

# 基于沿航向干涉的星载双通道合成孔径雷达系统地面运动目标检测技术\*

蔡斌 梁甸农 董臻 杜湘瑜

国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073

**摘要** 目前在轨的星载合成孔径雷达(SAR)系统,大都局限于沿航向排列的两个通道用于地面运动目标检测、测速与重定位。沿航向干涉ATI(along-track interferometry)技术利用两通道雷达图像间动目标和杂波干涉相位的差异,提高了地面慢速、弱小运动目标的检测能力,具有稳健性好,适用范围广,对地面场景RCS(radar cross section)起伏不敏感等特点,是双通道星载SAR系统普遍采用的一种GMTI(ground moving target indication)技术。基于干涉幅度/相位的联合分布和二元假设条件“杂波”及“杂波+动目标”,文中系统地分析了SAR-ATI技术中,常见的单边相位恒虚警检测和独立分布二级恒虚警检测方法,提出了条件分布二级检测和幅度/相位二维联合检测两种恒虚警检测方法,并以最优的基于NP(Neyman-Pearson)准则的似然比检测方法作为其他恒虚警检测方法性能的上限,对其性能进行分析和对比。仿真实验和性能分析结果表明,幅度/相位二维联合恒虚警检测方法稳健性好,实用性强,在低信杂比或低杂噪比条件下,检测性能良好。

**关键词** 合成孔径雷达 地面运动目标检测 沿航向干涉 恒虚警检测 概率密度函数

星载SAR-GMTI技术将高分辨率合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像技术与GMTI(ground moving target indication)技术相结合,可以获取更为丰富的地面场景和运动目标信息,具有地面(海面)大面积侦察、监视和运动目标检测、跟踪、定位的能力,得到最有价值的战场情报,同时,对于监测缓慢运动的洋流、冰川、海上漂浮物也有突出的性能。然而,目前在轨的星载合成孔径雷达系统,例如TerraSAR-X系统(德国)和RADARSAT-2系统(加拿大)等,大都局限于两个通道用于地面动目标检测、测速与重定位。经典的SAR-ATI技术原理简单,稳健性好,适用范围广,对地面场景RCS(radar cross section)起伏不敏感,具有地面运动目标检测、测速和重定位能力,是双通道星载SAR普遍采用的一种GMTI技术。

星载双通道SAR-ATI技术的工作原理是:单星任意两个沿航向排列的接收通道(双天线或单天线双相位中心),独立接收雷达回波,通道间距离称为沿航向基线。双通道回波在同一观测几何条件下进行单/双站SAR成像,经通道均衡和图像对配准等处理步骤。在理想条件下,地面静止场景杂波图像间相位相同,可以完全抵消;由于前后两次观测获取的图像存在较短的时延(由沿航向基线决定),地面目标的切航向运动引起的雷达观测斜距的差异,导致两通道动目标图像间存在相位差异。图像对经干涉处理后,动目标相位差可用于动目标检测、测速和重定位。

在近20年时间里,国内外多家研究机构针对星载SAR-ATI技术开展了较为深入的研究,取得了一系列的研究成果。文献[1]从性能指标出发对SAR-ATI技术的动目标图像散焦、动目标检测和

2009-05-08 收稿, 2009-06-18 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 60902092)和国防预研基金(批准号: 9140A21020609KG0161)资助项目  
通信作者, E-mail: caibin2004@yahoo.com.cn

目标重定位等进行了系统地研究. Gierull<sup>[2,3]</sup>将地面场景划分为均匀区域、一般非均匀区域和极度非均匀区域三种类型,给出了相应的干涉幅度和相位的联合概率密度函数,提出了一种幅度和相位二级恒虚警检测方法(constant false alarm rate, CFAR). Chiu<sup>[4]</sup>提出了一种非参数恒虚警检测方法,采用直方图对实际干涉数据的分布进行拟合,替代理论的幅度/相位联合概率密度函数,增强了检测方法实用性. Meyer等<sup>[5]</sup>提出了将地面场景和动目标先验信息集成进 SAR-ATI 检测技术中,应用于城区和高速公路的交通监视.其中包括了典型军事/民用目标的后向散射系数和地面公路交通网中道路的宽度、道路等级和最大限速范围等信息,提高运动目标检测、测速和重定位性能.实际上,在一般军事/民用的应用背景中,典型动目标的 RCS 可以通过实测试验或电磁建模方法得到,而大量的动目标会限制在地面公路上运动,这种集成先验信息的方法是适合于理论研究和工程化应用背景的.

严格意义来说, SAR-ATI 不是一种杂波抑制方法,其通过复图像对干涉,对消了杂波图像相位,却不会像其他杂波抑制类方法一样抑制杂波能量,提高图像的信杂比(signal-to-clutter ratio, SCR). 杂波能量极大地限制了 SAR-ATI 的性能和应用,随着信杂比的降低,动目标检测、测速和重定位性能会大大下降<sup>[6]</sup>. 另一方面,对 ATI 而言,加性噪声(一般用杂噪比来衡量)会引起杂波图像间的去相关,在低杂噪比(clutter-to-noise ratio, CNR)区域,例如海面、湖泊和平整的道路等,杂波图像间相干系数会降低至 0.8 以下,检测性能较差. 针对低信杂比或低杂噪比条件,本文充分利用干涉幅度和相位信息,形成二级或二维检测函数,降低了虚警概率,提高了检测性能,扩大了测速范围.

## 1 “杂波”和“杂波+动目标”假设条件下干涉幅度和相位的分布

本文主要假设前提为:(1)地面场景同质均匀,无杂波起伏,则杂波图像服从复 Gauss 分布.(2)动目标设为点目标,常用的动目标统计模型包括确定型目标模型(Swerling 0 模型)和 Gauss 型目标模型(Swerling I 模型),本文以确定型动目标模型为主,Gauss 型模型可同理推广.(3)经通道均

衡后,两通道图像间幅度/相位不一致性已得到有效抑制.(4)经多视处理后,SAR 图像分辨率大于目标尺寸,即单个像素内既包含杂波也包含动目标.(5)SAR 图像域的 GMTI 方法与传统的基于回波域的方法的信杂比和杂噪比的定义有很大不同,详细定义方法见文献[7].(6)设定二元假设条件,假设  $H_0$ :“杂波”;假设  $H_1$ :“杂波+动目标”.

基于上述假设前提,在  $H_0$  假设条件下,干涉幅度和相位的联合概率密度函数(probability density function, PDF)是<sup>[2]</sup>,

$$f_c(\eta, \Phi) = \frac{2n^{n+1}\eta^n}{\pi\Gamma(n)(1-\rho^2)} \cdot \exp\left(\frac{2n\eta\rho\cos\Phi}{1-\rho^2}\right) \cdot K_{n-1}\left(\frac{2n\eta}{1-\rho^2}\right) - \pi < \Phi \leq \pi, \eta \geq 0 \quad (1)$$

其中,  $\Phi$  为干涉相位,  $\eta$  为归一化干涉幅度.  $\rho$  为相干系数,  $n$  为等效多视视数,  $\Gamma(\cdot)$  为 gamma 函数,  $K_{n-1}$  是第二类  $n-1$  阶修正 Bessel 函数.  $f_c(\eta, \Phi)$  是  $n, \rho$  的函数. 对(1)式中  $\eta, \Phi$  进行积分,可得到相位和幅度的单边概率密度函数为

$$f_c(\Phi) = \frac{\Gamma(n+1/2)(1-\rho^2)^n \rho \cos(\Phi)}{2\sqrt{\pi}\Gamma(n)(1-\rho^2 \cos^2(\Phi))^{(n-1/2)}} + \frac{(1-\rho^2)^n}{2\pi} \cdot {}_2F_1(n, 1; 1/2; \rho^2 \cos^2(\Phi)) - \pi < \Phi \leq \pi \quad (2)$$

$$f_c(\eta) = \frac{4n^{n+1}\eta^n}{\Gamma(n)(1-\rho^2)} I_0\left(\frac{2n\eta\rho}{1-\rho^2}\right) \cdot K_{n-1}\left(\frac{2n\eta}{1-\rho^2}\right) \eta \geq 0 \quad (3)$$

其中,  ${}_2F_1(\cdot)$  为 Gauss 合流超几何函数,  $I_0(\cdot)$  为零阶第一类修正 Bessel 函数.

