

# 一种基于迭代函数系统的个性化耳鸣 康复自然音合成方法



蔡丽, 何培宇, 陈杰梅

四川大学 电子信息学院(成都 610065)

**【摘要】** 耳鸣是一种常见的临床症状。研究表明,分形音可有效治疗耳鸣,但目前的分形音多基于固定的音符库结合分形算法映射而成,其频率单一,很难与患者进行个性化适配。临床研究证实,自然声为常用的耳鸣匹配声,对调节消极情绪、减轻耳鸣的烦扰程度有良好的效果。因此,本文提出了一种基于迭代函数系统(IFS)的个性化耳鸣康复自然音合成方法。该方法以个性化构造的自然音音频库为基础,通过IFS分形算法映射合成康复音。实验表明,此方法合成的康复音符合耳鸣治疗声基本要求,且可通过控制音频库的生成使康复声适配患者的耳鸣声,对耳鸣治疗具有一定的参考价值。

**【关键词】** 分形音;自然声;迭代函数系统;个性化;康复音

## A new method of synthesizing personalized tinnitus rehabilitation sound based on iterative function system algorithm

CAI Li, HE Peiyu, CHEN Jiemei

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, P.R.China

Corresponding author: HE Peiyu, Email: hepeiyu@scu.edu.cn

**【Abstract】** Tinnitus is a common clinical symptom. Researches have shown that fractal sound can effectively treat tinnitus. But current fractal sound is usually synthesized based on constant notes via fractal algorithm, which lead to monotony of synthesized fractal sound. So it is difficult to achieve personalized match. Clinical datas have confirmed that it is common to match tinnitus sound with nature sound and it has a good effect on regulating negative emotion and relieving tinnitus via some natural sound. Therefore, a new method of personalized synthesizing tinnitus rehabilitation sound based on iterative function system (IFS) fractal algorithm is proposed in this paper. This method firstly generates personalized audio library based on natural sound, then tinnitus rehabilitation sound is synthesized via IFS fractal algorithm. Simulation results show that rehabilitation sound in this paper can meet the basic requirements of tinnitus therapy sound and can match tinnitus sound by controlling personalized audio library. So it has reference significance to the treatment of tinnitus sound therapy.

**【Key words】** fractal sound; natural sound; iterative function system; personalized; rehabilitation sound

## 引言

耳鸣指不由外界声音引起的听觉感知,其病因复杂,发病机制尚不清楚。相关资料显示,耳鸣发病率为10%~15%,对患者的身心常造成极大伤害<sup>[1-2]</sup>。因此,对耳鸣康复方法的探索仍具有十分重要的意义。

耳鸣的声音治疗是一种非药物方法,其简便、

有效且无副作用,是目前公认有效的耳鸣治疗方法<sup>[3]</sup>。声音疗法分为掩蔽疗法和习服疗法。掩蔽疗法提供与患者耳鸣频率相近、响度相同或稍高于耳鸣响度的声音作为掩蔽声源(如自然声),通过抑制中枢神经兴奋来达到抑制耳鸣的效果<sup>[4]</sup>;习服疗法常以分形音乐作为背景声,使患者习惯和适应耳鸣,通过缓解由耳鸣带来的负面情绪来达到减轻耳鸣症状的效果<sup>[5]</sup>。研究表明,重复的声音会唤醒记忆,无法达到预期的减压放松效果<sup>[1,5]</sup>,而将分形图形的随机性和自相似性运用到康复音合成中正好可弥补这一缺陷<sup>[6-8]</sup>。丹麦唯听助听器中的“禅”

DOI: 10.7507/1001-5515.201705012

基金项目:四川省科技支撑资助项目(2011SZ0123, 2013GZ1043)

通信作者:何培宇, Email: hepeiyu@scu.edu.cn

音和文献[9-10]的分形音乐都利用分形技术映射合成。调查发现,不管是“禅”音还是文献[9-10]中的分形音乐都是基于乐器数字接口 (Musical Instrument Digital Interface, MIDI) 中固定的中音区音符所合成,因此存在频率单一和节奏单调的问题。文献[10]虽然在加入分解和弦后解决了音调突变的问题使分形音乐更加流畅,但由于音库本身的缺陷,仍无法达到与患者的个性化匹配,无法进行针对性治疗。

