

【引用格式】王志欣, 张锦灿, 唐立赫. 基于形态滤波的水声通信信号同步检测方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 301-306.

基于形态滤波的水声通信信号同步检测方法

王志欣, 张锦灿, 唐立赫

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要 针对水声通信过程中拷贝相关同步检测在不同信道环境下相关峰值差距较大, 通过单一固定门限同步检测导致信号误检率、漏检率高的问题, 设计了一种信号同步检测帧结构, 在传统拷贝相关同步检测信号前加入三单音信号, 结合形态学滤波技术, 提出了一种新的水声通信信号同步检测方法, 实现了不同信道环境和通信距离下单一固定门限检测值的水声通信信号同步检测, 降低了信号同步检测的误检和漏检概率。实际海试结果表明: 在 5 km, 7 km, 10 km 不同通信距离和信道环境下该方法均可实现信号同步检测, 信号的误检概率和漏检概率均为 0。

关键词 水声通信; 形态滤波; 同步检测; 拷贝相关; 三单音

中图分类号 TN929.3

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)04-0301-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.04.004

Synchronous Detection Method of Underwater Acoustic Communication Signal Based on Morphological Filtering

WANG Zhixin, ZHANG Jincan, TANG Lihe

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract Aiming at the problem that the correlation peak difference of copy correlation synchronous detection is large in different channel environments in the process of underwater acoustic communication, and the signal false detection rate and missed detection rate are high through a single fixed threshold synchronous detection, a signal synchronous detection frame structure is designed. Three tone signals are added before the traditional copy correlation synchronous detection signal. Combined with morphological filtering technology, a new synchronous detection method of underwater acoustic communication signal is proposed, which realizes the synchronous detection of underwater acoustic communication signal with a single fixed threshold detection value under different channel environment and communication distance, and reduces the probability of false detection and missed detection. The actual sea trial results show that this method can achieve signal synchronous detection under different channel environments and at communication distances of 5km, 7km and 10km, and the probability of false detection and missed detection are both 0.

Key words underwater acoustic communication; morphological filtering; synchronous detection; copy related; three tone

收稿日期: 2022-04-25

作者简介: 王志欣 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水声信号处理、水声通信研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U19B2028)。

0 引言

水声通信^[1-2]作为目前水下唯一有效的远距离通信手段,受到广泛应用。潜艇、无人潜航器和水下信息网之间及其与水面舰船之间的信息传输均使用水声通信。水声通信过程中,信号同步检测是通信成功与否的前提。受水声信道^[3-4]影响,通信双方在不同距离、不同信道环境上进行信息传输,接收方接收的通信信号相关性和信噪比变化较大。传统拷贝相关同步检测方法^[5-6]受接收信号相关性和信噪比影响,相关峰值大小差异较大。采用单一门限值进行同步检测,门限值较高则信号漏检率升高,门限值较低则信号误检率升高。

形态学滤波^[7-8]是一种非线性滤波方法,基于信号的几何结构特性,利用一定形态的结构元素,对信号进行匹配或局部修正,进而达到信号提取、噪声抑制的目的。形态学滤波应用于水声通信信号同步检测,可以有效抑制水声信道非平稳色噪声,降低通信信号的误检和漏检概率。

1 形态学滤波原理

形态学滤波是在数学形态学理论的基础上,提出的一种基于形状的非线性滤波方法,被广泛应用于数字信号处理领域^[9]。该方法通过信号和结构元素的形态运算以修正信号的局部特征,进而获得更本质的信号形态^[10]。在信号噪声抑制应用方面,通过对信号频谱进行多值形态变换,可以有效抑制信号频谱中的正脉冲(峰值)噪声、负脉冲(低谷)噪声以及白噪声^[11],在降低虚警概率的同时,提高了信号的检测概率。

膨胀和腐蚀运算是形态学滤波最基本的运算操作。设 $f(n)$ 为定义在 $F = \{0, 1, \dots, N-1\}$ 上的信号频谱;结构元素 B 为一集合。则 $f(n)$ 关于集合 B 的膨胀和腐蚀运算为

