

OTH 雷达图像的粗糙度指标及用于射频干扰自适应抑制

罗忠涛¹ 郭人铭¹ 郭杰¹ 何子述² 卢琨³

摘要 针对 OTH (Over-the-horizon) 雷达距离-多普勒 (Range-Doppler, RD) 图, 本文首次提出采用纹理粗糙度作为 RD 图质量的评价指标, 即计算 RD 图所转化灰度图的 Tamura 纹理粗糙度. 分析表明, 粗糙度指标能准确反映 RD 图受干扰情况, 对于不同灰度转换函数具有稳健性. 作为应用举例, 本文将图像粗糙度用于改进射频干扰抑制算法, 使干扰抑制达到自适应优化. 实验结果表明, Tamura 粗糙度能够正确反映 RD 图干扰抑制情况, 优化粗糙度指标能够使干扰抑制自适应达到最优.

关键词 OTH 雷达, 距离-多普勒图, Tamura 粗糙度, 干扰抑制

引用格式 罗忠涛, 郭人铭, 郭杰, 何子述, 卢琨. OTH 雷达图像的粗糙度指标及用于射频干扰自适应抑制. 自动化学报, 2022, 48(3): 887-895

DOI 10.16383/j.aas.c190286

Tamura Coarseness for OTH Radar Image Evaluation and Its Application in Adaptive Optimization of Interference Suppression

LUO Zhong-Tao¹ GUO Ren-Ming¹ GUO Jie¹ HE Zi-Shu² LU Kun³

Abstract Tamura coarseness is introduced as a reasonable index for evaluating the quality of range-Doppler (RD) map in OTH (Over-the-horizon) radar. Tamura coarseness is calculated as the texture coarseness of a gray image which is transformed from the RD map. The analysis shows that Tamura coarseness can correctly reflect the radio frequency interference in the RD image and is also robust when the gray transforming function changes. As an example of its application, Tamura coarseness is adopted to improve the interference suppression algorithm, so that the suppression can be optimized adaptively. Simulation results show that Tamura coarseness can be used as a quality index of the RD image, which helps to suppress the interference perfectly.

Key words Over-the-horizon (OTH) radar, range-Doppler (RD) map, Tamura coarseness, interference suppression

Citation Luo Zhong-Tao, Guo Ren-Ming, Guo Jie, He Zi-Shu, Lu Kun. Tamura coarseness for OTH radar image evaluation and its application in adaptive optimization of interference suppression. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(3): 887-895

现代雷达普遍采用动目标检测技术, 信号检测通常在距离-多普勒 (Range-Doppler, RD) 图中进行. 当雷达信号带宽内出现干扰时, 干扰会叠加到 RD 单元幅度上, 从而影响目标检测. 该现象在超视距 (Over-the-horizon, OTH) 雷达中经常遇到^[1].

OTH 雷达工作在高频段, 易受其他设备信号

干扰的影响. 射频干扰 (Radio frequency interference, RFI) 被雷达接收并经信号处理后, 会在 RD 图上表现出不同形态, 影响目标检测甚至是海杂波谱探测^[1-2]. 干扰抑制一直受到高频雷达研究的关注, 学者们也提出了基于不同原理的干扰抑制方法^[3-8]. 然而, 由于天波雷达中干扰和杂波特性均为未知, 传统干扰抑制方法都不能从理论上证明某方法最优, 也难以提出明确的优化方向.

事实上, 基于分析 RD 图的经验发现, 尽管从数据特征上难以评判 RD 图的优劣, 但用人眼观察 RD 图却很容易有直观的评判. 如图 1 所示, 噪声区域像背景底色; 海杂波区域是不规则边缘的带状区域; 窄带干扰表现为平行于距离维的高亮直线; 宽带干扰表现为遍布全图的条纹状^[5]. 当干扰抑制不充分或过度抑制时, RD 图形态也会变化. 尽管此类变化从传统的信号处理角度来说难以表征和量化, 从人眼和图像的角度却可以直观发现.

本文拟从图像分析的角度, 研究 OTH 雷达的

收稿日期 2019-04-08 录用日期 2019-11-01

Manuscript received April 8, 2019; accepted November 1, 2019
国家自然科学基金 (61701067, 61702065), 重庆市教育委员会科研基金 (KJ1600427, KJ1600429) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61701067, 61702065) and Scientific Research Foundation of the Chongqing Education Committee (KJ1600427, KJ1600429)

本文责任编辑 潘泉

Recommended by Associate Editor PAN Quan

1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065 2. 电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731 3. 南京电子技术研究所 南京 210013

1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065 2. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731 3. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013

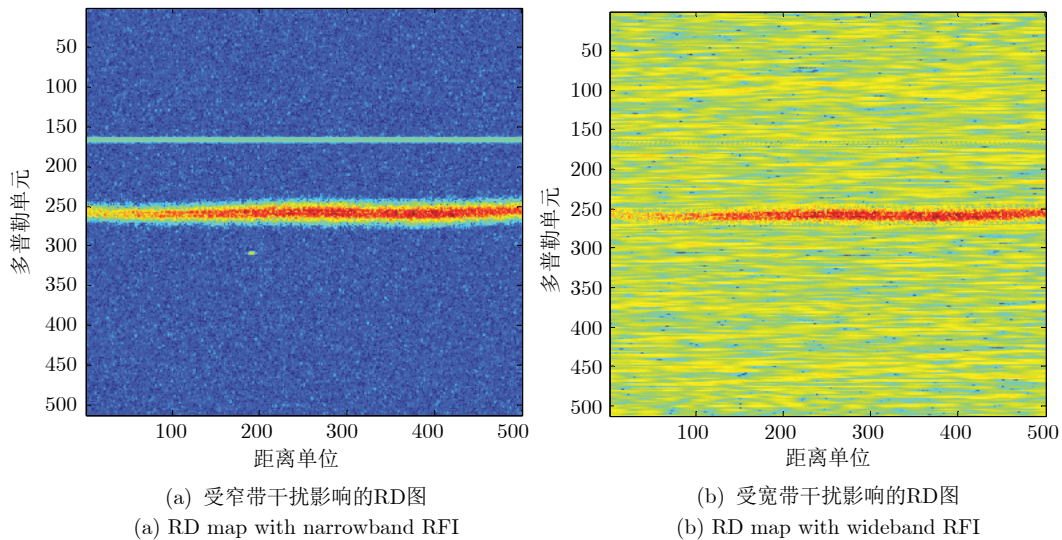


图 1 OTH 雷达 RD 图

Fig.1 RD maps of OTH radar

RD 图像质量及干扰问题. 之前, 作者研究直线检测技术在 OTH 雷达中的应用, 如在文献 [9] 中提出快-慢时间图中检测瞬态干扰直线, 在文献 [10] 中提出了 RD 灰度图中检测窄带干扰直线. 本文考虑从图像分析角度, 分析 RD 图像的特征与形态, 通过提取图像的纹理特征来判断 RD 图的质量.

