

基于中国剩余定理解分布式星载 SAR-ATI 测速模糊

齐维孔^{①②} 党雅文^① 禹卫东^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 分布式星载 SAR 系统利用沿航迹干涉对地面运动目标测速时, 由于较长基线导致严重的测速模糊。该文在研究鲁棒性中国剩余定理的基础上, 利用剩余定理在满足某些约束条件下得到唯一解的原理, 分析了多基线和多频率分布式星载 SAR-ATI 系统解速度模糊的方法, 同时推导了多基线和多频率的约束条件, 以及最大测速值。仿真结果表明该文算法能有效地解分布式星载 SAR-ATI 系统动目标速度模糊, 为分布式星载 SAR 系统设计与基线设计提供了一定的指导作用和参考价值。

关键词: 分布式星载合成孔径雷达; 中国剩余定理; 沿航迹干涉; 动目标检测; 速度模糊

中图分类号: TN959.4; P414.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2493-05

Deblurring Velocity Ambiguity of Distributed Space-Borne SAR Based on Chinese Remainder Theorem

Qi Wei-kong^{①②} Dang Ya-wen^① Yu Wei-dong^①

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

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

Abstract: When distributed Space-borne SAR measures the ground moving target velocity using along track interferometry, larger baseline leads to serious velocity ambiguity. On the basis of exploring robust Chinese remainder theorem, this paper analyzes the method of deblurring velocity ambiguity for multi-baseline and multi-frequency distributed Space-borne SAR, which uses the principle that remainder theorem determines the unique resolution on some conditions. Moreover, the constraints of multi-baseline and multi-frequency, and the maximum measurement velocity value are derived. The simulation results show that the algorithm is efficient for deblurring velocity ambiguity, play a guiding role and provides reference for system design and baseline design of distributed Space-borne SAR.

Key words: Distributed Space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR); Chinese Remainder Theorem (CRT); Along Track Interferometry (ATI); Moving Target Identification(MTI); Velocity ambiguity

1 引言

分布式星载合成孔径雷达(SAR)的一个主要功能是地面动目标检测(GMTI), 使用分布式星载SAR可以有效地抑制或者消除杂波^[1]。与DPCA技术利用两个通道的数据差进行处理完成动目标检测不同, ATI技术主要通过对同一场景两幅图像的干涉相位进行处理来完成动目标检测和测速^[2]。

分布式星载SAR系统可以在空间形成多个上百米的长基线, 从而利用长的沿航迹基线容易实现地面慢速运动目标的检测, 但是大的沿航迹空间基线也带来一个严重的缺点^[2-6], 即减小了速度周期、减小了不模糊速度, 使得盲速点增多, 从而不利于快速运动目标的检测。

文献[3, 4]中提出了利用穷举法建立两个速度集合, 由两个速度集合的交集得到可能的动目标速度; 文献[7]中, 分析了使用多基线和多频率解速度模糊, 该方法与穷举法类似。已有文献的分析方法, 理论上虽简单, 但是计算效率低, 并且没有确切地给出最大可检测速度范围以及解速度模糊的约束条件等。

对于中国剩余定理(CRT)的研究, 已有不少文献^[8,9]。其中, 文献[9]中对鲁棒的剩余定理进行了深入分析, 文献[10]中提出了快速计算的算法。另外, 对剩余定理在合成孔径雷达上应用也开展了一些研究, 比如利用剩余定理实现了干涉合成孔径雷达(INSAR)相位解缠^[9,10]; 基于剩余定理和速度合成孔径雷达(VSAR)^[11]的原理, 提出了多频VSAR系统, 双速VSAR系统以及天线子阵分布不均匀的SAR系

统^[12-15]等,用以提高动目标测速的范围,实现对慢速运动目标和快速运动目标的检测。

本文基于中国剩余定理的原理,利用鲁棒性剩余定理的方法来解决速度模糊,给出了分布式星载SAR-ATI系统多基线和多频率解速度模糊的方法,并给出了动目标测速范围,以及多基线或者多频率选择的约束条件。本文的研究对分布式星载SAR系统设计,基线设计提供了一定的指导作用和参考价值。

