机载三通道 SAR/GMTI性能分析及改进方法

史洪印 周荫清 陈 杰

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在分析经典的三通道 SAR(Synthetic Aperture Radar)地面动目标指示(GMTI, Ground Moving Target Indication)方法原理的基础上,提出一种较全面三通道 SAR/GMTI性能评价方法.该方法同时考虑了载机存在速度误差、通道不匹配、杂波内部运动和系统噪声等主要误差因素,并分析了各种因素对系统性能的影响.经典的三通道 SAR/GMTI方法存在的缺点是不能同时提高最大不模糊可检测速度、最小可检测速度和盲速指标的性能以满足系统设计的要求.给出了一种新的天线布置方案和动目标检测方法,改进的检测方法在不增加通道数的前提下,较好地解决了该问题,具有很好的实用性.最后通过计算机仿真验证了新方法的可行性.

关 键 词: 合成孔径雷达; 地面动目标指示; 模糊速度; 最小可检测速度; 盲速; 杂波内部运动

中图分类号: TN 957.5

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)07-0904-05

Performance analysis and improved method for airborne three-channel SAR/GMTI system

Shi Hongyin Zhou Yinqing Chen Jie

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A comprehensive performance analysis method of three-channel SAR(synthetic aperture radar) GMTI(ground moving target indication) was presented after analyzing the theory of conventional three channel SAR ground moving target indication methods. The main error factors such as velocity variety of radar platform, receiver channel mismatch, clutter internal motion and system noise were considered in this method and the detection performance of each error factor affect on was analyzed too. The shortcoming of conventional three channel SAR/GMTI methods is that the performance of minimum detectable velocity, ambiguous speed and blind-speed simultaneously can't be improved to meet the requirements of the system. The improved method solves the problem without increasing receiving channels by rearranging the transmitting and receiving antennae. Theoretical analysis and simulation results show the validity of this scheme.

Key words: synthetic aperture radar; ground moving target indication; ambiguous speed; minimum detectable velocity; blind-speed; clutter internal motion

运动目标检测和成像是合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)要完成的基本功能和难点之一,如何实时、高精度地检测出运动目标、确定目标运动速度及其位置并对这些动目标成像是SAR运动目标检测和成像的主要任务.目前常用的 GMTI(Ground Moving Target Indication)方法是三通道杂波抑制干涉方法[1-3],该类方法是结合 DPCA(Displaced Phase Center Antenna)技术和 ATI(Along Track Interferometry)技术,在抑制地杂波后,通过干涉技术实现动目标的测速和定位.目前有关三通道 SAR/GMTI的算法已有很多,而且理论分析和计算机仿真的结果都很好,但是实际

收稿日期: 2008-12-05

作者简介: 史洪印(1976-),男,山东曹县人,博士生,现为燕山大学信息学院讲师, shihongyin@ee.buaa.edu.cn.

的系统性能却不太令人满意[4], 主要原因是理论分析和计算机仿真的条件过于理想化, 没有考虑真实系统中影响算法性能的各种因素. 文献 [5] 中分析了双通道系统的性能, 但仅考虑背景杂波, 忽略系统噪声的影响, 而且没有考虑地杂波的内部运动. 理想情况下, 杂波被完全对消, 仅剩下动目标信号和系统噪声. 在非理想情况下 (存在雷达平台速度误差、通道失衡和杂波内部运动), 噪声与剩余的杂波的功率是可以比拟的, 不能忽略.

在 SAR动目标检测系统设计中, 衡量一种动目标检测算法的性能以及衡量其是否可行的重要指标是最小可检测速度、盲速和模糊速度. 通常最小可检测速度越小越好, 不至于低速运动目标的漏检; 在感兴趣的目标所在的速度区域内, 盲速区越少越好, 最好没有盲速; 模糊速度越大越好, 最好是在感兴趣的速度区域内不存在速度模糊. 通过对三通道 SAR/GMTI技术的性能分析可知, 该系统存在最小可检测速度、盲速和模糊速度指标之间的矛盾, 即提高某一指标的性能将会导致其它指标性能的恶化, 不能同时使这些指标达到系统设计要求. 为此提出一种新的天线布置方案, 在不改变天线孔径数目的前提下, 采用不等间隔相位中心技术, 并且使用边缘的子孔径作为发射天线, 3个通道同时接收, 较好地解决了上述矛盾, 使 3个指标的性能可以同时得到提高.