临床研究证实,自然声是多数耳鸣患者的掩蔽声源,可打破耳鸣与不良情绪之间的恶性循环链,在一定程度上减轻耳鸣的烦扰程度[4,11]。因此本文将自然声作为基础音,结合分形理论,提出了一种基于迭代函数系统 (iterative function system, IFS) 的个性化耳鸣康复自然音合成的新方法。该方法以个性化选取的自然音片段代替常规音符,以基于自然音片段发展而成的自然音库代替以往固定的音符库,再结合 IFS 分形图像的层次特征进行映射,最终合成分形自然音。该方法以保证相似但不重复为出发点,配合自然音的良好掩蔽特性使得合成康复音与患者更加适配,以期达到针对性缓解耳鸣症状的目的,对耳鸣的临床治疗具有一定的借鉴意义。

### 1 耳鸣康复音合成原理

本文通过控制个性化自然音音库的生成和 IFS 分形序列来合成耳鸣康复音,其总体思路为:

- (1) 提供不同的自然音片段进行试听选优,筛选合适片段作为个性化基础自然音;
- (2) 基于音频的韵律变换方法,对选取的个性化基础自然音片段从音色、音调、响度和速度四个维度上进行韵律变换处理。在各变换算法的单独或联合作用下将基础自然音片段发展成自然音音频库,并对库内音频按相关性进行编号处理;

(3) 为满足治疗声相似不重复的要求,选取经 IFS 系统产生的分形序列进行线性处理,在映射规则的控制下最终合成耳鸣康复音。

通过控制 IFS 序列及其长度可使合成的分形自然音具有可控时长相似不重复特性。基础自然音的选取过程和映射音库的产生过程与患者本身紧密关联,保证了合成的康复音满足个体需求。其流程如图 1 所示。

### 2 个性化自然音音频库的生成

#### 2.1 基础自然音选取

自然音音频库由基础自然音发展而成。为实现个性化,基础自然音片段的选取应该基于患者的意愿和要求。其选取过程为:首先提供给患者不同的自然音片段(流水声、风声、鸟叫声、蝉鸣声等)进行试听,然后从耳鸣声匹配度、可接受度、喜欢程度三个层面去评分,最后筛选出综合评分最高(或评分前三)的自然音片段作为基础音。

#### 2.2 韵律变换

耳鸣的声治疗常需保证长达半小时甚至更长时间的治疗声连续刺激[1,5]。若仅用所选基础自然音进行映射合成,产生的康复音必定单调重复。因此本文从响度、速度、音调和音色四个韵律维度上对所选基础音进行变换,将其发展成具有丰富韵律的自然音库。四种变换方法如下:

- (1) 响度变换:即音频幅度的调节。
- (2) 速度变换:本文采用重叠叠加算法[12]进行音频速度变换。
- (3) 音调变换:本文采用 Hilbert-Huang 变换与 AM-FM 相结合的方式对音调的调节,其实质是共振峰的搬移[13]。
- (4) 音色均衡:本文基于均衡技术[14]进行音色调节。音频均衡技术中,频带的划分最为关键,为更好地建立治疗声与耳鸣患者的联系,本文将 Mel

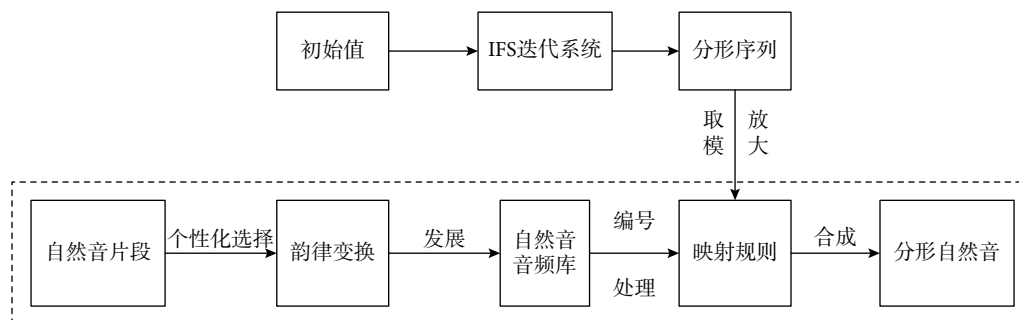


图 1 个性化耳鸣康复音合成过程

Fig.1 The synthesis process of personalized tinnitus rehabilitation sound

频率应用于频带划分。Mel 频率是基于人耳耳蜗和基底膜特性所提出的频率标度。人耳听觉系统对物理频率的感知具有对数特征，而对 Mel 频率具有线性特征。Mel 频率与物理频率的关系为：

$$f_{mel}(f) = 2595 \log_{10}(1 + f/700) \quad (1)$$

其中， $f$ 为物理频率， $f_{mel}$ 为 Mel 频率。完成对 Mel 频段的划分一般分为三步：① 根据最大物理频率计算 Mel 最大频率；② 根据划分频带个数计算 Mel 频带间隔；③ 求得各 Mel 频段中心频率。

