

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513813

基于相关定时与混沌编码的仿生伪装隐蔽通信方法^{*}

蒋佳佳^{1,2}, 郭同同^{1,2}, 杨绪宝^{1,2}, 李兆明^{1,2}, 谭金松^{1,2}

(1. 精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072; 2. 微光机电系统技术教育部重点实验室 天津 300072)

摘要:丛林由于地形复杂、环境多变等特点已成为非对称作战和特种行动的关键区域,传统无线电通信在此环境下易受干扰、易被侦测,基于仿生伪装的声通信技术为丛林隐蔽通信提供了新思路,然而该技术在丛林复杂声学环境下面临通信有效性(通信速率、误码率)与隐蔽性之间相互制约的瓶颈问题。针对此问题提出了差分时延差编码、混沌序列帧长跳变以及多阵元虚拟时间反转镜(VTRM)信道均衡相结合的仿生伪装隐蔽通信方法。该方法利用多物种叫声协同组成通信脉冲序列,设计了基于同步码和信息码的伪装通信帧结构,利用绣眼鸟鸣声作为同步码并引入混沌编码机制,通过同步码和混沌序列驱动通信帧长动态随机跳变以提高信号伪装性和抗预测性,利用蟋蟀叫声作为信息码实现差分时延差编码和相关定时解码,结合多阵元虚拟时间反转镜技术,有效抑制丛林多径效应引发的信号失真。最后搭建了仿生伪装隐蔽通信原理样机并完成了丛林环境实验和隐蔽性评价实验。实验结果表明,本方法在维持高隐蔽性前提下,通信距离90 m内误码率低于 1.7×10^{-3} ,平均通信速率达到54.2 bit/s,可实现兼顾隐蔽性和有效性的伪装隐蔽声通信。

关键词:仿生伪装通信;混沌加密;多径衰落;差分时延差编码;空间分集合并

中图分类号: TH911 TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Camouflage covert communication based on correlated timing and chaotic encoding

Jiang Jiajia^{1,2}, Guo Tongtong^{1,2}, Yang Xubao^{1,2}, Li Zhaoming^{1,2}, Tan Jinsong^{1,2}

(1. The State Key Lab of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin 300072, China;

2. Micro Optical Electronic Mechanical System Technology Laboratory, Tianjin 300072, China)

Abstract: In jungle environments characterized by complex terrain and dynamic conditions, traditional radio communications are prone to interference, interception, and detection. Bio-inspired acoustic covert communication has emerged as a promising stealth alternative; however, challenges such as severe multipath fading and insufficient concealment remain when mimicking animal vocalizations. To address these limitations, this study proposes a bionic camouflage covert communication method that integrates differential time-delay coding, chaotic encoding-based frame-length modulation, and Multi-Element Virtual Time Reversal Mirror (VTRM) channel equalization. The proposed method constructs a camouflage communication frame comprising synchronization and information codes. Synchronization is achieved using white-eye bird calls in combination with a chaotic encoding mechanism that dynamically modulates frame length, enhancing signal camouflage and unpredictability. Cricket chirps are utilized as information codes to implement differential time-delay coding and correlation-based timing decoding. To counteract multipath-induced signal distortions prevalent in jungle environments, VTRM technology is employed for effective channel equalization. A prototype system was developed and subjected to field testing in realistic jungle conditions, including evaluations of concealment performance. Experimental results demonstrate that under high-concealment scenarios, the proposed method achieves a bit error rate below 1.7×10^{-3} within a 90-meters range and maintains an average communication rate of 54.2 bit/s. These findings validate the method's ability to balance concealment and communication efficiency in complex jungle acoustic environments.

Keywords: bionic camouflage communication; chaotic encryption; multipath fading; differential time delay coding; spatial diversity combining

0 引言

目前无线电通信干扰手段日趋成熟,许多宽带宽、小尺寸无线电干扰系统被研发出来,它们可在宽频带范围内有效干扰无线电通信,当无线电通信受到干扰或处于被监听状态时,武装队伍之间将无法及时进行命令和情报的秘密传递而陷入被动^[1-3]。在此背景下,一些不占用无线电信道、不受电磁干扰影响的声通信方法被提出,Hanspach 等^[4]使用超声作为载体通过跳频调制实现了 2 台电脑之间速度为 20 bit/s 的隐蔽声波通信,极限通信距离为 19.7 m。刘文洁等^[5]基于幅度键控(amplitude shift keying, ASK)利用超声波实现了秘密通信。陈桂英等^[6]基于相移键控(phase shift keying, PSK)实现了计算机之间的隐蔽通信,通信距离为 8.5 m 时误码率为 0.16%。上述隐蔽通信方法由于通信波形人工特征明显而在伪装性方面存在不足,并且由于超声波在空气中的能量衰减而通信距离较短。仿生伪装隐蔽通信方法(camouflage covert communication method, CCCM)^[7]基于低截获概率原理^[8],通过模拟环境背景信号特征实现隐蔽信息传输,已在水下环境中得到应用。Jiang 等^[9]于 2020 年首次将其引入大气环境中提出了仿蟋蟀叫声的隐蔽通信方法,该方法利用相邻蟋蟀叫声脉冲的时间间隔编码通信信息,在 80 m 的极限通信距离下误码率为 1.5%,通信速率达到 46.9 bps。同一团队^[10-11]还研究了仿绣眼鸟叫声的伪装隐蔽通信方法,可基于绣眼鸟叫声脉冲间的时间间隔实现编码,在通信距离不超过 60 m 时通信误码率低于 2%,通信速率达到 43 bps。

丛林环境下的声信道具有复杂的时变、空变特性、频率选择性和显著的多径效应,声音信号在丛林环境中传播时存在两大主要失真源:由风场、温度场引起的不规则振幅波动和由地面、树冠等障碍物的反射或空气声波阻抗的变化而引起的多径效应^[12-13]。传统大气环境下的仿生伪装隐蔽通信方法^[9-11]在采用时延差编码时,一般根据叫声脉冲信号短时能量较强的特点^[14],基于短时能量谱等特征实现脉冲端点检测以确定相邻叫声脉冲之间的时延差,但由于丛林环境下多径衰落等因素导致的码间干扰(inter-symbol interference, ISI),上述方法利用端点检测进行时延差解码时将产生误差,尤其在低信噪比情况下叫声脉冲段和静默段易发生混淆,导致误码率增加。此外,丛林环境下广泛存在除仿生对象以外的昆虫、兽类、鸟类等各种其他动物,若通信帧仅由单一仿生对象的叫声构成,通信信号与周围环境的匹配度不足。以上两点导致现有仿生伪装隐蔽通信方法在通信有效性和隐蔽性上相互制约。为此,联合多种仿生对象,将相关定时算法用于丛林环境下仿生伪装隐蔽通信,在接收端通过匹

配滤波获得相关增益,结合多阵元虚拟时间反转镜(virtual time reversal mirror, VTRM)技术和混沌序列,提出了一种新型仿丛林中动物叫声的伪装隐蔽声通信方法。

