

一种基于 Hough 变换的宽带雷达目标检测器

夏宇垠 冯大政 李涛

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文针对宽带雷达目标距离单元走动、具有强距离单元的特性,提出了一种基于 Hough 变换的目标检测算法(HD)。该算法分为两步:在第1步中,对过一级门限的高分辨距离像数据做 Hough 变换,并对 Hough 参数空间的所有数据做相应的累积分布函数(CDF)映射;在第2步中求出各个角度若干个最大值的和,并对这些和值做 CDF 映射,选出最大的映射和值作为检测算子。3类飞机实测数据的实验结果表明,与基于散射点密度的广义似然比检测算法相比,该方法检测性能至少有 1.3 dB 的提高。

关键词: 距离扩展目标检测;高分辨距离像;CDF 映射;Hough 变换;顺序统计量

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)11-2755-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01439

Hough-transform-based Detector for Wideband Radar Target

Xia Yu-yin Feng Da-zheng Li Tao

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A new detection scheme based on Hough transform for spatially distributed moving target which range walks and has strong range cells is proposed. The proposed scheme, Hough Detector (HD), consists of two steps. In the first step, a primary threshold is set and any range-time cell of High Resolution Range Profiles (HRRPs) with a value exceeding this threshold is mapped into Hough parameter space and then every Hough cell is refined using its own Cumulative Distribution Function (CDF). In the second step, summations of several strongest cells of every angle in Hough space are calculated, then the summations is mapped by their own CDF. The maximum of the mapped summations is used as the test statistic for target detection. Experimental results for measured data of three planes illustrate that Hough detector achieves at least 1.3 dB improvement comparing with the existing Scatter Density Dependent Generalized Likelihood Rate Test (SDD-GLRT).

Key words: Range-spread target detection; High Resolution Range Profile (HRRP); Cumulative Distribution Function (CDF) mapping; Hough transform; Order statistic

1 引言

相对于窄带雷达,宽带雷达具有低截获,抗杂波能力强,波形和系统设计自由度大等优势,可以获得更为精细的目标结构信息。宽带雷达是雷达技术发展的重要方向,在军事领域有较大的应用潜力,其目标检测问题成为当今的热点^[1-5]。

对于宽带雷达,本文以逆合成孔径雷达(ISAR)为例,其脉冲宽度以纳秒计。尺寸为十几米到几十米的目标(如飞机),对于窄带雷达为点目标,而对于宽带雷达则存在距离扩展。在距离扩展目标检测理论研究领域,不断有成果问世。文献[1,2]研究了均匀、非均匀高斯杂波中距离扩展目标多脉冲重复

周期的检测问题,文献[3]介绍了复合高斯杂波的情况。但上述文献中的目标模型只把窄带目标情况做简单地推广,回避了脉冲重复周期期间的跨距离单元走动^[6],初相起伏等实际问题。文献[4,5]研究了单周期的距离扩展目标检测问题,并没有累积多脉冲间的回波能量,其检测性能并不理想。鉴于宽带雷达的应用潜力,研究新的检测算法具有重要的现实意义。

Hough 变换是一种有效的提取图像中直线的方法,文献[7]将该方法应用于监视雷达的目标检测,用于检测特定距离,特定速度的窄带目标。若距离扩展目标相对于雷达做匀速直线运动,其相邻多个脉冲间高分辨距离像(HRRP)也存在直线。本文算法, Hough 检测器(HD),将文献[7]中的方法做推广,用于检测未知位置,未知速度的距离扩展目标。HD 算法首先将过一级门限的 HRRP 样本做 Hough 变

2009-11-10 收到, 2010-06-03 改回

国家部委基金资助课题

通信作者: 夏宇垠 xia.yuyin@gmail.com

换,并在 Hough 参数空间搜索强距离单元的能量积累点,并以此作为判决依据。3 类飞机实测数据的仿真结果表明在检测概率 90%时,与基于散射点密度的广义似然比检测算法(SDD-GLRT)相比,低计算量的 HD 至少有 1.3 dB 的改善。

