

文章编号: 1001- 2486(2010) 04- 0078- 06

基于子孔径图像的低频 SAR 多通道均衡方法*

周红¹, 娄军¹, 黄晓涛¹, 常玉林^{1,2}, 周智敏¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073;

2. 中国人民解放军总参谋部 61886 部队, 北京 100086)

摘要: 利用多通道 SAR 系统进行运动目标指示时, 通道间的幅相失配严重影响了运动目标检测以及参数估计的性能。针对多通道低频 SAR/GMTI 系统, 提出了一种基于子孔径 SAR 图像的多通道均衡方法。该方法利用相同视角的多通道子孔径图像, 估计该角度对应的幅相误差, 在达到较高幅相误差估计精度的同时, 也能适应误差随视角的变化。基于车载低频多通道 SAR/GMTI 实测数据的实验结果表明: 该方法能有效地补偿不同通道之间的幅相误差, 提高运动目标的检测和参数估计性能。

关键词: 合成孔径雷达; 子孔径图像; 通道均衡; 地面运动目标指示

中图分类号: TN959. 73; TN959. 1 文献标识码: A

Low Frequency SAR Multi-channel Equalization Method
Based on Subaperture ImageZHOU Hong¹, LOU Jun¹, HUANG Xiao-tao¹, CHANG Yu-lin^{1,2}, ZHOU Zhi-min¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. 61886 Unit of the PLA General Staff, Beijing 100086, China)

Abstract: When the multi-channel SAR system is used for moving target indication, the imbalance in amplitude and phase among channels severely affects the performance of moving target detection and parameter estimation. For multi-channel low frequency SAR/GMTI system, a multi-channel equalization method based on subaperture image was proposed. The method makes use of multi-channel subaperture images with the same view-angle, and estimates the amplitude and phase errors related to this view-angle at the same time. It can estimate the amplitude and phase errors accurately and adapts to the errors changing with the view-angle. The experiment based on vehicle-borne low frequency multi-channel SAR/GMTI real data demonstrates that this method can effectively compensate for the amplitude and phase errors among different channels and improve the performance of moving target detection.

Key words: SAR; subaperture image; channel equalization; ground moving target indication

工作于 UHF/VHF 波段的低频合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统具有穿透叶簇对地成像的能力。若在平台上沿航迹向装置多个低频 SAR 接收天线, 可使低频 SAR 同时具有地面运动目标指示(Ground Moving Target Indication, GMTI)功能, 从而可以对较大范围的裸露或叶簇覆盖的静止或运动目标进行侦察、监视及成像。

在实际应用中, 由于天线方向图和频率响应不一致、接收机噪声以及环境影响等因素, 各通道间的幅相失配即通道误差严重影响了运动目标检测和参数估计性能。因此基于多通道 SAR 系统进行 GMTI 之前, 需要进行通道误差校正, 即通道均衡。按误差估计源分, 通道误差校正包括有源校正和自校正两种^[1], 其中前者对辅助信源的位置、形态有较高的要求。相比较而言, 自校正方法的适应性更佳。文献[2]提出一种图像域的通道误差估计和自校正方法, 该方法通过成像处理将特定点(即作为训练数据估计误差的静止目标)“局域化”到一个分辨单元内, 信噪比提高, 从而便于更准确的估计幅相误差, 在实际中取得了较好效果。对于低频多通道 SAR 系统而言, 由于系统的波束角很大, 且幅相误差随方位角变

* 收稿日期: 2009- 09- 14

基金项目: 国家部委资助项目; 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET- 07- 0223)

作者简介: 周红(1982-), 女, 博士生。

化,直接基于全孔径图像估计和补偿幅相误差无法达到满意的效果。

为验证所提方法的作用,本文采用了相位中心偏置天线(Displaced Phase Centre Antenna, DPCA)^[3]结合顺轨干涉(Along Track Interferometry, ATI)^[4],图像域空时自适应处理(Space Time Adaptive Processing, STAP)^[2,5]这两种典型的图像域 GMTI 方法对实测数据进行处理。