图 2 为本文由 Mel 频率设计的带通滤波器组。滤波器组各中心频率呈对数递增，恰好符合人耳听觉系统对于物理频率感知的对数分布特性。用图示滤波器组将音频信号划分为各路子带信号，根据均衡原理在可控范围内对各频带信号进行增益(或衰减)调节，即可得到音色均衡后的音频信号。

音频库由基础音发展而成，库内各音频片段间具有一定自相似特征，这保证了基于该音库映射合成的康复音具有丰富的韵律但又不产生大的突变。韵律变换时，患者可根据个人需要，控制音频库内音频的频率成分，以达到个性化匹配的目的。

### 2.3 自然音音频库的编号处理

为避免映射合成的分形自然音存在较大突变、音频不流畅的问题，这里对自然音音频库进行编号处理。首先，依次求取自然音音频库内各音频片段(假设为  $x$ )与基础自然音(假设为  $y$ )的互相关系数：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x(i) - m_x)(y(i) - m_y)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [x(i) - m_x]^2 \sum_{i=1}^n [y(i) - m_y]^2}} \quad (2)$$

其中  $m_x$  为信号  $x$  的平均值， $m_y$  为信号  $y$  的平均值。

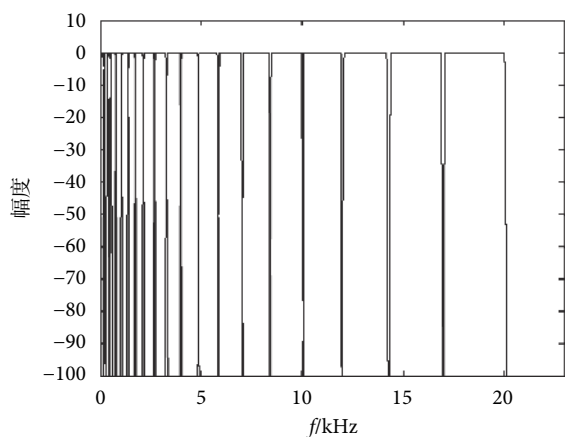


图 2 Mel 滤波器组  
Fig.2 Mel filter banks

接着，挑选出相关系数在 [0.3, 0.8] 的音频片段作为有效片段，并按相关程度由强自弱进行编号。将相关性在 0.3 以下和 0.8 以上的音频片段予以舍弃，从而在一定程度上避免映射合成的音频产生突变和重复性过高的问题。互相关系数与相关程度的定义如表 1 所示。

### 3 基于个性化自然音音库和 IFS 算法合成分形自然音

研究表明，将分形技术用于音乐谱曲可使合成的音乐具有可预测而又不单调、随机而又统一的分形特征，此特征正好符合耳鸣康复音的要求<sup>[6-8]</sup>。基于此，本文选取 IFS 分形算法<sup>[15]</sup>生成的分形序列作为映射序列来控制康复音的合成。

图 3 即为本文的治疗声映射合成过程：① 将原始 IFS 序列经线性方法处理获得整数分形序列；② 以整数分形序列的最大值最小值的差值作为区间跨度，并将其划分为与音频库内音频数量相同的区间得到编号区间；③ 判定分形序列值对应的区间，映射音频库内对应编号的音频以合成分形自然音。

### 4 仿真分析及试听分析

本文通过  $1/f$  波动和分形维度分析合成治疗音的整体相似不重复特性，通过对比实验分析合成治疗音个性化匹配的特征，通过耳鸣模型<sup>[16]</sup>刺激效果分析合成治疗音对耳鸣的治疗作用，最后通过试听分析对合成治疗音进行主观检验。

#### 4.1 $1/f$ 波动分析

$1/f$  波动在局部呈无序状态但在宏观上却存在相关性，这种波动可使人感到舒适，大多数音乐和舒适的声音均符合  $1/f$  波动<sup>[16-17]</sup>。功率谱  $S(f)$  是信

