

天线斜置情况下三通道 SAR-GMTI 技术研究

李亚超 李晓明 邢孟道 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 该文提出了一种新的基于 DPCA(相位中心偏置天线)技术的动目标检测体制,即天线沿载机飞行方向按一定倾斜角度放置。利用等效相位中心原理建立了天线斜置情况下三通道运动目标回波信号模型,给出了天线倾斜角对动目标检测、最小可检测速度和盲速的影响。通过改进的 DPCA 技术实现运动目标的检测、测速和定位。最后,仿真数据验证了该新体制和改进 DPCA 技术对运动目标检测的可行性。

关键词: SAR; 运动目标检测; 相位中心偏置天线; 最小可检测速度

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0578-05

Study on the Three Channels SAR-GMTI System with the Slant-Placed Antennae

Li Ya-chao Li Xiao-ming Xing Meng-dao Bao Zheng

(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: This paper proposes a new system based on DPCA technology for the detection and position of moving target, namely three antennae are placed at a slant angle along airplane flying detection. The echo model of moving target is established based on three channels with the slant-placed antennae in terms of the equivalent phase center principle. The analysis of the detection of moving target, MVD and blind velocity relative to the slant-placed antenna is given and the improved DPCA technology is presented for the detection, velocity measure and position. Finally, the simulated data confirm this new system and the improved DPCA technology.

Key words: SAR; Moving target detection; DPCA (Displaced Phase Center Antenna); MVD

1 引言

在瞬息万变的现代战争中,要想获取主动权,就必须更快、更准、更直观地反映战场信息,包括对战场环境的监视和对环境中运动目标的检测和定位。由于 SAR-GMTI 具有全天候、全天时和作用距离远等优点,已经被广泛地应用于机载雷达动目标检测技术领域^[1,2]。它能在复杂环境下得到所观测领域的地物信息,并实现运动目标的检测和定位;能把被检测到的运动目标标注在 SAR 图像中。实际上,InSAR^[3,4]处理更能反映地物环境信息,实现场景的三维成像。因此,为了更直观地获取战场环境和环境中动目标的位置信息,应该把被检测的动目标标注在三维地物场景中,实现在三维图像中的动目标检测和定位。

DPCA 技术^[5,7]由于其高效的动目标检测性能,已经被广泛地应用于 SAR-GMTI 雷达系统中。基于传统 DPCA 技术检测动目标方法由于要满足天线间距、脉冲重复频率和载机速度之间的关系,使其应用受到了限制。而一些改进的基于 DPCA 技术检测动目标的方法^[8,9]虽然能较好地对运动目

标进行检测和定位,但不能实现干涉 SAR 处理,不能更直观地反映三维战场环境中的运动目标。而实际上,国内对这方面的研究较少,一般都是干涉成像和动目标检测体系分开实现的,没有能同时实现三维成像中的动目标检测。

因此,本文提出了一种新的基于 DPCA 技术的动目标检测体制,即天线沿载机飞行方向按一定倾斜角度放置。与传统的天线沿水平方向放置的情况比,该体制除了天线沿水平方向投影实现动目标检测外,还能沿垂直方向投影实现地面场景的干涉 SAR 三维成像。本文研究了天线斜置情况下的运动目标检测方法,分析了天线斜置情况下对成像平面的影响和天线斜置时等效相位中心技术。同时,利用等效相位中心原理建立了天线斜置情况下三通道运动目标回波信号模型,给出了天线倾斜角对动目标检测、最小可检测速度和盲速的影响,并通过改进的 DPCA 技术实现运动目标的检测、测速和定位。最后,仿真数据验证了该新体制和改进 DPCA 技术对运动目标检测的可行性。

2 天线斜置对成像平面的影响

为了能在实现对观测区域进行干涉 SAR 成像同时,也能实现对地面运动目标的检测,现按如图 1 所示,把三天线沿载机飞行方向按一定角度倾斜放置。图中 x 为载机的飞行方向, v_a 为载机的飞行速度。可见,在正侧视情况下,当三

