

【引用格式】武正义, 周跃海, 童峰, 等. 基于小波包变换特征向量提取的隐蔽水声通信性能评价方法研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(3): 301-309.

基于小波包变换特征向量提取的隐蔽水声通信性能评价方法研究

武正义, 周跃海*, 童峰, 陈东升

(厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361002)

摘要 针对水声通信系统的隐蔽性缺乏客观、有效的评价手段, 提出一种基于小波包变换提取信号特征向量并比较特征向量相似度的信号隐蔽性评价算法。为了区别截获信号和环境噪声, 考虑从能量分布特征的角度, 提取截获信号的特征参数。所提算法利用小波包变换具有更高的时频分辨率、自适应选择频带等特点, 获取信号的小波包能量占比、小波包能量熵、小波包尺度熵, 采用上述 3 个特征参数组成特征向量和利用余弦相似度算法判别信号隐蔽性。仿真实验和海试结果表明, 所提方法得到的信号隐蔽性能基本符合实际信号隐蔽性能随信噪比变化规律, 为隐蔽水声通信系统评估设计和水声对抗性能评级提供有效参考。

关键词 隐蔽性能评估; 隐蔽水声通信; 小波包变换; 特征提取; 余弦相似度比较

中图分类号 TN929.3

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)03-0301-09

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.03.008

Research on Performance Evaluation Method of Covert Underwater Acoustic Communication Based on Feature Vector Extraction with Wavelet Packet Transform

WU Zhengyi, ZHOU Yuehai*, TONG Feng, CHEN Dongsheng

(College of Ocean and Earth Science, Xiamen University, Xiamen 361002, China)

Abstract To address the lack of objective and effective evaluation methods for the covert performance of underwater acoustic communication systems, an approach that relies on wavelet packet transform is proposed in this paper. The proposed method extracts signal feature vectors and utilizes a similarity algorithm to assess the covert capability of signals. The proposed method capitalizes on the superior time-frequency resolution and adaptive-frequency-band selection of the wavelet packet transform to differentiate intercepted signals from environmental noise. It extracts feature parameters of intercepted signals, specifically the wavelet packet energy percentage, wavelet packet energy entropy, and wavelet packet scale entropy. These parameters are used to construct the feature vectors, and the cosine similarity algorithm is applied to determine the covert performance of signals. Simulation experiments and sea trials demonstrate that the concealment performance yielded by the proposed method aligns closely with the actual changes in covert performance concerning signal-to-noise ratio. As a result, this method offers an effective reference for evaluating and designing covert underwater acoustic communication systems and grading the acoustic countermeasure performance.

Key words covert performance evaluation; covert underwater acoustic communication; wavelet transform;

收稿日期: 2023-12-20

作者简介: 武正义 (2001-), 男, 硕士生, 主要从事水声通信研究。

*通信作者: 周跃海 (1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水声信号处理, 水声网络和水声调制解调器设计。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助“水下隐蔽通信评价研究”(20720210078)。

feature extraction; cosine similarity algorithm

0 引言

随着我国国防建设的推进,水声通信技术已在海洋军事、水声对抗方面得到广泛应用,水下通信系统的隐蔽性能越来越受到重视。隐蔽水声通信要求在实现可靠传输的同时,尽可能降低被第三方检测的概率,以实现低检测概率(Low Probability of Detection, LPD)通信^[1]。隐蔽水声通信通常借助海洋背景噪声为掩护,在低信噪比情况下,将信号隐藏在环境噪声中,使得通信信号功率低于第三方截获机的检测阈值或利用生物仿声技术携带有效信息,避免被敌方侦测。针对通信系统的隐蔽性能评价,各研究人员、专家提出了不同的检测方法,但是如何量化、直观地判别信号隐蔽性是目前隐蔽水声通信亟需解决的问题之一。

水下隐蔽通信技术主要包括噪声通信、扩频技术、仿声隐蔽技术、混沌保密通信、信道预测技术及自适应功率调整技术等,1995年徐穆洵即提出了水下噪声隐蔽通信技术,包括移频和延时2种通信体制,噪声通信采用真正海洋背景噪声进行通信,以更高层次增强其“隐身”能力,由于其携带信息的噪声与接收机周围的海洋背景噪声相同,即其振幅、频率和相位都随机变化,侦查设备更难区分通信信号和背景噪声^[2]。而扩频通信和仿声技术在近几年得到了快速发展及应用,扩频通信通过伪随机序列控制信号能量扩展到比原始信号带宽宽很多的频带,在低信噪比条件下仍能实现较低误码率^[3-5],又因其具有良好的抗干扰能力和保密性,在水声通信中得到广泛使用。2018年LIU^[6],2019年JIANG^[7]等人提出模拟海洋哺乳动物如鲸鱼、海豚等发声,结合直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)和多进制频移键控(Multiple Frequency Shift Keying, MFSK)调制方式将待传信息隐写在海洋仿声信号中,降低被敌方拦截器识别的概率,不同的调制方式和编码技术也影响信号的传输速率和隐蔽性。扩频和仿声水声通信技术,在理论上满足了一定的隐蔽性需求,但实际可能所传信号与海洋背景噪声区分度较大,拦截