表 1 相关系数和相关程度的关系

Tab.1 The relationship of correlation coefficient and correlation degree

相关系数	相关程度
$0.00 < r \leq 0.30$	微相关
$0.30 < r \leq 0.50$	实相关
$0.50 < r \leq 0.80$	显著相关
$0.80 < r \leq 1.00$	高度相关



图 3 映射合成过程

Fig.3 The process of mapping and synthetic

号时间相关性的一个重要量度,表示信号在频率  $f$  处均方根的变化,其关系为:

$$S(f) \propto f^{-\beta} \quad (3)$$

其中  $\beta$  为标准指数,当  $\beta$  在  $[0.5, 1.5]$  范围内时,可将信号看作是  $1/f$  波动。

本文 IFS 分形序列控制康复自然音的最终映射合成,分形序列的波动特性直接决定音频的整体特性。将 IFS 产生的分形序列和经线性处理后用于映射合成的序列均进行  $1/f$  波动分析。如图 4 所示,图中横、纵轴分别为频率和功率谱的对数值。

由图 4 可知,IFS 迭代系统产生的分形序列和映射所用序列的功率谱拟合曲线斜率分别为  $-0.9381$  (即  $\beta = 0.9381$ ) 和  $-0.9378$  (即  $\beta = 0.9378$ ),均符合  $1/f$  波动特性,说明线性处理过程并不破坏分形序列的波动特性。该结果表明,合成的康复音具有整体的稳定性,可使人感到舒适和放松<sup>[16-17]</sup>。

#### 4.2 分形维度分析

分形维度表征了分形在几何变换下的标度无关性,可体现局部与整体的相似特征。合成自然音的分形维度特征可由相邻自然音片段编号差  $i$  及其出现的频率  $F_i$  来表示。当  $i$  与  $F_i$  满足关系式:

$$\lg(F_i) = \lg(c) - D \times \lg(i) \quad (4)$$

即当  $\lg(i)$  与  $\lg(F_i)$  存在以  $-D$  为斜率的线性关系时表示合成自然音具有分形的自相似特性<sup>[8-9]</sup>。表 2 为对一段时长为 20 min 的合成自然音进行的相关统计,图 5 表示  $i$  与  $F_i$  的对数域拟合关系。

由表 2 可知,相同音频片段连续出现次数 ( $i = 0$ ) 较少,同时音频编号差较大的情况 ( $i > 10$ ) 也较

少出现,说明音频无大量的重复性和明显突变性。由图 5 可知,  $\lg(i)$  与  $\lg(F_i)$  为近似线性关系,说明音频具有整体的自相似特性。

#### 4.3 合成音频对比分析

用文献[10]方法合成 IFS 分形音乐,并将其由 MIDI 格式转化为 wav 格式;用本文方法,以流水声为基础音构造流水声音频库,合成分形流水声 1;对该流水声音频库进行个性化处理(增加 2~5 kHz 频段音频比例),以相同的分形序列映射合成分形流水声 2。对合成的音频分别进行频谱分析,如图 6 所示。

图 6 中,分形流水声 1 频率集中在 2 kHz 内;相较于分形流水声 1,分形流水声 2 频谱中 2~5 kHz 的频率成分相应增加,这与个性化调整的预期效果相一致。据此,患者可根据自身需求构造对应自然音音频库来合成治疗音,以实现个性化适

表 2 相邻自然音片段映射编号差及出现次数统计

Tab.2 Difference between the neighbouring numbers and their frequency

编号差 $i$	频率 $F_i$
0	16
1	60
2	52
3	70
4	41
5	22
6	56
7	33
8	12
9	11
10	8
11	4
12	3
13	1