2 分布式 SAR-ATI 动目标测速原理

沿航迹干涉(ATI)SAR利用沿航迹的两个天线,分别对应两个接收通道,成像得到的两幅图像,进行共轭相乘后得到干涉相位 θ ;当存在运动目标时,残余相位 θ 不为0,存在如下关系^[2]

$$\theta = \frac{2\pi B}{\lambda} \cdot \frac{v_r}{v_a} \quad (1)$$

其中, v_r 为目标径向速度, v_a 为雷达速度, λ 为发射信号波长, B 为两个天线的相位中心间距,对分布式星载SAR来说, B 为两卫星之间沿航迹方向的基线。

但是如果干涉相位超过 2π ,相位就会出现以 2π 为周期的回卷现象,从而导致动目标测速模糊^[7]。

从式(1)中,得到最大的不模糊速度为

$$v_{r,\max} = \lambda v_a / B \quad (2)$$

对于分布式星载SAR系统,卫星之间沿航迹的基线一般上百米,沿航迹基线 B 很大,最大不模糊速度很小,从而导致较小的周期性盲速,为

$$v_r = k(\lambda v_a / B), \quad k \text{ 为整数} \quad (3)$$

出现测速模糊时,形成的ATI干涉相位为

$$\theta = \frac{2\pi B}{\lambda} \cdot \frac{v_r}{v_a} = \theta_1 + 2\pi n \quad (4)$$

其中 θ_1 为实际测量到的干涉相位, n 为模糊数。

根据动目标速度和相位之间的转换关系,可得目标真实速度 v_r 可以表示为

$$v_r = v_1 + n v_{r,\max} \quad (5)$$

其中 v_1 为实际测量到的干涉相位 θ_1 对应的速度。

为了解速度模糊,文献[3,4]中提出了利用穷举法建立两个速度集合,由两个速度集合的交集得到可能的动目标速度,当两个交集存在多个元素时,根据已经限定的速度范围,取出某一个元素;而文献[7]提出了使用多基线和多频率的方法计算模糊数,通过合理设计多基线或者多频率来求解速度模糊,得到真实的动目标速度。但是上述解速度模糊的方法不够灵活,尤其在分布式卫星的实际应用中,基线有可能达到上千米,不模糊速度很小,模糊数

的范围更大,此时计算量增大,同时文献[3,4,7]没有明确给出在多基线或者多频率情况下,系统所能达到的测速范围,以及基线之间应该满足的关系或者频率之间应该满足的关系等。以下在研究鲁棒性剩余定理的基础上,对解速度模糊的方法进一步研究。

3 鲁棒性的剩余定理

当使用多基线解速度模糊时,对式(4)左右两边同除 2π ,得

$$f = \frac{B_i}{\lambda} \cdot \frac{v_r}{v_a} = n_i + f_i = n_i + \frac{k_i}{M} + \varepsilon_i, \quad i=1,2,\dots,L \quad (6)$$

同理,当使用多频率解速度模糊时,得

$$f = \frac{B}{\lambda_i} \cdot \frac{v_r}{v_a} = n_i + f_i = n_i + \frac{k_i}{M} + \varepsilon_i, \quad i=1,2,\dots,L \quad (7)$$

其中 L 为不同基线或者不同频率的个数, B_i 为不同的沿航迹基线, λ_i 为不同频率对应的波长, n_i 为不同的模糊数, k_i 为正整数, M 为由误差 ε_i 确定的整数,误差的范围 ε_i 为

$$|\varepsilon_i| \leq 1/2M \quad (8)$$

为了分析方便,分别研究多基线和多频率解速度模糊,其实也可以在分布式星载SAR系统中同时实现多基线和多频率,即使用3个以上卫星,并且为多发多收的工作模式,分别发射不同频率信号,各卫星同时接收回波,从而可以进一步提高动目标检测概率和测速范围。

