

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802198

基于二维匹配优化成像的地面动目标检测方法

刘国光 胡学成 杜文韬
(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘要: 合成孔径雷达在对地面运动目标的高精度成像时,目标径向速度引起距离向走动、方位向速度引起散焦,导致目标的信噪比和检测概率下降。采用距离走动校正滤波器组和方位匹配滤波器组级联的方法对多通道杂波抑制后的数据进行二维匹配优化成像,降低剩余杂波的功率同时提高动目标的聚焦效果;进一步在各滤波器成像后使用自适应门限进行恒虚警检测,并对输出的多个检测结果进行判断与融合。仿真与实测数据的处理结果表明了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达;地面动目标成像;滤波器组;恒虚警检测

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.51070

Ground moving target detection method based on optimized imaging by two-dimensional matching

Liu Guoguang Hu Xuecheng Du Wentao
(Nanjing Research Institute of Electronics Technology (NRIET), Nanjing 210039, China)

Abstract: When synthetic aperture radar (SAR) imagines a moving target with high accuracy, the radial velocity of the target causes the range migration and the azimuth velocity causes the azimuth defocus, which will lead to the decrease of the signal-to-noise ratio and detection probability of the target. In this paper, a method of the series connection of range migration correction filter bank and azimuth matched filter bank is proposed to optimize the two-dimensional matching imaging of the multi-channel clutter suppressed data, which can reduce the residual clutter power and improve the focusing effect of moving targets. Then the CFAR detection is performed using adaptive threshold after each filter is imaged, and the output of multiple test results can be judged and fused. The results of simulation and measured data processing demonstrate the effectiveness of the method.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR); ground moving target imaging (GMTIm); filter bank; constant false-alarm rate (CFAR)

0 引言

多通道合成孔径雷达地面动目标指示 (synthetic aperture radar-ground moving target indication, SAR-GMTD) 系统能够在对目标区域进行成像的同时实现对地面动目标的检测和定位,已经应用在军事侦查和交通监视等领域中。相比单通道 SAR-GMTI 系统,多通道 SAR-GMTI 系统能利用各个通道间信息,有效地抑制杂波并保留动目标信息,同时为动目标的测速定位提供更多的自由度^[1]。目前,多通道 SAR 系统常用的动目标检测方法主要包括偏置相位中心天线 (displaced phase center antenna, DPCA) 技术^[2]、沿航迹干涉 (along-track interferometry, ATI) 技术^[3] 以及空时自适应处理 (space-time adaptive processing, STAP) 技术等。其中 STAP 技术同时结合了

接收波束成形和目标多普勒滤波,具有更多的空时自由度,而且对机载雷达平台运动效应不敏感,能获得相对较理想的杂波抑制性能^[4]。

由于各种因素的影响,杂波抑制后场景中的静止杂波并不会被完全消除,这会引起动目标检测出现虚警和漏警。为提高动目标检测能力^[5],就必须要对动目标进行良好聚焦,使之凸显出来。本文在后多普勒域进行杂波抑制^[6],然后对杂波抑制后的结果进行再处理,目的是对每个动目标进行精确聚焦同时降低剩余杂波的功率,从而提高动目标的信杂噪比和检测性能。针对快速运动目标会在距离向上产生距离走动、方位向产生散焦现象,本文提出了一种由多普勒模糊补偿滤波器组和方位匹配滤波器组级联的方法对所有动目标先进行二维匹配优化成像,再经过恒虚警 (constant false-alarm rate, CFAR) 检测,对多个检测结

果进行判断与融合,以达到抑制剩余杂波提高动目标检测性能的目的。

本文所提出的算法有以下两点优势:1)不同于传统方法在图像域进行空时自适应处理,本文是在数据多普勒域进行的 STAP,无须进行多通道时间校准,因此不需要满足天线间距的 DPCA 条件^[7],而且该方法对各通道天线孔径长度没有统一性要求,对系统适应性更强^[8];2)传统动目标重聚焦方法(如 Radon 变换法求多普勒模糊数^[9]、WVD(Wigner-Ville distribution)变换法估计调频率^[10])中需要把每个动目标所在距离单元提取出来单独分析然后对每个动目标作不同参数的处理,而本文方法是对所有动目标进行统一成像然后检测,避免了对每个动目标运动参数的估计,精简了处理步骤。

1 距离-方位二维匹配成像

1.1 动目标回波信号模型

以机载三通道 SAR-GMTI 系统为例,如图 1 所示,三通道天线沿航迹均匀排列,信号收发采用全孔径发射、三子孔径同时接收模式, A_1 、 A_2 、 A_3 为等效相位中心,相位中心间距为 d 。图 2 所示为 SAR-GMTI 系统与动目标的几何关系。雷达平台载机速度 V_a 沿 x 轴正方向,飞行高度 h ,雷达工作在正侧视模式。初始时刻 $\eta=0$ 时,雷达平台处于 $A(0,0,h)$ 点,运动目标 T 在 $P_0(x_0, y_0)$ 点,雷达与目标距离为 $R(0)$ 。动目标速度为 (V_x, V_y) , V_x 为方位向速度, V_y 为距离向速度(地距)。在 $\eta = x_0/(V_a - V_x)$ 时刻,雷达运动至 B 处,目标运动至 P_η 处。