器可轻易识别为通信信号从而施加干扰信号,如何量化、科学地判别上述通信方式的隐蔽性,实现真正隐蔽通信仍是一个巨大挑战。

对于水声通信信号的隐蔽性评价,DILLARD在1979年提出了一种在无先验序列的情况下如何选择检测系统参数来更好的检测扩频信号的方法,将辐射计的探测性能与脉冲探测系统的探测性能进行图象对比,总结推导出了部分检测系统的模型并针对Modified OR/BMWD系统,修正了虚警检测概率公式^[8]。2017年,柳文明引入人耳心理学模型,通过心理学模型分析海洋环境噪声,绘制出听觉掩蔽阈值曲线,将其作为衡量听觉隐蔽性的客观标准,该文章指出当通信信号的功率谱低于该曲线时可认为实现了听觉隐蔽,解决了用听音评估主要依赖主观判断的问题^[9];以色列海法大学DIAMANT基于声呐方程,结合数值模拟的方法,建立拦截器的信号检测概率方程,对比分析了LPD的各类描述方法,并建立系统模型,讨论了不同系统参数对LPD结果的影响,为水声通信系统的隐蔽性能评估提供了科学的评价方法^[10]。虽然DILLARD对无先验经验的扩频系统提出了有效的侦测模型,但适用范围较为局限,柳文明仅从人耳感知角度分析隐蔽性能,忽略了截获机的拦截能力,DIAMANT所提模型是基于声呐方程,但未考虑多径时变水声信道。和传统利用小波包变换识别调制方式的应用需求不同的是,隐蔽水声通信需要区分系统截获的信号和背景噪声,构建指标来判别系统的隐蔽性能。HUANG采用了小波包能量分布特征来分析振动信号,用小波包分解重构后的不同频带子带信号能量占比来表征振动信号能量特征^[11],LI一文中使用小波包能量熵作为特征参数对舰船信号进行特征提取^[12],较好地区别了不同舰船所发噪声,2014年LIU从信息熵的角度使用了多小波包的Shannon熵对信号进行线路故障识别^[13],其中小波包能量占比、能量熵、Shannon熵(即尺度熵)经过比较,发现能较好的表征信号能量特征,故选取其作为本文的信号特征提取的参数。

由于水声调制信号与海洋噪声在能量分布上存在明显差异, 本文主要考虑提取信号能量特征, 并结合在文本识别上已得到广泛使用的余弦相似度算法^[14-15]。本文在第 1 节中介绍了小波包变换、特征参数选取及余弦相似度的相关理论, 第 2 节完成了所提出的系统隐蔽性指标的仿真评估, 最后第 3 节利用海试采集数据对该方法的客观和有效性进行了有效论证, 仿真实验和海试实验都表明了所提出方法能较好地评估隐蔽水声通信性能。

1 基于小波包变换的水声信号隐蔽性判断

本文所提隐蔽性能评价算法框图如图 1 所示, 输入信号经过 3 层小波包分解, 第 3 层共有 8 个子带信号, 代表不同频带, 使用特征提取算法, 得到由小波包能量占比、能量熵、尺度熵组成的特征向量, 同样对已知的通信信号进行特征提取, 采用余弦相似度算法进行比较, 由相似性判断是否隐蔽。余弦相似度最早应用于信息检索领域, 计算简单的文本向量空间模型, 随着研究的深入和应用范围扩大, 也用于图像处理、自然语言处理和深度学习等领域, 在本文用于比较由信号特征参数构成的空间向量的相似性, 在所了解文献中, 余弦相似度算法

