

超视距雷达中射频干扰仿真与距离-多普勒图检测方法

罗忠涛¹, 严美慧¹, 卢 琨², 夏 杭¹

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210013)

摘 要: 超视距雷达存在射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)问题, 尤以遍布全距离-多普勒(Range-Doppler, RD)图的宽带 RFI 影响最大. 本文给出宽带 RFI 的仿真方法和基于 RD 图的 RFI 检测方法. 首先, 基于自回归滑动平均模型仿真宽带 RFI, 模拟实测 RFI 的时频特性和 RD 图形态. 其次, 基于图像分类思想, 研究 RD 图宽带 RFI 检测器, 通过提取 RD 图纹理特征, 运用模式识别, 实现 RD 图有无宽带 RFI 的分类. 图库设计以仿真 RFI 数据的 RD 图库作训练集, 以实测数据的 RD 图库作测试集, 识别算法以 K 近邻为例. 实验仿真 3 种纹理特征、5 种距离度量及有无海杂波等多种组合, 检测性能统计表明, 适当设计的干扰识别率普遍能达到 96% 以上, 验证了本文所提的干扰仿真与检测方法的有效性.

关键词: 超视距雷达; 距离-多普勒图; 射频干扰仿真; 干扰检测; 纹理特征; K 近邻

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)05-1174-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210402

Radio Frequency Interference Simulation and Detection in the Range-Doppler Map for Over-the-Horizon Radar

LUO Zhong-tao¹, YAN Mei-hui¹, LU Kun², XIA Hang¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China)

Abstract: Over-the-horizon radar(OTHR) is often threatened by radio frequency interference(RFI), among which the wideband RFI spreading all over the range-Doppler(RD) map is the worst. This paper proposes the methods for RFI simulation and wideband RFI detection based on the RD map. Firstly, based on the auto-regressive and moving-average model, the RFI signal is simulated and can imitate the real RFI characteristics in the time-frequency domain and the RD map. Secondly, by the idea of image classification, the wideband RFI detector is designed based on the RD map. Its guideline is: based on the RD maps, extract their texture features and use pattern recognition algorithms to classify whether the RD map has any wideband RFI. For the RD image datasets, the simulated RFI data is used for the training dataset, while the real data is used for the testing dataset. The K-nearest neighbor(KNN) algorithm is employed as an example for classification. The experiments investigate three kinds of texture features, five kinds of distance measurements, and whether the sea clutter is cancelled. The results show the accuracy of a proper design is generally higher than 96%, which demonstrates the effectiveness of the proposed methods for RFI simulation and detection.

Key words: over-the-horizon radar; range-Doppler map; radio frequency interference simulation; interference detection; texture features; K-nearest neighbor

1 引言

天波超视距雷达(Over-The-Horizon Radar, OTHR)利用电离层反射高频电磁波, 对国防远程战略预警有

重要作用^[1]. OTHR 工作频段的 RFI(Radio Frequency Interference)会污染 RD(Range-Doppler)图, 尤其是带宽较大的 RFI 遍布整个 RD 图, 严重降低目标检测性能.

因此,准确检测和处理干扰对 OTHR 很重要. 研究者提出了多种 RFI 抑制方法,包括针对 RFI 窄带性的子空间投影法^[2]、滤波器设计法^[3]等,针对 RFI 强方向性的接收波束形成法^[4]等.

本文采用图像识别来研究宽带 RFI 检测问题^[5],其优势是不关注干扰具体特性,更关注 RD 图的形态特征. 实现步骤为:建立 RD 图库,提取纹理特征,基于模式识别理论设计干扰识别算法.

图库的建立需要仿真干扰数据,因为 OTHR 实测数据太少会导致过拟合. 不过,宽带 RFI 较难仿真,尚未见可用的仿真模型. 为此,本文提出一种仿真宽带 RFI 的办法,并与实测 RFI 的时频特性相比较.

RD 图识别需要基于纹理特征. 目前常用的纹理分析方法很多^[6],如局部二值模式(Local Binary Pattern, LBP)^[7,8]、灰度共生矩阵(Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM)^[9]、方向梯度直方图(Histograms of Oriented Gradients, HOG)^[10]、Gabor 变换^[11]和 Tamura 纹理^[12]等. 特征提取方法对于图像识别性能很重要.

