

隋广洲, 于洋. 灾害救援探测机械雷达信号同步传递模型构建[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 175-178. [SUI Guangzhou and YU Yang. Construction of synchronous transfer model of rescue detection mechanical radar signal [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 175-178. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.032.]

灾害救援探测机械雷达信号同步传递模型构建^{*}

隋广洲¹, 于洋²

(1. 岭南师范学院, 广东 湛江 524048; 2. 沈阳中科韦尔腐蚀控制技术有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:针对当前方法所建模型雷达信号传递耗时长、建模结果与实际结果拟合度低的问题,提出基于 SHD 的灾害救援探测机械雷达信号同步传递模型。利用小波变换对救援探测机械雷达图像进行研究,整体分解雷达图像,去除雷达图像的冗余和相关性信息,在利用计算机处理雷达图像前,分析和处理离散二维信号,采用低通滤波器来分解雷达信号,通过控制阈值来对雷达图像进行编码,压缩处理雷达图像;在此基础上,计算雷达信号辨识框架的基本信度分配和 Pignistic 概率,建立贝叶斯信度函数,分析 Dempster 信度合成规则,采用识别方法来确定雷达的类型,计算识别信号与其他信号参数之间的形似度,并对每种雷达信号参数的相似度做归一化处理,利用 SDH 技术构建雷达信号同步传递模型。实现了救援探测机械雷达信号同步传递模型的构建。结合实验,在对雷达信号传递耗时和雷达信号同步传递建模结果与实际结果拟合度测试时,实验结果证明,提出方法建模结果与实际结果的拟合度较高,更符合实际结果。

关键词:救援探测;机械雷达信号;同步传递模型;

中图分类号: TP391.9; X4; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)01-0175-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.032

安全问题始终是人们关注的热点话题。煤矿开采、火灾消防、井下作业、地震灾害等灾害的发生,由于灾害的不确定性,使不同环境下救灾防灾成为了研究热点,相关工作人员或居民的安全救援受到广泛关注。

我国的救援探测雷达从人工逐渐向自动化的方向发展。雷达信号同步传递方式包括原始雷达信号和录取雷达信号传递,前者是直接对输出的回波信号进行接收,具有信息完整的优点;后者传递的则是处理之后的雷达信号,其中包括目标提取、去噪和杂波抑制等,具有便于观察和数据量小的优点^[1-2]。

雷达信号的同步传递可以得到雷达视频信息传递的完整性以及对信号目标探测的概率,因此,对救援探测机械雷达信号同步传递的研究刻不容缓。董春曦等^[3]提出基于压缩感知的救援探测机械雷达信号同步传递模型,将雷达信号的样本空间当作稀疏字典,用稀疏来表示分选的雷达信号,利用观测数据可以得到雷达信号的所有信息,从而对雷达信号进行同步传递。实验结果得到,该方法所建模型可以在低信噪比的情况下获得理想效果,但该模型雷达信号的传递耗时较长,实时性较差。刘兴钊等^[4]提出基于光电协同的救援探

测机械雷达信号同步传递模型,该方法将光学运算和电子逻辑控制结合,采用空间光学信息来完成海量数据的处理,利用电子学对雷达信号进行传递控制。实验结果得到,该方法所建模型的功耗较低,但存在建模结果与实际结果拟合度低的问题。

针对上述两种方法中存在的问题,本文提出基于 SHD 的灾害救援探测机械雷达信号同步传递模型。

1 救援探测机械雷达信号同步传递模型构建

1.1 救援探测机械雷达图像压缩

利用小波变换对救援探测机械雷达图像进行研究,小波变换可以对雷达图像整体进行分解,去除雷达图像的冗余和相关性信息。其优点是可以多分辨率分析,同时可以在时域和频域同时的情况下表征雷达信号特征,在小波分析中存在多个窗口函数^[5],窗口的大小固定不变,但形状不固定。

