基于幅度和相位联合的 ATI 动目标检测新方法

袁 昊 周荫清 李景文

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 分析了影响 SAR-ATI 动目标检测干涉相位图中点幅度和相位分布的因素——包括雷达噪声、杂波能量、地面 RCS 起伏以及成像时的旁瓣等. 针对 SAR-ATI 检测时虚警概率过高问题,基于幅度门限和相位门限联合动目标检测处理,提出了一种改进方法:首先对 SAR 每一个通道的图像域中相位被污染的点作一次关于能量梯度的预滤波,在滤除了干涉相位图中相位失效的点之后,根据雷达的固有噪声及干涉相位分布图,在概率意义下设定滤波门限进行自适应幅度滤波;最后采用相位门限进行检测处理,有效降低了虚警概率;同时给出一个由干涉相位图中统计量拟合出的动目标检测曲线经验公式,能够明显降低在低杂噪比条件下的虚警概率. 仿真结果验证了此方法的有效性.

关 键 词: 合成孔径雷达; 信号处理; 沿轨迹干涉; 雷达噪声; 虚警概率; 地面运动目标指示

中图分类号: TN 95

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)02-0169-07

New method of ATI moving targets indication based on amplitude and phase thresholds

Yuan Hao Zhou Yinqing Li Jingwen

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The factors, which influence the distribution of the amplitude and phase of the points in the phase interferogram of SAR-ATI moving targets indication, including radar-noise, scatter energy, background uneven RCS and the side lobe of image pixels were analyzed. To resolve the problem of the high false alarm rate in SAR-ATI, an improved method was proposed based on the MTI of the joint amplitude-phase threshold. Firstly, the points with polluted phase in the image of every channel were pre-filtered. Secondly, after eliminating the points with invalidated phase, the adaptive amplitude filtering was processed with the threshold set by the probability, according to the radar-noise and the phase interferogram. In the end, the detection with the phase threshold method was performed to reduce the false alarm rate effectively. An empirical formula derived from the statistic fitted curves in the phase interferogram was presented to reduce the false alarm rate in the low CNR condition evidently. The computer simulation demonstrates this method.

Key words: SAR; signal processing; along-track interferometry; radar-noise; false alarm rate; GMTI

实现合成孔径雷达地面动目标指示(GMTI, Ground Moving Target Indication)的方法之一是沿航迹向干涉处理(ATI, Along-Track Interferometry)技术,这种方法在机载 SAR(Synthetic Aperture Radar)上已经取得了较好的效果,但在星载 SAR 条件下,由于卫星的地速很大,卫星与

收稿日期: 2006-03-13

作者简介: 袁 昊(1982—),男,安徽巢湖人,博士生,buaayh@ee.buaa.edu.cn.

地面运动目标之间位置关系相当复杂，检测难度相当大. 到目前为止，各国均处于预研阶段，包括加拿大的 Radarsat-2[1] 和美国的 Discoverer-2[2] 及 TechSat21 计划[3].

理论上讲，对于 RCS(Radar-Cross Section)不变的地面场景，如果其它因素的影响可以忽略，SAR-ATI 处理后的干涉复图像虚部为零. 实际的情形是，由于杂波源的运动[4]，在一个合成孔径时间内地面场景的 RCS 将会发生缓慢变化，经过 ATI 处理后干涉复图像虚部会分布在一定的范围内. 本文对地面 RCS 有起伏的场景采用 ATI 方法进行动目标检测，分析了系统输出的干涉相位图，提出了一种新的动目标检测方法.

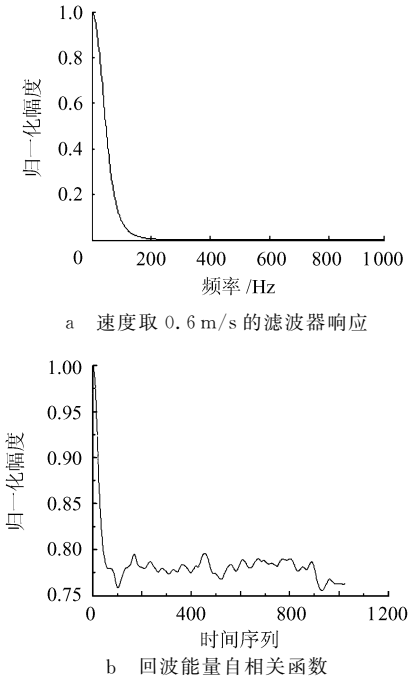
本文首先设计了具有高斯谱形的数字低通滤波器，将高斯白噪声通过此低通滤波器，近似得到具有高斯形状频谱特性的 RCS 起伏特性；其次，介绍了基于 ATI 技术进行地面动目标检测的原理和处理方法；第三，从 ATI 输出的干涉相位分布图的组成机理出发，逐步推导了一种改进的基于幅度门限与相位门限的联合动目标检测新方法；论文最后对不同杂噪比条件下，地形 RCS 起伏程度不同的地杂波采用该方法进行动目标检测，分析了这两类因素对检测性能的影响.