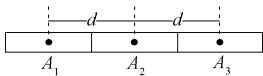


图 1 三通道天线位置

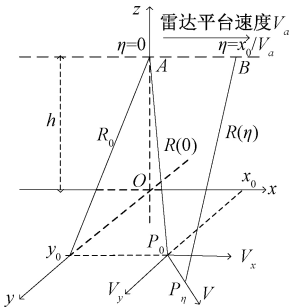


图 2 SAR-GMTI 系统与动目标的几何关系

雷达发射信号为:

$$s(\tau) = \omega_r(\tau) \exp(j2\pi f_c \tau + j\pi \gamma \tau^2) \quad (1)$$

根据等效相位中心原理,第 i ($i = 1, 2, 3$) 个通道的回波信号模型为:

$$S_i(\tau, \eta) = \sigma_i \omega_r \left[\tau - \frac{2R_i(\eta)}{c} \right] \omega_a(\eta) \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi R_i(\eta)}{\lambda} \right] \cdot \exp \left\{ j\pi \gamma \left[\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right]^2 \right\} \quad (2)$$

式中: c 为光速; λ 为波长; f_c 为发射信号的中心频率; γ 为 LFM 信号的调频率; τ 和 η 分别为快时间和慢时间; $\omega_r(\cdot)$ 为距离窗函数; $\omega_a(\cdot)$ 为方位窗函数; σ_i 为反射系数; $R_i(\eta)$ 为瞬时斜距。

$$R_i(\eta) = \sqrt{(x_0 - d_i + V_x \eta - V_a \eta)^2 + (y_0 + V_y \eta)^2 + h^2} \quad (3)$$

式中: d_i 是各通道天线孔径等效相位中心间距。在方位时间 $\eta = \eta_0 = (x_0 - d_i)/(V_a - V_x)$ 时,天线波束中心线经过动目标 T 。将 $R_i(\eta)$ 在 $\eta = \eta_0$ 处进行泰勒展开并取近似可得:

$$R_i(\eta) = R_0 + C_1(\eta - \eta_0) + C_2(\eta - \eta_0)^2/2 \quad (4)$$

$$\text{其中 } R_0 = \sqrt{y_0^2 + h^2}, C_1 = \frac{V_y y_0}{R_0}, C_2 \approx \frac{(V_a - V_x)^2 + V_y^2}{R_0}$$

这里用地距速度 V_y 表示,而径向速度 $V_r \approx V_y y_0/R_0 = C_1$ 。由此可得到动目标的多普勒中心频率 f_{dc} 和多普勒调频率 K_a 。

$$f_{dc} = -\frac{2V_y y_0}{\lambda R_0} = -\frac{2V_r}{\lambda} \quad (5)$$

$$K_a = \frac{-2[(V_a - V_x)^2 + V_y^2]}{\lambda R_0} \quad (6)$$

对于非合作运动目标,由于运动参数未知,利用静止场景参数成像,得到的图像必然会产生方位向位置偏移、散焦、距离走动等现象^[9]。

1.2 距离向匹配

回波信号经距离脉冲压缩之后,可得:

$$S_i(\tau, \eta) = A \sigma_i p_r \left(\tau - \frac{2R_i(\eta)}{c} \right) \cdot$$

$$\omega_a(\eta - \eta_0) \exp \left[-j \frac{4\pi R_i(\eta)}{\lambda} \right] \quad (7)$$

式中: $p_r(\cdot)$ 为距离压缩后的脉冲包络; A 为脉冲压缩带来的复常量。将回波变换到距离频域,可得:

$$S_i(f_r, \eta) = A \cdot \sigma_i \omega_r(f_r) \omega_a(\eta - \eta_0) \cdot$$

$$\exp \left[-j \frac{4\pi R_i(\eta)}{c} (f_r + f_c) \right] \quad (8)$$

信号随慢时间变化的相位可表示为:

$$\phi(f_r, \eta) = -4\pi \frac{f_r + f_c}{c} \left[C_1(\eta - \eta_0) + \frac{C_2(\eta - \eta_0)^2}{2} \right] = \varphi_1(f_r, \eta) + \varphi_2(f_r, \eta) \quad (9)$$

式中: $\varphi_1(f_r, \eta)$, $\varphi_2(f_r, \eta)$ 分别为 1 次和 2 次相位项。将式(5)中的目标运动引起的多普勒偏移项改写为:

$$f_{dc} = -\frac{2V_y y_0}{\lambda R_0} = -\frac{2V_r}{\lambda} = f_{dc0} + M \cdot PRF \quad (10)$$

即动目标的多普勒偏移分为基带多普勒中心和模糊多普勒分量。其中 f_{dc0} 为基带多普勒中心, M 是 PRF 模糊

数。正侧视模式下,距离弯曲可忽略,考虑一次相位项引起的距离走动。

$$\varphi_1(f_r, \eta) = 2\pi \frac{f_r + f_c}{f_r} (f_{d0} + M \cdot PRF) \eta = 2\pi \frac{f_r + f_c}{f_r} f_{d0} \eta + 2\pi \frac{f_r}{f_c} \cdot M \cdot PRF \cdot \eta + 2\pi \cdot M \cdot PRF \cdot \eta \quad (11)$$