1　系统性能分析

1.1　回波信号模型

三通道 SAR动目标检测系统的空间几何模型如图 1所示.

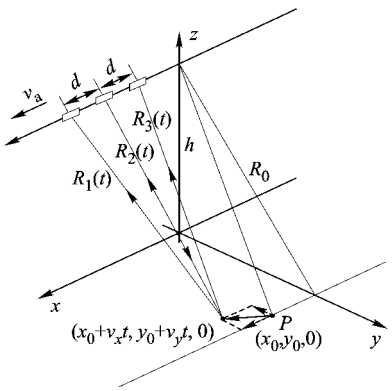


图 1　三通道 SAR动目标检测空间几何模型

载机平台在水平面内沿 x 轴方向直线飞行, 飞行速度为 v_a, 飞行高度 h; 阵列天线由沿载机飞行方向以等间隔 d 线性排列的 3个接收孔径组成, 中间孔径以重复频率 P_{rf} 发射电磁波, 雷达波长为 λ; 设在 $t=0$ 时刻, 中间天线的坐标为 $(0, 0, h)$, 动目标 P 的坐标为 $(x_0, y_0, 0)$, 速度为 $(v_x, v_y, 0)$, 中间孔径到场景中心的距离为 R_0, 则 t 时刻, 天线的相位中心坐标为 $(v_a t, 0, h)$, 动目标 P 的坐标为 $(x_0 + v_x t, y_0 + v_y t, 0)$.

1.2　信杂噪比计算

定义信杂噪比 (R_{scnr}) 为信号功率与杂波加噪声功率之和之比, 即 $R_{scnr} = S/(C+N)$, 其中 S, C 和 N 分别为动目标信号、地杂波和噪声的功率.

实际系统存在如下几种因素将会影响杂波抑制效果和动目标的检测性能: ①接收机通道失配, 主要包括通道之间的绝对增益误差和相位失配引入的误差; ②系统噪声, 系统噪声可以模拟为叠加在背景杂波上面的白噪声; ③杂波内部运动; ④雷达平台的非匀速平稳飞行, 这将导致回波数据在空间上为非均匀采样而无法满足 DPCA 条件, 从而降低系统的杂波对消性能.

设载机速度为 $v_a + \Delta v_a$, 其中 Δv_a 为载机速度误差. 按照文献 [6] 中的推导方法, 可以得出三通道频域信号为

$$\left.\begin{aligned}
I'_1(f) &= A_1\exp(\mathrm{j}\varphi_1)G\exp\left(\mathrm{j}k\frac{dy_0v_y}{v_aR_0}\right)\cdot\\
&\quad\exp\left(\mathrm{j}k\frac{d(d-2x_0)\Delta v_a}{2v_aR_0}\right)I(f)+n_1\\
I'_2(f) &= GI(f)+n_2\\
I'_3(f) &= A_2\exp(\mathrm{j}\varphi_2)G\exp\left(-\mathrm{j}k\frac{dy_0v_y}{v_aR_0}\right)\cdot\\
&\quad\exp\left(\mathrm{j}k\frac{d(d+2x_0)\Delta v_a}{2v_aR_0}\right)I(f)+n_3
\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

其中, $k=2\pi/\lambda$; 幅度系数 G 包括距离向处理、收发天线增益特性、目标散射特性和空间传播损耗; $A_1\exp(\mathrm{j}\varphi_1)$ 和 $A_2\exp(\mathrm{j}\varphi_2)$ 分别为通道 1和 3相对通道 2的通道失配系数; n_i, $i=1, 2, 3$ 分别为三通道的噪声. 相邻通道对消后, 得到残差信号为

$$\left.\begin{aligned}
|I'_{12}(f)|^2 &= \left|A_1\exp(\mathrm{j}\varphi_1)\cdot\right.\\
&\quad\exp\left(\mathrm{j}k\frac{d(d-2x_0)\Delta v_a}{2v_aR_0}\right)\cdot\\
&\quad\left.\exp\left(\mathrm{j}k\frac{dy_0v_y}{v_aR_0}\right)-1\right|^2|G|^2\cdot\\
&\quad|I(f)|^2+n_{12}\\
|I'_{23}(f)|^2 &= \left|1-A_2\exp(\mathrm{j}\varphi_2)\cdot\right.\\
&\quad\exp\left(\mathrm{j}k\frac{d(d+2x_0)\Delta v_a}{2v_aR_0}\right)\cdot\\
&\quad\left.\exp\left(-\mathrm{j}k\frac{dy_0v_y}{v_aR_0}\right)\right|^2|G|^2\cdot\\
&\quad|I(f)|^2+n_{23}
\end{aligned}\right\}\quad(2)$$

其中, n_{12}和 n_{23}为通道对消后的噪声.