1 地面场景 RCS 起伏特性的模拟

由于杂波源自身的运动，场景散射单元的 RCS 在雷达观测时间内服从正态分布[4]，是具有高斯谱的正态随机数序列. 具体的仿真实现方法就是把独立正态随机数列通过具有高斯谱形的数字低通滤波器，即可得到所需的具有高斯形状频谱特性的相关正态随机序列，用以模拟地面的 RCS 起伏特性.

本文采用了康斯坦尼兹法设计一个具有高斯谱形的 4 阶数字低通滤波器[5]. 假设 SAR 在飞行过程中采集了 K 个脉冲的回波信号，那么任意一个散射体在这 K 个脉冲里的 RCS 的统计特性都要满足高斯形状的谱分布，用一组服从独立正态分布的复数通过设计的低通滤波器就能实现上述要求. 由于设计的低通滤波器阶数为 4，还需要取出前面 4 个暂态响应的值，所以对应的每一个散射点的 RCS 需要产生 $K+4$ 个服从独立正态分布的复数，然后用构建的低通滤波器对表征不同时刻的某个散射单元 RCS 复值进行滤波，取滤波后的 K 个有效点来描述不同脉冲时刻该散射点 RCS 的起伏特性.

图 1 给出当雷达的脉冲重复频率 $F_{prf}=5\,000$ Hz，发射波长 $\lambda=0.03$ m，杂波谱宽 $\omega_f=2\pi\frac{2v}{\lambda}$，$v=0.6$ m/s(v 为与杂波谱宽相关的一个折合速度，本文称之为地杂波相对速度)时的滤波器响应及通过该滤波器得到的回波能量自相关函数图.



a 速度取 0.6 m/s 的滤波器响应

b 回波能量自相关函数

图 1 滤波器响应及回波能量自相关函数

2 SAR-ATI 检测动目标原理

沿航迹方向干涉方法[6]是对两天线信号杂波对消检测运动目标方法的扩展，其基本原理是利用安装在同一平台沿航迹方向排列的两副天线测绘地面场景，若地面目标静止，则两副天线得到的图像完全相同，而动目标则会在对应像素中产生相位偏移. 两天线获取的回波信号分别成像处理后，形成干涉相位图，相位差 $\Delta\varphi$ 与多普勒频移 ω_d 和时间间隔 Δt 有关，$\Delta\varphi=\omega_d\cdot\Delta t$，即与径向速度成正比关系，利用 $\Delta\varphi$ 的信息就可以通过相应的处理手段进行动目标检测. 图 2 给出了 SAR-ATI 空间几何关系.

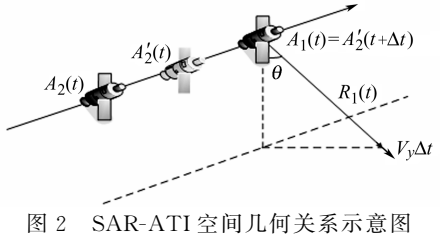


图 2 SAR-ATI 空间几何关系示意图

假设天线 A_1 发射信号，天线 A_1 和 A_2 接收回波，根据等效相位中心原理，天线 A_1 和 A_2 分

别发收电磁波可以等效成 A_1 和 A_2 连线中点处有一个等价的天线 A_2'既发又收,则对地面同一运动目标的两个天线接收到的回波相位是

$$\varphi_1 = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2R_1(t) \tag{1}$$

$$\varphi_2 = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2R_2'(t+\Delta t) \tag{2}$$

式中,$R_i(\cdot)$表示 $\cdot$ 时刻运动目标到第 i 个天线的距离. 干涉后的相位差为

$$\Phi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}\left[R_1(t) - R_2'(t+\Delta t)\right] = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot V_y \Delta t \tag{3}$$

其中,V_y 是运动目标的径向速度;λ 为波长. 因此

$$V_y = \frac{1}{\Delta t}\left(\frac{\lambda}{4\pi}\Phi_{12}\right) \tag{4}$$

为了避免相位发生混叠模糊,Φ_{12} 应该在$[-\pi,\pi]$之间,则可求得 V_y 的不模糊变化范围$[-V_{y\max}, V_{y\max}]$

$$\Delta t = \frac{\lambda}{4V_{y\max}} \tag{5}$$

地面运动目标在水平面上垂直卫星航向的最大不模糊速度为 $V_{y\max}/\sin\theta$,θ 为雷达视线与垂线的夹角.