纹理是图像的一个重要特征, 可用于分析许多类型的图像, 如自然图像、遥感图像、医疗图像等. 作为一种视觉特征, 纹理分析的方法有多种, 如空间自相关法、共生矩阵法、Tamura 方法等. 其中, Tamura 纹理由 Tamura 等于 1978 年提出^[4], 它基于人类对纹理的视觉感知, 侧重对图像全局特征的提取, 其特征量中对应于心理学角度上纹理特征的 6 种属性, 即粗糙度、对比度、方向度、线性度、规整度和粗略度.

在 Tamura 纹理中, 粗糙度 (Coarseness) 是最基本的纹理特征, 可以直观反映人眼对图像粗糙程度的感知, 常用于基于内容的图像检索与评估、异常纹理检测等. 例如, 文献 [12] 通过提取视频帧 Tamura 纹理特征来检测数字视频是否被复制或篡改; 文献 [13] 提出基于金属零件表面图像 Tamura 纹理的粗糙度、对比度和方向度来识别不同工艺加工的零件; 文献 [14] 提出基于水下目标功率谱图的 Tamura 纹理的粗糙度和对比度, 检测与识别水下目标速度的高低. 文献 [15] 提出使用 Tamura 纹理特征实现对嘈杂环境和不良照明下车牌的准确定位. 文献 [16] 提出基于纹理的障碍物检测算法, Tamura 方法比空间自相关法和共生矩阵法更加稳健. 在生物医学图像分析中, Tamura 纹理

可用于表征研究对象的形状和内部结构, 并判断不同形态器官组织代表的信息^[17]. 总之, Tamura 粗糙度在图像分析中有着广泛应用.

截至目前, 尚无文献对 Tamura 纹理和 RD 图像结合展开研究. 本文将开展创新性工作, 首次讨论将 Tamura 纹理粗糙度用于 OTH 雷达 RD 图像, 并分析其合理性. 其次, 考虑 RD 图像可能受干扰的情形, 分析粗糙度与干扰情形之间的联系. 最后给出粗糙度的使用举例, 以粗糙度作为指标实现射频干扰的自适应抑制.

1 RD 图像与粗糙度计算

本小节介绍 OTH 雷达的 RD 图处理方法, 利用灰度变换函数将其转化为灰度图, 再给出 Tamura 粗糙度的计算方法.

1.1 RD 图与灰度图

设 OTH 雷达接收阵列为 K 个阵元组成的均匀线阵, 一个相干处理间隔内有 N 个采样点, 雷达接收数据排列为矩阵 $\mathbf{X}_R \in C^{K \times N}$. 采用 K 维权向量 \mathbf{a} 对 \mathbf{X}_R 进行波束形成, 输出为时域数据 $\mathbf{x}_R = \mathbf{a} \times \mathbf{X}_R$. 对时域数据 \mathbf{x}_R 进行脉冲压缩和多普勒处理, 即可得到 RD 矩阵 $\mathbf{Z} \in C^{P \times M}$. 其中, P 为一个相干处理间隔内的积累周期数, M 为单周期内的采样点数. 将 RD 矩阵 \mathbf{Z} 的值按照幅度 dB 值显示, 即可得到 RD 图^[5].

考虑获得 RD 图后进入图像分析阶段. 首先将 RD 图转化为灰度图. 人们在观察时, 一般采用 dB 值来呈现 RD 图, 以便显示绝对幅度比海杂波小得多的噪声和目标.

本文采用基于对数函数的灰度变换方法, 将常规 RD 图转化为 RD 灰度图. 对数变换中可设置合理的最小值, 以控制原数据的动态范围. 例如, 设置动态范围为 b dB, 则 RD 矩阵元素不会小于最小值

$$|\mathbf{Z}|_{\min} = |\mathbf{Z}|_{\max} \times 10^{-\frac{b}{20}} \quad (1)$$

其中, $|\mathbf{Z}|_{\max}$ 表示矩阵 \mathbf{Z} 中的最大模值. 总的灰度变换函数可以表示为

$$\mathbf{Y}(p, m) = c \times \lg \left\{ \frac{\max(|\mathbf{Z}(p, m)|, |\mathbf{Z}|_{\min})}{|\mathbf{Z}|_{\min}} \right\} \quad (2)$$

其中, c 控制灰度级, 例如 256 或 64.

经过灰度变换, 原 RD 矩阵 \mathbf{Z} 或 RD 图转化为 RD 灰度图, 原距离-多普勒单元 (p, m) 的幅度转换成灰度图中像素点 (p, m) 的灰度值.

1.2 粗糙度的计算

粗糙度是反映纹理中粒度的一个量, 是最基本的纹理特征. 粗糙度描述了一幅图像平均的粗糙程度. 针对灰度图 $\mathbf{Y}(p, m)$, 粗糙度的计算可分为以下 3 个步骤.

步骤 1. 计算图像中大小为 $2^k \times 2^k$ 像素的活动窗口中像素的平均强度值, 即

$$\mathbf{A}_k(x, y) = \frac{\sum_{p=x-2^{k-1}}^{x+2^{k-1}-1} \sum_{m=y-2^{k-1}}^{y+2^{k-1}-1} \mathbf{Y}(p, m)}{2^{2k}} \quad (3)$$

其中, $k = 1, \dots, K$ 控制活动窗口大小, 一般 K 值在 2~6 之间; $\mathbf{Y}(p, m)$ 为像素点 (p, m) 的灰度值.