膨胀运算:

$$(f \oplus B)(n) = \max\{f(n-m)\} \quad (n-m \in F, m \in B) \quad (1)$$

腐蚀运算:

$$(f \ominus B)(n) = \min\{f(n+m)\} \quad (n+m \in F, m \in B) \quad (2)$$

可见,膨胀运算和腐蚀运算分别是关于结构元素 B 的最大和最小运算,结构元素 B 为信号最大最小运算的区域,且 $(f \oplus B)(n) \geq (f \ominus B)(n)$ 。开运算和闭运算则是在膨胀和腐蚀运算的基础上形成的形态学操作。 $f(n)$ 关于 B 的开运算和闭运算操作分别为

开运算:

$$O_b(f) = (f \ominus B) \oplus B \quad (3)$$

闭运算:

$$C_b(f) = (f \oplus B) \ominus B \quad (4)$$

开运算中信号频谱小于结构元素的部分会被“开掉”,是非扩张的,因此开运算能够抑制信号的正脉冲噪声;闭运算中信号频谱小于结构元素的部分会被膨胀填充,是扩张的,因此闭运算能够抑制信号的负脉冲噪声。通过对开、闭运算进行不同组合形成的滤波器,可对信号中不同类型的噪声进行滤除,从而实现信号的噪声抑制和平滑处理。

本文所使用的开、闭运算组合为

$$TH[f(n)]_b = f(n) - O_b \left(O_b \left(\frac{C_b(O_b(f)) + O_b(C_b(f))}{2} \right) \right) \quad (5)$$

如图1所示,信号噪声抑制和平滑处理流程:

1) 分别对接收信号的频谱进行开、闭运算和闭、开运算; 2) 将开、闭运算和闭、开运算的结果进行平均; 3) 对平均后的结果进行2次开运算,获得信号的噪声基底; 4) 用接收信号的频谱减去信号的噪声基底,得到去除噪声后的信号基底。

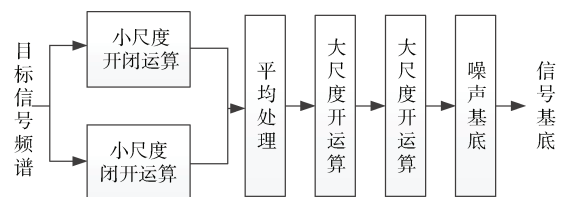


图1 信号噪声抑制和平滑处理流程

Fig. 1 Signal noise suppression and smoothing process

图2所示为形态滤波前后信号频谱对比,可见经形态滤波处理后,最终获得的信号基底去除了色噪声和信号频谱起伏的影响,提高了信号的检测能力。

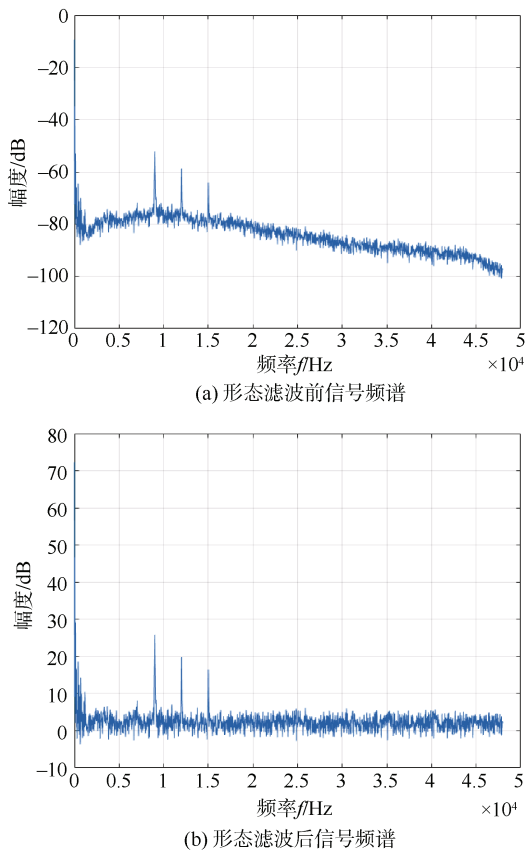


图 2 形态滤波前后信号频谱对比

Fig. 2 Comparison of signal spectrum before and after morphological filtering

2 水声通信信号同步检测帧结构

水声通信过程中传统拷贝相关同步检测方法信号的帧结构如图 3 所示。通信信号由同步信号、空白间隔、数据信号组成。其中, 同步信号一般为线性调频 (LFM) 信号, 通过拷贝相关提取峰值位置实现信号同步; 空白间隔的加入是为了防止信道多途造成的信号拖尾, 导致同步信号对数据信号造成干扰; 数据信号则包含通信所传输的信息。