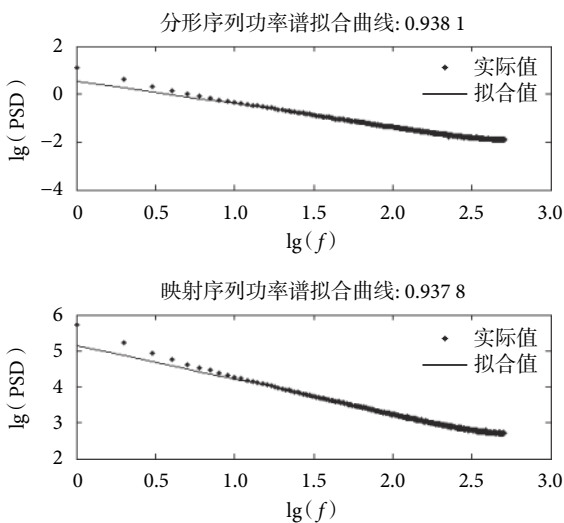


图 4 序列的功率谱拟合曲线

Fig.4 The power spectrum curve fitting of sequences

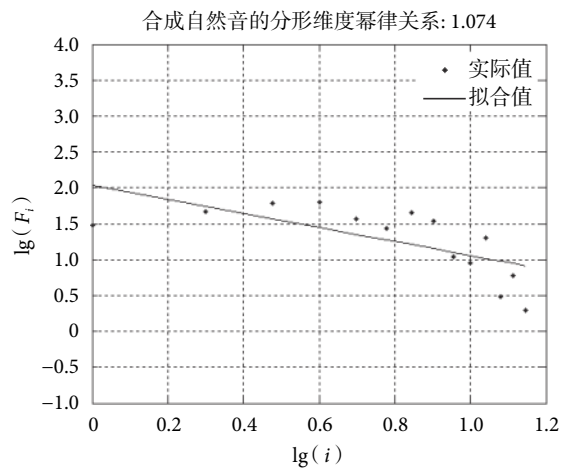


图 5 合成自然音的分形结构分析

Fig.5 Fractal structure analysis of synthetic natural sounds



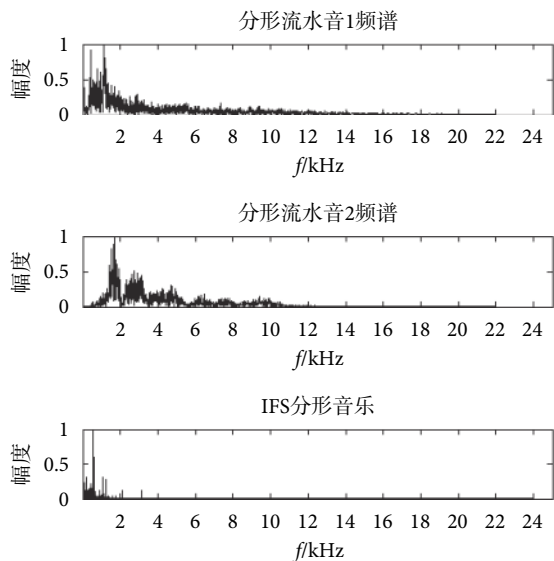


图6 IFS分形音乐和分形自然音频谱对比

Fig.6 The spectrum analysis of IFS fractal music and fractal natural sound

配。由于音库的限制，文献[10]方法合成的 IFS 分形音乐频率集中在 1 kHz 内，其频率成分单一，很难进行个性化适配。

为进一步体现本文合成康复音的特点，这里选取鸟叫声和蝉鸣声分别合成分形鸟叫声和分形蝉鸣声，其频谱对比如图 7 所示。由图可知，选取不同的基础自然音，所得的合成分形自然音呈现不同的频率特性：分形蝉鸣声频率较为集中，对于耳鸣声频率特性明显的患者具有良好的适配效果；分形鸟叫声频谱较宽，正好适用于耳鸣声频率丰富难辨的患者。

#### 4.4 耳鸣模型刺激分析

为验证合成耳鸣治疗音能在一定程度上抑制耳鸣，这里基于文献[18]提出的一种自适应耳鸣模型进行了声音刺激分析，该模型可有效模拟耳鸣的产生及声音疗法对耳鸣的抑制作用。实验假设第三条听觉通路损伤（即耳鸣声频段为 5.15 ~ 6.05 kHz）。实验时长为 80 s，在第 20 ~ 60 s 输入上述分形蝉鸣声（频率集中在 4 ~ 6 kHz）和 IFS 分形音乐（频率集中在 1 kHz 内）分别刺激模型，仿真结果如图 8 所示。

对比两幅图可以发现，在加入分形蝉鸣声后，由于其频率范围处在耳鸣声频段范围内，经过一段时间刺激，耳鸣自发信号得到抑制，模型输出功率逐渐减弱；60 s 时撤去刺激信号，输出功率逐渐上升，耳鸣症状复发。而加入 IFS 分形音乐后，由于其频率不在耳鸣声频段范围内，无法抑制耳鸣自发信号，因此模型输出功率维持不变。

