

DOI: 10.13382/j.jemi.B2103971

舞台载波通信自适应跳频抗干扰仿真分析*

荆俊明 石建明 张秀蓉 王 艳
(甘肃工大舞台技术工程有限公司 兰州 730050)

摘 要:目前文艺演出发展受舞台机械、灯光、音响等各控制系统协同困难、信号干扰严重、可靠性差等因素制约难以出现突破性的进展,为构建稳定可靠高效的舞台设备通信系统进一步促进演艺技术的发展,在对舞台设备实际运行环境进行研究后,提出一种基于深度网络的舞台载波通信自适应跳频抗干扰技术。首先利用模型获取大量舞台电力线传输频道参数,然后利用深度神经网络训练自适应跳频抗干扰模型,该模型可以根据舞台电力线通信环境自适应选择通信频段。实验证明,该技术可以根据舞台通信电力线环境的干扰情况快速有效的选择稳定的通信频段,信噪比接近-18 dB 时,误码率相比传统方法缩小近 10 倍,在提高通信效率的同时进一步提高了舞台设备间通信的可靠性和稳定性。

关键词:载波通信;舞台技术;自适应模型;跳频抗干扰

中图分类号: TN98;TP29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Simulation and analysis of adaptive frequency hopping anti-jamming for stage carrier communication

Jing Junming Shi Jianming Zhang Xiurong Wang Yan
(Gansu University of Technology Stage Technology & Engineering CO., LTD., Lanzhou 730050, China)

Abstract: At present, the development of performances has evolved from factors such as auxiliary failures, severe signal interference, and poor signal interference in various control systems such as performing arts, stage machinery, sound, and equipment development. The development of stable and reliable stage equipment is developed for the evolution of performance and performance, and the actual operation of stage equipment After environmental research, an adaptive frequency hopping anti-jamming technology for stage carrier communication based on deep network is proposed. First, the model is used to obtain a large number of stage power line transmission channel parameters, and then a deep neural network is used to train an adaptive frequency hopping anti-jamming model, which can adaptively select the communication frequency band according to the stage power line communication environment. Experiments have proved that this technology can quickly and effectively select a stable communication frequency band according to the interference situation of the stage communication power line environment. When the signal-to-noise ratio is close to -18 dB, the bit error rate is reduced by nearly 10 times compared with the traditional method, which improves the communication efficiency while further improving the reliability and stability of communication between stage equipment.

Keywords: carrier communication; stage technique; adaptive model; frequency hopping anti-jamming

0 引 言

剧场舞台作为文艺展示的媒介和载体,在丰富人们艺术生活中具有重要的地位^[1]。近年来随着技术的更新,舞台功能逐渐复杂化,所需设备也不断增多,因此在

运行过程中就容易出现设备同步较差、控制较难等问题^[2],由于舞台设备种类复杂多样、控制方式灵活多变等特性,以及受舞台结构和应用环境等因素影响,设备间通信效率较难提高^[3],通过传感器接专用线通信方式在设备过多、监测参数复杂时会存在布线混乱、难以维护等问题^[4]。低压载波技术^[5]的应用为提高舞台通信效率带来

了新方案,但通信信道中的干扰和噪声一直是一个待解决的难题^[6],目前运用较广的抗干扰技术有直接序列扩频^[7]、线性调频 Chirp^[8]、正交频分复用 (OFDM)^[9]、跳频 (FH)^[10]、跳时 (TH)^[11] 及各种方式的组合技术^[12-14] 等。跳频在实际应用中较多。文献[10]提出一种优化的抗干扰的 MDFH 系统,可以通过干扰随机化和频率分集显著提高系统效率和抗干扰性。文献[14]提出一种结合信道估计技术的自适应速率数据传输模型,通过信道估计反馈的信噪比改变选择的 PN 码序列。文献[15]提出了一种基于分布式补偿的载波频偏估计算法,并通过实验证明该算法具有较好的估计性能和较低的复杂度以及良好的导频利用率。虽然跳频技术具有诸多优点^[16],但需在通信中需不断更新跳频序列来跳变通信频道,频点更新序列是影响通信性能的关键^[17],文献[18]提出了一种基于跳频的自适应多集合点控制信道方法,该方法可以基于信道中的主要用户活动来更改跳频序列,提高通信效率,虽然取得了一些效果,但通用性和稳定性较差,难以推广应用。

针对以上所述方法存在的不足,本文在现有研究的基础上,结合舞台载波通信信道特点,提出一种基于深度神经网络的舞台载波通信自适应跳频抗干扰技术,通过利用训练模型的方法来自适应的获取通信最优频点参数,避免了传统方法在频点选择时存在的问题,通过设计实验仿真模型验证,该技术在保证通信准确度的同时提高提高了通信的稳定性,进一步提高了舞台设备间的通信效率。