图 3 传统拷贝相关同步检测信号帧结构

Fig. 3 Frame structure of traditional copy correlation synchronous detection

水声通信过程中, 通信双方随着距离的远近以及信道环境的改变, 接收端接收的通信信号信噪比

和同步信号相关性具有较大差异, 导致传统拷贝相关同步检测方法在进行相关峰值位置提取时, 选取门限值较高则信号漏检率升高, 门限值较低则信号误检率升高, 无法通过单一门限值实现稳定的信号同步检测。

本文通过在传统拷贝相关同步检测方法信号帧结构的基础上, 在同步信号前加入三单音信号, 设计了一种新的信号同步检测帧结构, 如图 4 所示。信号同步检测时首先对三单音信号进行检测, 当检测到三单音信号时, 则可确认接收到通信信号。截取后续同步信号进行拷贝相关, 此时可以确保同步信号在截取的信号中, 故无需进行门限检测, 直接取峰值位置即可完成信号同步检测。



图 4 本文使用的信号同步检测帧结构

Fig. 4 Signal synchronization detection frame structure used in this paper

三单音信号检测使用门限值检测的方式, 由于是对三单音线谱能量的检测, 故门限值的选取只与信号接收信噪比有关, 与信号相关性无关, 故不受信道多途等环境因素影响。因此, 可通过单一固定门限值完成三单音信号的检测, 并且后续同步信号拷贝相关峰值位置提取无需门限值, 故该信号同步检测帧结构可实现对水声通信信号的单一固定门限值同步检测。

3 基于形态滤波的水声通信信号同步检测

本文通过设计一种新的信号同步检测帧结构, 在传统拷贝相关同步检测方法信号帧结构的基础上加入三单音信号, 并结合形态学滤波技术, 提出了一种基于形态滤波的水声通信信号同步检测方法。该方法克服了传统拷贝相关同步检测方法受水声信道环境影响导致拷贝相关峰值差异较大, 单一固定门限同步检测导致信号误检、漏检率高的问题, 在不同信道环境和通信距离下, 仍可使用单一固定门限值完成对水声通信信号的稳定同步检测。

本文所提基于形态滤波的水声通信信号同步检测流程如图 5 所示。该方法具体步骤：1) 对采集的水声信号进行预处理，主要包括：去直流、归一化、带通滤波，得到滤波后的时域信号；2) 对滤波后的信号进行平均周期图时间累积 (Welch 谱估计)，获取时间上的处理增益，降低信道衰落对信号频谱造成的影响，得到信号频谱信息；3) 对信号频谱进行形态学滤波，精确估计信号的噪声基底；4) 利用获取的信号噪声基底对信号频谱进行白化处理，消除色噪声干扰和信号频谱的起伏；5) 信号经白化处理后剩余噪声可近似为高斯白噪声，通过单一固定门限进行三单音信号检测；6) 检测到三单音信号后，截取后续同步信号，通过拷贝相关提取峰值位置完成信号同步检测。

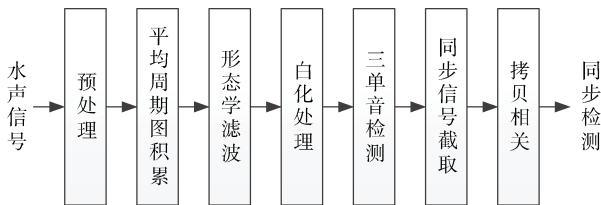


图 5 基于形态滤波的水声通信信号同步检测流程
Fig. 5 Synchronous detection process of underwater acoustic communication signal based on morphological filtering

4 海试数据验证

为验证本文所提的基于形态滤波的水声通信信号同步检测方法的有效性,于 2021 年 11 月在三亚某海域进行了水声通信试验,采集了不同信道环境和通信距离下的水声通信数据,对数据进行了分析处理,并与传统拷贝相关水声通信信号同步检测方法进行了对比。

试验海域水深约为 30 m,发射换能器布放深度 10 m,接收水听器布放深度 8 m,分别采集了收发双方通信距离为 5 km, 7 km, 10 km 时的水声通信信号,采样率为 96 kHz。通信过程中信号帧结构如图 4 所示,三单音信号频率分别为 9 kHz, 12 kHz, 15 kHz,信号时长 256 ms;同步信号为 LFM 信号,频率为 9~15 kHz,信号时长 100 ms;保护间隔均为 100 ms;数据段信号为 Pattern 时延差编码^[12-13]信号。图 6 所示为 5 km 处接收的水