根据三通道 SAR/GMTI原理, 对杂波抑制后的信号实施动目标检测. 以第 1路残差信号为例, 通道对消后的信杂噪比为

$$R_{scnr} = P_t \left| A_1 \exp(j\varphi_1) \cdot \exp\left(j\frac{d(d-2x_0)\Delta v_a}{2v_a R_0} \right) \cdot \exp\left(j\frac{dy_0 v_y}{v_a R_0} \right) - 1 \right|^2 \Big/ \left| P_c \, | A_1 \exp(j\varphi_1) \cdot \exp\left(j\frac{d(d-2x_0)\Delta v_a}{2v_a R_0} \right) \cdot \exp\left(j\frac{dy_0 v_{int}}{v_a R_0} \right) - 1 \right|^2 + P_n \Bigg) \quad (3)$$

其中, v_{int}为杂波内部运动速度; P_t, P_c和 P_n分别为杂波抑制前动目标、地杂波和噪声的功率.

由雷达方程可以得到, 杂波抑制前的信杂比 R_{scr}和信噪比 R_{snr}分别为[7]

$$R_{scr} = \frac{P_t}{P_c} = \frac{\sigma_t}{\sigma_c^2 \rho_a \rho_r} \quad (4)$$

$$R_{snr} = \frac{P_t}{P_n} = \frac{P_t}{P_c} \cdot \frac{P_c}{P_n} = \frac{\sigma_t}{\sigma_c^0 \rho_a \rho_r} \cdot R_{cnr} = \frac{\sigma_t}{\rho_a \rho_r} \cdot \frac{R_{cnr}}{\sigma_c^0} = \frac{\sigma_t}{\rho_a \rho_r} \cdot \frac{1}{N_{E\sigma_c^0}} \quad (5)$$

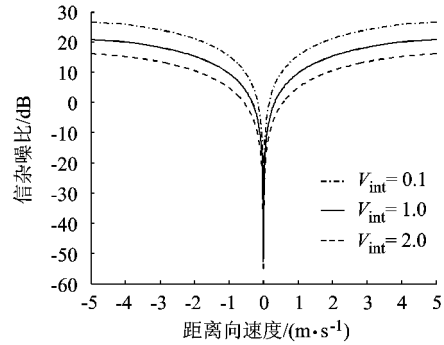
其中, σ_c^0, σ_t分别为地杂波和动目标的后向散射系数; ρ_a, ρ_r分别为方位向和距离向分辨率; $R_{cnr} = P_c/P_n$为杂波噪声功率比, $N_{E\sigma_c^0} = \sigma_c^0/R_{cnr}$为噪声等效后向散射系数.

将式(4)和(5)代入式(3), 可得杂波抑制后的信杂噪比为

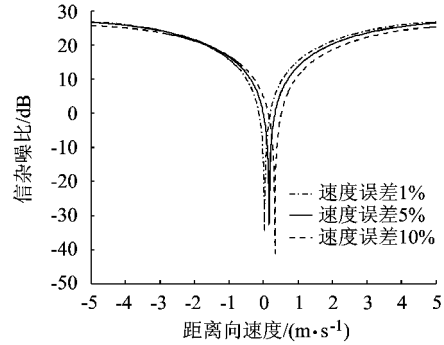
$$R_{scnr} = \left| A_1 \exp(j\varphi_1) \exp\left(j\frac{d(d-2x_0)\Delta v_a}{2v_a R_0} \right) \cdot \exp\left(j\frac{dy_0 v_y}{v_a R_0} \right) - 1 \right|^2 \Big\backslash \left(\frac{\sigma_c^0 \rho_a \rho_r}{\sigma_t} \left| A_1 \exp(j\varphi_1) \cdot \exp\left(j\frac{d(d-2x_0)\Delta v_a}{2v_a R_0} \right) \cdot \exp\left(j\frac{d \cdot y_0 \cdot v_{int}}{v_a \cdot R_0} \right) - 1 \right|^2 + \frac{N_{E\sigma_c^0} \rho_a \rho_r}{\sigma_t} \right) \quad (6)$$