步骤 2. 计算每个像素点在水平和垂直方向上互不重叠的窗口之间的平均强度差

$$\mathbf{E}_{k, h}(x, y) = |\mathbf{A}_k(x+2^{k-1}, y) - \mathbf{A}_k(x-2^{k-1}, y)| \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_{k, v}(x, y) = |\mathbf{A}_k(x, y+2^{k-1}) - \mathbf{A}_k(x, y-2^{k-1})| \quad (5)$$

其中, $\mathbf{E}_{k, h}(x, y)$ 代表水平方向差值, $\mathbf{E}_{k, v}(x, y)$ 代表垂直方向差值. 对于每个像素, 假设 k_{best} 是使 $\mathbf{E}_{k, h}(x, y)$ 和 $\mathbf{E}_{k, v}(x, y)$ 中较大者达到最大的 k 值, 对应最佳尺寸

$$S_{\text{best}}(p, m) = 2^{k_{\text{best}}} \quad (6)$$

步骤 3. 粗糙度计算为整幅图最佳尺寸的平均值

$$F = \frac{1}{P \times M} \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M S_{\text{best}}(p, m) \quad (7)$$

基于 OTH 雷达 RD 图转化的灰度图, 经过步骤 1~3 运算, 即可得到该图的粗糙度. 考虑到一般情况下, OTH 雷达重点关注目标检测, 而 RD 图中非海杂波即噪声区域才是潜在的目标检测区域. 因此, 可采用 RD 灰度图的海杂波区域以外 (例如 ± 20 倍 Bragg 频率外^[5]) 区域来计算粗糙度.

2 RD 灰度图粗糙度分析

本文提出将粗糙度作为一个指标, 来衡量 RD 灰度图质量. 那么, 需要讨论粗糙度的影响因素和应具有的性质. 首先, 粗糙度应当稳健, 因为各相干处理间隔的数据功率有所不同, 生成灰度图时灰度转换函数含有人为参数. 其次, 粗糙度需要能够表征 RD 图质量, 即准确反映 RD 图是否受干扰影响、完全抑制或过度抑制等情况.

2.1 灰度转换的影响

首先分析灰度变换对粗糙度指标的影响. 将 RD 图经灰度变换函数转换为灰度图像的过程中, 动态范围和灰度级都会影响 RD 灰度图, 从而影响灰度图的粗糙度.

仿真一组相干处理间隔为 5.12 s 的海杂波数据, 再结合无干扰、宽带干扰和窄带干扰数据, 分别处理得到 RD 图, 再由灰度变换生成 RD 灰度图, 设置灰度级为 256. 当未设置动态范围时, 不同干扰情况的 RD 灰度图为图 2(a)~2(c); 设置动态范围 $b = 80$ dB 时, 对应的灰度图分别是图 2(d)~2(f). 可以看到, 设置动态范围后, 大部分像素灰度值下降, 海杂波、目标与背景噪声的对比更为明显, 更利于视觉观察.

横向比较图 2 中的 3 幅图. 在图 2(a) 与 2(d) 中, RD 图无干扰, 噪声区域的幅度分布均匀, 是理想的噪声形态. 目标清晰显示, 可认为是 RD 图像质量最佳. 在图 2(b) 与 2(e) 中, RD 图存在窄带射频干扰直线, 目标检测也会受影响, 图像质量较差. 在图 2(c) 与 2(f) 中, 宽带射频干扰遍布 RD 图, 全图区域布满条纹, 目标难以观察, 可认为图像质量很差.

针对图 2 中各种情形下的数据, 采用 $K = 4$ 以及灰度级 256、64 和 32, 粗糙度计算结果如表 1.

1) 对表 1 进行横向分析. 对于每种干扰状态的粗糙度, 在不同灰度级 256 或 64 或 32 下, 有动态范围比无动态范围时稍小一点, 可认为是基本相同. 说明在不同灰度图转换方式下, 每种干扰状态的粗糙度是稳健的.

2) 对表 1 进行纵向分析. 不含干扰时粗糙度最低, 含窄带射频干扰时次之, 宽带射频干扰的粗糙度最高. 从是否有利于目标检测的图像质量观点来看, 可发现一个规律: 粗糙度越低, 图像质量越高, 噪声区域越干净, 越利于目标检测; 反之, 粗糙度越高, 图像质量越差, 越不利于目标检测.

2.2 干扰程度的影响

下面分析干扰情况对粗糙度的影响, 观察粗糙

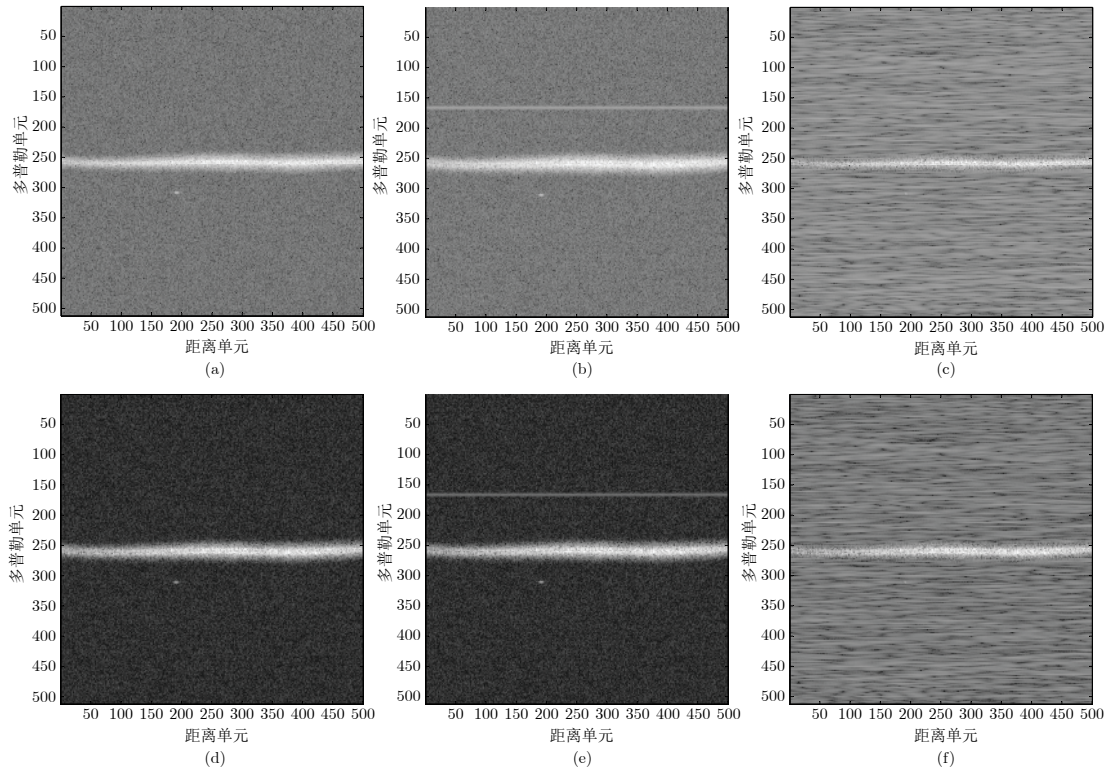


图 2 不同干扰情形下的 RD 灰度图: (a)~(c) 分别表示无动态范围转换的无干扰、有窄带射频干扰、有宽带射频干扰的 RD 灰度图; (d)~(f) 分别表示对应的动态范围为 80 dB 转换的 RD 灰度图

