

基于联合像素干涉统计特性的 三通道动目标检测方法

吕孝雷¹, 邢孟道¹, 潘月娥², 张守宏¹

(1. 西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071;

2. 西安电子科技大学 计算机学院, 陕西西安 710071)

摘要: 本文提出了一种基于联合像素的三通道地面运动目标检测(GMTI)方法. 首先分析联合像素处理后的两多视 SAR 图像干涉统计特性, 建立幅相联合的概率统计模型, 分析虚警和漏警, 考虑到最小可检测速度内存在速度模糊, 采用能量重心法解模糊, 最后将干涉幅度和解模糊后的干涉相位联合检测动目标. 实测数据处理结果验证了该方法的有效性.

关键词: 地面动目标检测 (GMTI); SAR 干涉统计特性; 联合像素; 最小可检测速度; 速度模糊

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)12-2319-05

Detection of Three-channel Ground Moving Targets Using Statistical Properties of Joint Pixel Pairs Interferograms

LV Xiaolei¹, XING Mengdao¹, PAN Yue'e², ZHANG Shouhong¹

(1. National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China;

2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: A new method based on joint pixel interferograms is proposed for three-channel ground moving target indication (GMTI). Firstly, a joint probability statistical model is established using the statistical properties analysis of multilook SAR interferograms after joint pixel processing. Then the false and leak alarms are analyzed. Meanwhile, considering the velocity ambiguity in the range of minimum detectable velocity (MDV), an energy center method is presented to resolve ambiguity. Lastly, the interferometric magnitude and unambiguous phase are jointed to detect moving targets. The validity of new detection method is demonstrated by the results from real data.

Key words: ground moving target indication (GMTI); statistics of SAR interferograms; joint pixel; minimum detectable velocity (MDV); velocity ambiguity

1 引言

目前, 国内开始陆续录下了机载多通道 SAR-GMTI 的实测数据, 对多通道 SAR-GMTI 展开了更深入的研究. 随着 SAR 图像分辨率的提高, 干涉图像的相干性也随之提高, 这有利于杂波抑制, 但同时图像配准精度提出了更高的要求. 为了克服由图像配准误差所引起的杂波抑制性能下降的问题, 先后提出了多点消一点, 多点相消^[1]的自适应杂波抑制方法. 多点相消是基于联合像素协方差矩阵的特征分解技术的地面杂波抑制方法, 即使配准误差达到 1 个像素, 仍能有效抑制杂波. 在动目标检测方法上目前大多基于传统的恒虚警率 (CFAR) 检测, 文献[2]提出了基于两单视复图像 (SLC) 的干涉相

位和幅度联合检测方法, 该方法比传统的 CFAR 有很大的改进, 但存在两个问题, 首先在没有进行杂波对消的情况下采用幅度检测会受到强散射点的干扰, 存在虚警现象; 其次对于检测三通道慢速目标来说, 由于最小可检测速度范围内存在速度模糊, 直接采用干涉相位检测, 存在漏警现象.

为提高动目标定位和测速精度, 降低虚警率, 应该考虑如何获得最佳的杂波抑制和动目标检测性能. 本文以国内三通道 SAR-GMTI 实测数据为背景, 提出了基于联合像素干涉统计特性的三通道动目标检测方法. 本文第 2 节根据联合像素处理后的两多视 SAR 图像干涉统计特性建立统计模型, 并分析虚警、漏警; 第 3 节考虑到三通道最小可检测速度范围内存在速度模糊现象, 提出

采用能量重心法解模糊. 第 4 节提出将干涉幅度和解模糊后的干涉相位联合检测地面动目标的方法, 并给出相应的检测流程图; 第 5 节分析实测数据处理的结果, 并与 CFAR 检测作比较.

