

基于 EM 算法和 GOF 的宽带分布式 目标检测算法

李 涛,冯大政,夏宇垠

(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)

摘 要: 针对 K 分布杂波背景下的宽带分布式目标检测问题,提出了一种基于期望最大化算法和拟合优度检测方法的检测算法.该算法利用期望最大化方法估计杂波参数,提高了估值精度.通过结合拟合优度检测有效利用了目标回波对杂波背景的干扰,并简要分析该算法的恒虚警率性.对仿真数据与实测数据的多个仿真结果表明,与传统的非相干积累方法及基于散射点密度的广义似然相比,该算法检测性能有明显的提高.

关键词: 分布式目标检测; K 分布杂波; 期望最大化; 拟合优度检测

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 10-2246-05

A Detection Method Based on EM and GOF for Wideband Spatially Distributed Target

LI Tao, FENG Da-zheng, XIA Yu-yin

(National Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: A detection algorithm for the spatially distributed target on the background of K distribution clutter is proposed. The proposed algorithm estimates the parameters of the clutter by Expectation Maximization(EM) method and improves the estimation precision. Then combined with Goodness-Of-Fit(GOF) test, it efficiently utilize the disturbance of target echo to clutter background. Furthermore, Constant False Alarm Rate (CFAR) property with respect to the unknown clutter power is proved. Finally, experimental results for simulated data and measured data illustrate that the proposed algorithm achieves a visible performance improvement comparing with conventional non-coherent integration and Scatter Density Dependent Generalized Likelihood Rate Test (SDD-GLRT).

Key words: distributed target detection; K distribution clutter; expectation maximization(EM); goodness-of-fit test (GOF)

1 引言

在宽带高分辨雷达体制下,目标回波已不再表现为一个点,而在径向距离维上表现为距离扩展目标,目标回波的能量分布到多个高分辨距离单元中.为了提高雷达的检测性能,需要进行积累提高信噪比.文献[1~4]分别基于极大似然及子空间方法研究了在均匀、非均匀杂波和干扰背景下的分布式目标的自适应检测问题,本质上都是先对单个距离单元进行时域相干积累,然后对所有距离单元时域积累的结果再做距离单元间径向积累.文献[5~7]介绍了当目标或干扰导向矢量存在误差时的几种稳健检测算法.然而,上述几种检测算法都是在假定相干积累期间目标平动引起的整体包络平移远小于一个距离单元的情况下得到的,然而,在实际运用中,这种假设条件过于苛刻.首先,由于距离分辨力的

提高,相对于雷达平台的径向运动使目标很短时间内就能越过一个距离单元.其次,即使忽略平动的影响,目标的转动也会引起同一距离单元目标回波相位差的变化.这两种情况对时域相干积累性能的影响较大.如果同时进行运动补偿及解决转动影响,会大大增加运算量和设备复杂度.因此,本文只利用宽带雷达体制下目标的距离维扩展特性,基于单次回波进行目标检测.

当高分辨雷达在低视角观测目标时,环境杂波一般为非高斯的,表现为其概率密度函数有较长的拖尾效应.由理论仿真及实测数据分析,发现 K 分布可以较好的描述高分辨杂波幅度统计特性^[8,9].基于上述考虑,本文主要研究 K 分布杂波下单次回波宽带分布式目标检测问题,利用高分辨雷达体制下目标的距离维扩展特性,提出一种基于 EM 和 GOF 的自适应检测算子.

2 杂波统计参数估计

2.1 K 分布杂波模型

K 分布杂波可表示为

$$z = \sqrt{\tau} \cdot \eta \tag{1}$$

式中 τ 为基本幅度调制分量,是一个实的、非负、服从伽马分布的独立同分布随机变量, η 为斑点分量,是独立同分布的单位方差零均值复高斯随机数,是由任何距离单元中杂波的多路径散射性质产生的,幅度服从瑞利分布,且 τ_i 和 η_i 是相互独立的. K 分布杂波的幅度概率密度函数为

$$f(|z|) = \int_0^\infty f(|\eta| | \tau) f(\tau) d\tau = \frac{2b}{\Gamma(v)} \left(\frac{b|z|}{2} \right)^v K_{v-1}(b|z|) \tag{2}$$

式中 $\Gamma(\cdot)$ 是伽马函数, v 为伽马分布的形状参数, u 为均值参数, $K_{v-1}(\cdot)$ 是 $(v-1)$ 阶第二类修正贝塞尔函数, $|\cdot|$ 为取括号内复数绝对值, b 是比例系数,其值 $b = \sqrt{\frac{v\pi}{u}}$. 对于大多数雷达杂波来说,形状参数的取值范围是 $0.1 < v < \infty$, 对于较小的 v 来说,如 $v \rightarrow 0.1$ 时,杂波有长的拖尾,起伏较快,而 $v \rightarrow \infty$ 时,杂波分布接近于瑞利分布.