1.3 各因素对杂波抑制效果的影响

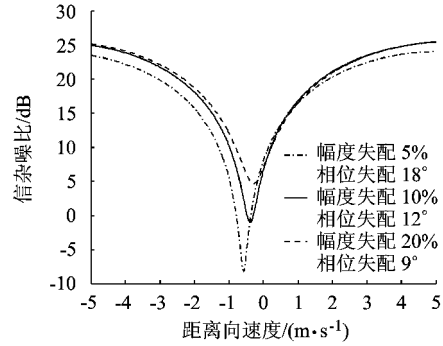
图 2给出了在某一噪声强度下, 杂波对消效果随各因素的变化曲线, 为更好地说明每一种因素对杂波抑制效果的影响, 仿真时仅考虑一种误差因素. 图 2a是信杂噪比随杂波内部运动速度的关系曲线. 从该曲线可以看出, 杂波内部运动速度越高, 抑制效果越差. 图 2b是信杂噪比随载机速度误差的关系曲线. 从该曲线可以看出, 载机速度误差不但使杂波抑制效果变差, 而且将某些要检测的动目标对消掉, 造成动目标的漏检. 图 2c是信杂噪比随通道失配的关系曲线. 从该曲线可以看出, 通道失配对杂波抑制效果的影响与载机存在速度误差的影响类似. 最后, 从式(6)可以看出, 不同位置的动目标的对消效果亦不同. 由于方位坐标 x_0与载机误差在同一项, 所以信杂噪比随动目标方位坐标的关系曲线与图 2b类似.



a 杂波内部运动



b 载机速度误差



c 通道失配

图 2 各因素对杂波抑制效果的影响

1.4 检测门限的确定

根据虚警概率和检测概率可以确定检测门限 R_{th}. 在数学上, 典型的雷达系统虚警概率可表示为[8]

$$P_{fa} = \int_{V_T}^{\infty} \frac{r}{\phi^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\phi^2} \right) dr = \exp\left(-\frac{V_T^2}{2\phi^2} \right) \quad (7)$$

式中, V_T为检测门限; ϕ^2为剩余杂波加噪声的功

率.

检测概率可表示为

$$P_{\mathrm{D}} = \int_{V_{\mathrm{T}}}^{\infty} \frac{r}{\phi^2} I_0\left(\frac{rA}{\phi^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\phi^2}\right) \mathrm{d}r \qquad (8)$$

式中 I_0 为修正的第一类零阶贝塞尔函数.

1.5 最小可检测速度

如果不考虑通道失衡、载机速度误差和杂波内部运动, 当 $R_{\mathrm{scnr}} = R_{\mathrm{th}}$ 时, 利用式 (6) 可以得到最小可检测距离向速度 v_{min} 的表达式, 否则, 得不到其显式表达式, 需要根据系统的参数通过仿真来确定. 为了找到最小可检测速度随孔径相位中心间距 d 的变化关系, 给出了位于某一方位向的动目标在不同 d 时的 R_{scnr} 随 v_y 的关系曲线, 如图 3所示. 从该图可以看出, 动目标的最小可检测速度与两孔径相位中心间距 d 成反比, 增大 d 可降低最小可检测速度.

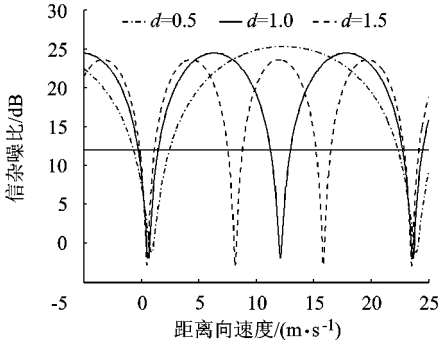


图 3　不同孔径相位中心间距下的信杂噪比曲线

1.6 盲　速

当信杂噪比满足 $R_{\mathrm{scnr}} \geqslant R_{\mathrm{th}}$ 时, 动目标可以被检测到, 否则, 对应动目标的速度即为盲速. 从图 3可以看出, 盲速不再是某一速度点, 而是一个速度区域; 而且系统的盲速区数目随两孔径相位中心间距 d 的增大而增多. 为使感兴趣的目标所在的速度区域内盲速区较少, 最好没有盲速, 应尽量减小 d.