1 自适应跳频抗干扰技术原理介绍

跳频技术是常用的扩频方式,收发双方传输信号的载波频率受伪随机码的控制而随机跳变,是一种用码序列进行多频频键控的通信方式,工作原理如图 1 所示。与定频通信相比,具有良好的抗干扰能力,在部分频点被干扰时,仍能在其他频点上进行有效通信。但由于更新频点通过频点更新序列决定,且通信信道是实时变化的,单一码序列很难在通信中取得最佳的性能。

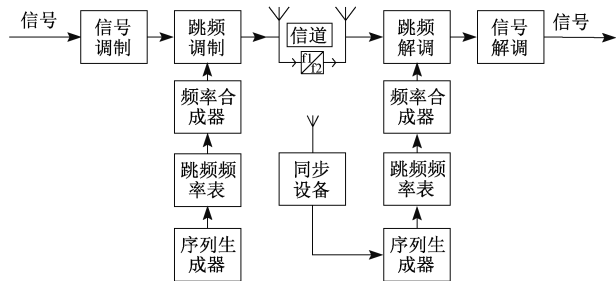


图 1 跳频技术原理

Fig. 1 Principle of frequency hopping technology

自适应跳频抗干扰技术通过采用深度神经网络训练自适应模型的方法,根据检测到的通信环境干扰情况自适应更新最优通信频点序列,来进一步节省通信时间和提高通信效率与稳定性。首先通过仿真获得大量模拟舞台实际工程环境的数据,不断对同一参数下的工程环境进行跳频通信仿真,将平均误码率作为目标函数,通过粒子群算法优化得到最优频点更新参数,求出所有模拟工程环境数据的最优频点更新参数,以模拟环境数据为样本,获取的最优频点参数为标签整理训练数据集,然后利用深度神经网络训练自适应频点更新模型,该模型可以根据实际工程采样自适应设定最优的频点更新参数,将训练好模型导出,用自适应模型确定频点更新参数的方法替代传统的根据误码率不断随机更新频点参数的方法进行通信。

舞台低压载波通信自适应跳频抗干扰技术实现原理如图 2 所示。

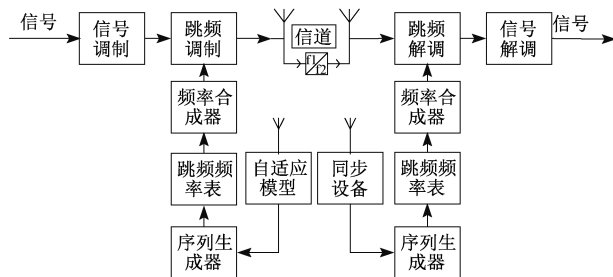


图 2 自适应跳频抗干扰技术原理

Fig. 2 Principle of adaptive frequency hopping anti-jamming technology

2 舞台自适应载波通信仿真模型

2.1 舞台载波通信系统与仿真模型

舞台控制系统主要由上位控制系统、可编程控制器、执行控制器、信息采集系统和被控设备等构成,舞台载波通信是信息采集的一个重要环节,其主要功能是将采集到的设备运行信息和各个编码器、位置开关、采集装置等的信号传递到执行控制器后由数据总线统一提交至可编程控制器处理。舞台载波通信系统主要由载波控制器、编码装置、耦合装置、解耦装置、译码装置构成,其中载波控制器用来处理采集到的信息,并控制编码器进行编码,编码调制后的信息通过耦合器接入舞台电力线中,在接收处通过解耦装置分离后利用解码装置获取信息。针对舞台设备复杂,电力传输线中存在阻抗不匹配、干扰因素较多以及信号衰减等问题,结合舞台实际运行情况,建立如图 3 所示的 2 端口网络来模拟舞台电力线载波通信过程。