当使用多基线解速度模糊时,令

$$\mu_i = 1/B_i, \quad x = v_r/(v_a \lambda) \quad (9)$$

当使用多频率解速度模糊时,令

$$\mu_i = \lambda_i, \quad x = v_r B / v_a \quad (10)$$

那么式(6)和式(7)可统一用下式表示为

$$f = \frac{x}{\mu_i} = n_i + f_i = n_i + \frac{k_i}{M} + \varepsilon_i \quad (11)$$

$$\mu_1 < \mu_2 < \dots < \mu_L, \quad i=1,2,\dots,L$$

现在目的就是从已知的 μ_i , k_i 和 M 中,唯一地确定 n_i 的值,从而得到 f 。夏香根教授在文献[8,9]中,描述了CRT的鲁棒性计算方法。

首先令 Γ 为正整数,并且 Γ 使

$$\Gamma_i = \mu_i \Gamma, \quad i=1,2,\dots,L \quad (12)$$

都为正整数;同时还需要满足 Γ_i 和 Γ_j 互为素数的条件,其中 $1 \leq i \neq j \leq L$,该条件在分布式SAR上主要用来选择多基线和多频率的值,以使 Γ_i 和 Γ_j 互为素数。

对于 $1 \leq i \leq L$,令

$$\gamma_i = \Gamma_1 \Gamma_2 \dots \Gamma_{i-1} \Gamma_{i+1} \dots \Gamma_L \quad (13)$$

其中 $\gamma_1 = \Gamma_2 \Gamma_3 \dots \Gamma_L$, $\gamma_L = \Gamma_1 \Gamma_2 \dots \Gamma_{L-1}$ 。当 $2 \leq i$

$\leq L$ 时, 定义集合 S_i
 $S_i =$

$$\left\{ (\hat{n}_1, \hat{n}_i) = \arg \min_{\hat{n}_1=0,1,\dots,\gamma_1-1, \hat{n}_i=0,1,\dots,\gamma_i-1} \left| \hat{n}_i \Gamma_i + \frac{\tilde{k}_i}{M} - \hat{n}_1 \Gamma_1 - \frac{\tilde{k}_1}{M} \right| \right\} \quad (14)$$

令集合 $S_{i,1}$ 表示集合 S_i 中 (\hat{n}_1, \hat{n}_i) 的第一个元素 \hat{n}_1 组成的集合, 即

$$S_{i,1} = \{ \hat{n}_1 : (\hat{n}_1, \hat{n}_i) \in S_i \} \quad (15)$$

当满足以下: (1) Γ_i 和 Γ_j 互为素数, 其中 $1 \leq i \neq j \leq L$; (2) $x < \frac{\Gamma_1 \Gamma_2 \cdots \Gamma_L}{\Gamma}$; (3) $M > (\Gamma_1 + \Gamma_L)$;

3个条件时, 集合 S :

$$S = \bigcap_{i=2}^L S_{i,1} \quad (16)$$

仅仅包含一个元素 \hat{n}_1 , 即

$$S = \{ \hat{n}_1 \} \quad (17)$$

此时, \hat{n}_1 就是式(11)当 $i = 1$ 时的解, 为了减小估计误差, 分别按照上述方法求出 $\hat{n}_i, i = 1, 2, \dots, L$, 将 \hat{n}_1 代入式(11)并取平均, 可得 x 估计值为

$$\hat{x} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (\hat{n}_i + f_i) \mu_i \quad (18)$$

由式(9)和式(10), 可得动目标速度的估计值为

$$\hat{v}_r = \frac{v_a}{L} \sum_{i=1}^L (\hat{n}_i + f_i) \mu_i \quad (19)$$

文献[11]中, 提出了鲁棒性剩余定理的快速算法, 将计算速度从 γ_i^2 阶次减小到 Γ_i^2 阶次, 显著地减小了计算速度, 提高了计算效率, 使该算法更适用于工程应用。

4 多基线解速度模糊

4.1 多基线解速度模糊原理

当使用多基线解速度模糊时, 分布式SAR的工作原理如图1所示(假设使用双基线, 多基线的情况也可类推):

图1中, 分布式卫星分别为 S_0, S_1 和 S_2 , 在同一轨道沿航迹方向排列, 工作于一发多收的正侧视

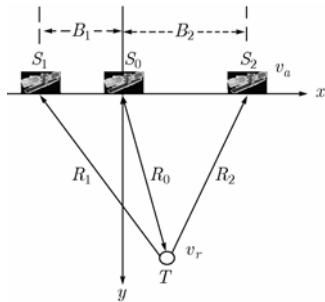


图1 多基线分布式SAR工作示意图

模式, 卫星 S_0 发射信号, 3颗卫星同时接收回波; x 为卫星飞行方向, 飞行速度为 v_a , S_0 与 S_1 和 S_2 形成的沿航迹的基线分别为 B_1 和 B_2 ; 地面上运动目标 T 垂直航迹速度为 v_r 。