2 HRRP 样本特性与 Hough 变换

2.1 HRRP 样本特性

HRRP 样本反映了在一定的雷达视角时,目标上散射体的散射截面沿雷达视线的分布情况。对于实际非合作 ISAR 目标,散射点模型认为,在任一个距离单元里驻留的散射点及其相对分布和复反射系数都是恒定不变的^[8]。若目标占 N 个距离单元,共 M 次回波参与检测处理,目标检测判决问题可表示为

$$\left. \begin{aligned} H_1 : x_n(m) &= \exp\left(-\frac{j4\pi R(m)}{\lambda}\right) \cdot \sum_{i=1}^{L_n} \sigma_{ni} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi\Delta r_{ni}(m)}{\lambda} - \psi_{ni0}\right]\right\} + w_n(m) \\ H_0 : x_n(m) &= w_n(m), \quad n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中 n, m 分别表示距离单元和回波的序号, L_n 为第 n 个距离单元散射点个数, λ 为波长, $R(m)$ 为第 m 次回波时目标转动中心与雷达的径向距离, σ_{ni}, ψ_{ni0} 分别表示第 n 个距离单元的第 i 个散射点回波的复振幅和初始相位。 $\Delta r_{ni}(m)$ 表示第 i 个散射点在第 m 次回波时的径向位移, $w_n(m)$ 是噪声。图 1 是单次 HRRP 样本的幅度示意图。图 2 是一组相对于雷达以 150 m/s 匀速直线运动的飞机相邻 HRRP 样本。

通过研究文献和实测数据,我们发现,一组相邻宽带雷达目标样本具有以下 3 个特性:

(1)跨距离单元走动^[6]。对于宽带雷达的运动目标,由于距离分辨单元远小于目标尺寸,回波包络的平移不能忽略,见图 2。因为走动是未知量,所

以很难将对应距离单元的回波能量积累。

(2)在较小的观测时间内,HRRP 样本大小峰值的相对位置是基本固定的^[8]。我们从实测数据的相关系数来说明:取实测“雅克-42”相邻 43200 次回波,相邻 48 个 HRRP 分为一组,计算每组第一个样本 x_1 与其余 47 个样本 $x_m, m = 2, \dots, 47$ 的相关系数 $\rho_{1,m}$,并对多组相关系数值做平均。

$$\rho_{1,m} = E\left\{\frac{\max_{\tau=1, \dots, N}(\mathbf{x}_1^T \mathbf{x}_m(\tau))}{\|\mathbf{x}_m\| \|\mathbf{x}_1\|}\right\} \quad (2)$$

图 3 中可以看出平均相关系数随间隔次数下降。这说明随着时间的增加,HRRP 的形状是在变化的。但虽相隔 47 次,平均相关系数依然能保持在 0.88 以上,可见其波形的总体变化不大,大小峰值相对位置基本固定。

(3)HRRP 样本存在若干强距离单元。从图 1 中可以看出,HRRP 样本能量分布并不均匀。这是因为目标的某些部件有很强的方向性,使其所在的距离单元能量特别大^[1,6]。

根据 HRRP 样本的 3 个特性,若目标相对于雷达作匀速直线运动,从它的一组相邻 HRRP 样本总可以找到若干根由“亮”点组成的直线,“亮”点对应的是强距离单元,并且这些直线的斜率相同,见图 2。从检测理论可知,检测算法的性能取决于观测数据的信噪比(SNR),强距离单元数据 SNR 较高,若能累积这些点来做检测,可获得好的检测性能。

2.2 Hough 变换

Hough 变换是 Hough 在 1962 年以专利形式提出的一种检测直线的方法。1972 年,Hart 对原始 Hough 变换进行实用化改进,采用极坐标形式来表示,其方程为^[9]

$$\rho = \sqrt{n^2 + m^2} \sin\left(\theta + \tan^{-1} \frac{n}{m}\right) \quad (3)$$

n 为距离单元数, m 为回波次数, ρ 和 θ 分别表示 Hough 参数空间的距离和角度参数。Hough 变换可简单地归结为一句话:一个点对应一条正弦直线。不同直线确定不同的交点,从而在参数空间完成所

