相参雷达K分布海杂波背景下非相干积累恒虚警检测方法

张 坤* 水鹏朗 王光辉
(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710171)

摘 要：相参雷达系统下的非相干积累检测方法，可以提高雷达的目标检测速度，达到实时处理的要求。然而，相参雷达系统下的非相干积累检测方法对参考单元数、脉冲积累数、杂波散斑协方差矩阵以及海杂波模型的形状参数均是非恒虚警(CFAR)的。该文基于块白化的海杂波预白化方法，提出预白化单元平均恒虚警(PWCA-CFAR)检测方法和预白化单元中值恒虚警(PWCM-CFAR)检测方法，并使用了匹配于参考单元数、脉冲积累数、形状参数的自适应门限，确保提出检测方法的恒虚警特性。实验结果表明，当存在异常单元时，PWCM-CFAR检测方法的检测性能优于PWCA-CFAR检测方法。

关键词：相参雷达系统；非相干积累检测方法；恒虚警；海杂波；块白化
中图分类号：TN959.72 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2020)07-1627-09
DOI: 10.11999/JEIT190441

Non-coherent Integration Constant False Alarm Rate Detectors against K-distributed Sea Clutter for Coherent Radar Systems

ZHANG Kun SHUI Penglang WANG Guanghui
(*National Laboratory of Radar Signal Processing*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*)

Abstract: The non-coherent integration detectors for coherent radar systems can promote the detection rate of the radar and meet the required real-time processing, however, these detectors are not Constant False Alarm Rate (CFAR) with respect to the reference cell number, the accumulated pulse number, the clutter speckle covariance matrix, and the shape parameter of the sea clutter model. Based on block-whitening method to whiten the sea clutter, a Pre-Whitening Cell-Averaging CFAR (PWCA-CFAR) detector and a Pre-Whitening Cell-Median CFAR (PWCM-CFAR) detector are proposed where the detection thresholds matching the reference cell number, accumulated pulse number and shape parameter are used. The experiment results show that the PWCM-CFAR detector attains better detection performance than the PWCA-CFAR detector when there exist abnormal cells.

Key words: Coherent radar system; Non-coherent integration detectors; Constant False Alarm Rate (CFAR); Sea clutter; Block-whitening

1 引言

海杂波背景下的雷达目标检测问题在民用、军事方面受到广泛关注，并发展了许多目标恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测方法。K分布模型是描述高分辨海杂波的有效模型之一，在海面目标检测中受到广泛应用[1–5]。目标CFAR检测方法是雷达系统在保持虚警率恒定条件下对雷达回波作判别以确定目标信号是否存在的方法[5–8]。对于CFAR检测方法，按照数据处理方式可以分为相干积累CFAR检测方法和非相干积累CFAR检测方法。在相干积累中会使用所有积累脉冲的相位信息，所以必须明晰积累脉冲间的相位变化。在这种情况下，必须对回波信号进行预处理补偿相位的变化以保证脉冲间信号的相位一致，使得补偿后的信号可以相干相加，以获得相干积累增益，提高目标检测性能[9,10]。而非相干积累放弃了脉冲间的相位信息，直接将脉冲间信号的幅度或者功率积累，使得非相干积累的增益小于相干积累增益。通常情况下，相干积累CFAR检测方法的检测性能要优于非相干积累CFAR检测方法。但是，相干积累CFAR检测方法有时间代价高、计算复杂度高的不足。当

收稿日期：2019-06-18；改回日期：2020-05-25；网络出版：2020-06-04
*通信作者： 张坤 xidiankun@163.com；kzhang_1608@stu.xidian.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金(61671357)
Foundation Item: The National Nature Science Foundation of China (61671357)

相参雷达工作在搜索模式下，需要快速发现海面大中型目标而对弱小目标不感兴趣时，因为大中型目标的高信杂比，非相干积累相比于相干积累的增益损失并不会影响大中型目标的检测，所以此时使用计算简单、时间代价低的非相干积累CFAR检测方法更具有现实意义[3,4]。

传统的非相干积累检测方法的CFAR特性是指检测方法能够根据杂波的功率变化自动地调整检测门限，使得在不同的杂波功率下保持相同的虚警率[3–6]。由于脉冲积累可以提高目标回波的信杂比以及参考单元选择有关背景杂波功率水平的估计，所以参考单元数和脉冲积累数会影响非相干积累检测方法的CFAR特性。此外，在对海探测雷达照射的数百公里的海陆场景中，天气、风速、浪高等因素均随着时间和空间的变化而变化。在雷达照射区域，由于海杂波的非平稳特性，海杂波的非高斯性和海杂波脉冲间的相关性随着空间和时间变化，这将导致目标检测时虚警率的变化。在这种情况下，传统的对杂波功率变化CFAR的非相干积累检测方法将不能实现全场景CFAR检测。海杂波脉冲维的相关性可以用海杂波脉冲维的散斑协方差矩阵描述。目前为止，K分布海杂波背景下的非相干检测方法的CFAR特性，有关专家学者做了大量研究[3–5]。研究得出，K分布海杂波背景下的非相干积累检测方法的CFAR特性与杂波功率无关，与海杂波的非高斯性、脉冲积累数和参考单元数有关。

然而，K分布海杂波背景下的非相干目标检测方法关于海杂波散斑协方差矩阵的CFAR特性的研究，相关专家学者尚未关注。李东宸等人[11]使用了块白化方法在检测前对海杂波进行白化处理抑制海杂波，以提高检测性能。本文使用块白化方法抑制海杂波的同时，海杂波的白化处理可以保证非相干积累检测方法对杂波散斑协方差矩阵的CFAR特性。本文基于块白化的海杂波白化方法，提出了预白化单元平均CFAR(Pre-Whitening Cell-Averaging CFAR, PWCA-CFAR)检测方法和预白化单元中值CFAR(Pre-Whitening Cell-Median CFAR, PWCM-CFAR)检测方法，并使用了匹配于海杂波的非高斯性、脉冲积累数和参考单元数的门限，保证所提出方法的CFAR特性。另外，本文理论推导了提出方法关于杂波功率是CFAR的。本文安排如下，第2节介绍相参雷达K分布海杂波背景下的非相干积累检测方法并分析其CFAR特性；第3节详细介绍了提出的PWCA-CFAR检测方法和PWCM-CFAR检测方法；第4节结合实测数据和仿真数据，通过实验对比了提出的两种非相干积累CFAR检测方法的检测性能；第5节总结全文。