根据ATI动目标检测原理, 得到两个基线的沿航迹的干涉相位为

$$\Psi_i = \frac{2\pi B_i v_r}{\lambda v_a} = 2\pi n_i + \varphi_i, \quad i = 1, 2 \quad (20)$$

将式(20)两边同时除以 2π , 得到

$$f = \frac{B_i v_r}{\lambda v_a} = n_i + f_i = n_i + \frac{k_i}{M} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2 \quad (21)$$

其中

$$k_i = \left\lfloor \frac{\varphi_i M}{2\pi} \right\rfloor, \quad i = 1, 2 \quad (22)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\varphi_i}{2\pi} - \left\lfloor \frac{\varphi_i M}{2\pi} \right\rfloor \frac{1}{M}, \quad i = 1, 2 \quad (23)$$

为了满足条件(1), 需要 Γ/B_1 和 Γ/B_2 互为素数, 其中 Γ 为使 Γ/B_1 和 Γ/B_2 正整数的整数, 根据该条件, 就可以选择有效的基线实现速度解模糊。

由条件(2), 可得最大可检测速度为

$$v_{r \max} = \frac{v_a \lambda \Gamma_1 \Gamma_2}{\Gamma} \quad (24)$$

由条件(3), 可得 M 的取值范围

$$M > (\Gamma_1 + \Gamma_2) \quad (25)$$

解模糊后估计的动目标速度为

$$\hat{v}_r = \frac{v_a \lambda}{L} \sum_{i=1}^L (\hat{n}_i + f_i) \frac{1}{B_i} \quad (26)$$

4.2 仿真结果与分析

假设 $v_a = 7500$ m/s, $v_r = 5$ m/s, $B_1 = 210$ m, $B_2 = 150$ m, $\lambda = 0.03$ m。根据以上参数, 得: $\mu_1 = 1/210, \mu_2 = 1/150$ 。

令 $\Gamma = 1050$, 得到 $\Gamma_1 = 5, \Gamma_2 = 7$ 。可见, Γ_1 和 Γ_2 互为素数, 满足3个条件中条件(1)。当只使用 S_0 和 S_1 间的沿航迹基线进行ATI动目标检测时, 无模糊的动目标最大检测速度为 $v_{r1 \max} = 1.07$ m/s; 同理, 当只使用 S_0 和 S_2 间沿航迹基线时, 最大检测速度为 $v_{r2 \max} = 1.50$ m/s, 可检测速度范围较小, 对于快速运动目标, 容易出现速度模糊。

而使用多基线解模糊时, 由条件(2)易知大可检测的速度为 $v_{r \max} = 7.5$ m/s, 显著增大了检测动目标速度的范围, 从而有利于对快速运动目标的测速。

由式(12)-式(17), 计算出 $n_1 = 3, n_2 = 4$; 代入式(26), 得多基线解速度模糊后的动目标速度为 $\hat{v}_r = 5$ m/s, 可见多基线有效地实现了解速度模糊。

4.3 基线设计

从以上分析可知基线设计时需要考虑两个条

件,即条件(1)和条件(2)。条件(1)表示 B_1 和 B_2 需要满足基本的基线约束条件,条件(2)表示在满足条件(1)的基础上,最大化最大可检测速度,实现对快速动目标测速的目的,综合这两个条件,就可以有效地选择基线。

当基线 $B_1 = 100$ m,基线 B_2 从100 m到320 m以间隔1 m变化时,图2显示了解模糊后的动目标速度随基线 B_2 的变化曲线,图3显示了最大可检测速度随基线 B_2 的变化曲线。

