

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2017.03.015

# 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

徐媛媛, 何培宇, 陈杰梅

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

**摘要:** 耳鸣是在无外界声源刺激下的一种主观感知, 在临床上十分常见. 习服治疗是目前公认的一种有效的耳鸣治疗方法. 研究表明, 具有相似却又不重复的分形音乐可以作为耳鸣习服治疗的治疗声源. 本文提出了一种基于 IFS(Iterated Function System)分形算法和分解和弦的耳鸣康复音合成新方法, 该方法将分形图形处理技术运用到耳鸣康复音的合成中, 使得生成的音符整体在可控范围内随机出现, 并且相邻音符在可调节的范围内波动, 可有效的避免音调突变现象. 此方法保留了图像信号中的分形特征, 实现了可控范围内的确定性与可预测性的统一; 在加入了分解和弦后, 音乐更加连贯. 试听结果表明, 该耳鸣康复音具有相似不重复、流畅且突变少的特点, 对耳鸣治疗有一定的参考价值.

**关键词:** 耳鸣; 习服治疗; IFS 算法; 分形; 分解和弦

**中图分类号:** TN912      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2017)03-0517-06

## A new method of synthesizing tinnitus rehabilitation sound based on IFS algorithm and broken chord

XU Yuan-Yuan<sup>1</sup>, HE Pei-Yu<sup>2\*</sup>, CHEN Jie-Mei<sup>3</sup>

(College of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Tinnitus is a sensation of sound without external stimulation and it is common on clinical. Tinnitus retraining therapy (TRT) is a recognized treatment of relieving tinnitus. Scientific researches show that some similar and unrepeatable music can be used as the sound of TRT. This paper proposed a new method of generating fractal tones based on IFS and broken chord. Applying this new method in the synthesizing could make all the notes within the scale and appeared randomly. Furthermore, the adjustability of neighboring notes avoided the tone mutation. By using this method, the tinnitus rehabilitation sound achieved a balance of predictability and randomness. Experimental results showed that it had obvious fractal characteristics and remained the fractal image features. By adding broken chords, the music turned into more coherent and mildly pleasant songs. So it had reference significance to the treatment of tinnitus.

**Keywords:** Tinnitus; TRT; IFS; Fractal; Broken chord

收稿日期: 2016-05-21

基金项目: 四川省科技支撑项目(2011SZ0123); 四川省科技支撑项目(2013GZ1043)

作者简介: 徐媛媛(1990-), 女, 硕士生, 研究方向为语音信号处理. E-mail: xyyscu@163.com

通讯作者: 何培宇. E-mail: hepeiyu@scu.edu.cn

## 1 引言

耳鸣为临床上常见的症状,由于病因复杂,发病机理尚不清楚<sup>[1]</sup>,所以其治疗方法的研究一直是耳科学界最前沿的研究课题之一.相关资料显示中国约有 1.3 亿耳鸣患者<sup>[2]</sup>,且耳鸣引起的注意力不集中、失眠及精神抑郁等现象正严重影响着人们的正常生活.耳鸣习服疗法于 1990 年由 Jastreboff 提出并在全世界引起了极大的关注,其原理是使患者放松对耳鸣的警惕,并适应或习惯耳鸣<sup>[3]</sup>.耳鸣习服疗法主要包括咨询和声治疗两个部分,其中声治疗因具有无损伤及低并发症等优点而深受广大患者欢迎<sup>[4]</sup>.以音乐为基础的声治疗已被证明可以有效地缓解耳鸣症状<sup>[5]</sup>.研究表明,将具有可预测性与随机性相统一的分形算法用于合成音乐,能较好的满足耳鸣治疗的需要<sup>[6]</sup>.因此利用分形算法合成音乐对治疗耳鸣有极为重要的意义.

但是,国内关于利用分形音乐治疗耳鸣的相关研究较少<sup>[7]</sup>,文献<sup>[7,8]</sup>虽然生成了相似不重复的音乐,但却存在音调突变、局部音乐递增、音乐不够流畅等问题.而丹麦唯听公司利用分形技术生成的音乐虽在临床上得到了一定的治疗效果<sup>[9]</sup>,但该公司生产的助听器主要适用于有听力损失的人群,并且价格昂贵,在国内很难推广.