2 统计模型

为解决图像配准误差引起杂波抑制性能下降的问题, 不但利用当前所要检测的像素, 还利用其周围相邻像素的复数据来联合构造数据矢量, 称为联合像素矢量^[1]. 假定构造联合像素矢量所用的相邻像素的数目为, 且只从像素的四周选取, 联合像素矢量 $\mathbf{uX}(m)$ 表示为:

$$\mathbf{uX}(m) = [\mathbf{uX}^T(m-k/2), \mathbf{uX}^T(m-k/2+1), \dots, \mathbf{uX}^T(m), \dots, \mathbf{uX}^T(m+k/2)]^T \quad (1)$$

其中 $\mathbf{uX}(i)$, $i \in [m-k/2, m+k/2]$ 为像素矢量, 即将两 SLC 中的同一像素 i (对应于同一地面散射单元) 的复数据排成一个矢量形式. 假设成像区域在同质地表上, 像素服从零均值复循环高斯分布^[3], 复循环高斯模型可以推广到 N 个测度, 或者是 N 个通道, 或者是同一图像中相邻的 N 个像素的集合. 将 N 个像素矢量排列成一个联合像素矢量可以建模为零均值的联合复循环高斯随机矢量. 因此, 联合像素矢量 $\mathbf{uX}(m)$ 的概率分布服从多维复高斯, 假设运动目标的阵列导向矢量已知, 联合像素的权值可由最优 STAP 的权矢量得到^[4]:

$$\mathbf{W}(m) = \hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{uX}(m)}^{-1} \cdot \mathbf{u}\mathbf{a}_t \quad (2)$$

其中, $\mathbf{u}\mathbf{a}_t$ 为地面运动目标的联合像素阵列导向矢量, 与运动目标 SAR 图像扩散到相邻像素的情况有关. $\mathbf{C}_{\mathbf{uX}(m)}$ 为采样协方差矩阵, 依赖于联合像素矢量, 为了便于建立统计模型, 将采样协方差矩阵统计平均后得到联合像素权矢量.

$$\mathbf{W} = \sum_{m=1}^M \hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{uX}(m)}^{-1} \cdot \mathbf{u}\mathbf{a}_t \quad (3)$$

然而, 实际中由于地面运动目标的径向速度是未知的, 因此目标的阵列导向矢量是未知的. 这时可以在最小均方差准则下获得最优权. 经过联合像素处理后, 像素 $\mathbf{uZ}(m)$ 可表示为:

$$\mathbf{uZ}(m) = \mathbf{W}^T \mathbf{uX}(m) = \sum_{l=m/2-k/2}^{m/2+k/2} w_l \mathbf{uX}(l) \quad (4)$$

其中 w_l 为权矢量的各分量. 由于权矢量用来抑制杂波的, 所以不会改变运动目标的相位信息, 这点可从子空间投影角度得到较好的解释. 根据式(3)和联合像素矢量概率密度函数, 由下面定理 1 可知像素 $\mathbf{uZ}(m)$ 服从一维复高斯分布.

定理 1 设联合像素矢量 $\mathbf{uX}(m) \sim \mathbf{CN}(0, \mathbf{C}_{\mathbf{uX}(m)})$, 则联合像素处理后像素 $\mathbf{uZ}(m) \sim \mathbf{CN}(0, \sigma_m^2)$, 其中, $\sigma_m^2 = \mathbf{W}^T \mathbf{C}_{\mathbf{uX}(m)} \mathbf{W}$.

证明如下:

因为 $\mathbf{uX}(m) \sim \mathbf{CN}(0, \mathbf{C}_{\mathbf{uX}(m)})$, 所以 $\mathbf{uX}(m)$ 的特征函数满足:

$$\begin{aligned} \varphi_{\mathbf{uX}(m)}(\boldsymbol{\xi}) &= E[\exp(j \operatorname{Re}(\boldsymbol{\xi}^H \mathbf{uX}(m)))] \\ &= \exp[-\frac{1}{4} \boldsymbol{\xi}^H \mathbf{C}_{\mathbf{uX}(m)} \boldsymbol{\xi}] \end{aligned}$$

