

基于 DBS 图像的双通道广域监视雷达动目标检测和参数估计方法

郑明洁^① 闫贺^{①②} 张冰尘^① 赵凤军^① 杨汝良^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: 该文提出了一种基于高分辨率多普勒波束锐化图像的适用于双通道广域监视雷达系统的地面动目标检测、定位和测速方法。首先,分析了广域监视雷达系统的回波特性,给出了杂波抑制和参数估计算法。然后,针对双通道参数估计精度低的问题,提出了提高动目标参数估计精度的算法。最后,针对参数估计时模糊严重的问题,给出了有效的解模糊算法。仿真数据和实际飞行数据证明了该文方法的有效性。

关键词: 广域监视(WAS)雷达; 动目标检测; 参数估计; 解模糊; 多普勒波束锐化(DBS)

中图分类号: TN959

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)01-0036-07

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20007

A Novel Method of Moving Target Detection and Parameters Estimation for Dual-channel WAS Radar Based on DBS Image

Zheng Ming-jie^① Yan He^{①②} Zhang Bing-chen^① Zhao Feng-jun^① Yang Ru-liang^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: In the paper, a method of moving target detection and parameters estimation is proposed used for dual channels Wide Area Surveillance (WAS) radar based on high resolution Doppler Beam Sharpen (DBS) image. First, it analyzes characteristics of clutter and moving target return, and presents the ways of clutter suppression and moving target parameters estimation. Then, an approach to decrease errors of parameters estimation is proposed. At last, an effective approach to resolve the ambiguity caused during estimating moving targets parameters is proposed. The effectiveness of the presented method is demonstrated by both simulated data and real data.

Key words: Wide Area Surveillance (WAS) radar; Moving target detection; Parameters estimation; De-ambiguity; Doppler Beam Sharpen (DBS)

1 引言

广域监视(Wide Area Surveillance, WAS)雷达在载机飞行过程中,波束在方位向快速重复扫描,完成对热点区域动态监视。广域监视模式具有监视区域广、重访率高、可跟踪动态目标、识别目标特征和类别等优势,在机载雷达系统中得到了很好的应用。在上世纪90年代海湾战争中,美国的JSTARS系统充分发挥了广域扫描模式的优势,通过处理3个接收通道的回波数据,成功地发现了正在撤退的伊拉克坦克群,对其进行了及时、有效的打击^[1]。本世纪初,德国研制的PAMIR系统除了具有高分辨率SAR成像功能外,最重要的功能就是广域扫描-地面动目标监视^[2-4]。该系统通过设置5个接收通

道,不仅能够检测运动目标,还能够对目标进行测速和定位,充分展示了该模式的优越性能。

对于广域监视雷达系统动目标检测算法的研究,已经有相关文献发表。文献[1,5]采用杂波抑制干涉(Clutter Suppress Interferometry, CSI)算法抑制杂波,根据杂波抑制后的两路数据干涉处理结果进行动目标参数估计。文献[2]采用改进的空时自适应处理方法进行杂波抑制,采用最大似然算法完成目标角度估计。文献[6]中采取了空时联合的方法进行杂波抑制,利用相邻的3个多普勒通道作为时域自由度,两通道作为空域自由度,共5个自由度来抑制波束主多普勒通道的杂波,采用杂波抑制后的两路数据干涉处理结果进行动目标定位。上述文献中的算法虽然能够检测动目标、估计动目标参数,但是系统通道数多、实现复杂、造价高,并且算法复杂,运算量大,不易实时实现;文献[2]和文献[6]

属于空时类处理算法，杂波抑制效果受到样本非均匀性的影响，甚至会造成虚警增加。

双通道系统设备少、造价低，检测算法简单、运算量小，更适合实时实现。但是双通道系统动目标参数估计精度低、模糊严重。本文提出了一种基于高分辨率多普勒波束锐化 (Doppler Beam Sharpen, DBS) 图像的适用于双通道广域监视雷达系统的地面动目标检测、定位和测速方法。多普勒波束锐化技术是高分辨率雷达成像技术之一^[7]，由于具有较高的分辨率，能更清晰地显示动目标周围的地理信息，同时提高了目标信噪比，有利于动目标检测。本文详细分析了动目标回波特性，给出了动目标检测算法；针对广域系统中，目标速度和位置互相影响，参数估计难度大、精度低的问题，给出了有效的参数估计算法；针对参数估计时模糊严重的问题，给出了详细的分析和有效的解决方案。最后，通过模拟数据和实际飞行数据验证了本文算法的有效性。