1 基于子孔径图像的通道均衡方法

本文提出了基于子孔径图像的通道均衡方法,其处理流程如图 1 所示。

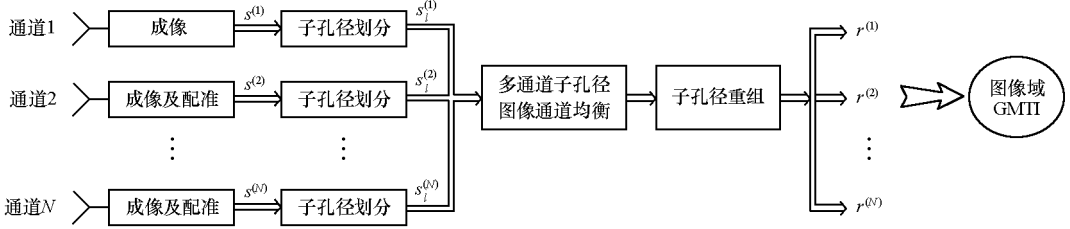


图 1 基于子孔径图像的通道均衡方法

Fig. 1 Channel equalization method based on subaperture image

1.1 子孔径图像的生成

设条带 SAR 场景中, 载机沿方位向以速度 v_a 运动, 高度是 h , 电磁波传播速度是 c , 系统载频是 f_c , 零时刻第 n ($n = 1, 2, \dots, N$) 部接收天线的方位位置是 $(n-1)d$ 。将各通道 SAR 图像 $s^{(n)}$ 在二维波数域($k_x - k_y$)按式(1)确定的支撑域(如图 2(a)阴影所示)进行划分:

$$\tan(\theta_l - \frac{\Delta\Theta}{2}) < \frac{k_x}{k_y + 4\pi f_c/c} < \tan(\theta_l + \frac{\Delta\Theta}{2}) \quad (1)$$

其中, θ_l ($l = 1, 2, \dots, L$) 称为视角, $\Delta\Theta$ 称为积累角。将划分后的利用该支撑域生成的子孔径图像记为 $s_l^{(n)}$, 对应的是雷达以 θ_l 为视角, 以 $\Delta\Theta$ 为积累角录取的回波频谱, 如图 2(b)阴影所示。

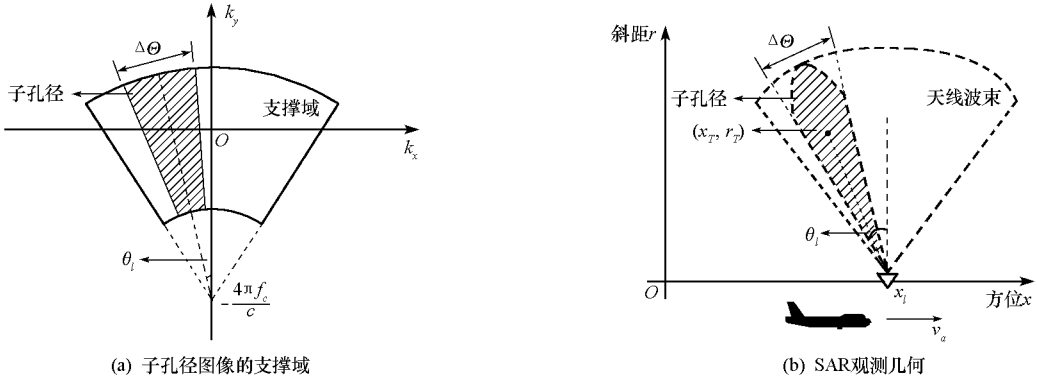


图 2 子孔径图像的支撑域及对应的 SAR 观测几何

Fig. 2 Support domain of subaperture image and the corresponding SAR observation geometry