1 仿生对象叫声特性统计分析

蟋蟀和绣眼鸟广泛分布于中国和世界各地的丛林等环境下^[15-19],通过谱减法去噪、基于短时能量谱的脉冲端点检测等方法从一系列高质量蟋蟀叫声和绣眼鸟叫声中摘取出共 269 个蟋蟀叫声脉冲和 634 个绣眼鸟叫声脉冲,并对各个叫声脉冲的时频特征进行了统计分析,如图 1 所示。

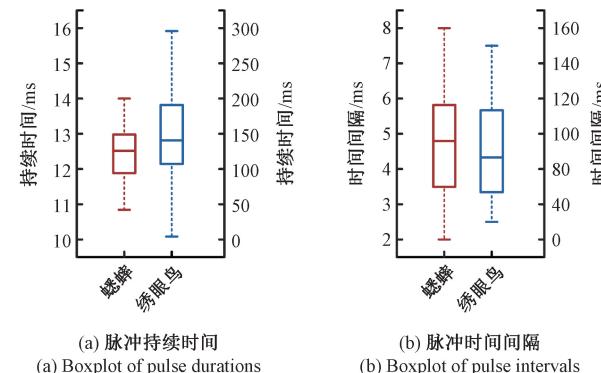


图 1 蟋蟀和绣眼鸟叫声脉冲持续时间和脉冲时间间隔的统计特性
(a) Boxplot of pulse durations (b) Boxplot of pulse intervals

Fig. 1 Statistical characteristics of pulse duration and pulse interval of calls from crickets and white-eyes

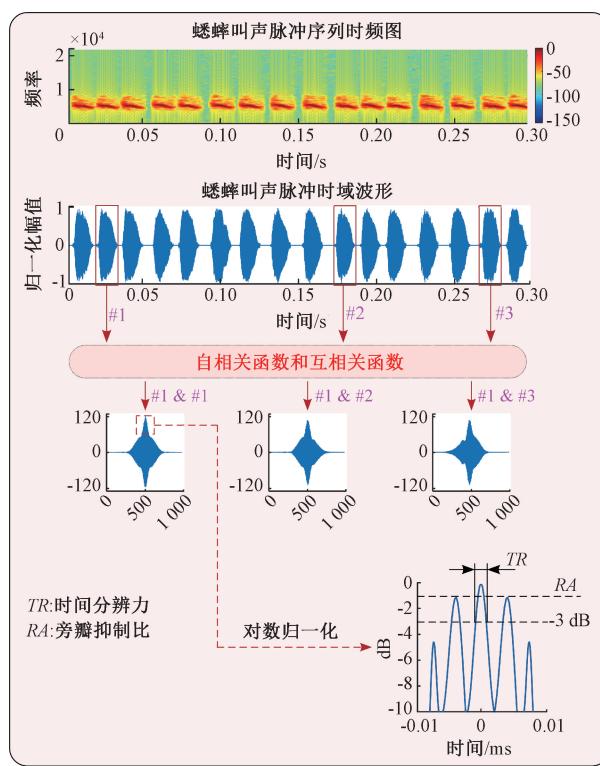
蟋蟀叫声脉冲的能量主要集中在 4~6 kHz 的频率区间,脉冲宽度集中分布在 12~14 ms,分布标准差为 0.39 ms,相邻蟋蟀叫声脉冲之间的时间间隔主要分布在 2~8 ms 并呈随机分布,标准差为 1.21 ms。绣眼鸟同为丛林环境中的典型动物且与蟋蟀存在食物链关系,二者经常同时出现在同一场景中,绣眼鸟叫声脉冲的能量主要集中在 3~7 kHz 的频率区间,脉冲宽度分布在 20~300 ms,分布标准差为 56.56 ms,叫声脉冲时间间隔分布在 20~150 ms 之间且不存在显著规律,分布标准差为 36.53 ms。

拷贝相关算法广泛应用于信号检测与识别领域,可对时延差进行检测,信号 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 对数形式的归一化互相关函数^[20]定义为:

$$RD_{s_1, s_2}(\tau) = 20 \lg \left(\frac{|R_{s_1, s_2}(\tau)|}{R_{s_1, s_2, \max}} \right) \quad (1)$$

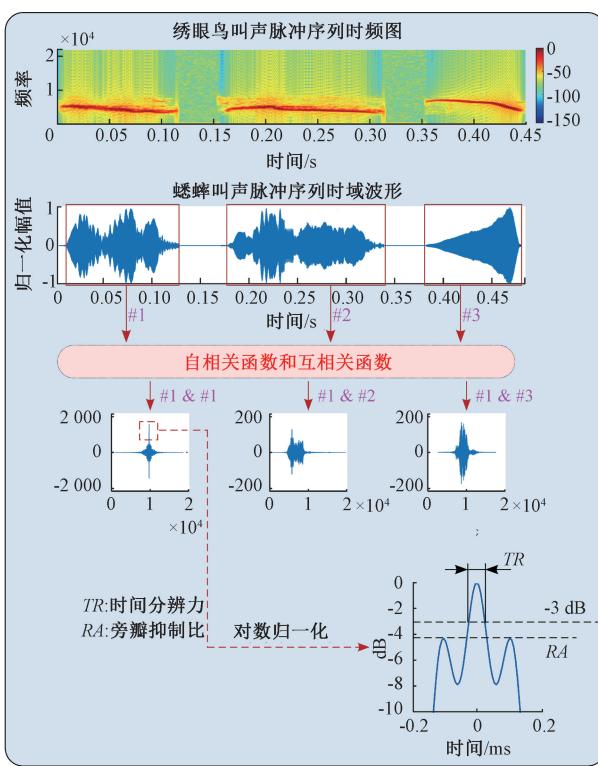
其中, $R_{s_1, s_2}(\tau)$ 为 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 的互相关函数, τ 为时延, $R_{s_1, s_2}(\tau) = s_1(t) \otimes s_2(-t)$, \otimes 为卷积, $R_{s_1, s_2, \max}$ 为 $R_{s_1, s_2}(\tau)$ 的最大值 $s_1(t)$, 若 $s_1(t) = s_2(t)$, 则 RD_{s_1, s_2} 为信号 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 对数形式的归一化自相关函数。蟋蟀和绣眼鸟叫声脉冲的时频谱、时域波形和自相关、互相关函数

波形如图 2 所示,2 种动物由于发声机理而在叫声脉冲的时频特性、音节丰富程度等方面存在较大差别,图 2 中



(a) 蟋蟀叫声信号分析的不同表征方式
(a) Different representations for cricket chirp signal analysis

TR 定义为自相关波形的时间分辨力, RA 为自相关波形的旁瓣抑制比。



(b) 绣眼鸟叫声信号分析的不同表征方式
(b) Different representations for white-eye chirp signal analysis

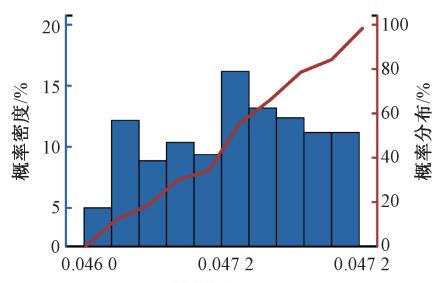
Fig. 2 Time-frequency spectrograms, time-domain waveforms, and autocorrelation and cross-correlation function waveforms of the pulse calls of crickets and white-eyes