Kullback-Leibler(KL)散度也叫 KL 熵,是两个概率密度函数间相似程度的度量. 定义如下

设  $p(x), q(x)$  是随机变量  $x$  的两种概率密度函数,则两者之间 KL 散度是,

$$KL[p(x), q(x)] = \int p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx \quad (4)$$

KL 散度主要的特性是:其值必定大于等于零,当且仅当  $p(x) = q(x)$  时,其值等于零. 由于(4)式是非对称的,即  $KL[p, q] \neq KL[q, p]$ ,因此本文定义

一个对称的 KL 散度

$$KL[p(x), q(x)] = \int p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx + \int q(x) \log \frac{q(x)}{p(x)} dx \quad (5)$$

KL 散度的重要应用就是用来度量多变量概率密度函数中各分量相互独立的程度. 本小节就采用 KL 散度对两种假设条件下的幅度和相位的独立程度进行分析, 则对  $H_0$  假设, 取联合 PDF 和单边 PDF 乘积的 KL 散度:

$$KL(f_c(\eta, \Phi), f_c(\eta) \cdot f_c(\Phi)) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} f_c(\eta, \Phi) \log \left[ \frac{f_c(\eta, \Phi)}{f_c(\eta) \cdot f_c(\Phi)} \right] d\eta d\Phi + \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} f_c(\eta) \cdot f_c(\Phi) \log \left[ \frac{f_c(\eta) \cdot f_c(\Phi)}{f_c(\eta, \Phi)} \right] d\eta d\Phi \quad (6)$$

由于幅/相联合分布及单边分布较为复杂, (6)式中的积分难以得到解析表达形式, 因此仍采用数值积分的方法进行分析. 从(4)–(6)式可以看出, 幅度和相位的单边 PDF 和联合 PDF 是视数  $n$  和相关系数  $\rho$  的函数. 图 1 给出了(6)式中 KL 散度随  $n$  和  $\rho$  的变化曲线,  $1 \leq n \leq 25$ ,  $0 \leq \rho \leq 1$ . 从图中可以看出: 当  $\rho$  较大,  $n$  较小时, KL 散度较大; 当  $n, \rho$  均较大时, KL 散度趋近于 0, 但是这种条件在实际中难以满足. 总的来说, 在大部分  $(n, \rho)$  区间内, 联合 PDF 和单边 PDF 乘积的 KL 散度是大于零的. 换言之, 在  $H_0$  假设下, 干涉幅度/相位的联合分布中, 幅度和相位不能视为相互独立的分量.

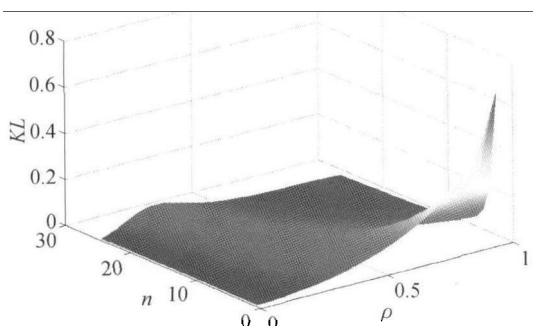


图 1 幅度/相位联合 PDF 和单边 PDF 乘积的 KL 散度随  $n$  和  $\rho$  的变化曲线

当多视视数较大时, 在“杂波+动目标”假设下, 幅度/相位的联合概率密度函数为<sup>[3]</sup>,

$$f_{c+m}(\eta, \Phi) = \frac{2n^{\pi-1} \eta ((\eta - \delta \cos(\Phi - \Phi_v))^2 + \delta^2 \sin^2(\Phi - \Phi_v))^{\frac{\pi-1}{2}}}{\pi \Gamma(n) (1 - \rho^2)} \exp\left(\frac{2n\rho(\eta \cos(\Phi) - \delta \cos(\Phi_v))}{1 - \rho^2}\right) K_{\pi-1}\left(\frac{2n \sqrt{(\eta - \delta \cos(\Phi - \Phi_v))^2 + \delta^2 \sin^2(\Phi - \Phi_v)}}{1 - \rho^2}\right) \quad (7)$$

其中,  $\Phi_v$  为动目标干涉相位,  $\delta$  表示信杂比.  $f_{c+m}(\eta, \Phi)$  为  $n, \rho, \Phi, \delta$  的函数. (7)式中幅度/相位的单边分布难以得到解析表达式, 本文采用数值积分的方法对幅/相单边分布及检测概率等进行计算.

## 2 几种恒虚警检测方法 with 最优的基于 NP 准则的似然比检测方法

### 2.1 单边相位恒虚警检测方法

单边相位恒虚警检测方法, 是经典 SAR-ATI 技术通常采用的一种动目标恒虚警检测方法, 其检测子为 ATI 干涉相位. 根据系统设定的恒虚警概率  $P_{fa} = \alpha$ , 由(2)式及下文(8)式计算相位检测门限, 当待检测像素点干涉相位超过检测门限时, 判决为该像素包含动目标. (2)式中参数  $n, \rho$  由实测数据估计<sup>[2]</sup>, 相应的虚警概率  $P_{fa}$ 、检测门限  $\Phi_{th}$  和检测概率  $P_d$  计算公式如下

$$P_{fa} = 2 \int_{\Phi_{th}}^{\pi} f_c(\Phi) d\Phi = \alpha \quad (8)$$

$$P_d = 2 \int_{\Phi_{th}}^{\pi} f_{c+m}(\Phi) d\Phi \quad (9)$$

首先, 如文献[2, 3, 5]所述, 在单边相位恒虚警检测方法中, 对于一般性的虚警概率需求 ( $P_{fa} \leq 10^{-5}$ ), 多视处理视数要在 4 视以上, 才能获得有效的检测结果. 本文选择  $n=10$ , 对几种检测方法的性能进行分析和对比. 其次, 在星载 SAR-ATI 技术的处理流程中, 典型的去相关因素包括图像配准误差去相关、通道幅度/相位不一致性去相关、Doppler 质心去相关、时间去相关、成像误差去相

关和加性热噪声去相关等. 本节主要在低信杂比和低杂噪比条件下, 对几种检测方法性能进行分析和比较, 可暂不考虑杂波图像间的其他去相关因素. 经通道幅度均衡后, 假设两通道 SAR 图像杂噪比近似相等, 则相关系数为

$$\rho = \frac{CNR}{CNR + 1} \quad (10)$$

图 2 给出了假设  $H_0$  和假设  $H_1$  条件下, 单边相位概率密度函数随 SCR 和 CNR 的变化曲线. 仿真参数:  $n=10$ ,  $\Phi_v=1$  rad,  $P_{fa}=10^{-5}$ . 图 2(a) 中  $CNR=10$  dB,  $SCR=10, 5, 0, -5$  dB,  $-\infty$ . 图 2(b) 中  $SCR=0$  dB,  $CNR=10, 5, 0, -5$  dB.