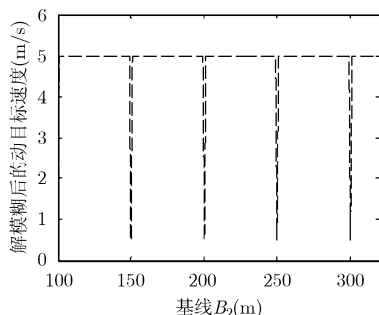


图2 解模糊后的动目标速度随基线 B_2 的变化曲线

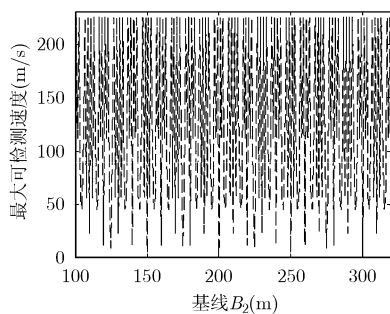


图3 最大可检测速度随基线 B_2 的变化曲线

从图2中可见,当 B_2 的基线为100 m,150 m,200 m,250 m,300 m时,出现速度解模糊错误。经过分析可知,当基线 B_1 为100 m,基线 B_2 为100 m,200 m,300 m时,不满足条件(1),因此出现解速度模糊错误;在图3中,当基线 B_2 为150 m和250 m时,最大可检测速度分别为4.5 m/s和4.5 m/s,大于动目标的真实速度5 m/s,所以出现解速度模糊错误。从图3中,可得在基线 B_1 和 B_2 满足约束条件(1)的情况下,最大可检测速度的范围为[4.5 m/s, 225 m/s]。

综上,在基线设计时,遵循的方法是在满足条件(1)的基础上,由条件(2)使其最大可检测速度最大,从而有效地对快速运动目标测速。

5 多工作频率解速度模糊

5.1 多工作频率解速度模糊原理

当使用多工作频率解速度模糊时,分布式SAR

的飞行示意图如图4所示:

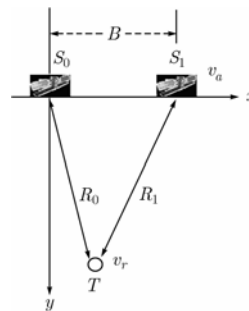


图4 多频率分布式SAR工作示意图

图4中,各参数与图1基本相同,主要不同的是分布式卫星为两颗卫星,工作于多发多收正侧视模式,卫星 S_0 发射波长为 λ_1 信号,卫星 S_1 发射波长为 λ_2 信号,接收时,两颗卫星同时接收回波; S_0 与 S_1 形成的沿航迹的基线为 B 。

根据ATI动目标检测原理,得到两个频率的沿航迹的干涉相位为

$$\Psi_i = \frac{2\pi B v_r}{\lambda_i v_a} = 2\pi n_i + \varphi_i, \quad i=1,2 \quad (27)$$

将上式两边同时除以 2π ,得到

$$f = \frac{B v_r}{\lambda_i v_a} = n_i + f_i = n_i + \frac{k_i}{M} + \varepsilon, \quad i=1,2 \quad (28)$$

其中,

$$k_i = \left\lfloor \frac{\varphi_i M}{2\pi} \right\rfloor, \quad i=1,2 \quad (29)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\varphi_i}{2\pi} - \left\lfloor \frac{\varphi_i M}{2\pi} \right\rfloor \frac{1}{M}, \quad i=1,2 \quad (30)$$

为了满足条件(1),就是要使 $\Gamma\lambda_1$ 和 $\Gamma\lambda_2$ 互为素数,其中 Γ 为使 $\Gamma\lambda_1$ 和 $\Gamma\lambda_2$ 正整数的整数。根据这个条件,就可以选择有效地选择发射信号的频率实现速度解模糊。

同理,由条件(2),可得最大可检测速度为

$$v_{r\max} = \frac{v_a \Gamma_1 \Gamma_2}{B \Gamma} \quad (31)$$

估计的动目标速度为

$$\hat{v}_r = \frac{v_a}{BL} \sum_{i=1}^L (n_i + f_i) \lambda_i \quad (32)$$

5.2 仿真分析

假设 $v_a = 7500$ m/s, $v_r = 5$ m/s, $B = 200$ m, $\lambda_1 = 0.03125$ m和 $\lambda_2 = 0.03$ m。根据以上参数,得: $\mu_1 = \lambda_1 = 25/800$, $\mu_2 = \lambda_2 = 24/800$ 。