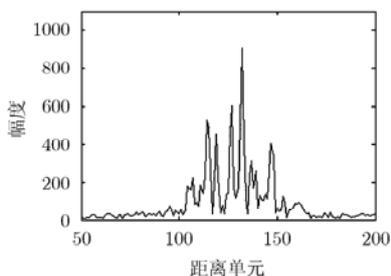


图 1 单次 HRRP 样本

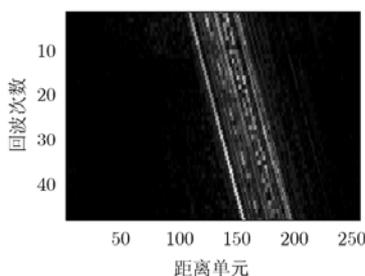


图 2 48 次相邻 HRRP 灰度图

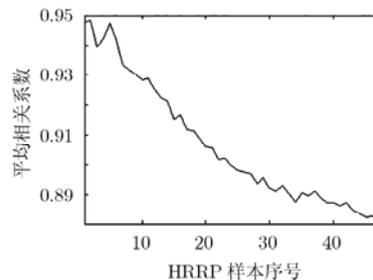


图 3 第 1 次 HRRP 样本与其他回波平均相关系数

需各直线参数点的聚类操作。

结合 HRRP 样本的 3 个特性以及 Hough 变换的特点,可知对一组相邻的 HRRP 样本作 Hough 变换后,在其 Hough 参数空间的某一角度 θ ,将出现若干强点。每个强点对应的是该位置强距离单元多次回波的能量和。根据这一思想,来设计本文算法。

3 Hough 检测(HD)算法的流程及分析

设参与处理的原始空间数据为 $[x_n(m)] \in \mathbb{C}^{M \times N}$, $w_n(m)$ 服从方差为 σ^2 的独立复高斯分布。

3.1 一级门限

若对原始空间的每点数据都进行 Hough 变换,计算量将非常可观。实际上原始空间的大多数点不含目标,本文采用一级门限对原始空间数据进行过滤,仅对过门限的数据进行 Hough 变换。在 H_0 假设下,若一级门限为 T_1 ,原始空间每点数据的虚警概率 p_f 为

$$p_f = \int_{T_1}^{+\infty} \frac{1}{\sigma^2} \exp(-x/\sigma^2) dx = \exp(-T_1/\sigma^2) \quad (4)$$

那么要进行 Hough 变换的原始空间总的期望点数为 $[NM \exp(-T_1/\sigma^2)]$, $\lceil \cdot \rceil$ 为上取整,计算量随一级门限增加而下降。从第 4 节的实验结果可知,较低的一级门限对于提高检测性能是有好处的,因为它处理了更多的数据,但要求较高的计算量。

3.2 Hough 变换

对过一级门限 T_1 的原始空间点做 Hough 变换。记坐标为 (ρ, θ) 的 Hough 参数空间点为 $y_\rho(\theta)$, $\rho \in [\rho_{\min}(\theta), \dots, \rho_{\max}(\theta)] \in N$ 。 $\rho_{\min}(\theta), \rho_{\max}(\theta)$ 分别表示 θ 时 ρ 的最小,最大值。若有 $J(\rho, \theta)$ 个原始空间数据映射到 $y_\rho(\theta)$ 点,在 H_0 假设下, $y_\rho(\theta)$ 的累积分布函数(CDF)(记作 CDF_1)为^[7]

$$CDF_1(\varepsilon, p_f, J(\rho, \theta)) = (1 - p_f)^{J(\rho, \theta)} + \sum_{j=1}^{\lfloor \varepsilon/T_1 \rfloor} C_{J(\rho, \theta)}^j p_f^j \cdot (1 - p_f)^{J(\rho, \theta) - j} \Gamma_{\text{inc}}(\varepsilon - jT_1, j) \quad (5)$$

其中 $\Gamma_{\text{inc}}(x, a) = \int_0^x e^{-t} t^{a-1} dt / \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{a-1} dt$ 为不完全伽马函数, C_M^N 为二项系数, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示下取整。在原始空间维数确定后,即可计算 $J(\rho, \theta)$ 的值(具体的方法是对一个全 1 的原始空间做 Hough 变换)。