信号衰减与电磁干扰等信道特征与高斯白噪声信道

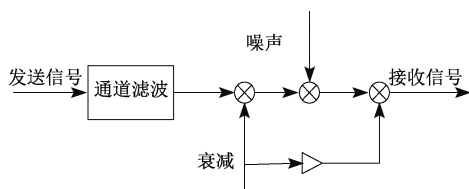


图 3 舞台载波通信模型

Fig. 3 Stage carrier communication model

相似,在 Simulink 中搭建模型进行自适应跳频载波通信仿真如图 4 所示。

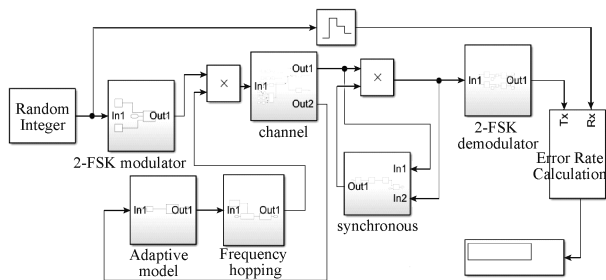


图 4 舞台自适应跳频载波通信 Simulink 模型

Fig. 4 Simulink model of stage adaptive frequency hopping carrier communication

2.2 舞台载波通信干扰分析与仿真模型

舞台通信中影响通信质量的干扰可概括为有色背景噪声、窄带噪声、与工频异步噪声、与工频同步噪声、脉冲噪声等。有色背景噪声是舞台通信系统中多个低强度噪声源融合后产生的噪声,噪声功率谱密度较低,特性与高斯白噪声极为相似,普遍存在于整个舞台电力线信道频带内,干扰频率范围高达 30 MHz。仿真时可以将其看作一个平稳随机过程,通过一组均值为 0 的白噪声序列经过 AR 滤波来模拟,过程如下:

$$x(n) + \sum_i^p a(i)x(n-1) = w(n) \quad (1)$$

式中: $a(i)$ 是 AR 系数; $w(n)$ 是一组均值为 0 的白噪声。在 Simulink 中搭建图 5 所示的模型来模拟舞台有色背景噪声。

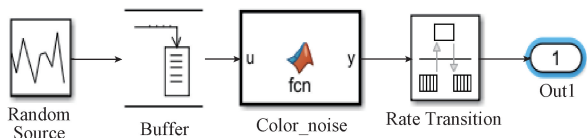


图 5 有色背景噪声 Simulink 模型

Fig. 5 Simulink model of colored background noise

舞台窄带噪声是由频域干扰引起二点频带较窄的噪声,多为正弦调制,噪声范围一般在 1~22 MHz 频段内。仿真时可以通过叠加多个正弦函数来模拟,其模拟过程

如下:

$$n_{nar}(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (2)$$

式中: f_i 为第 i 个波形的频率; A_i 为幅值; φ_i 为相位。在 Simulink 中搭建图 6 所示的模型来模拟舞台窄带噪声。

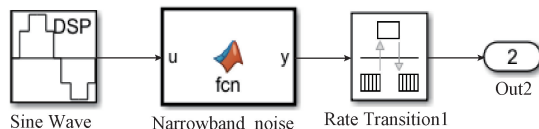


图 6 窄带噪声 Simulink 模型

Fig. 6 Simulink model of narrow-band noise

与工频同步噪声是一些含晶闸管舞台设备在工频下工作时产生的与工频同步且持续时间长、频率覆盖范围大的周期性噪声。与工频异步噪声是指由舞台开关设备动作引起的重复频率集中在 50~500 kHz 的周期性强脉冲干扰。周期性脉冲噪声可以通过脉冲宽度、脉冲存在时间以及脉冲间隔来进行描述,仿真时选用按指数衰减的正弦信号来进行模拟,其模拟过程如下:

$$n_{pul}(t) = \sum_{i=1}^N A_i e^{\frac{t}{\tau_i}} \sin[2\pi f_i(1 - \text{tarr}_i) + \varphi_i] \quad (3)$$

式中: N 为脉冲个数; τ_i 为第 i 个脉冲时间常数; tarr_i 为第 i 个脉冲出现时间。与工频同步噪声和与工频异步噪声可以通过单个周期性噪声脉冲来模拟,在 Simulink 中搭建图 7 所示的模型来模拟舞台周期性脉冲噪声。

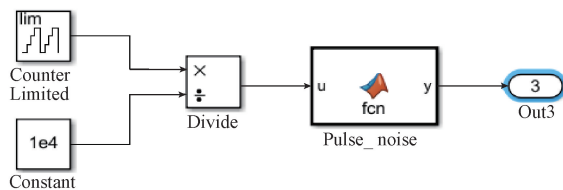


图 7 周期性脉冲噪声 Simulink 模型

Fig. 7 Simulink model of periodic impulse noise

随机突发脉冲噪声主要是指由舞台设备开关、启停控制过程中的暂态信号产生的持续时间短但能量集中强度较大的随机噪声,这种随机噪声影响较大,对通信干扰严重。仿真时利用单个脉冲通用函数来模拟,在 Simulink 中搭建图 8 所示的模型来模拟舞台随机突发脉冲噪声。

2.3 舞台自适应跳频通信信道模型

整个实验设计两种模拟信道:1) 直接对舞台不同设备间通信环境进行采样,利用采样数据构成模拟信道带通信模型进行验证,但由于实际采样受到采样点、通信环境、采样时间等因素的限制,建立模拟信道的无法全面表的达整个信道环境状态;2) 先对实际环境进行采样后分析信道干扰参数,利用建好的干扰模型对信道进行模