3　幅度相位联合检测动目标

3.1　基于干涉相位图提取动目标信息的原理

SAR-ATI 动目标检测如图 3 所示.

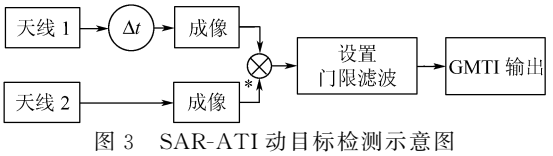


图 3　SAR-ATI 动目标检测示意图

应用 ATI 方法进行处理时,首先应将回波数据处理成两通道的复图像,一般地,地杂波谱为高斯形状,所以得到的干涉相位图沿实轴对称. 典型的地杂波干涉相位图通常如图 4 所示.

运动目标的位置是时刻变化的,所以,两天线接收动目标回波的相位差与静止目标不同,会在

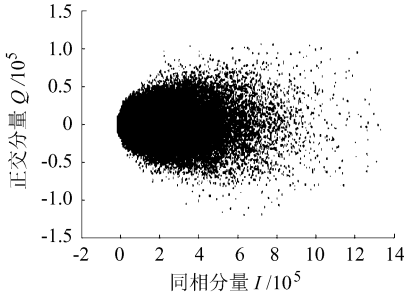


图 4　典型的地杂波干涉相位图

原有静止目标相位差的基础上叠加一个新的相差,利用这个原理,在干涉相位图上选择适当的门限,就可检测出运动目标. 图 5 给出了一个典型的单点运动目标的干涉相位分布图. 图中,动目标的点分布在一条直线上,离原点最远即能量最大的点是该点动目标成像压缩后的主瓣,其余的点对应的是脉压后点目标旁瓣. 在 ATI 检测时,如果能量最大的点没有被检测出来,将会产生漏警现象.

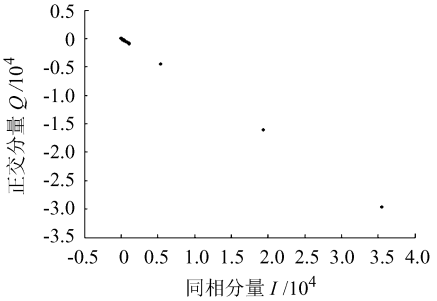


图 5　单点动目标干涉相位分布图

基于动目标与杂波在干涉相位图中分布关系不同的原理,可以考虑在得到回波信号的相位干涉图之后,对图像直接设置一个相位门限 $\Delta\Phi_{\text{th}}$,即用过复平面原点处作 $y=\pm kx$ 的 2 条射线夹住地杂波的干涉相位图($k=\tan|\Delta\Phi_{\text{th}}|$),动目标检测中,落在这 2 条射线之间的判定为静止目标,外面部分判定为运动目标,见图 6. 最小可检测速率(MDV,Minimum Detectable Velocity)计算公式为

$$V_{\text{MDV}} = \frac{\lambda V_a \cdot \Delta\Phi_{\text{th}}}{2\pi L} \tag{6}$$

其中,λ 为发射脉冲波长;V_a 为 SAR 载体运动速度;L 为两副天线间距.

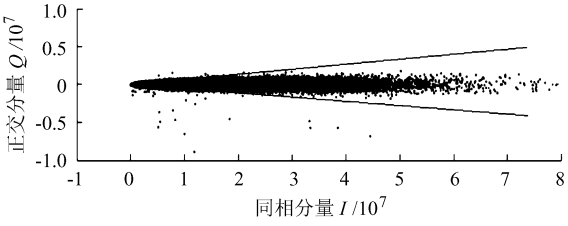


图 6　基于相位门限的 ATI 动目标检测示意图

3.2　干涉图像域预滤波

从图 5 可以看出,图像域中的每一个像素在干涉相位图上的分布都是由一簇相同相位(该相位称之为像素的实际相位)的点组成,在图像域中表现为该点方位向和距离向上的相邻像素,在时域上可以视为方位向与距离向上脉冲压缩后的旁瓣. 对于面目标的杂波背景,其每一个像素都会产生大量的同相位点,在干涉相位图中会与周围的

点产生叠加,此时得到的各点相位称之为检测相位.在图像域中,得到的各像素点的检测相位有可能因为相邻像素旁瓣的影响而偏离实际相位,产生相位漂移.