由式(3)可知, 权矢量 \mathbf{W}^T 统计平均后不依赖信号环境, 则 $\mathbf{uZ}(m)$ 的特征函数为:

$$\begin{aligned} \varphi_{\mathbf{uZ}(m)} &= E[\exp(j \operatorname{Re}(\boldsymbol{\xi}^H \mathbf{uZ}(m)))] \\ &= E[\exp(j \operatorname{Re}(\boldsymbol{\xi}^H \mathbf{W}^T \mathbf{uX}(m)))] \\ &= E[\exp(j \operatorname{Re}(\boldsymbol{\xi}^H \mathbf{W}^T \boldsymbol{\xi}^H \mathbf{uX}(m)))] \\ &= \varphi_{\mathbf{uX}(m)}(\mathbf{W}^* \boldsymbol{\xi}) \\ &= \exp[-\frac{1}{4} \boldsymbol{\xi}^H \mathbf{W}^T \mathbf{C}_{\mathbf{uX}(m)} \mathbf{W}^* \boldsymbol{\xi}] \end{aligned}$$

因为特征函数与概率密度函数一一对应, 所以 $\mathbf{uZ}(m) \sim \mathbf{CN}(0, \mathbf{W}^T \mathbf{C}_{\mathbf{uX}(m)} \mathbf{W}^*)$

将通道 1 的 SLC 和通道 2 的 SLC、通道 2 的 SLC 和通道 3 的 SLC 分别作联合相消得到两幅杂波抑制后的 SLC 记为 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$.

$$\begin{aligned} I_1(t) &= G_2 j \sin \left[\pi \frac{dv_r}{v_a \lambda} \right] \exp \left[\pi \frac{dv_r}{v_a \lambda} \right] \\ I_2(t) &= G_2 j \sin \left[-\pi \frac{dv_r}{v_a \lambda} \right] \exp \left[-\pi \frac{dv_r}{v_a \lambda} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

其中 G 为配准相消后的复图像的包络, d 为通道间距, v_a 为载机速度, v_r 为地面动目标的径向速度. $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 的多视协方差矩阵可定义为:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \mathbf{uZ}(m) \mathbf{uZ}(m)^H = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho e^{j\phi} \\ \sigma_1 \sigma_2 \rho e^{-j\phi} & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 n 为视数, 像素矢量 $\mathbf{uZ}(m) = [uZ_1(m) \ uZ_2(m)]^T$, $uZ_1(m)$ 、 $uZ_2(m)$ 分别为 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 中对应的像素, $\sigma_1 \sigma_2$ 、 ϕ 分别为 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 多视干涉图像的幅度和相位, ρ 为 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 复相关系数的幅度. 由式(5)可知, 干涉相位 ϕ 满足 $2\pi dv_r / (v_a \lambda)$, 当 $v_r > \lambda_a / (2d)$ 或 $v_r < -\lambda_a / (2d)$ 时, 相位出现模糊, 解模糊(这将会在下面讨论)后相位记为 $\hat{\phi}$. 由定理 1 可知, 像素矢量 $\mathbf{uZ}(m)$ 可建模为二维零均值联合复高斯随机矢量. 根据文献[5], $\mathbf{A} = n\hat{\mathbf{R}}$ 服从复 Wishart 分布. 复 Wishart 分布是 Gamma 规律在多视多维复数据情况下的一般化情形, 利用这种分布不但可以计算多视干涉协方差, 而且可以分析多视干涉图像的幅度和相位的统计特性, 推导出干涉幅度和相位的边缘概率分布和联合概率分布, 从而可以分析动目标检测的虚警和漏警现象. 复 Wishart 分布中的协方差统计模型的建立是假设成像区域在同质地表上, 而事实上, 地面动目标检测往往在城镇、郊区等异质区域上, 因此, 引入一个随机变量 $\delta \in (0, \infty)$, 将协方差模型扩展

为乘积模型, 即 $\hat{R} \rightarrow \delta R$. 目前有不少文献对统计模型进行了研究, 本文采用逆 χ^2 统计模型. 根据协方差的乘积统计模型和文献[2]附录的推导, 干涉幅度和相位的联合概率密度函数可表示为:

$$f(\eta, \phi) = \frac{(2n)^{2n} \mu^v}{2 \sqrt{\pi} \Gamma(n) (1 - \rho^2)^{-(n+v)} \Gamma(v) \Gamma(n+v+3/2)} \cdot \Gamma(2n+v) \Gamma(v+2) \cdot \eta^{2n-1} [(1 - \rho^2) \mu - 2n\eta(\rho \cos \phi - 1)]^{-(2n+v)} \times {}_2F_1(2n+v, n-1/2; n+v+3/2; [(1 - \rho^2) \mu - 2n\eta(\rho \cos \phi + 1)] / [(1 - \rho^2) \mu - 2n\eta(\rho \cos \phi - 1)]) \quad (7)$$