根据 RD 图干扰与噪声纹理的特点,本文选用 3 种纹理特征提取方法并分析其参数. 实验环节将仿真纹理特征与海杂波对于干扰检测性能的影响,干扰检测将采用易理解的 KNN 算法^[13].

2 射频干扰信号仿真

2.1 RFI 仿真方法

OTHR 系统的接收信号主要包含目标回波、海杂波、各种干扰和噪声. 本文考虑 RFI 的接收信号建模为

$$r(n) = A_s s(n) + A_c c(n) + A_i i(n) + A_w w(n) \quad (1)$$

其中 $s(n)$, $c(n)$, $i(n)$, $w(n)$ 分别表示目标回波、海杂波、RFI 和复高斯白噪声, A_s , A_c , A_i , A_w 分别表示各信号幅度. 本文主要解决式(1)RFI 的仿真问题.

按照频谱宽度,RFI 可分为点频 RFI 和宽带 RFI^[14]. 点频 RFI 在 RD 图造成一条直线,其频谱为频点,可参考文献^[15]的单频信号建模法. 宽带 RFI 的频谱具有一定宽度,尽管明显低于雷达带宽,但足以造成全 RD 图的条纹^[14].

经仔细分析 RFI 的时频特性,我们发现 RD 图中宽带 RFI 条纹与点频 RFI 直线有共同点,但 RFI 条纹所占多普勒单元多且幅度变化明显. 再结合干扰功率谱密度,我们认为可在点频 RFI 基础上增加随机性,模拟出宽带 RFI 的频谱展宽效果.

本文提出基于自回归滑动平均(Auto-Regressive and Moving-Average, ARMA)模型仿真宽带 RFI. 设 ARMA 系统输入为 $v(n)$, 输出为 $u(n)$, 差分方程为

$$u(n) = -\sum_{p=1}^P a_p u(n-p) + \sum_{l=0}^L b_l v(n-l) \quad (2)$$

其中, a_p 和 b_l 为模型参数, P 和 L 为阶数. 对应的系统方

程为

$$H(z) = \left(\sum_{l=0}^L b_l z^{-l} \right) / \left(1 + \sum_{p=1}^P a_p z^{-p} \right) \quad (3)$$

一方面,为仿真 RFI 频谱集中现象, $H(z)$ 构造 RFI 的点频特性. 考虑余弦信号的 Z 变换为

$$\cos(an) \xleftrightarrow{z} \frac{z^2 - z \cos \alpha}{z^2 - 2z \cos \alpha + 1} = \frac{1 - \cos \alpha \cdot z^{-1}}{1 - 2\cos \alpha \cdot z^{-1} + z^{-2}} \quad (4)$$

可令系数 $a_1 = -2\cos \alpha$, $a_2 = 1$, $b_0 = 1$, $b_1 = -\cos \alpha$, 使 $u(n)$ 具有点频信号的频谱特性.

另一方面, $v(n)$ 赋予干扰频谱展宽和随机性. 设 $v(n)$ 为 0 均值复高斯噪声, 功率谱为常数, $u(n)$ 的功率谱为^[16]

$$\text{PSD}_U(j\omega) = \left[\sum_{l=0}^L b_l \exp(-j\omega l) \right]^2 / \left[1 + \sum_{p=1}^P a_p \exp(-j\omega p) \right]^2 \quad (5)$$

对应于广义平稳随机过程, 功率谱有一定带宽.

利用希尔伯特变换将实数信号转换为复数信号, 得到解析信号 $H[u(n)]$. 最终 RFI 信号仿真模型为

$$i(n) = H[u(n)] \exp(j2\pi f_i n + j\varphi_0) \quad (6)$$

其中 f_i 为频率, φ_0 为初相位.

此外,当 ARMA 模型输入 $v(n)$ 为常数(例如 1)时, 输出为单频信号, 故此方法也可仿真点频 RFI.