子孔径图像的生成可通过对全孔径图像带通滤波实现, 滤波器的通带如式(1)定义。设视角 θ_l 对应的带通滤波器为 h_l , 将二维卷积运算表示为“ $*$ ”, 则子孔径图像 $s_l^{(n)}$ 由式(2)得到:

$$s_l^{(n)} = s^{(n)} * h_l \quad (2)$$

对斜距平面上位于 (x_T, r_T) 处的某静止目标而言, 雷达在这段积累时间内的中心位置是 $x_l = x_T - r_T \tan\theta_l$, 因此称 x_l 为子孔径的时域中心, 它是 (x_T, r_T) 的函数。不同目标在同一个子孔径内的支撑域相同, 但子孔径时域中心不同。由此可知: 通过在波数域划分子孔径, 能获得雷达以特定视角观测场景的成像结果即子孔径图像, 从而为通道误差估计提供了不同视角的训练数据。

1.2 基于子孔径图像的通道误差估计和均衡算法

该方法将杂波协方差阵的最大特征值对应的特征向量作为幅相误差的估计。通道 1 作为参考通

道, 设 $g_l^{(n)}$ (复数, $n = 2, 3, \dots, N$) 是第 n 个通道、第 l 个视角子孔径图像的幅相误差, 则可将 θ_l 对应的 N 个通道幅相误差表示为向量 g_l 的形式:

$$g_l = [1, g_l^{(2)}, \dots, g_l^{(N)}]^T \quad (3)$$

设子孔径图像中特特点的某像素内包含了 I 个独立的静止地杂波单元, a_i 为第 i 个静止地杂波单元的随机复幅度, 于是该像素对应的多通道杂波协方差矩阵 R_l 可以表示为:

$$R_l = E[(\sum_{i=1}^I a_i)(\sum_{i=1}^I a_i)^H] \cdot g_l^H g_l \quad (4)$$

于是有:

$$\begin{aligned} R_l \cdot g_l &= E[(\sum_{i=1}^I a_i) \cdot (\sum_{i=1}^I a_i)^H] \cdot g_l^H g_l \cdot g_l \\ &= \lambda \cdot g_l \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 定义 $\lambda = E[(\sum_{i=1}^I a_i) \cdot (\sum_{i=1}^I a_i)^H] \cdot g_l^H g_l$, λ 为非负实数, 于是 λ 可以视为 R_l 的特征值, g_l 为 λ 对应的特征向量。又由于 $\text{Rank}(R_l) = 1$, 于是幅相误差 g_l 为 R_l 唯一非零正特征值对应的导向矢量。将各通道不同视角的子孔径图像除以对应的 $g_l^{(n)}$ 即得到通道均衡后的一组子孔径图像 $r_l^{(n)}$:

$$r_l^{(n)} = \frac{s_l^{(n)}}{g_l^{(n)}} \quad (6)$$

1.3 子孔径图像的重组算法

通道均衡后的子孔径图像序列 $r_l^{(n)}$ (n 固定, $l = 1, 2, \dots, L$) 经过相干积累可得到全孔径图像 $r^{(n)}$ 。定义子孔径图像重组的权向量为 w , w 的第 l 个元素是 $r_l^{(n)}$ ($n = 1, 2, \dots, N$) 的权系数, 即

$$w = [w_1, w_2, \dots, w_L]^T \quad (7)$$

则全孔径图像 $r^{(n)}$ 由式(8)得到:

$$r^{(n)} = \sum_{l=1}^L w_l \cdot r_l^{(n)} \quad (8)$$

为求解 w , 设置如下准则: 当各视角误差相同时, 按 1.2 节得到的重组全孔径图像 $r^{(n)}$ 与不进行子孔径分割而直接用 $g_l^{(n)}$ 校正得到的图像的误差最小。在这一准则下, 求解 w 的过程即解下述无条件多变量非线性最优化问题:

$$\min_w \|g_l^{(n)} \cdot s^{(n)} - r^{(n)}\|_F \quad (9)$$

其中 $\|\cdot\|_F$ 是 Frobenius 范数, 表示对矩阵中的所有元素求平方和再开平方。由于 $r_l^{(n)} = s_l^{(n)} / g_l^{(n)}$, 最优化问题(9)等价于:

$$\min_w \|s^{(n)} - \sum_{l=1}^L w_l \cdot s_l^{(n)}\|_F \quad (10)$$

利用式(2), 定义 h_l 的频域形式为 H_l , Spt 为 $s^{(n)}$ 的支撑域, 则将式(10)化简为:

$$\min_w \|\text{Spt} - \sum_{l=1}^L w_l \cdot H_l\|_F \quad (11)$$

利用最速下降法、牛顿法等^[6]可以解这个问题, 在此不赘述。考虑一种简单的情形, 子孔径带通滤波器设置为矩形窗, 相邻的滤波器的重叠率(即重叠区域的带宽与滤波器带宽之比, 记为 k)为 0, 并且所有滤波器的通带之和正好覆盖整个支撑域, 此时 w 为全 1 向量。