在利用计算机处理雷达图像前,需要分析和

* 收稿日期: 2019-08-05 修回日期: 2019-10-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51705228); 广东省自然科学基金资助项目(S2013010012107); 岭南师范学院校级项目(LY1803)

第一作者简介: 隋广洲(1980-),男,辽宁大连人,硕士,讲师,研究方向为机械故障诊断、信号处理、模式识别。

E-mail: sui_guo@163.com

处理离散二维信号,定义一维尺度函数以及相应的小波函数 $\varphi(x)$ 、 $\psi(x)$ 、 $\varphi(y)$ 、 $\psi(y)$, 她们均属于空间 $L^2(R)$ 。利用上述函数来表示二维小波, 表达式如下:

$$\begin{cases} \psi^1(x, y) = \phi(x)\psi(y); \\ \psi^2(x, y) = \psi(x)\phi(y); \\ \psi^3(x, y) = \psi(x)\psi(y); \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ_1 、 ψ^2 、 ψ^3 为三个二维小波函数, 分别用来度量垂直、水平和对角线变化情况, 可以利用细节信号和逼近信号来表示雷达图像信号^[6], 二维小波重构和分解与一维相似, 分解重构如图 1 所示, 其表达式为:

$$p_j f = p_{j+1} f + D_{j+1}^1 f + D_{j+1}^2 f + D_{j+1}^3 f. \quad (2)$$

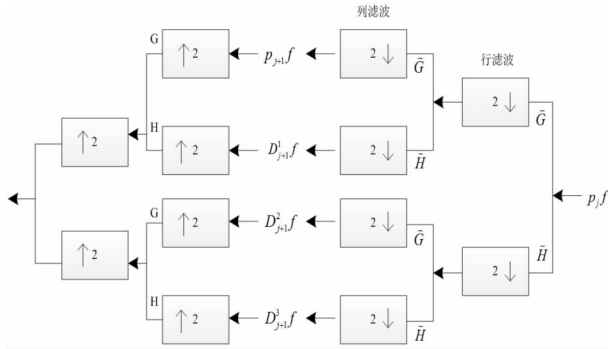


图 1 信号分解重构

式中: H 、 \tilde{H} 代表低通滤波器, G 、 \tilde{G} 代表高通滤波器, \tilde{H} 、 \tilde{G} 代表 H 和 G 的对偶^[7]。

对雷达图像进行小波变换的过程中利用快速算法, 将原始图像当作初始值来分解, 每级雷达图像可以成为四个子图像, 按照需要确定分解级数。分解所得到的图像分别为 LL_j 、 LH_j 、 HL_j 、 HH_j , 各个图像中信息与上级图像有关联, LL_j 表示水平和垂直方向的低频信息, HH_j 表示水平和垂直方向的高频信息^[8], 分解获得 LL_j 、 LH_j 、 HL_j 、 HH_j 之后能够继续进行分解, 考虑雷达图像的能量主要在低频分量处集中, 通常情况下只对 LL_j 做进一步分解, 三层小波分解如图 2 所示。