针对上述问题,本文提出了一种基于 IFS 分形算法和分解和弦的耳鸣康复音合成新方法.该方法将分形图像处理的方法引入到音乐合成中,实现了所有音符在可控范围内随机的出现,且相邻音符在指定范围内波动,不存在突变情况.此方法在音乐中很好地保留了分形图像的特点,使得生成的分形音乐可预测且不重复,确保音乐具有相似性的同时又不具有记忆性.此外,本文采用多个音轨相互配合,并加入了利用分解和弦作为伴奏的音轨,使得音乐更加流畅优美,且不破坏音乐的分形特性,符合耳鸣康复音的基本特点,对耳鸣习服治疗具有借鉴意义.

## 2 IFS 分形算法与分解和弦

### 2.1 IFS 分形算法

分形是一类局部与整体具有自相似的对象,其本质是标度变换下的不变性. IFS 算法是分形图像压缩的理论基础<sup>[10]</sup>,其基本思想是把实物整体视为是其部分的一种仿射变换.

IFS 在分形图像处理领域有着广泛的应用,其本质是将待生成的图形看成是由与整体相似的图形经过相似变换或仿射变换拼接而成的.相似变换是指将图形在各个方向上以相同的比率进行变换.仿射变换是指不同方向上变换比率不同的一种变换,相似变换是一种特殊的仿射变换.仿射变换的数学表达式如式(1)所示.

$$\omega: \begin{cases} x' = ax + by + e \\ y' = cx + dy + f \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\omega$  表示仿射变换,  $a, b, c, d, e, f$  为仿射变换系数. 对于一个复杂的图形,仿射变换族  $\{\omega_n\}$  控制图形的结构和走势,  $\{\omega_n\}$  中每个仿射变换被调用的概率为  $P$ , 用来保证图形的随机性. 仿射变换系数和  $P$  构成了 IFS 码. IFS 码是生成分形图形的关键,根据不同的 IFS 码可以生成多变的图形.

本文以 Sierpinski 垫片的 IFS 生成为例,详细介绍 IFS 算法生成过程. Sierpinski 垫片可以看作是一个三角形被等分成四个部分,然后将中间的三角形抠去,再对剩余的三角形进行如上操作,如图 1 所示.

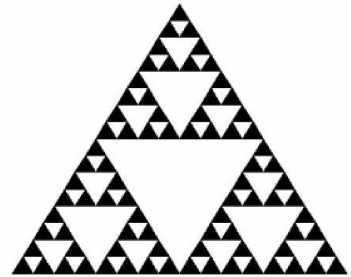


图 1 Sierpinski 垫片  
Fig. 1 Sierpinski triangle

从上图可以看到每个小三角形边长是原来三角形的一半并且进行了平移.由于平移距离不同,仿射变换共有三个. Sierpinski 垫片的仿射变换族可表示如下.

$$\begin{aligned} \omega_1: & \begin{cases} x' = 0.5x + 0y + 0 \\ y' = 0x + 0.5y + 0 \end{cases} \\ \omega_2: & \begin{cases} x' = 0.5x + 0y + 0.5 \\ y' = 0x + 0.5y + 0 \end{cases} \\ \omega_3: & \begin{cases} x' = 0.5x + 0y + 0.25 \\ y' = 0x + 0.5y + 0.5 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Sierpinski 垫片的 IFS 码如表 1 所示.