1.4 子孔径参数的选择

增加子孔径个数能得到相位误差随视角变化的更细致的规律, 但同时增加了运算量。此外, 一般相邻子孔径的重叠率 k 是固定的, 因此增加子孔径个数意味着减小子孔径积累角, 从而使误差估计精度降低。

设全孔径图像总点数为 P^2 , 记利用一个视角的子孔径图像进行通道均衡的运算量为 Q 。对于 L 个

子孔径的情形,各步骤运算量或运算次数如表1所示,其中FFT表示快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform),IFFT表示逆FFT(Inverse FFT)。

表1 基于子孔径图像的通道均衡运算量

| 运算步骤 | 生成子孔径图像 | | | 子孔径图像 通道均衡 | 子孔径图像 重组 |
|------|-----------------|--------|------------------|---------------|-------------|
| | 2D-FFT | 滤波 | 2D-IFFT | | |
| 复乘次数 | $P^2 \log_2 P$ | LP^2 | $LP^2 \log_2 P$ | LQ | - |
| 复加次数 | $2P^2 \log_2 P$ | - | $2LP^2 \log_2 P$ | | LP^2 |

子孔径图像重组步骤的权矢量 w 与具体的图像无关,可事先算出来,并且乘以权系数的运算可合并至“子孔径图像通道均衡”的步骤中,所以没有考虑与之有关的运算量。由表1可知,基于子孔径图像的通道均衡的运算量是子孔径个数 L 的线性函数,并与图像大小有关。

将全孔径图像中特显点的信噪比记为 a , 积累角记为 $\Delta \Theta_0$ 。利用信噪比与图像方位分辨率成反比的关系^[7]以及方位分辨率的定义,得到子孔径图像的信噪比 a_{sub} :

$$a_{\text{sub}} = \frac{a \sin(\Delta \Theta / 2)}{\sin(\Delta \Theta_0 / 2)} \approx a / L (1 - k) \quad (12)$$

假设子孔径图像的相位误差为高斯分布,利用其方差 σ_{sub}^2 与信噪比的关系^[8]结合式(12)可得:

$$\sigma_{\text{sub}}^2 = \frac{a_{\text{sub}} + 0.5}{a_{\text{sub}}^2} = \frac{aL(1-k) + 0.5L^2(1-k)^2}{a^2} \quad (13)$$

由此得到允许的 σ_{sub}^2 对 L 的限制:

$$L < \frac{a(\sqrt{1 + 2\sigma_{\text{sub}}^2} - 1)}{(1-k)} \quad (14)$$

再结合运算量的考虑可选择合适的 L 。

2 实验

利用车载三通道低频 SAR/GMTI 系统实测数据对本文方法和性能进行验证。该系统采用正侧视条带工作模式,工作于 UHF 波段,天线架高 5m,收发天线为工字天线,阵元间距为 1 倍波长,波束角为 60° 。测绘带近端和远端的入射角分别为 79.5° 和 87.2° ,由发射天线到接收天线直接辐射引起的通道耦合已通过设置波门去除。观测场景是一块约 400m^2 的平整空地,有少量强散射固定目标可作为估计通道误差的特显点。配合实验的运动目标是一辆小货车,用 GPS 测得运动目标真实的方位向和距离向速度是 $(0, 3)\text{m/s}$ 。含运动目标的通道 1 的场景成像结果如图 3 所示。

