r(f_d)] \\ &= S_T(\tau)S_F(f_d) \end{aligned} \quad (13)$$

若令

$$\left\{ \begin{aligned} ASR_T(\tau) &= \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} S_T(\tau + n/PRF) - S_T(\tau)}{S_T(\tau)} \\ ASR_F &= \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{f_d \min}^{f_d \max} S_F(f_d + m \cdot PRF) \Delta f_d - \int_{f_d \min}^{f_d \max} S_F(f_d) \Delta f_d}{\int_{f_d \min}^{f_d \max} S_F(f_d) \Delta f_d} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

分别称  $ASR_r(\tau)$ 、 $ASR_f$  为距离模糊比和方位模糊比,则式(14)可分解为距离和方位模糊比之和:

$$ASR(\tau) = \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} S_r(\tau + n/PRF) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{f_{dmin}}^{f_{dmax}} S_f(f_d + m \cdot PRF) df_d - S_r(\tau) \int_{f_{dmin}}^{f_{dmax}} S_f(f_d) df_d}{S_r(\tau) \int_{f_{dmin}}^{f_{dmax}} S_f(f_d) df_d} = [ASR_r(\tau) + 1] [ASR_f + 1] - 1 \approx ASR_r(\tau) + ASR_f \quad (15)$$

## 2 仿真分析

根据上节推导的结果,结合具体的系统参数,即可通过计算来分析星载双基地 SAR 系统的模糊比变化规律。大卫星单基地 SAR 是双基地 SAR 的特例,只需将收发参数设为相同即可用相同的方法计算大卫星 SAR 自身的模糊比,并作为双基地 SAR 的参照比较。仿真时以 Envisat 为大卫星,小卫星与 Envisat 相距 100km。Envisat 雷达参数为:波长 5.6275cm,天线长 10m,天线高 1.3m,正侧视工作模式<sup>[5]</sup>。小卫星天线取典型值<sup>[1]</sup>:长 2.5m,高 0.6m,假设小卫星天线通过调整姿态保持与大卫星天线的指向同步。发射、接收天线均假设为矩形平面口径,口径场均匀同相分布。 $\sigma_0(\theta_i, \theta_d)$  的计算采用点散射体模型。

仿真模糊比在一个测绘带内的变化规律,仿真参数为下视角  $\gamma_s = 40^\circ$ ,  $PRF = 2000\text{Hz}$ 。仿真结果如图 2 所示,可见,与大卫星 SAR 相比,测绘带内的双基地 SAR 的距离模糊比、方位模糊比都变差了。

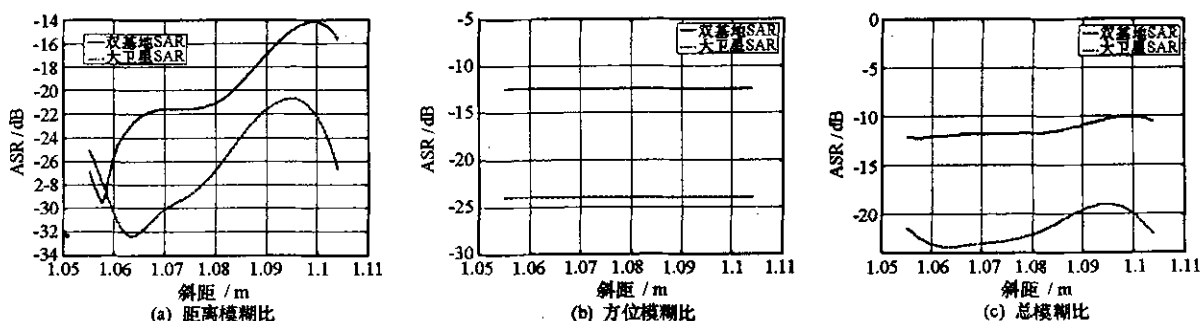


图 2  $\gamma_s = 40^\circ$ 、 $PRF = 2000\text{Hz}$  时测绘带内模糊比

Fig.2 ASR versus range in swath when  $\gamma_s = 40^\circ$ ,  $PRF = 2000\text{Hz}$

当  $PRF$  取定为  $2000\text{Hz}$  不变时,测绘带内平均模糊比随下视角的变化规律如图 3 所示。由图 3(a) 知,无论是大卫星 SAR 还是双基地 SAR,随着下视角变大,测绘带内平均距离模糊比总的变化趋势是变差;由图 3(b) 知,二者的方位模糊比总的趋势均随下视角变大而变好,但在下视角大部分范围内较稳定,只是当下视角接近地平线方向时,由于方位模糊区域迅速减小,方位模糊比才有迅速下降的趋势;图 3(c) 为测绘带内平均总模糊比的变化规律,二者总的趋势都是随下视角变大而变差。比较而言,在带内平均距离模糊比上双基地 SAR 表现更接近大卫星 SAR,而平均方位模糊比则有更大差距。