天线俯仰角不变时,由于各天线的高度不同,使得它们各自的成像平面也不同,其成像平面差如图2所示。为了便于分析,图2中只给出了两个天线成像平面图(三天线情况类似),图中天线2发射信号,天线1和天线2都接收信号。由于天线高度的不同,成像平面略有差异。假设光速为 c ,雷达采样率为 f_s ,天线间的距离为 d ,倾斜角度为 θ ,天线1的高度为 H ,俯仰角为 β ,则有

$$\Delta x_1 = \frac{c}{2f_s \sin \beta} \quad (1)$$

$$\Delta x_2 = \frac{c\sqrt{(H+d\sin\theta)^2+(H\tan\beta)^2}}{2f_s H \tan \beta} \quad (2)$$

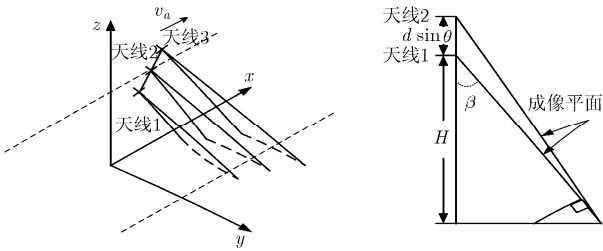


图1 多天线斜置
三维示意图

图2 垂直载机飞行平面
的多天线斜置投影图

式中 Δx_1 为天线1的采样单元在地距上的投影, Δx_2 为天线2的采样单元在地距上的投影。当成像平面一致(即 $\theta = 0^\circ$)时, Δx_1 等于 Δx_2 ;当成像平面不一致时, Δx_1 不等于 Δx_2 ,造成相同的地距单元在不同成像平面上有不同的斜距单元,从而使各天线接收回波信号所成图像产生差异,影响图像匹配和动目标检测。从式(1)和式(2)可知,它们之间的差异为

$$\Delta x_{12} = |\Delta x_1 - \Delta x_2| \quad (3)$$

从式(3)可知,当 Δx_{12} 远小于半个采样单元时,天线斜置对成像平面的影响可以忽略,如式(4)所示。

$$\Delta x_{12} \ll \frac{c}{4f_s} \quad (4)$$

假设信号采样频率为 $f_s = 50\text{MHz}$,天线俯仰角为 $\beta = 50^\circ$,载机飞行高度为 $H = 5\text{km}$,天线斜置角为 $\theta = 45^\circ$,天线间距为 $d = 0.5\text{m}$,则不同天线采样单元在地距上的投影差为 $\Delta x_{12} = 1.1442\text{e}^{-4}\text{m}$ 。可见, $\Delta x_{12} \ll c/(4f_s) = 1.5\text{m}$,这时它们之间的差异可以忽略不计,认为各天线的成像平面相同,为发射天线2的成像平面。实际上,在一般载机平台上都能满足式(4)的要求,可以认为图1所示的天线斜置情况下的三天线成像平面一致。虽然这个差异不会影响距离包络,但会对相位产生影响。而相位的影响会在下面的等效相位中心中被补偿。

3 天线斜置情况下的等效相位中心

当接收和发射分开的两个天线之间的距离远小于雷达到目标的距离时,补偿一个固定相位 $\exp(j\pi d^2 \cos^2 \theta / \lambda(2r - d \sin \theta))$ (d 为两天线间距, r 为发射天线到目标的垂直距离, θ 为天线斜置角, λ 为波长)后可以等效为单个天线收发,

其等效收发相位中心在两天线连线的中点,此等效位置称为天线斜置情况下的等效相位中心。如图3所示,两天线在经过近似等效为相同成像平面后,假设地面有一固定目标点 p ,其位置为 $(x, r - d \sin \theta / 2)$,等效相位中心为坐标参考点 $(0, 0)$;天线2为发射信号,到目标的垂直距离和作用距离分别为 r 和 r_2 ;天线1为接收信号,到目标的作用距离为 r_1 ;等效相位中心到目标的作用距离为 r_e 。当 $x, d \ll r$ 时, r_1, r_2 和 r_e 之间的关系为

$$\begin{aligned} r_1 + r_2 - 2r_e &= \sqrt{\left(x + \frac{d}{2} \cos \theta\right)^2 + (r - d \sin \theta)^2} \\ &+ \sqrt{\left(x - \frac{d}{2} \cos \theta\right)^2 + r^2} - 2\sqrt{x^2 + \left(r - \frac{d}{2} \sin \theta\right)^2} \\ &\approx \frac{d^2 \cos^2 \theta}{2(2r - d \sin \theta)} \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知,它们之间的距离只相差一个和地面目标横向位置无关的固定常数,因此,在回波信号中补偿掉这个固定常数后,就可看成信号是由等效相位中心收发的。当然,三天线斜置情况也是一样的,如图4所示,天线2发射,天线1和天线3接收。通过补偿一固定相位因子,消除相位误差的影响。