根据雷达工作模式, $PRF \cdot \eta$ 为整数。

$$\varphi_1(f_r, \eta) = 2\pi \frac{f_r + f_c}{f_r} f_{d0} \eta + 2\pi \frac{f_r}{f_c} \cdot M \cdot PRF \cdot \eta \quad (12)$$

式中:距离向频率 f_r 和方位时间 η 的耦合代表了动目标的线性距离走动。为校正距离走动,本文采用 Keystone 变换法,即定义一个新的方位时间 ζ ,它与 η 的关系如下:

$$\eta = \frac{f_r + f_c}{f_r} \zeta \quad (13)$$

则有:

$$\varphi_1(f_r, \zeta) = 2\pi f_{d0} \zeta + 2\pi \frac{f_r + f_c}{f_r} M \cdot PRF \cdot \zeta \quad (14)$$

由式(14)可知,目标在 Keystone 变换后基带多普勒中心对应的走动分量得到补偿,对于较小径向速度的目标,距离走动已被校正。而对于大径向速度目标,仍然有 M 倍 PRF 模糊对应的距离走动分量剩余。对此,本文利用滤波器组对所有动目标进行统一处理。滤波器组的传递函数为:

$$H(f_r, \zeta; M) = \exp\left(-j2\pi M \cdot PRF \cdot \frac{f_r + f_c}{f_r} \zeta\right) \quad (15)$$

其中 $M \in [-M', M']$, M' 是需要设置的最大模糊数。

$$M' = \text{ceil}\left(\frac{2 \cdot \max(|V_r|)}{\lambda} / PRF - \frac{1}{2}\right) \quad (16)$$

其中 ceil 和 \max 分别表示向上取整和取最大值^[11]。

对于 PRF 模糊次数为 M_{amb} 的信号通过滤波器组后,且在仅在 $H(f_r, \zeta; M = M_{amb})$ 滤波通道得到距离向的完全匹配,距离走动得到完全校正,该目标信号位于同一个距离频率单元。而在其他通道走动则无法校正,导致目标只有部分脉冲参与相关积累,方位压缩处理后输出的峰值会明显降低。对成像后该动目标所在区域的峰值取最大值可得到正确的模糊次数。

1.3 方位向匹配

信号在对应通道将距离走动完全校正以后变回到距离时域,信号可表示为:

$$S_r(\tau, \zeta) = A \cdot \sigma_r p_r(\tau - 2R_0/c) \cdot \exp(-j4\pi f_r R_0/c) \cdot W_a(\zeta) \exp(j2\pi f_{d0} \zeta) \cdot \exp(j\pi K_a \zeta^2) \quad (17)$$

式中: $W_a(\cdot)$ 是以 ζ 为变量的方位窗函数; K_a 为式(6)表示的动目标的调频率,由于 $(V_a - V_x)^2 \gg V_y^2$, 故有式(18)成立。

$$K_a \approx -2(V_a - V_x)^2 / \lambda R_0 \quad (18)$$

由式(17)可以看出,信号是关于 ζ 的线性调频信号。为了对多个非合作目标同时进行方位向聚焦,本文采用含多个方位向匹配函数的滤波器组来匹配各个动目标不同的方位向速度。该滤波器组的方位频域传递函数为:

$$H_a(f_a, N) = \exp\left[-j\pi \frac{f_a^2}{-2(V_a - N \cdot \Delta V_x)^2 / \lambda R_0}\right] \quad (19)$$

其中 $N \in [-N', N']$, N' 是设置的对应最大方位向速度的通道序号。

$$N' = \text{ceil}(\max(|V_x|) / \Delta V_x) \quad (20)$$

式中: ΔV_x 是设置的速度步长,它的取值越小,方位向速度估计越精确。由方位向速度估计误差导致的散焦分析如下。

设目标真实方位向速度为 V_x , 目标在第 N 个滤波通道输出最大的幅值,即目标方位向速度的估计值为:

$$\hat{V}_x = N \cdot \Delta V_x \quad (21)$$

\hat{V}_x 与 V_x 最大误差为 $\Delta V_x / 2$ 。定义调频率失配系数为:

$$\rho = \frac{(V_a - V_x)^2 - (V_a - \hat{V}_x)^2}{(V_a - V_x)^2} \quad (22)$$

最大调频率失配系数为:

$$\rho_m = \frac{(V_a - V_x)^2 - (V_a - V_x - \Delta V_x / 2)^2}{(V_a - V_x)^2} \quad (23)$$

实际处理中,要根据系统所允许的最大失配系数来设置速度搜索步长。

方位频域信号通过方位匹配滤波器组后,将方位压缩后的信号作快速傅里叶逆变换(IFFT)变到图像域。在所成多幅图像中,每个动目标会在与它方位向速度最匹配的滤波器输出最大的峰值,可将该滤波器对应的速度作为动目标的方位向速度估计值。在该滤波器的输出中动目标完成距离-方位二维匹配精确成像。