图 2(a) 中, 随着 SCR 的降低,  $f_{c+m}(\Phi)$  的中心逐渐偏离动目标相位  $\Phi_v$ , 向  $f_c(\Phi)$  的中心相位移动, 且方差增大. 图 2(b) 中, 随着 CNR 的下降,  $f_c(\Phi)$  和  $f_{c+m}(\Phi)$  的方差逐渐增大, 且  $f_{c+m}(\Phi)$  的中心会向动目标相位  $\Phi_v$  处移动. 图 3 给出了在不同动目标相位  $\Phi_v$  下, 单边相位检测概率随 SCR 和 CNR 的变化曲线. 仿真参数:  $n=10$ ,  $P_{fa}=10^{-5}$ ,  $\Phi_v=1, 1.5, 2, 2.5$  rad.

图 3(a) 中  $CNR=10$  dB, 图 3(b) 中  $SCR=5$  dB. 从图中可以看出, 即使当  $\Phi_v$  较大时, 单边相位检测方法在低 SCR 或低 CNR 条件下, 检测概率仍然较低, 难以满足系统设计和应用的需求.

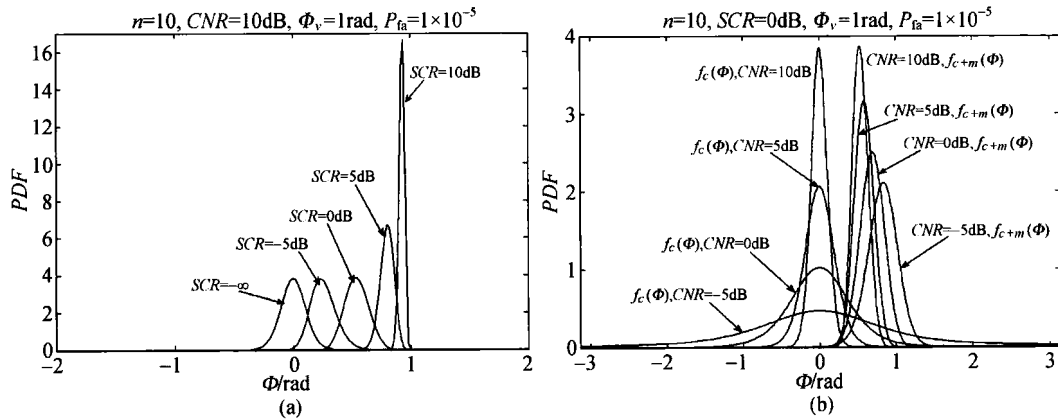


图 2 “杂波”和“杂波+动目标”干涉相位 PDF 随 SCR 和 CNR 的变化曲线  
 $n=10, P_{fa}=10^{-5}, \Phi_v=1$  rad. (a)  $CNR=10$  dB,  $SCR=-\infty, -5, 0, 5, 10$  dB;  
 (b)  $SCR=0$  dB,  $CNR=-5, 0, 5, 10$  dB

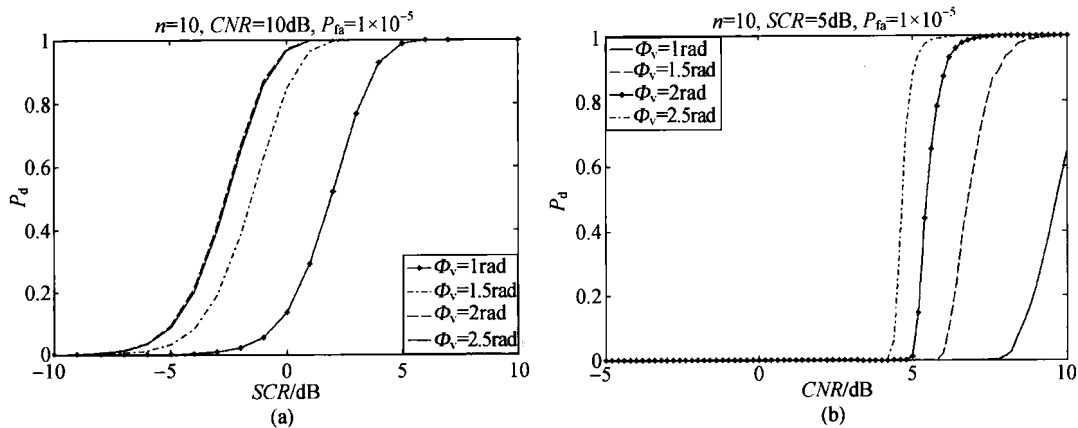


图 3 单边相位检测的检测概率随 SCR 和 CNR 的变化曲线  
 $n=10, P_{fa}=10^{-5}, \Phi_v=1, 1.5, 2, 2.5$  rad. (a)  $CNR=10$  dB; (b)  $SCR=5$  dB

2.2 幅度/相位二级恒虚警检测方法

Gierull<sup>[2]</sup>基于“杂波”干涉幅度和相位相互独立的假设,提出了一种幅度/相位二级CFAR检测方法,提高了检测性能.本小节将对其原理进行简要阐述,指出采用干涉幅度作为一维检测子的可行性,并根据第1节中干涉幅度/相位独立性的分析结果,提出了一种基于条件分布的幅度/相位二级CFAR检测方法;根据对以上两种二级CFAR检测方法的恒虚警门限曲线的分析结果,给出一种幅度/相位二级门限选择的经验性方法,最后对以上几种检测方法的性能进行了分析和对比.

本文称Gierull提出的方法为独立分布二级CFAR检测方法,第一级检测子为干涉相位,第二级检测子为干涉幅度,当待检测数据的干涉相位和幅度都超过恒虚警门限时,则判决为动目标.在恒虚警条件下,ATI干涉幅度/相位二级检测的虚警概率和检测概率可表示为

$$P_{fa} = 2 \int_{\eta_{th}}^{\infty} f_c(\eta) d\eta \cdot \int_{|\Phi_{th}|}^{\pi} f_c(\Phi) d\Phi = \alpha \quad (11)$$

$$P_d = 2 \int_{\eta_{th}}^{\infty} f_{c+m}(\eta) d\eta \cdot \int_{|\Phi_{th}|}^{\pi} f_{c+m}(\Phi) d\Phi = \iint_{(\Phi, \eta) \in U} f_{c+m}(\eta, \Phi) d\eta d\Phi \quad (12)$$

式中,积分区域  $U = \{\eta > \eta_{th}, |\Phi| > |\Phi_{th}|\}$ .实际上,该方法中包含两个前提条件:在一般信杂比条件下,动目标RCS一般大于均匀地面场景的

RCS;另一方面,在  $H_0$  假设下,干涉幅度/相位的联合概率密度函数,其干涉相位较大时,干涉幅度较小.实际中,第一个前提条件在大部分均匀场景区域,对于大部分感兴趣的军事目标和民用目标而言,都是满足的.但在地面场景的一般非均匀或者极度非均匀区域,比如随风变化的大面积植被区域、城区或地面地形突变的强散射区域等,这一前提条件不一定能够满足.基于第1节中的假设条件和(1), (2), (7)式,本文采用仿真方法,对以上两个假设前提进行论述.