令 $\Gamma = 800$,有 $\Gamma_1 = \mu_1 \Gamma = 24$, $\Gamma_2 = \mu_2 \Gamma = 25$ 。显然 Γ_1 和 Γ_2 互为素数,满足条件(1);由条件(2),可知动目标最大可检测的速度为 $v_r = 28.125$ m/s;

使用多频率解速度模糊后的动目标速度为 $\hat{v}_r = 5 \text{ m/s}$ 。

6 结束语

分布式星载SAR系统可以在空间形成多个上百米的长基线,从而利用长的沿航迹基线容易实现地面慢速运动目标的检测。但是大的沿航迹空间基线也带来一个严重的缺点,即减小了速度周期,减小了不模糊速度,使得盲速点增多。为了有效解决分布式星载SAR速度模糊的问题,本文基于剩余定理的原理,利用鲁棒性剩余定理的方法,给出了分布式星载SAR系统多基线和多频率解速度模糊的方法,并给出了测速范围,以及基线或者频率选择的约束条件。本文的研究对分布式星载SAR系统设计,基线设计提供了一定的指导作用和参考价值。

参考文献

- [1] Ender J H G. Space-time adaptive processing for synthetic aperture radar[J]. *IEE Colloquium*, 1998, 241(6): 1-18.
- [2] Moccia A and Rufino G. Spaceborne along-track interferometry: performance analysis and mission scenarios[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2001, 37(1): 199-213.
- [3] 宁蔚. 机载/星载雷达地面动目标检测方法研究 [D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2005.
- [4] 曾斌. 分布式卫星SAR慢动目标检测及关键技术研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2006.
- [5] Krieger G, Fiedler H, and Mittermayer J, *et al.* Analysis of multistatic configurations for spaceborne SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2001, 37(1): 199-213.
- [6] 李真芳, 保铮, 王彤. 分布式小卫星 SAR 系统地面运动目标检测方法[J]. *电子学报*, 2005, 33(9): 1664-1666.
Li zhen-fang, Bao Zheng, and Wang Tong. Ground moving target indication for distributed small satellite SAR systems. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(9): 1664-1666.
- [7] 党雅文, 禹卫东. 分布式小卫星 SAR 测速解模糊分析[J]. *测试技术学报*, 2007, 21(6): 500-505.
Dang Ya-wen and Yu Wei-dong. Analysis of deblurring of velocity measurement for the distributed small satellites SAR. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2007, 21(6): 500-505.
- [8] Xia Xiang-gen and Liu Ke-jing. A generalized Chinese remainder theorem for residue sets with errors and its application in frequency determination from multiple sensors with low sampling Rates[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(11): 768-771.
- [9] Xia Xiang-gen and Wang Gen-yuan. Phase unwrapping and a robust Chinese remainder theorem[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2007, 14(4): 247-250.
- [10] Li Gang, Xu Jia, Peng Ying-ning, and Xia Xiang-gen. An efficient implementation of a robust phase-unwrapping algorithm[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2007, 14(6): 393-396.
- [11] Xu Jia, Li Gang, Peng Ying-ning, and Xia Xiang-gen. Parametric velocity synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(9): 2463-2480.
- [12] Wang Gen-yuan, Xia Xiang-gen, and Chen V C, *et al.* Detection, location, and imaging of fast moving targets using multifrequency antenna array SAR [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2004, 40(1): 345-355.
- [13] Li Gang, Xu Jia, Peng Ying-ning, and Xia Xiang-gen. Moving target location and imaging using dual-speed velocity SAR[J]. *IET Radar Sonar Navig.*, 2007, 1(2): 158-163.
- [14] Wang Gen-yuan, Xia Xiang-gen, and Chen V C. Dual-speed SAR imaging of moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2006, 42(1): 368-379.
- [15] Li Gang, Xu Jia, Peng Ying-ning, and Xia Xiang-gen. Bistatic linear antenna array SAR for moving target detection, location, and imaging with two passive airborne radars [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(3): 554-565.

齐维孔: 男, 1983年生, 硕博连读生, 研究方向为星载合成孔径雷达系统设计和信号处理。

党雅文: 男, 1980年生, 博士, 研究方向为分布式星载 SAR 系统设计及地面低速运动目标检测。

禹卫东: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为星载和机载合成孔径雷达信号处理。