定义为自相关波形主瓣的 -3 dB 宽度, TR 数值越小则自相关波形的时间分辨能力越强, RA 定义为波形最高副瓣峰值与波形主瓣峰值之比^[21-22], 如式(2)所示。

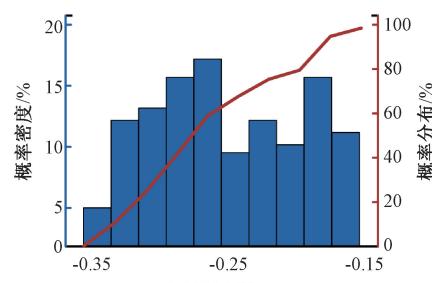
$$RA = 20 \lg \left(\frac{RD_{\max,p}}{RD_{\max}} \right) \quad (2)$$

其中, $RD_{\max,p}$ 为对数归一化自相关波形旁瓣最大值, RD_{\max} 为归一化对数自相关波形的峰值。自相关函

数波形的旁瓣会影响自相关波形主峰位置的检测从而导致定位偏差, RA 越小, 表明该自相关波形的旁瓣对主瓣位置检测的干扰越小, 使用拷贝相关进行定时的精度越高。利用 TR 和 RA 作为判断仿生对象叫声脉冲自相关性能的依据对上述提取到的 269 个蟋蟀叫声脉冲和 634 个绣眼鸟叫声脉冲展开了统计分析, 如图 3、4 所示。



(a) 时间分辨率概率密度直方图和概率分布曲线
(a) Time resolution probability density histogram and probability distribution curve



(b) 旁瓣抑制比概率密度直方图和概率分布曲线
(b) Sidelobe suppression ratio probability density histogram and probability distribution curve

Fig. 3 Statistical characteristics of time resolution and sidelobe suppression ratio in cricket chirp pulse autocorrelation waveform

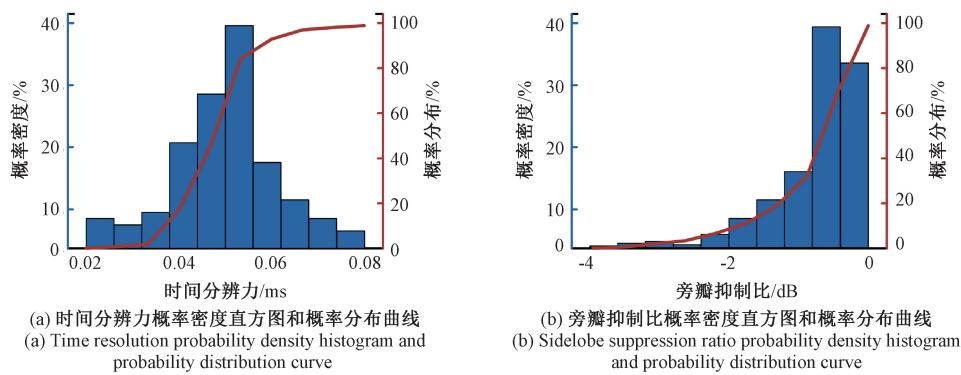


图4 绣眼鸟叫声脉冲自相关波形时间分辨力和旁瓣抑制比统计特性

Fig. 4 Statistical characteristics of time resolution and sidelobe suppression ratio in white-eye call pulse autocorrelation waveform

根据上述统计结果,各个蟋蟀叫声脉冲和绣眼鸟叫声脉冲经过接收端匹配滤波器输出后的自相关波形具有足够窄的主瓣,能够分辨出的最短时间间隔达到0.8 ms,由于蟋蟀叫声脉冲和绣眼鸟叫声脉冲间的时间间隔分布在2~8 ms,因此采用相关定时的方法可以对此区间内的时间间隔实现精确区分。然而蟋蟀叫声脉冲自相关波形的旁瓣抑制比均较高,几乎所有蟋蟀叫声脉冲自相关函数波形的旁瓣抑制比均高于-0.4 dB且蟋蟀叫声脉冲带宽较窄,较高的旁瓣将会降低多径结构检测和时间同步的准确性,影响时间反转镜的聚焦性能,因而其作为信道探测码和通信同步码的性能不足。为保证同步和信道估计的效果,要求同步码自相关函数波形的自相关性好、旁瓣抑制比低,为提高通信速率,要求信息码的码元宽度较短。因此利用蟋蟀叫声脉冲作为信息码构建信息码元库并实现时延差编码,利用绣眼鸟叫声脉冲作为同步码实

现各个帧的同步和时变多径声信道的快速隐蔽估计。为了保证在解码时各个同步码之间不会发生误判,根据旁瓣抑制比和脉冲相关性对提取到的绣眼鸟叫声脉冲进行进一步筛选,基于贪心算法筛选出256个旁瓣抑制比低、自相关性优良、互相关性差的绣眼鸟叫声脉冲完成了同步码元库的构建。

2 通信编解码方法设计

本研究设计了一种基于帧结构的伪装隐蔽通信编码方法,一个通信帧由一个同步码和若干个信息码构成,将通信信息嵌入至相邻信息码间的时间间隔上,所有码元均为真实动物叫声脉冲,设计了如图5所示仿蟋蟀和绣眼鸟叫声的伪装隐蔽通信系统,图5中 $a(t)$ 为待发送的通信信号, $a'(t)$ 为接收端解码的信号。

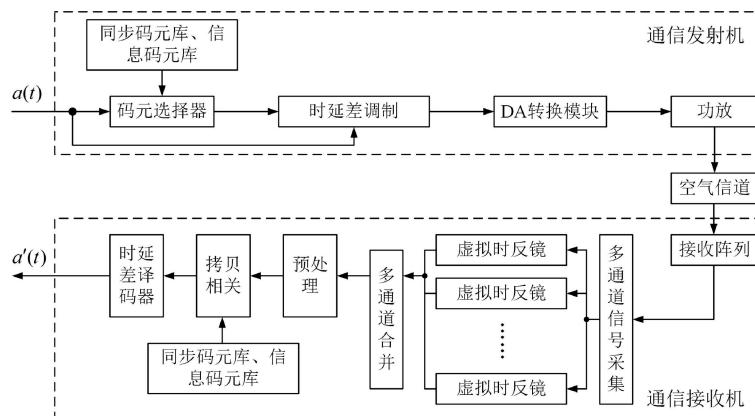


图5 仿生伪装隐蔽通信系统结构

Fig. 5 Structure of the bionic camouflage covert communication system

2.1 通信编码方法设计

1) 差分时延差编码

差分时延差编码对传统时延差编码方法进行了改

进,每个码元不需要有固定的宽度,时间基准由每一帧的同步码决定,可有效减小由于时间漂移产生累积误差^[23]。分别取最小时延差和最大时延差为 TI_{\min} 和 TI_{\max} ,