图4给出了  $H_0$  和  $H_1$  假设条件下,干涉幅度的PDF随SCR和CNR的变化曲线.仿真参数部分同图2,且图4(b)中  $SCR = 5 \text{ dB}$ ,  $CNR = 10, 5, 0, -5 \text{ dB}$ .从图中可以看出,信杂比和杂噪比对  $H_0$  和  $H_1$  假设下干涉幅度的分布有一定的影响,但“杂波+动目标”的干涉幅度均大于“杂波”的干涉幅度,干涉幅度可以作为一维检测子对动目标和杂波进行区分,第一个前提假设是可以满足的.在恒虚警条件下,ATI干涉单边幅度检测的虚警概率和检测概率可表示为

$$P_{fa} = \int_{\eta_{th}}^{\infty} f_c(\eta) d\eta = \alpha \quad P_d = \int_{\eta_{th}}^{\infty} f_{c+m}(\eta) d\eta \quad (13)$$

其中,  $\eta_{th}$  为幅度检测门限.图5给出了在不同  $\Phi$  下,单边幅度CFAR检测的检测概率随SCR和CNR的变化曲线,部分仿真参数同图3,且图3(a)  $CNR = 10 \text{ dB}$ , (b)  $SCR = 0 \text{ dB}$ .

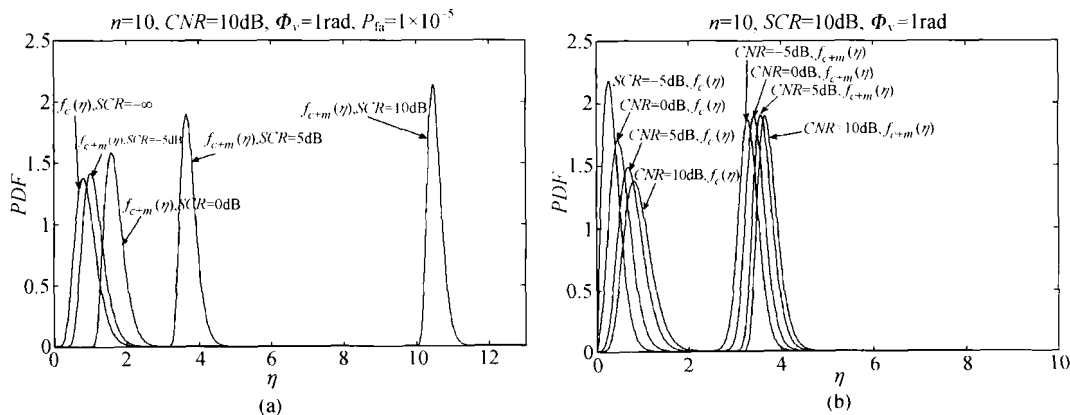


图4 “杂波”和“杂波+动目标”干涉幅度PDF随SCR和CNR变化曲线  
 $n=10, P_{fa} = 10^{-5}, \Phi_v = 1 \text{ rad}$ . (a)  $CNR = 10 \text{ dB}, SCR = -\infty, -5, 0, 5, 10 \text{ dB}$ ;  
 (b)  $SCR = 5 \text{ dB}, CNR = -5, 0, 5, 10 \text{ dB}$

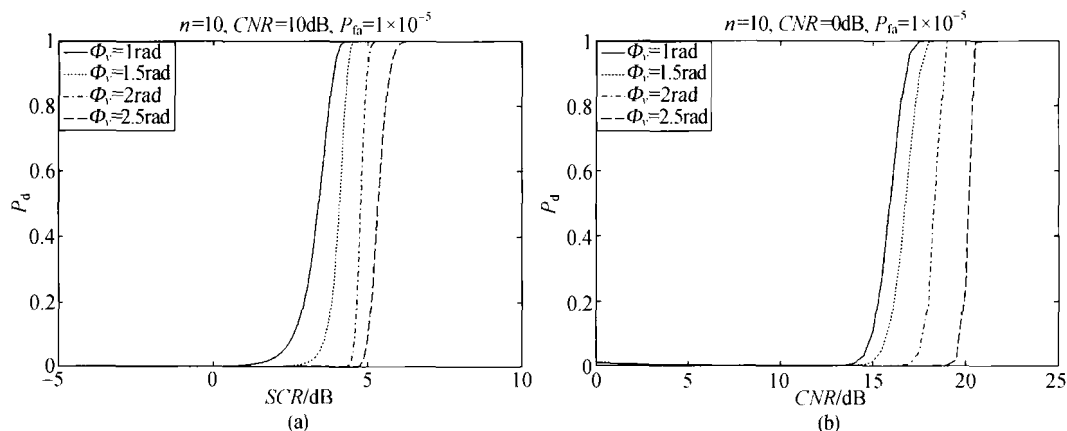


图 5 幅度单边检测的检测概率随 SCR 和 CNR 的变化曲线

$n=10, P_{fa}=10^{-5}, \Phi_v=1, 1.5, 2, 2.5 \text{ rad}$ . (a)  $CNR=10 \text{ dB}$ ; (b)  $SCR=0 \text{ dB}$

从图 5 中可以看出，在低 SCR 或低 CNR 条件下，当虚警概率较小时，干涉幅度单边检测的检测概率很低，无法满足系统要求，难以实用，必须要和相位或其他检测子结合起来使用。

根据前文的分析结果，在“杂波”幅/相联合分布中，幅度和相位并非独立的，干涉幅度的分布会随相位而变化，则“杂波”的幅/相联合 PDF 可分解为，

$$f_c(\eta, \Phi) = f_c(\Phi) f_c(\eta | \Phi) \quad (14)$$

图 6 给出了在不同的  $\Phi$  下， $f_c(\eta | \Phi)$  的变化曲线。仿真参数： $\Phi=0.5, 1, 2, 3 \text{ rad}$ ， $n=10$ ， $CNR=10 \text{ dB}$ 。由于  $f_c(\eta, \Phi)$  是沿  $\Phi$  轴对称分布的，图 6 中

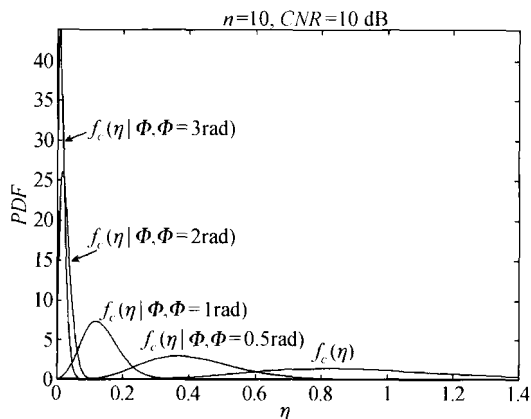


图 6 给出了在不同的  $\Phi$  下， $f_c(\eta | \Phi)$  和  $f_c(\eta)$  的变化曲线

$n=10, P_{fa}=10^{-5}, CNR=10 \text{ dB}$ ,  
 $\Phi=0.5, 1, 2, 3 \text{ rad}$

$\Phi$  取正值或负值应得到相同的结果，本文选在  $\Phi$  正半轴取值。从图中可以看出，当  $\Phi \rightarrow \pi$  时， $f_c(\eta | \Phi)$  的中心会向  $\eta=0$  方向移动，方差降低，信号分布聚集，拖尾减小；当  $\Phi \rightarrow 0$  时， $f_c(\eta | \Phi)$  的中心会向  $\eta$  正半轴方向移动，方差增加，信号分布扩散，拖尾增大。因此，一方面，当相位较大时，干涉幅度会降低，有利于利用幅度对杂波和动目标进行区分；另一方面，采用单边分布函数进行二级检测是一种次优的方法，幅度门限的选取应随相位门限而变化，而不应整个相位区间内采用单一的幅度门限。