1.4 点目标成像仿真

通过仿真实验对上述动目标二维匹配成像算法进行验证,仿真设置雷达工作在正侧视模式,主要参数如表 1 所示。设置两个点目标,其一为用于对照的静止目标,置于(9 900, 0)处,另一个是径向速度 $V_r = 20$ m/s、方位向速度 $V_x = 20$ m/s 动目标,置于(10 000, 0)处。仿真设置最大 PRF 模糊次数 $M' = 2$, 方位向速度步长为 4 m/s。

图 3(a)所示为用静止参数对两目标所成的图像,可见静止目标被聚焦良好,而动目标在距离向呈现出跨越多个距离单元的走动,方位向出现散焦和偏移。下面主要对动目标处理。图 3(b)所示为距离压缩后的图像,可见动目标由于距离走动而呈现出一条斜线。

首先对动目标进行距离走动校正,图 3(c)所示为 Keystone 变换后的结果,图 3(d)和(e)所示为 PRF 模糊次数为 -1、-2 的滤波通道输出的结果,可见 Keystone 变换校正了一部分距离走动,而只有滤波通道($M = -1$)的输出

表1 系统参数

参数	说明	参数值
V_a	平台速度/($m \cdot s^{-1}$)	115
R_0	场景中心斜距/km	10
λ	波长/m	0.033 9
B	带宽/MHz	40
f_s	距离采样率/MHz	60
T_p	脉冲宽度/ μs	10
D	天线孔径/m	0.551
PRF	脉冲重复频率/Hz	1 000
B_a	多普勒带宽/Hz	417.26
K_a	方位向调频率/($Hz \cdot s^{-1}$)	-74.910 3

结果中距离走动被完全校正,即该目标的真实多普勒中心PRF模糊数为-1。

然后进行方位压缩,用模糊数为-1的滤波通道的输出通过方位匹配滤波器组。图3(f)~(h)所示为选取的其中3个滤波器的成像结果,分别对应方位向速度估计值为16、20、24 m/s。可以看出($V_x = 20$ m/s)对应滤波器的输出中动目标得到了良好的聚焦,相邻两滤波器均有方位向的散焦。

图4所示为方位匹配滤波器组输出峰值,可以看出在对应20 m/s的滤波通道图像峰值与用静止参数成像对比提高15 dB,说明该成像算法能有效地提高动目标的聚焦成像效果。

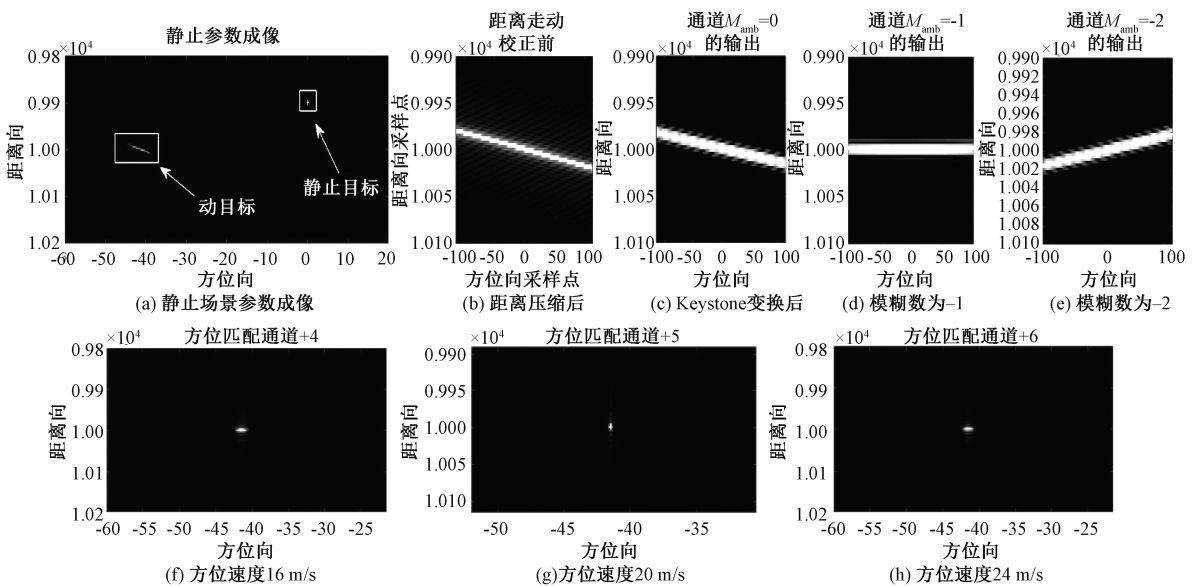


图3 动目标二维匹配成像仿真输出结果

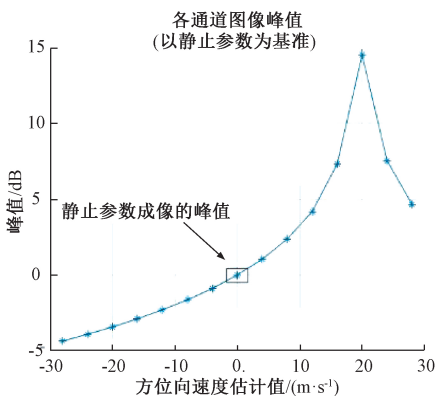


图4 方位匹配滤波器组输出峰值

2 基于二维匹配成像的动目标检测方法

2.1 动目标检测方法的处理流程

基于距离-方位二维匹配优化成像的地面动目标检测

方法的处理流程如图5所示。

首先对三通道的回波数据预处理,先距离压缩同时校正斜视引起的距离走动,再作通道均衡处理^[12],消除各通道间的幅相误差。然后变换到数据多普勒域进行STAP处理抑制场景杂波,协方差矩阵估计后经过最优加权在空域波束成形,得到杂波抑制后的合成数据。此时大部分场景静止杂波已被消除,接下来要对合成数据进行再处理,即对合成数据中的动目标信号进行距离-方位二维匹配优化成像,同时剩余杂波也能得到抑制。