是首次应用于水声通信领域。下述内容将分别介绍小波包变换理论、信号提取的 3 个特征参数、计算原理, 以及参数选取的合理性。

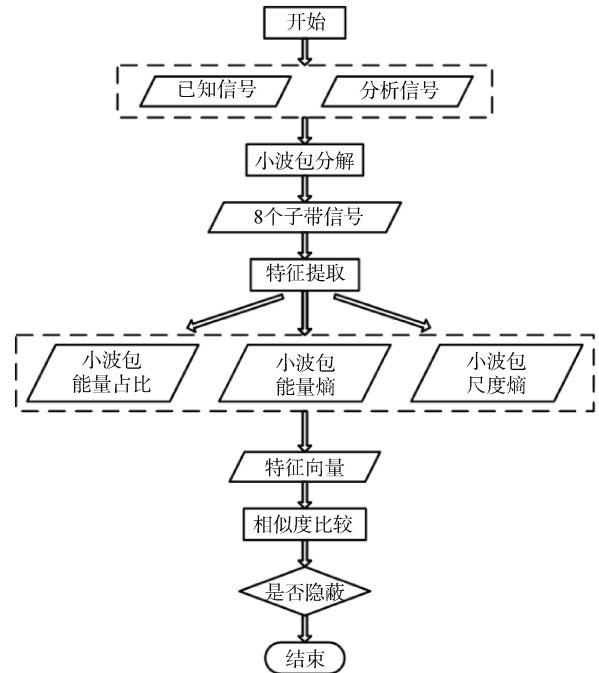


图 1 隐蔽性能评价算法框图
Fig. 1 Diagram of covert performance evaluation algorithm

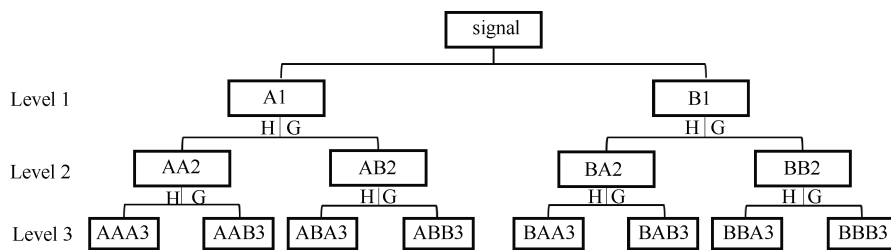


图 2 小波包分解示意图
Fig. 2 Schematic diagram of wavelet packet decomposition

1.1 小波包变换理论

小波包变换是小波变换的延伸, 本质是将一个信号分解成不同尺度和频率的小波包成分, 以更好地理解信号的局部特性和结构, 在小波包分解中, 信号被逐步分解成越来越细的子频带, 直到达到所需的分辨率或满足特定的分析目标, 这一分解过程通常是通过迭代的方式完成的。小波包变换通过对输入信号不断分解, 克服了离散小波变换在高频区域分辨率较低的限制性, 用多层次划分信号的方法, 对小波变换没有细分的高频部分进一步分解,

并根据信号的特征分析, 自适应选择频带, 提供了更高的时-频分辨率和适应性^[16]。本文所提算法基于小波包变换对信号的分解, 提取其各频带的子信号特征以表征整体信号特征, 是隐蔽性评价算法实现的第 1 步。

图 2 描述了基于小波包变换 (Wavelet Packet Transform, WPT) 的信号分解过程, 其中分解层为 3 层, 首先对原始信号进行一级分解, 进行高频和低频滤波得到 A1 和 B1, 进一步对子带进行高频和低频滤波分解, 得到 8 个子带信号, 其中 H、G

分别代表高通滤波和低通滤波。例如：A 是经过高通滤波后的高频子带信号，B 是低通滤波后的低频子带信号，A1 是输入信号第 1 层分解后的高频部分，AB2 是 A1 信号第 2 层分解后的低频部分，ABB3 是 AB2 分解后的低频部分，如图 2 所示。

小波包由 2 个正交的小波基函数滤波器系数组成，小波包函数可以定义为

$$\begin{cases} u_{2n}^{(j)}(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) u_n^{(j)}(2t-k) \\ u_{2n+1}^{(j)}(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) u_n^{(j)}(2t-k) \end{cases} \quad n=0,1,2,\dots \text{ and } k=0,1,\dots,m \quad (1)$$

式中： $u_0^{(0)}(t)$ 为正交尺度函数 $\phi(t)$ ，即 $u_0^{(0)}(t) = \phi(t)$ ，该小波包函数是由 $u_0^{(0)}(t)$ 确定的； $u_1^{(0)}(t)$ 为小波基函数 $\psi(t)$ ，由式 (1) 中的上标 (j) 表示第 j 层小波包基，在第 j 层会有 2^j 小波包基； $h(k)$ 和 $g(k)$ 分别为正交镜像低通滤波器和高通滤波器系数，且 $g(k) = (-1)^k h_{l-k}$, $l, k \in Z$ ， $\sum_{n \in Z} h_n = \sqrt{2}$ 。

通过公式 (1) 确定了小波包基函数，则可对该信号进行小波包分解，得到小波系数：

$$\begin{cases} d_l^{j,2n} = \sum_k a_{k-2l} d_k^{j-1,n} \\ d_l^{j,2n+1} = \sum_k b_{k-2l} d_k^{j-1,n} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $d_l^{j,2n}$ 和 $d_l^{j,2n+1}$ 为小波系数； j 为尺度参数， $j \in Z^+$ ； k, l 为平移参数， $l, k \in Z$ ； n 为频率参数， $n \in \{2^{j-1}, 2^{j-2}, \dots, 0\}$ ； a_{k-2l} 为小波包分解低通滤波器； b_{k-2l} 为小波包分解高通滤波器^[17]。

小波包重构算法公式为

$$d_k^{j-1,n} = \sum_l a_{k-2l} d_l^{j,2n} + \sum_l b_{k-2l} d_l^{j,2n+1} \quad (3)$$

式中： $d_k^{j-1,n}$ 为小波包重构后的小波包系数； a_{k-2l} 为小波包重构低通滤波器； b_{k-2l} 为小波包重构高通滤波器。

1.2 特征提取的参数选取

若要选取合适的特征参数，则需明确噪声调制信号及海洋环境噪声的信号特征。噪声调制信号与直接序列扩频信号具有一定的相似性，直接扩频序列调制信号是在“伪随机”序列控制下，将信号能量扩展分布到比原始信号带宽大很多的频带上，其