线性调频信号脉冲压缩后其峰值旁瓣比理论值可以达到-13.26 dB,经过加窗处理后其值可以达到-20 dB以下[7].当面目标场景RCS能量均匀分布时,相邻像素对中心像素的相位漂移影响不大;然而,背景中若存在强点散射体,或者动目标为强点目标时,其对周围的像素相位漂移的影响就不可以忽略.如果强散射点为动目标,那么周围弱杂波的相位被污染后就有可能呈现出运动目标的相位特征;若强散射点为静止目标时相位叠加也有可能让相邻的静止弱目标的相位增大,也会出现虚假的动目标.这些点的相位不是由自身的散射特性以及运动特性决定,而是由周围强点信号旁瓣决定的,已经不能反映该像素位置目标真正的运动特征.因此,在干涉前的复图像域中,可先根据相邻像素的能量梯度做一次滤波,剔除被强点目标相位污染的弱点像素.

在干涉前的各通道复图像中,每个点的相位是随机分布的,可以近似认为在整个图像域中各点相位是在$[0,2\pi)$上均匀分布且相互独立,即:$p(\varphi_1)=p(\varphi_2)=\dfrac{1}{2\pi}$, $p(\varphi_1)\cdot p(\varphi_2)=0$.设某一点的主瓣能量为$e_{m1}$、相位为$\varphi_1$,与其相邻的某点在该点位置处的旁瓣能量为$e_{n2}$、相位为$\varphi_2$,则该像素检测相位偏离实际相位$\pi/4$以上的概率为$\iint\limits_{|\varphi_1-\varphi_2|\geqslant\Phi_{\pi/4}} p(\varphi_1)p(\varphi_2)\mathrm{d}\varphi_1\mathrm{d}\varphi_2$,偏离实际相位$\pi/8$以上的概率为$\iint\limits_{|\varphi_1-\varphi_2|\geqslant\Phi_{\pi/8}} p(\varphi_1)p(\varphi_2)\mathrm{d}\varphi_1\mathrm{d}\varphi_2$.其中,两积分限分别为

$$\Phi_{\pi/4}=2\arctan\left(\frac{e_{n2}-\sqrt{2\,e_{n2}^2-e_{m1}^2}}{e_{m1}-e_{n2}}\right)$$

$$\Phi_{\pi/8}=2\arctan\left(\frac{(1+\sqrt{2})e_{n2}-\sqrt{(4+2\sqrt{2})\,e_{n2}^2-e_{m1}^2}}{e_{m1}-e_{n2}}\right)$$

若e_{m1}与e_{n2}能量相等($e_{m1}=e_{n2}$),当像素检测相位偏离实际相位$\dfrac{\pi}{4}$以上的概率为$\iint\limits_{|\varphi_1-\varphi_2|\geqslant\frac{\pi}{2}} p(\varphi_1)\cdot p(\varphi_2)\mathrm{d}\varphi_1\mathrm{d}\varphi_2=50\%$时,该点实际检测能量低于$\sqrt{2}\,e_{n2}$;当像素检测相位偏离实际相位$\pi/8$以上的概率为$\iint\limits_{|\varphi_1-\varphi_2|\geqslant\frac{\pi}{4}} p(\varphi_1)p(\varphi_2)\mathrm{d}\varphi_1\mathrm{d}\varphi_2=75\%$时,该点实际检测能量低于$\sqrt{2+\sqrt{2}}\,e_{n2}$;而像素检测相位偏离实际相位$\pi/8$时,对下一步两幅图像配准后作干涉,影响已经很严重了,故可以选用点目标脉压后的峰值旁瓣比(用常数表示)的$1\Big/\sqrt{2+\sqrt{2}}$作为相邻像素能量梯度滤波的门限.当图像中某一点与其上、下、左、右四邻域中任意一点的比值低于滤波的门限时,即可认为该点的相位已被污染,应将其滤除.

虽然ATI检测动目标方法无法显式推导出概率密度函数,但可以从干涉相位图上近似估算出虚警概率为

$$P_{\mathrm{fa}}=\sum_{i\in F}c(i)\Big/\sum_{i\in A}c(i) \tag{7}$$

其中,F为干涉相位图中门限以外的区域;A为干涉相位图中全部的区域;$c(i)$表示区域某单元中干涉相位图的点数.这个公式在门限以外没有动目标的前提下近似成立.