先进行距离向匹配,将数据通过含多重PRF模糊次数的滤波器组,校正目标由径向速度引起的距离走动;再进行方位向匹配,将上一级的输出通过由多个方位向匹配函数构成的滤波器组,完成方位聚焦成像。对于每个动目标都存在某一滤波器与之二维匹配,在对应的滤波器它的信噪比得到显著提高。接着对滤波器组的所有输出进行自适应门限的恒虚警检测,最后对多个检测结果进行判别和融合。

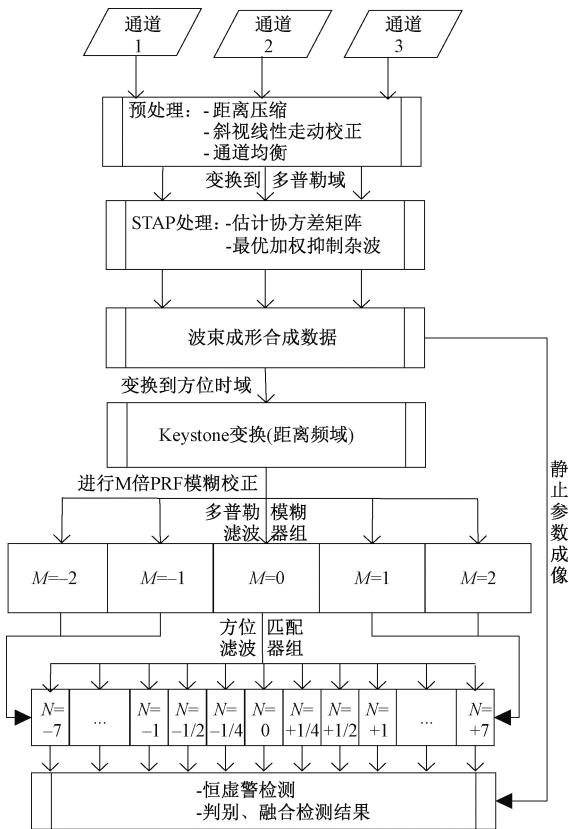


图 5 动目标成像与检测流程

2.2 滤波器组参数设置

首先设置距离向匹配滤波器组的参数。实际中,民用和军事的地面目标距离向速度(地距)都在(-30 m/s, 30 m/s)范围内,本文机载雷达的脉冲重复频率为 1 000 Hz,代入到式(16)可得最大 PRF 模糊次数 $M' = 2$,故设置模糊数 $M = (-2, -1, 0, 1, 2)$ 5 个滤波器补偿距离走动。

然后考虑方位匹配滤波器组的参数设置。本文设置最大方位向速度估计为 28 m/s,基本步长为 4 m/s。针对小于 4 m/s 的低速目标,为增强它与静止目标的区分度,提升低速目标的检测能力,本文设置了 0.1、2 m/s 的滤波器。即设置对应方位向估计速度为(0, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28) m/s 的滤波器组,反方向速度同理,共设置 19 个方位匹配滤波器。

最大方位向速度估计误差为 2 m/s。由式(23)计算得出,在(-28, 28) m/s 区间内的方位向速度,目标的最大调频率失配系数 ρ_m 在(2.5%, 4.5%)。如图 6 所示,可以看出对于 28 m/s 的动目标,2 m/s 的估计误差会让图像峰值下降 4 dB 左右,即散焦后的峰值为完全聚焦时的 0.63 倍,其他 V_x 对应的最大调频率失配均小于这个值。因此 4 m/s 的步长设置带来的峰值损失在可接受的范围内。若想得到更好的估计精度和成像聚焦效果,可适当缩小步长。

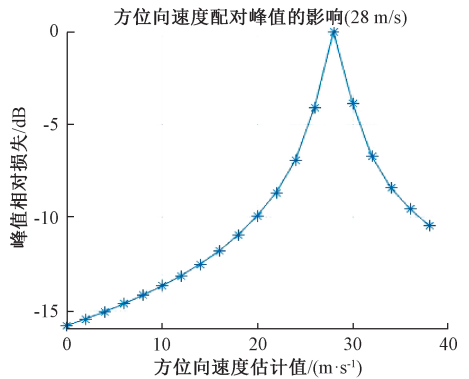


图 6 最大调频率失配引起的图像峰值损失

2.3 恒虚警检测与判别方案

由于地杂波背景的复杂性和随机性,使用固定门限检测,往往产生较多的虚假目标^[13]。为降低虚警概率,本文采用一种局部威布尔双参数估计的 CFAR 自适应门限设置^[14],处理过程如图 7 所示。该方案无需知道背景杂波的统计模型,能够适应不同场景。且该方法能根据局部区域内杂波剩余来设置自适应门限,能有效降低虚警概率,提高检测性能。