功率谱密度甚至可以降低到噪声以下，这使得拦截器很难检测到信号的存在；直接序列扩频信号使用伪随机的 PN 序列对载波进行调制，对于没有先验序列经验的截获方来说，难以破译直接扩频信号，故直接序列扩频通信系统有良好的保密性。而噪声调制信号具有类似的特点，不同的是噪声调制信号采用的是类噪声序列对载波进行调制，相对于 PN 序列来说，更接近环境噪声，因此理论上在低信噪比条件下，噪声调制信号和海洋环境噪声的相似度，比直接序列扩频信号更高。海洋环境背景噪声主要由潮流、海洋涡流噪声、海面波浪噪声、风成噪声、海水静压作用、船舶噪声、生物噪声以及其他一些人为噪声，且主要为加性噪声^[18]，从信号带宽角度分析，其带宽覆盖 10 Hz~4 MHz，而主要能量集中在 10 Hz~500 kHz 的低频波段，对于扩展频谱后的水声通信信号来说，带宽仍是极宽的。在本文中我们选用了带宽分别为 5 kHz~15 kHz、13 kHz~18 kHz 的四进制噪声序列调制信号 (Mary Noise Sequence, MNS)^[2] 和海洋纯背景噪声进行比较。

1) 小波包能量占比。

将小波包能量占比作为振动波的特征参数，在地质勘探、机械检测中较为常用，那么在水声通信中，由于通信信号与背景噪声在能量占比方面有着显著区别，也可使用小波包能量占比作为特征参数，MNS 信号的频谱能量通常具有明显的能量集中在某些小波包内，而海洋噪声能量一般集中在低频范围，假设将信号分解为 n 层，第 j 个节点重构信号 $S_{n,j}$ 对应的信号能量为 $E_{n,j}$ ^[11]：

$$E_{n,j} = \int |s_{n,j}|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{j,k}|^2 \quad (4)$$

式中： $x_{j,k}$ ($j=0, 1, 2, \dots, 2n-1$)，即小波包分解后的节点； $k=1, 2, \dots, m$ ， m 为信号长度，设分析信号的总能量为 E_0 ：

$$E_0 = \sum_{j=0}^{2^n-1} E_{n,j} \quad (5)$$

各频段能量占分析信号的总能量的百分比为 E_j ：

$$E_j = \frac{E_{n,j}}{E_0} \times 100\% \quad (6)$$

2) 小波包能量熵 WPEE。

和小波包能量占比参数不同的是，小波包能量熵反映了信号在不同频带中能量的分散程度和分

布形态, 当信号在某个频带中能量集中、分布均匀时, 小波包能量熵值较低; 而当信号在不同频带中能量分散、分布不均匀时, 小波包能量熵值较高。小波包能量占比体现了信号在能量谱的总体分布情况, 小波包能量熵体现的则是细分后各子带信号的特征, 因此, 小波包能量熵可以用来定量评估信号的时频特性, 包括信号的频谱宽度、频带能量分布的集中性和不均匀性。小波包能量熵值计算如下^[12]:

$$I_{n,j} = -E_{n,j} \log E_{n,j} \quad (7)$$

式中, $E_{n,j}$ 是第 n 层 j 个节点小波包的归一化能量。

3) 小波包尺度熵。

海洋背景噪声除了在能量分布方面与调制信号有显著差异, 两者包含的信息量也不同, 所以也可以从信息熵的度量方式来体现两者差异性。所提出的小波包尺度熵是对小波包系数重构后信号熵的度量, 基于小波包系数的概率分布, 用来衡量信号在不同尺度和频率上的信息丰富程度。小波包尺度熵值越大, 表示信号的复杂性越高, 包含的信息量越丰富, 反之, 小波包尺度熵值越小, 表示信号的复杂性越低。各子带小波包熵为^[13]

$$p_{(n,j)}(i) = \frac{S_{(n,j)}(i)}{\sum_{i=1}^N S_{(n,j)}(i)} \quad (8)$$

$$H_{n,j} = -\sum p_{(n,j)}(i) \cdot \lg [p_{(n,j)}(i)] \quad (9)$$

$$(j = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 1)$$

式中: $S_{(n,j)}$ 是原始信号进行 n 层小波包分解, 第 j 个节点的重构信号序列; $S_{(n,j)}(i)$ 是重构信号序列的第 i 个值; N 是原始信号长度; $p_{(n,j)}(i)$ 表示重构序列第 i 个值的比重; $H_{n,j}$ 是信号第 n 层第 j 个小波包尺度熵。若对信号和噪声进行 3 层小波包分解并重构, 得到 8 个子带信号, 计算尺度熵值, 即可构造一个特征向量 $[H_{3,0}, H_{3,1}, \dots, H_{3,8}]$ 。

上述所举的特征参数主要从信号能量分布特征、信息熵的角度出发, 来表征通信信号和海洋背景噪声, 每个参数得到一组 8 列特征向量, 最后形成 3×8 的信号特征向量, 用来代表信号特征。但需要注意的是, 本文所选取的特征参数, 是仅从通信信号和海洋背景噪声的差异性出发考虑