Fig. 2 RD gray-scale images: (a)~(c) are images without dynamic range conversion, for no RFI, narrowband RFI, and wideband RFI, respectively; (d)~(f) are corresponding images with dynamic range conversion for 80 dB

表 1 不同干扰类型的 RD 图粗糙度
Table 1 Coarseness of RD images for various kinds of interference

	无动态转换时灰度级			有动态转换时灰度级		
	256	64	32	256	64	32
无干扰	6.92	6.92	6.91	6.84	6.84	6.83
窄带RFI	7.37	7.37	7.36	7.31	7.31	7.30
宽带RFI	8.58	8.58	8.55	8.58	8.58	8.56

度是否能够准确表现干扰严重程度和抑制程度. 当 OTH 雷达 RD 图中含干扰时, 干扰严重程度及是否充分抑制, 会在 RD 灰度图上表现出不同的形态, 而不同的形态所对应的粗糙度值也不同. 图 3 仿真不同干扰情况和抑制情况, 分别为无干扰、有宽带射频干扰及干扰抑制程度不同的 RD 灰度图. 图 3(a)~3(e) 表示灰度转换时无动态范围, 图 3(f)~3(j) 表示灰度转换有动态范围 80 dB. 干扰抑制算法采用了文献 [18] 中的滤波器设计方法, 未完全抑制或完全抑制效果是由过大或过小的相似度值产生.

可以观察到, 当图 3(a) 和 3(f) 中 RD 图无干扰时, 噪声区域的幅度分布较均匀, 目标可观察; 当图 3(b) 和 3(g) 中 RD 图含宽带射频干扰时, 目标难

以观察. 图 3(a) 和 3(f) 经滤波器设计抑制干扰后, 图 3(c) 和 3(h) 是干扰未完全抑制的 RD 灰度图, 可见噪声区域的纹理粗糙; 图 3(d) 和 3(i) 是干扰完全抑制的 RD 灰度图, 可见噪声区域幅度分布较均匀, 目标可观察; 图 3(e) 和 3(j) 是干扰过度抑制的 RD 灰度图, 可见噪声区域纹理较粗糙, 目标被掩盖.

对图 3 分别计算当灰度级为 256、64 和 32 时的粗糙度, 计算结果如表 2 所示. 从表 2 可以看到, 无干扰时, 粗糙度数值处于最低; 有干扰但被完全抑制时, 粗糙度次之; 有干扰且未抑制时, 粗糙度最高; 当干扰未完全抑制或者过度抑制时, 噪声区域的粗糙度介于最优抑制和未抑制之间. 此外, 有无动态范围转换或灰度级大小, 对粗糙度基本无影响.

2.3 目标数量的影响

接下来分析目标数量对粗糙度的影响. 模拟不同径向速度和距离的目标回波, 与海杂波一起组成雷达回波. 在无干扰的情况下, 采用传统脉冲压缩和多普勒处理, 输出 RD 图如图 4. 总体上目标位置呈现出随机分布, 每个目标形成了一个光斑, 占据了多个距离-多普勒单元, 可视为反映了目标回波在电离层等影响下距离和多普勒维的旁瓣展宽. 对

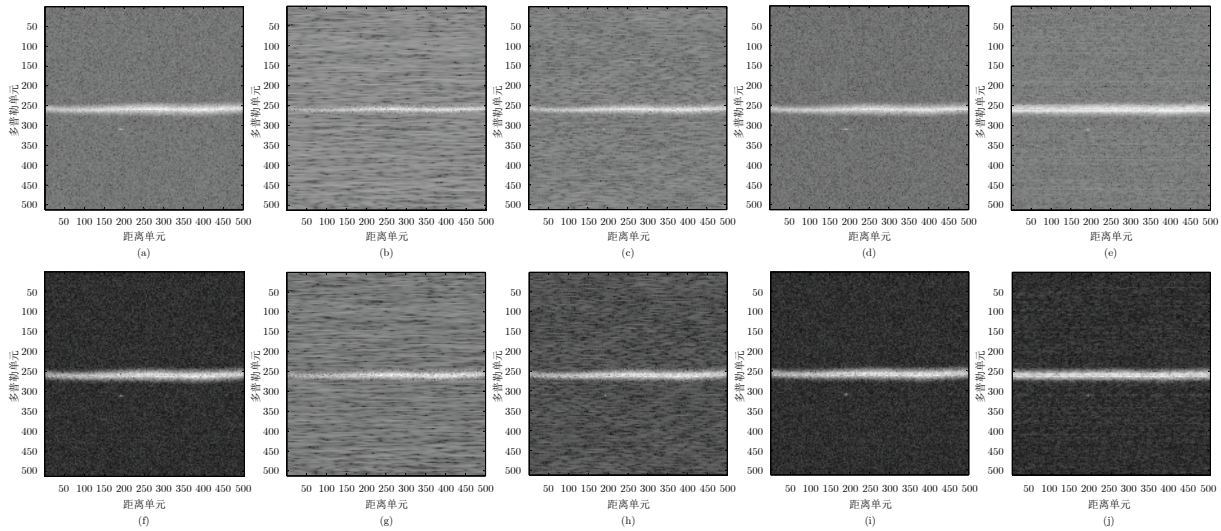


图 3 不同干扰抑制结果的 RD 灰度图: (a)~(e) 分别表示无动态范围转换的无干扰、有宽带干扰、干扰未完全抑制、干扰完全抑制、干扰过度抑制的 RD 灰度图; (f)~(j) 分别表示对应的动态范围为 80 dB 转换的 RD 灰度图