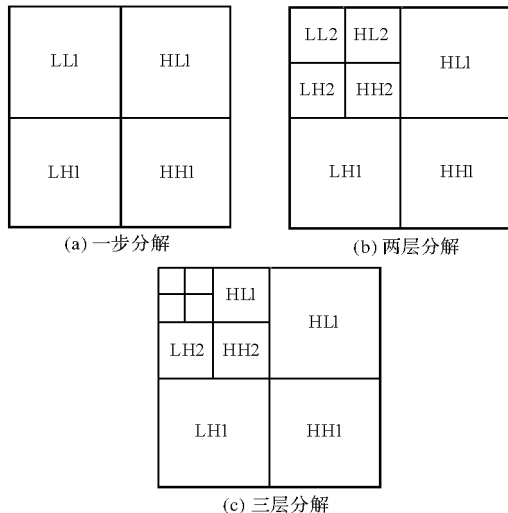


图 2 三层小波分解

将图 3 的雷达图像当作初始值三次小波分解的图像示例。

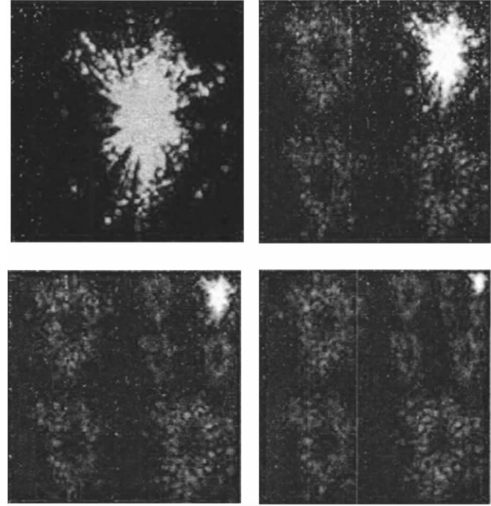


图 3 雷达图像

经过小波分解可以改变雷达图像的能量分布, 并且信息集中在低频分量中, 通过控制阈值来对雷达图像进行编码, 假设所使用的阈值为 T_0 , T_1 , \dots , T_{N-1} , 可以决定重要系数, T_0 为初始阈值^[9], 表达式如下:

$$T_0 = M2^E. \quad (3)$$

式中: M 为常数, E 为整数, 对于选取任意阈值需要满足:

$$T_i = T_{i-1}/2. \quad (4)$$

通过对雷达图像的整体分解以及对雷达图像的编码, 实现了对雷达图像的压缩处理。

1.2 雷达信号同步传递模型

雷达信号的识别结果为雷达的种类, 本文主要采用雷达信号可传递信度模型来处理信号的同步传递, 假设 Ω 是辨识框架, 有限个互斥元素可以构成一个辨识框架, 当函数 $m: 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$ 满足下式时:

$$\sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1, \quad (5)$$

则称 m 是 Ω 上的基本信度分配^[10], 在可传递信度模型中, $m(\emptyset) = 0$ 不需要成立, $m(\emptyset)$ 代表未知情况。Pignistic 概率可以将信度度量转为概率度量, 具体表达式为:

$$BetP(\theta) = \sum_{\theta \in A \subseteq \Omega} \frac{1}{A} \frac{m(A)}{1 - m(\emptyset)}. \quad (6)$$

当 $|A| \neq 1$ 时, 若基本信度分配满足 $m(A) = 0$, 则说明 m 是 Ω 的贝叶斯信度函数。

设 Θ 和 Δ 表示两个辨识框架, m^Ω 是 $\Omega = \Theta \times \Delta$ 上的基本信度分配, 则在 Θ 处的边缘化 m^Ω 为:

$$m^{\Omega \downarrow \Theta}(A) = \sum_{W \subseteq \Omega, W \downarrow \Theta = A} m^\Omega(W). \quad (7)$$

式中: $W \downarrow \Theta = \{x: x \in \Theta, W \cap (x, \Delta) \neq \emptyset\}$, 对于 Θ 中的元素 θ 来说, 条件基本信度分配 $m^\Delta[\theta]$ 代表 θ 条件下 Δ 中的信度函数。

设 m_1 、 m_2 为同一个辨识框架中的两个基本信度分配, Dempster 信度合成规则为:

$$m(C) = \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A) m_2(B)}{1 - K}. \quad (8)$$

式中: $K = \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B)$, 假设 $m^\Delta[\theta]$ 表示归一化的条件基本信度分配, P^Θ 表示贝叶斯信度函数^[11], 对于任意 $W \subseteq \Omega$ 来说, $\Omega = \Theta \times \Delta$ 上的基本信度分配 m^Ω 为:

$$m^\Omega(W) = \begin{cases} m^\Delta[\theta]P^\Theta(\theta), & W = (\theta, D); \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