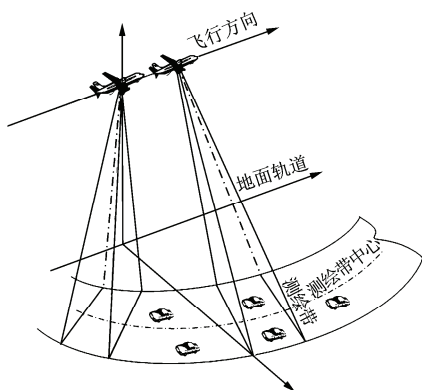


图 1 广域扫描示意图

两个通道接收回波信号后，首先进行通道间一致性校正，然后进行高分辨率的 DBS 成像，具体步骤包括：距离徙动校正、距离向脉冲压缩、方位去调频处理和方位向加权 FFT。距离脉压后两通道信号可表示为

$$\left. \begin{aligned} S_1(nT) &= G \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (2R_1(nT))\right) \\ &\quad \cdot \text{sinc}(\pi k_r (nT - \tau_1) T_0) \\ S_2(nT) &= G \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (2R_1(nT) - d \sin(\theta))\right) \\ &\quad \cdot \text{sinc}(\pi k_r (nT - \tau_2) T_0) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 λ 是波长， G 是与目标后向散射强度、天线增

2 算法描述

2.1 回波分析和 DBS 成像

为了实现广域扫描，载机在飞行过程中，天线波束在方位向由后向前扫描，扫描到某个角度驻留一定脉冲数，步进到下一个角度，扫描到规定角度后，反向扫描或者回到起始角度重新开始扫描，扫描角度范围可根据实际需求而定。扫描示意图如图 1 所示。双通道广域监视雷达地面动目标检测系统天线几何结构如图 2 所示。以载机质心在地面的投影为原点， x 轴为载机飞行轨迹 (x' 轴) 在地面投影轨迹， z 轴过原点指向载机质心， y 轴满足右手螺旋法则。载机飞行高度 h ，飞行速度 v ，天线方位向等分成两个子孔径 A_1 和 A_2 ，孔径间距为 d 。 A_1 发射， A_1 和 A_2 同时接收。假定 t 时刻波束中心斜视角 θ_0 ，目标位于 P 点，斜视角为 θ ，俯仰角为 α ，方位角为 η ，目标到 A_1 和 A_2 的斜距分别为 $R_1(t)$ 和 $R_2(t)$ 。由图可知， $R_2(t) = R_1(t) - d \sin(\theta)$ 。

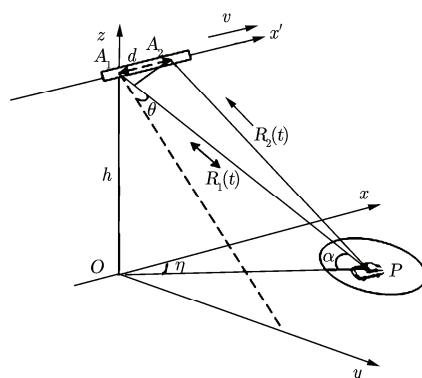


图 2 天线几何结构图

益有关的幅度信息， T_0 是发射脉冲宽度， k_r 是发射信号线性调频斜率。 τ_1 和 τ_2 分别是两路回波信号延迟时间， $\tau_1 = 2R_1(t)/c$ ， $\tau_2 = (R_1(t) + R_2(t))/c$ ， c 是光速。