Fig. 3 RD gray-scale image for various interference suppression results: (a)~(e) are images without interference, broadband RFI, incomplete suppression, complete suppression, and excessive suppression, without dynamic range conversion; (f)~(j) are the corresponding images with dynamic range conversion for 80 dB

表 2 不同干扰抑制程度的 RD 图粗糙度

Table 2 Coarseness of RD images for various levels of RFI suppression

	无动态转换时灰度级			有动态转换时灰度级		
	256	64	32	256	64	32
无干扰	6.92	6.92	6.91	6.84	6.84	6.83
有干扰	8.58	8.58	8.55	8.58	8.58	8.56
未完全抑制	7.68	7.68	7.66	7.68	7.68	7.67
完全抑制	7.12	7.12	7.10	6.89	6.89	6.89
过度抑制	7.68	7.68	7.67	7.67	7.67	7.66

于目标像素点会在多大程度上影响粗糙度, 可以通过测量不同目标情况对应的粗糙度进行观察和衡量. 考虑图 3 中的干扰有无和抑制程度的不同情况, 再加上目标数量变化的因素, 组成不同干扰、目标和抑制的多种组合, 处理得到各自的 RD 灰度图, 并计算其粗糙度.

分别以目标数量为 0, 1, 5, 10, 15, 20 为例, 考虑图 3(f)~3(j) 中干扰和抑制处理情况, 得到 256 灰度级动态范围为 80 dB 的 RD 灰度图, 计算粗糙度的结果如表 3 所示.

在表 3 中, 当存在干扰但无抑制或未充分抑制时, 目标对粗糙度基本无影响. 这并不难理解, 目标幅度往往较干扰更低故而被干扰掩盖掉, 因此对整图的粗糙度未形成明显影响.

当干扰不存在, 以及干扰存在且完全或过度抑制时, 目标数量对 RD 图的粗糙度有了一定的影响. 由表 3 可以看到, 当目标数量由 0 增至 20, 无干扰

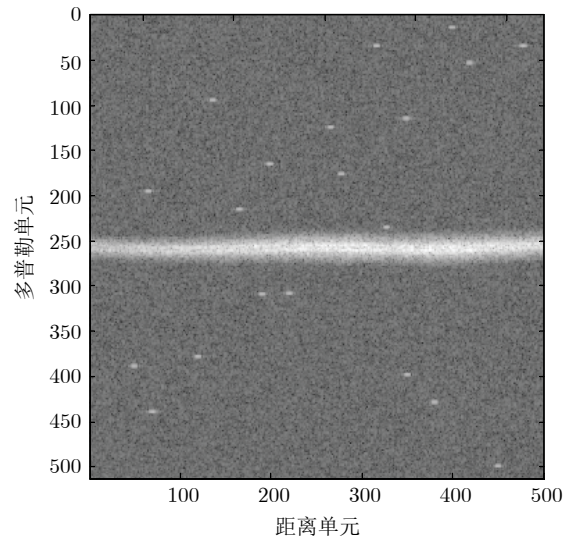


图 4 在无干扰的海杂波数据中加入目标回波后, RD 图中 20 个目标的距离-多普勒单元位置

Fig. 4 The position of 20 targets in the RD map without any RFI

表 3 不同目标情况下 RD 图的粗糙度

Table 3 Coarseness of RD images of various targets

	目标个数					
	0	1	5	10	15	20
无干扰	6.84	6.84	6.85	6.86	6.87	6.89
有干扰	8.58	8.58	8.58	8.58	8.58	8.58
未完全抑制	7.68	7.68	7.69	7.69	7.69	7.70
完全抑制	6.89	6.89	6.90	6.91	6.92	6.94
过度抑制	7.67	7.67	7.69	7.69	7.70	7.71

下的粗糙度由 6.84 增长到 6.89; 干扰完全抑制下的粗糙度由 6.89 增长至 6.94. 综上所述, 随目标数据增加, 粗糙度的增长幅度很小, 不到粗糙度值的 1%.

最后从纵向看表 3. 在相同目标个数下, 无干扰情况具有最小的粗糙度; 有干扰但被完全抑制时, 粗糙度次之; 有干扰且未抑制时, 粗糙度最高. 这些仿真结果与第 2.2 节中无目标时是一致的. 此外, 改变动态范围或灰度级大小, 对于目标存在下的粗糙度结果基本无影响. 因此, 可以说目标对于粗糙度的影响很小.

2.4 粗糙度分析小结

除以上仿真外, 作者基于实测的 OTH 雷达数据, 进行了 RD 灰度图转换和纹理粗糙度分析, 其结果与上面的仿真结果基本吻合. 结合已有的研究, OTH 雷达图像粗糙度分析的结论主要有:

1) 一组 OTH 雷达相干处理间隔内数据, 生成 RD 灰度图并计算 Tamura 纹理粗糙度, 该粗糙度数值在灰度变换函数参数改变时基本不变. 这说明, 针对不同类型和状态下的 OTH 雷达数据, 粗糙度可以作为一个稳健的衡量指标.

2) 以目标检测环境是否理想的视角来看, 纹理粗糙度能够正确反映 RD 灰度图的理想程度, 不受干扰时的理想 RD 图粗糙度小, 受干扰时的 RD 图粗糙度数值大, 最优抑制的 RD 图粗糙度与无干扰时粗糙度很接近.

3) 纹理粗糙度作为衡量指标, 基本不受目标存在与否及其数量的影响. 目标的存在既不会明显改变粗糙度, 也没有改变干扰抑制情况与粗糙度大小的对应次序. 因此, 粗糙度可以正确地衡量有目标时的 RD 图理想程度.

综上, 纹理粗糙度表现稳健, 能够正确反映 RD 灰度图是否理想, 可作为 RD 图质量的指标. 以粗糙度为指标, OTH 雷达不仅可以评估雷达工作状态, 还可帮助提升信号处理算法, 实现自适应优化处理.

3 粗糙度用于自适应干扰抑制

本文以基于滤波器设计的射频干扰抑制为例, 展示粗糙度指标如何使干扰抑制变得自适应. 以此例说明粗糙度在 OTH 雷达信号处理中具有很大的应用潜力.