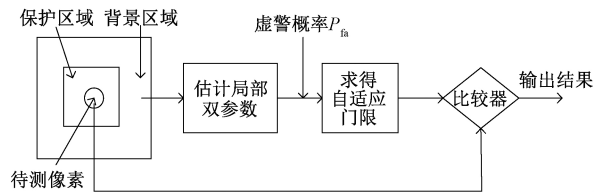


图 7 CFAR 检测过程

通过距离-方位二维匹配成像,信杂噪比得到很大提高,因此绝大部分滤波器的 CFAR 结果可以认为是动目标。但是实际场景中可能有静止的强散射体未被抑制充分,在低速滤波通道尤其是($M=0, N=0$)滤波器仍然可以被检出。所以需要对($M=0, N=0$)滤波通道的检测出的每个目标作判别,筛选出动目标,剔除可能的虚假目标。

目标筛选流程如图 8 所示。第 1 步是筛选出 $V_x \neq 0$ 的动目标。对于每个检出的目标,若存在($M=0, N \neq 0$)滤波器的输出峰值大于其在($M=0, N=0$)下的值,则判断该目标为动目标,其余则是 $V_x \approx 0$ 的未判别目标。第 2 步要接着筛选出 $V_r \neq 0$ 的动目标。本文设置了一个零处理对照组,是将杂波抑制后的数据直接用静止调频率成像。将($M=0, N=0$)滤波通道和在对照组中的 CFAR 检测结果幅度相减取绝对值,静止杂波经 Keystone 变换幅度不发生变化,相减之后被对消,而动目标会被校正一部分走动,目标区域距离向幅度会发生变化,所以不会被消除。对于低速目标,若 $|V_r T_s| / \rho_r < 0.5$ (T_s, ρ_r 分别为合成孔径时间和距离单元长度)^[15],即走动不超过半个距离单元,与静止杂波几乎没有区别,则相减之后也会被对消。代入实测

参数得到理论上能检测到的最小地距速度 $V_y = 0.276 \text{ m/s}$ 。因此,对消后留下的可判定为动目标,消除的目标则有可能是虚假目标或是速度很小的目标。鉴于虚警一般会带

来较大的代价,且不可能被完全消除,所以只能尽可能地排除疑似的虚假目标。于是下一步要将判定的疑似虚假目标从各个检测结果中(如果有)剔除。

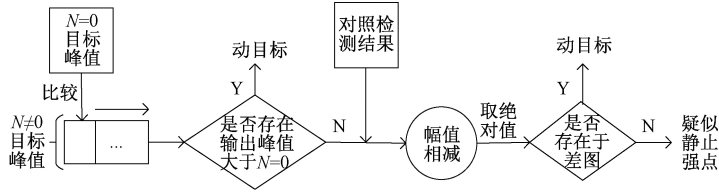


图8 目标筛选流程

最后把多个滤波器检测出的同一位置附近的动目标进行幅度加权聚心处理,完成多个检测结果的融合。后续可利用相关函数法等估计出基带多普勒中心^[15],就可以将动目标标记到正确的位置。至此,地面动目标的指示完成。

2.4 实测数据处理结果

实测数据为某所录取的机载条带3通道SAR-GMTI数据,载机高度5 km,雷达采用全孔径发射、子孔径接收的方式,工作在小斜视角模式下,斜视角 $\theta = 2.13^\circ$,虚警概率 $P_{fa} = 10^{-5}$ 。其他参数与表1所示的仿真参数一致。

图9(a)所示为用静止场景参数对一个通道数据所成图像中的一个区域,从图中无法分辨出动目标;图9(b)所示为某一通道数据经预处理后的距离多普勒域图像;图9(c)所示为将三通道数据经STAP处理、波束成形后的合成数据的图像,与图9(b)对比可见,STAP抑制了大部分的场景杂波;图9(d)所示为距离走动校正前、Keystone变换后、滤波器 $M = \pm 1$ 输出的部分图像,从图中可以观察到两个疑似动目标分别在滤波通道-1、0距离走动得到校正;图9(e)所示为 $(M = -1, N = 5)$ 滤波通道的输出图像,杂波轮廓仍可见,幅度比较均匀,动目标被凸显出来,其中右边的动目标得到了良好聚焦。