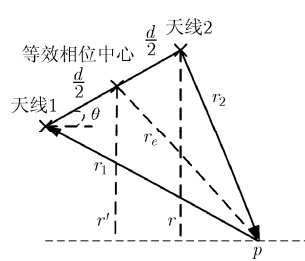


图3 两天线斜置情况
下的等效相位中心

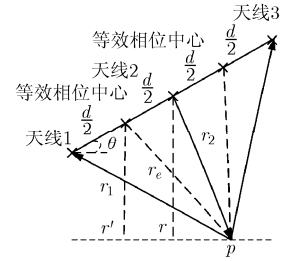


图4 三天线斜置情况
下的等效相位中心

4 基于 DPCA 技术的斜置天线 SAR-GMTI 方法

经过上面斜置天线回波信号的补偿和近似后,可以把斜置三天线等效在如图5所示的相同的成像平面内。图中 v_a 为载机的飞行速度, r_n 为地面运动目标在成像平面内离天线2的初始垂直距离。由文献[8-11]可知,运动目标沿方位向的速度只会使动目标成像散焦,而检测运动目标主要靠目标相对雷达的径向速度,所以,为了方便分析,公式推导只考虑动目标的径向速度,如图5所示,动目标径向速度为 v_r 。结合文献[12],可得到三天线到地面运动目标 p 点的作用距离分别为

$$\left. \begin{aligned} R_1(t_m) &\approx r_n - \frac{d}{2} \sin \theta + v_r t_m + \frac{\left(v_a t_m - \frac{d}{2} \cos \theta\right)^2}{2r_n} \\ R_2(t_m) &\approx r_n + v_r t_m + \frac{(v_a t_m)^2}{2r_n} \\ R_3(t_m) &\approx r_n + \frac{d}{2} \sin \theta + v_r t_m + \frac{\left(v_a t_m + \frac{d}{2} \cos \theta\right)^2}{2r_n} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

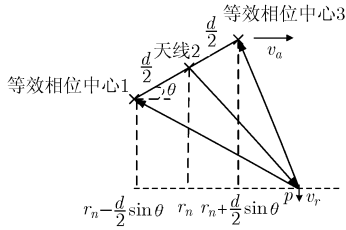


图5 天线斜置情况下的 SAR-GMTI 示意图

从式(6)可以看出,三天线对动目标成像在距离向上有位置偏移,其相对天线2对动目标成像结果而言,天线1和天线3对动目标所成图像在距离向上的偏移分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_{21} &= -\frac{d}{2}\sin\theta - \frac{dv_a t_m \cos\theta}{2r_n} + \frac{d^2 \cos^2\theta}{8r_n} \\ \Delta R_{23} &= \frac{d}{2}\sin\theta + \frac{dv_a t_m \cos\theta}{2r_n} + \frac{d^2 \cos^2\theta}{8r_n} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 t_m 为方位慢时间。从式(7)可以看出, ΔR_{21} 和 ΔR_{23} 主要由分量 $(d/2)\sin\theta$ 引起,而分量 $(dv_a t_m \cos\theta)/(2r_n)$ 和 $(d^2 \cos^2\theta)/(8r_n)$ 一般远小于距离分辨单元的一半,可以忽略。因此,需要对分量 $(d/2)\sin\theta$ 进行补偿。由于距离向上图像的位置偏移和运动目标速度无关,因此,补偿后由测量误差或小分量引起的图像位置偏差可以通过文献[13]的方法对图像进行配准校正各图像之间的微小偏移。在通过距离偏移的校正之后,回波信号如下式所示,为了方便分析,这里只给出方位相位项。

$$\left. \begin{aligned} s_1(t_m) &= \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(r_n - \frac{d}{2}\sin\theta + v_r t_m + \frac{(v_a t_m - d\cos\theta/2)^2}{2r_n}\right)\right] \\ s_2(t_m) &= \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(r_n + v_r t_m + \frac{(v_a t_m)^2}{2r_n}\right)\right] \\ s_3(t_m) &= \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(r_n + \frac{d}{2}\sin\theta + v_r t_m + \frac{(v_a t_m + d\cos\theta/2)^2}{2r_n}\right)\right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