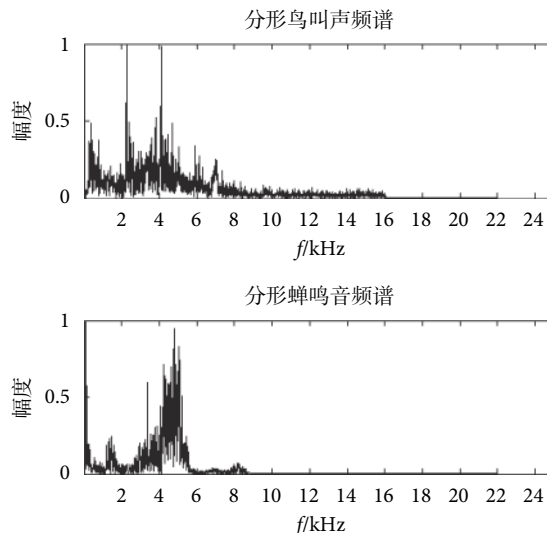


图7 分形自然音频谱对比

Fig.7 The spectrum analysis of fractal natural sound

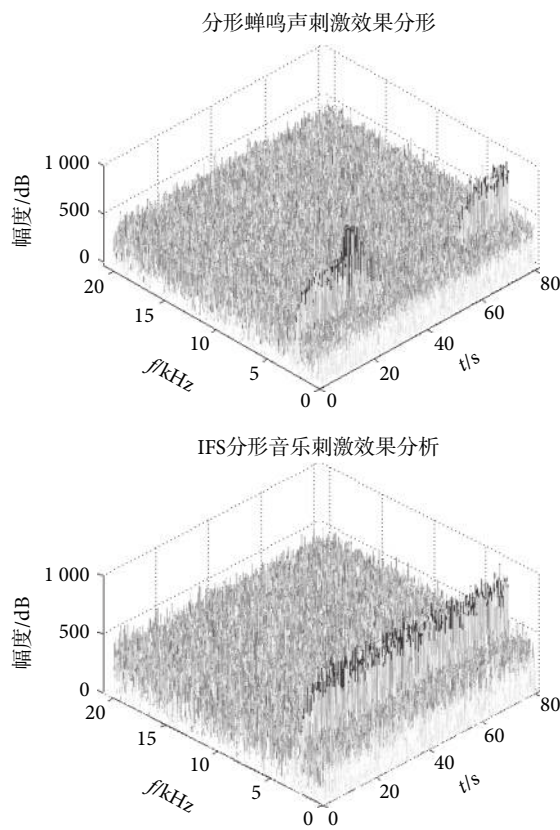


图8 耳鸣模型输出时频图

Fig.8 The output time-frequency diagram of tinnitus model

#### 4.5 试听分析

前面进行了详细的仿真分析，在理论上论证了治疗音的各项特性。本节通过试听实验对合成治疗音进行主观评价。需要说明的是，试听实验是对合成治疗音听觉效果（重复度、突变度和舒缓度）的主观检验，因不涉及治疗效果的评价，故选取听

表3 统计结果

Tab.3 The statistical results

音频片段	frag1	frag2	frag3
完全不重复	4	8	5
相似不重复性	35	30	29
重复	6	7	11
舒缓	34	31	36
流畅	30	28	30

力状况良好的正常人进行试听。该试听仅作为对本文合成治疗音的初步听觉效果分析,在临床中还需要根据耳鸣患者的具体情况调节相关参数以达到治疗目的。

试听人员共45名(男20名,女25名),均为年龄18~25岁的在校学生。试听人员在相对安静的环境中进行试听。试听设备为Lenovo小新潮7000电脑播放器。试听音频为本文基于3种不同的自然界声音(流水声、鸟叫声、风声)合成的3种分形自然音片段,分别为frag1、frag2和frag3。每段音频的试听时长为3min,每次试听时frag1、frag2和frag3轮流播放,每段音频试听间隔为1min。每位试听人员共进行一轮试听,试听结束即刻依据完全不重复、相似不重复、重复、流畅及舒缓五项要素对frag1、frag2和frag3分别进行评判。评判过程为:针对每一种音频片段每位试听人员从各要素中选择出最符合该音频特性的要素,五项要素中完全不重复、相似不重复和重复只能选其一,舒缓和流畅这两项可同时选择、同时不选或选择其一。试听统计结果如表3所示。