若每个码元携带 n bit 通信信息, 则当第 i 个时延差 τ_i 满足式(3)时, τ_i 表示的通信信息为在数值上与 m 相等的 n 位二进制数, ΔT 表示编码量化间隔且 $\Delta T = (TI_{\max} - TI_{\min})/2^n$, ΔT 和 τ_i 均符合仿生对象真实叫声脉冲序列的统计规律。

$$m\Delta T + TI_{\min} < \tau_i \leq (m+1)\Delta T + TI_{\min} \quad (3)$$

随着每个时延差编码的比特数增加, 编码量化间隔 ΔT 减小, 通信速率增加但通信可靠性降低, 因此对每个时延差编码不同比特数时的通信性能进行了仿真, 选取合适的编码参数以实现通信速率和通信可靠性间的权衡, 如图 6 所示。当每个时延差分别编码 1、2、3 bit 通信信息时, 通信速率分别达到 27.45、55.83、82.76 bit/s, 当每个时延差编码 2 bit 时, 误码率和通信速率均有所保障, 因此选取每个时延差编码的比特数为 2。

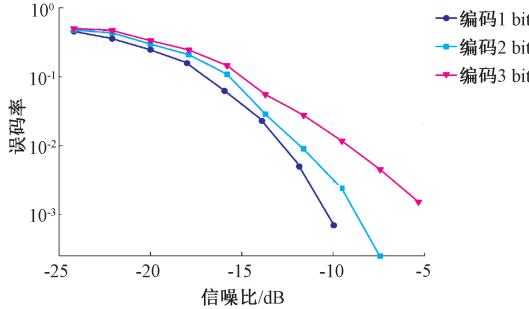


图 6 时延差编码不同比特数时误码率随信噪比变化曲线

Fig. 6 Bit error rate versus signal-to-noise ratio curves for different bit numbers in time delay difference encoding

根据对蟋蟀叫声脉冲时间间隔的统计结果, 分布在 2~8 ms 范围内的时延差与其他范围内的时延差的比例约为 7:1, 为保证通信脉冲序列中的时延差 τ_i 及相邻通信帧间时间间隔 τ_f 的分布比例与仿生对象真实叫声脉冲序列的一致性, 在编码通信帧时令 $TI_{\min} = 2$ ms、 $TI_{\max} = 8$ ms, 并随机选取每个通信帧中的信息码数目为 6~9 个, 将相邻通信帧间的时间间隔 τ_f 随机设置在 8~50 ms 范围内, 保证通信脉冲序列符合真实蟋蟀和绣眼鸟叫声脉冲序列的统计规律。

2) 帧长混沌随机跳变方法设计

为使各个通信帧中的叫声脉冲数目随机变化, 提出了一种基于混沌序列的帧长跳变方法, 混沌序列可以根据需求选取以提高通信信号的随机性和不可预测性, 增强抗干扰能力。以 Logistic 混沌映射为例, 作为一种经典且使用广泛的混沌序列发生器, 其映射表达式为:

$$x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k), 0 < x_k < 1 \quad (4)$$

其中, μ 为分支参数。当 μ 处于 $\mu_0: 3.569\ 946$ 和 $\mu_1: 4$ 之间时, 系统处于混沌状态。基于同步码编号

Num_{sc} 的通信帧长变化方式为: 基于同步码元编号 Num_{sc} 通过式(5)确定混沌序列的分支参数 μ 以及混沌序列初始值 x_0 , 得到混沌序列, 令该混沌序列迭代 N_{warm} 步进入典型混沌状态后得到 x_N , $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整, $Num_{sc} \in [1, 256]$ 。

$$f(x): \begin{cases} \mu = \lceil (\mu_1 - \mu_0) Num_{sc} + 256\mu_0 - \mu_1 \rceil / 255 \\ x_0 = \lceil Num_{sc} / 256 \times 269 \rceil \end{cases} \quad (5)$$

通过式(6)确定通信帧中信息码 IC 的数量 N , N_{\max} 和 N_{\min} 根据上文对真实蟋蟀和绣眼鸟叫声脉冲时间间隔分布统计得到, $N_{\max} = 9$, $N_{\min} = 6$ 。继续对混沌序列进行迭代 N 次得到 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 并通过式(7)的映射规则确定通信帧中 N 个信息码各自在信息码元库中的编号 Num_{ICi} ($1 \leq i \leq N$), $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整, $Num_{sc} \in [1, 256]$, 该过程如图 7 所示。

$$g(x): N = \lceil x_N (N_{\max} - N_{\min}) \rceil + N_{\min} \quad (6)$$

$$h(x): Num_{ICi} = \lceil x_i \times 269 \rceil \quad (7)$$

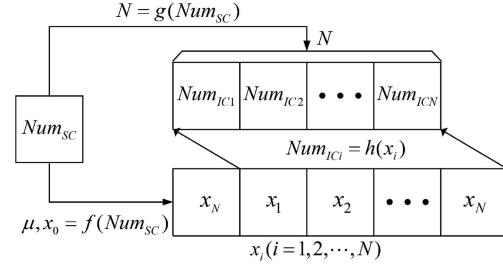


图 7 帧长混沌跳变规则

Fig. 7 Chaotic hopping rule of frame length

伪装保密隐蔽通信编码过程为:

(1) 根据每个时延差编码的 bit 位数对通信信息进行分组。例如, 假设通信信息为“01101100……”, 则将待编码的通信信息分组为 G1: “01”、G2: “10”、G3: “11”、G4: “00”……。

(2) 根据 $\tau = (m + 1/2)\Delta T$ 确定各组通信信息对应的时延值, m 为与各组信息对应的十进制数。例如对应上一步各组信息的 m 分别为: $m1 = 1, m2 = 2, m3 = 3, m4 = 0, \dots$ 。

(3) 从同步码元库中随机选取一个同步码作为当前通信帧的帧头, 加入一定保护时隙 τ_p 用于信道估计, 经过 G1 对应的时间 τ_1 后, 根据混沌映射规则 $f(x)$ 、 $g(x)$ 、 $h(x)$ 确认当前帧中的信息码数量以及各个信息码元在信息码元库中的编号, 依次按照顺序插入相应信息码和时延差, 至此完成一帧通信信号的编码。

(4) 经过时间 τ_f 后随机插入一个新的同步码作为下一帧的帧头, 重复上述步骤直至所有通信信息完成编码, 最终得到通信脉冲序列并通过声源向外发送。

2.2 通信解码方法设计

1) 同步码检测

通过上文同步码的相关性筛选,同步码元库中的各个同步码彼此互相关性较低,且绣眼鸟叫声脉冲具有优良的自相关性能,因此利用拷贝相关模块,可依次对各个同步码位置进行检测。图 8(a)所示为一段包含 3 个通信帧的伪装隐蔽通信信号 $S(t)$,通过分别与 SC1、SC2 进行拷贝相关可得到如图 8(b)、(c)所示的相关结果,根据相关峰出现时刻确定各个同步码在通信脉冲序列中的时间位置,作为时间基准完成通信帧的分割和不同接收阵元之间接收信号的同步。