对式(8)中的 $s_1(t_m)$ 进行 FFT 变换($s_2(t_m)$ 和 $s_3(t_m)$ 类似)为

$$s_1(f_a) = \exp(j(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 + \Phi_6)) \quad (9)$$

其中 $\Phi_1 = -\frac{4\pi r_n}{\lambda} + \frac{2\pi v_r^2 r_n}{\lambda v_a^2}$, $\Phi_2 = \frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda}$, $\Phi_3 = -\frac{2\pi v_r d \cos\theta}{\lambda v_a}$,

$$\Phi_4 = \frac{2\pi f_a v_r r_n}{v_a^2}, \Phi_5 = -\frac{2\pi f_a d \cos\theta}{2v_a}, \Phi_6 = \frac{\pi \lambda f_a^2 r_n}{2v_a^2}.$$

式(9)中,对三天线而言, Φ_1 为常数项,不影响动目标的成像和检测; Φ_2 为由于天线间距引起的相位误差,在两幅复图像相减时,地面杂波被保留下来,影响动目标的检测,需要被补偿掉; Φ_3 与目标的径向速度有关,被用于动目标的检测; Φ_4 为由于目标径向运动所引起的动目标在 SAR 图像中的位置偏移,它不影响目标的检测,但需要对其进行补偿并在 SAR 图像中对动目标重新定位; Φ_5 为由于天线间距所引起的 SAR 图像在方位向的整体偏移,需要在动目标检测前进行补偿; Φ_6 为地面静止杂波的方位调频项,在成像之前需要

被补偿掉。因此,在动目标检测前,其补偿函数为

$$\text{sref}_1 = \exp\left[-j\left(\frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda} - \frac{2\pi f_a d \cos\theta}{2v_a} + \frac{\pi \lambda f_a^2 r_n}{2v_a^2}\right)\right] \quad (10)$$

同理,可以得到天线2和天线3的补偿函数为

$$\text{sref}_2 = \exp\left[-j\left(\frac{\pi \lambda f_a^2 r_n}{2v_a^2}\right)\right] \quad (11)$$

$$\text{sref}_3 = \exp\left[-j\left(-\frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda} + \frac{2\pi f_a d \cos\theta}{2v_a} + \frac{\pi \lambda f_a^2 r_n}{2v_a^2}\right)\right] \quad (12)$$

式(8)在经过方位频域补偿并 IFFT 之后,通道1和通道2之间信号两两相减并取模值得到

$$|s'_{21}(t_m)| = \left| \text{sinc}\left[\pi B_a\left(t_m + \frac{v_r r_n}{v_a^2}\right)\right] \sin\left[\frac{\pi d \cos\theta v_r}{\lambda v_a}\right] \right| \quad (13)$$

其中通道2和通道3之间信号两两相减并取模结果类似,用 $s'_{23}(t_m)$ 表示。可见,对地面静止目标而言,即 $v_r = 0$ 时, $|s'_{21}(t_m)| = 0$,则地杂波被抑制;对运动目标而言,当 $v_r = \frac{m\lambda v_a}{d \cos\theta}$ (m 为整数)时, $|s'_{21}(t_m)| = 0$,运动目标被对消掉,此时,运动目标的速度为盲速,无法检测到运动目标;当 $v_r \neq \frac{m\lambda v_a}{d \cos\theta}$ 时, $|s'_{21}(t_m)| \neq 0$,运动目标没有或部分被对消,

可以对运动目标进行检测。同时,结合传统的 DPCA 技术^[14]可以得到,天线斜置情况下的最小可检测速度为 $MVD = \frac{\lambda v_a}{2d \cos\theta}$ 。假设 $\theta = 45^\circ$, $\lambda = 0.03\text{m}$, $v_a = 120\text{m/s}$,图6