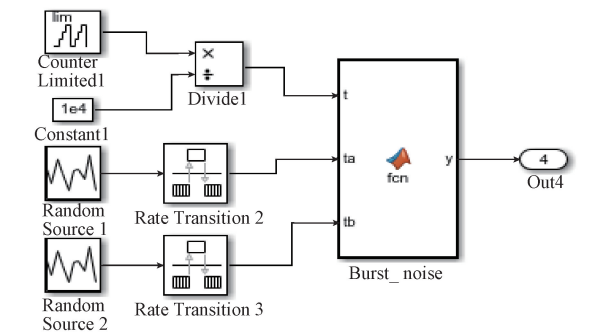


图 8 随机突发脉冲噪声 Simulink 模型

Fig. 8 Simulink model of random burst impulse noise

拟, Simulink 仿真模型如图 9 所示。

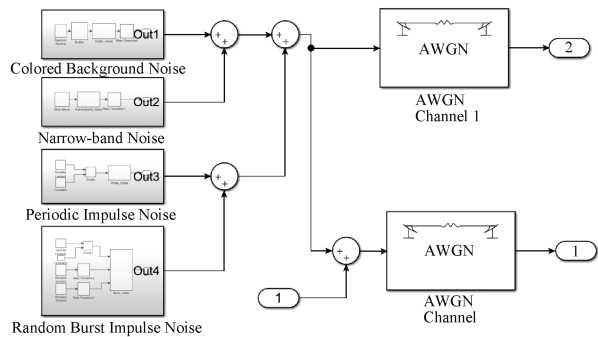


图 9 Simulink 信道模型模块

Fig. 9 Simulink channel model module

建立的模拟信道模型可通过设置参数范围,更加全面的模拟通信环境,也更有利于自适应跳频模型的训练。实验中用第 2 种方案获取训练参数和训练模型,用第 1 种方案进行测试,来对比常规跳频和自适应跳频的通信性能。

3 自适应跳频抗干扰模型训练

3.1 舞台载波通信环境模拟采样

由于舞台设备间电力线路复杂、设备类型繁多、且设备启停随机等因素,通信信道中存在多种干扰,对舞台设备间的通信影响严重。为了有效舞台设备的实际通信环境,设计多个点对舞台设备运行环境采样,采样信息如表 1 所示。

表 1 环境采样信息表

Table 1 Environmental sampling information table

采样控制系统	采样次数	每次时常/min	数据组数
吊杆	300	1	6 000
升降台	300	1	6 000
主侧车台	200	0.5	2 000
旋转车台	200	0.5	2 000

采样设备采用普源(RIGOL)DS102Z-E 数字示波器,该示波器模拟带宽 100 MHz,采样率 1 GSa/s。实验数据由采样数据分段处理后获得。

3.2 获取最优频点参数

用于训练自适应模型的最优评点参数可用粒子群算法^[19]获取。设在多维空间中的频点参数粒子群为 X , 分别设粒子 i 经过的位置与速度为 x_i 和 v_i , 最优历史记为 P_{ibe} , 全局最优位置记为 G_{be} , 则粒子的速度更新公式和位置更新公式如下:

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 R(P_{ibe}^k - w_i^k) + c_2 R(G_{be}^k - w_i^k) \quad (4)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (5)$$

式中: v_i^k 是第 i 个粒子第 k 次迭代的速度; x_i^k 为第 i 个粒子第 k 次迭代的位置; c_1 、 c_2 分别为学习因子,调节学习步长; R 是一个 $[0, 1]$ 之间的随机取值函数。用舞台载波通信的误码率设计适应度评价函数来更新算法,多次迭代后找出当前环境误码率最低的最优频点,为保证算法不陷入局部最优解采用式(6)来更新粒子群速度。

$$v_i^{k+1} = v_i^k + N_p c_1 R(P_{ibe}^k - w_i^k) + c_2 R(G_{be}^k - w_i^k) \quad (6)$$

式中: N_p 是粒子相似度增益,当模型粒子间相似度较高且在一个较小的最优频点范围内迭代超过 5 次时,记录当前最优频点参数并设置一个较大的 N_p 值,使模型继续寻找其他最优频点,设计深度为 5 的数据保存迭代器,结束时选出性能最优的频点参数,将得到的参数作为标签,通信环境采样数据作为训练样本构成训练数据集。

3.3 DBN-BP 深度神经网络训练自适应模型

利用 DBN-BP 深度神经网络完成自适应模型训练, DBN-BP 网络由多个生成神经网络结构的受限玻尔兹曼机(restricted Boltzmann machine, RBM)堆叠构成的深度置信网络(deep belief nets, DBN)^[20]和在 DBN 后的 BP 网络组成,采用对比散度算法和反向传播算法进行训练,训练时首先利用对比散度算法训练 RBM 层,逐步提取舞台环境采样的扰动特征,然后将提取的特征带入 BP 网络以频点参数为标签,利用反向传播算法进行微调,通过大量学习获得舞台电力线环境与最优频点之间的关系矩阵得到最终的自适应跳频抗干扰模型。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验训练数据获取