3.3 基于 CDF 映射的顺序统计

下面在 Hough 参数空间考虑目标的检测问题,分两步进行:

(1)将同一 θ 值,不同 ρ 的各点做顺序排列(第 1 次顺序统计)。挑选出前 R 个大值,并求和,和值记为 $S(\theta)$ 。

(2)将不同 θ 值的 $S(\theta)$ 做顺序排列(第 2 次顺序

统计),将最大值作为检测算子,与门限相比以判定目标是否存在。

需要注意的是两次顺序统计都不能直接进行,这是因为对一组变量做顺序统计的前提是该组变量同分布。对第 1 次顺序统计而言,当 $\rho_1 \neq \rho_2$ 时,一般有 $J(\rho_1, \theta) \neq J(\rho_2, \theta)$,根据式(5), $y_{\rho_1}(\theta)$ 与 $y_{\rho_2}(\theta)$ 的概率分布不相同,使得 $y_{\rho_1}(\theta)$ 与 $y_{\rho_2}(\theta)$ 的大小比较并不“公平”。对第 2 次顺序统计而言,也存在相同的问题, $S(\theta)$ 与 $\rho_{\min}(\theta)$, $\rho_{\max}(\theta)$ 有关, $S(\theta)$ 间的比较无法直接进行。

为了解决这个问题,本文引入 CDF 映射^[10]。根据概率论的知识,对一个变量做 CDF 映射,其分布服从 $U(0,1)$ 。在使用 CDF_1 函数映射后,在 H_0 下, Hough 参数空间的各点概率分布相同。本文将映射后的数据记作 $z_\rho(\theta) = CDF_1(y_\rho(\theta), p_f, J(\rho, \theta))$ 。

下面来求 $S(\theta)$ 的 CDF。根据 Hough 变换的定义,映射到同一 θ 的不同 ρ 的原始空间数据互不相同,根据本文的假设,原始空间数据相互独立,可以推出 $y_{\rho_{\min}(\theta)}(\theta), \dots, y_{\rho_{\max}(\theta)}(\theta)$ 间也相互独立,所以映射后的 $z_{\rho_{\min}(\theta)}(\theta), \dots, z_{\rho_{\max}(\theta)}(\theta)$ 在 H_0 下服从独立的 $U(0,1)$ 。将该组数据做顺序排列,记排列后的数列为 $z_{(1)}(\theta) \leq z_{(2)}(\theta), \dots \leq z_{(\rho_{\max}(\theta) - \rho_{\min}(\theta) + 1)}(\theta)$ 。取前 R 个大值,并求和 $S(\theta) = \sum_{r=1}^R z_{(\rho_{\max}(\theta) - \rho_{\min}(\theta) + 2 - r)}(\theta)$ 。根据概率学知识, L 个独立 $U(0,1)$ 顺序统计量前 R 个大值的和值的 CDF(记作 CDF_2)为^[11]

$$CDF_2(\varepsilon, R, L) = \sum_{r=0}^{R-1} \frac{(-1)^r (\varepsilon - r)^L u(\varepsilon - r)}{(R - r)^{L-R+1} (R - r - 1)! r!} \quad (6)$$

其中 $u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ 。本文采用 CDF_2 对 $S(\theta)$ 做映

射,并取其最大值作为最终的检测算子:

$$\lambda_{\text{HD}} = \max_{\theta \in [0^\circ, \tan^{-1} \frac{v_{\max} T_r}{\Delta R}] \cup [180^\circ - \tan^{-1} \frac{v_{\max} T_r}{\Delta R}, 180^\circ]} \left\{ CDF_2(S(\theta), R, \rho_{\max}(\theta) - \rho_{\min}(\theta) + 1) \right\} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} T \quad (7)$$

T_r , ΔR , v_{\max} 分别为雷达脉冲重复时间,分辨率和目标最大平动速率。 R 值可根据目标的能量分布给出,根据第 4 节的实验结果,一般取小于 10 的值。因为不同 θ 值的 Hough 参数空间点对应的是同一组原始空间数据,所以 $S(\theta)$ 间不满足统计独立,检测门限 T 由 Monte Carlo 统计得出。