中实线为 $d = 0.5\text{m}$ 时径向速度对检测幅度的影响,虚线为 $d = 1\text{m}$ 时径向速度对检测幅度的影响;可见,随着天线间距的变大,其检测盲速的个数会增加,但却有利于慢速运动目标的检测。图7为在 $d = 0.5\text{m}$ 时,不同倾斜角情况下径向速度对检测幅度的影响,图中实线为 $\theta = 45^\circ$ 时径向速度对检测幅度的影响,虚线为 $\theta = 20^\circ$ 时径向速度对检测幅度的影响;可见,随着天线倾斜角的减小,检测盲速的个数会增加,但同时也大大增加了对慢速目标的检测概率,有利于慢速运动目标的检测。因此,在实际的应用中,要根据雷达对运动目标的检测要求对各参数进行详细的设计。

5 运动目标的测速和定位

式(13)只是实现了对运动目标的检测,并没有实现运动目标的定位。但通过三天线所得 SAR 图像分别相减后, $s'_{21}(t_m)$ 和 $s'_{23}(t_m)$ 的相位存在差异,可以通过这一差异对运动

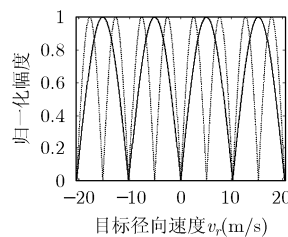


图6 不同天线间距时径向速度对检测幅度的影响

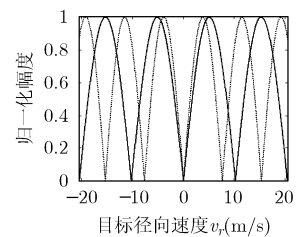


图7 不同倾斜角时径向速度对检测幅度的影响

目标的径向速度进行估计

$$v_r = \frac{\lambda v_a \arg[s'_{23}(t_m) s_{21}^*(t_m)]}{2\pi d \cos \theta} \quad (14)$$

式中 $\arg(\bullet)$ 为求相角函数。由于相位差以 2π 为周期, 为使测速无模糊, 应保证

$$-\frac{\lambda v_a}{2d \cos \theta} < v_r < \frac{\lambda v_a}{2d \cos \theta} \quad (15)$$

在得到了运动目标的径向速度后, 就可以对运动目标进行定位, 并标注在 SAR 图像中。把检测到运动目标的信号 $s'_{21}(t_m)$ 或 $s'_{23}(t_m)$ 变换到方位多普勒域, 乘以目标定位补偿函数

$$\text{sref}_{\text{position}} = \exp\left[-j \frac{2\pi f_a v_r r_n}{v_a^2}\right] \quad (16)$$

在补偿了式(16)的相位后, 运动目标就可以实现定位了。

综上所述, 可以得到天线斜置情况下的运动目标检测流程为如图 8 所示。

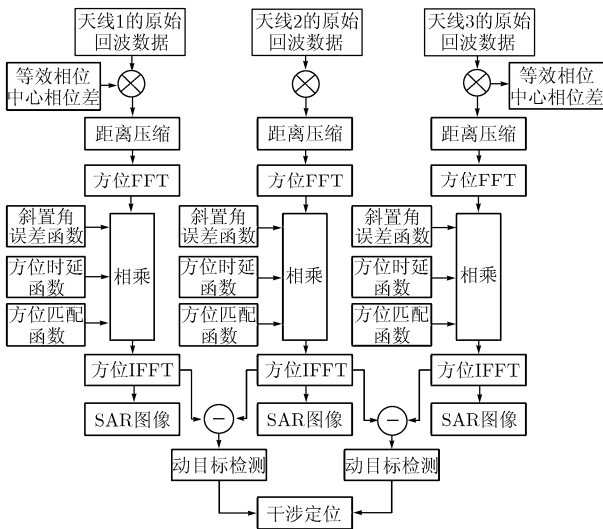


图 8 天线斜置情况下运动目标检测流程图

6 仿真分析

为了验证天线斜置情况下三通道动目标检测和定位方法的可行性, 现对固定点目标场景内 3 个不同速度的运动目标进行检测和定位。假设雷达参数为: 发射信号载频 $f_c = 8.85 \text{ GHz}$, 发射信号带宽 $B = 40 \text{ MHz}$, 信号采样频率 $f_s = 50 \text{ MHz}$, 发射信号时宽 $T_p = 20 \mu\text{s}$, 脉冲重复周期 $\text{PRF} = 1000 \text{ Hz}$, 天线间距 $d = 0.5 \text{ m}$, 天线斜置角 $\theta = 45^\circ$, 载机飞行速度 $v_a = 120 \text{ m/s}$ 。固定场景由如图 9(a)所示的 45 个带 ‘•’ 的静止点目标组成, 静止点目标在方位向按 4m 间隔分布, 在距离向按 5m 间隔分布。运动目标由如图 9(a)所示的 3 个带 ‘+’ 的点目标组成。在假设高度为零的情况下, 它们沿方位维和距离维的初始位置分别为 $[0\text{m}, 10\text{km}]$, $[-10\text{m}, 9995\text{m}]$ 和 $[16\text{m}, 10010\text{m}]$; 沿方位维和距离维的运动速度分别为 $[0\text{m/s}, 3\text{m/s}]$, $[3\text{m/s}, -3.5\text{m/s}]$ 和 $[-2\text{m/s},$