2.1 方法实现

由于系统的相对带宽低于 10%,入射角变化不大,所以不考虑通道误差随频率和入射角的变化。以下利用图像域通道均衡(不划分子孔径而对全孔径图像进行通道均衡)和本文提出方法对数据进行处理,所得结果再进行运动目标检测,以比较两种通道均衡方法的性能。图像域通道均衡估计得到的三通道幅度误差为 $[1, 1.11, 1.01]$,相位误差为 $[0^\circ, -91.3^\circ, -79.1^\circ]$,特显点信噪比为 48dB。

计算子孔径个数:以 10° 作为可接受的子孔径相位误差的标准差,重叠率 k 取为 0,因此由式(14)得到 L 的最大整数解是 7。在暂不考虑运算量的情况下,将图像分为 7 个子孔径图像。然后将子孔径带通滤波器设置为较简单的矩形窗。划分子孔径并分别成像后(此时得到每个子孔径方位分辨率是 3m,符合式(14)对 σ_{sub}^2 的限制),提取特显点分别估计误差,如图 4 所示,可以看出不同视角的通道误差

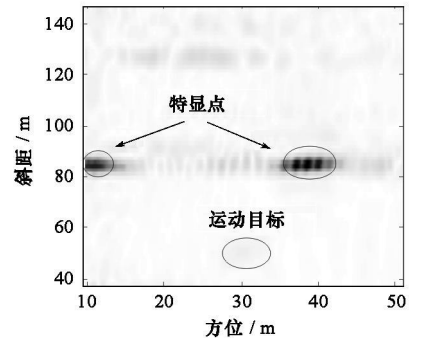


图3 通道1 SAR 成像幅度图

Fig.3 Amplitud figure of channel 1 SAR imaging

有很大区别。通道均衡后,采用两种方案检测运动目标及估计参数。由于实验过程中没有设置辅助信源,误差估计仅能依靠特显点,因此仅将本文方法与全孔径图像域方法进行对比。

(1) DPCA 结合 ATI 的方法。该方法首先将通道 1 与通道 2 的图像相减、通道 2 与通道 3 的图像相减以实现杂波相消,再将两路杂波相消结果进行顺轨干涉。对干涉图的幅度和相位设置门限以检测运动目标,通过干涉相位估计目标的径向速度分量。

设置 -5dB 为幅度门限,此时以两种通道均衡方法作为预处理都能检测出运动目标,并且不存在虚警目标,估计目标速度分别为(0, 2.90) m/s 和(0, 2.93) m/s。为了观察不同通道均衡方法的杂波抑制效果,将幅度门限设置为 -14dB,再显示结果在图 5 和图 6 中。可见本文所提方法能得到更好的杂波抑制效果,目标速度估计更精确。

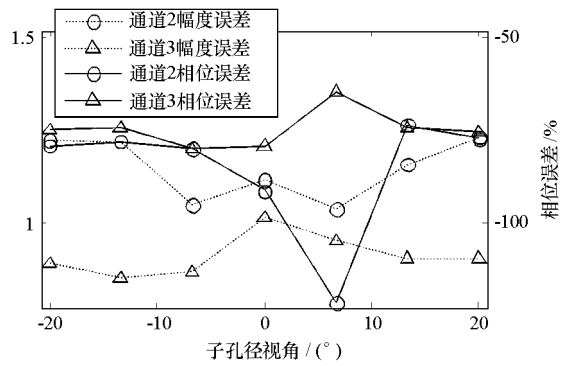


图 4 不同子孔径的通道幅度、相位误差
Fig. 4 Amplitude and phase errors of different subapertures in each channel