声通信信号时域波形和时频图。

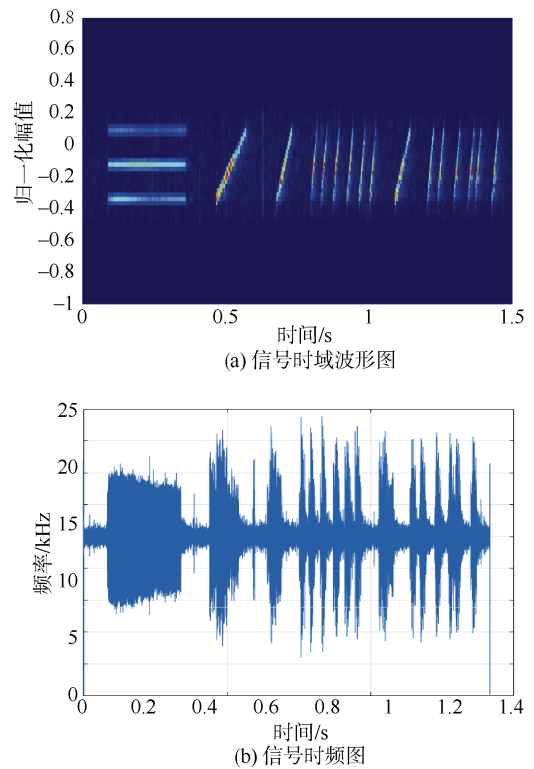


图 6 5 km 处接收的水声通信信号
Fig. 6 Underwater acoustic communication signal received at the distance of 5 km

图 7 所示分别为收发双方相距 5 km, 7 km, 10 km 通信时水声信道环境。5 km 通信在一段时间内信道环境基本不变; 7 km 和 10 km 通信信道环境变化较为明显,多径位置及个数均随时间改变。可见,在不同通信距离处水声信道环境差异较为明显。

图 8 所示分别为收发双方相距 5 km, 7 km, 10 km 通信时传统拷贝相关同步检测方法同步信号相关结果。5 km 通信同步信号拷贝相关峰值为 773.6; 7 km 通信同步信号拷贝相关峰值为 520.5; 10 km 通信同步信号拷贝相关峰值为 83.38。可见,不同信道环境下拷贝相关同步检测相关峰值差异较大,10 km 处相较于实际相关峰值干扰峰值更高,使用单一固定门限同步检测时,若门限设置设为 300,则 5 km 和 7 km 处可正确检测,10 km 处则会产生漏检;若门限设置设为 80,10 km 处则易造成误检。