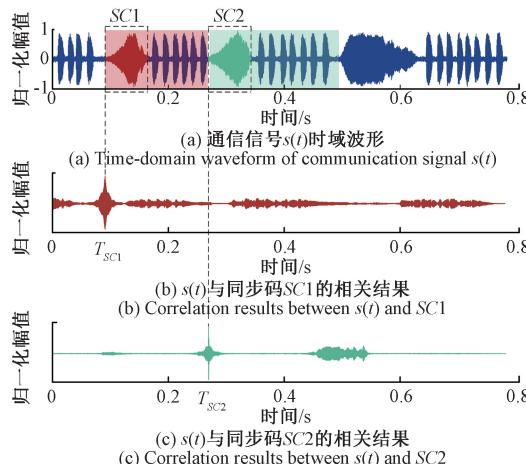


图 8 基于相关的同步码检测

Fig. 8 Synchronization code detection based on correlation

2) 隐蔽信道均衡

由于丛林环境下的声信道具有复杂的时变空变特性、频率选择性和多径效应,信道参数的快速精确估计是实现信道均衡、提升通信性能的关键,在仿生伪装隐蔽通信中,基于同步码的快速隐蔽信道估计过程与通信过程交替进行,同时采用了虚拟时间反转镜技术与空间分集合并(spatial diversity combining, SDC)技术^[24-26]对由多径效应产生的码间干扰进行抑制,如图 9 所示, H_s 和 H_r 分别为通信发送端和通信接收端距离地面的高度, N 为接收阵元个数, d 为接收阵元之间的距离。

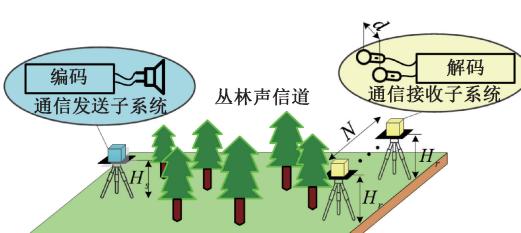


图 9 VTRM+SDC 信道均衡示意图

Fig. 9 VTRM+SDC channel equalization schematic

分集合并技术利用多条路径传输同一信息,接收端对经过多个信道传输的信号进行合并,通常认为当两个接收阵元之间的距离 d 大于信号波长的一半时信号互不相干。多阵元虚拟时间反转技术原理如式(8)所示, $S_n(t)$ 为信道 i 接收到的通信信号,通信帧的帧头 $P(t)$ 作为信道探测码使用,接收端通道 i 接收到的探测信号为 $P_n(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$), N 为阵元数目,根据 $P_n(t)$ 结合正交匹配追踪算法(orthogonal matching pursuit, OMP)^[27]重构出第 i 个信道的冲激响应 $h_i'(t)$ 。将接收到的通信信号 $S_n(t)$ 与 $h_i'(-t)$ 进行卷积得到各个通道恢复信号 $r_i(t)$ 后,采用等增益合并得到均衡后的信号 $r(t)$, * 表示卷积,即:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i(t) = P(t) * h_i(t) \\ r_i(t) = S_n(t) * h_i'(-t) = \\ S(t) * h_i(t) * h_i'(-t) = S(t) * \hat{h}_i(t) \\ r(t) = \sum_{i=1}^N r_i(t) \end{array} \right. \quad (8)$$

由于 N 个接收阵元处各自接收到的通信信号互不相干,各个信道的主径信号彼此叠加获得 N 倍增益,而其余多径信号由于各个信道的不相干而无法产生叠加,有效抑制了多径效应,并且接收阵元数目越多抑制效果越好。在通信时每帧均利用同步码进行一次信道均衡,可有效避免随观测时间增加时反信道与真实信道匹配性逐渐变差。设置接收阵元数目 $N=4$,在多径信道下对 VTRM 和 SDC 信道均衡效果进行了仿真,原始通信信号、单通道 VTRM 处理后的信号和 4 通道 SDC 后通信误码率随信噪比变化曲线结果如图 10 所示,经过虚拟时间反转和 4 通道分集合并后误码率均有不同程度的下降。

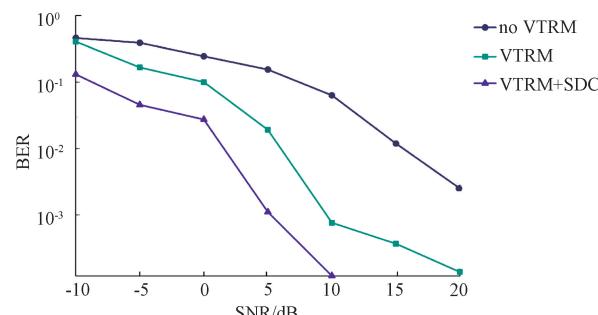


图 10 均衡前、VTRM 后和 VTRM+SDC 后通信误码率随信噪比变化曲线

Fig. 10 Error rate versus signal-to-noise ratio curves before equalization, after VTRM, and after VTRM+SDC

3) 基于相关定时的时延差解码

在上述同步码检测和信道均衡的基础上,基于映射规则 $f(x)$ 、 $g(x)$ 、 $h(x)$ 可根据同步码 SC 的编号确定各个通信帧中的信息码数量以及编号 Num_{jci} , 基于拷贝相关

算法^[28]依次检测信息码携带的时延差信息。

如图 11 所示, τ_z 为用于信道估计的保护时隙, τ_f 为通信帧之间的时间间隔, τ_{SC_k} 和 τ_{IC_i} 为第 k 个同步码和第 i 个信息码的时间长度, T_i 和 T_{i_end} 为第 i 个通信码元的起始和结束位置。第 i 个信息码相关峰位置与前一信息码相关峰位置的时间差值, 再减去前一信息码的持续时间 $t_{IC_{i-1}}$, 可得第 i 个信息码所携带的时延差信息 τ_i 。再根据每个时延差编码的比特位数, 依次确定各个时延差编码的通信信息, 完成解码。

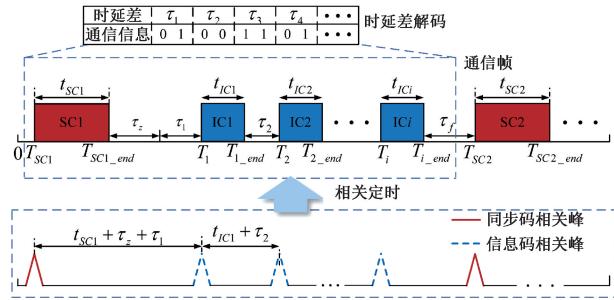


图 11 基于拷贝相关的时延差信息提取

Fig. 11 Extraction of delay difference information based on copy correlation

3 实验验证

3.1 丛林环境试验

为测试本改进型仿生伪装保密隐蔽声通信方法的有效性(通信速率、误码率)和隐蔽性, 在天津市北辰区一处野外丛林中进行了验证实验。实验条件为: 天气情况为晴朗, 西南风两级, 空气湿度为 50%, 温度为 30°C, 丛林中植被茂密程度为中等, 树木类型为落叶林, 树干直径为中等, 分布稀疏且规则, 如图 12 所示。