2.2 时频域特性验证

为验证本文 RFI 仿真方法, 利用文献^[14]的五域六图法, 选取 RFI 特性表现最明显的 RD 图、频率-周期(Frequency-Period, FP)图和频率-多普勒(Frequency-Doppler, FD)图, 绘制如图 1, 其中海杂波已抑制. 仿真条件为: OTHR 采用连续波, 带宽 20 kHz, 采样频率 50 kHz, 重复周期 10 ms, 积累周期数 256.

图 1 对比了实测与仿真 RFI 的特性, 图 1(a)~(c) 为实测 RFI, 图 1(d)~(f) 为本文方法仿真的 RFI. 由图 1 可见:

(1) RD 图中仿真与实测 RFI 都形成横条纹, 形态相似. RFI 在 RD 图中表现为垂直于多普勒维的直线及遍布整个 RD 图的横条纹.

(2) FP 图中仿真与实测 RFI 的频谱均在每个周期具有窄带性, 各周期幅度连续, 幅度变化来自多普勒处理的加窗.

(3) FD 图中仿真与实测 RFI 的多普勒形态相似. 宽带 RFI 为带状, 点频 RFI 为点状.

综上, 仿真 RFI 在时频域和多普勒域均符合实测 RFI 的基本特性, 其 RD 图也能模拟实测 RFI 形态. 这说明本文方法能有效模拟 RFI.

显然, 本文仿真的 RFI 与 ARMA 模型参数有密切关系. 目前我们调参能模拟类似图 1(a) 的 RFI, 虽还不能很好地模拟过于复杂的 RD 图干扰形态, 但基于图像识别的干扰检测方法的一大优点是并不要求训练集包含

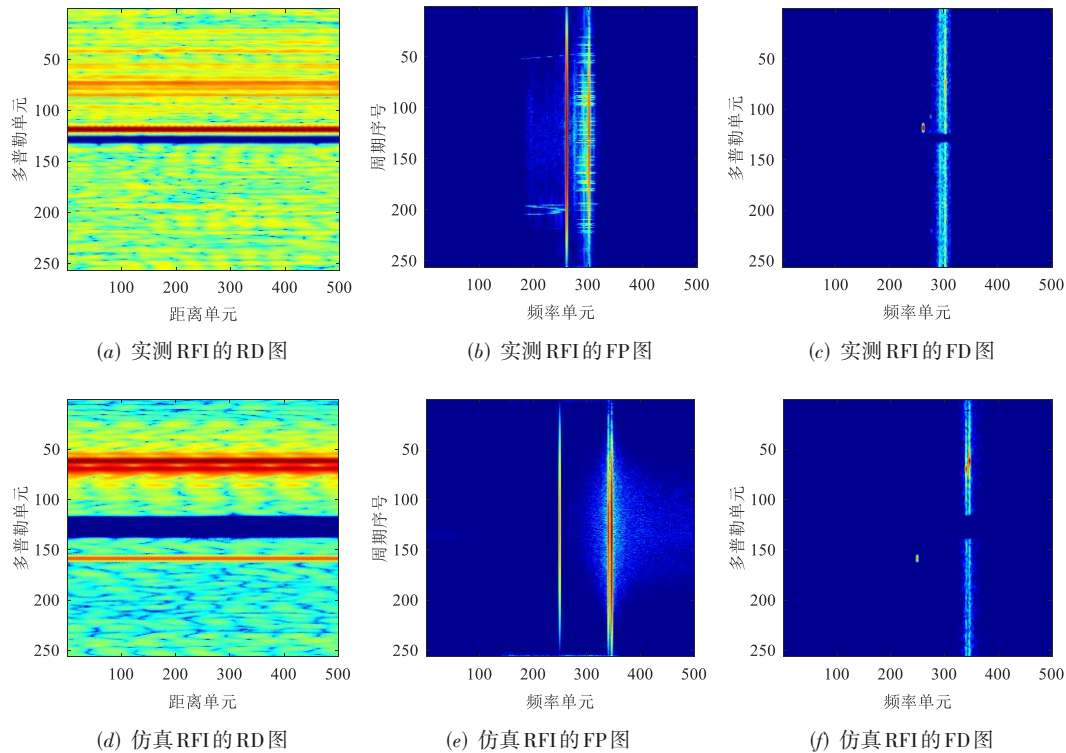


图1 实测与仿真RFI对比图

所有待测样本形态.