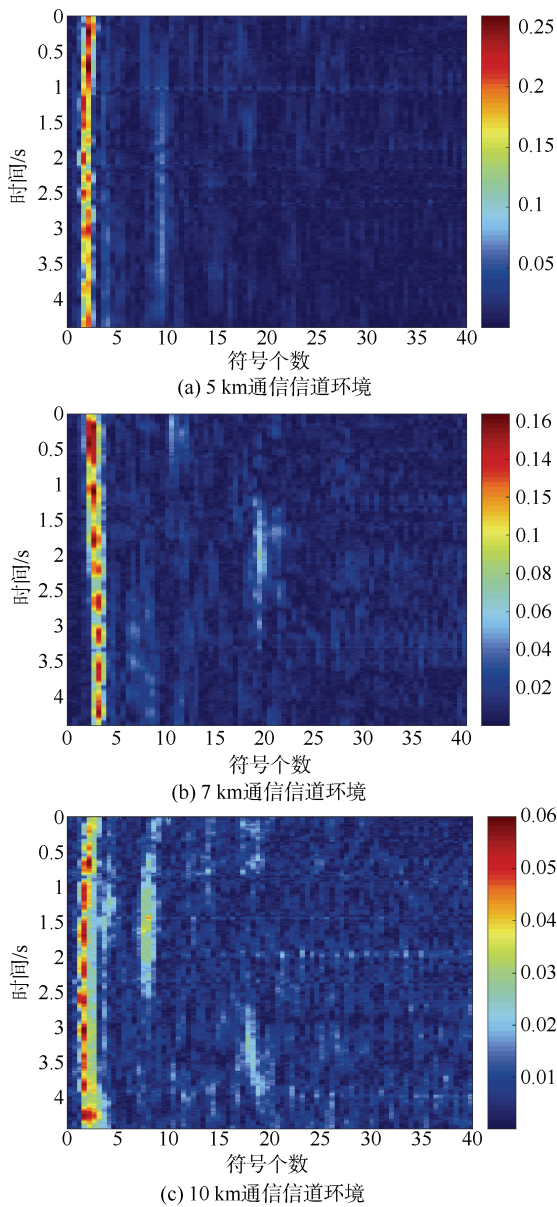


图 7 水声信道环境

Fig. 7 Underwater acoustic channel environment

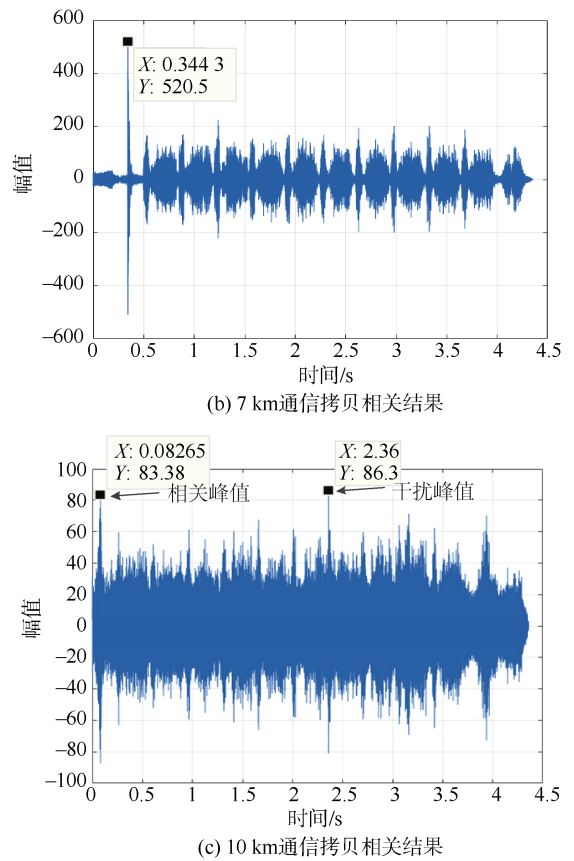
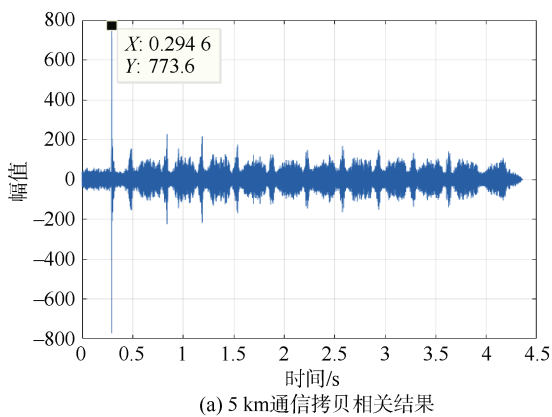
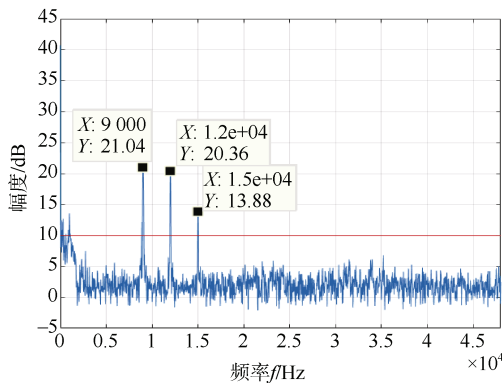
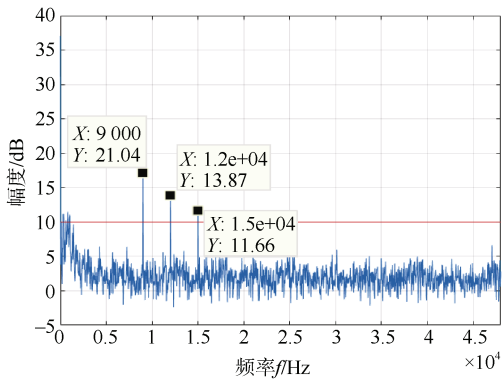


图 8 传统拷贝相关同步检测法同步信号相关结果
Fig. 8 Synchronization signal correlation results of traditional copy correlation synchronization detection method