目标相位在方位向是二次调频相位，积累一定脉冲后，多普勒频率具有一定的展宽，若要提高图像分辨率，需经过去调频处理，使目标的能量集中在单一的频率中。去调频处理后，方位向做加权 FFT，加权函数选择 Chebyshev 窗。

接下来对两路 DBS 图像做干涉处理，得

$$S_1(f) \cdot S_2(f)^* = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (d \sin(\theta))\right) \cdot G_c \quad (2)$$

其中

$$G_c = \left| \sum_{n=1}^N \left(G_0 \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (2R_1(nT)) \right) \cdot \exp(j\pi f_{dr}(nT)^2) \right. \right. \\ \left. \left. \cdot F_{\text{Cheb_w}}(nT) \cdot \exp(-j2\pi f n T) \right) \right|^2$$

f_{dr} 是方位调频斜率, 可根据调频斜率估计算法得到, $F_{\text{Cheb_w}}$ 是 Chebyshev 窗函数, $G_0 = G \cdot \text{sinc}(\pi k_r \cdot (nT - \tau_1)T_0)$ 。由式(2)可得, 干涉相位为

$$\phi = -\frac{2\pi}{\lambda} (d \sin(\theta)) \quad (3)$$

其中, θ 是目标斜视角。

2.2 动目标检测

图 3 给出了动目标检测和参数估计流程图。

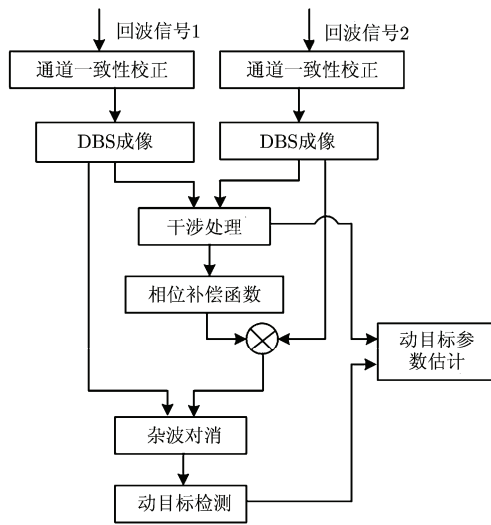


图 3 动目标检测和参数估计流程图

处理算法在高分辨率 DBS 图像域完成。两路回波数据完成通道幅相误差校正和高分辨率 DBS 成像后, 对两路 DBS 图像干涉处理, 得到相位补偿函数, 并补偿到第 2 路 DBS 图像中。然后进行杂波对消, 并完成动目标检测, 根据检测结果和干涉处理结果进行动目标参数估计。DBS 成像是一种快速、高效的成像方法, 相比常规 SAR 成像方法, 运算量小的多, 非常适合实时处理; 本文在干涉处理后, 仅经过一次相位补偿, 即可完成杂波对消; 该方法适于实时实现。

假定 DBS 图像中频率为 f 的信号由动目标、杂波和噪声组成, 如下所示:

$$\begin{cases} S_1(f) = M_1(f) + C_1(f) + N_1(f) \\ S_2(f) = M_2(f) + C_2(f) + N_2(f) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $M_1(f)$ 和 $M_2(f)$ 分别表示两路动目标信号, $C_1(f)$ 和 $C_2(f)$ 分别表示两路杂波信号, $N_1(f)$ 和 $N_2(f)$ 分别表示两路噪声信号。由于动目标的多普勒频率由径

向速度和斜视角共同确定, 所以同一多普勒频率的动目标和静止目标斜视角不同, 干涉相位不同。

对第 2 路信号中静止目标进行相位补偿, 然后与第 1 路信号对消, 得

$$\begin{aligned} S_{12}(f) &= S_1(f) - S_2(f) \exp(j\phi_c) \\ &= M_1(f)(1 - \exp(j(\phi_c - \phi_m))) \\ &\quad + N_1(f) - N_2(f) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 ϕ_c 和 ϕ_m 分别是静止目标和动目标干涉相位。由上式可见, 经过上述处理后, 静止目标被对消, 动目标和噪声保留下来。采用恒虚警率方法^[8] 在静止目标对消后的残差子图像中进行动目标检测。实际中, 由于载体运动误差、系统热噪声、通道不一致等各种因素的影响, 导致按照式(5)对消后, 杂波剩余多, 虚警增加, 不利于动目标检测。采用自适应方法来补偿通道相位误差, 能更有效的消除杂波^[9]。本文具体做法为: 实际接收的两路回波数据经过通道一致性校正、高分辨率 DBS 成像后, 为了消除随机干扰, 分别在距离向排序, 取出前 M 个幅度较大数据, 共轭相乘, 做平均, 如下式所示:

$$C_{12}(f) = \sum_{m=1}^M S_{r1}(f, m) S_{r2}^*(f, m) \quad (6)$$

其中 M 为距离单元数, $S_{r1}(f, m)$ 和 $S_{r2}(f, m)$ 分别是两幅 DBS 图像在距离向排序后前 M 个幅度较大数据。对由式(6)得到的干涉相位做线性拟合, 得: $\phi_p(f) = p_1 + p_2 f$, 其中, p_1 和 p_2 分别为拟合后的常数项和一次项系数, 加入常数项是考虑到各种剩余误差导致的固定相位。将该相位补偿到 $S_2(f)$ 中, 并与 $S_1(f)$ 对消, 可有效的消除杂波, 得到杂波对消后的残差子图像。

3 动目标参数估计和解模糊分析

3.1 动目标定位和解模糊分析

本文在图 2 所示的坐标系中定位目标, 目标在惯性坐标系中的位置可以通过坐标系转换求得, 限于篇幅, 不在此描述。在图 2 坐标系中, 目标位置由 3 个变量确定, 分别为: 目标斜距 R , 目标俯仰角 α 和目标方位角 η 。目标斜距由检测到目标的距离向位置确定; 目标的俯仰角根据目标斜距和载体飞行高度求得。目标俯仰角、方位角和斜视角满足 $\sin \theta = \cos \alpha \cdot \cos \eta$, 因此, 确定了俯仰角和斜视角, 就可以确定目标的方位角。本文主要讨论目标斜视角的估计方法。

如果回波中只有动目标, 根据式(3)可求得准确的动目标斜视角。但是实际中动目标淹没在杂波和噪声中, 干涉相位受到污染, 降低了斜视角的估计精度。此外, 干涉相位存在 2π 周期性模糊, 使得斜

视角存在严重的模糊。只有解决了这两个问题, 才能求出目标正确的斜视角。

根据文献[9]中分析, 干涉相位主要受到杂波的影响, 对于噪声不敏感, 动目标信杂比(Signal to Clutter Ratio, SCR)越低, 干涉相位受影响越严重, 提高动目标信杂比是提高干涉相位精度的重要途径, 该结论同样适用于本文。对于淹没在主瓣杂波内的慢速运动目标, SCR 较低, 干涉相位估计精度低; 在主瓣杂波之外的快速运动目标, SCR 较高, 干涉相位估计精度高。对于淹没在主瓣杂波内的目标, 除了通过系统设计提高 SCR 以外, 还可以增加一个接收通道, 通过两两对消获得两路杂波对消后的动目标信号, 然后对这两路信号干涉处理, 就会大大提高目标的 SCR, 进而提高干涉相位精度^[10]。

本文提出了只有两个接收通道的情况下, 采用相位平均的方法降低随机杂波和噪声的影响。对于高分辨率系统, 目标信号分布在几个距离-多普勒单元内, 设置一个矩形窗, 将动目标包含在窗内, 然后对窗内所有点的干涉相位求平均, 如下式所示:

$$\phi_r = \frac{1}{N_r N_f} \sum_{n_r=1}^{N_r} \left(\sum_{n_f=1}^{N_f} \phi(n_r, n_f) \right) \quad (7)$$

其中, N_r 是距离窗长度, N_f 是多普勒频率窗长度。用平均相位 ϕ_r 来代替干涉相位 ϕ 求目标斜视角, 降低随机干扰的效果较明显。根据仿真结果, 最好情况下干涉相位估计误差下降了 $N_r N_f$ 倍。根据实际目标所占距离-多普勒单元数确定矩形窗的大小。该方法简单易行, 没有增加设备量, 在实际中获得较好的效果。