3 RD图宽带干扰检测

基于RD图检测宽带RFI的依据是RD图在有干扰和无干扰下有截然不同的纹理特点. 一般图像识别包括预处理、特征提取和分类器设计. 本文不使用图像预处理, 因为白均衡、滤波降噪等预处理会使RD图幅度信息失真. 本章介绍特征提取和检测器设计, 下章解决“RD图库设计”这一新问题.

3.1 纹理特征提取

检测宽带RFI的基础是合理的纹理特征. 经审慎挑选, 选取LBP、HOG和GLCM三种典型特征, 并分析特征算子及其参数.

(1) LBP算子及其参数

Ojala T等提出圆形LBP算子、均匀模式 $LBP_{Q,R}^{u2}$ 和旋转不变均匀模式, 其中 R 为圆形邻域半径, Q 为邻域内像素点个数, $u2$ 表示模式^[7]. 本文采用包含大部分纹理模式的 $LBP_{Q,R}^{u2}$.

$LBP_{Q,R}^{u2}$ 参数: R 决定空间分辨率, 增大 R 可捕捉更大的空间尺度细节, 典型值范围为1~5. 增大 Q 可对每个像素进行更详细的LBP编码.

(2) HOG算子及其参数

HOG计算和统计图像局部区域的梯度方向直方图构成纹理特征, 过程可参考文献[10].

HOG参数: 单元格控制检测窗口, 增大单元格可获得更大尺度的空间信息.

(3) GLCM算子及其参数

GLCM计算特定灰度值和空间关系的像素对在图像中的频率, 表征图像纹理^[9]. 纹理信息矩阵 $P_m(s, \theta)$ 中, s 为像素间距离, θ 为角度, r 和 v 为像素灰度值, 本文设 $s=1$.

GLCM参数: θ 常取四个离散方向即 $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$ ^[17], 由于RD图中RFI为横条纹, 故也取水平方向 $\theta=0^\circ$. 灰度量化级 C 表示灰度值缩放为1~ C 间的整数, 影响GLCM的大小.

3.2 RD图宽带干扰检测器设计

RD图分类器的设计可基于机器学习或模式识别算法, 如支持向量机^[18]和KNN^[13]等. 分类算法的任务是将待测图像分为“有干扰”(指“有宽带RFI”)或“无干扰”(指“无宽带RFI”).

本文以KNN为例设计RD图干扰检测器, 并分析距离度量方式这一关键因素. 基于RD图和KNN的宽带RFI检测器系统如图2所示.

KNN根据样本间的相似程度对测试样本分类. 特征空间中两个样本的距离越小, 相似度越大. 距离度量有多种^[19], 本文选用五种常用的度量方式.

设样本特征矩阵为 X , 其中纹理特征样本 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ 分别是 X 的第 i, j 行的行向量, $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM})$, $\mathbf{x}_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jM})$, M 为特征总维数, \mathbf{x}_i 与 \mathbf{x}_j 的欧氏距离为

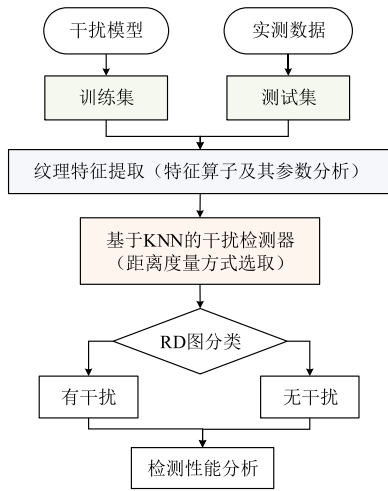


图2 基于RD图的干扰检测器

$$d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \left[\sum_{m=1}^M (\mathbf{x}_{im} - \mathbf{x}_{jm})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

标准化欧氏距离为

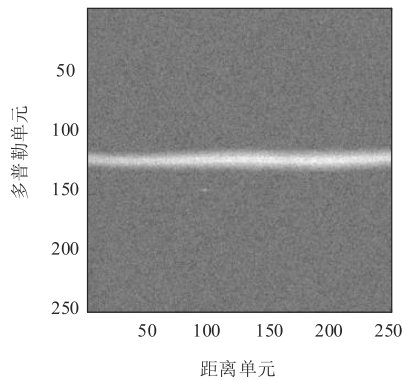
$$d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \left[\sum_{m=1}^M \left(\frac{\mathbf{x}_{im} - \mathbf{x}_{jm}}{s_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