的, 若用来区别其他信号相似性, 其科学性和有效性还有待考量。

1.3 余弦相似度比较

余弦相似度本质是比较两组向量在空间中的夹角, 通过夹角大小来比较向量的差异程度, 如下图所示, 分别把特征向量 $V1$, $V2$ 绘制在二维坐标中, 2 个向量方向不同, 若夹角为 0° , 意味着方向相同、向量重合, 方向上的差异为 0, 若夹角为 90° , 则向量方向垂直, 方向完全不同, 相似性越低。余弦相似度开始多用于文本的相似性判断, 后来推广到语音相似性的比较, 利用余弦相似度作为特征系数的相似性准则进行降维, 其中余弦相似度的计算公式如下^[14]:

$$\cos \langle \mathbf{A}, \mathbf{B} \rangle = \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{A}| |\mathbf{B}|} \quad (10)$$

式中: $|\mathbf{A}|$ 、 $|\mathbf{B}|$ 表示向量的模; $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ 为向量的点积。如此利用余弦相似度比较 2 个信号特征向量的夹角, 即可计算 2 个信号的相似性。

2 实验结果与分析

信号的隐蔽性判别步骤如下, 由小波包变换提取输入信号的特征参数后, 归一化并组成特征向量 $V1$ 、 $V2$, 特征向量包含了小波包能量占比、小波包能量熵、小波包尺度熵 3 个维度, 每个维度由 8 个子带信号的特征构成, 最后将特征向量按照余弦相似度算法进行比较, 得出量化的信号相似性参数, 相似性参数范围在 $[-1, 1]$, 数值越大, 信号与原始信号相似性越高, 隐蔽性能越差; 数值越小, 信号与原始信号相似性越低, 隐蔽性能越好。在本次仿真实验中, 主要对四进制噪声序列调制信号 (MNS) 分析, 在 BELLHOP 模型下建立水声信道仿真模型, 比较经过水下信道后 MNS 信号和原始信号、海洋环境噪声的相似性。

2.1 不同信号的特征参数比较

从能量分布的角度分析, 水声通信信号和海洋背景噪声有明显区别, 第 1 节分别阐述了小波包能量占比、能量熵、尺度熵的理论推导, 应用上述理论在仿真软件中进行仿真实验。为了说明所提方法的有效性, 图 3 比较了不同信号的特征参数。首先使用小波包分解函数分解输入信号, 重构第 3 层 8 个子

带信号，计算各子带信号能量占比并绘制柱状图，比较了噪声调制信号与厦门近海背景噪声、台湾海峡背景噪声的能量特征。

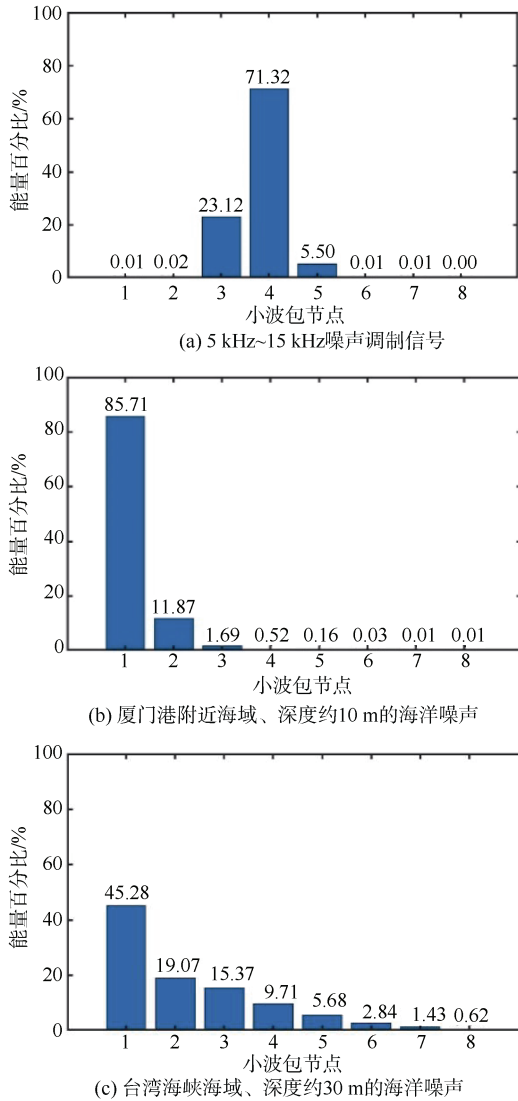


图 3 各信号的小波包能量占比

Fig. 3 Wavelet packet energy percentage of each signal

图 3 (a) MNS 信号主要集中在第 3、4、5、6 节点，集中程度极为显著；而图 3 (b)，3 (c) 海洋噪声信号主要集中在第 1 频段，能量占比为 85.71%和 45.28%，海洋背景噪声与水声通信信号差异较为明显，适合作为特征参数表征信号。