2 相参雷达K分布海杂波背景下的非相干积累检测方法

相参雷达发射N个相参的脉冲，接收机接收多脉冲的雷达回波数据，海面目标检测可以归结为式(1)

$$\left.\begin{aligned}&\mathrm{H}_0:\boldsymbol{z}=\boldsymbol{c}=\sqrt{\tau}\boldsymbol{u},\boldsymbol{z}_p=\boldsymbol{c}_p=\sqrt{\tau_p}\boldsymbol{u}_p,\\&\quad p=1,2,\cdots,P\\&\mathrm{H}_1:\boldsymbol{z}=\boldsymbol{s}+\boldsymbol{c}=\boldsymbol{s}+\sqrt{\tau}\boldsymbol{u},\boldsymbol{z}_p=\boldsymbol{c}_p=\sqrt{\tau_p}\boldsymbol{u}_p,\\&\quad p=1,2,\cdots,P\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{z}$,$\boldsymbol{s}$和$\boldsymbol{c}$分别是待检测单元(Cell Under Test, CUT)接收向量、目标回波向量和海杂波向量，$\boldsymbol{z}_p$表示CUT周围P个海杂波向量。海杂波用K分布复合高斯模型描述, τ是慢变的纹理分量，$\boldsymbol{u}$是快变的散斑分量。并且，$\tau,\tau_1,\tau_2,\cdots,\tau_P$是独立同分布的正随机变量，服从双参数的Gamma分布$p_\tau(\tau|\upsilon,\mu)$，其中$\mu$是尺度参数，表示海杂波功率变化，$\upsilon$是形状参数。$\boldsymbol{u},\boldsymbol{u}_1,\boldsymbol{u}_2,\cdots,\boldsymbol{u}_P$是独立同分布的随机向量，服从复高斯分布$\mathbb{CN}(\boldsymbol{0},\boldsymbol{M})$，其中$\boldsymbol{M}$是海杂波的散斑协方差矩阵，主对角线元素为1。并且，纹理分量和散斑分量相互独立。当纹理分量服从Gamma分布时，海杂波幅度服从K分布[1–5]

$$p_r(r)=\frac{2}{\mu G(\upsilon)}\left(\frac{r}{2\mu}\right)^{\upsilon}K_{\upsilon-1}\left(\frac{r}{\mu}\right),r>0\tag{2}$$

其中，r是海杂波的幅度，$K_{\upsilon-1}(\cdot)$表示第2类$\upsilon-1$阶修正Bessel函数，$G(\cdot)$表示伽马函数。K分布模型尺度参数μ和形状参数υ已知或者可以从雷达回波数据中预先估计。

在非相干积累检测方法中，雷达回波通过平方率检波器，实现脉冲能量累积，则式(1)变化为

$$\left.\begin{aligned}&\mathrm{H}_0:z=\tau x,z_p=\tau_p x_p,p=1,2,\cdots,P\\&\mathrm{H}_1:z=|\boldsymbol{s}+\boldsymbol{c}|^2,z_p=\tau_p x_p,p=1,2,\cdots,P\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

其中$z,z_1,z_2,\cdots,z_P$表示脉冲能量累积输出，$x=\boldsymbol{u}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{u}$，$x_p=\boldsymbol{u}_p^{\mathrm{H}}\boldsymbol{u}_p$，$p=1,2,\cdots,P$是独立同分布的正随机向量，服从分布$p_x(x|\boldsymbol{M},N)$，$N$是脉冲积累数。本文主要研究CA-CFAR和CM-CFAR非相干积累检测方法。CA-CFAR和CM-CFAR检测方法的检测统计量为

$$\begin{aligned}\xi&=\frac{\tau x}{\vartheta\{\tau_1x_1,\tau_2x_2,\cdots,\tau_Px_P\}}\\&=\frac{(\tau/\mu)x}{\vartheta\{(\tau_1/\mu)x_1,(\tau_2/\mu)x_2,\cdots,(\tau_P/\mu)x_P\}}\\&=\frac{\zeta x}{\vartheta\{\zeta_1x_1,\zeta_2x_2,\cdots,\zeta_Px_P\}}\end{aligned}\tag{4}$$

其中，$\vartheta\{\cdot\}$表示取均值或者中值，分别对应CA-CFAR和CM-CFAR检测方法，$\zeta=\tau/\mu$，$\zeta_p=\tau_p/\mu$，$p=1,2,\cdots,P$服从形状参数υ、尺度参数为1的Gamma分布$p_\zeta(\zeta|\upsilon,1)$。从分布$p_\zeta(\zeta|\upsilon,1)$

可以看出，CA-CFAR和CM-CFAR检测方法的检测统计量与尺度参数无关。由于尺度参数反映杂波的平均功率水平，所以CA-CFAR和CM-CFAR检测方法关于杂波功率是CFAR的。

下面以CM-CFAR检测方法为例，推导检测统计量与脉冲积累数N、参考单元数P、K分布海杂波模型的形状参数υ和杂波散斑协方差矩阵$\boldsymbol{M}$的关系。令$g=\zeta x$，$g_p=\zeta_p x_p$，$p=1,2,\cdots,P$，β为$g_1,g_2,\cdots,g_P$的中值，则

$$\xi_{\mathrm{CM}}=g/\mathrm{median}\{g_1,g_2,\cdots,g_P\}=g/\beta \tag{5}$$

其中，median$\{\cdot\}$为取中值运算。随机变量g和β的概率密度函数分别为

$$\left.\begin{aligned}&p_g(g\,|\upsilon,\boldsymbol{M},N)=\int_0^{+\infty}\frac{1}{x}p_x\left(\frac{g}{x}\,|\boldsymbol{M},N\right)\\&\cdot p_\zeta(\zeta\,|\upsilon,1)\,\mathrm{d}x\\&p_\beta(\beta)=\frac{P!}{[((P-1)/2)!]^2}[(1-p_g(\beta\,|\upsilon,\boldsymbol{M},N))\\&\cdot p_g(\beta\,|\upsilon,\boldsymbol{M},N)]^{(P-1)/2}p_g(\beta\,|\upsilon,\boldsymbol{M},N)\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