图9(a)所示为用静止场景参数对一个通道数据所成

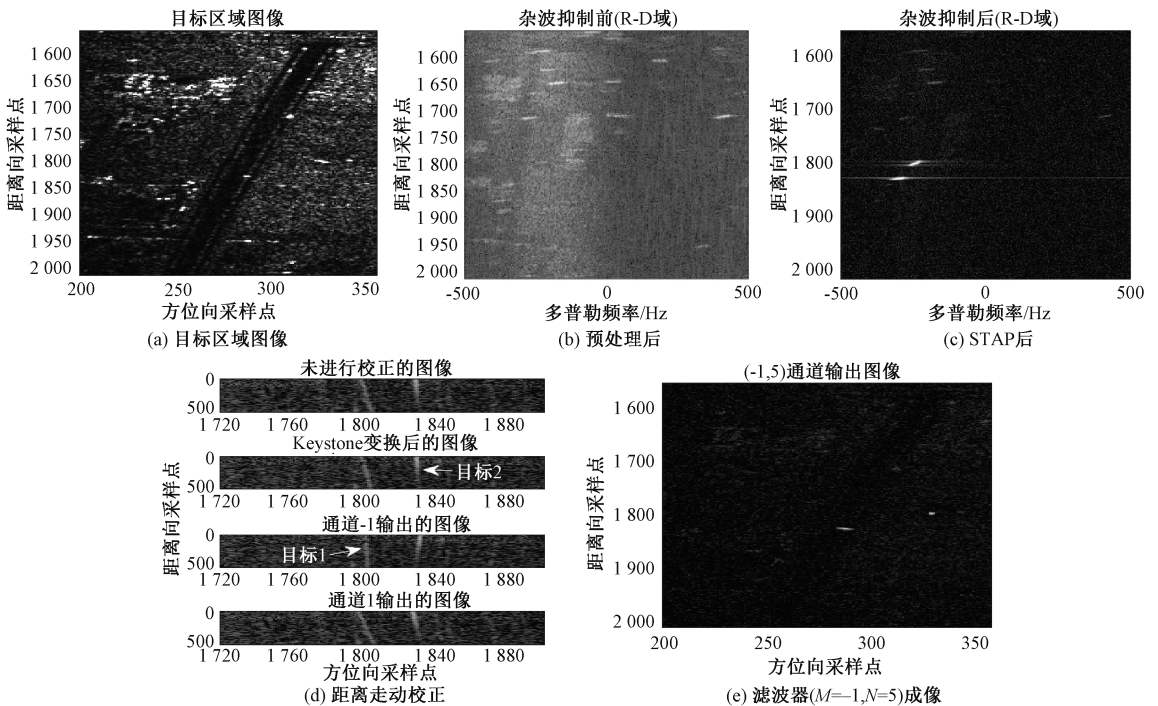


图9 二维匹配成像前后

图10所示为滤波器组输出的CFAR检测结果。首先要对图10(a)所示的 $(M=0, N=0)$ 滤波器检测结果进行判别以减少虚警目标。图10(b)所示为对照组检测结果,与图10(a)一样检测出了5个目标。用2.3节的判别方法对比后发现,下方两个目标分别在 $(N=5)$ 和 $(N=1)$ 滤波

通道的输出峰值远大于 $(N=0)$ 的峰值,判定为动目标。从图10(c)可看出,右上角3个目标在对照组和 $(M=0, N=0)$ 滤波通道检测结果幅度相减后的差图中消失,所以可能是虚假目标。

在将疑似虚假目标剔除之后,选其他滤波器的检测结

果来评估该检测方法的性能。图 10(d)所示为与图 9(e)对应的($M=-1, N=5$)滤波通道 CFAR 检测结果,可见检测出了两个动目标;图 10(e)所示为($M=1, N=4$)滤波通道的检测结果,可见该结果检测出了 3 个动目标,其中 1 个动目标在其他滤波通道中均未被检测出来,且在图 9(d)中

也没有发现该目标的轨迹,推测该目标为 RCS 较小的微弱动目标。综合图 10(d)、(e)的检测结果,两者均未出现图 10(b)所示的虚警,这说明本文基于二维匹配优化成像的动目标检测方法能够有效地降低虚警提高检测动目标的能力。