从能量熵的角度提取特征，使用小波包重构函数重构信号，计算每个子带信号的能量熵值，即可得到该信号每个频带的能量均匀程度特征。如图 4 所示，横坐标为小波包分解后的 8 个频带节点，频

带频率随横坐标向右逐渐增大，纵坐标为归一化后的能量熵值，通过比较噪声调制信号和海洋噪声的能量熵折线图，可分析得出海洋噪声的绝大部分能量集中在相对低频部分，小部分能量在中间频段，而噪声调制信号的主要能量分布在中间 2 个频段，和海洋噪声有着显著区别，该参数能较好地地区分信号与噪声。所选参数均能有效区别信号特征，接下来将在不同仿真条件下，计算信号与噪声的相似度，并判断算法的科学性。

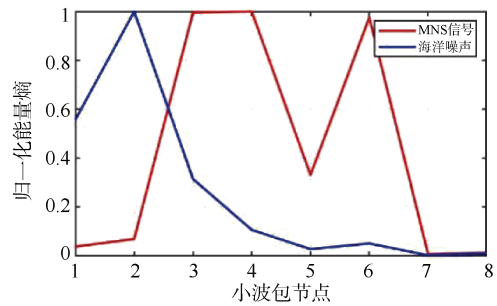


图 4 小波包各子带归一化后能量熵

Fig. 4 Energy entropy after normalization for each subband of wavelet packet

2.2 不同仿真条件下信号隐蔽性

采用 Bellhop 模型^[19]仿真水声信道，假设实验水域为浅海信道，水深 10 m，发射机深度 4 m，截获机深度 6 m，两机通信距离为 2 km，发射信号载波中心频率为 10 kHz，信道冲激响应如图 5，使用频带为 5 kHz~15 kHz 的 MNS 信号经过 BELLHOP 信道仿真，并加入经过 5 kHz~15 kHz 有色噪声，该噪声有 5 kHz~15 kHz 的带通滤波器获得。计算从 -25~10 dB 信噪比条件下，原始噪声调制信号、海洋噪声信号的相似度。

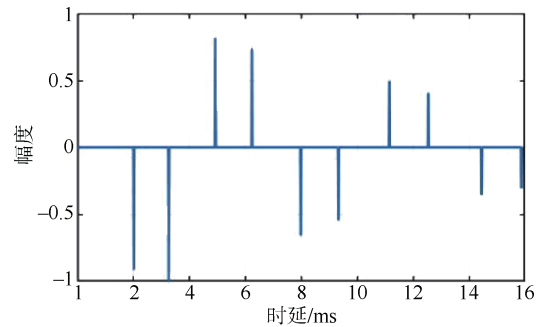


图 5 仿真信道冲激响应

Fig. 5 Simulated channel impulse response

首先探究不同信噪比条件下 5 kHz~15 kHz 噪声调制信号和噪声的相似性, 从图 6 可得, 两者存在明显的相反关系, 当信噪比较低时, 仿真通信信号被噪声淹没, 与原始信号相似性较低, 而与海洋噪声存在高度相似, 隐蔽性能较好; 当信噪比提高时, 仿真信号与原始信号相似度逐渐提高, 作为调制信号的能量特征更明显, 而与能量较为分散的海洋噪声相似度降低, 隐蔽性能变差。可见不同信噪比的条件下, 对信号隐蔽性能具有重要影响。

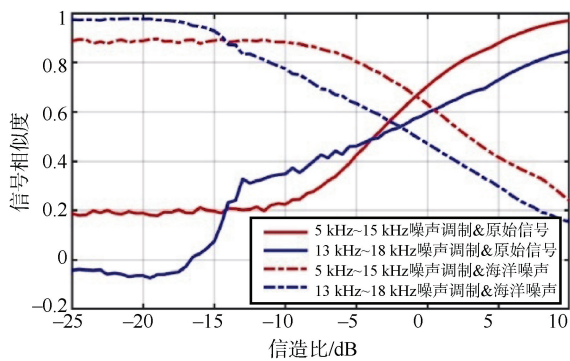


图 6 不同带宽下信号相似度曲线
Fig. 6 Similarity curves of signals under different bandwidths

考虑不同带宽下的信号隐蔽性, 在相同仿真信道参数下, 使用小波包提取 5 kHz~15 kHz、13 kHz~18 kHz 噪声调制信号特征, 并使用余弦相似度分别比较不同信噪比下, 仿真信号与未经过信道的原始信号及仿真海洋噪声的相似性, 得出相似度变化曲线, 由此判断信号隐蔽性。如图 6 可得, 相似度曲线总体变化趋势受信噪比影响, 仿真信号在 -25 dB 信噪比时, 与原始信号的相似度为 0.19 和 -0.06, 相似性极低, 隐蔽性较好, 13 kHz~18 kHz 的 MNS 信号和原始信号的相似性比 5 kHz~15 kHz 更低, 且 13 kHz~18 kHz 信号与仿真海洋噪声相似度更高, 但两者区别较小; 随着信噪比的提高, 两者与原始信号的相似性逐步提高, 隐蔽性能降低, 但两者的隐蔽性能差值基本不超过 0.2, 无明显差距, 这也是由于两者信号结构较为一致, 则经过信道传输后的信号也存在相似性; 并且曲线总体变化趋势符合相关法测量信号相关性时随信噪比提高的规律, 说明相似性曲线可以满足衡量信号隐蔽性的要求, 并具有准确、可量化的优点。