$4\text{m/s}]$ 。静止目标 RCS 为归一化幅值 1, 运动目标的 RCS 为归一化幅值 0.3。单天线 SAR 成像结果如图 9(b)所示, 可见, 运动目标被静止目标强杂波所掩盖, 难以发现运动目标的存在。图 9(c)为利用天线水平放置时 DPCA 技术检测运动目标的结果; 由于天线斜置, 引起一个和天线斜置倾角有关的相位误差, 影响杂波相消的效果, 难以检测运动目标的存在。图 9(d)为利用本文所提出的天线倾斜放置时 DPCA 技术检测运动目标的结果, 可见, 静止强杂波背景被抑制掉了, 呈现出清晰的 3 个动目标, 能实现动目标的检测。基于图 9(d)的结果, 并结合干涉相位能测出 3 个运动目标的径向速度分别为 $v_{r1} = 3.1195 \text{ m/s}$, $v_{r2} = -3.4532 \text{ m/s}$ 和 $v_{r3} = 4.0310 \text{ m/s}$ 。由于运动目标散焦的影响, 使目标的径向速度估计和定位存在一个小的误差。在得到运动目标的径向速度后, 可以实现运动目标的定位, 如图 9(e)所示。从图 9(a)的运动目标初始位置可以看出, 可以得到较好的定位效果。

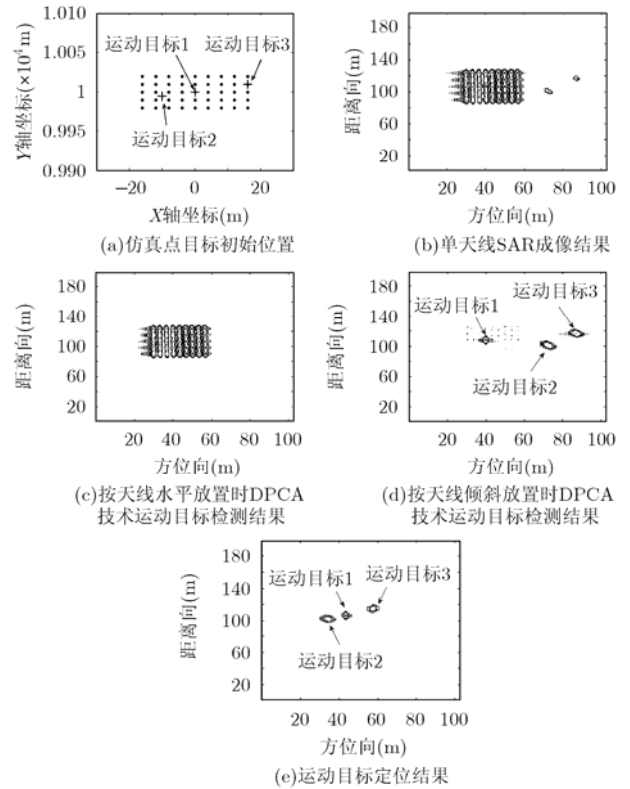


图 9 天线斜置情况下的运动目标检测

7 结束语

新一代雷达应该具备多种功能(如: 合成孔径雷达成像、地面运动目标检测和干涉合成孔径雷达成像等)。但是, 传统的天线水平放置或垂直放置只能分别实现地面动目标检测或干涉合成孔径雷达成像功能中的一种。因此, 针对这一问题, 本文研究了天线斜置情况下基于 DPCA 技术的三通道运动目标检测方法。因为, 天线斜置时, 在水平方向的投影可以实现运动目标检测, 在垂直方向的投影可以实现干涉合