CM-CFAR检测方法的检测统计量的概率密度函数为

$$\begin{aligned}p_{\xi_{\mathrm{CM}}}(\xi)&=\int_0^{+\infty}xp_g(x\xi\,|\upsilon,\boldsymbol{M},N)\,p_\beta(x)\,\mathrm{d}x\\&=\frac{P!}{[((P-1)/2)!]^2}\int_0^{+\infty}xp_g(x\xi\,|\upsilon,\boldsymbol{M},N)\\&\quad\cdot[(1-p_g(x\,|\upsilon,\boldsymbol{M},N))\,p_g(x\,|\upsilon,\boldsymbol{M},N)]^{(P-1)/2}\\&\quad\cdot p_g(x\,|\upsilon,\boldsymbol{M},N)\,\mathrm{d}x\end{aligned} \tag{7}$$

由式(7)可以看出，CM-CFAR检测方法的检测统计量ξ_{CM}的概率密度函数$p_{\xi_{\mathrm{CM}}}(\xi)$与参考单元数$P$有关。因式(7)复杂，无法推导出CM-CFAR检测方法的$p_{\xi_{\mathrm{CM}}}(\xi)$与脉冲积累数$N$、形状参数$\upsilon$和杂波散斑协方差矩阵$\boldsymbol{M}$的关系。同上，可以证明CA-CFAR检测方法的检测统计量ξ_{CA}的概率密度函数与参考单元数P有关，同时也难以推导出与脉冲积累数N、形状参数υ和杂波散斑协方差矩阵$\boldsymbol{M}$的关系。

目前为止的研究结果表明，K分布海杂波背景下的非相干积累检测方法的CFAR特性与杂波功率无关，与海杂波的非高斯性、脉冲积累数和参考单元数有关[3–5]。然而，CA-CFAR和CM-CFAR检测方法的CFAR特性是否与海杂波的散斑协方差矩阵有关，专家学者尚未研究，从式(7)中也不能得出结论。本节通过仿真实验和K-S检验的方法判断CA-CFAR和CM-CFAR检测方法的检测统计量的概率密度函数与杂波散斑协方差矩阵$\boldsymbol{M}$的关系。仿真实验中，使用球不变随机过程(Spherically Invariant Random Process, SIRP)方法产生服从K分布的海杂波数据[12]，尺度参数固定为$\mu=1$，杂波散斑协方差矩阵$\boldsymbol{M}=[\rho^{|i-j|}]_{i,j=1}^N,\rho\in[0,1]$，其中，$\rho$是脉冲间的相关系数。在每组仿真实验中，产生$10^5$个仿真数据，参考单元数$P=50$，脉冲积累数$N=10$，形状参数$\upsilon=6$，相关系数$\rho$分别取值0.10, 0.50, 0.95。每个仿真数据计算1个检测统计量，然后统计分析检测统计量的经验累积分布。K-S检验是基于累积分布函数，用以比较两种独立样本的经验累积分布是否有显著性差异。假设两种独立样本的样本数分别为m和n，经验累积分布函数分别为$F_{1,m}(x)$和$F_{2,n}(x)$，判定两种独立样本的经验累积分布具有显著性差异，需满足式(8)条件

$$\begin{aligned}&\sup_x\{|F_{1,m}(x)-F_{2,n}(x)|\}>T(a)\\&\quad=C(\alpha)\sqrt{(m+n)/mn}\end{aligned} \tag{8}$$

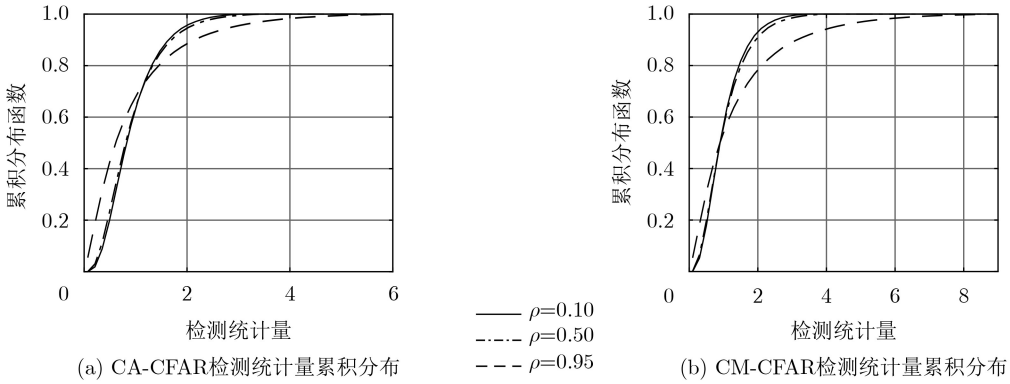
其中，sup$\{\cdot\}$是求上确界运算，α表示错误判决概率，$T(\alpha)$表示判决门限，$C(\alpha)$表示错误判决概率为α时的经验值。在仿真实验中采用K-S检验方法时，错误判决概率固定为$\alpha=0.001$，经验值$C(0.001)=1.95$，经过计算得到对应的判决门限为$T(0.001)=0.0087$。

图1给出了CA-CFAR和CM-CFAR的检测统计量在不同相关系数下的经验累积分布曲线。图1 (a)中CA-CFAR的检测统计量在$\rho=0.10$和$\rho=0.95$情况下，经验累积分布函数的K-S距离为0.2323，图1 (b)中CM-CFAR的检测统计量在$\rho=0.10$和$\rho=0.95$情况下，经验累积分布函数的K-S距离为0.1491，均大于判决门限0.0087。基于此实验结果，可以认为CA-CFAR和CM-CFAR检测方法的检测统计量与杂波散斑协方差矩阵$\boldsymbol{M}$有关，即说明了CA-CFAR和CM-CFAR检测方法关于杂波散斑协方差矩阵$\boldsymbol{M}$是非CFAR的。

在目标检测中，应用匹配于参考单元数P、脉冲积累数N和形状参数υ的自适应检测门限，可以保证CA-CFAR和CM-CFAR检测方法对这3个参数的CFAR。另外，采用块白化方法对海杂波进行预白化处理，使得杂波散斑协方差矩阵变为单位阵，保证CA-CFAR和CM-CFAR检测方法对杂波散斑协方差矩阵的CFAR。基于此，本文提出了预白化CA-CFAR(PWCA-CFAR)检测方法和预白化CM-CFAR(PWCM-CFAR)检测方法。下面将具体介绍这两种全场景CFAR的非相干积累检测方法。