其中, ${}_2F_1(\cdot)$ 表示高斯超几何函数, η 为归一化干涉幅度, μ, v 为逆 χ^2 分布的两个参数, μ 表示自由度, v 表示地表的均匀程度. 通常 $v \geq 2$, v 越接近 2, 地表越不均匀, 如城镇区域. 当 $v \geq 20$ 时可认为同质地表. 根据式(7)画出干涉幅度和相位的联合概率密度(见图 1). 幅度检测线 1 代表传统的 DPCA-CFAR 检测门限, 相位检测线 1 代表传统的 ATF-CFAR 检测门限. 在分析虚警、漏警前不妨作这样的假设: 由相位检测线 1 和幅度检测线 2 构成的区域(1、6、7、8)为剩余杂波区域, 由相位检测线 1 和幅度检测线 1 构成的区域(2、3)为动目标区域, 由两幅度检测线和相位检测线 1 构成的区域(4、5)为杂波和动目标的混合区. 当采用 DPCA-CFAR 检测时, 会造成 1 区域的虚警, 4、5 区域的漏警, 当采用 ATF-CFAR 检测时, 会造成 4、5、6、7 的虚警, 当采用 DPCA-CFAR 和 ATF-CFAR 联合检测时, 会造成 4、5 区域的漏警. 通过上述分析, 可得出这样的结论: 采用联合检测方法比采用单一的检测方法(DPCA-CFAR 或 ATF-CFAR)在检测性能上更优. 这一结论也可以从概率分布上得到诠释, 因为 DPCA-CFAR 检测和 ATF-CFAR 检测分别服从干涉幅度和干涉相位的边缘概率分布, 采用边缘概率检测只考虑某一方面的影响, 忽略幅度和相位之间的联系. 例如, 地面运动目标 RCS 一般比地杂波大, 但目标回波强度不仅与 RCS 有关, 还与所处的天线波束的位置有关, 在天线波束中心能量较强, 在其四周能量较弱, 因此单靠幅度检测, 就很难检测到天线波束距离向两侧的动目标. 另外, 地杂波的干涉相位一般在零附近, 但有时会受到噪声、动目标的相位污染(虽然联合像素处理在一定程度上能

抑制目标信息的扩散, 但仍然会受到配准精度制约), 因此单靠干涉相位检测虚警率往往会比较高.

同时还需要指出, 图 1 的干涉幅度和相位联合 PDF 不但与 v, ρ 有关, 还与视数 n 有关, 随着 n 增加不但能较好地抑制相干斑而且能降低幅度和相位分布的统计方差, 提高检测性能.

3 干涉相位解模糊

前面分析干涉幅度和相位的联合 PDF 时, 假设干涉相位是无模糊的, 如果相位出现模糊, 直接采用幅度相位联合检测, 会出现漏警现象, 同时会影响目标的定位. 因此有必要分析模糊问题. 在 SAR-GMTI 模式时, 相位发生缠绕是由于目标的径向速度模糊引起的, 如何克服径向速度模糊涉及到 GMTI 天线通道数和工作方式. 假设天线全孔径发射, 多孔径同时接收, d 为通道间距, D_A 为天线等效孔径, $\lambda = 0.03m$, PRF = 1000Hz, $d = 0.5m$, $V = 100m/s$, 一般将目标的最小可检测速度定义在主瓣的两倍处(考虑到频谱展宽等因素), 画出不同通道数所对应 MDV 范围和一个 PRF 的盲速关系. 从图 2 可知, 只有当通道数 ≥ 4 时, MDV 内不存在模糊. 因此, 对于检测三通道慢速目标来说, MDV 内存在速度模糊. 而对于单孔径发射, 多孔径接收的工作方式下, MDV 内总是存在速度模糊, 跟通道数无关.