分析表3,分别约77.8%、66.7%和64.4%的试听人员认为frag1、frag2和frag3具有相似不重复特性,该结果表明大部分试听者认为合成治疗音是相似但不重复的,这与仿真实验所述的特征相吻合;分别约75.6%、68.9%、80.0%的试听人员认为frag1、frag2和frag3舒缓悦耳;分别约66.7%、62.2%和66.7%的试听者认为frag1、frag2和frag3前后流畅无明显突变。上述试听结果说明本文合成的治疗音具有整体相似不重复性,且声音流畅舒缓无明显突变,有助于听者放松心情。

## 5 结论

本文提出了一种基于IFS的个性化耳鸣康复自然音合成方法。IFS系统产生的分形序列具有随机性和可预测性的平衡,保证了合成治疗音整体的相似但不重复特性;自然音天然的舒适性和丰富性增加了合成治疗音的舒缓性,可使听者放松;基础

自然音的选取和自然音库的构造过程与患者紧密相关,具有个性化适配的特性。仿真实验验证了合成治疗音的个性化匹配的效果、整体的1/f波动特性、分形特性和对耳鸣模型的抑制效果。因此,本文提出的康复音合成方法对运用声音疗法治疗耳鸣具有一定借鉴意义。

## 参考文献

- Chen J M, He P Y, Pan F. A new method of synthesizing chaotic music for tinnitus sound therapy//IEEE International Conference on Digital Signal Processing, Singapore: IEEE, 2015: 278-282.
- 陈杰梅,何培宇,潘帆.一种基于五声音阶和混沌的耳鸣康复音生成方法.生物医学工程学杂志,2015,32(6):1329-1334.
- Hoare D J, Searchfield G D, El Refaie A, et al. Sound therapy for tinnitus management: practicable options. J Am Acad Audiol, 2014, 25(1, SI): 62-75.
- Mohanty P R, Walikar B N, Rashinkar S M, et al. Outcome of audiometric masking therapy on subjective tinnitus patients in different age groups. International Journal of Otorhinolaryngology and Head and Neck Surgery, 2017, 3(3): 699.
- Jastreboff P J, Jonathan W P. Tinnitus retraining therapy: implementing the neurophysiological model. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 151-188.
- Kuk F, Peeters H, Lau C. The efficacy of fractal music employed in hearing aids for tinnitus management. Hearing Review, 2010, 17(10): 32-42.
- 刘艳慧,唐艺芬,丁军,等.助听器的分形音乐程序治疗耳鸣的疗效观察.听力学及言语疾病杂志,2014,22(1): 97-99.
- Hann D, Searchfield G D, Sanders M, et al. Strategies for the selection of music in the short-term management of mild tinnitus. Australian and New Zealand Journal of Audiology, 2008, 30(2): 129-140.
- 汪璐,何培宇,潘帆.基于音乐数字设备接口技术的耳鸣康复分形声生成方法研究.生物医学工程学杂志,2014,31(4): 888-893.
- 徐媛媛,何培宇,陈杰梅.一种基于IFS分形算法和分解和弦的耳鸣康复音合成新方法.四川大学学报:自然科学版,2017,54(3): 517-522.
- Henry J A, Schechter M A, Zaugg T L, et al. Clinical trial to compare tinnitus masking and tinnitus retraining therapy. Acta Oto-Laryngologica, 2006, 126(S556): 64-69.
- 宋知用. MATLAB在语音信号分析与合成中的应用.北京:北京航空航天大学出版社,2013: 169-178.
- 吕多玉,何培宇,潘帆.医用蝉鸣声多样化合成的一种新方法.四川大学学报:自然科学版,2015,52(3): 567-572.
- 岳云.采用数字滤波器的音频系统的频域均衡(二)——均衡实例.电声技术,2000(1): 11-18.
- 肖海蓉.基于IFS分形算法的树木形态分析与实现.计算机仿真,2011,28(6): 274-279.
- Voss R F, Clark J. "1/f noise" in music: Music from 1/f noise. J Acoust Soc Am, 1978, 63(1): 258-263.
- Beauvois M W. Quantifying aesthetic preference and perceived complexity for fractal melodies. Music Percept, 2007, 24(3): 247-264.
- Li S W, He P Y, Chen J M. An adaptive tinnitus model based on least mean square algorithm//IEEE International Conference on Digital Signal Processing. London, UK: IEEE, 2017: 1368-1373.

收稿日期: 2017-05-04 修回日期: 2018-01-31

本文编辑: 李莅兰