表1给出了是否经过图像域预滤波的动目标检测虚警概率对比,地杂波等效速度分别取0.3 m/s和0.6 m/s,能量梯度滤波的门限取-17 dB(文中点目标脉压后峰值旁瓣比约为-20 dB).

3.3 雷达噪声对动目标检测的影响

雷达噪声在成像系统中是一种加性噪声,而成像系统是一个线性系统,故噪声在每一个通道做独立的成像处理时,输出具有可加性.但是,动目标检测需要对两个通道的复图像进行干涉处理,此部分的系统是一个乘性系统,因此,整个动目标检测不是一个线性系统.记通道1接收回波为s_1,接收机噪声为n_1,通道2接收回波为s_2,接收机噪声为n_2,各自经过相同的成像系统后对应的输出为S_1,N_1和S_2,N_2,在不考虑接收机噪声时系统的输出为$O_{\mathrm{P}}=S_1\times S_2^*$,而在考虑接收机噪声之后,系统的输出变为:$O_{\mathrm{P}}'=(S_1+N_1)\times(S_2+N_2)^*=S_1\times S_2^*+N_1\times N_2^*+S_1\times N_2^*+N_1\times S_2^*$,图7给出了系统输出每一组分量的干涉相位分布.

表1 动目标检测虚警概率表

组别	检测门限斜率	最小可检测速度 MDV/(m·s^{-1})	$v=0.3$ m/s		$v=0.6$ m/s	
			无图像域滤波	有图像域滤波	无图像域滤波	有图像域滤波
1	0.1	1.088	1.23×10^{-2}	8.24×10^{-3}	3.82×10^{-2}	2.95×10^{-2}
2	0.2	2.155	2.82×10^{-3}	6.51×10^{-4}	6.94×10^{-3}	4.55×10^{-3}
3	0.3	3.1816	1.52×10^{-3}	2.17×10^{-4}	1.52×10^{-3}	6.51×10^{-4}

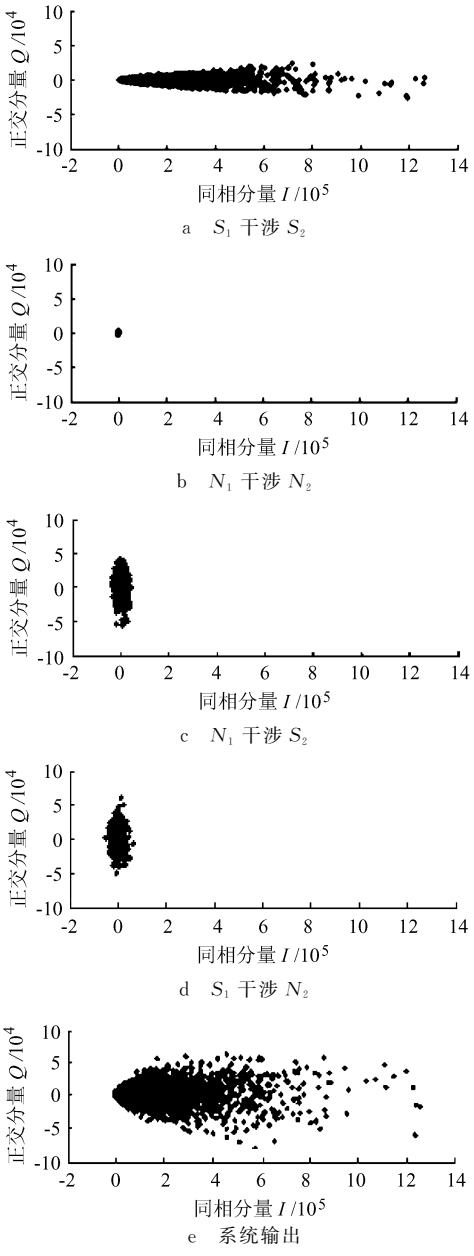


图 7　实际干涉相位分布图输出分解

在实际处理过程中,噪声和地杂波是混合的,无法对其进行有效的分离.但是 SAR 成像算法实质是匹配滤波,其对信号的增益要远大于噪声的增益,即使输入杂噪比不大的情形,经过成像处理输出杂噪比也可达到十几至几十分贝的量级,且由于两个通道的杂波信号有很好的相关性,图像配准后两幅图像像素的分布几乎完全一致,因此在干涉过程中,其干涉相位保持在一个很小的分布范围内,基本沿水平方向分布.因此,系统输出的干涉相位分布图的实部基本由杂波信号干涉的能量决定,干涉相位图中分布在实轴附近能量最大的点约为杂波能量最大值的平方,这从图 7 的干涉相位分解中可以得到验证.对于噪声而言,两个通道的噪声没有任何相关性,干涉相位分布在 0～2π 之间,噪声在图像域上是等概率随机分布的,因此其在干涉相位图上是一个圆域,圆的半径近似为最大噪声能量的平方.噪声和杂波相互独立,它们的干涉相位也分布在 0～2π 之间,在干涉相位图上也是一个圆域,圆的半径不超过噪声能量最大值乘以杂波能量的最大值.