下面分析相位模糊的问题。由于相位以 2π 为周期, 实际目标斜视角应该为

$$\theta_m = a \sin \left(\frac{-(\phi + k2\pi)\lambda}{2\pi d} \right) \quad (8)$$

其中, ϕ 是干涉相位, d 是孔径间距, k 为模糊周期数, λ 是波长, 只有确定 k 才能求出目标真实的斜视角。假定天线波束指向斜视角为 θ_0 , 波束宽度为 β , 目标斜视角位于 $(\theta_0 - \beta/2, \theta_0 + \beta/2)$ 之内。波束宽度内干涉相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi d}{\lambda} \left(\sin \left(\theta_0 + \frac{\beta}{2} \right) - \sin \left(\theta_0 - \frac{\beta}{2} \right) \right) \\ &\approx 2\pi \frac{d}{d_0} \cos(\theta_0) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, ϕ_1 和 ϕ_2 分别是波束边缘干涉相位, d_0 是子孔径收发等效长度, $d_0 = \lambda/\beta$ 。经过分析, 得到如下结论:

(1) 如果 $d = d_0$, $|\Delta\phi| \approx 2\pi |\cos(\theta_0)|$, k 具有唯一

性, 选取 k 使得 $\phi + k \cdot 2\pi$ 在 (ϕ_1, ϕ_2) 之内, 进而确定目标斜视角, 本文属于该种情况。

(2) 如果 $d < d_0$, $|\Delta\phi| < 2\pi |\cos(\theta_0)|$, k 具有唯一性, 选取 k 使得 $\phi + k \cdot 2\pi$ 在 (ϕ_1, ϕ_2) 之内, 进而确定目标斜视角。

(3) 如果 $d > d_0$, $|\Delta\phi| > 2\pi |\cos(\theta_0)|$, k 的取值不唯一, 目标斜视角仍然存在模糊, 但是 k 的取值数目减少。广域扫描模式下, 目标历经多次扫描, 利用目标在多次扫描间的相关性, 可以唯一的确定 k 值。如果满足 $|d \cdot \cos(\theta_0)| < d_0$, $|\Delta\phi|$ 在 $(0, 2\pi)$ 之内, k 仍然具有唯一性, 选取 k 使得 $\phi + k \cdot 2\pi$ 在 (ϕ_1, ϕ_2) 之内, 进而确定目标斜视角。

经过上面的分析和处理后, 可以有效地解决目标斜视角模糊问题。

3.2 动目标测速和解模糊分析

动目标斜视角确定后, 根据检测到目标位置的多普勒频率就可以求得目标的径向速度, 如下式所示:

$$v_r = v \cdot \sin(\theta) - f_r \frac{\lambda}{2} \quad (10)$$

其中, f_r 是动目标多普勒频率, θ 是目标斜视角, v 是载机速度。由于载机飞行速度的测量精度较高, 目标径向速度估计精度主要取决于多普勒频率估计精度和斜视角估计精度。多普勒频率估计精度等于频率分辨率, 根据系统设计, 在几赫兹~几十赫兹之间。根据上一节分析, 斜视角估计精度主要由目标 SCR 决定。

在中、高脉冲重复频率(pulse repeat frequency, prf)系统中, f_r 小于 prf, 动目标径向速度不会产生模糊。在低 prf 系统中, f_r 以 prf 为周期折叠, 折叠倍数 $m = \text{round}(f_r / \text{prf})$, $\text{round}(\ast)$ 表示四舍五入取整。只有确定 m 才能求出目标的多普勒频率和真实的径向速度。