其中, s_m 表示第 m 个维度的标准差. 夹角余弦为

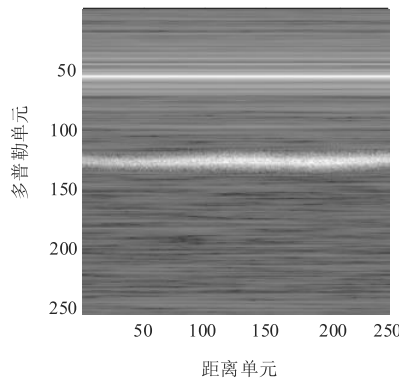
$$s_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^M \mathbf{x}_{im} \mathbf{x}_{jm}}{\left[\sum_{m=1}^M \mathbf{x}_{im}^2 \sum_{m=1}^M \mathbf{x}_{jm}^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

卡方距离为

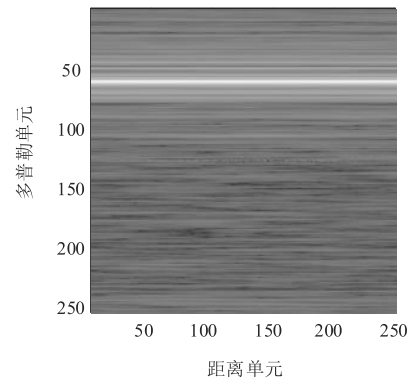
$$d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \sum_{m=1}^M \frac{(\mathbf{x}_{im} - \mathbf{x}_{jm})^2}{\mathbf{x}_{im} + \mathbf{x}_{jm}} \quad (10)$$



(a) 无 RFI 图



(b) 有 RFI 图



(c) 无海杂波的 RFI 图

图3 去海杂波前后的RD灰度图

4.2 训练集与测试集设计

对于训练集,先用式(6)仿真 RFI 数据,再由式(1)仿真接收数据,最后处理得到仿真 RD 灰度图. 测试集使用实测数据处理后的 RD 灰度图. 训练集和测试集均

马氏距离为

$$d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \left[(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^T \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

其中, \mathbf{S} 为 \mathbf{X} 的协方差矩阵.

4 RD 灰度图生成与图库设计

基于图像识别的宽带 RFI 检测需建立图库,分为训练集和测试集,由 RD 图转换而来^[5].

4.1 RD 灰度图像

(1) RD 灰度图生成

OTHR 接收数据经雷达常规处理,得到 RD 矩阵 \mathbf{Z} ,再转换为灰度图,灰度转换的等价函数为^[5]

$$I = \frac{G_s}{|\lg G_d|} \cdot \lg \left[\max \left(\frac{|\mathbf{Z}|}{|\mathbf{Z}|_{\max} G_d}, 1 \right) \right] \quad (12)$$

其中, I 为像素矩阵, G_d 和 G_s 分别控制动态范围和灰度级,设为 -80 dB 和 256.

(2) 海杂波问题

海杂波与 RFI 区别明显且不相关,因此可分析去海杂波的必要性. 本文去海杂波的做法是:在 RD 灰度图中删除海杂波所在多普勒单元,再采用双三次插值算法,将图尺寸重新调整为 256×256.

图3展示本文仿真的干扰 RD 灰度图和去海杂波的 RD 灰度图. 可见,海杂波处于低多普勒区域,宽带 RFI 遍布全图,因此删除海杂波不影响干扰观测. 对比图 3(b)、图 3(c),去海杂波前后的干扰形态保持一致.

综上,从 RD 灰度图来看,海杂波不影响干扰形态. 后面实验分析将表明,合适的纹理特征和距离度量方式下,海杂波几乎不影响干扰检测性能.

包含“有干扰”和“无干扰”两类图集.