从以上分析可以看出,在含噪声的地杂波干涉相位分布图上选择离实轴较近且横坐标最大的点,近似认为是杂波能量最大值的平方;对于一部工作在稳定状态下的雷达,接收机的噪声是固定的,设雷达的接收机噪声是均值为 0,方差为 σ^2 的高斯白噪声.经过成像处理之后干涉复图像上能量呈瑞利分布,干涉相位图上噪声分布在一个圆域中.可以选择幅度门限对其进行滤波,综合考虑虚警概率与漏警概率两种因素,选择滤波后恒虚警约为 0.1%时的幅度门限值作为噪声最大值的平方.

由此,可以得到关于噪声与杂波相干涉的相位分布圆域的范围.在动目标检测过程中,杂波与噪声的干涉信号是无用信号,在输出的干涉相位图中应设置一个幅度门限将其滤除.由于噪声相对杂波而言输出能量很小,该门限可以滤除噪声干涉的影响.通过这一方法,实现了对干涉相位图中的点进行自适应幅度滤波,在不增大漏警概率的前提下,较好地降低了由噪声引起的虚警概率.整个检测流程及在干涉相位图中滤波效果分别如图 8、图 9 所示.

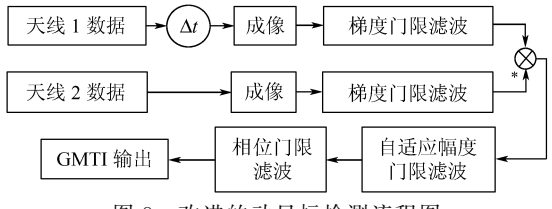


图 8　改进的动目标检测流程图

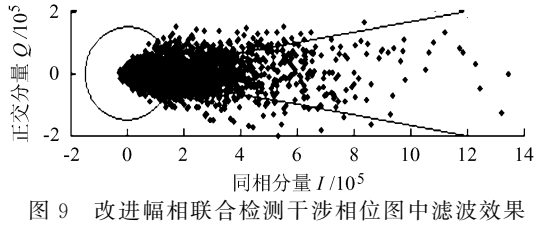


图 9　改进幅相联合检测干涉相位图中滤波效果

3.4　曲线门限的动目标检测

由图 9 可知,采用幅相联合检测,在干涉相位图中的顶端附近,仍有一部分点落在门限之外造成虚警,只有通过增大相位门限才能减小这部分的虚警概率,然而代价是系统的 MDV 增大,容易

造成漏警现象，对 GMTI 非常不利. 但如果仅从动目标指示的角度出发，不去考虑系统 MDV 指标，在干涉相位图中不采用相位门限，而采用某种曲线门限进行滤波，可以更好地反映杂波的实际分布，同时兼顾虚警与漏警. 由于干涉相位图无法对其准确推导数学表达式，因此，根据干涉相位分布图中的统计特性，给出一个经验公式，更准确的曲线门限有待于进一步的研究. 下面给出公式拟合过程.