在广域监视模式下, 波束具有较大的斜视角, 因此, 杂波的多普勒中心频率以 prf 为周期折叠, 折叠倍数为: $n = \text{round}(f_{cr} / \text{prf})$, 其中, f_{cr} 是杂波多普勒中心频率, 根据多普勒中心频率估计算法以及图 2 中的几何关系, 可求得 f_{cr} 和 n 。在杂波多普勒中心频率移到零频后, 由载机运动产生的运动目标多普勒频率折叠倍数与杂波折叠倍数相等。此外, 根据可检测地面目标运动范围, 由目标运动引起的多普勒频移在 $(-\text{prf}/2, \text{prf}/2)$ 内。因此, 动目标多普勒频率的折叠倍数 m 等于 $n-1, n, n+1$ 中某个值。根据不同的 m , 可分别求出对应的动目标多普勒频率和径向速度。

相邻目标径向速度之间相差了周期速度，周期速度 $v_{rT} = \lambda \cdot \text{prf} / 2$ 。在连续两次扫描帧内，相差周期速度的目标运动位移相差 $L_T = v_{rT} \cdot T$ ， T 是扫描周期， L_T 至少在几十到几百米之间，因此根据连续扫描帧相关结果能够确定真实的目标径向速度，在下一节中将结合数据给出进一步的分析。根据多次扫描的检测结果，采用 Kalman 滤波器等描绘目标的运动轨迹，同时修正目标的运动参数。

4 实验结果

下面分别采用计算机仿真数据和实际飞行数据对本文方法进行验证。

4.1 计算机仿真结果

仿真 X 波段数据，天线全孔径长度为 0.85 m，等分成两个子孔径，其中一个子孔径发射，两个子孔径同时接收。仿真的系统参数如表 1 所示。

仿真了 4 个动目标，参数设置如表 2 所示。

接收回波数据后，首先进行通道一致性校正，然后进行高分辨率 DBS 成像，如图 4 所示。

由图可见，两个动目标完全淹没中杂波中，另外两个动目标在杂波谱之外。采用本文方法进行动目标检测，结果如图 5 所示，4 个目标全部检测到。

对两路 DBS 复图像进行干涉处理，取出目标所

在距离-多普勒单元的干涉相位进行平均，求出目标斜视角和径向速度。根据系统参数，速度周期为 27.58 m/s，参数估计结果见表 3。

表 1 系统参数

参数	数值
波长	0.03125 m
载机速度	170 m/s
prf	1765 Hz
发射信号带宽	25 MHz
驻留脉冲数	512
步进角度	2.4°
扫描角度范围	-45°~45°

表 2 目标参数

目标	斜视角(°)	径向速度(m/s)	目标斜距(m)	SCR(dB)	SNR(dB)
T1	-40.61	-3.42	39251.03	-0.2562	22.87
T2	-39.61	6.78	39255.02	-0.2562	22.87
T3	-40.62	-11.01	39251.91	-0.2555	22.46
T4	-39.60	10.40	39264.03	-0.2555	22.46

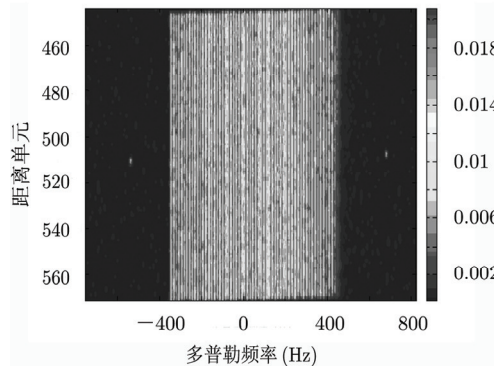


图 4 DBS 图像

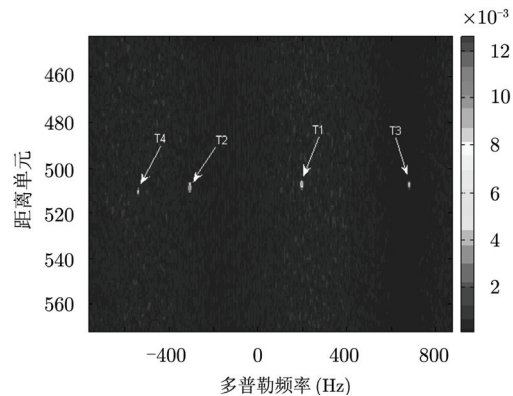


图 5 动目标检测结果

为了确定动目标的真实速度，仿真了两次扫描过程。根据第 1 次扫描检测结果求得目标斜距，然后根据目标参数及两次扫描间的系统相关性计算第 2 次扫描时目标斜距；然后对第 2 次扫描进行动目标检测，求得第 2 次扫描时的动目标斜距，如表 4 所示。根据动目标斜距的估计值和检测值，确定目标真实的径向速度。