训练集中“有干扰”图集由仿真宽带 RFI 图组成,设计步骤如下:

Step1: 调节式(2)参数 a_p 和 b_l 及式(6)的 f_s , 产生多

种形态的RFI.

Step2:调整式(1)的 A_i ,仿真不同幅度RFI.

Step3:采用一组仿真海杂波,调整式(1)的 A_s ,生成仿真接收数据.

Step4:雷达常规处理得到RD图,再由式(12)转换为灰度图,尺寸调整为 256×256 .

Step5:根据实验需要,决定是否从RD灰度图去海杂波.

训练集中“无干扰”图集包含仿真纯噪声图和仿真瞬态干扰图^[5].

测试集来源于OTHR实测接收数据的多样化处理,包含在接收波束形成环节采用不同的波束指向、阵元数、阵元位置及波束形成算法,生成各种形态的RD图.测试集中“有干扰”图集有形态和幅度不一的宽带RFI图,“无干扰”图集包含无干扰、各种杂波干扰、点频RFI和瞬态干扰图.图4为训练集与测试集设计方案示意图.根据图4方案,训练集和测试集的两类图集各包含

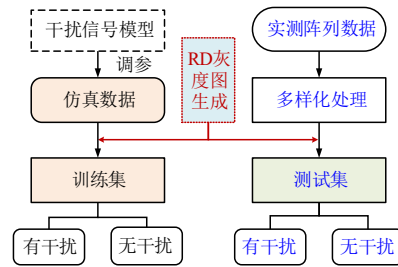


图4 训练集与测试集设计方案

100张RD灰度图.

5 实验与结果分析

干扰检测实验将测试集的各图归类为“有干扰”或“无干扰”.本章分别仿真LBP、HOG和GLCM三种特征的干扰识别率.

5.1 LBP参数与海杂波影响

实验1仿真 $LBP_{Q,R}^{u2}$ 的参数 Q 、 R 及海杂波影响,结果如表1.

表1 $LBP_{Q,R}^{u2}$ 参数与海杂波的识别率

算法	有海杂波/无海杂波(%)							
	$LBP_{8,1}^{u2}$	$LBP_{8,2}^{u2}$	$LBP_{8,3}^{u2}$	$LBP_{8,4}^{u2}$	$LBP_{16,1}^{u2}$	$LBP_{16,2}^{u2}$	$LBP_{16,3}^{u2}$	$LBP_{16,4}^{u2}$
欧氏	98.0/98.0	99.5/99.0	99.5/99.5	99.5/99.0	98.0/98.0	99.0/99.0	99.5/99.5	99.5/99.0
标欧	97.5/98.0	98.0/100	96.0/98.5	91.5/95.5	98.5/98.5	98.5/100	100/99.0	98.0/99.0
余弦	98.0/98.0	99.5/99.0	99.5/99.5	99.5/99.0	98.0/98.0	99.0/99.0	99.0/99.5	99.5/99.0
卡方	98.0/97.0	99.0/98.5	99.5/99.5	100/99.0	97.5/97.5	99.0/98.0	99.5/98.5	100/98.5
马氏	81.0/77.0	88.5/92.0	90.0/93.0	80.5/87.0	91.5/68.5	97.0/95.0	87.5/93.0	91.0/93.0

观察表1可得:

(1) LBP的欧氏、余弦和卡方距离的识别率很高且稳健,但标准化欧氏距离(标欧)的识别率稍低,马氏距离最低且不稳健.

(2) 对于高识别率(大于98%)情况, $LBP_{Q,R}^{u2}$ 的 Q 、 R 参数几乎不影响识别率.

(3) 对于高识别率(大于98%)情况,海杂波对识别率几乎无影响.

5.2 HOG参数与海杂波影响

实验2仿真HOG算法的单元格及海杂波影响,结果如表2.

由表2数据可得:

(1) 除了马氏距离,HOG的各种距离的识别率均很高且稳健.

(2) 对于较高识别率(大于96%)情况,单元格大小几乎不影响识别率.

(3) 对于较高识别率(大于96%)情况,海杂波对识别率几乎无影响.