成孔径雷达成像,并最终实现 InSAR-GMTI。当然,由于篇幅的原因,本文重点研究了天线斜置情况下的运动目标检测方法,分析了天线斜置情况下对成像平面的影响和天线斜置时的等效相位中心技术;给出了天线倾斜角对动目标检测、最小可检测速度和盲速的影响,并通过改进的 DPCA 技术实现运动目标的检测、测速和定位。

参考文献

- [1] Damini A, Balaji B, Haslam G, and Goulding M. X-band experimental airborne radar-Phase II: synthetic aperture radar and ground moving target indication [J]. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig*, 2006, 153(2): 144-151.
- [2] Sharma J J, Gierull C H, and Collins M J. The influence of target acceleration on velocity estimation in dual-channel SAR-GMTI [J]. *IEEE Trans. on GRS*, 2006, 44(1): 134-147.
- [3] Bamler R and Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry [J]. *Inverse Problem*, 1998, 14(3): R1-R54.
- [4] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, Li F K, Madsen S N, Rodriguez E, and Goldstein R M. Synthetic aperture radar interferometry [C]. *Proc. IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
- [5] 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 Yin-qing, and Li Jing-wen. An algorithm of spaceborne SAR/GMTI based on DPCA [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(10): 1564-1568.
- [6] 张英, 李景文. 基于 DPCA 的机载 SAR-MTI 系统误差分析及补偿方法研究[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 2031-2034.
Zhang Ying and Li Jing-wen. System error analysis and calibration method for airborne SAR-MTI system based on DPCA Technique [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12): 2031-2034.
- [7] 王永良, 陈建文, 吴志文. 现代 DPCA 技术研究[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 118-121.
Wang Yong-liang, Chen Jian-wen, and Wu Zhi-wen. Research on modern DPCA techniques [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(6): 118-121.
- [8] 郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测和成像研究[D]. [博士学位论文], 北京: 中国科学院电子研究所, 2003, 6.
Zheng Ming-jie. Study on SAR-GMTI and imaging[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing: Institute of Electronics of Chinese Academy of Sciences, 2003, 6.
- [9] 王琦. 基于频域分析和 DPCA 的 SAR 运动目标检测方法研究[D]. [博士学位论文], 北京: 中国科学院电子研究所, 2005, 9.
Wang Qi. SAR-GMTI based on frequency analysis and DPCA[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing: Institute of Electronics of Chinese Academy of Sciences, 2005, 9.
- [10] 李杰, 向敬成, 黄顺吉. 合成孔径雷达慢运动目标成像处理的研究[J]. 电子科技大学学报, 1995, 24(2): 119-125.
Li Jie, Xiang Jing-cheng, and Huang Shun-ji. On study of slowly moving target imaging using SAR [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 1995, 24(2): 119-125.
- [11] 曲畅文, 何友, 苏峰, 黄勇. SAR 运动目标检测基于 chirp-fourier 变换 [C]. International Radar Conference, Yantai, China, IEEE, 9-12 May 2005: 802-805.
- [12] 邢孟道, 李真芳, 保铮, 王彤. 分布式小卫星雷达空时频成像方法研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(增刊): 70-82.
Xing Meng-dao, Li Zhen-fang, Bao Zheng, and Wang Tong. Study of distributed microsatellites radar space-time-frequency imaging method [J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(Supplement): 70-82.
- [13] 李真芳. 分布式小卫星 SAR-InSAR-GMTI 的处理方法[D]. [博士学位论文], 西安: 西安电子科技大学, 2006, 4.
Ling Zhen-fang. Approaches to SAR-InSAR-GMTI for distributed small satellite SAR systems [D]. [Ph.D. dissertation], Xi'an: Xidian University, 2006, 4.
- [14] Hovanessian S A, Jovic L B, and Lopez J M. Spaceborne radar design equations and concepts [C]. *Proc. IEEE*, 1997, 1(1): 125-136.
- 李亚超: 男, 1981 年生, 博士生, 从事雷达信号处理、SAR/ISAR 成像和地面运动目标检测方面的研究工作。
- 李晓明: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为动目标检测、空时自适应信号处理、雷达成像。
- 邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达成像和目标识别。
- 保铮: 男, 1927 年生, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要研究领域为雷达系统设计、SAR/ISAR 成像处理、空时二维信号处理、动目标检测及成像和目标识别等。