本文主要研究落入 MDV 内的三通道慢速动目标检测问题. 因此就需要进行干涉相位解模糊. 在天线波束对称的条件下, 静止杂波回波的多普勒频谱具有对称分布的特性, 而地面慢速动目标本身具有径向速度, 其回波的多普勒谱有一定频偏, 这样其多普勒谱能量相对于杂波多普勒中心来说呈不对称分布, 根据这种分布不对称, 本文采用频域能量重心法解模糊. 具体步骤如下:

- (1) 选择经过联合像素处理后的一幅 SLC, 利用 DPCA-CFAR 检测动目标(这里设置幅度门限比常规门限要低些, 尽可能减少图 1 中 4、5 区域的漏警现象).
- (2) 在 SLC 中沿方位向加窗提取出所检测到的动目标的信号, 插值后做方位 FFT 可以得到动目标的多普勒谱(考虑到动目标越距离单元散焦, 因此可取动目标所在相邻的几个距离单元的多普勒谱叠加), 估计多普勒谱的能量重心.
- (3) 在动目标所在距离单元的不同方位向加窗提取出杂波信号, 按步骤(2)同样的方法估计出杂波多普勒谱的能量重心.
- (4) 根据运动多普勒谱能量重心与杂波多普勒谱能量重心差估计出运动多普勒谱频偏, 然后估算出径向速度进行解模糊.

对动目标加窗提取时, 由于动目标和杂波是耦合在一起的, 因此窗长度对估计的动目标频谱能量重心影响

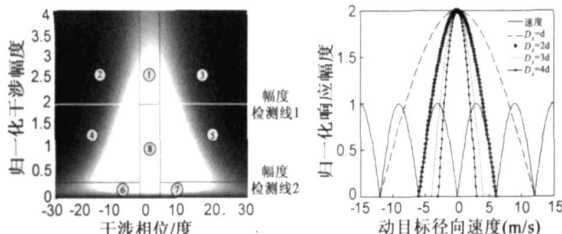


图1 干涉幅度和相位联合 PDF $n=2, v=3, \rho=0.95$

图2 通道数、MDV 和一个 PRF 内的盲速关系

比较大,窗长度太长,杂波所占能量偏多,估计出来的能量重心偏向多普勒中心,径向速度偏小.窗长度太短,能量重心估计不准,估计出的径向速度的精度太低,影响解模糊.基于上述考虑,可根据 SAR 方位分辨率和动目标散焦情况选择合适的窗长度,在估计动目标多普勒能量重心时,采用迭代法来提高估计精度.

4 三通道检测方法

为了能够提高动目标定位和测速精度,降低虚警率和漏警率,在获得最佳的杂波抑制同时考虑如何提高动目标检测性能.根据前面分析,本文在联合像素抑制杂波的基础上将解模糊、干涉幅度、干涉相位相结合,提出联合检测地面慢速(落入 MDV 内)动目标的方法.具体流程图见图 3.解模糊过程要在单视复图像进行,这主要考虑到多视干涉后多普勒谱可能会混叠(跟视数有关),从而影响谱能量重心估计精度.对于视数 n 选择一般可根据距离分辨率和方位分辨率比值来定.图 3 中幅度检测门限 η_1 要比 η_2 低些,这是因为通过幅度检测 2、解模糊和相位检测不但能检测出图 1 中 2、3 区域中有模糊的快速(相对而言)动目标,而且还能检测出 4、5 区域中快速动目标.相位检测 1 和幅度检测 1 联合检测 2、3 区域中无模糊的慢速目标.