从参数估计结果看，位于杂波之外的目标 T3 和目标 T4，参数估计精度较高，接近目标实际速度。

表 3 目标参数估计结果

目标	斜视角估计值(°)	模糊速度估计值(m/s)
T1	-40.41	24.63/-2.95/-30.53
T2	-38.96	35.83/8.25/-19.32
T3	-40.63	16.53/-11.04/-38.62
T4	-39.69	37.77/10.19/-17.39

表 4 目标参数估计结果

目标	第 1 次扫描斜距	第 2 次扫描斜距	第 2 次扫描斜距	目标真实速度
	检测值 (m)	估计值 (m)	检测值 (m)	估计值 (m/s)
T1	39250.82	39489.11/39438.10/39390.12	39438.30	-2.95
T2	39255.71	39504.82/39456.83/39408.81	39457.21	8.25
T3	39250.53	39472.61/39424.61/39376.63	39424.03	-11.04
T4	39265.13	39520.54/39472.53/39424.52	39472.01	10.19

目标 T1 和目标 T2 淹没在杂波中，干涉相位受杂波影响严重，导致干涉相位误差较大，参数估计误差大。根据 3.1 节中的分析，要提高参数估计精度，可通过在系统设计时，综合各方面的指标，通过提高杂波分辨率来提高 SCR，通过提高系统增益来提高目标的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)，以提高目标的参数估计精度。

4.2 实际飞行结果

采用本文方法对实际飞行数据进行了处理。部分系统参数为：X 波段，载机速度 181 m/s， $\text{prf}=1800$ Hz，发射信号带宽 25 MHz，波束中心斜视角 -1° ，收发等效波束宽度 4.6° ，驻留脉冲数 512。

首先对回波数据进行通道一致性校正，然后进

行 DBS 成像，得到图 6。对两路数据干涉处理，并对干涉相位进行直线拟合，得到相位补偿函数，对第 2 路回波进行相位补偿，补偿后两路信号相减，得到杂波抑制后的残差子图像，然后进行动目标检测，检测到 5 个目标，标注在残差子图像上，结果如图 7。

根据检测结果求得目标斜视角、斜距以及模糊径向速度，然后根据再次扫描检测和参数估计结果解速度模糊，求得目标真实的径向速度，如表 5 所示。由于所检测目标并非配合目标，无法对参数估计值进行实际比对，但是根据连续两次扫描结果以及上一节中仿真结果能够验证本文方法的有效性。

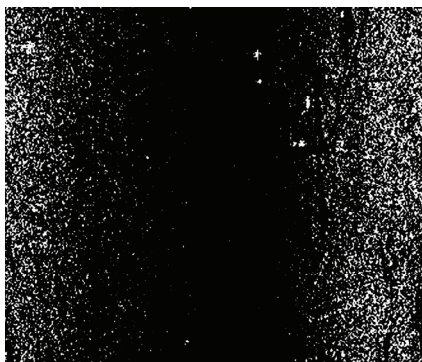


图 6 DBS 图像

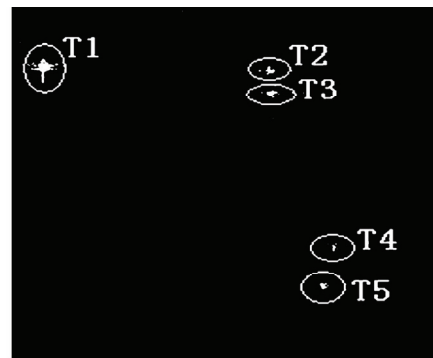


图 7 杂波抑制和动目标检测结果

表 5 目标参数估计结果

目标	斜视角 ($^\circ$)	径向速度 (m/s)	斜距 (m)
T1	0.50	3.79	35599.1
T2	0.94	-7.50	35534.2
T3	0.84	-7.35	35574.7
T4	-1.40	2.10	35856.5
T5	-2.10	3.61	35923.7