使 $m^\Delta = m^{\Omega \downarrow \Delta}$, 对于任意 $D \subseteq \Delta$ 有如下表达式:

$$m^\Delta(D) = \sum_{\theta \in \Theta} m^\Delta[\theta](D)P^\Theta(\theta). \quad (10)$$

救援探测机械雷达信号主要是关于雷达载频等参数的信息, 需要采用识别方法来确定雷达的类型, 获取其种类信息。设模板数据库中有 N 种雷达 R_1, R_2, \dots, R_N ; 对于每种雷达 $R_{i'}$ ($i' = 1, 2, \dots, N$) 有 L' 种信号参数 $r_{i'}(r_{i'1}, r_{i'2}, \dots, r_{i'L'})$, 其中 $r_{i'j'}$ 代表模板数据库中 i' 类雷达的第 j' 种信号参数, 可以利用 $y_{j'}$ 表示雷达的 j' 种信号参数^[12], 根据模糊匹配法引入高斯型隶属度函数, 对待识别信号和模板数据库中 i' 类雷达关于 j' 种信号参数的相似度进行计算, 计算公式如下:

$$d_{i'j'} = \exp\left(-\frac{1}{2} \times \left(\frac{y_{j'} - r_{i'j'}}{\sigma_{i'j'}}\right)^2\right); \quad (11)$$

$$\sigma_{i'j'} = \min_{k \neq i'} \|r_{i'j'} - r_{kj'}\|. \quad (12)$$

式中: $\sigma_{i'j'}$ 表示隶属度函数的宽度参数, 对每种信号参数的相似度做归一化处理, 可以获得待识别雷达信号与每种雷达的匹配率:

$$s_{i'}(R_{i'}) = \begin{cases} d_{i'j'}, & \sum_{k=1}^N d_{kj'} < 1; \\ \frac{d_{i'j'}}{\sum_{k=1}^N d_{kj'}}. \end{cases} \quad (13)$$

$$s_{i'}(\emptyset) = \begin{cases} 1 - \sum_{k=1}^N d_{kj'}, & \sum_{k=1}^N d_{kj'} < 1; \\ 0. \end{cases} \quad (14)$$

其中, $s_{i'}(\emptyset)$ 代表不可知情况, 当总相似度 $\sum_{k=1}^N d_{kj'} < 1$ 时, 说明雷达信号与模板雷达的匹配度较低, 每一种信号参数都表示了一种特性, 当雷达信号属于模板数据库中的某种雷达时, 各种信号参数间的冲突较小, 反之, 冲突较大时则信号不属于已知的雷达, 需要修正匹配概率。证据 $s_{i'}$ 和 $s_{j'}$ 关于命题的相容系数有如下表达式:

$$Q_{i'j'}(R_k) = \frac{2s_{i'}(R_k)s_{j'}(R_k)}{s_{i'}(R_k)^2 + s_{j'}(R_k)^2}. \quad (15)$$

当 $s_{i'}(R_k) = s_{j'}(R_k)$ 时, $Q_{i'j'}(R_k) = 1$ 说明 $s_{i'}$ 和关于 R_k 的看法相同, 之间没有冲突, 即待识别雷达信号与模板数据库中 i' 类雷达关于 j' 种信号参数的匹配程度相同。

假设雷达模板数据库完整, 不需要考虑未知的雷达种类, 可以采用证据来表示信号关于雷达种类的属性信息, 表达式为:

$$m^\Theta(R_{i'}) = \sum_{j'=1}^{L'} \omega_{j'} s'_{j'}(R_{i'}). \quad (16)$$

式中: $\omega_{j'}$ 代表各种信号参数的权值。

雷达和平台间为配属关系, 可以用下列矩阵来表示:

$$A = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & \cdots & a_{0N} \\ a_{10} & a_{11} & \cdots & a_{1N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{M0} & a_{M1} & \cdots & a_{MN} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