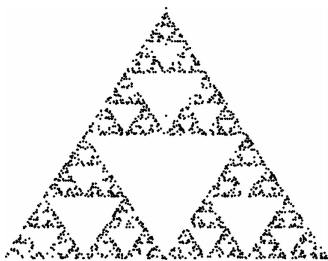
IFS 的生成过程是一个不断描点的过程,随着迭代次数的不断增多,图形也会越来越清晰.该算法不仅实现了局部与整体的自相似而且还实现了

生成位置的随机性与确定性的统一。

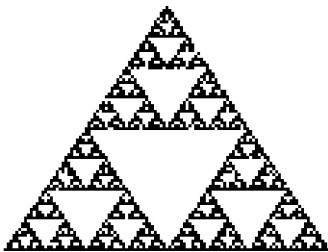
表1 IFS码  
Tab.1 IFS Code

$i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$	$e_i$	$f_i$	$p_i$
1	0.5	0	0	0.5	0	0	0.333
2	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0.333
3	0.5	0	0	0.5	0.25	0.5	0.334

图2是迭代次数分别为 $N=2000$ (图2(a)所示)和 $N=20000$ (图2(b)所示)生成的Sierpinski垫片图。由图2可以看出虽然迭代次数不同,但整体图像的轮廓固定,且随着迭代次数的增加,图像逐渐清晰,并且各个点的位置在可控范围内具有随机性,因此可以很好的满足了分形音乐确定性与不可预测、相似但不重复的特点。



(a)  $N=2000$



(b)  $N=20000$

图2 不同迭代次数的Sierpinski垫片  
Fig.2 Sierpinski triangle of different iteration

根据上述IFS算法的特点并结合耳鸣康复音的特点,本文将IFS分形算法运用到耳鸣康复音合成中,用于合成分形音乐。

## 2.2 分解和弦

分解和弦是和弦按顺序依次弹出的一种演奏方法,它在音乐伴奏方面具有广泛的应用。分解和弦具有很强的流动性,加入分解和弦后的音乐具有更强的连贯性,音乐更加优美舒畅。现有分形音乐合成方法大多都只针对分形算法和映射规则来对应生成音乐,并没有对这些音乐进行处理,这样会使音乐太过分散,听起来不够流畅,易使耳鸣患者产生不良情绪,不利于耳鸣的治疗。针对这一问题,

本文将利用分形算法合成的音乐作为主旋律,并结合主旋律特点合成分解和弦,将合成的分解和弦作为主旋律的伴奏,这样合成的分形音乐更加连贯。

## 3 基于IFS、分解和弦合成耳鸣康复音的过程

### 3.1 耳鸣康复音合成总体思路

音乐具有四大要素,即音的高低、音的长短、音的强弱、音色,其中音的高低即为旋律,音的长短和强弱共同组成了音乐的节奏。本文通过控制音调序列来生成旋律,将离散时间值序列映射为节奏,利用可调强弱与音色的MIDI(Musical Instrument Digital Interface)最终合成耳鸣康复音。图3为本文生成耳鸣康复音的流程图。

本文利用IFS分形算法生成分形图,再对图中的 $x$ 、 $y$ 变量分别按时间顺序记录并进行线性变换,将变换过后的坐标值映射到符合MIDI的音调值区域。 $x$ 变量映射的音调值作为第一音轨, $y$ 变量的映射作为第二音轨,有效的将图像信号信息保留到声音信号的不同音轨。根据乐曲每小节的节拍数对第一音轨的音调值合成分解和弦,将其作为第三音轨。对于节奏的处理,本文采用另一种映射规则来合成三个音轨的节奏。最后利用MIDI技术实现多音轨耳鸣康复音的合成。

### 3.2 基于IFS、分解和弦生成音调值序列

分形的基本特征是自相似。研究表明,利用自相似原理来构成音乐片段,可以逼真的模仿真实的音乐<sup>[7]</sup>。

IFS算法不仅实现了分形的自相似特点还在其中加入了随机特性,使得生成的分形图形状是可预测的,同时生成此形状过程中每个局部点坐标的走势是不确定的,能充分的展示可预测与不确定性的统一。根据IFS算法的以上特点,本文将IFS算法运用到分形音乐的合成中。将分形音乐用来丰富耳鸣康复音为耳鸣的习服治疗提供了新思路。