针对射频干扰, 传统抑制算法虽多, 但由于干扰、噪声及杂波参数未知, 没有理论指标作参考, 不能确认是否取得自适应最优效果. 在引入粗糙度指标后, 以实现噪声区域 (非杂波区域) 的指标最小化为目标, 可对射频干扰进行自适应抑制处理, 避免

干扰抑制不充分或过度抑制的情况.

3.1 自适应优化干扰抑制

粗糙度指标能够自适应地判断和评价干扰情况. 以文献 [18] 中固定相似度约束下设计滤波器的干扰抑制方法为例, 基于粗糙度指标优化的自适应干扰抑制方案如图 5. 其中, 对 RD 图粗糙度的计算与优化, 构成了一个循环迭代过程. 如图 5 所示, 首先将传统的 RD 图转化为灰度图像, 然后计算 Tamura 纹理粗糙度. 当粗糙度指标未达到最小时, 该方案会继续优化滤波器参数, 循环迭代直至粗糙度达到最小.

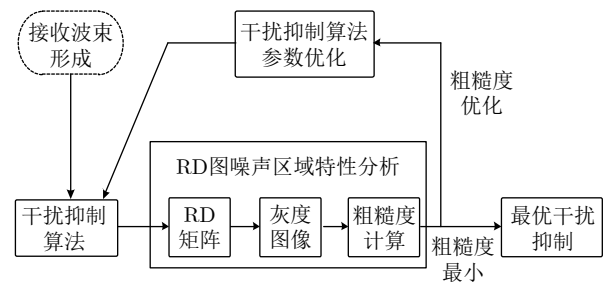


图 5 干扰抑制自适应优化流程框图

Fig. 5 Flow chart of adaptive RFI suppression

借助于图像粗糙度, 自适应干扰抑制算法具体流程如算法 1 所示. 其中, 干扰抑制算法的参数是相似度 ε , 取值范围为 $(0, 1]$. 本文采用一个简单的迭代方法: 设置初始值 $\varepsilon_0 = 1$, 步长 $\Delta\varepsilon$ 为一个较小值, 如 0.01; 令 ε 逐步减小, 表示抑制程度在增加, 直到取得最小粗糙度值. 相比传统干扰抑制方法^[8] 设定固定相似度 0.8, 本文方法以取得最优相似度 ε_{opt} , 对应于最小粗糙度值, 实现干扰抑制最优化.

算法 1. 滤波器自适应干扰抑制优化算法

步骤 1. 设置滤波器参数 ε 的优化步长为 $\Delta\varepsilon$, 阈值比率 $\eta = 0.01$. 初始化迭代次数 $j = 0$, 对应滤波器参数为 $\varepsilon_0 = 1$, 计算干扰噪声区域的粗糙度值 F_0 .

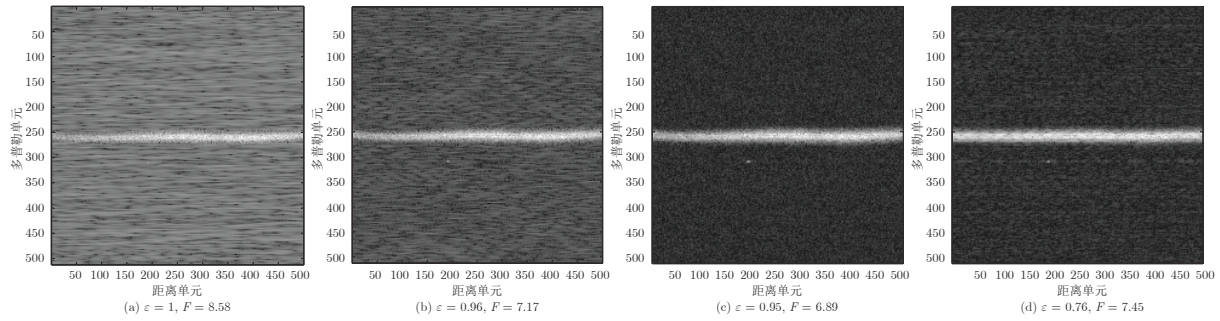
步骤 2. $j = j + 1$, $\varepsilon_j = \varepsilon_{j-1} - \Delta\varepsilon$, 根据 ε_j 设计滤波器并抑制干扰, 计算其 RD 灰度图的粗糙度 F_j .

步骤 3. 计算粗糙度差值 $\Delta F = F_{j-1} - F_j$. 判断: 若 $\Delta F / F_{j-1} < \eta$, 取得最优抑制, 转至步骤 4; 否则, 转至步骤 2.

步骤 4. 若 $\Delta F < 0$, $\varepsilon_{\text{opt}} = \varepsilon_{j-1}$; 否则, $\varepsilon_{\text{opt}} = \varepsilon_j$. 输出 ε_{opt} 对应最优滤波器和干扰抑制结果.

3.2 自适应干扰抑制仿真

采用 MATLAB 软件仿真和处理天波雷达数据, 验证本文提出的粗糙度纹理特征判断图像质量和自适应干扰抑制方法. 设雷达发射线性调频连续

图 6 基于不同 ε 参数下的 RD 灰度图与粗糙度Fig.6 RD gray-scale image and coarseness for varying ε

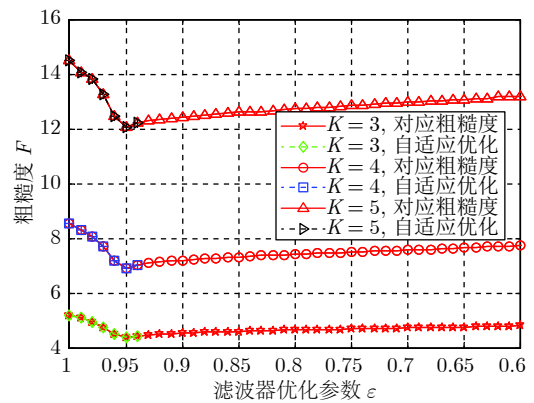
波, 波形参数为带宽 20 kHz, 采样频率 50 kHz, 波形周期 10 ms, 相干积累周期数 512. 模拟射频干扰, 与目标回波及海杂波相加为雷达接收数据, 采用脉冲压缩和快速傅里叶变换做多普勒处理, 设置动态范围为 80 dB, 所得 RD 图如图 6(a) 所示. 图中每个像素点即距离-多普勒单元的多普勒维长度约为 0.2 Hz, 距离维长度约为 3 km. 注意, 图 1~3 中 RD 图均基于此组参数产生.