据此，本文给出了一种基于条件概率密度函数的二级检测方法，第一级为单边相位检测，第二级采用相位门限约束下的条件幅度概率密度函数，来计算幅度检测门限。则对应于(11)，(12)式，条件分布二级检测的虚警概率、检测概率和检测门限计算公式如下：

$$P_{fa} = 2 \int_{|\Phi_{th}|}^{\pi} f_c(\Phi) d\Phi \cdot \int_{\eta_{th}}^{\infty} f_c(\eta | \Phi_{th}) d\eta = \alpha \quad (15)$$

$$P_d = 2 \int_{|\Phi_{th}|}^{\pi} f_c(\Phi) d\Phi \cdot \int_{\eta_{th}}^{\infty} f_c(\eta | \Phi_{th}) d\eta = \iint_{(\Phi, \eta) \in U} f_{c+m}(\eta, \Phi) d\eta d\Phi \quad (16)$$

式中，积分区域  $U = \{\eta > \eta_{th}, |\Phi| > |\Phi_{th}|\}$ 。从(11)，(15)式可以看出，在幅度/相位二级恒虚警检测方法中，虚警概率可在幅度和相位两级检测中进行分配，其乘积满足系统的虚警概率要求，则在整个幅度/相位二维平面内将有无数组  $(\eta_{th}, \Phi_{th})$  可供

选择, 检测概率也会随之变化. 图7给出了“杂波”和“杂波+信号”的二维联合PDF, 独立分布的二级检测中恒虚警门限曲线和条件分布的二级检测中的恒虚警门限曲线. 仿真参数:  $n=10$ ,  $CNR=10$  dB,  $SCR=0$  dB,  $P_{fa}=10^{-5}$ ,  $\Phi_v=1$  rad. 从图7中可以看出: (1) 在第1节的假设前提下, “杂波”的联合概率密度函数成“钟形”分布在  $\eta-\Phi$  平面上, 沿  $\Phi$  轴对称; 而“杂波+动目标”的联合概率密度函数集中在  $\Phi_v$  附近. (2) 相比于独立分布二级检测方法, 条件分布二级检测方法的恒虚警门限曲线的形状, 更接近于“杂波”联合概率密度函数的等概率密度线. 在相同的虚警概率约束下, 条件分布二级检测能更好的将“杂波”和“杂波+动目标”信号分离, 提高检测性能.

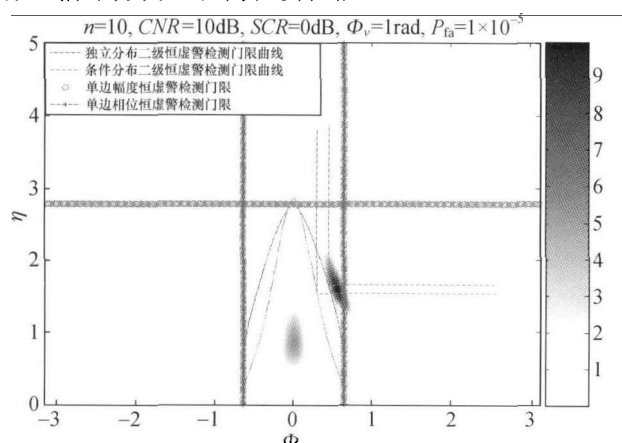


图7 “杂波”和“杂波+动目标”幅相联合分布, 单边相位/单边幅度检测门限, 独立分布/条件分布二级检测恒虚警门限曲线

$n=10$ ,  $P_{fa}=10^{-5}$ ,  $CNR=10$  dB,  $SCR=0$  dB,  $\Phi_v=1$  rad

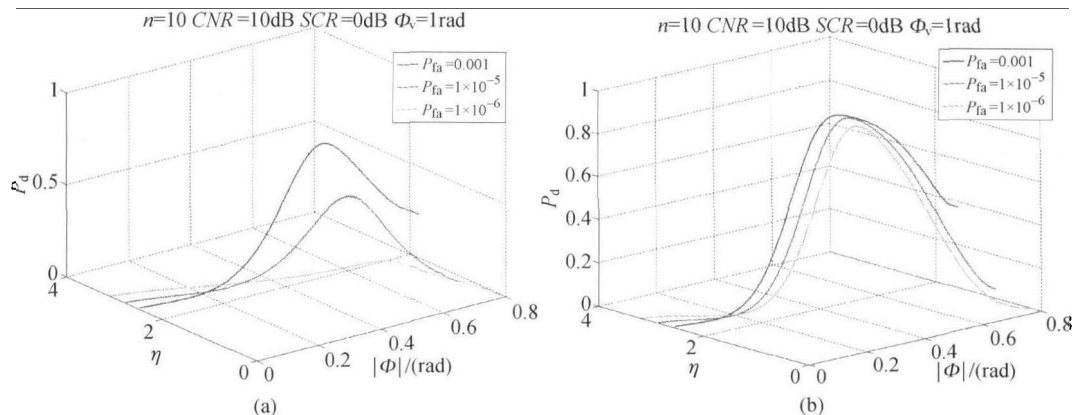


图8 在  $\eta-|\Phi|$  平面内, 恒虚警门限对应的检测概率随虚警概率变化曲线

$n=10$ ,  $CNR=10$  dB,  $SCR=0$  dB,  $\Phi_v=1$  rad,  $P_{fa}=10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ . (a) 独立分布二级恒虚警检测; (b) 条件分布二级恒虚警检测

如上文所述, 在总的虚警概率条件约束下, 对于两种二级恒虚警检测方法, 在  $\eta-\Phi$  二维平面上, 将有无数组门限  $(\eta_{th}, \Phi_{th})$  可供选择. 文献[2]给出了一种根据经验和系统要求选择二级门限的方法, 例如设置总的虚警概率为  $P_{fa}=10^{-6}$ , 则分配给单边相位检测子的虚警概率为 0.005, 据此计算相应的相位检测门限和幅度检测门限, 以及总的检测概率. 另一方面, 二级门限的选取也要考虑到系统设计需求和先验信息, 系统设计需求包括, 动目标最小可检测速度 (minimum detectable velocity, MDV)、虚警概率、检测概率等; 先验信息包括动目标的 RCS 和地面场景类型、平均后向散射强度等. 一般情况下, 可首先设置相位检测门限, 以满足 MDV, 进而根据恒虚警约束条件, 求取幅度检测门限, 提高检测性能.

本文采用仿真的方法, 对以上两种二级 CFAR 检测方法的恒虚警门限曲线性质进行了分析, 以优化总检测概率为目的, 给出一种二级门限选取的经验性方法. 如(1), (2), (3), (11), (15)式所示, 两种二级 CFAR 检测方法的恒虚警门限曲线会随  $n$ ,  $SCR$ ,  $CNR$ ,  $P_{fa}$ ,  $\Phi_v$  等参数变化. 图8给出了在不同恒虚警概率约束下, 两种方法的检测概率在整个恒虚警检测门限上的变化规律. 仿真参数:  $n=10$ ,  $CNR=10$  dB,  $SCR=0$  dB,  $\Phi_v=1$  rad,  $P_{fa}=10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ . 图8(a)独立分布二级 CFAR 检测; 图8(b)条件分布二级 CFAR 检测.