2.2 统计参数估计

伽马分布的均值参数 u 表示 K 分布杂波的平均功率, u 越大,则表示杂波功率越大. 形状参数 v 决定 K 分布偏离瑞利分布的程度, v 越小,偏离程度越大,具有比瑞利分布更大的尾部,因此通过估计形状参数 v 来了解杂波或混响分布的尖锐程度是非常必要的.

传统的 K 分布参数估计器 V, W, X, U^[10] 是利用 K 分布的高阶矩特征或对统计量进行数据映射进行形状参数估计,而均值参数则直接由待估计样本的幅度平方和求平均后得到. EM^[11] 方法是一种通过迭代得到参数的极大似然估计值的方法,主要用于当观测数据不完全时的估值问题. 由式(1)可看出,观测量 z_i 为基本调制分量 τ_i 的平方根与斑点分量 η_i 的乘积,而所需要估计的统计参数 v 和 u 均为伽马分布的参数,利用 EM 算法可估计出 τ_i 在 z_i 下的条件期望,然后再基于极大似然方法求出待估计参数的值. 在一次迭代过程中, EM 算法包括两个步骤. 在第 k 次迭代时,利用上次迭代所得到的参数集 $\theta^{(k-1)}$,计算出条件期望(E-step),本文中 $\theta = \{v, u\}$.

$$Q(\theta, \theta^{(k-1)}) = E_{z_1, \dots, z_N, \tau_1, \dots, \tau_N} \{ \ln f(z_1, \dots, z_N, \tau_1, \dots, \tau_N | \theta) \} \tag{3}$$

式中 N 为用于参数估计的辅助单元个数, $E_{z_1, \dots, z_N, \tau_1, \dots, \tau_N} \{ \cdot \}$ 表示完全数据在观测数据 z_i ,

$i = 1, \dots, N$ 和 $\theta^{(k-1)}$ 下的条件期望. 然后,利用极大似然方法求出使函数 $Q(\theta, \theta^{(k-1)})$ 为最大的 θ 值(M-step),即为 $\theta^{(k)}$,完成第 k 次迭代. 上述两个步骤交替进行,直到 θ 收敛,得到参数集 θ 的估计值 $\hat{\theta} = \theta^{(K)}$.

根据 EM 方法,可得

$$\hat{u} = \frac{\alpha_1^{(K)}}{N} \tag{4}$$

$$\hat{v} = \arg \max_v \left[-\ln(\Gamma(v)) + v \ln(v) - v \ln\left(\frac{\alpha_1^{(K)}}{N}\right) + (v-1) \frac{\alpha_2^{(K)}}{N} - v \right] \tag{5}$$

图 1 所示实验比较了 U, V, W, X 和本文算法在形状参数 v 值由 0.1 到 2 变化时性能曲线,其纵坐标为估计标准差 σ_v , 实验所取样本长度为 128, 每点独立实验 10000 次. 由图 1 可看出,本文算法在形状参数 v 值较小时性能与 U, W 估计器性能近似,但在 v 值较大时,性能最优,其中 U 估计器与本文算法性能最为相近. 图 2 所示实验比较了本文算法和 U 估计器在估计样本长度不同时性能对比,可发现本文算法在估计样本数量少时性能较优. 在实际问题中,辅助数量有限,估计样本的长度是受到限制的,因而本文估计杂波参数方法有一定的实用价值.