正常舞台载波通信频段设置在 40~500 kHz,设定模型参数后对模拟通道进行采样,设置粒子群算法的初始频点更新参数,通信过程中计算接收信号的误码率来更新粒子的速度和位置,根据舞台实际电力线通道分析参数随机设定不同扰动模型参数得到针对 2 000 种不同工况的 30 000 组数据,采用粒子群算法分别求出每个通道

环境的最优频点参数,与原始通道采样参数构成训练数据集用于训练自适应频点更新模型。数据获取通过图 10 所示的 Simulink 模型实现。

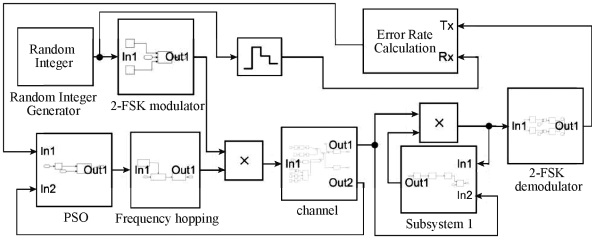


图 10 PSO 算法获取最优参数获取模型

Fig. 10 PSO algorithm to obtain the optimal parameter acquisition model

设定数据传输速率为 500 bits/s,2FSK 调制,频率跳变范围 100~500 kHz,跳频带宽设为 400 kHz,滤波器阶数设为 48 阶,初始化粒子群算法,设置频点粒子个数为 20,最大迭代速度停止,最大迭代次数 60 次,粒子位置范围 100~500 kHz,粒子速度更新范围-5~5 kHz,初始粒子参数,运行仿真模型。图 11 所示为某一通道环境下一组经过滤波后的带干扰信号及其频谱。图 12 所示为其解跳后的信号与频谱。

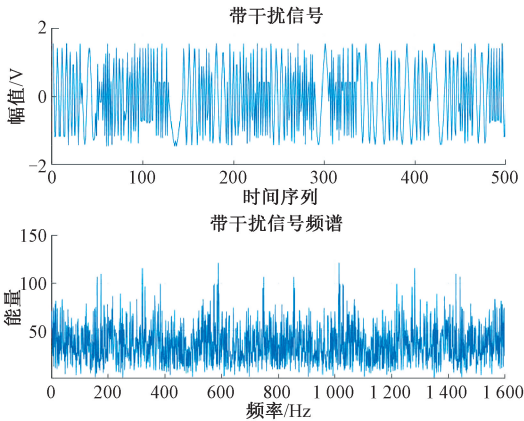


图 11 带干扰信号及其频谱

Fig. 11 Interference signal and its spectrum

通过粒子群算法进行迭代,算法迭代时信号传输误比特曲线如图 13 所示。从图 13 可以看出,随着算法迭代误码率越来越低,算法迭代 25 次时误码率接近 0.025。重复上述步骤,设置不同干扰类型,仿真得到 30 000 组数据及其频点更新参数构成训练数据集。

4.2 自适应跳频抗干扰模型训练

模型训练基于深度学习库 Tensorflow 实现,由于通信实时性要求较高,模型结构需尽量设计精简,DBN 输入层与采样数据长度相同设为 500,设置不同的 DBN 层数,分别对比不同层数设置的 DBN 中每层 RBM 的重构误差