由图 6(a) 可见, 宽带射频干扰存在时图像纹理粗糙, 噪声区域的纹理特性不均匀. 采用本文方法计算噪声区域的粗糙度. 首先, 以动态范围 80 dB 和灰度级 256, 将 RD 图转换为灰度图. 然后, 取 20 倍 Bragg 频率以外的区域为噪声区域, 计算噪声区域粗糙度为 $F_0 = 8.58$.

采用算法 1, 设置粗糙度计算参数 $K = 4$, 相似度初始值 $\varepsilon_0 = 1$, 优化步长 $\Delta\varepsilon = 0.01$, 对干扰抑制进行自适应优化. 图 7 中用正方形标记的虚线给出了自适应算法的迭代过程. 当迭代次数 j 由 0 增加到 5 时, ε 由 1 减小到 0.95, 粗糙度在逐步减小, 对应干扰抑制效果也在优化; 当 $j = 6$ 即 $\varepsilon = 0.94$ 时, 粗糙度增大, 说明进入过度抑制阶段. 因此迭代终止, 最优抑制停在 $\varepsilon = 0.95$, 此时粗糙度值为 6.89, 非常接近无干扰时粗糙度 6.84. 比较图 6(c) 与图 2(d), 可以看到, 本文最优抑制结果与无干扰时 RD 图像非常接近.

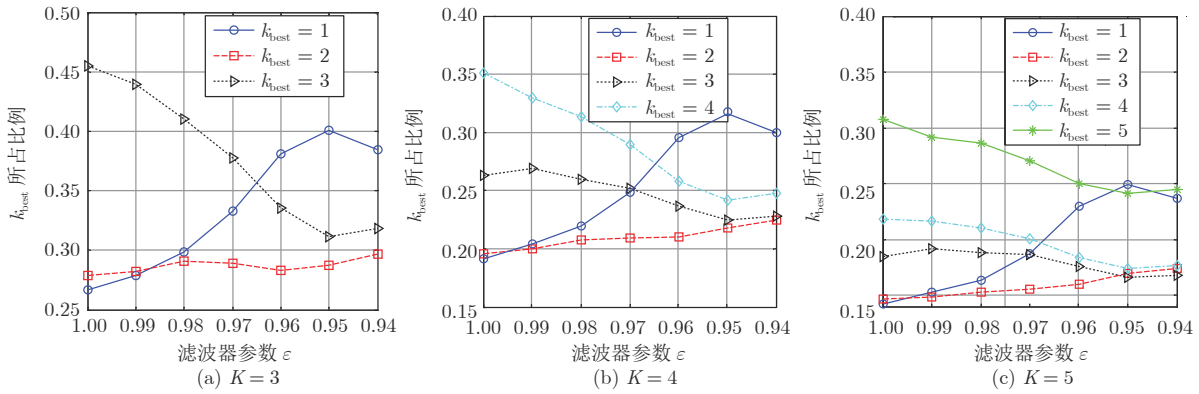
仿真其他相似度 ε 值对应的粗糙度, 如图 7 中实线所示. 可以看到, 粗糙度的变化趋势是先减后增, 表明粗糙度确实存在最小值且容易寻找. 4 个典型相似度参数 ε 值所对应的 RD 灰度图如图 6 所示, 其中图 6(d) 为白化滤波器即 $\varepsilon = 0.76$ 的结果. 可以看到, 粗糙度确实能够正确反映人们对 RD 灰度图质量的视觉效果. 此外, 改变 K 值为 3 和 5, 粗糙度与相似度的对应关系保持不变, 如图 7 所示.

为观察粗糙度更多细节, 图 8 画出了 K 分别为 3, 4, 5 时最佳尺寸参数 k_{best} 的比例随 ε 的变化.

图 7 粗糙度 F 随 ε 的变化趋势Fig.7 The coarseness F versus ε

三幅图具有共同特点: $k_{\text{best}} = 1$ 比例总是随干扰抑制优化 (ε 从 1 到 0.95) 而增大, 随抑制恶化 (ε 从 0.95 到 0.94) 而减小. 当 $K = 5$ 时, $k_{\text{best}} = 4, 5$ 比例的增减趋势与 $k_{\text{best}} = 1, 2$ 恰好相反; 当 $K = 4$ 时, $k_{\text{best}} = 4$ 比例与 $k_{\text{best}} = 1$ 恰好相反. 由式 (6) 和式 (7) 可见, k_{best} 越小则粗糙度越小, 故小 k_{best} 值的比例与粗糙度增减趋势正好相反. 这与仿真图相吻合: 针对同一 K 值, 图 8 中 $k_{\text{best}} = 1$ 比例越大, 对应图 7 中粗糙度越小. 结合图 7 和图 8 可见, $K = 4$ 和 5 对应的粗糙度变化趋势比 $K = 3$ 更加明显, 故更适合用来计算粗糙度.

此外, 针对多目标场景的仿真结果表明, 目标对粗糙度影响很小, 不改变粗糙度与相似度的变化趋势, 本文干扰抑制方法依然可行. 另外, 本文算法也用于实测 OTH 雷达数据的干扰抑制, 处理结果与本文仿真相似. 由此说明, 本文提出的粗糙度指标和自适应滤波器设计算法, 可以有效抑制射频干扰, 达到最优抑制效果. 本文抑制方案还可采用线搜索方法来迭代优化参数, 从而减少运算量, 未来工作也将应用到更多实测数据处理中.

图 8 不同 K 值下 ε 变化时的 k_{best} 比例Fig.8 The ratio of k_{best} versus ε for varying K

4 结束语

针对 OTH 雷达图像, 本文首次提出计算 RD 图中非杂波区域的 Tamura 纹理粗糙度, 作为 RD 图像质量的评估指标. 粗糙度指标能够反映干扰抑制的不同程度, 为干扰抑制提供了合理的优化方向. 结合 RD 灰度图的 Tamura 纹理粗糙度, 能够设计出具有自适应优化能力的干扰抑制算法. 实验结果表明, 借助于 Tamura 纹理粗糙度优化, 自适应干扰抑制算法能够取得最佳干扰抑制效果. 作为 OTH 雷达 RD 图像质量评估指标, Tamura 粗糙度有着很好的应用潜力, 将在未来研究中开发出更多应用.