从图8可以看出: 在整条恒虚警门限曲线上, 检测概率有较大的变化, 存在一个最大值, 而最大

值一般会出现相位门限  $|\Phi_{th}|$  区间的中后部。因此，一方面，在已知动目标参数和“杂波+动目标”概率密度函数的情况下，可选取在获得最优检测性能的幅度/相位门限；另一方面，根据大量仿真实验所得经验，在相位门限区间的中后部的一个区间之内，检测概率较高，而在相位门限区间的两端，检测概率较低。据此，本文提出了一种二级门限的经验性选取方法，首先，计算出相位检测门限的区间范围，实际上，相位门限  $|\Phi_{th}|$  区间左侧端点应为 0 相位值，右侧端点应为单边相位检测门限；其次，对相位门限区间两端进行适当裁减；最后，对剩余相位门限区间取其中心点，作为相位门限检测点，根据其余输入参数，可相应计算幅度检测门限和其他性能指标。

### 2.3 幅度/相位二维联合恒虚警检测方法

从图 8 可以看出：在两种二级检测方法中，一方面，如果根据经验或系统设计需求设置硬性的二级检测门限，会导致检测概率很低，对慢速运动目标和低 RCS 的动目标失去了检测能力；另一方面，对二级检测门限进行优化，需要已知动目标的参数，实际当中难以适用，也失去了其恒虚警性质，如果根据多次仿真结果的经验值进行选取，也难以达到最优的检测性能。据此，本文根据“杂波”的幅度/相位二维联合分布，基于 Neyman-Pearson (NP) 准则的似然比检验，提出了一种幅度/相位二维检测方法，提高了检测性能。根据 NP 准则，对于给定的  $P_{fa} = \alpha$ ，定义似然比检测如下

$$\Lambda_{2D}(\eta, \Phi) = \frac{f(\eta, \Phi | H_1)}{f(\eta, \Phi | H_0)} = \frac{f_{c+m}(\eta, \Phi)}{f_c(\eta, \Phi)} > \gamma, \quad \gamma > 0 \quad (17)$$

其中门限  $\gamma$  由下式得到，

$$P_{fa} = \iint_{\Lambda_{2D}(\eta, \Phi) > \gamma} f_c(\eta, \Phi) d\eta d\Phi = \alpha \quad (18)$$

实际中，动目标参数和“杂波+动目标”的分布  $f_{c+m}(\eta, \Phi)$  难以得到，可以假设其在整个  $\eta-\Phi$  平面上服从均匀分布，即令

$$f_{c+m}(\eta, \Phi) = C \quad (19)$$

其中， $C$  为实常数。则(17)式可重写为

$$f_c(\eta, \Phi) < \gamma' \quad (20)$$

则相应虚警概率和检测概率的计算公式为，

$$P_{fa} = \iint_{f_c(\eta, \Phi) < \gamma'} f_c(\eta, \Phi) d\eta d\Phi = \alpha \quad (21)$$

$$P_d = \iint_{f_c(\eta, \Phi) < \gamma'} f_{c+m}(\eta, \Phi) d\eta d\Phi \quad (22)$$

从上式可以看出，检测门限只与“杂波”的分布和参数相关，与动目标的分布和参数无关，则上述幅度/相位二维检测器具备恒虚警性质，其详细的恒虚警门限曲线和检测性能的分析结果见下面部分。

### 2.4 最优的基于 NP 准则的似然比检测方法

在幅/相二维联合 CFAR 检测方法中，由于无法确知动目标参数和“杂波+动目标”的幅/相二维分布，只能假设其在  $\eta-\Phi$  平面内服从均匀分布。从(7)式可以看出：“杂波+动目标”幅/相的二维联合分布，是  $n$ ， $\rho$ ， $\Phi_v$  和 SCR 的函数。其中， $n$ ， $\rho$  可以由 SAR 图像对和干涉相位估计得到<sup>[2]</sup>。但信杂比 SCR 和动目标速度  $\Phi_v$ ，获取较为困难。

根据文献[7]中信杂比的定义，动目标 RCS 和地面场景的平均后向散射系数获取较为困难。实际上，国内外多家研究机构对不同类型地面场景的平均后向散射系数已做过较为深入的研究，给出了随地表类型、极化方式、波段和入射角等参数变化规律，实际计算中可参考相关的研究成果和文献。另一方面，地面运动目标的 RCS 与方位角、入射角、极化方式和波段等因素有关，包括国防科学技术大学、中国科学院计算研究所、西安电子科技大学在内的多家机构，针对典型军事/民用的运动目标的电磁建模问题，进行过深入的研究，取得了较多的研究成果。基于以上的研究成果，在一定条件下，可对动目标的先验信杂比，进行较为粗略的估计。

再者，在实际应用中，无论是在城市、郊外、沙漠还是具有复杂地形的山区中，地面目标大部分情况下都是运动在公路之上的，在没有任何道路或崎岖的山岭运动的地面目标较少。在这种前提条件下，可以充分利用公路交通网和数字高程图的先验信息，精确估计动目标方位向偏移量、径向速度及



动目标相位, 提高动目标检测性能, 进一步可用于精确的动目标测速和方位向重定位。

根据文献[5, 8], 在系统一发双收前提下, 动目标干涉相位、径向速度和其方位向偏移量应满足如下关系

$$\Phi_v = -\frac{\Delta a 2\pi B}{R_0 \lambda} \quad (23)$$

$$V_r = \frac{\Phi_v \lambda V_s}{2\pi B} \quad (24)$$

其中,  $\Delta a$  为方位向偏移量,  $V_s$  为卫星速度,  $B$  为沿航向基线,  $\lambda$  为波长,  $V_r$  为动目标径向速度在斜距向的投影分量,  $R_0$  为雷达至地面目标斜距。根据(23), (24)式, 动目标干涉相位、目标地面径向速度及其方位向偏移量成确定性比例关系, 可相互转化。首先, 由现有的 GIS 数据或者光学、SAR 图像得到地面道路的先验信息, 包括公路位置、公路等级、公路宽度和最大限速等参数。其次, 根据(23), (24)式, 由卫星参数和雷达参数等, 我们可以得到图像中道路沿方位向两侧每一个采样点位置所对应的偏移量  $\Delta a$  和相位  $\Phi_v$ , 详细过程可参见文献[5, 8]。

根据以上分析得到动目标先验信息信杂比 SCR 和动目标相位  $\Phi_v$ , 根据 NP 准则, 对于给定的  $P_{fa} = \alpha$ , 定义似然比检测如下

$$\Lambda_{NP}(\eta, \Phi) = \frac{f(\eta, \Phi | H_1)}{f(\eta, \Phi | H_0)} = \frac{f_{c+m}(\eta, \Phi)}{f_c(\eta, \Phi)} > \mu \quad (25)$$

其中门限  $\mu$  可由下式确定

$$P_{fa} = \int_{\mu}^{\infty} f(\Lambda_{NP} | H_0) d\Lambda_{NP} = \int_{\{\eta, \Phi | \Lambda_{NP} > \mu\}} f_c(\eta, \Phi) d\eta d\Phi = \alpha \quad (26)$$

则相应的检测概率为

$$P_d = \int_{\mu}^{\infty} f(\Lambda_{NP} | H_1) d\Lambda_{NP} = \int_{\{\eta, \Phi | \Lambda_{NP} > \mu\}} f_{c+m}(\eta, \Phi) d\eta d\Phi \quad (27)$$

从(26)式可以看出, 虚警概率不仅与“杂波”的分

布和参数有关, 还与动目标的参数有关, 因此, 最优的基于 NP 准则的似然比检测方法不具备恒虚警性质。

(25)式中的似然比检测函数, 表达形式较为复杂, 难以化简, 本文仍采用数值积分的办法, 计算其检测门限和检测概率。图 9 给出了“杂波”和“杂波+动目标”二维联合 PDF, 条件分布二级、二维联合 CFAR 检测和基于 NP 准则的似然比检测方法的恒虚警检测门限曲线, 仿真参数同图 7。较二级 CFAR 检测中硬性设置二级门限, 二维 CFAR 方法和基于 NP 准则的似然比检测方法, 能够在  $\eta-\Phi$  二维平面, 将“杂波”和“杂波+动目标”的信号更好的进行分离。特别是幅/相二维联合检测方法, 不需要已知动目标先验信息, 保持了 CFAR 特性, 能够将检测概率最大化。