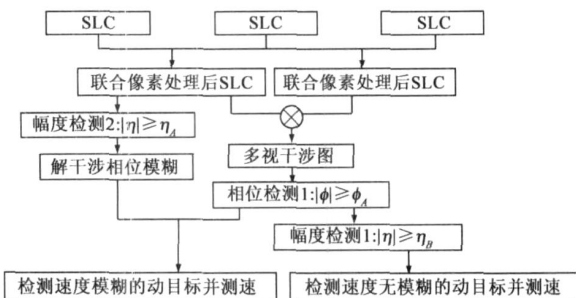


图3 联合检测动目标流程图

5 实测数据处理分析与结果

本批数据为某次试飞所录取机载条带式三通道 GMTI 数据,雷达工作在 X 波段,采用正侧视 1 发 3 收体制即天线 2 发射,三根天线同时接收,飞行高度为 5000m,场景近端斜距为 6km.动目标布置如图 4 所示:飞机以 120m/s 由上向下飞行,九辆小型货车各装有角反射器,在主道两侧的辅道按逆时针奔跑,其中有六辆

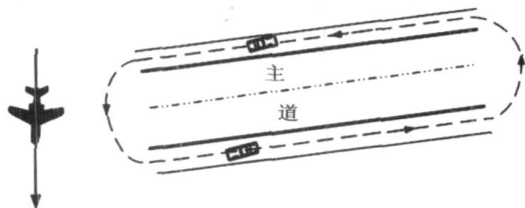


图4 动目标布置示意图

是慢车,速度控制在 1m/s 左右,三辆为快车,速度控制在 3~6m/s.慢车间距约为 200m,快车间距不定.

分别取三个通道的合作目标场景 SLC,距离向为 512 个点,方位向为 22134 个点,通道 2 的 SLC 与通道 1、3 的 SLC 相关系数分别为 0.90, 0.88, 距离向采样间距 2.5m,方位向采样间距 0.12m,故取视数 21.将通道 2 与通道 1、3 分别作联合像素处理,得到两幅杂波抑制后的 SLC,再进行多视干涉,其统计特性见图 5. (a) 为干涉相位理论边缘分布与统计直方图比较.根据乘积模型可知,干涉相位边缘分布与地表质地无关,因此只与视数、复图像的相关系数有关.从(a)可看出,干涉相位统计直方图基本与理论边缘分布吻合. (b) 为干涉幅度理论边缘分布与统计直方图比较.干涉幅度边缘分布与地表质地有关,本次实验动目标布置在城区,从(b)中证实了其异质地表($v = 2.5$)幅度边缘分布比同质地表($v = 20$)更逼近统计直方图.

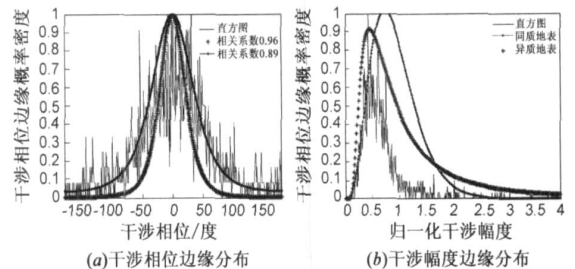


图5 联合像素抑制后干涉统计特性

根据本批数据的 GMTI 工作方式可知 MDV 内总是存在速度模糊的,速度模糊范围为: $[-5.2m/s, 5.2m/s]$.图 6 为检测和定位结果,上三角动目标速度为负,下三角动目标速度为正.采用非相干积累的单元平均恒虚警率(CA-CFAR)检测^[6],通过检测单元附近的若干个参考单元的均值来估计杂波功率水平,从而自适应设定检测门限.为降低虚警率,本文设定第二门限,如果某一单元的功率超过 CFAR 检测门限(第一门限),但比抵消前相应单元的功率低若干分贝(第二门限)以上,则认为这个单元中的残余功率是静止目标杂波抵消后的剩余功率,而不是由动目标信号功率形成的.第二门限能有效限制地面极强静止目标抵消后残余功率超过第一门限造成虚警的情况.由于 1 号动目标干涉相位未解模糊,定不



图6 检测和定位结果 方框表示目标检测,三角表示目标定位,

垂直向为方位向,水平向为距离向

到主道的下辅道. 由图 7 可知, 1 号目标速度较大, 频谱能量重心明显发生偏移, 采用能量重心法解模糊, 得到的粗速度为 5.4m/s , 再经干涉相位精估计后速度为