5 结束语

在现有的雷达系统中多采用 3 个或以上的接收通道，检测算法也是基于多通道系统。但是多个通

道系统成本高，在广域扫描模式下算法复杂，实时处理不易实现。本文提出了一种适用于双通道广域监视雷达系统的基于多普勒波束锐化(DBS)图像的地面动目标检测、定位和测速方法，该算法能够有效抑制杂波，检测动目标，估计动目标位置和速度。本文针对广域监视系统特有的参数模糊问题进行了详细分析，给出了解模糊的方法，获得了目标真实的位置和速度。通过理论分析和仿真及实测数据验证，证明该方法能够有效的完成动目标检测和参数估计的功能。动目标参数估计时，由于受到杂波的影响，估计精度较低；如何消除杂波的影响以提高参数估计精度，是本文后续工作的重点内容之一。

参 考 文 献

- [1] Entzminger John N Jr, Fowler C A, and Kenneally W J. JointSTARS and GMTI: past, present and future[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(2): 748-761.
- [2] Cerutti-Maori D, Jklare J, Brenner A R, *et al.* Wide-area traffic monitoring with the SAR/GMTI system PAMIR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3019-3030.
- [3] Cerutti-Maori D, Gierull C H, and Ender J H G. Experimental verification of SAR-GMTI improvement through antenna switching[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2066-2075.
- [4] Wilden H and Brenner A R. The SAR/GMTI airborne radar PAMIR: technology and performance[C]. IEEE MIT-S, Anaheim, California, May 23-28, 2010: 534-537.
- [5] 邓海涛, 张长耀. 一种机载三通道GMTI实时信号处理方法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(2): 370-373.
- Deng Hai-tao and Zhang Chang-yao. A real-time signal processing method for air-born three-channels GMTI[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(2): 370-373.
- [6] 包敏, 郭睿, 李亚超, 等. 基于实测数据的广域三通道 SCANSAR-GMTI算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(9): 1963-1969.
- Bao Min, Guo Rui, Li Ya-chao, *et al.* SCANSAR-GMTI based on real three-channel data[J]. *System Engineering and Electronics*, 2011, 33(9): 1963-1969.
- [7] 危嵩. 机载合成孔径雷达动目标检测与成像研究[D]. [博士学位论文], 华中科技大学, 2005.
- Wei Song. Study on airborne SAR-GMTI and imaging[D]. [Ph.D. dissertation], University of HuaZhong Science and Technology, 2005.
- [8] 何友, 关键, 彭应宁, 等. 雷达自动检测与恒虚警率处理[M]. 第1版, 北京: 清华大学出版社, 1999: 32-48.
- He You, Guan Jian, Peng Ying-ning, *et al.* Radar Auto-Detecting and CFAR Processing[M]. Copy 1st, Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 1999: 32-48.
- [9] 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], 中国科学院电子学研究所, 2003.
- Zheng Ming-jie. Study on SAR-GMTI and imaging[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing: Institute of Electronics of Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [10] 李景文, 李春升, 周荫清. 三孔径INSAR动目标检测和成像[J]. *电子学报*, 1999, 27(6): 39-43.
- Li Jing-wen, Li Chun-sheng, and Zhou Yin-qing. Three-aperture INSAR moving target detecting and Imaging[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(6): 39-43.

作 者 简 介



郑明洁(1974-), 女, 2003年在中国科学院电子学研究所获得博士学位; 目前在中国科学院电子学研究所工作, 副研究员, 主要从事雷达动目标检测研究、合成孔径雷达系统设计与仿真分析, 曾发表论文多篇。

E-mail: zhengmj@mail.ie.ac.cn