设在干涉相位分布图中，实部的均方值为 E_{x^2}，方差为 σ_x^2，虚部的均方值为 E_{y^2}，方差为 σ_y^2，杂噪比为 R_{CNR}，杂波的相对运动速度为 v. 从干涉相位图上被幅度门限滤除剩余点的边缘分布来看，包络近似为两条关于实轴对称的指数函数曲线，且分布在第 1 和第 4 象限，曲线可以写为 $y=Kx^{\alpha}$ 的形式，在这里，用虚部与实部的标准偏差之比作为指数项. 然而仅用标准偏差之比作为指数会使曲线形状变化过快，因此引入了含地杂波相对速度 v 的一项作为指数项的修正. 由前文分析可知，相同杂噪比条件下，杂波相对速度越小，相位图上点分布越狭长，反之分布则越短粗. 地杂波相对速度与干涉相位图中点的分布不呈明显的线性关系，故选择指数函数作为修正因子的表达式，指数项可以写为 $\alpha=\dfrac{\sigma_y}{\sigma_x \cdot B^v}$. 干涉相位图上点分布狭长，指数项很小，$y$ 作为 x 的 α 次幂，结果会非常小. 因此，还要有一个关于结果的系数修正，在 x^{α} 前乘关于形状参数的另一个量 $(E_{x^2}/E_{y^2})^2$ 作为对 x 的 α 次幂的修正，以增大 y 值. 从整个表达式来看，$(E_{x^2}/E_{y^2})^2$ 只相当于 σ_y/σ_x 的 -4 次方量级，而 σ_y/σ_x 处于指数项的位置，高阶导数由指数项的变量决定. 曲线的走向及形状与未修正前的曲线一致，干涉相位图中实部、虚部均方值之比与均方差之比的比值作为指数项和修正系数的耦合项乘入线性系数. 除此之外曲线的形状还与杂噪比有关，杂噪比越小，曲线开口越阔. 虚部的分布与杂噪比成反比，因此，线性系数中还有一项关于杂噪比的表达式，即 $10^{\frac{A-R_{\mathrm{CNR}}}{10}}$，线性系数最终可以表示为 $K=\dfrac{E_{x^2}/E_{y^2}}{\sigma_{x^2}/\sigma_{y^2}}10^{\frac{A-R_{\mathrm{CNR}}}{10}}\left(\dfrac{E_{x^2}}{E_{y^2}}\right)^2$，拟合的曲线表达式为

$$y=\pm\frac{(E_{x^2}/E_{y^2})^3}{\sigma_{x^2}/\sigma_{y^2}}10^{\frac{A-R_{\mathrm{CNR}}}{10}}x^{\frac{\sigma_y}{\sigma_x\cdot B^v}} \tag{8}$$

其中，根据多组实验获得经验数据，$A=15$，$B=1.2$.

曲线门限在干涉相位图中的滤波效果如图 10 所示.

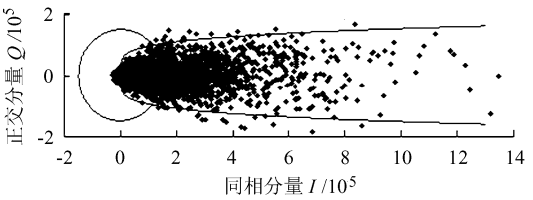


图 10 曲线门限在干涉相位图中滤波效果

4 计算机仿真

图 11 和表 2 是单通道复图像输出杂噪比 R_{CNR} 为 15 dB，10 dB 和 0 dB，地杂波相对速度 v 为 0.3 m/s，0.6 m/s 和 1.0 m/s 时，分别采用幅相联合法和幅度曲线法进行动目标检测虚警概率的结果.

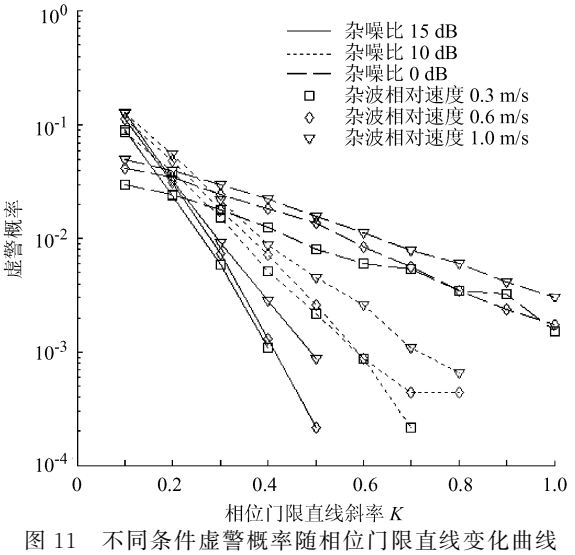


图 11 不同条件虚警概率随相位门限直线变化曲线

表 2 采用幅度曲线法进行动目标检测虚警概率

组别	检测条件	虚警概率
1	$R_{\mathrm{CNR}}=15$ dB，$v=0.3$ m/s	8.25×10^{-3}
2	$R_{\mathrm{CNR}}=15$ dB，$v=0.6$ m/s	9.98×10^{-3}
3	$R_{\mathrm{CNR}}=15$ dB，$v=1.0$ m/s	1.17×10^{-2}
4	$R_{\mathrm{CNR}}=10$ dB，$v=0.3$ m/s	4.71×10^{-2}
5	$R_{\mathrm{CNR}}=10$ dB，$v=0.6$ m/s	4.86×10^{-2}
6	$R_{\mathrm{CNR}}=10$ dB，$v=1.0$ m/s	5.06×10^{-2}
7	$R_{\mathrm{CNR}}=0$ dB，$v=0.3$ m/s	1.08×10^{-3}
8	$R_{\mathrm{CNR}}=0$ dB，$v=0.6$ m/s	4.34×10^{-4}
9	$R_{\mathrm{CNR}}=0$ dB，$v=1.0$ m/s	4.34×10^{-4}