5.3 GLCM参数与海杂波影响

实验3仿真GLCM算法的 θ 、 C 及海杂波影响,结果

表2 HOG参数与海杂波的识别率

算法	有海杂波/无海杂波(%)			
	单元格 8×8	单元格 16×16	单元格 32×32	单元格 128×128
欧氏	97.0/97.0	97.5/97.5	98.0/98.0	97.5/97.5
标欧	96.0/97.0	97.5/97.0	98.5/98.0	97.5/97.5
余弦	97.0/97.0	97.5/97.5	98.0/98.0	97.5/97.5
卡方	96.0/96.5	96.5/97.0	97.5/98.5	98.0/97.5
马氏	80.0/57.5	75.0/81.5	66.0/62.0	91.5/95.0

如表3.

对比表3可得:

(1) 除了马氏距离,GLCM的识别率均相对较高且较稳健.

(2) 普遍看来, $\theta=0^\circ$ 方法比常规 θ 平均法识别率更高.这说明纹理观察有利于优化特征参数.

(3) 有海杂波情况下, C 从8~32时,稳健距离度量的识别率提高; C 从32~256时,识别率小幅波动.无海杂波时 C 对识别率几乎无影响.

(4) RD灰度图去海杂波,对 $\theta=0^\circ$ 情况会普遍提高识别率,但对 θ 求平均情况却无明显规律.

表3 GLCM参数与海杂波的识别率

算法		有海杂波/无海杂波(%)			
		C=8	C=32	C=128	C=256
欧式	$\theta=0^\circ$	87.5/93.5	94.0/94.5	92.5/94.0	93.0/94.0
	θ 平均	49.0/69.5	82.5/78.5	83.0/77.0	83.0/76.5
标欧	$\theta=0^\circ$	90.0/95.0	90.0/96.5	92.5/96.0	92.0/96.5
	θ 平均	51.0/75.0	53.5/82.5	67.0/84.0	74.0/84.5
余弦	$\theta=0^\circ$	88.5/93.5	95.0/94.0	95.5/94.5	96.0/94.0
	θ 平均	52.0/68.0	81.5/82.5	82.5/72.5	85.0/73.0
卡方	$\theta=0^\circ$	91.0/94.0	94.0/94.5	94.0/94.0	93.5/94.0
	θ 平均	53.5/65.0	83.0/78.5	81.5/74.5	81.5/75.5
马氏	$\theta=0^\circ$	86.5/88.5	89.0/93.5	88.0/94.5	86.5/93.5
	θ 平均	76.0/78.5	64.5/73.0	66.5/72.5	67.5/80.0

纵观实验 1~3, KNN 采用欧式、余弦和卡方距离, LBP 和 HOG 特征下识别率分别普遍达到 98% 和 97%, 且海杂波几乎无影响。但 GLCM 特征仅在 $\theta=0^\circ$ 、标欧距离和无杂波情况下识别率能达到 96%。

6 结论

本文提出了宽带 RFI 的仿真方法, 探讨了基于 RD 图的宽带 RFI 检测思路, 以 KNN 为例设计了干扰检测器, 并仿真分析多种纹理特征、距离度量及海杂波等因素对干扰检测性能的影响。目前实验结果分析可得 3 点初步结论: (1) 从纹理特征角度, LBP 和 HOG 比 GLCM 特征更适合检测宽带 RFI。 (2) KNN 算法采用欧式、余弦和卡方距离度量可获得较高且稳健的识别率。 (3) 在合理的纹理特征和距离度量方式下, 海杂波几乎不影响识别率。基于图像识别的干扰检测独立于传统方法的原理, 能帮助提高干扰处理的稳健性。

参考文献

- [1] 周文瑜, 焦培南. 超视距雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 6-10.
- [2] WANG W, WYATT L R. Radio frequency interference cancellation for sea-state remote sensing by high-frequency radar[J]. IET Radar Sonar Navigation, 2011, 5(4): 405-415.
- [3] LUO Z T, HE Z S, LU K, et al. Optimal receive filter design under similarity constraint in coloured noise[J]. IET Radar Sonar Navigation, 2015, 9(7): 888-899.
- [4] GUO X, SUN H B, YEO T S. Interference cancellation for high-frequency surface wave radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(7): 1879-1891.
- [5] 罗忠涛, 夏杭, 卢琨, 何子述. 超视距雷达中距离-多普勒图的瞬态干扰自动识别方法[J]. 电子学报, 2021, 49(7):

1279-1285.