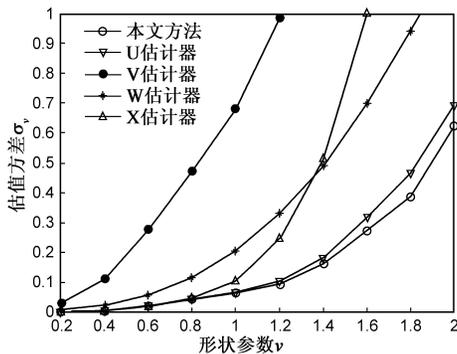


图1 几种估计器的估计误差

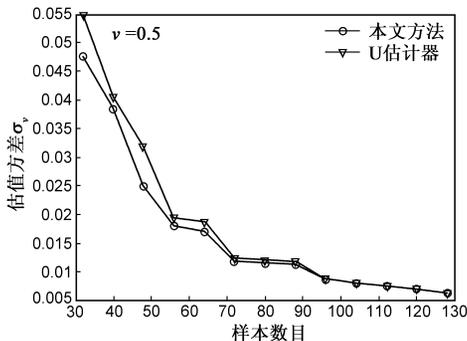


图2 样本数量不同时两种估计器的估计误差

3 检测流程

3.1 GOF 检测算子

在雷达应用中, GOF 方法^[12]通常用于分析杂波或

者目标回波的统计特性,判断一组独立同分布随机变量是否服从假定的概率密度分布,也可用于雷达检测问题中,因为含目标回波的距离单元与背景杂波的统计特性是不相同的.例如存在 L 个待检测单元 $x_i, i = 1, 2, \dots, L$, 其背景杂波的累积分布函数为 $F(x)$, 则分布式目标检测问题可表示为如下的二元假设:

$$\begin{cases} H_0: G(x) = F(x) \\ H_1: G(x) \neq F(x) \end{cases} \quad (6)$$

然而, GOF 方法需要多个独立同分布样本来判断其是否服从假定概率分布, 单次回波的窄带雷达的检测问题就不能运用这种方法. 而利用多次回波检测时, 窄带雷达的相干积累和子空间方法有较好的性能及完备的理论体系, 因而, 在窄带雷达检测问题中, GOF 方法实用价值较低.

宽带高分辨雷达体系下, 目标在径向距离维上表现为距离扩展目标, 回波占据了连续的多个距离单元, 常规检测方法是利用目标回波中的强散射点信息或进行滑窗非相干积累来判断目标是存在. 本文则利用了目标所占据距离单元与只含杂波距离单元统计特性不同的特点进行检测. 假定含有目标回波的距离单元数为 L , 则

$$x_i = a_i + z_i, \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (7)$$

z_i 为服从 K 分布的杂波, a_i 为该距离单元目标回波幅度, 则 x 幅度服从概率密度分布:

$$\begin{aligned} f(x|x) &= \int_0^\infty f(x|a)f(a)da \\ &= \int_0^\infty \frac{2b}{\Gamma(v)} \left(\frac{b|x-a|}{2} \right)^v K_{v-1}(b|x-a|) f(a) da \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $f(a)$ 为目标回波幅度服从的概率密度分布, 在没有目标先验知识的情况下无法确定. 含目标回波的距离单元与只含杂波的距离单元概率密度分布是不相同的. 因此, 我们首先基于 EM 算法, 利用辅助单元估计 K 分布参数, 然后利用 GOF 检测算子, 判断待检测单元是否服从 K 分布.

GOF 检测算子中应用最广的是 χ^2 算子, 然而其需要样本数量较多. 通过实验, 我们选取小样本 Anderson-Darling(AD)检测算子用于宽带分布式目标检测问题中. 假定存在 L 个独立同分布待检测样本, 首先取各距离单元复幅度的模值并按大小将其排序, 即 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_L$, 然后基于 AD 检测算子判断待检测样本中是否有目标存在:

Anderson-Darling(AD)检测算子

$$\lambda_{AD} = - \sum_{i=1}^L \frac{2i-1}{L} \cdot (\ln(F(x_i)) - \ln(F(x_{n-i+1}))) - L \quad (9)$$

式中的 $F(x_i)$ 为 K 分布的累积分布函数, 由式(2)可推导出

$$F(x) = 1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\sqrt{\frac{v\pi}{4u}} x \right)^v K_v \left(\sqrt{\frac{v\pi}{4u}} x \right) \quad (10)$$

式中的 λ 为检测算子, 当 λ 大于对应算法门限时, 则判定目标存在, 反之, 则判断目标不存在.