3　PWCA-CFAR检测方法和PWCM-CFAR检测方法

在对海雷达信号处理过程中，通过杂波预白化



(a) CA-CFAR检测统计量累积分布 (b) CM-CFAR检测统计量累积分布

图 1 CA-CFAR和CM-CFAR的检测统计量在不同脉冲间相关系数下的经验累积分布函数

方法对杂波脉冲维去相关。但是白化过程中需要对每个分辨单元的杂波散斑协方差矩阵进行估计和求逆，计算时间长，如此就失去了非相干积累检测方法在处理时间上的优势。针对该问题，本文采用分块白化的方法对杂波进行预白化处理。假设，雷达回波信号向量序列为$\boldsymbol{z}_1,\boldsymbol{z}_2,\cdots,\boldsymbol{z}_Q$, Q为雷达回波信号向量序列的长度。将该信号向量序列划分为长度为L的不重叠的信号向量序列，块白化长度需要满足$L\geq 2N$[13]

$$\begin{aligned}&\left[\boldsymbol{w}_1\boldsymbol{w}_2\cdots\boldsymbol{w}_{Q/L}\right]=\left[\boldsymbol{z}_1\boldsymbol{z}_2\cdots\boldsymbol{z}_Q\right],\\&\boldsymbol{w}_i=\left[\boldsymbol{z}_{(i-1)L+1}\boldsymbol{z}_{(i-1)L+2}\cdots\boldsymbol{z}_{iL}\right]\end{aligned}\tag{9}$$

采用归一化采样协方差矩阵估计方法(Normalized Sampling Covariance Matrix, NSCM)[14]，从第i块的回波信号中估计第i块的杂波散斑协方差矩阵为

$$\hat{\boldsymbol{M}}_i=\frac{N}{L}\sum_{l=(i-1)L+1}^{iL}\frac{\boldsymbol{z}_l\boldsymbol{z}_l^{\mathrm{H}}}{\boldsymbol{z}_l^{\mathrm{H}}\boldsymbol{z}_l}\tag{10}$$

NSCM估计方法利用回波功率归一化处理，可以有效抑制杂波功率起伏对散斑协方差矩阵估计的影响。利用估计的散斑协方差矩阵对回波数据进行块白化，得到白化后回波数据

$$\begin{aligned}&\left[\bar{\boldsymbol{z}}_1\bar{\boldsymbol{z}}_2\cdots\bar{\boldsymbol{z}}_Q\right]=\left[\bar{\boldsymbol{w}}_1\bar{\boldsymbol{w}}_2\cdots\bar{\boldsymbol{w}}_{Q/L}\right],\bar{\boldsymbol{w}}_i=\hat{\boldsymbol{M}}_i^{-1/2}\boldsymbol{w}_i,\\&i=1,2,\cdots,Q/L\end{aligned}\tag{11}$$

块白化后，式(1)在海杂波背景下的二元假设检验问题转化为如式(12)的二元假设检验问题

$$\left.\begin{aligned}&\mathrm{H}_0:\bar{\boldsymbol{z}}=\bar{\boldsymbol{c}},\bar{\boldsymbol{z}}_p=\bar{\boldsymbol{c}}_p,p=1,2,\cdots,P\\&\mathrm{H}_1:\bar{\boldsymbol{z}}=\bar{\boldsymbol{s}}+\bar{\boldsymbol{c}},\bar{\boldsymbol{z}}_p=\bar{\boldsymbol{c}}_p,p=1,2,\cdots,P\end{aligned}\right\}\tag{12}$$

其中，$\bar{\boldsymbol{z}}$, $\bar{\boldsymbol{s}}$和$\bar{\boldsymbol{c}}$分别是白化后的CUT回波、目标回波和海杂波，$\bar{\boldsymbol{z}}_p,p=1,2,\cdots,P$表示白化后的参考单元回波。那么PWCA-CFAR检测方法和PWCM-CFAR检测方法的结构分别为

$$\begin{aligned}&\xi_{\mathrm{PWCA}}=\frac{\bar{\boldsymbol{z}}^{\mathrm{H}}\bar{\boldsymbol{z}}}{\dfrac{1}{P}\displaystyle\sum_{p=1}^{P}\bar{\boldsymbol{z}}_p^{\mathrm{H}}\bar{\boldsymbol{z}}_p}\underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}}T_{\mathrm{PWCA}},\\&\xi_{\mathrm{PWCM}}=\frac{\bar{\boldsymbol{z}}^{\mathrm{H}}\bar{\boldsymbol{z}}}{\mathrm{median}\left\{\bar{\boldsymbol{z}}_1^{\mathrm{H}}\bar{\boldsymbol{z}}_1\bar{\boldsymbol{z}}_2^{\mathrm{H}}\bar{\boldsymbol{z}}_2\cdots\bar{\boldsymbol{z}}_P^{\mathrm{H}}\bar{\boldsymbol{z}}_P\right\}}\underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}}T_{\mathrm{PWCM}}\end{aligned}\tag{13}$$

其中，ξ_{PWCA}和T_{PWCA}分别是PWCA-CFAR检测方法的检测统计量和检测门限，ξ_{PWCM}和T_{PWCM}分别是PWCM-CFAR检测方法的检测统计量和检测门限。检测门限T_{PWCA}和T_{PWCM}均仅与虚警概率P_{fa}、参考单元数P、脉冲积累数N和形状参数υ有关。由于PWCA-CFAR和PWCM-CFAR检测方法的检测统计量的概率密度函数的复杂性，本文使用离线的Monte-Carlo实验方法提前建立不同参数条件下的门限表格。检测时，根据给定的P, N, υ和虚警率P_{fa}，通过查表获得检测门限。查表时，由于网格误差的存在，表格的大小会影响检测方法的CFAR特性。为了保证查表的检测方法的CFAR特性，表格越大越好，此时网格误差越小，但是表格越大，所需存储空间越大，查表时运行时间越长，故表格又不能做的太大。查表的目标检测方法的CFAR特性与表格的精细化程度有关，所以查表的目标检测方法可以保证一种精度可以控制的近似CFAR特性。