式中: $a_{i'j'}$ 雷达为 $R_{j'}$ 时目标为 $T_{i'}$ 的概率, $a_{i'0}$ 代表信号杂波时 $T_{i'}$ 的概率, $a_{0j'}$ 代表雷达为 $R_{j'}$ 时虚假目标的概率。将矩阵转为条件基本信度分配可以表示为:

$$m^\Delta[R_{i'}](T_{j'}) = a_{i'j'}. \quad (18)$$

在对雷达信号基本信度分配、贝叶斯函数、条件基本信度分配等计算的基础上, 利用 SDH 技术构建雷达信号同步传递模型, 来实现对雷达信号的同步传递:

$$U = m^\Delta[R_{i'}](T_{j'}) + m^\Theta(R_{i'}) + Q_{i'j'}. \quad (19)$$

2 实验结果分析

为了验证基于 SHD 的救援探测机械雷达信号同步传递模型的性能, 搭建实验平台对该方法所建的模型展开实验研究。

实验一: 对雷达信号的同步传递耗时进行测试, 测试结果如图 4 所示。

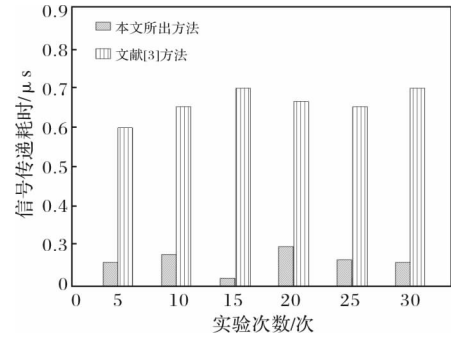
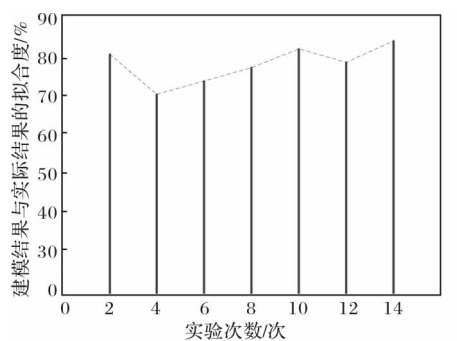


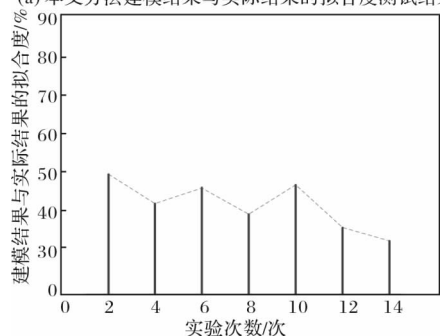
图4 不同方法的信号同步传递耗时测试结果

在对雷达信号同步传递耗时测试时, 分析图 5 可知, 提出方法的 30 次实验中, 雷达信号的传递耗时小于等于 $0.3 \mu s$, 并且第 15 次实验的信号传递耗时最短, 文献[3]方法的 30 次实验中, 雷达信号传递耗时大于等于 $0.6 \mu s$ 小于等于 $0.7 \mu s$, 最短信号传递耗时出现在第 5 次实验中, 通过对比可知, 提出方法对救援探测机械雷达信号进行同步传递时, 传递耗时比文献[3]方法短, 说明提出方法的实时性更好。

实验二: 在对雷达信号同步传递耗时测试的基础上, 进一步测试雷达信号传递建模结果与实际结果的拟合度, 并与文献[4]方法进行对比, 对比结果如图 5 所示。分析图 5 可知, 构建雷达信号同步传递模型后, 需要对建模结果与实际结果的拟合度进行测试, 14 次实验中, 提出方法建模结果与实际结果的拟合度整体在 70% 以上, 文献[4]方法建模结果与实际结果拟合度整体在 30% ~ 50% 之间, 该方法的最高拟合度比提出方法最低拟合度少 20%, 对比得到, 提出方法所建模型更符合实际, 验证了模型的有效性。