References

- Zhou Wen-Yu, Jiao Pei-Nan. *Over-the-horizon Radar Technology*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 132-134
(周文瑜, 焦培南. 超视距雷达技术. 北京: 电子工业出版社, 2008. 132-134)
- Wang W, Wyatt L R. Radio frequency interference cancellation for sea-state remote sensing by high-frequency radar. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2011, **5**(4): 405-415
- Kong Shu-Ya, Wang Liang. Adaptive suppression method for SAR narrowband interference based on compressed sensing. *Electronic Measurement Technology*, 2019, **42**(13): 107-111
(孔舒亚, 王亮. 压缩感知合成孔径雷达自适应射频干扰抑制方法. 电子测量技术, 2019, **42**(13): 107-111)
- Wen Bi-Yang, Han Jin-Zhu, Zhou Qi-Hao, Li Yan. Radio frequency interference suppression algorithm in the spatial domain for high-frequency radars. *Journal of Xidian University*, 2017, **44**(4): 132-137
(文必洋, 韩金柱, 周企豪, 李艳. 高频地波雷达空域射频干扰抑制算法. 西安电子科技大学学报, 2017, **44**(4): 132-137)
- Luo Zhong-Tao. Study on Signal Processing for Future Sky-wave Over-the-horizon Radar System [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, China, 2015.
(罗忠涛. 新体制天波超视距雷达信号处理研究 [博士学位论文], 电子科技大学, 中国, 2015.)
- Zhu Yong-Heng, Li Ming, Niu Jiong, Zhang Ling, Ji Yong-Gang. Research on radio frequency interference suppression for HF-SWR. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, **48**(7): 142-148
(朱永恒, 黎明, 牛炯, 张玲, 纪永刚. 基于方向分析的高频地波雷达射频干扰抑制. 中国海洋大学学报, 2018, **48**(7): 142-148)
- Liu Jian-Cheng, Quan Hou-De, Li Zhao-Rui, Liu Dong-Lin, Zhao Hong-Zhi. RF interference cancellation based on multi-tap delay and orthogonal combination in multipath channel. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2017, **39**(3): 654-661
(刘建成, 全厚德, 李召瑞, 刘东林, 赵宏志. 多路延迟正交合成的多径信道射频干扰抵消. 电子与信息学报, 2017, **39**(3): 654-661)
- Luo Z T, He Z S, Li J. An effective scheme for radio frequency interference suppression in high-frequency radar. In: Proceedings of the 2015 IEEE Radar Conference. Arlington, VA, USA: IEEE, 2015. 539-544
- Luo Z T, Song T C, He Z S, Hu J F. Approach for transient interference detection based on straight line extraction for high-frequency sky-wave radar. *Electronics Letters*, 2017, **53**(9): 618-620
- Luo Zhong-Tao, Wu Tai-Feng, He Zi-Shu, Chen Xu-Yuan. Extraction of radio frequency interference based on image segmentation for high-frequency radar. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, **40**(4): 776-781
(罗忠涛, 吴太锋, 何子述, 陈绪元. 基于图像分割的高频雷达射频干扰提取算法. 系统工程与电子技术, 2018, **40**(4): 776-781)
- Tamura H, Mori S, Yamawaki T. Textural features corresponding to visual perception. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1978, **8**(6): 460-473
- Liu Y Q, Huang T Q. Exposing video inter-frame forgery by Zernike opponent chromaticity moments and coarseness analysis. *Multimedia Systems*, 2017, **23**(2): 223-238
- Chen Su-Ting, Hu Hai-Feng, Zhang Chuang. Surface roughness modeling based on laser speckle imaging. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(23): 105-113
(陈苏婷, 胡海锋, 张闯. 基于激光散斑成像的零件表面粗糙度建模. 物理学报, 2015, **64**(23): 105-113)
- Wang Shun-Jie, Qi Chun, Cheng Yu-Sheng. Application of Tamura texture feature to classify underwater targets. *Applied Acoustics*, 2012, **31**(2): 135-139
(王顺杰, 齐春, 程玉胜. Tamura纹理特征在水下目标分类中的应用. 应用声学, 2012, **31**(2): 135-139)
- Zhang X D, Shen P Y, Gao J R, X X, Qi D, Zhang L, et al. A license plate recognition system based on Tamura texture in complex conditions. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation. Harbin, China: IEEE, 2010. 1947-1952
- Gupta A, Garg M, Mittal A. A comparative performance evaluation of the 2010 segmented image with obstacle for textural coarseness. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research.

Coimbatore, India: IEEE, 2010. 1–6

- 17 Majtner T, Svoboda D. Extension of tamura texture features for 3D fluorescence microscopy. In: Proceedings of the 2nd International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission. Zurich, Switzerland: IEEE, 2012. 301–307
- 18 Luo Z T, He Z S, Lu K, Chen X Y. Optimal receive filter design under similarity constraint in coloured noise. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2015, 9(7): 888–899



罗忠涛 博士, 重庆邮电大学通信与信息工程学院副教授. 主要研究方向为信号与信息处理, 统计信号处理, 数字图像处理. 本文通信作者.

E-mail: luozt@cqupt.edu.cn

(LUO Zhong-Tao Ph.D., associate professor at the School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers signal and information processing, statistical signal processing, and digital image processing. Corresponding author of this paper.)



郭人铭 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生. 主要研究方向为信号与信息处理, 数字图像处理.

E-mail: s180131036@stu.cqupt.edu.cn

(GUO Ren-Ming Master student at the School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers signal and information processing, and digital image processing.)



郭杰 重庆邮电大学通信与信息工程学院学士. 主要研究方向为数字图像处理.

E-mail: guojie1072050774@163.com

(GUO Jie Bachelor at the School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers digital image processing.)



何子述 博士, 电子科技大学信息与通信工程学院教授. 主要研究方向为阵列信号处理, 自适应信号处理, MIMO 雷达与通信.

E-mail: zshe@uestc.edu.cn

(HE Zi-Shu Ph.D., professor at the School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China. His research interest covers array signal processing, adaptive signal processing, MIMO radar, and MIMO communication.)



卢琨 博士, 南京电子技术研究所研究员级高级工程师. 主要研究方向为超视距雷达系统设计和信息处理.

E-mail: mimimomoba@gmail.com

(LU Kun Ph.D., fellow senior engineer at Nanjing Research Institute of Electronics Technology. His research interest covers system design and signal processing for over-the-horizon radar.)