最后探究不同调制序列下的信号隐蔽性, 在相

同信道条件下进行仿真实验, 计算带宽为 13 kHz~18 kHz 的四进制噪声序列和直接扩频 M 序列信号, 图 6 信号相似度曲线: 在较低信噪比时, 直扩信号的隐蔽性能略好于噪声调制信号; 当信噪比到 -15 dB 时, 噪声调制信号隐蔽性能略好于直扩信号; 信噪比达到 -5 dB 以上时, 直扩信号隐蔽性能优于噪声调制信号; 两者在不同信噪比下与原始信号的相似性曲线总体并无较大差别, 隐蔽性变化趋势相似, 但仿真信道与实际海洋声学信道有一定差异, 仿真条件下测量的信号隐蔽性能可能和实际通信有所差异。

3 海上试验与分析

为了更进一步验证本文所提算法的有效性和可靠性, 实验团队于 2023 年 5 月在福建省厦门市厦门湾进行水声通信实验研究。发射和接收换能器均无指向性, 实验水域水深约 15 m, 发射源位于水下 2 m, 2 个水听器组成垂直截获阵列分别位于水下 2 m 和 3 m 处, 如示意图 7 所示, 实验团队保持发射船位置不变, 移动截获船节点位置变化。定义截获船在 1.5 km 处为节点 1, 截获船在 3 km 处为节点 2。本次实验中系统采样率为 48 kHz, 载波中心频率为 10 kHz, 带宽为 5 kHz~15 kHz, 采用四进制相移键控和噪声序列调制载波, 每个节点发射 2 次。同时使用 128 kHz 采样率水听器采集海洋噪声, 深度放置约为 3 m。

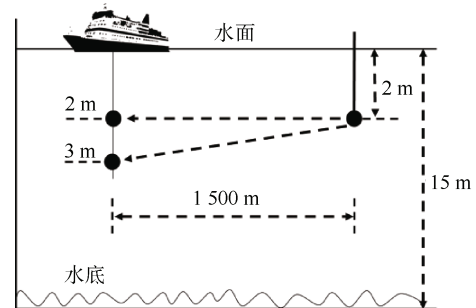


图 7 厦门湾海试示意图
Fig. 7 Sea trial in Xiamen bay

节点 1 和 2 处截获的信号时域波形如图 8 所示, 从时域上观察, 3 km 处的截获信号已看不出明显的调制信号结构, 且毛刺较多。可利用本文所提算法, 先采用小波包变换提取截获信号和海洋噪声特征,

使用余弦相似度计算特征向量相似度得到截获信号与海洋噪声及原始信号的相似度表(表1-2)。

表1 1.5 km 和 3 km 处截获信号与原始信号相似度

截获信号	节点 1.1	节点 1.2	节点 2.1	节点 2.2
第 1 次	0.883 4	0.774 4	0.639 1	0.692 8
第 2 次	0.869 0	0.870 9	0.500 2	0.482 9

表2 1.5 km 和 3 km 处截获信号与海洋噪声相似度

截获信号	节点 1.1	节点 1.2	节点 2.1	节点 2.2
第 1 次	0.421 6	0.562 7	0.677 2	0.589 8
第 2 次	0.415 4	0.502 0	0.741 6	0.755 5

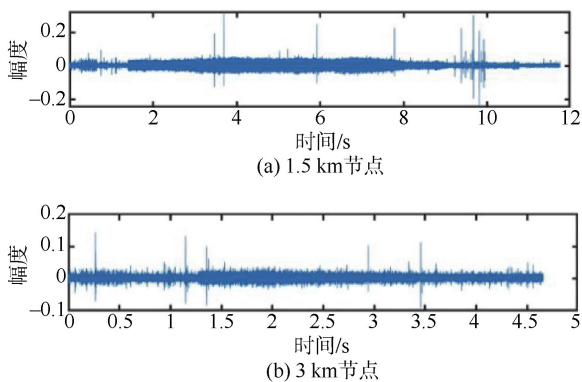


图8 1.5 km 和 3 km 处截获信号时域波形

Fig. 8 Time domain waveforms of intercepted signals at 1.5 km and 3 km

图中:节点 1.1、2.1 是深度为 2 m 的水听器,节点 1.2、2.2 是深度为 3 m 的水听器,处于节点 1 时两船水平距离为 1.5 km,节点 2 为 3 km。从图 8 和表 1 数据中分析,当截获机位于 1.5 km 时,虽然截获信号在时域上观察波形,还有不太明显的调制信号帧结构,但经过小波包变换,提取各个子频带特征后,可以得到明显的调制信号能量分布图,与原始信号进行相似度比较后,得到相似度大致在 0.77~0.88 左右,当通信距离增加至 3 km 时,相似度明显降低,约为 0.48~0.69,符合实际通信情况,当发射信号功率固定,通信距离越远,接收信号信噪比越低,则与原始信号相似度越低,被截获的概率越低。同时发现,同一水听器截获的信号与原始信号及海洋噪声比较后,计算的相似度不同,一方