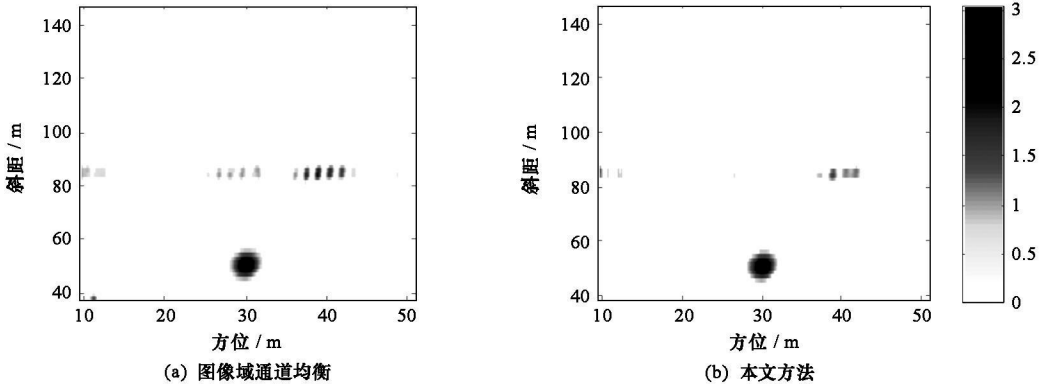


图 5 DPCA+ ATI 方法幅度图
Fig. 5 Amplitude figure via DPCA+ ATI

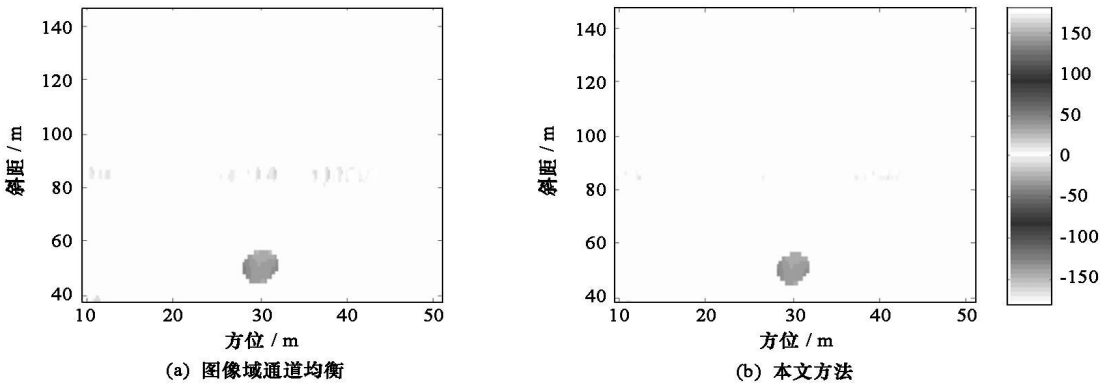


图 6 DPCA+ ATI 相位图
Fig. 6 Phase figure via DPCA+ ATI

(2) 图像域 STAP 方法。该方法对于给定的搜索速度,联合多通道 SAR 图像进行 STAP 和重新聚焦,然后根据输出的幅度图像判决是否存在该速度的运动目标。

经图像域 STAP 得到的聚焦幅度图如图 7 所示。以 0.05m/s 为步长进行处理,以 1.0×10^{-5} 为虚警概率设置恒虚警门限进行运动目标检测,则两种通道均衡方法作为预处理都能将目标检测出来并且不存在虚警目标,估计目标速度分别为(0, 2.90) m/s 和(0, 3.05) m/s。比较图 7(a) 和(b)可知,经本文方法通道均衡后杂波抑制性能优于图像域方法,速度估计也更精确。