使用IFS算法生成分形图形的过程,其实质为根据仿射变换族和概率不断计算下一个点坐标的过程,通过计算IFS码及初始位置坐标即可生成分形图形。将分形图中的 $x$ 、 $y$ 变量按出现的时间顺序存储为两个离散序列,再分别对两个序列进行不同的线性变换,使音调序列值集中在中音区(即映射到MIDI所对应的48~83之间)。 $x$ 变量变换后的音调值序列作为第一音轨, $y$ 变量的音调值作为第二音轨。对第一音轨的音调值进行判断,若为每小结节拍数的整数倍,则在此小结加入以该初始音

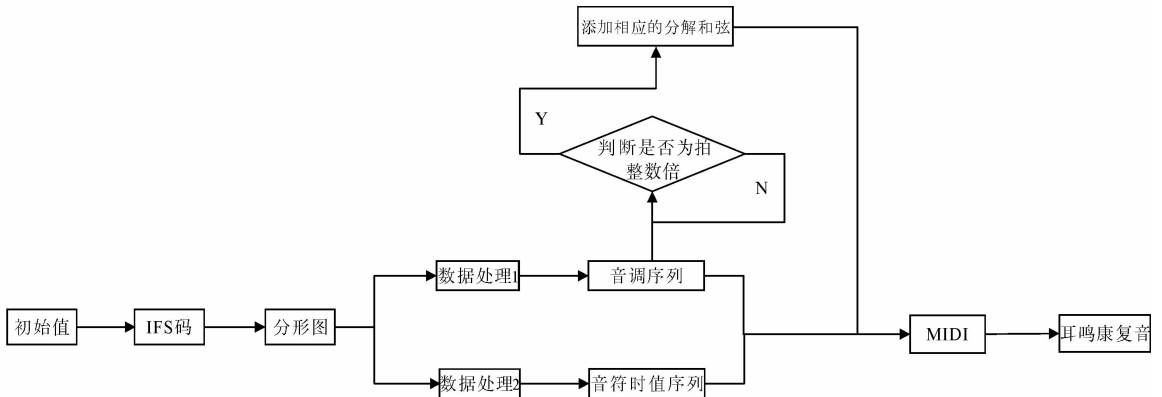


图 3 耳鸣康复音合成过程  
Fig. 3 The process of synthesizing tinnitus rehabilitation sound

为基准的分解和弦. 以 4/4 拍(四分之一音符为一拍, 每小结有四拍)为例, 依次取出主音轨的第  $i$  个音符, 若  $i$  可以被 4 整除, 那么取出与  $i$  对应的音调值(设取出的为  $n$ ), 在第三音轨的相同位置插入该音调值, 并使从  $i$  开始连续的三个音符音调值分别为  $n+4, n+2, n+4$ , 依次按此方法添加, 最终合成第三音轨.

经过处理后三个音轨相互配合, 第一音轨作为主音轨, 第三音轨作为伴奏音轨. 在加入了伴奏音轨后, 音乐节奏连贯, 整个音乐结构紧凑, 且符合分形特性.

### 3.3 基于 IFS 算法生成音符时值序列

节奏不仅包括音的长短还包括音的强弱, 对于音的长短本文将通过 IFS 算法生成的音符时值序列映射为每个音的长短, 音的强弱则通过控制 MIDI 参数来实现.

将按时间顺序存储的  $x, y$  变量对应取模值, 再对这些距离值取整并对 4 取余, 使得这些值变为只有 0, 1, 2, 3 的离散序列. 最后将这些值映射为 [0.125, 0.25, 0.5, 1] 这四个固定的值. 虽然这些距离值最后映射的值为有限个数的, 但由于每个点出

现的时间顺序具有随机性, 这样会让各离散值随机穿插, 使得离散数字的排列组合多变, 从而达到节奏变换不沉闷的作用.

本文将随机性加入到了音符时值的合成中, 增加了音符时值序列的不可预测性, 使节奏成为可预测与不可预测的统一, 并且在映射规则上引入了 1/8 音符, 使音乐旋律多变, 音乐节奏灵活.