PWCA-CFAR和PWCM-CFAR检测方法的原理框图如图2所示。首先对雷达回波信号进行块白化，目的在于对雷达回波信号的脉冲维去相关以保证PWCA-CFAR和PWCM-CFAR检测方法对于海杂波散斑协方差矩阵的CFAR特性。其次在块白化后的雷达回波中进行目标检测，沿距离维在待检测单元周围选取参考单元，利用参考单元中的回波数据估计杂波背景的功率水平，利用待检测单元回波数据计算待检测单元的回波功率。然后，通过待检测单元回波功率与估计的杂波功率的比值，构造检

测统计量。最后，将检测统计量与经过查表得到的检测门限进行比较，得出相应的判决。

4　实验结果和性能分析

4.1　仿真数据检测性能分析

本节采用仿真数据对PWCA-CFAR检测方法和PWCM-CFAR检测方法的性能进行评估。应用SIRP方法产生尺寸为$N\times 5000\times 200$(脉冲维×距离维×波位维)K分布海杂波数据，N为积累脉冲数，脉冲间相关系数设置为$\rho=0.9$。在一个相干处理时间内，目标信号可以建模为目标回波幅度和多普勒导向矢量的乘积

$$\boldsymbol{s}=a\boldsymbol{p},\boldsymbol{p}=\left[12\pi \mathrm{j}f_{\mathrm{d}}T_{\mathrm{r}}4\pi \mathrm{j}f_{\mathrm{d}}T_{\mathrm{r}}\cdots 2\left(N-1\right)\pi \mathrm{j}f_{\mathrm{d}}T_{\mathrm{r}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

其中，a是目标信号的复幅度，f_{d}是目标多普勒频移，T_{r}是脉冲重复周期，$\boldsymbol{p}$为多普勒导向矢量。仿真的海杂波加上仿真的目标信号构成仿真的雷达回波数据，目标多普勒偏移在区间$[-1/2T_{\mathrm{r}},1/2T_{\mathrm{r}}]$随机选取。目标回波的信杂比(Signal-to-Clutter Ratio, SCR)定义为

$$\mathrm{SCR}=10\lg\left(|a|^2/\bar{p}_{\mathrm{c}}\right) \tag{15}$$

其中，$\bar{p}_{\mathrm{c}}$是海杂波的平均功率水平。实验中，设置目标回波SCR = 5 dB。提出的非相干积累检测方法的检测性能与参考单元数、脉冲积累数和杂波统计模型的形状参数有关。由于脉冲积累提高了目标回波的信杂比和参考单元数的增加使得e_{PWCA}和e_{PWCM}的估计更加精确，所以参考单元数和脉冲积累数的增加有利于提高提出的非相干积累检测方法的检测性能。此外，海面目标检测时，真实海杂波中常常存在比较多的异常分辨单元，这些“异常点”可能会导致目标检测性能的下降。在仿真的海杂波数据中添加比例为b的异常分辨单元，同时添加10^4个仿真目标，计算检测概率，给出检测方法的接收机工作性能(Receiver Operation Characteristic, ROC)曲线。通过ROC曲线，评估PWCA-CFAR检测方法和PWCM-CFAR检测方法在不同异常分辨单元比例和不同形状参数情况下的检测性能。

实验参数设置如下，块白化长度$L=50$，目标检测时保护单元数$Q=2$，第1组实验：异常分辨单元比例$b=0\%, 5\%, 10\%$，参考单元数$P=40$，脉冲积累数$N=10$，形状参数$v=1$；第2组实验：异常分辨单元比例$b=5\%$，参考单元数$P=30$，脉冲积累数$N=5$，形状参数$v=1, 5, 20$。图3和图4分别给出了PWCA-CFAR检测方法和PWCM-CFAR检测方法在不同异常分辨单元比例和不同形状参数情