LUO Zhong-tao, XIA Hang, LU Kun, HE Zi-shu. Automatic recognition of transient interference in the range-Doppler map for over-the-horizon radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(7): 1279-1285. (in Chinese)

- [6] 刘丽, 匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述[J]. 中国图像图形学报, 2009, 14(4): 622-635.
- [7] LIU Li, KUANG Gang-yao. Overview of image textural feature extraction methods[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4): 622-635. (in Chinese)
- [7] OJALA T, PIETIKAINEN M. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 971-987.
- [8] 王凯丽, 张艳红, 肖斌, 等. 一种基于二维局部二值模式的纹理图像分类方法[J]. 电子学报, 2018, 46(10): 2519-2526.
- [9] WANG Kai-li, ZHANG Yan-hong, XIAO Bin, et al. Texture images classification based on two dimensional local binary patterns[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(10): 2519-2526. (in Chinese)
- [9] HARALICK R M, SHANMUGAM K, DINSTEN I. Textural features for image classification[J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, 1973, 3(6): 610-621.
- [10] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]//Proceedings of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, California, USA: IEEE, 2005: 886-893.
- [11] 王学文, 丁晓青, 刘长松. 基于 Gabor 变换的高鲁棒汉字识别新方法[J]. 电子学报, 2002, 30(9): 1317-1322.
- [11] WANG Xue-wen, DING Xiao-qing, LIU Chang-song. Gabor filters based feature extraction for robust Chinese character recognition[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(9): 1317-1322. (in Chinese)
- [12] 罗忠涛, 郭人铭, 郭杰, 等. OTH 雷达图像的粗糙度指标及用于射频干扰自适应抑制[J/OL]. 自动化学报, <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190286>.
- [12] LUO Zhong-tao, GUO Ren-ming, GUO Jie, et al. Tamura coarseness for OTH radar image evaluation and its application in adaptive optimization of interference suppression[J/OL]. Acta Automatica Sinica, <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190286>. (in Chinese)
- [13] COVER T M, HART P E. Nearest neighbor pattern classification[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1967, 13(1): 21-27.
- [14] 罗忠涛, 严美慧, 卢琨, 等. 超视距雷达海杂波与干扰信

号的多域特征与海杂波检测[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 580-588.

LUO Zhong-tao, YAN Mei-hui, LU Kun, et al. The characteristics of sea-clutter and interferences in various domains and the detection of sea-clutter for OTH radar[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2021, 43(3): 580-588. (in Chinese)

- [15] ZHOU H, WEN B Y. Radio frequency interference suppression in small-aperture high-frequency radars[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(4): 788-792.
- [16] 何子述, 夏威, 等. 现代数字信号处理及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 66-67.
- [17] 薄华, 马缚龙, 焦李成. 图像纹理的灰度共生矩阵计算问题的分析[J]. 电子学报, 2006, 34(1): 155-158.
BO Hua, MA Fu-long, JIAO Li-cheng. Research on computation of GLCM of image texture[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(1): 155-158. (in Chinese)
- [18] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 121-133.
- [19] 李航. 统计学习方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019: 255-258.

作者简介



罗忠涛 男, 1984 年生于四川省隆昌市. 现为重庆邮电大学通信与信息工程学院副教授. 研究方向为统计信号处理、数字图像处理与机器学习.

E-mail: luozt@cqupt.edu.cn



严美慧 女, 1996 年出生于江西省赣州市. 现为重庆邮电大学通信与信息工程学院研究生. 研究方向为雷达信号处理、图像分析与机器学习.

E-mail: 1264212873@qq.com



卢琨 男, 1977 年出生于广西省桂林市. 现为南京电子技术研究所研究员级高级工程师. 研究方向为超视距雷达系统设计与信息处理.

E-mail: mimimomoba@gmail.com



夏杭 男, 1994 年出生于贵州省安顺市. 现为重庆邮电大学通信与信息工程学院研究生. 研究方向为雷达信号处理、数字图像处理与机器学习.

E-mail: 1790095607@qq.com