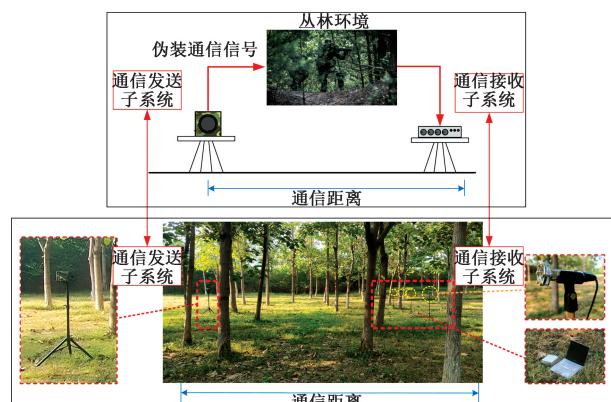


图 12 实验系统及实验现场

Fig. 12 Experimental system and environment

实验中采用 75 芯铷磁高音喇叭作为通信发送子系统的声源, 其频率范围为 0.7~18 kHz, 采用录音设备 Avisoft-UltraSound Gate 作为接收机, 其频率响应范围为 2~370 kHz, 满足伪装隐蔽通信系统发射和接收信号的需求。实验时设置每个时延差编码的比特位数 n 为 2, 每个通信帧长在 6~9 混沌跳变, 最小编码时延差为 2 ms, 最大编码时延差为 8 ms, 设置通信发送子系统高度为 2 m, 通信接收子系统的高度为 1.5 m, 利用 4 个麦克风阵元接收并记录 4 个通道的通信信息, 为使各个阵元接收到的通信信号互不相干, 设置各个接收阵元之间的距离 d 为 1 m, 最后在上位机中进行通信信号的预处理和解码。

以误码率和通信速率来验证仿生伪装隐蔽通信方法的可行性, 改变通信发送子系统与通信接收子系统的相对位置, 以 10 m 为步长使通信距离在 10~90 m 变化, 得到在不同通信距离下的通信误码率, 同时根据通信信号的时间长度和包含的数据量计算通信速率。实验中每个通信距离下随机发送 1×10^4 bit 数据平均用时 184.5 s, 通信速率为 54.2 bit/s, 采用文献[9]所提方法在传输相同数据量下平均用时 213.2 s, 通信速率为 46.9 bit/s。

实验中根据 OMP 算法估计得到不同距离下丛林声信道的多途结构如图 13 所示, 丛林环境下的声信道结构主要由早期反射、直接路径、后期多径叠加构成, 随通信距离增加, 接收端信噪比降低, 风场分布、温度场分布等不稳定因素的影响也将增加, 树木阻碍和丛林中复杂的微地形将造成更多散射和反射表面, 引起更加复杂的地形损失和多径现象, 影响通信性能, 严重时甚至导致通信暂时中断。

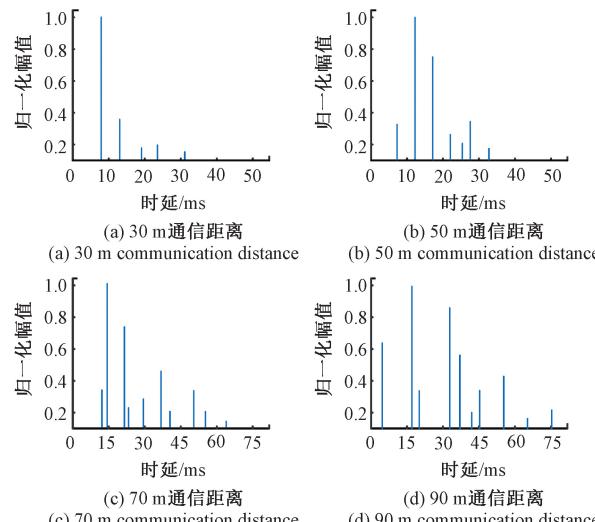


图 13 不同通信距离下丛林信道的多途结构

Fig. 13 Multi-path structure of jungle channels at different communication distances

为此引入了多阵元虚拟时间反转镜子技术,基于各个通信帧中的同步码,接收端可自动识别多径环境下的最优主径即相关峰值最高的路径并以此作为时域反转处理的参考,实现时域脉冲压缩与空间聚焦,显著提升接收端信噪比与抗干扰能力,如图 14 所示。

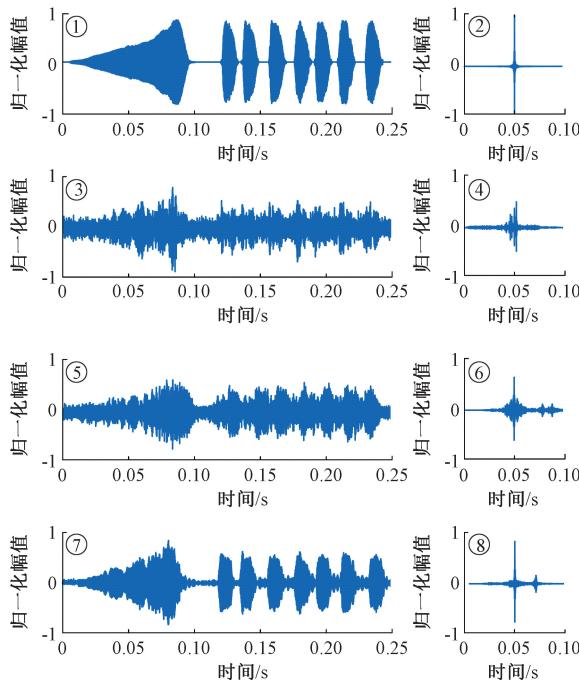


图 14 发送信号与接收信号均衡前后同步码拷贝相关输出

Fig. 14 Output of synchronous code copy correlation for transmitted and received signals, before and after equalization

图 14 中①、③、⑤、⑦为 70 m 通信距离下发送信号和均衡前后的接收端信号波形以及拷贝相关输出的波形;图 14 中②、④、⑥、⑧为对应的同步码元拷贝相关输出结果;图 14 中①、②为原始发送信号波形及同步码的拷贝相关输出;图 14 中③、④为阵元 1 接收信号波形及同步码的拷贝相关输出;图 14 中⑤、⑥为阵元 1 进行 VTRM 后的信号波形及同步码的拷贝相关输出;图 14 中⑦、⑧为 4 阵元进行 VTRM+SDC 后信号波形及同步码的拷贝相关输出。通信信号在经过丛林信道后发生了多径衰落,拷贝相关将会输出一系列峰值导致时间定位误差,经过 VTRM 和 SDC 后的拷贝相关结果具有更加尖锐的峰值,提升了时间位置检测的准确性。所提方法与文献[9]所提方法在不同距离下的误码率如图 15 所示,本方法具有更低的误码率,相比于基于脉冲端点检测的时延差检测方法,采用相关定时的方法在通信接收端获得了相关增益且采用了多阵元虚拟时间反转信道均衡技术对多径效应实现了抑制,在通信速率和通信可靠性方面均实现了不同程度的提升。

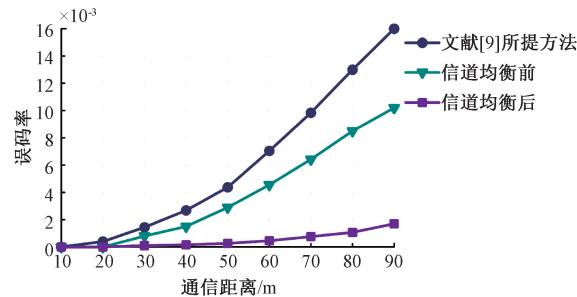


图 15 不同通信距离下的误码率

Fig. 15 Error rate at different communication distances

本次野外测试在常规气象条件下完成,实验条件为我国亚热带季风气候丛林环境的典型代表,为时延测试提供了典型的环境。对于大风、浓雾、雨雪等非常规或极端天气,通信性能将受到两类衰落的共同影响:一是由路径损耗、介质吸收与地形遮挡等宏观因素引起的慢衰落(大尺度衰落),信号平均功率随距离递减程度加速;二是由多径反射、散射引发的快衰落(小尺度衰落),接收功率在短时或短距范围内波动更加剧烈。丛林环境实验表明,接收端信噪比>7.86 dB 时误码率<1.7×10⁻³,可以实现有效通信;图 6 所示仿真实验表明当信噪比<-13 dB 时,通信误码率>1×10⁻²,无法保证可靠通信。