对式(10)作变量代换, 使 $y = x/\sqrt{u}$, 则

$$F(y) = 1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\sqrt{\frac{v\pi}{4}} y \right)^v K_v \left(\sqrt{\frac{v\pi}{4}} y \right) \quad (11)$$

由上式可知, 将所有待检测单元根据杂波 u 作变量代换后, 本文算法对于杂波功率是恒虚警的.

3.2 待检测单元和辅助单元的选取

上一节中我们引入了 GOF 检测算子, 这种检测算子本质上是根据一组独立同分布的样本幅度大小起伏来判定其是否与环境杂波分布相同. 要使用 GOF 检测算子, 我们要给定待检测单元, 即从单次回波的一维距离像中选中待检测距离单元.

首先, 我们设定一个位置可变的距离窗,

$$\vartheta_i = [i, i+L-1], \quad i = 1, 2, \dots, M-L+1 \quad (12)$$

M 为所取一维距离像区域距离单元个数, 窗口长度 L 由目标可能的最小径向长度决定, $L = \lceil l_{\min}/\Delta r \rceil$, $\lceil \cdot \rceil$ 指取大于等于括号内数的整数, Δr 为雷达的距离分辨力, 然后将滑窗内能量分别积累, 取出积累后值最大的一组为待检测单元.

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta_i \in \{\vartheta_1, \dots, \vartheta_{M-L+1}\}} \left[\sum_{n \in \theta_i} y(1, n) \right] \quad (13)$$

y 为所取一维距离像区域的所有距离单元复幅度的模平方. $\hat{\theta}$ 中包含的距离单元即为选定的待检测单元, 其余的距离单元则作为辅助单元来估计杂波统计参数. 本文检测算法流程如图 3.

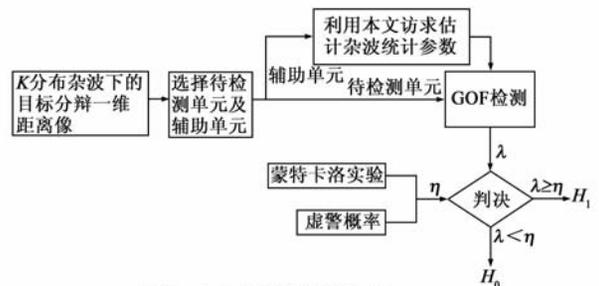


图3 本文检测算法流程图

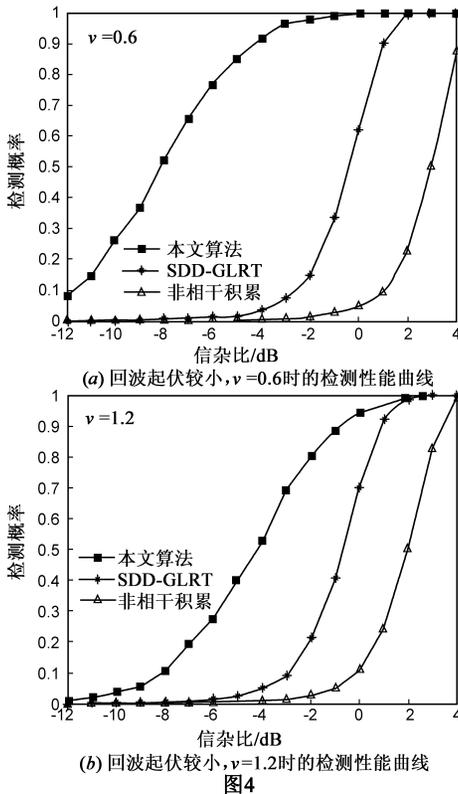
4 仿真实验

本文采用 ISAR 实测数据, 该数据取自国内某研究所逆合成孔径 C 波段雷达对“雅克-42”飞机的观测结果, 雷达波长为 0.545m, 脉冲重复频率为 400Hz, 信号带宽为 400MHz. 定义每个距离单元的目标回波能量 $s_i = \|\alpha_i\|^2, i = 1, \dots, L_r, L_r$ 目标实际占据的距离单元数, 宽

带目标回波占据距离单元较多,每个距离单元的回波强度不一,因此我们定义平均信噪比 $SNR = \sum_{i=1}^L s_i / Lu$.