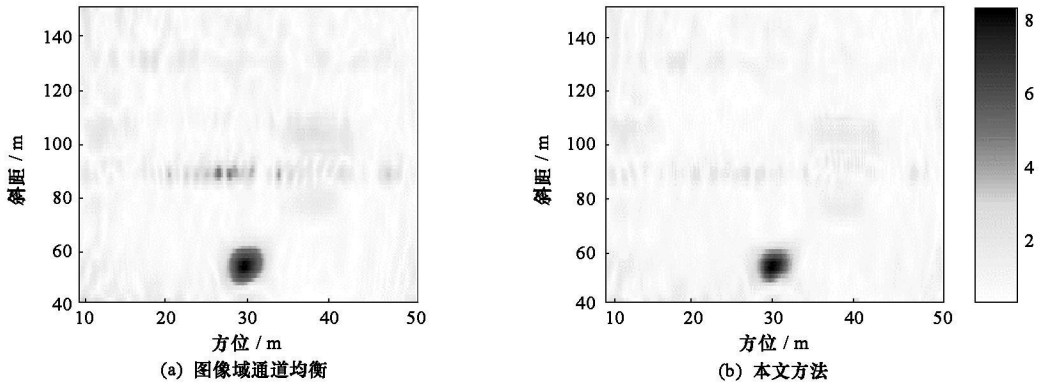


图7 图像域 STAP 输出
Fig. 7 Output of image domain STAP

2.2 方法性能

对于运算性能,使用 1.60GHz 主频双核、1G 内存的计算机,利用 Matlab R2009a 软件进行处理,没有硬盘读取操作,所有运算在内存中进行。得到不同子孔径个数条件下的运算耗时,如图 8(a) 所示。其中子孔径个数为 1 的情形即图像域方法。可以观察到,运算耗时与子孔径个数近似呈线性关系,与本文 1.4 节中分析的结果一致。对于运动目标检测性能,由于实测数据真实的通道误差未知,利用运动目标的输出信杂噪比改善来评估不同子孔径参数下的方法性能,结果如图 8(b) 所示。可以观察到随着子孔径个数的增加,运动目标检测性能明显提高。

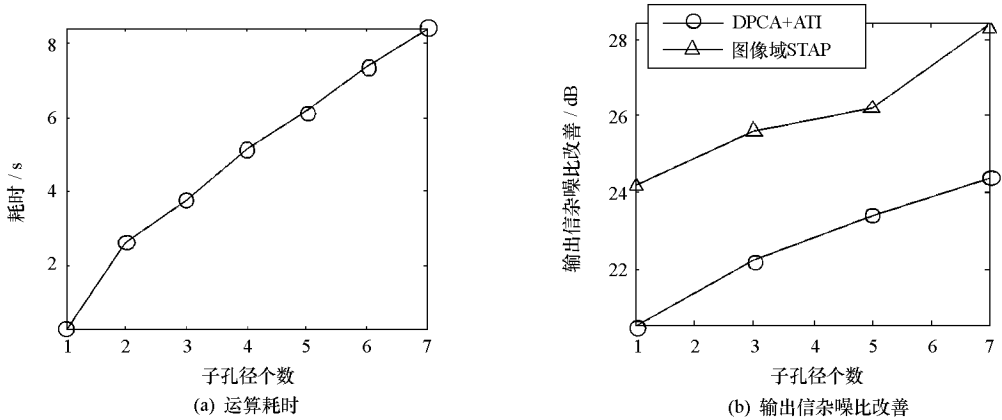


图8 不同子孔径个数的运算耗时和运动目标检测性能
Fig. 8 Calculation time and moving target detection performance using different subapertures

3 结论

提出的基于子孔径图像的通道均衡方法在背景杂波分布未知的情况下,能自适应地估计不同视角的通道误差,实现各通道间幅相误差的有效补偿。基于实测数据的实验结果表明,本文方法对运动目标检测性能的改善作用明显,适用于实际低频 SAR 系统的运动目标检测。

参考文献:

- [1] 龚清勇,朱兆达. 通道幅相误差快速校正算法在空时自适应处理中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(5): 655-659.
- [2] 常玉林,黄晓涛,周红,等. 基于 ATI 的双通道 UWB SAR 运动目标检测和距离向速度估计[J]. 信号处理, 2008, 24(5): 742-746.
- [3] Faulert D, Tam W. Improvement in the Detection Performance of a Space Based Radar Using a Displaced Phase Centre Antenna[C]//Proc. of the International Symposium on Antennas and Propagation, 1987, 25: 964-967.
- [4] Chapin E, Chen C W. Along-Track Interferometry for Ground Moving Target Indication[J]. IEEE A&E Systems Magazine, 2008, 23(6): 19-24.
- [5] 李真芳,保铮,杨凤凤. 基于成像的分布式卫星 SAR 系统地面运动目标检测(GMTI)及定位技术[J]. 中国科学 E 辑, 2005, 35(6): 597-609.
- [6] 范钦珊,等. 数学手册[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [7] Skolnik M I. 雷达手册(第二版)[M]. 王军,林强,等译. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [8] Thompson A A, Livingstone C E. Moving Target Performance for RADARSAT-2[C]//IGARSS 2000, 2000: 2599-2601.