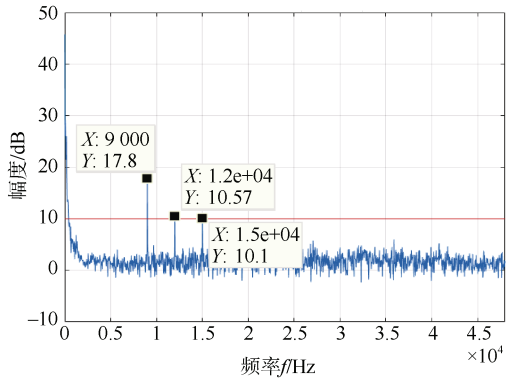
图 9 所示分别为收发双方相距 5 km, 7 km, 10 km 通信时本文所提方法三单音信号同步检测结果。频谱累积长度为三单音信号长度, 若三单音信号谱线达到检测门限则不再继续累积, 直接提取同步段信号进行后续处理; 若三单音信号谱线未达到检测门限, 则继续累积, 直到包含全部三单音信号能量。可见, 使用同一固定门限值(10 dB)在 5 km, 7 km, 10 km 通信距离下, 均可实现三单音信号检测。在检测到三单音信号后, 可确认接收到通信信号, 截取后续同步信号段进行拷贝相关, 此时可以确保同步信号在截取的信号中, 故无需进行门限检测, 直接取峰值位置即可完成信号同步检测。试验中, 分别在 5 km, 7 km, 10 km 处进行了 30 次通信, 均可实现水声通信信号的同步检测, 误检和漏检概率均为 0。



(a) 5 km通信三单音同步检测结果



(b) 7 km通信三单音同步检测结果



(c) 10 km通信三单音同步检测结果

图 9 本文所提方法三单音信号同步检测结果
Fig. 9 Synchronous detection results of three tone signals of the proposed method

5 结束语

水声通信信号稳定的同步检测作为水声通信能否成功的基础,传统拷贝相关水声通信同步检测方法受水声信道环境影响,不同信道环境同步信号相关峰值大小具有明显差异,使用单一固定门限检

测易导致信号漏检和误检,致使水声通信稳定性和可靠性大大降低。本文在传统拷贝相关水声通信同步检测帧结构的基础上,加入了三单音信号,并结合形态学滤波技术,在不同信道环境和通信距离下使用单一固定门限即可实现稳定的水声通信信号同步检测,通过对海试数据的分析处理证明了本文所提方法的有效性,虽然加入三单音信号占用了有效数据时间,但提高了水声通信的稳定性。

参考文献

- [1] 张锦灿, 王志欣. 高速 Pattern 时延差编码水声通信技术[J]. 无线电工程, 2019, 49 (9): 779-782.
- [2] 王大宇, 王志欣, 张光普. 基于改进谱减算法的水声通信信号检测方法[J]. 应用科技, 2020, 47(3): 69-73.
- [3] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.
- [4] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [5] 凌志强. 水声通信中低计算复杂度的信号检测与同步技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [6] STOJANOVIE M. OFDM for underwater acoustic communications; adaptive synchronization and sparse channel estimation[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Las Vegas: IEEE, 2008.
- [7] 王晓庆, 母诗源, 李晋, 等. 一种基于形态滤波的水声信号检测算法[J]. 无线电工程, 2019, 49 (7): 611-616.
- [8] 陈静, 杨明. 基于数学形态滤波的调制方式识别[J]. 无线电通信技术, 2016, 42 (1): 54-56.
- [9] 王权, 江桦, 陈含欣. 基于形态滤波的短波信号检测算法[J]. 信息与电子工程, 2011, 9 (6): 733-738.
- [10] 郭晓鑫, 刘立, 冯志鹏. 数学形态学在信号处理中的应用综述[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(10): 187-191.
- [11] 王志强, 安良, 陆倩人. 基于数学形态学的海洋混响背景下的信号检测[J]. 信号处理, 2008, 24 (6): 1004-1007.
- [12] 殷敬伟, 惠娟, 惠俊英, 等. 无源时间反转镜在水声通信中的应用[J]. 声学学报, 2007, 32 (4): 362-368.
- [13] 惠俊英, 刘丽, 刘宏, 等. Pattern——时延差编码水声通信研究[J]. 声学学报, 1999, 24 (6): 561-573.

(责任编辑: 曹晓霖)