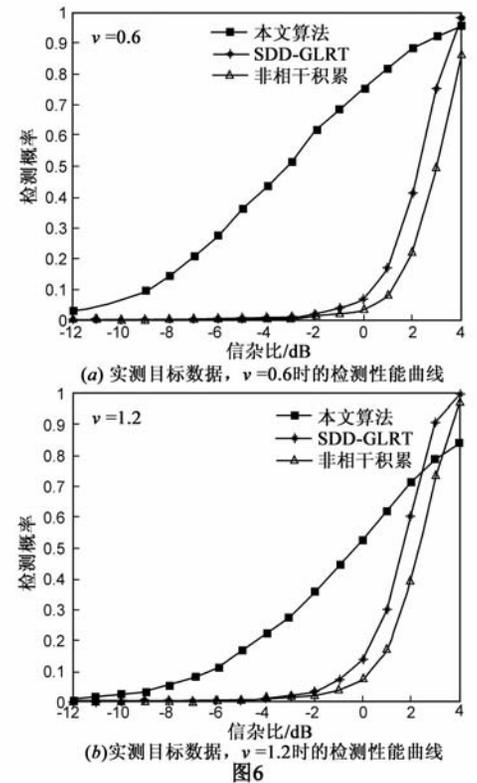
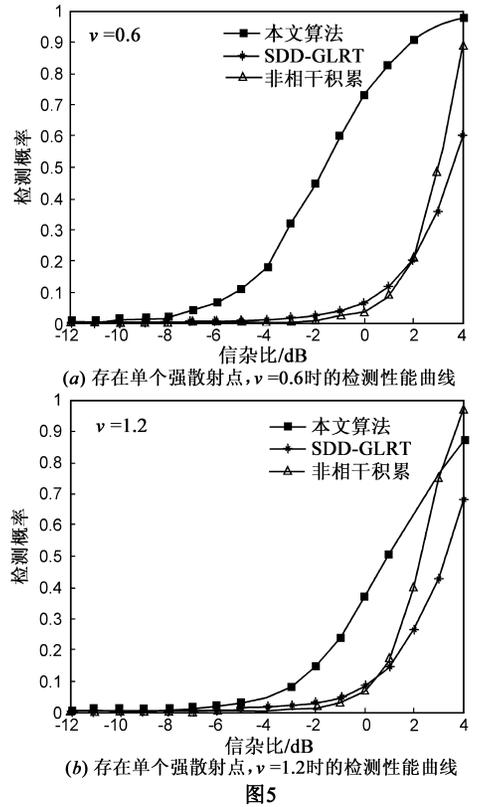
本文实验虚警概率设为 10^{-4} ,检测门限 η 通过 $100/p_{fa}$ 次独立实验得到,检测概率 p_d 通过 10000 次独立实验得到.实验中目标实际占据距离单元数 $L_r = 40$,设定的滑窗长度 $L = 30$,所取待检测区域距离单元个数 $M = 150$.

实验 1 仿真数据实验.假定所有距离单元目标回波能量相等,这种情况对应各距离单元目标回波起伏较小的高分辨一维距离像.如图 4(a)、(b)所示,分别给出了 K 分布杂波形状参数 $v = 0.6$ 及 $v = 1.2$ 时本文算法与 SDD-GLRT^[13] 及非相干积累^[14] 的性能对比图.由实验结果可以看出,当目标回波平缓,杂波起伏较大时,本文算法性能远超出传统算法,而当 v 值增大,杂波起伏平缓时,本文算法性能略有下降,但仍优于传统算法.



实验 2 仿真数据实验.假定存在单个强散射点,该散射点回波所在距离单元能量为目标回波平均能量的 100 倍,其余距离单元能量相等,这种情况对应存在单个超强散射点的目标高分辨一维距离像.如图 5(a)、(b)所示,分别给出了 K 分布杂波形状参数 $v = 0.6$ 及 $v = 1.2$ 时本文算法与 SDD-GLRT 及非相干积累的性能对比图.由实验结果可看出,当能量主要集中在强散射点,目标回波出现强峰值时,本文算法性能有所下降,

这是因为与平稳回波比较,目标的起伏变化向杂波趋近.在这种情况下,一种基于强散射点径向积累的高分辨极化目标检测算法^[15]性能更为实用.



实验 3 实测数据实验.取 5000 次回波进行实验,图 6(a)、(b)给出了 K 分布杂波形状参数 $v = 0.6$ 及 $v = 1.2$ 时本文算法与 SDD-GLRT 及非相干积累的性能对比图.