4 仿真实验

实验数据取自国内某研究所 C 波段 ISAR 雷达,脉冲重频为 400 Hz,信号带宽为 400 MHz,对应的距离分辨率为 0.375 m。数据包括 3 类飞机目标:“雅

克-42”、“安-26”和“奖状”。为考察 HD 算法的有效性,各取 3 类目标的两段数据作为目标信号,每段数据包含 25968 个 HRRP 样本,每个样本有 256 个距离单元。将相邻的 48 个样本分为一组,共 1082 组。飞机的平动速度为 150 m/s。估计检测概率时,每组数据做 10 次 Monte Carlo 实验,将 H_1 判决的总次数除以 10820。总体虚警概率为 10^{-4} 。

实验1 HD与SDD-GLRT, EI(能量积累)检测算法比较。EI算法采用全部观测数据能量之和作为检测算子。SDD-GLRT检测算子为^[5]

$$\lambda_{\text{SDD}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \ln \left[1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} \exp \left(|x_n(m)|^2 / \sigma^2 \right) \right] \quad (8)$$

$\alpha \approx D/M$, D 为目标所占平均距离单元数,当 $\alpha \rightarrow 1$ 时, SDD-GLRT 退化为 EI 算法。在比较中,考察一组 α 值的 SDD-GLRT 检测性能, $\alpha \in [5/256, 125/256]$, 采样间隔为 $5/256$, 共 25 个值。从图 4(a)~4(c) 结果看,对于“雅克-42”、“安-26”和“奖状”3类飞机, α 的最优值分别为 $15/256$, $10/256$, $5/256$, 这是因为随着目标所占距离单元的减少, α 的最优值也相应降低。由于目标能量分布不均匀,

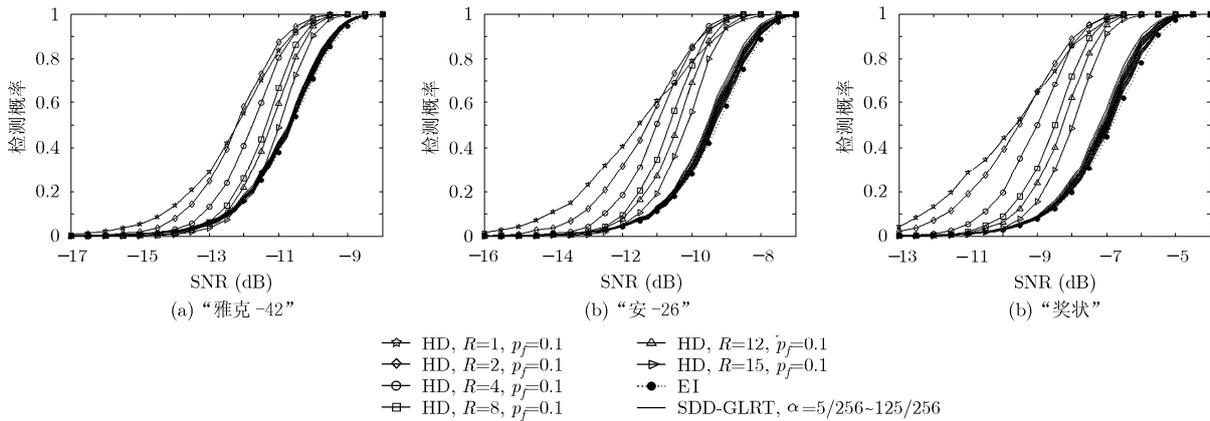


图4 3类飞机的3种算子检测曲线

SDD-GLRT检测性能比EI略好。

HD算法参数为 $p_f = 0.1$, $R = 1, 2, 4, 8, 12, 15$, 目标最大平动速率 $v_{\max} = 750$ m/s, 根据式(7), $\theta \in [0^\circ, 78^\circ] \cup [102^\circ, 180^\circ]$, 2° 采样。从图4(a)~4(c)可以看出:(1)低 R 值的HD检测曲线平滑,在低SNR时有较好表现。 R 值的选择应该控制在10以内;(2)HD算法对小尺寸的“奖状”飞机检测性能最好,这是因为小目标能量集中,强距离单元容易提取;(3)由于将多次脉冲间的目标能量进行了累积,HD对于SDD-GLRT, EI有一定的改进。在检测概率90%时,相对于SDD-GLRT, HD最多有1.3 dB, 1.4 dB, 1.9 dB的改善。