1.7 模糊速度

为便于找到模糊速度与孔径相位中心间距之间的关系, 在分析模糊速度时, 暂且忽略通道失衡的影响. 杂波对消后的两路图像的干涉相位为

$$\Delta\Phi = \arg\left(I'_{12}(f) \cdot I'^{*}_{23}(f)\right) = \frac{\pi}{\lambda}\frac{2dy_0}{v_{\mathrm{a}}R_0}v_y - \frac{\pi}{\lambda}\frac{2dx_0\,\Delta v_{\mathrm{a}}}{v_{\mathrm{a}}R_0} \qquad (9)$$

所以

$$v_y = \frac{\lambda v_{\mathrm{a}}R_0}{\pi 2dy_0}\Delta\Phi + \frac{x_0}{y_0}\Delta v_{\mathrm{a}} \qquad (10)$$

上式中的 $\Delta\Phi$ 存在相位模糊问题, 其主值区间为 $[-\pi, +\pi]$. 因此, 由式 (10) 得到的模糊速度为

$$v_{\mathrm{ambig}} = \pm\frac{\lambda v_{\mathrm{a}}R_0}{2dy_0} + \frac{x_0}{y_0}\Delta v_{\mathrm{a}} \qquad (11)$$

当动目标速度超过 v_{ambig} 时, 可以实现动目标的检测, 但其距离向速度不能得到正确估计, 由此可知, 应减小两孔径相位中心间距 d 以增大系统的模糊速度.

综合分析以上 3个指标可以得出, 增大两孔径相位中心间距可以提高指标最小可检测速度的性能, 同时会降低指标盲速和模糊速度的性能, 反之亦然.

2　改进方法

为解决上述问题, 采用一种新的天线布置方案, 采用不等间隔相位中心天线技术, 并且使用左边的子天线 2发射信号, 3个天线同时接收回波, 天线相位中心间距分别为 d_1 和 d_2, 如图 4所示.

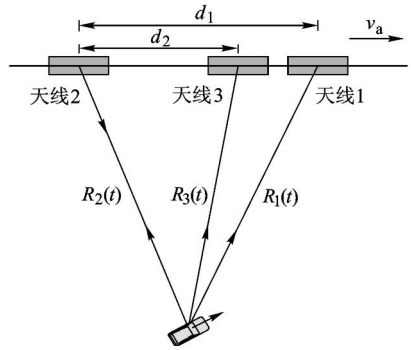


图 4　不等间距相位中心天线结构

下面分析新的天线布置方案所对应的性能指标. ①最小可检测速度, 如果选取 $d_1 > d_2 \geqslant d$, 则无论使用哪一路残差图像进行动目标检测都可以降低最小可检测速度, 即改善该指标的性能. ②模糊速度, 从式 (11) 可以看出, 模糊速度与孔径 1和 3的间距 $2d$ 成近似反比, 这样, 如果在新的天线布置方案中使孔径 1和 3的间距 $(d_1 - d_2) < 2d$, 则可以提高模糊速度, 改善该指标的性能. ③选取 d_1 和 d_2 大于 d 会使得系统的盲速区数目增多, 但是由于 $d_1 \neq d_2$, 所以两残差图像所对应的盲速区不同, 结合这两幅残差图像, 可大大减小盲速区. 在文献 [9] 中, 作者分析了由于要满足 DPCA 条件, 采用三通道 DPCA 技术无法从根本上消除盲速. 实际上即使不必满足 DPCA 条件 (通过插值配准处理), 也很难完全消除盲速, 因为系统存在各种误差因素时, 盲速不再是一些周期性的速度点, 而是一系列周期性的盲速区域. 所以只能尽可能减小盲速区. 另外, 该方法的一个不足之处是仍然无法对位于两残差图像盲速区的目标进行测速和定位.

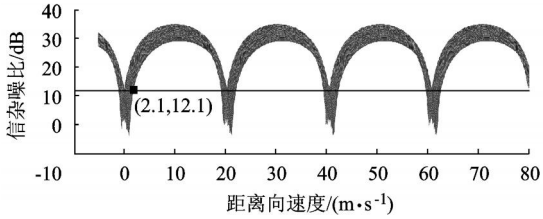
3 系统性能计算与分析

根据文中提出的方法进行性能计算仿真, SAR 系统的主要参数如表 1所示.