由以上实验结果可看出,本文算法存在以下优点:

(1) 当信杂比较低时,本文算法性能较优.

(2) 当目标回波包络起伏较小时,本文算法性能较优.

(3) 当 v 值较小,即杂波包络起伏较大时,杂波有长的拖尾,出现强散射点概率变大,SDD-GLRT 及非相干积累算法性能均有所下降,而本文算法利用了只含杂波距离单元与受目标回波干扰的杂波距离单元统计特性的差异来进行判定,杂波拖尾越长,受目标回波干扰后的统计特性差异就越大,因此性能反而优于 v 值较大时.这种特性可以使本文算法成为一些传统算法在 v 值较小时的有益补充.

5 结束语

本文针对 K 分布杂波背景下的宽带分布式目标检测问题,利用高分辨雷达体制下目标的距离维扩展特性,基于 EM 方法,估计杂波统计参数,并基于 GOF 提出检测算子.理论分析和仿真实验表明,本文算法有效提高了检测性能,尤其是在低信杂比及杂波包络起伏较大的情况下,可以较好的解决单次回波宽带分布式目标检测问题.本文算法在 v 值变大时,性能有所下降,因此,如何结合传统检测算法,提高在 v 值较大时的算法稳健性仍需要进一步的研究.

参考文献:

- [1] E Conte, A D Maio, G Ricci. GLRT-Based adaptive detection algorithm for range-spread targets [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(7): 1336 - 1348.
- [2] N Bon, A Khenchaf, R Garello. GLRT subspace detection for range and doppler distributed targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(2): 678 - 696.
- [3] F Bandiera, A D Maio, et al. 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.
- [4] E Conte, A Farina, K Gerlach. Adaptive detection algorithm of range spread targets with orthogonal rejection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(2): 738 - 752.
- [5] A D Maio. Robust adaptive radar detection in the presence of steering vector mismatches [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(4): 1322 - 1337.
- [6] O Besson. Adaptive detection with bounded steering vectors mismatch angle [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(4): 1560 - 1564.
- [7] A D Maio, S D Nicola, Huang Y W. Adaptive detection and es-

timation in the presence of useful signal and interference mismatches [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 56(11): 5618 - 5629.

- [8] E Conte, A D Maio, C Galdi. Statistical analysis of real clutter at different range resolutions [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(3): 903 - 917.
- [9] E Conte, A D Maio, A Farina. Statistical tests for higher order analysis of radar clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(1): 205 - 217.
- [10] D Blacknell, R J A Tough. Parameter estimation for the K-distribution based on $[z \log(z)]$ [J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2001, 148(6): 309 - 312.
- [11] G J McLachlan, K Thrimyambakam. The EM Algorithm and Extensions [M]. New York: Wiley, 1997.
- [12] Y Norouzi, F Gini, M M Nayebi. Non-coherent radar CFAR detection based on goodness-of-fit tests [J]. IET Radar Sonar Naving, 2007, 1(2): 98 - 105.
- [13] K Gerlach. Spatially distributed target detection in non-gaussian clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3): 926 - 934.
- [14] 黄巍, 贺知明, 向敬成. 宽带雷达能量积累与信号检测方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(7): 889 - 892. Huang Wei, He Zhiming, Xiang Jingcheng. On detection methods of broadband radar signals [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(7): 889 - 892. (in Chinese)
- [15] 李永祯, 王雪松, 徐振海, 等. 基于强散射点径向积累的高分辨率极化目标检测研究 [J]. 电子学报, 2001, 29(3): 307 - 310. Li Yongzhen, Wang Xuesong, Xu Zhenhai, et al. Study on high-resolution polarization target detection based on intense scatter range integration [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(3): 307 - 310. (in Chinese)

作者简介:



李 涛 男, 1983 年 8 月生于陕西洛川县. 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, 研究方向: 宽带雷达信号检测、空时自适应信号处理、雷达成像. E-mail: lt1983826@yahoo.com.cn



冯大政 男, 1959 年 12 月出生于陕西紫阳县. 教授、博士生导师、中国电子学会高级会员、IEEE 会员. 研究方向: 雷达成像、阵列信号处理、盲信号处理、神经网络等.