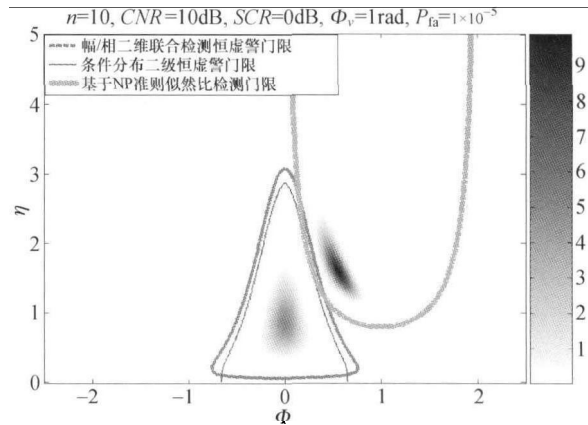


图 9 “杂波”和“杂波+信号”的二维联合 PDF 及条件分布二级 CFAR、二维联合 CFAR 和基于 NP 准则的似然比检测方法的恒虚警门限曲线

$n=10, CNR=10 \text{ dB}, SCR=0 \text{ dB}, P_{fa}=10^{-5}, \Phi_v=1 \text{ rad}$

图 10 给出了独立分布二级检测(经验取值/最优门限)、条件分布二级检测(经验取值/最优门限)、幅/相二维联合检测和最优的基于 NP 准则的似然比检测几种检测方法的检测概率随 SCR 和 CNR 的变化曲线。对于两种二级检测方法, 本文采用两种门限选取方法, 一种方法是经验取值, 另一种方法是由“杂波+动目标”的分布得到最优的检测门限, 以此作为性能分析和对比的参照, 仿真参数:  $n=10, P_{fa}=10^{-5}, \Phi_v=1.5 \text{ rad}$ 。图 10(a)  $CNR=5 \text{ dB}$ ; 图 10(b)  $SCR=-3 \text{ dB}$ 。从图中可以看

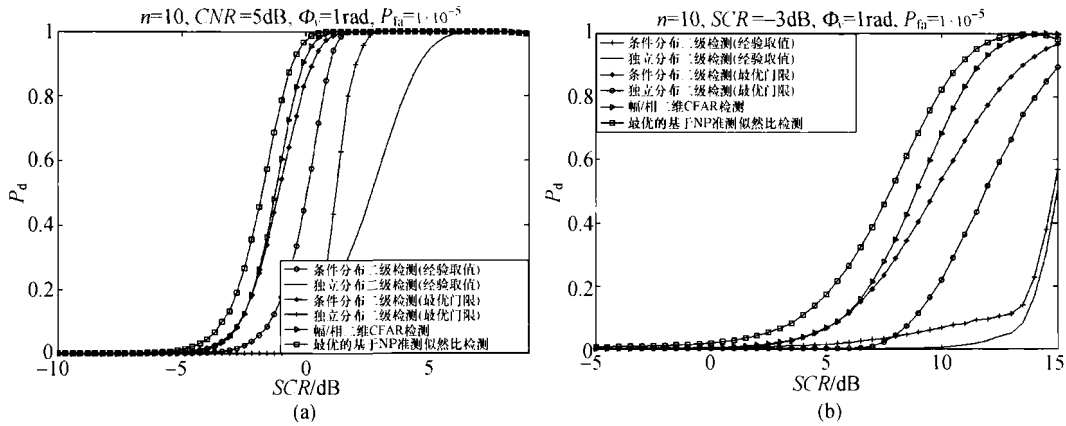


图 10 几种 ATI 检测方法的检测概率随 SCR 和 CNR 的变化曲线

$n = 10, P_{fa} = 10^{-5}, \Phi_v = 1.5 \text{ rad}$ . (a)  $CNR = 5 \text{ dB}$ ; (b)  $SCR = -3 \text{ dB}$

出：最优的基于 NP 准则的似然比检测方法优于其他的检测方法；在一定条件下，条件分布二级检测方法(最优门限)优于二维联合检测方法；以上几种包含幅度检测子方法均优于单边相位检测方法。

### 3 性能分析与对比

#### 3.1 接收机工作特性曲线

衡量检测器的性能的一个重要手段是接收机工作特性曲线(receiver operating characteristic, ROC),

即给定  $P_{fa}$ , 可以求出对应的  $P_d$ , 得到  $P_d - P_{fa}$  之间的对应关系. 图 11 给出了单边相位检测、独立分布二级检测、条件分布二级检测、幅/相二维联合检测和最优的基于 NP 准则的似然比检测几种检测方法的 ROC 曲线. 对于两种二级检测方法, 这里采用的是由“杂波+动目标”的分布得到最优的检测门限. 仿真参数:  $n = 10, \Phi_v = 0.5 \text{ rad}, P_{fa} = 10^{-5}$ . 图 11(a)中  $CNR = 10 \text{ dB}, SCR = 0 \text{ dB}$ ; 图 11(b)中  $CNR = 0 \text{ dB}, SCR = 3 \text{ dB}$ .

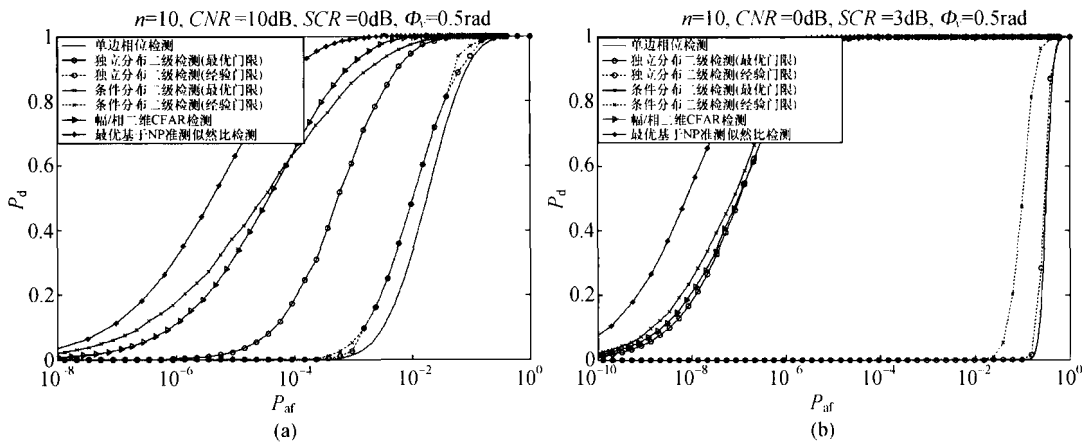


图 11 几种 ATI 检测方法的 ROC 曲线随 SCR 和 CNR 的变化规律

$n = 10, \Phi_v = 0.5 \text{ rad}$ . (a)  $CNR = 10 \text{ dB}, SCR = 0 \text{ dB}$ ; (b)  $CNR = 0 \text{ dB}, SCR = 3 \text{ dB}$

从图中可以看出：最优的基于 NP 准则的似然比检测方法性能最优，在某些 SCR 和 CNR 条件下，条件二级检测方法(最优门限)的性能优于二维联合检测方法；独立分布二级检测方法性能相对较

差；相比于 CNR, SCR 对检测性能的影响更大，在低 SCR 条件下，检测性能急剧下降. 两种二级检测方法(经验门限)性能比单边相位检测性能略好，但相比于其他方法，性能较差.