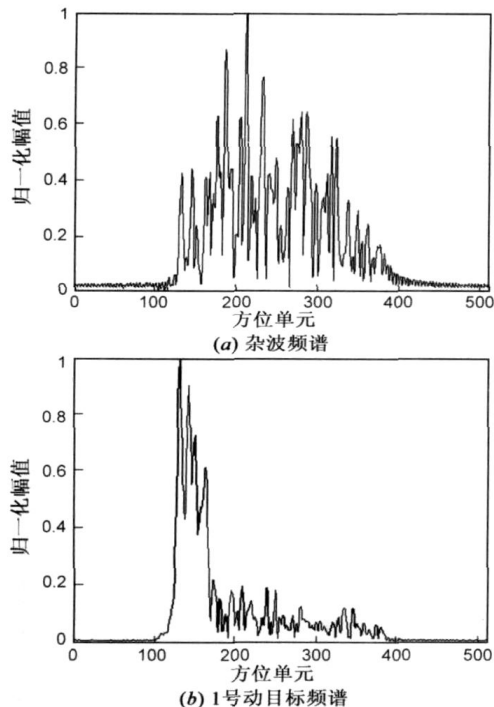


图7 1号动目标与同距离单元的杂波频谱图比较

5.81m/s . 从图 6(b) 中看出, 1 号动目标解模糊后能准确定位. 同时看到, 2 号动目标也被检测出来, 这是因为 2 号目标处在距离波束的右侧, 能量较弱, 只采用一个幅度检测(21dB), 造成了漏警. 采用本文的检测方法, 2 号目标就被幅度检测 2(17dB) 和解模糊后相位检测 1 检测出来. 可见, 本文的方法更为有效.

6 结束语

本文以国内三通道 SAR-GMTI 实测数据为背景, 提出了基于联合像素干涉统计特性的三通道动目标检测方法. 该方法不但有最佳的杂波抑制效果, 而且与传统的 CFAR 检测相比有更好的动目标检测性能.

致谢 感谢中国航天科技集团 504 所提供三通道 GMTI 实测数据.

参考文献:

- [1] LI Z F, BAO Z, et al. Image auto coregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection[J]. IEEE Trans on GRS, 2006, 44(2): 288– 297.
- [2] Christoph H Gierull. Statistical analysis of multilook SAR interferograms for CFAR detection of ground moving targets[J]. IEEE Trans on GRS, 2004, 42(4): 691– 701.

- [3] Rosen P A, Hensley S, et al. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Proc. IEEE, 2000, 88(3): 333– 382.
- [4] 李真芳. 分布式小卫星 SAR-InSAR-GMTI 的处理方法[D]. 西安: 西安电子科技大学电子工程研究所, 2006. Li Zhengfang. Approaches to SAR InSAR GMTI for distributed small satellite SAR systems[D]. Xi'an: National Key Lab of Radar Signal Processing Xidian Univ, 2006. (in Chinese)
- [5] Goodman N R. Statistic analysis based on a certain multivariate complex Gaussian distribution (an introduction)[J]. Ann Math Stat, 1963, 34(152): 152– 180.
- [6] Bassem R Mahafza. Radar Systems Analysis and Design Using Matlab[M]. USA: Chapman & Hall/ CRC, 2000. 146– 149.

作者简介:



吕孝雷 男, 1981 年生于浙江省嵊州市, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室博士研究生, 主要从事雷达成像(SAR/ISAR)、动目标检测等方面的研究.

E-mail: blue_horse@163.com



邢孟道 男, 1975 年生于浙江省嵊州市, 教授, 博士生导师, 研究方向主要为雷达成像和目标识别, 曾参加“863”、自然科学基金重点项目, 国防预研, 跨行业预研基金等多个项目, 已发表论文 40 多篇.

E-mail: xmd@mail.xidian.edu.cn



潘月娥 女, 1985 年生于浙江省永康市, 现为西安电子科技大学计算机学院硕士研究生, 主要从事数字图形、图像处理等方面的研究.

E-mail: pye3306@126.com



张守宏 男, 1938 年生于安徽省六安市, 教授, 博士生导师, 研究方向主要为雷达成像和阵列信号处理.