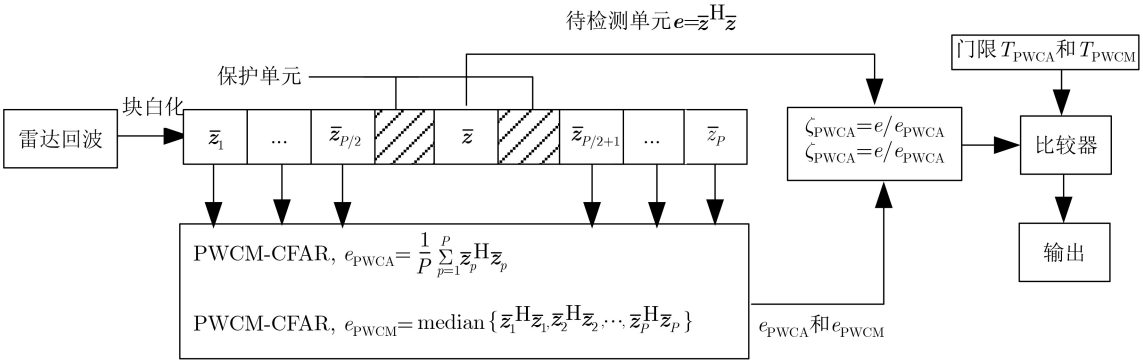


图 2 PWCA-CFAR和PWCM-CFAR检测方法的原理框图

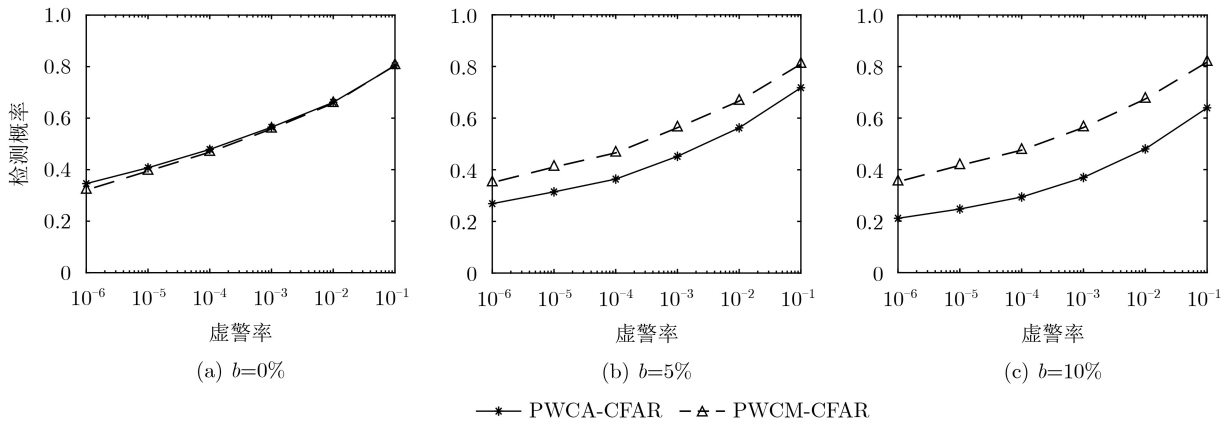


图 3 不同异常分辨单元比例情况下PWCA-CFAR和PWCM-CFAR检测方法的ROC曲线

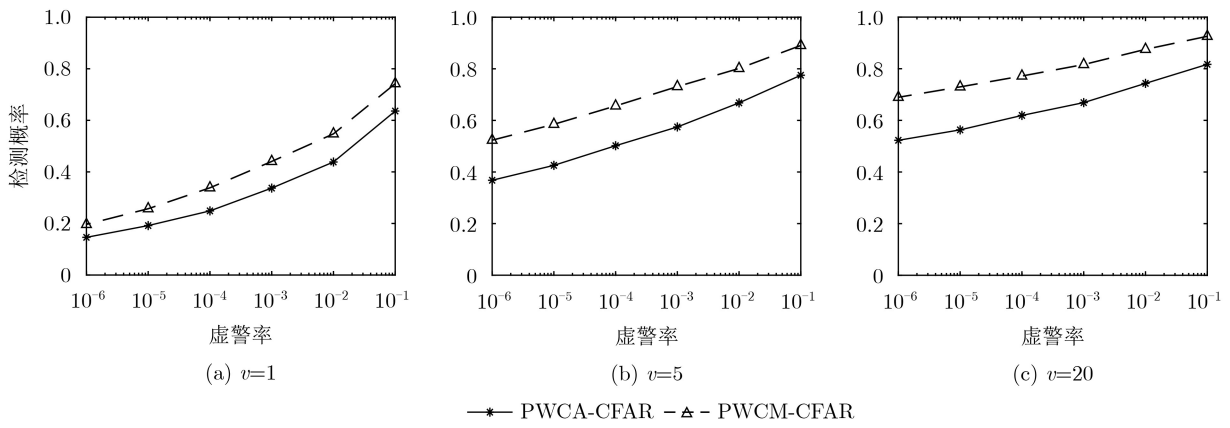


图 4 不同形状参数情况下PWCA-CFAR和PWCM-CFAR检测方法的ROC曲线

况下的ROC曲线。由图3(a)可以看出，当海杂波场景中没有异常分辨单元时，PWCA-CFAR检测方法的检测性能要略优于PWCM-CFAR检测方法，这是因为单元平均比单元中值更加充分地利用了参考单元数据的功率信息。而在图3(b)和图3(c)中，当存在异常分辨单元时，PWCA-CFAR检测器的检测性能有明显的下降，PWCM-CFAR检测器却表现出对异常分辨单元较好的稳健性。随着异常分辨单元比例的增加，PWCM-CFAR检测器相比于PWCA-CFAR检测器，其检测性能优势更加明显。由图4可以看出，当异常分辨单元比例$b=5\%$时，在不同形状参数情况下，PWCM-CFAR检测器的检测性能均优于PWCA-CFAR检测器。当形状参数变大时，PWCA-CFAR检测器和PWCM-CFAR检测器的检测性能均显著提高。这是因为随着形状参数的增大，海杂波的非高斯性减弱，这有利于提高非相干积累检测器的目标检测性能。

下面，通过实验分析块白化长度对PWCA-CFAR和PWCM-CFAR检测方法处理效率的影响。在实验中，仿真尺寸为10×5000×200(脉冲维×距离维×波位维)的K分布海杂波场景，形状参数$v=5$，积累脉冲数N=10，脉冲间相关系数ρ=0.9，块白化长度从20到100均匀选取，间隔为10，分别使用PWCA-CFAR和PWCM-CFAR检测方法对整个海杂波场景进行检测，参考单元数P=40，保护单元数Q=2，虚警率$P_{\rm fa}=10^{-4}$。重复该实验100次，计算两种检测方法检测整个海杂波场景所用时间的平均值，结果如图5所示。从图中可以看出，PWCA-CFAR检测方法的计算时间比PWCM-CFAR检测方法的时间少。另外，随着块白化长度的增加，两种检测方法的计算时间均逐渐缓慢减小，并且减少的幅度越来越小。为了缩短块白化时间，块白化长度越长越好。但是同时为了保证块白化长度内距离单元的海杂波具有相似的散斑协方差矩阵，块白化长度不能选择太长。因此块白化长度应该在这两个因素之间折中选取。

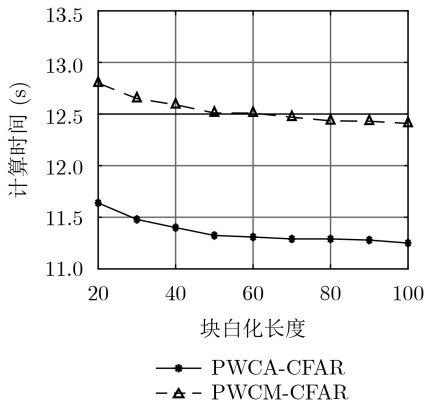


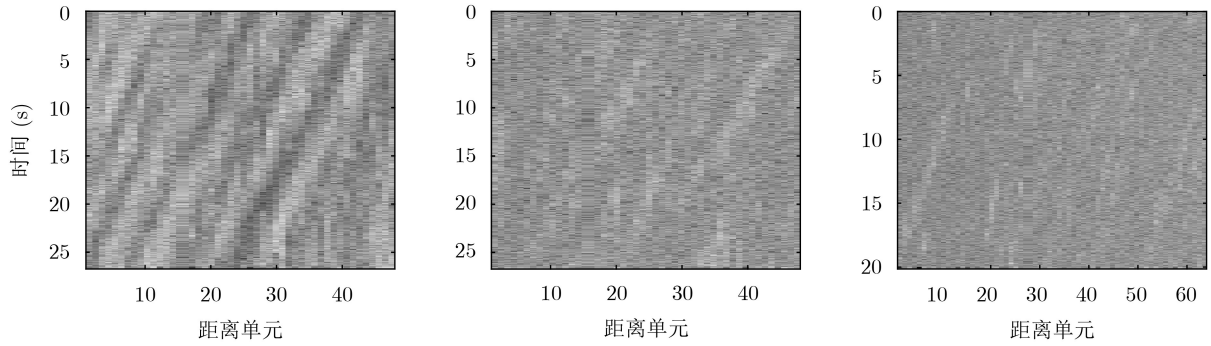
图 5 在不同块白化长度下PWCA-CFAR和PWCM-CFAR检测方法的计算时间