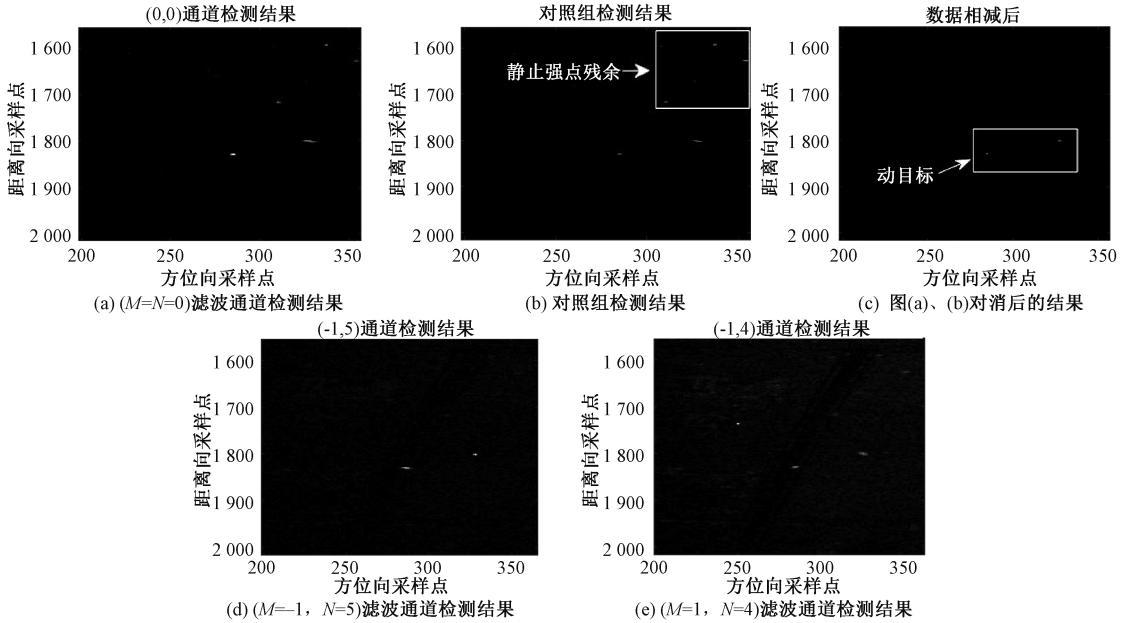


图 10 CFAR 检测结果

单独分析图 10(e)中检测出的微弱动目标,该动目标在对照组和($M=1, N=4$)滤波通道输出图像幅度的方位向剖面图如图 11(a)、(b)所示,可以看出若直接用静止参

数对合成数据进行方位压缩,成像之后该动目标被淹没在杂波之中,无法被检测出来。而经过距离-方位的二维匹配成像,微弱的动目标的幅度提升了 12 dB,而杂波幅度降低了 7 dB 左右,信杂噪比提高了近 20 dB,可见本文基于二维匹配优化成像的动目标检测方法能够有效抑制剩余杂波、显著提高对微弱动目标的检测能力。

3 结 论

本文研究了多通道 SAR-GMTI 系统地面运动目标高精度成像与检测问题。针对运动目标会在距离向上产生走动、方位向产生散焦现象,提出了一种由多普勒模糊补偿滤波器组和方位匹配滤波器组级联的方法,在 STAP 处理的基础上,对所有动目标进行距离-方位二维匹配优化成像,在经过自适应门限恒虚警检测后,对滤波器组输出的多个检测结果进行判断与融合,最终达到抑制剩余杂波提高动目标检测性能的目的。仿真与实测数据的处理结果表明本文提出的方法具有可行性。

参 考 文 献

[1] CERUTTI-MAORI D, SIKANETA I. A generalization of DPCA processing for multichannel SAR/GMTI radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51(1):560-572.
 [2] 李兆军, 娄晓光. 基于 DPCA 的双通道 SAR 动目标检

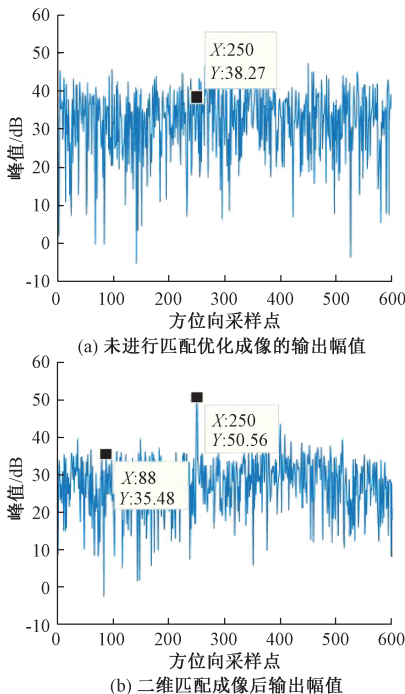


图 11 微弱动目标的图像幅度剖面图

- 测研究[J]. 电子测量技术, 2006, 29(3):4-5,14.
- [3] 郑春明, 沈汀, 冯宏川. 一种新的 ATI 动目标检测方法[J]. 电子测量技术, 2007, 30(8):20-25.
- [4] 庞礴. 多通道 SAR 成像理论与方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.
- [5] FIENUP J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2001, 37(3):794-809.
- [6] CERUTTI-MAORI D, SIKANETA I, GIERULL C H. Optimum SAR/GMTI processing and its application to the radar satellite RADARSAT-2 for traffic monitoring [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(10):3868-3881.
- [7] 吕孝雷, 齐飞林, 邢孟道, 等. 三通道 SAR-GMTI 地面快速目标检测[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(7):1581-1587.
- [8] 穆慧琳. 多通道 SAR 动目标检测方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
- [9] 钱江. SAR-GMTI 处理方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
- [10] 钱江, 苏军海, 李凉海, 等. 利用 KWT 进行动目标成像的三通道 SAR-GMTI 快速目标运动参数估计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7):1660-1667.
- [11] 张立峰. 动目标检测、成像与参数估计方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.
- [12] 张立峰, 王彤, 邢孟道, 等. 多通道 SAR-GMTI 通道均衡和动目标检测定位方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2009, 36(1):11-16,57.
- [13] 赵明波, 何峻, 付强. SAR 图像 CFAR 检测的快速算法综述[J]. 自动化学报, 2012, 38(12):1885-1895.
- [14] 王义敏, 安锦文, 王若朴. 基于局部双参数估计的 SAR 图像 CFAR 目标检测技术[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(4):50-52.
- [15] 武杰. SAR 地面动目标检测方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.

作者简介

刘国光, 硕士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理、SAR 地面动目标成像与检测等。

胡学成, 硕士生导师、研究员, 主要研究方向为机载雷达系统与信号处理。

杜文韬, 博士、工程师, 主要研究方向为空时自适应处理、合成孔径雷达地面动目标检测、火控雷达抗干扰等。

E-mail: liusuguoguang@qq.com