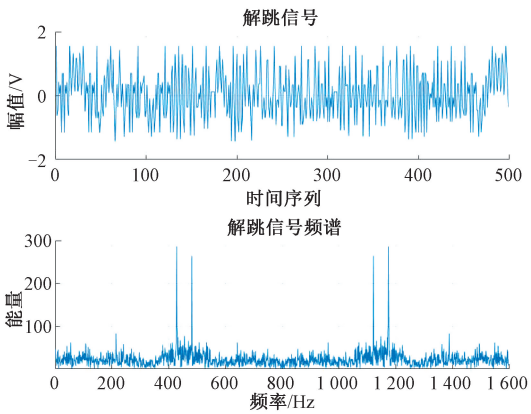


图 12 解跳信号及其频谱

Fig. 12 Solving the hop signal and its spectrum

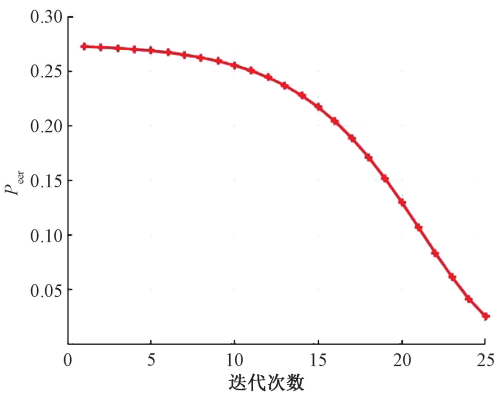


图 13 迭代误码率曲线

Fig. 13 Iterative bit error rate curve

来对比采用不同的层数设置对 DBN 网络提取输入信号特征的影响,对比多组数据得到平均结果如表 2 所示。

表 2 DBN 层数对比表

Table 2 Comparison table of DBN layers			
层数	每层节点个数	重构误差	时间/s
3	[450,300,150]	0.121 290	7.6
3	[375,250,125]	0.135 137	7.5
4	[450,330,210,90]	0.011 216	8.4
4	[430,320,210,100]	0.010 987	8.4
5	[440,350,260,170,90]	0.137 132	9.1
5	[450,360,270,180,100]	0.147 191	9.2

在只考虑重构误差和计算时间的前提下,当设置 DBN 层数为 4,每层参数设定为[430,320,210,100]时,最终平均重构误差相对较小,平均计算时间较短。将 RBM 层提取出的特征带入 BP 层,BP 层设为 3 层,隐藏层神经元根据经验公式设定,使用反向传播方法进行训练和微调,训练时每期从 20 000 组数据中随机抽取 3 000 组进行迭代训练,进行 10 期训练后的训练结果如图 14 所示。

从图 14 可以看出,随着每期的迭代误差越来越小,在进行第 10 期迭代时训练误差与测试误差几乎重合。随机抽取 1 500 组数据进行测试,通过模型获取的跳频频点参数值与实际期望值的平均测试误差小至 0.018 6 kHz,此误差值还与优化算法的迭代停止条件有关,可在实际应用中根据需求调节停止迭代准则来获取精度更高的频点参数。

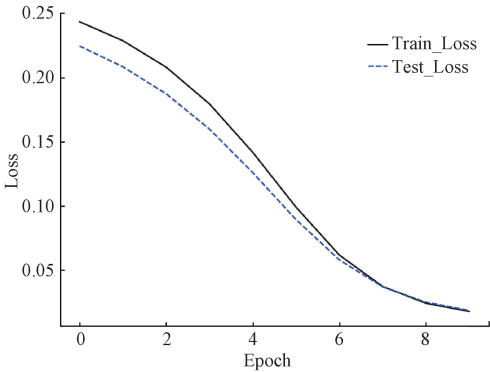


图 14 BP 网络训练误差
Fig. 14 Training error of BP network

4.3 仿真结果分析

用自适应跳频模型替代粒子群算法进行跳频参数更新,对比舞台通信环境中自适应跳频技术和常规跳频技术在载波通信中的表现,常规跳频技术跳频间隔设置为 4 kHz,更新频点个数设置为 100,对 1 000 种模拟工况进行仿真实验,每次从每种模拟通道环境中随机抽取 10 组数据,共 10 000 组,分别用两种不同的跳频方式进行通信,仿真时间 10 min,随机选择通道间隔设为 2 s,计算通信误码率,图 15 所示为在不同信噪比设定下,采用两种不同跳频策略的舞台载波通信误码率曲线。

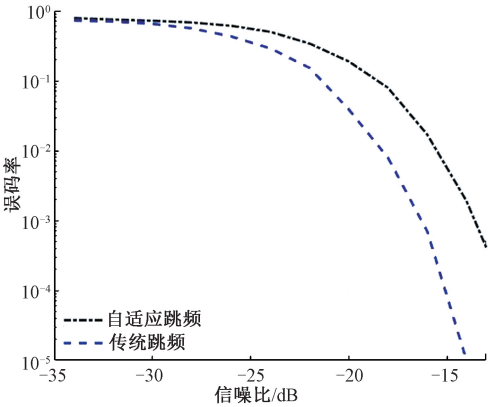


图 15 不同信噪比下误码率曲线
Fig. 15 Bit error rate curve under different SNR

从图 15 可以看出,当信噪比接近-18 dB 时,自适应

跳频通信误码率几乎接近 0.01,比于常规跳频通信几乎小一个数量级,充分体现出了自适应跳频技术的优越性,可以在信噪比较小的情况下保证较好的通信效率,具有较强的适应能力和抗干扰能力。

4.4 模型性能验证

为进一步验证自适应跳频通信技术对实际工程环境的通信效果,用整合后的前期环境采样数据代替模型中的模拟通道进行仿真,来进一步验证模型可行性。从舞台吊杆控制系统、升降台控制系统、侧车台控制系统以及旋转车台控制系统的采样数据中随机抽取一定数量数据进行仿真,图 16 所示为一组滤波后的调制信号和其频谱。解跳信号及其频谱如图 17 所示。