3.2 隐蔽性测试

目前,在声学通信领域的波形识别系统中一般通过随机森林、支持向量机、神经网络等机器学习手段对 LFM、CW、ASK、FSK、PSK 等典型通信信号进行检测和识别^[29-32]。采用基于预训练 GoogLeNet 模型和迁移学习^[33]的通信信号识别方法检测通信信号是否会被识别为典型人工通信信号,从而验证仿生伪装隐蔽通信方法的伪装性能。利用小波变换将通信信号时间序列转变为能同时表征时间域和频率域特征的时频图作为输入对网络参数进行微调并将其用于通信信号的模式识别任务,构建了通信信号检测系统。如果模型将通信信号分类为绣眼鸟叫声或蟋蟀叫声,则实现了隐蔽性;相反,若通信信号被分类为典型的通信信号,例如 LFM、CW、ASK、FSK、PSK 等,则会引起敌方怀疑,使通信信号暴露在敌人面前。因此,设计了频率在 20 Hz~20 kHz 随机分布、持续时间在 10~200 ms 随机分布的 LFM、CW、ASK、FSK 和 PSK 信号脉冲各 400 个,将上述典型通信波形和 300 个蟋蟀叫声脉冲、600 个绣眼鸟叫声脉冲用于训练网络。将另外一组典型通信波形各 400 个以及发送的仿生伪装隐蔽通信脉冲序列在相同环境下传播,并用相同的设备接收信号,将其时频图输入到训练后模型中进行测试,结果如图 16 所示,表明所训练的模型能够有效地对典型通信脉冲进行分类。提取出通信脉冲序列中的 200 个同步码和 400 个信息码输入到模型中进行识别,几乎所

有的信息码元和同步码元均被识别为蟋蟀叫声和绣眼鸟叫声,结果表明所设计的伪装隐蔽通信信号具有优良的隐蔽性能,即使敌方检测到了通信信号也会将其判定为环境中天然存在的声音而无法察觉其中包含的通信信息。

	LFM	CW	ASK	FSK	PSK	绣眼鸟叫声	蟋蟀叫声
LFM	96.75	2.50	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00
CW	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ASK	1.25	1.75	97.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FSK	0.00	2.50	0.00	97.50	0.00	0.00	0.00
PSK	0.00	1.00	0.00	0.00	99.00	0.00	0.00
同步码	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.50	0.50
信息码	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

图 16 通信信号识别结果

Fig. 16 Communication signal recognition results

4 结 论

本研究提出了一种基于相关定时与混沌编码的仿动物叫声伪装保密隐蔽通信方法,可在常规无线电通信受阻时进行丛林环境下的隐蔽声通信,该方法将通信信息调制在动物叫声脉冲序列中,通过差分时延差和相关定时原理实现编解码,基于混沌序列实现了通信信息的进一步加密,同时结合虚拟时间反转镜技术和空间分集合并技术对多径效应进行了抑制。本方法中的通信信号完全由原始蟋蟀叫声和绣眼鸟叫声构成,相比于传统的丛林环境下的伪装隐蔽通信方法,可实现更高的通信速率和更低的误码率。丛林实验表明,通信距离为 90 m 时误码率为 1.7×10^{-3} ,平均通信速率达到 54.2 bps。在伪装性方面,基于卷积神经网络的信号分类测试表明,所设计的伪装隐蔽通信信号具有优良的伪装隐蔽性能。该方法在应用中尚存在环境依赖性和信噪比条件的限制:仅在通信信号与通信环境背景相匹配时方可隐蔽触发,才能保证通信信号掩藏于丛林背景中而不被敌方察觉。本方法可基于季节、昼夜与地域差异灵活调整仿生对象,结合时间信息和地域信息建立相应的通信脉冲库,解决由于仿生对象叫声时空差异而造成通信信号与环境匹配度下

降的问题,进一步增加通信方法的适用性和隐蔽性。针对动物休眠期或不活跃期,设定“低活性窗口”暂停相关码元调用,并启用替代物种以避免通信中断,提升在不同场景下的广域适用性与鲁棒性;本方法中的仿生对象不局限于前文所述蟋蟀和绣眼鸟,还可以进一步基于其他兽类、鸟类和昆虫叫声构建通信码元库,提升伪装通信的效率和隐蔽性。

参考文献

- [1] ERPEK T, SAGDUYU Y E, SHI Y. Deep learning for launching and mitigating wireless jamming attacks [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2019, 5(1): 2-14.
- [2] 陈凤, 李聪, 朱立东, 等. 卫星通信干扰信号识别技术研究现状及展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(3): 227-239.
- [3] CHEN F, LI C, ZHU L D, et al. Overview of satellite communication interference signal recognition technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(3): 227-239.
- [4] KADHIM A N, SADKHAN S B. Security threats in wireless network communication-status, challenges, and future trends [C]. 2021 International Conference on Advanced Computer Applications, 2021: 176-181.
- [5] HANSPACH M, GOETZ M. On covert acoustical mesh networks in air[J]. Journal of Communications, 2013, 8(11): 758-767.
- [6] 刘文洁, 文红, 陈松林, 等. 基于声波的潜信道隐蔽安全通信方法[J]. 通信技术, 2019, 52(2): 418-422.
- [7] LIU W J, WEN H, CHEN S L, et al. Stealth secure communication method in subliminal channel based on acoustic wave [J]. Communication Technology, 2019, 52(2): 418-422.
- [8] 陈桂英, 张国军, 刘梦然, 等. 短距离声通信研究及实现[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(29): 8631-8634.
- [9] CHEN G Y, ZHANG G J, LIU M R, et al. Short range acoustic communication research and implementation[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(29): 8631-8634.
- [10] QIAO F, JIANG J J, LI Y, et al. Recognition method for bionic camouflage cetacean whistle communication trains modulated by abrupt LFM signal[J]. Journal of Measurement Science & Instrumentation, 2023, 14(1): 2023004.
- [11] POLYDOROS A, WOO K. LPI detection of frequency-hopping signals using autocorrelation techniques [J].

- IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1985, 3(5): 714-726.
- [9] JIANG J J, XU J Y, DUAN F J, et al. Camouflage covert communication in air by imitating cricket's sound[J]. IEEE Access, 2020, 8: 71840-71850.
- [10] 蒋佳佳,陆茵,徐俊宇,等.一种基于仿鸟叫声的隐藏通信方法(英文)[J].Journal of Measurement Science and Instrumentation,2023, 14(4): 387-397.
- JIANG J J, LU Y, XU J Y, et al. A covert communication method based on imitating bird calls[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2023, 14(4): 387-397.
- [11] JIANG J J, LU Y, XU J Y, et al. Bio-inspired camouflage communication in air imitating birds songs [J]. Applied Acoustics, 2023, 211: 109548.
- [12] YIP D A, BAYNE E M, SOLYMOS P, et al. Sound attenuation in forest and roadside environments: Implications for avian point-count surveys [J]. The Condor, 2017, 119(1): 73-84.
- [13] ATTENBOROUGH K, TAHERZADEH S. Sound propagation through forests and tree belts[J]. Acoustics 2016, 2016, 38(1): 114-125.
- [14] 邢毓华,顾力铭.脉冲噪声环境下混沌扩频时延估计算法研究[J].电子测量与仪器学报,2023, 37(3): 230-237.
- XING Y H, GU L M. Research on chaotic time delay estimation method in Alpha stable distributed noise environment[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 230-237.
- [15] 雷富民,邢晓莹,贾陈喜,等.中国鸟类鸣声[M].北京:科学出版社,2017: 133-134.
- LEI F M, XING X Y, JIA CH X, et al. Vocalization of chinese birds[M]. Beijing: Science Press, 2017: 133-134.
- [16] ZHAO X. Analysis on the fauna composition of the infraorder gryllidea in china (Orthoptera: Ensifera)[J]. International Journal of Ecology, 2022, 11: 240-263.
- [17] MAGARA H J O, NIASSY S, AYIEKO M A, et al. Edible crickets (Orthoptera) around the world: Distribution, nutritional value, and other benefits-a review[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 7: 537915.
- [18] HE ZH Q, WANG X Y, LIU Y Q, et al. Seasonal and geographical adaption of two field crickets in china (Orthoptera: Grylloidea: Gryllidae: Gryllinae: Teleogryllus)[J]. Zootaxa, 2017, 4338: 374-384.
- [19] BHANGER N, SULTANA R, BALOCH N, et al. Taxonomic insights and geographic distribution of gryllidae (Gryllinae; Orthoptera) in sindh pakistan[J]. Journal of Wildlife and Biodiversity, 2024, 8(2): 1-15.
- [20] 刘扬,张传营,赵景玉,等.多麦克风阵列数据融合声源定位方法研究[J].电子测量与仪器学报,2024, 38(7): 97-108.
- LIU Y, ZHANG CH Y, ZHAO J Y, et al. Research on sound source localization method using data fusion of multiple microphone arrays [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 (7): 97-108.
- [21] GUO Q, ZHENG ZH M, WANG B, et al. Femtosecond laser fabricated apodized fiber bragg gratings based on energy regulation[J]. Photonics, 2021, 8(4): 110.
- [22] LIANG L, SUN J, LI H L, et al. Research on side lobe suppression of time-modulated sparse linear array based on particle swarm optimization[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2019, 2019 (3): 7130106.
- [23] 吴永清,邬松,许枫. Pattern时延差编码水声定位的时延估计研究[J].声学技术,2014, 33 (3): 189-192.
- WU Y Q, WU S, XU F, et al. Research on time delay estimation in underwater positioning of Pattern time delay shift coding system [J]. Technical Acoustics. 2014, 33(3): 189-192.
- [24] 常俊杰,吴中权,徐洋.基于虚拟时间反转的空气耦合超声板材腐蚀缺陷概率损伤成像[J].电子测量技术,2022, 45(2): 148-153.
- CHANG J J, WU ZH Q, XU Y. Probabilistic damage imaging of plate corrosion defects by air-coupled ultrasound based on virtual time reversal[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(2): 148-153.
- [25] 张晓勇,罗来源.虚拟时间反转水声信号检测[J].声学学报,2016, 41(1): 67-72.
- ZHANG X Y, LUO L Y. Underwater acoustic signal detection using virtual time reversal processing[J]. Acta Acustica, 2016, 41(1): 67-72.
- [26] 刘稳,刘立帅,项延训,等.基于超声导波虚拟时间反转的多层异质金属粘接结构损伤定位[J].仪器仪表学报,2024, 45(6): 111-119.
- LIU W, LIU L SH, XIANG Y X, et al. Damage localization in multilayer heterogeneous metal bonded structures based on virtual time reversal of ultrasonic guided wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 111-119.
- [27] 李可,王翀,明雪飞,等.基于改进多路径匹配追踪的芯片超声信号去噪方法[J].仪器仪表学报,2023, 44(1): 93-100.
- LI K, WANG CH, MING X F, et al. Denoising method

- of chip ultrasonic detection signals based on the improved multipath matching pursuit [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 93-100.
- [28] JIANG J J, WANG X Q, DUAN F J, et al. Bio-inspired steganography for secure underwater acoustic communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(10): 156-162.
- [29] 陈双双, 顾师嘉, 李娜娜, 等. 基于残差时序卷积网络的水声通信信号模式识别[J]. 无线电工程, 2024, 54(2): 473-482.
- CHEN SH SH, GU SH J, LI N N, et al. Pattern recognition of underwater acoustic communication signals based on residual temporal convolutional network [J]. Radio Engineering, 2024, 54(2): 473-482.
- [30] PENG SH L, JIANG H Y, WANG H X, et al. Modulation classification based on signal constellation diagrams and deep learning [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 30(3): 718-727.
- [31] SHANTHAKUMAR S, SHAKILA S, SUNETH P, et al. Environmental sound classification using deep learning [J]. Instrumentation, 2020, 7(3): 15-22.
- [32] JIANG W H, TONG F, DONG Y Z, et al. Modulation recognition of non-cooperation underwater acoustic communication signals using principal component analysis [J]. Applied Acoustics, 2018, 138: 209-215.
- [33] 魏新园, 周京欢, 张楠, 等. 基于深度迁移学习的超声缺陷识别方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 45(12): 256-263.
- WEI X Y, ZHOU J H, ZHANG N, et al. Research on ultrasonic defect recognition method based on deep transfer learning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 45(12): 256-263.

作者简介



蒋佳佳(通信作者), 2009 年于河北师范大学获得学士学位, 2014 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院教授, 主要研究方向为水声探测、通信与信号处理、在线检测与信号处理技术。

E-mail: jiajiajiang@tju.edu.cn

Jiang Jiajia(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hebei Normal University in 2009, received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2014. Now he is a professor in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests

include underwater acoustic detection, communication and signal processing, online detection, and signal processing technology.



郭同同, 2022 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为仿生通信、信号处理。

E-mail: guotongtong@tju.edu.cn

Guo Tongtong received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2022. He is currently a M. Sc. candidate in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include bio-inspired communication and signal processing.



杨绪宝, 2022 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为水下全双工通信、信号处理。

E-mail: tanjinsong@tju.edu.cn

Yang Xubao received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2022. He is currently a M. Sc. candidate in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interest includes underwater full-duplex communication and signal processing.



李兆明, 2021 年于长春理工大学获得学士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生, 主要研究方向为仿生水声通信、水声探测、信号处理。

E-mail: zhaomingli@tju.edu.cn

Li Zhaoming received his B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2021. He is currently a Ph. D. candidate in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include bio-inspired underwater acoustic communication, underwater acoustic detection, and signal processing.



谭金松, 2021 年于西南石油大学获得硕士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生, 主要研究方向为仿生水声通信、信号处理。

E-mail: tanjinsong@tju.edu.cn

Tan Jinsong received his M. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2021. He is currently a Ph. D. candidate in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include bio-inspired underwater acoustic communication and signal processing.