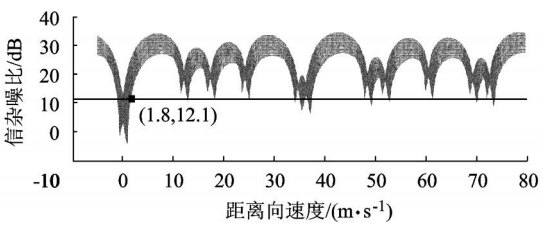
表 1 系统主要参数

参数	数值	参数	数值
h /km	10	σ_c^0 /($m^2 \cdot m^{-2}$)	0.1
R_0 /km	11.5	σ_t /m^2	10
v_a /($m \cdot s^{-1}$)	200	$N_{E0\beta}$ /dB	-25
Δv_a /($m \cdot s^{-1}$)	20	通道相位误差 /rad	$-\pi/30$
λ /m	0.03	通道增益误差 /%	5
ρ_a /m	2	v_{int} /($m \cdot s^{-1}$)	0.1
ρ_r /m	2	方位向扫描范围 /m	-200~200
P_d /%	80	d /m	0.6
P_{fa}	10^{-5}	d_1, d_2 /m	1.0, 0.7

将 SAR 系统参数带入式(6)可以得到整个场景的杂波抑制性能曲线, 如图 5a所示, 图中的检测门限可由式(7)和式(8)算出, 为 12.1 dB. 从该图可以得到系统的最小可检测速度为 v_{min} = 2.1m/s, 需要说明的是该速度是整个成像场景中的最小可检测速度, 盲速区为小于检测门限的区域. 从图 5a可以看出, 在 v_{min}到 80m/s之间共有 3 个盲速区. 采用第 2节给出的改进方法, 将两幅残差图像幅度相加求平均, 得到新图像的杂波抑制性能曲线如图 5b所示. 从该图可以得到系统的最小可检测速度为 v_{min} = 1.8m/s, 而且盲速区大大减小. 另外, 相对于经典方法, 改进方法的模糊速度提高了 $2d/(d_1 - d_2) = 4$倍.



a 经典方法



b 改进方法

图 5 信杂噪比曲线

4 结束语

本文在分析经典的三通道 SAR/GMTI方法原理的基础上, 给出了一种较全面的性能评价方法. 该方法分析了载机存在速度误差、通道不匹配、杂波内部运动和系统噪声等主要误差因素对系统性能的影响. 另外, 本文给出了一种新的天线布置方案和动目标检测方法, 较好的解决了经典动目标检测方法难以提高总体性能指标的问题.

参考文献 (References)

[1] Stockburger E F, Held D N. Interferometric moving ground target imaging[C] // IEEE International Radar Conference. Alexandria, VA: [s.n.], 1995: 438-443

[2] Gabele Martina, Sikaneta Ishuwa. A new method to create a virtual third antenna from a two-channel SAR-GMTI system[J]. Waveform Diversity & Design, 2007(10): 433-437

[3] 孙娜, 周荫清, 李景文. 基于 DPCA 技术的星载 SAR/GMTI 处理方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(10): 1564-1568
Sun Na, Zhou Yinqing, Li Jingwen. Algorithm of spaceborne SAR/GMTI based on DPCA[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2005, 27(10): 1564-1568(in Chinese)

[4] Weihing Diana, Hinz Stefan, Meyer Franz, et al. An integral detection scheme for moving object indication in dual-channel high resolution spaceborne SAR data[J]. Urban Remote Sensing Joint Event, 2007(6): 1-6

[5] 杨贤林, 潘志刚, 沈汀. 机载双通道 SAR/DPCA 误差分析[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 536-539
Yang Xianlin, Pan Zhigang, Shen Ting. Error analysis for airborne dual-channel SAR/DPCA system[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(3): 536-539(in Chinese)

[6] 张英. 基于 DPCA 技术的 SAR 动目标检测及定位方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学电子信息工程学院, 2004
Zhang Ying. SAR moving target detection and location method based on DPCA technique[D]. Beijing: School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004

[7] Shen Chiu, Chuck Livingstone. A comparison of displaced phase centre antenna and along-track interferometry techniques for RADARSAT-2 ground moving target indication[J]. Can J Remote Sensing, 2005, 31(1): 37-51

[8] Bassem R Mahafza, Atef Z Elsherbeni. MATLAB simulations for radar systems design[M]. New York: Chapman & Hall/CRC, 2004

[9] 郑明洁, 杨汝良. 一种改进的 DPCA 运动目标检测方法[J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1429-1432
Zheng Mingjie, Yang Ruliang. An improved DPCA moving targets detecting algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(9): 1429-1432(in Chinese)

(责任编辑: 娄 嘉)