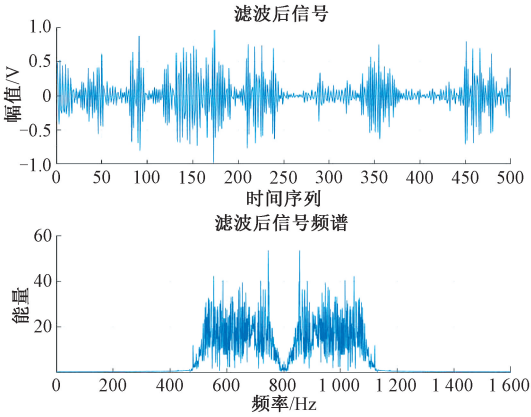


图 16 调制信号及其频谱
Fig. 16 Modulated signal and its spectrum

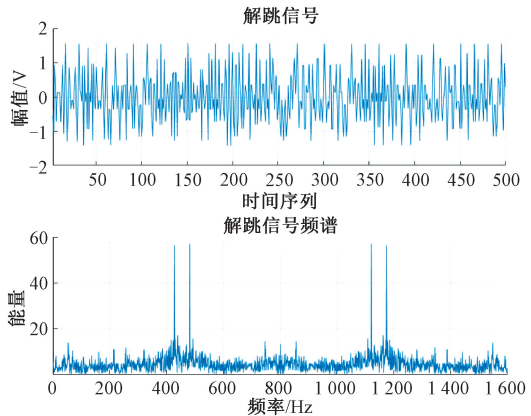


图 17 解跳信号及其频谱
Fig. 17 Solving the hop signal and its spectrum

由图 16、17 可以看出,自适应跳频通信模型在采用实际数据信号仿真时,信号解跳后仍能较好地还原原始信息。分别针对 4 种通信环境随机抽取工况数据进行通信仿真,数据抽取与仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同工况下模型仿真测试结果

Table 3 Model simulation test results under different working conditions

采样环境	抽取组数	仿真时间/min	平均误码率/%
吊杆	3 000	3	0.983
升降台	3 000	3	1.015
侧车台	2 000	2	1.017
旋转车台	2 000	2	0.992

通过表 3 可以看出,舞台载波通信自适应抗干扰模型在使用实际环境采样数据进行测试时也表现出较理想的通信效果,可以针对各种不同应用环境有效地更新频点参数,进一步提高跳频通信的抗干扰能力和通信效率。

5 结 论

通过仿真与实验,自适应跳频技术相比传统的随机跳频技术舞台载波通信中可以针对当前舞台电力线环境自适应选择最佳通信频段,避免了传统跳频通信中根据跳频参数表实现跳频的局限性,大大提高了通信效率。利用深度神经网络可以全面有效的学习舞台电力线通信环境的特征,可以有更多的通信频道选择方式,能更加快速而准确的找到最优的通信频道,在有效降低通信误码率的前提下节省了更多的通信时间,进而整体提高了舞台载波通信系统的运行效率。

参考文献

[1] 艾学峰. 京剧舞台美术与当代技术结合探究[J]. 中国京剧,2021(2):48-49.
AI X F. Research on the combination of Beijing Opera stage art and contemporary technology [J]. China Beijing Opera,2021(2):48-49.

[2] 骆东松,沈汉林,武晓峰. 基于 WebService 的舞台机械远程监控系统[J]. 自动化技术与应用,2020,39(2):169-173,182.
LUO D S, SHEN H L, WU X F. Remote monitoring system of stage machinery based on WebService [J]. Automation Technology and Application, 2020, 39(2):169-173,182.

[3] 侯鹏强,唐伟,向飞. 舞台机械技术与设备系列谈(三)——数据通信[J]. 演艺科技,2020(8):35-38.
HOU P Q, TANG W, XIANG F. A series discussion on stage mechanical technology and equipment (3) data communication [J]. Performing Arts Science and Technology,2020(8):35-38.

[4] 任慧,王会芹,马旭超. 基于 IP 的舞台内通系统通信协议的研究[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版),2015,22(2):20-23.
REN H, WANG H Q, MA X CH. Research on the

communication protocol of instage communication system based on IP [J]. Journal of Communication University of China (Natural Science Edition), 2015,22(2):20-23.

[5] 赵俊红,张合强. 低压电力线载波通信技术研究[J]. 自动化应用,2016(12):143-144.
ZHAO J H, ZHANG H Q. Research on low-voltage power line carrier communication technology [J]. Application of Automation,2016(12):143-144.