在干涉相位分布图中的幅度滤波门限是由地杂波能量与噪声能量共同决定的，当杂噪比相同时，由于地杂波等效速度的不同，地杂波自身干涉的相位分布图会随着等效速度变大而展宽，故在选用相同的滤波门限时地杂波相对速度越大，虚警概率越高.

起伏程度相同，杂噪比越大，地形起伏的作用

就越明显,相位门限对虚警概率的影响就越大,随着杂噪比的降低,这种影响越来越弱.

在不同的杂噪比条件下,干涉相位图中的幅度门限对抑制单纯的两通道内噪声与杂波交叉干涉的性能是一致的.然而,在干涉相位分布图上,相位是由噪声叠加杂波干涉得到的,噪声与杂波交叉干涉后的能量会叠加到杂波与杂波干涉的能量上.因此,对于噪声较大的情形,噪声与杂波交叉干涉的能量分布范围会广一些,相应的叠加到杂波与杂波干涉点的能量也会更大一些,表现在整体的干涉相位分布图上,干涉点的虚部分量会更大.因此,对于相同的地形起伏程度,杂噪比越小,检测的虚警概率越大.

在低杂噪比时(0 dB),由于噪声在干涉相位图中的输出占很大一部分,地杂波中一部分相位起伏变化小的点会落入幅度滤波门限中.用小斜率(0.1)相位门限滤波,虚警概率小于高杂噪比时的情形.实际上,此时滤去了淹没在噪声中的地杂波干涉相位信息,该部分的虚警概率应该由更高的相位门限滤除.

采用文中设计的关于干涉相位图统计量的指数函数进行滤波,在高杂噪比时效果一般,甚至不如幅度相位门限滤波的效果;但在低杂噪比时,体现出明显优势.文中从统计量的角度提出了这种滤波方法,姑且不去讨论它的严谨性,旨在给出一种思路、一种见解,在基于 ATI 方法的动目标检测中可能存在类似或者和本文相去甚远的经验公式,找到它也许可以更加有利于实现 GMTI.

5　结　论

1) 本文对基于 ATI 方法进行动目标检测输出的干涉相位分布图进行了详细分析,提出了在干涉前单通道获得的图像域中进行能量梯度滤波的方法,有效地降低了动目标检测的虚警概率.地杂波等效速度越小,该方法的效果越显著.

2) 一定的虚警概率条件下,当系统杂噪比较大时,RCS 起伏程度对动目标径向最小可检测速率影响较大;当系统杂噪比较小时,由于噪声在干涉相位图中输出能量较大,RCS 起伏程度对动目标径向最小可检测速率的影响相对减弱.

3) 相对于 RCS 起伏现象,雷达的杂噪比对动目标检测虚警概率的影响更为严重,降低接收机的噪声,对降低动目标检测的虚警概率有着非常重要的意义.

参考文献 (References)

[1] Livingstone C E, Thompson A A. The moving object detection experiment on RADARSAT-2[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2004, 30(3): 355－368

[2] Whelan D A. Discoverer II program summary[C]// IEEE National Radar Conference-Proceedings. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2000: 7－8

[3] Steyskal H, Schindler J K. Pattern synthesis for TechSat21-a distributed space-based radar system [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003,45(4):19－25

[4] 张有为,李少洪. 雷达系统分析[M]. 北京:国防工业出版社,1981: 145
Zhang Youwei, Li Shaohong. Radar system analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1981:145(in Chinese)

[5] 方再根. 计算机模拟和蒙特卡洛方法[M] . 北京:北京工业大学出版社,1988: 297－303
Fang Zaigen. Computer simulation and the Monte Carlo methods[M]. Beijing: Beijing Industry Institute Press, 1988: 297－303(in Chinese)

[6] Goldstein R M, Zebker H A. Interferometric radar measurement of ocean currents[J]. Nature, 1987, 328: 707－709

[7] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京:科学出版社,2001: 204－205
Wei Zhongquan. Synthetic aperture radar satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001:204－205(in Chinese)

(责任编辑:娄　嘉)