4.2 实测数据检测性能分析

采用实测海杂波数据对PWCA-CFAR检测方法和PWCM-CFAR检测方法进行检测性能评估。本节使用的3组实测数据是X波段的Fynmeet雷达在南非采集到的海杂波数据[15]，雷达载频9 GHz，距离分辨率15 m，脉冲重复间隔$f_{\rm r}=5000$ Hz。3组数据的存储格式均为脉冲维×距离维，第1组数据CFC17_009.02.mat的尺寸为133640 × 48，第2组数据CFC17_011.01.mat的尺寸为133640 × 48，第3组数据CFC17_005.01.mat的尺寸为100744 × 64。3组数据的幅度图如图6所示，使用K分布拟合3组数据的海杂波幅度分布，拟合参数及结果如图7所示，其中点迹表示海杂波数据幅度的经验概率密度曲线，黑色实线表示K分布拟合曲线。3组数据幅度分布的K分布拟合结果的参数分别为：$v=1.8015$，$\mu=0.2619$；$v=10.9698$，$\mu=0.1114$；$v=22.1082$，$\mu=0.1060$，其中v是形状参数，μ是尺度参数。由图7可以看出，K分布模型能够很好地描述该3组数据。

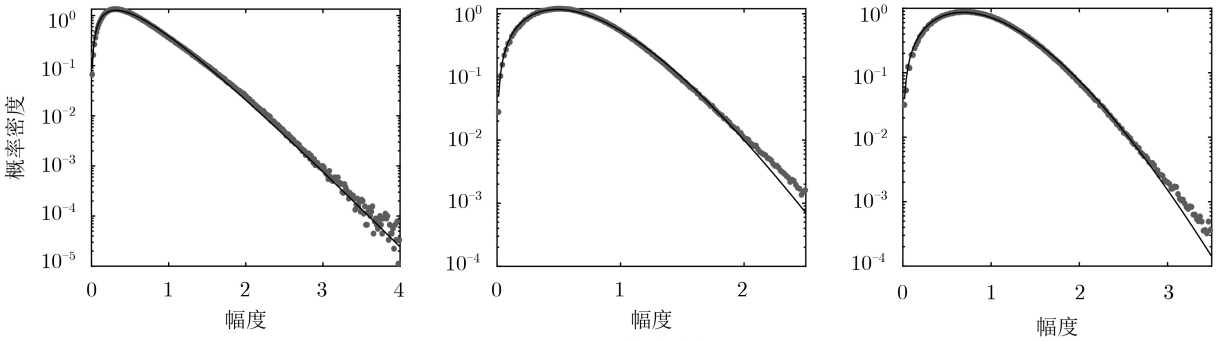
在3组实测海杂波数据中加入仿真目标，分析

评估PWCA-CFAR检测方法和PWCM-CFAR检测方法在不同SCR情况下的检测性能。实验中，首先对3组数据进行分割，脉冲积累数设置为$N=10$，则第1组数据和第2组数据均分割成13364个尺寸为10×48(脉冲维×距离维)的数据，第3组数据分割成10074个尺寸为10×48(脉冲维×距离维)的数据(删除第100741～100744脉冲的数据和第49～64距离单元的数据)。在处理后的每组数据中，随机选择10^4个尺寸为10×48的杂波数据中分别加入仿真目标。对于选定的尺寸为10×48的杂波数据，计算该杂波数据的杂波平均功率$\bar{p}_c$，根据仿真目标的信杂比SCR和式(15)可以得到仿真目标的幅度$|a|=\sqrt{\bar{p}_c 10^{\mathrm{SCR}/10}}$，初相$\varphi$在区间$[0,2\pi]$上随机选取，如此目标信号的复幅度为$a=|a|\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}$，仿真目标的多普勒偏移在区间$[-f_{\mathrm{r}}/2, f_{\mathrm{r}}/2]$随机选取，根据式(14)产生目标信号。在尺寸为10×48的杂波数据中，随机选取一距离维位置，在此位置直接加上产生的目标信号。应用提出的非相干积累检测方法进行目标检测时，块白化长度为48，脉冲积累数$N=10$，参考