[6] 王芳,张士兵,王振朝. 低压电力线载波通信调制解调技术研究[J]. 电视技术,2010,34(5):69-72.
WANG F, ZHANG SH B, WANG ZH CH. Research on modulation and demodulation technology of low voltage power line carrier communication [J]. TV Technology, 2010,34(5):69-72.

[7] 李振东,谭维凤,康成斌,等. 直接序列扩频系统抗干扰能力研究[J/OL]. 电子与信息学报:1-8[2020-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4494.TN.20201123.0900.004.html>.
LI Z D, TAN W F, KANG C B, CHENG J S. Direct sequence spread spectrum system anti-interference ability research [J/OL]. Journal of electronics and information: 1-8 [2020-12-28]. HTTP: //http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4494.TN.20201123.0900.004.html.

[8] 樊孝明,林基明. 锁相环解调的 Chirp-UWB 接收机仿真研究[J]. 电子技术应用,2011(5):121-125.
FAN X M, LIN J M. Simulation of chirp-UWB receiver with phase locked loop demodulation [J]. Application of Electronic Technology, 2011(5):121-125.

[9] XING O, JIAN Z. Orthogonal chirp division multiplexing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 64(18):3946-3957.

[10] LEI Z, WANG H, LI T. Anti-jamming message-driven frequency hopping—Part I: System design [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(1):70-79.

[11] 齐琳,郭黎利,姜晓斐,等. 不同调制的并扩超宽带通信系统的性能研究[J]. 计算机应用研究,2012(9):3448-3451.
QI L, GUO L L, JIANG X F, et al. Research on performance of parallel expansion UWB communication system with different modulation [J]. Application Research of Computers, 2012(9):3448-3451.

[12] 郭筱亮,杨建伟,杨俊. 一种基于差分相关的 DS/FH 信号快速捕获方法[J]. 仪器仪表学报,2014,35(S2):89-95.
GUO X L, YANG J W, YANG J. A fast acquisition method for DS/FH signal based on differential correlation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014,35(S2):

- 89-95.
- [13] 洪伟,孙斌,胡万坤,等.跳扩结合通信系统接收同步算法设计[J].雷达与对抗,2020,40(3):25-28,56.
HONG W, SUN B, HU W K, XU J. Design of reception synchronization algorithm for jump-spread combination communication system [J]. Radar and Countermeasures, 2020,40(3):25-28,56.
- [14] 高维珉,张永翼,苏爱东.并行组合扩频通信系统的自适应变速率数据传输模型[J].现代电子技术,2020,43(13):32-35,39.
GAO W M, ZHANG Y Y, SU A D. Adaptive variable rate data transmission model for parallel combination spread spectrum communication system [J]. Modern Electronic Technology, 2020,43(13):32-35,39.
- [15] 吴旭,范文同,胡富珍.基于分布式补偿方法的载波频偏估计算法[J].电子测量与仪器学报,2019,33(6):165-170.
WU X, FAN W T, HU F ZH. Carrier frequency offset estimation algorithm based on distributed compensation method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(6):165-170.
- [16] 闵诗逸.数据链传输波形抗干扰技术研究[D].成都:电子科技大学,2020.
MIN SH Y. Research on waveform anti-jamming technology of data link transmission [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [17] BAO J, JI L. Frequency hopping sequences with optimal partial hamming correlation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(6):3768-3783.
- [18] CORMIO C, CHOWDHURY K R. Common control channel design for cognitive radio wireless ad hoc

networks using adaptive frequency hopping [J]. Ad Hoc Networks, 2010, 8(4):430-438.

- [19] HASHEMI A B, MEYBODI M R. A note on the learning automata based algorithms for adaptive parameter selection in PSO [J]. Applied Soft Computing Journal, 2011, 11(1):689-705.
- [20] ZHAO L, ZHOU Y, LU H, et al. Parallel computing method of deep belief networks and its application to traffic flow prediction [J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 163(1):972-987.

作者简介



荆俊明,本科,现在甘肃工大舞台技术工程有限公司担任高级工程师,主要研究方向为机电一体化(舞台设备)。

E-mail:420565321@qq.com

Jing Junming has a B. Sc. degree. Now he is a senior engineer at Gansu University of Technology Stage Technology Engineering Co., Ltd. His main research interest includes electromechanical integration (stage equipment).



石建明,2017年于兰州理工大学获得学士学位,2020年于兰州理工大学获得硕士学位,现在甘肃工大舞台技术工程有限公司任职,主要研究方向为智能信息处理、舞台控制技术。

E-mail:673085380@qq.com

Shi Jianming received his B. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 2017 and M. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 2020. Now he is working for Gansu University of Technology Stage Technology Engineering Co., Ltd. His main research interests include intelligent information processing and stage control technology.