面由于海洋声学信道是时变、多径干扰严重的,另一方面试验海域存在航行船舰经过,导致同一节点,不同发射时间,不同深度的水听器得到的截获信号有一定差异,但根据试验结果分析,该影响在可接受范围内。

表 2 反映了不同距离下载获信号与海洋噪声的相似度,通信距离在 1.5 km 时,截获信号与海洋噪声相似度约为 0.41~0.56;通信距离在 3 km 时,截获信号与海洋噪声

相似度约为 0.58~0.75;随着通信距离增加,截获信号与海洋噪声相似度越高,越接近海洋环境噪声,隐蔽性越好。综上数据分析,说明本文所提方法能有效衡量截获信号的隐蔽性能,对改善通信系统隐蔽性,提高对水声对抗能力具有重要作用。

4 结束语

本文提出的一种水声信号隐蔽性能评价方法,该方法基于小波包变换提取截获信号特征参数,并利用余弦相似度比较特征向量间的相似性,所提方法量化信号隐蔽性能的有效手段。本文详细介绍了针对如何区别截获信号与海洋环境噪声的情况,利用小波包变换提取信号特征向量的方法;并在仿真实验中,基于 BELLHOP 信道模型,分别从不同信噪比、不同带宽、不同调制序列的角度来验证算法的有效性和科学性,研究表明,信噪比较低或通信距离较远时,信号隐藏在背景噪声中,不易被敌方截获机检测到,与噪声相似度越高,隐蔽性能较好;最后在海试中,再次验证相似度算法的可行性和有效性,与原有的相关法信号检测相比,实现了快捷高效、科学量化地判别信号隐蔽性能。

参考文献

- [1] 柳文明,韩树平,李厚全,等.基于截获因子的直序扩频水声通信隐蔽性能分析[J].南京大学学报:自然科学,2017,53(4):654-660.
- [2] 徐穆洵.噪声通信[J].军事通信技术,1995(3):1-6.
- [3] BAI Y G, ZHAO D S, WU G Q. The simulation of direct spread spectrum system based on transmitted reference signal[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2013, 10(1): 784-814.
- [4] 艾宇慧,周瑜丽,岳沛,等.m序列扩频谱水声通信研究[J].哈尔滨工程大学学报,2000(2):15-18.

- [5] 孙卫华,王子勇,郭小宇,等.直接序列扩频水声通信技术研究[J].舰船科学技术,2016,38(7):124-127.
- [6] LIU S Z, MA T L, GANG Q, et al. Bionic communication by dolphin whistle with continuous-phase based on MSK modulation[C]// 2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Hong Kong: IEEE, 2016.
- [7] JIANG J J, WANG X Q, DUAN F J, et al. A sonar-embedded disguised communication strategy by combining sonar waveforms and whale call pulses for underwater sensor platforms[J]. Applied Acoustics, 2019, 145 (8): 255-266.
- [8] DILLARD R A. Detectability of spread-spectrum signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979, 15 (4): 526-537.
- [9] 同鸣,郝重阳,刘晓军.基于听觉掩蔽特性的扩频信息隐藏方法[J].计算机工程,2006(10):137-139.
- [10] DIAMANT R, LAMPE L, GAMROTH E. Bounds for low probability of detection for underwater acoustic communication[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 42 (1): 143-155.
- [11] HUANG D, CUI S, LI X Q. Wavelet packet analysis of blasting vibration signal of mountain tunnel[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117: 72-80.
- [12] LI Y X, NING F Y, JIANG X R, et al. Feature extraction of ship radiation signals based on wavelet packet decomposition and energy entropy[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 8092706.
- [13] LIU Z G, HAN Z W, ZHANG Y, et al. Multiwavelet packet entropy and its application in transmission line fault recognition and classification[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2014, 25(11): 2043-2052.
- [14] 艾佳琪,左毅,刘君霞,等.基于余弦相似度的动态语音特征提取算法[J].计算机应用研究,2020,37(S2):147-149.
- [15] GEORGE K K, KUMAR C S, SIVADAS S, et al. Analysis of cosine distance features for speaker verification[J]. Pattern Recognition Letters, 2018, 112: 285-289.
- [16] 王旭.基于小波变换的通信信号特征提取与调制识别[D].贵州:贵州大学,2009.
- [17] GAO R X, YAN R Q. Wavelets: Theory and Applications for Manufacturing[M]. Boston: Springer, 2011.
- [18] 刘晓健,崔乃刚,刘雪峰,等.基于海洋环境噪声水下探测研究进展[J].数字海洋与水下攻防,2022,5(6):518-523.
- [19] GUL S, ZAIDI S S H, KHAN R, et al. Underwater acoustic channel modeling using BELLHOP ray tracing method[C]// 14th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). Islamabad: IEEE, 2017.

(责任编辑:张曼莉)