### 3.2 检测概率随动目标径向速度变化曲线

在一定的系统参数和虚警概率约束下, 检测概率随动目标径向速度变化曲线反映了 GMTI 系统、杂波抑制和检测方法, 对地面运动目标的检测能力, 为系统设计和杂波抑制、检测方法的研究, 提供重要参考. 图 12 给出了单边相位检测、独立分布

二级检测、条件分布二级检测、二维联合检测和最优的基于 NP 准则的似然比检测几种检测方法的检测概率随动目标径向速度变化曲线. 同图 11, 对于两种二级检测方法, 这里采用的是由“杂波+动目标”分布得到最优的检测门限.

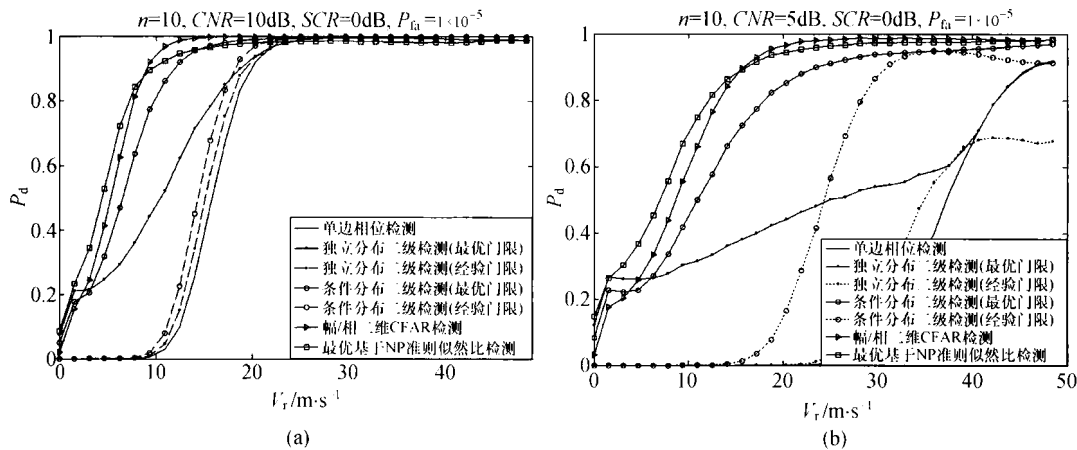


图 12 几种 ATI 检测方法的检测概率随动目标径向速度的变化规律

$n=10, P_{fa}=10^{-5}$ . (a)  $CNR=10\text{ dB}, SCR=0\text{ dB}$ ; (b)  $CNR=5\text{ dB}, SCR=0\text{ dB}$

仿真参数: 卫星速度  $V_s=7.6\text{ km/s}$ , 轨道高度  $H=625.87\text{ km}$ , 中心频率  $9.65\text{ GHz}$ , 脉冲重复频率  $PRF=3.15\text{ kHz}$ , 沿航向基线  $2.4\text{ m}$ , 天线尺寸(长×宽) $5.4\text{ m}\times 0.9\text{ m}$ , 雷达信号带宽  $BW=100\text{ MHz}$ ,  $n=10, P_{fa}=10^{-5}$ . (a)  $CNR=10\text{ dB}, SCR=0\text{ dB}$ ; (b)  $CNR=5\text{ dB}, SCR=0\text{ dB}$ . 从图中可以看出, 在低 SCR 或低 CNR 条件下, 条件分布二级检测、幅/相二维联合检测及最优基于 NP 准则的似然比检测方法可以提高慢速运动目标的检测性能, 扩大测速范围. 但基于经验性门限的二级检测方法, 检测性能较差, 与单边相位检测较为接近.

### 4 结论

本文系统的分析了 SAR-ATI 技术中, 常见的单边相位恒虚警检测和独立分布二级恒虚警检测方法, 并充分利用干涉幅度和相位信息, 提出了条件分布二级检测和幅度/相位二维联合检测两种恒虚警检测方法, 在低信杂比和低杂噪比条件下, 以最优的基于 NP 准则的似然比检测方法作为其他恒虚警检测方法性能的上限, 对其性能进行分析和对比. 我们给出主要结论如下: (1) 在第 1 节假

设前提和低信杂比或低杂噪比条件下, 独立分布二级检测、条件分布二级检测、二维联合检测和最优的基于 NP 准则似然比检测几种检测方法的性能, 均优于干涉相位单边检测. (2) 基于条件分布二级检测方法的性能优于独立分布二级检测方法, 一方面, 其二级门限可在  $(\eta, \Phi)$  二维域内进行调解, 以满足系统需求; 另一方面, 当二级门限选择不恰当时, 检测概率会很低, 检测方法失效. (3) 幅/相二维联合检测方法充分利用了“杂波”和“杂波+动目标”在  $\eta-\Phi$  二维平面上的差异, 其性能优于两种二级检测方法, 且避免了门限选择问题; 与最优的基于 NP 准则似然比检测方法相比, 其不需已知动目标先验信息, 实用性较强. (4) 基于 NP 准则似然比检测方法的性能, 是其他几种 CFAR 检测方法性能的上限, 但是, 一方面, 其需要已知动目标先验信息, 实用较为困难; 另一方面, 其不具有恒虚警性质. (5) 在 ATI 技术的检测方法中, 除了干涉幅度和干涉相位信息外, 还可以将更多信息融合进来, 形成多级或多维检测器, 可以进一步降低虚警概率, 提高检测性能. (6) 本文假设前提为均匀同质且无杂波起伏的场景, 在实际中, 地面场

景可分为均匀同质场景、一般非均匀场景和极度非均匀场景。在后两种场景假设下，“杂波”及“杂波+动目标”的幅度/相位分布、幅度是否适合作为一级(或一维)检测子以及本文中所提出的方法是否适用，还有待于深入研究。

### 参 考 文 献

- 1 Chen CW. Performance assessment of along-track Interferometry for detecting ground moving targets. in Proc. IEEE Radar Conference, Philadelphia, US, April, 2004, 99--104
- 2 Gierull CH. Statistical analysis of multilook SAR interferograms for CFAR detection of ground moving targets. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(4): 691--701
- 3 Gierull CH. Moving target detection with along-track SAR interferometry; A theoretical analysis. Defense R&D OTTAWA Canada, DRDC-OTTAWA-TR-2002-084, 2002
- 4 Chiu S. A constant false alarm rate(CFAR)detector for RADA-RSAT-2 along-track interferometry. Canadian Journal of Remote Sensing, 2005, 31(1): 73--84
- 5 Meyer F, Hinz S, Laika A, et al. Performance analysis of the TerraSAR-X traffic monitoring concept. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2006, 61(3/4): 225--242
- 6 Chiu S. Clutter effects on ground moving target velocity estimation with SAR along-track interferometry. In: Proc IGARSS, Toulouse, France, July, 2003, 1314--1319
- 7 Chiu S, Livingstone C. A comparison of displaced phase centre antenna and along-track interferometry techniques for RADAR-SAT-2 ground moving target indication. Can J Remote Sensing, 2005, 31(1): 37--51
- 8 蔡 斌, 梁甸农, 董臻等. 基于先验信息的分布式星载单基线 SAR/ATI 方法. 国防科技大学学报. 2008, 30(4): 76--81