(a) 第1组数据　(b) 第2组数据　(c) 第3组数据

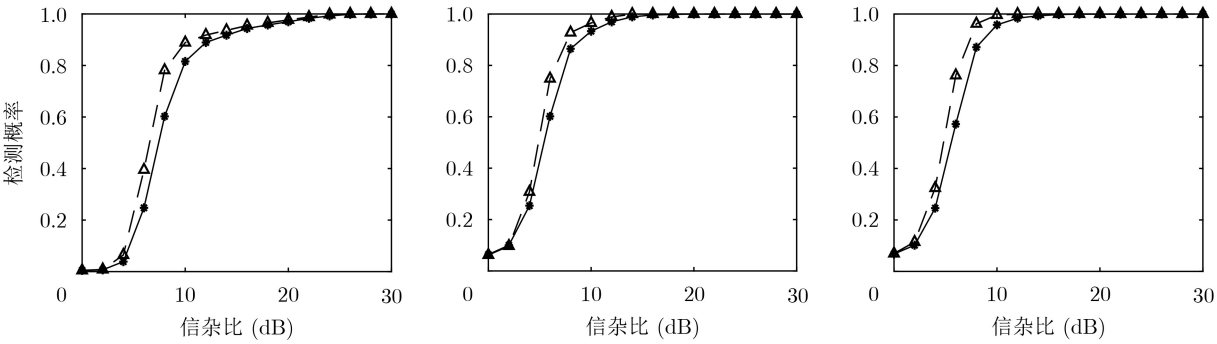
图 6 3组数据的幅度图



(a) 第1组数据　(b) 第2组数据　(c) 第3组数据

• 经验概率密度　—— K分布拟合

图 7 3组数据的幅度分布拟合结果



(a) 第1组数据　(b) 第2组数据　(c) 第3组数据

—*— PWCA-CFAR　–△– PWCM-CFAR

图 8 PWCA-CFAR和PWCM-CFAR检测方法在3组数据不同目标信杂比情况下的检测概率

单元数$P=40$，保护单元数目$Q=2$，虚警率$P_{\rm fa}=10^{-4}$，目标信号SCR的值从0 dB到30 dB均匀选取，间隔为2 dB，门限通过Mente-Carlo方法获得。计算检测方法在不同SCR情况下的平均检测概率，结果如图8所示。由图8可以看出，在3组数据中，PWCM-CFAR检测方法的检测性能均优于PWCA-CFAR检测方法，这是3组数据中存在一定异常单元的缘故。在高分辨对海雷达中，海杂波表现出强非高斯性，杂波中含有大量类似目标的尖峰回波并且海场景中可能存在岛礁，因此海杂波中的异常分辨单元通常是不可避免的。因此，在实际海杂波环境中，PWCM-CFAR检测方法的检测性能通常较好。

5 结束语

本文主要研究了相参雷达K分布海杂波背景下的非相干积累检测方法的CFAR特性，提出了对杂波功率、杂波非高斯性、杂波散斑协方差矩阵、脉冲积累数和参考单元数CFAR的PWCA-CFAR检测方法和PWCM-CFAR检测方法。在提出的两种非相干积累检测方法中，使用块白化方法对海杂波进行预白化处理，使得杂波散斑协方差矩阵变换为单位阵，并使用了匹配于杂波非高斯性、脉冲积累数和参考单元数的自适应门限，保证了提出方法的CFAR特性。实验结果表明，PWCM-CFAR检测方法能抑制异常单元对检测性能的影响，而PWCA-CFAR检测方法的性能却受到异常单元的影响而下降。

参 考 文 献

[1] 张玉石, 许心瑜, 尹雅磊, 等. L波段小擦地角海杂波幅度统计特性研究[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5): 1044–1048. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01139.
ZHANG Yushi, XU Xinyu, YIN Yalei, *et al*. Research on amplitude statistics of L-band low grazing angle sea clutter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(5): 1044–1048. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01139.

[2] 赵文静, 刘畅, 刘文龙, 等. K分布海杂波背景下基于最大特征值的雷达信号检测算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(9): 2235–2241. doi: 10.11999/JEIT171092.
ZHAO Wenjing, LIU Chang, LIU Wenlong, *et al*. Maximum eigenvalue based radar signal detection method for K distribution sea clutter environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(9): 2235–2241. doi: 10.11999/JEIT171092.

[3] 时艳玲, 水鹏朗. ANMF和CM-CFAR在K分布海杂波下的性能分析[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2012, 42(3): 359–364, 380. doi: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2012.03.004.
SHI Yanling and SHUI Penglang. Performance analysis of ANMF and CM-CFAR detectors against K-distributed sea clutter[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2012, 42(3): 359–364, 380. doi: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2012.03.004.

[4] WARD K D, TOUGH R J A, and WATTS S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance[M]. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2013: 101–143.

[5] 郝程鹏, 侯朝焕. 一种K-分布杂波背景下的双参数恒虚警检测器[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 756–759.
HAO Chengpeng and HOU Chaohuan. A two parameter CFAR detector in K-distribution clutter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 756–759.

[6] ROHLING H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1983, AES-19(4): 608–621. doi: 10.1109/TAES.1983.309350.

[7] 孟祥伟. 秩和非参数检测器在杂波边缘中的性能[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(12): 2859–2864. doi: 10.11999/JEIT190136.
MENG Xiangwei. Performance of rank sum nonparametric detector at clutter edge[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(12): 2859–2864. doi: 10.11999/JEIT190136.

[8] 代振, 王平波, 卫红凯. 非高斯背景下基于Sigmoid函数的信号检测[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(12): 2945–2950. doi: 10.11999/JEIT190012.
DAI Zhen, WANG Pingbo, and WEI Hongkai. Signal detection based on Sigmoid function in Non-Gaussian noise[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(12): 2945–2950. doi: 10.11999/JEIT190012.

[9] HUANG Penghui, XIA Xianggen, LIAO Guisheng, *et al*. Long-time coherent integration algorithm for radar maneuvering weak target with acceleration rate[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(6): 3528–3542. doi: 10.1109/TGRS.2018.2885508.

[10] CHEN Shuailin, LUO Feng, ZHANG Linrang, *et al*. Coherent integration detection method for maneuvering target based on dynamic programming[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2017, 73: 46–49. doi: 10.1016/j.aeue.2016.12.021.

[11] 李东宸, 水鹏朗, 许述文. 块白化杂波抑制的海面漂浮小目标检测方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2016, 43(6): 21–26. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2016.06.004.
LI Dongchen, SHUI Penglang, and XU Shuwen. Floating small target detection in the sea clutter via block-whitened clutter suppression[J]. *Journal of Xidian University*, 2016, 43(6): 21–26. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2016.06.004.

[12] 朱洁丽, 汤俊. 基于改进的ZMNL和SIRP的K分布杂波模拟方法[J]. 雷达学报, 2014, 3(5): 533–540. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.13124.
ZHU Jieli and TANG Jun. K-distribution clutter simulation methods based on improved ZMNL and SIRP[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 533–540. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.13124.

[13] REED I S, MALLETT J D, and BRENNAN L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, AES-10(6): 853–863. doi: 10.1109/taes.1974.307893.

[14] GINI F. Performance analysis of two structured covariance matrix estimators in compound-Gaussian clutter[J]. *Signal Processing*, 2000, 80(2): 365–371. doi: 10.1016/s0165-1684(99)00135-8.

[15] The defence, peace, safety, and security unit of the council for scientific and industrial research. The Fynmeet radar database[EB/OL]. http://www.csir.co.za/small_boat_detection, 2014.

张　坤：男，1989年生，博士生，主要研究方向为压缩感知、雷达信号处理和海面目标检测及其参数估计.

水鹏朗：男，1967年生，教授，博士生导师，研究方向为雷达目标探测、图像处理和滤波器组设计与应用.

王光辉：男，1990年生，硕士生，主要研究方向为海杂波模型建模和目标检测算法.

责任编辑：余　蓉