当下视角  $\gamma_s = 40^\circ$  不变时,测绘带平均模糊比随脉冲重复频率的变化规律如图 4 所示。从图 4(a) 知二者距离模糊比总的趋势是随  $PRF$  增大而变差,而在图 4(b) 中二者的方位模糊比变化趋势是随  $PRF$  增大而变好,这跟一般的结论是相符的<sup>[4,8]</sup>。在图 4(c) 中,二者的总模糊比呈谷形分布,在  $2000 \sim 2500\text{Hz}$  都存在最好值。同样,双基地 SAR 的测绘带内平均距离模糊比有更接近大卫星 SAR 的表现。

## 3 结束语

星载双基地 SAR 因为接收天线的面积限制,模糊信号在接收方向受到相对较弱的抑制,因此与大卫星 SAR 相比,其模糊性更为严重,但变化规律与其伴随飞行的大卫星 SAR 基本一致。相比较而言,由于小卫星天线在高度上更为接近大卫星天线尺寸,因此在距离模糊比上相对大卫星 SAR 抬高得不多,而在方位模糊上抬高较大。

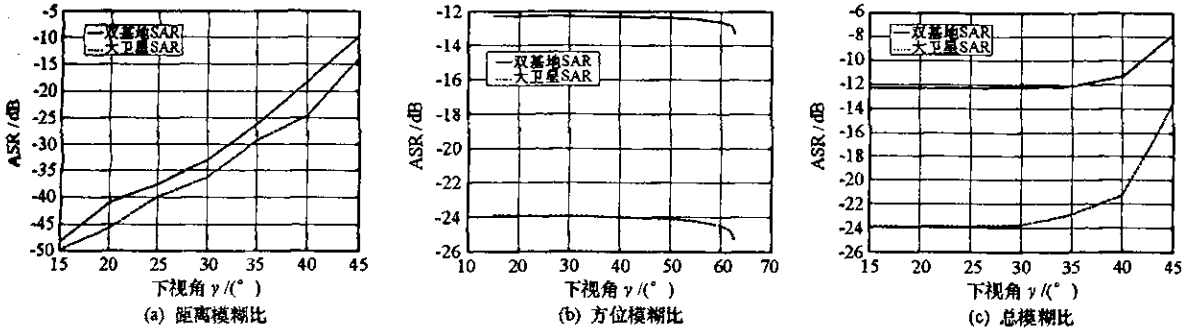


图3 测绘带内平均模糊比随下视角  $\gamma_s$  的变化

Fig.3 Average ASR over swath versus

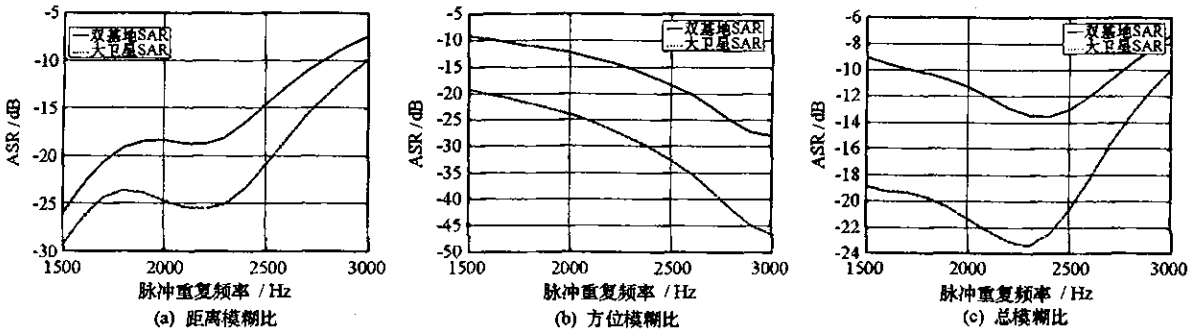


图4 测绘带内平均模糊比随 PRF 的变化

Fig.4 Average ASR over swath versus PRF

参考文献:

[ 1 ] Massonnet D. Capabilities and Limitations of the Interferometric Cartwheel[ J ]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing , 2001 , 39( 3 ) : 506 - 520 .

[ 2 ] 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).

[ 3 ] Li F K, et al. Ambiguities in Spaceborne Synthetic Aperture Radar Systems[ J ]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19( 3 ) : 389 - 397 .

[ 4 ] Barbarossa S, Levirini G. An Antenna Pattern Synthesis Technique for Spaceborne SAR Performance Optimizator[ J ]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing , 1991 , 29( 2 ) : 254 - 259 .

[ 5 ] Krieger G, Wendler M. Comparison of the Interferometric Performance for Spaceborne Parasitic SAR Configurations[ A ]. EUSAR 2002[ C ],Berlin : Vde Verlag GMBH, 2002 : 467 - 470 .

[ 6 ] 刘建平,梁甸农,何峰.主星带伴随微小卫星编队 SAR 系统的模糊性分析[ J ].系统工程与电子技术,2004,26(10):1429 - 1431.

[ 7 ] 何峰,梁甸农,刘建平.星载寄生式 SAR 多普勒特性分析[ J ].信号处理,2004,20(5):475 - 480.

[ 8 ] 袁孝康.星载合成孔径雷达导论[ M ].北京:国防工业出版社,2003.