(a) 本文方法建模结果与实际结果的拟合度测试结果



(b) 文献[4]方法建模结果与实际结果拟合度测试结果

图5 不同方法建模结果与实际结果拟合度对比

3 结论和讨论

针对雷达信号的特点,对信号的同步传递展开研究,提出基于SHD的救援探测机械雷达信号同步传递模型,分别测试了雷达信号同步传递的耗时情况和雷达信号传递建模结果与实际结果的

拟合度,实验结果得到,提出方法的雷达信号同步传递耗时较短,并且建模结果与实际结果的拟合度较高,不仅验证了模型的实时性,还验证了模型的有效性,提出方法所建模型还能够为雷达信号传递的进一步研究提供借鉴意义。

参考文献:

- [1] 马海林,李源,何虎. 基于ESL的多核雷达信号处理芯片的架构探索[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(1): 65-70.
- [2] 周宇,杨慧婷,谷亚彬,等. 基于调频率调制的雷达通信共享信号研究[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(6): 830-835.
- [3] 董春曦,沈志博,刘松杨. 基于压缩感知的雷达信号分选方法[J]. 北京邮电大学学报, 2016, 39(2): 82-87.
- [4] 刘兴钊,高叶盛. 基于光电协同的雷达实时信号处理技术[J]. 数据采集与处理, 2017, 32(4): 658-666.
- [5] 陈涛,柳立志,郭立民. 基于MWC压缩采样宽带接收机的雷达信号脉内调制识别[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4): 867-874.
- [6] 赵瑞金. 雷达数据传输方式的改进及时性分析[J]. 气象科技, 2018, 46(2): 257-261.
- [7] 何国强,李丽,李世平. 面向雷达信号处理应用的可重构处理器设计[J]. 现代雷达, 2016, 38(8): 46-50.
- [8] 孙玉梅,张彦飞,王美春,等. 基于FPGA的雷达信号高速实时采集和显示系统设计[J]. 电子器件, 2016, 39(3): 639-643.
- [9] 张强,王红卫,陈游,等. 海量电磁数据中雷达信号的高效分选方法[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(10): 150-154.
- [10] 李涛涛,杨峰,孙远,等. ZTR12矿用本安型地质雷达数据传输改进方法研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(10): 113-116.
- [11] 段晓超,段玲琳,李化雷. 星型拓扑RS422信号传输特性研究[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(1): 91-94.
- [12] 孙鹏,李贵楠,吴连涛,等. 基于双层压缩感知的有损无线链路稀疏信号传输[J]. 通信学报, 2017, 38(4): 120-128.

Construction of Synchronous Transfer Model of Rescue Detection Mechanical Radar Signal

SUI Guangzhou¹ and YU Yang²

(1. Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China; 2. Shenyang ZKwell Corrosion Control Technology Co., LTD., Shenyang 110000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the model radar signal transmission time is long and the modeling result is low with the actual result, a synchronous transmission model of the rescue detection mechanical radar signal based on SHD is proposed. The wavelet transform is used to study the image of the rescue detection mechanical radar. The radar image is decomposed, and the redundancy and correlation information of the radar image is removed. Before the radar image is processed by the computer, the discrete two-dimensional signal is analyzed and processed, and the low-pass filter is used. Decompose the radar signal, encode the radar image by controlling the threshold, and compress the radar image. On this basis, calculate the basic reliability distribution and Pignistic probability of the radar signal identification framework, establish the Bayesian reliability function, and analyze the Dempster reliability. Synthetic rules, using identification methods to determine the type of radar, calculating the similarity between the identification signal and other signal parameters, and normalizing the similarity of each radar signal parameter, using SDH technology to construct the radar signal synchronization transfer model. The construction of the synchronous transmission model of the rescue detection mechanical radar signal is realized. Combined with the experiment, when the radar signal transmission time-consuming and radar signal synchronous transmission of the modeling results and the actual results fit degree test, the experimental results show that the proposed method modeling results are more compatible with the actual results, more in line with the actual results.

Key words: rescue detection; mechanical radar signal; synchronous transfer model