实验2 不同一级门限下 HD 算法的性能比较。需要指出的是实验 1 中考察的 HD 算法 ($p_f = 0.1$) 并不是其最佳性能。当 $p_f = 1$ 即 $T_1 = 0$ 时, HD 性能将达到最优。图 5 中列出了在不同一级门限下 HD 算法的可检测因子(检测概率为 90% 时检测器所需的 SNR), 检测目标为“安-26”。从图 5 可知:(1) HD 检测性能随一级门限的减小而提高;(2) p_f 不应小于 0.01, 否则检测性能将低于 SDD-GLRT 算法;(3) p_f 从 0.5 增加到 1 时, 可检测因子几乎没有变化而计算量却增加了一倍, 所以为了较好的检测性能而选择很低的一级门限意义不大。

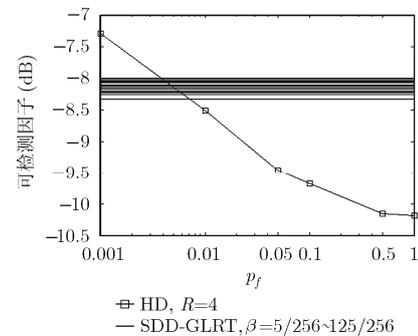


图5 不同一级门限下 HD 算法的可检测因子

5 总结

本文针对宽带雷达目标跨距离走动和能量分布不均的特性,提出了一套基于 Hough 变换的检测算法(HD)。3 类飞机实测数据的仿真实验表明低计算量的 HD 与最优的 SDD-GLRT 相比,至少有 1.3 dB 的改善。HD 算法可通过调节一级门限来控制计算量,随着计算量的增加,检测性能也相应的提高。

参考文献

- [1] Conte E, Farina A, and Gerlach K. Adaptive detection algorithm of range spread targets with orthogonal rejection

- [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2007, 43(2): 738-752.
- [2] Bandiera F and Maio A D. Adaptive radar detection of distributed targets in homogeneous and partially homogeneous noise plus subspace Interference [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(4): 1223-1237.
- [3] Gerlach K. Spatially distributed target detection in non-Gaussian clutter [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 1999, 35(3): 926-934.
- [4] Gerlach K and Steiner M. Detection of a spatially distributed target in white noise [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1997, 4(7): 198-200.
- [5] 戴奉周, 刘宏伟, 吴顺君. 一种基于顺序统计量的距离扩展目标检测器[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2488-2492.
Dai Feng-zhou, Liu Hong-wei, and Wu Shun-jun. Order-statistic-based detector for range spread target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(10): 2488-2492.
- [6] 侯庆禹, 刘宏伟, 保铮. 一种新的宽带目标识别雷达杂波抑制方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(5): 769-773.
Hou Qing-yu, Liu Hong-wei, and Bao Zheng. New method for suppression of the clutter of the wideband target recognition radar[J]. *Journal of Xidian University*, 2008, 35(5): 769-773.
- [7] Zeng J K, He Z S, Mathini S, and Liu H M. Modified Hough transform for searching radar detection [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 683-686.
- [8] 杜兰. 雷达高分辨距离像目标识别方法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2007.
- [9] 李玉山. 数字视觉和视频技术[M]. 西安:西安电子科技大学, 2006: 95-96.
- [10] Leung S W, Minett J W, Siu Y M, and Lee M K. A fuzzy approach to signal integration [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2002, 38(1): 346-350.
- [11] Marichala J L and Kojadinovic I. Distribution functions of linear combinations of lattice polynomials from the uniform distribution [J]. *Statistics & Probability Letters*, 2008, 78(8): 985-991.
- 夏宇垠: 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为宽带雷达信号检测、MIMO 雷达信号处理.
- 冯大政: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像、阵列信号处理、盲信号处理、神经网络等.
- 李 涛: 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为宽带雷达信号检测、空时自适应信号处理、雷达成像.