对第一音轨和第三音轨采用统一节奏映射, 对第二音轨采用单独的映射规则. 通过这样的映射规则使合成的音乐各音轨间相互配合、层次分明, 音乐舒缓悠扬.

### 3.4 通过 MIDI 技术生成耳鸣康复音

将利用 IFS 算法并加入了分解和弦的音调值序列和基于 IFS 算法合成的音符时值序列存储起来, 并利用 MIDI 技术将各音轨音调与音符时值整合在一起从而生成耳鸣康复音. 同时可通过调节 MIDI 入口函数的参数改变音色、强度等其他音乐要素. 图 4 为从利用该方法合成的耳鸣康复音中截取的五线谱片段.



图 4 耳鸣康复音五线谱片段  
Fig. 4 Stave of a music clip in this paper

## 4 仿真结果及试听结果分析

### 4.1 仿真结果分析要素

本文主要从“1/  $f$  波动”和分形结构这两个角

度来对合成的音调值序列及音符时值序列进行分析, 并通过仿真验证其合理性.

“1/  $f$  波动”是一种具有舒适感的波动<sup>[5]</sup>, 它的局部具有无序性而整体呈现相关性. 谱密度  $S(f)$  是

信号时间相关性的一个重要量度,  $S(f)$  表示信号在频率  $f$  处均方根的变化, 其关系可表示如下式.

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

研究表明, 当  $\beta$  在  $[0.5, 1.5]$  范围内时, 可将信号看作是“ $1/f$  波动”, 大多令人愉悦的音乐都是“ $1/f$  波动”<sup>[8]</sup>. 对式(3)两边取对数得到式(4).

$$\lg(S(f)) \propto -\beta \lg(f) \quad (4)$$

通过分析系数  $\beta$  可以判断音乐是否符合“ $1/f$  波动”特性.

分形维度表征了分形在几何变换下的标度无关性. 乐曲的分形特征可以用相邻两个音符的音程  $i$  和该音符出现的次数  $F_i$  表示, 它们的数学关系式表示如下式.

$$F_i = c/i^D \quad (5)$$

其中,  $D$  表示分形维度<sup>[10]</sup>. 乐曲的分形维度可以很好的体现分形音乐的相似不重复特性.

### 4.2 音调值分析

经过变换后的第一音轨及第二音轨音调序列如图 5 所示.

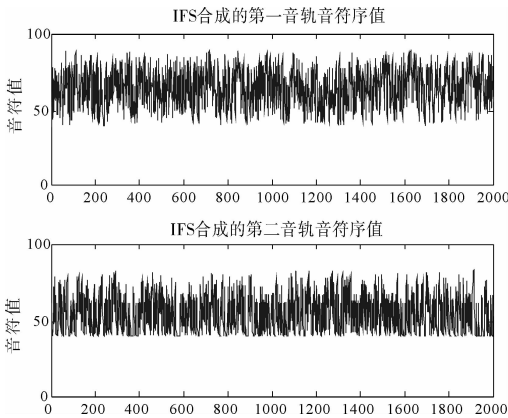


图 5 第一、二音轨音符序列值

Fig. 5 Pitch value sequences of the first two audio tracks

观察图 5 可发现, 音调序列具有整体的相似性而局部却又不尽相同的特点.

分别对音轨一、二的音调值序列进行“ $1/f$  波动”分析如图 6 所示. 图中“\*”表示实际值, “—”表示拟合值, 横轴表示迭代点数的对数值、纵轴表示音调值序列的功率谱密度  $S(f)$  的对数变换.

由图 6 可得, 拟合曲线斜率  $\beta$  分别为 0.9373 和 0.9378, 在 0.5~1.5 范围内, 音调值服从“ $1/f$  波动”. 所以基于 IFS 和分解和弦合成的音调值序列是一种符合音乐特性的波动, 并具有音乐的整体稳定性.

为了分析音乐的突变和重复程度, 本文对生成的乐曲片段的音程  $i$  和出现次数  $F_i$  进行统计, 如表 2 所示.

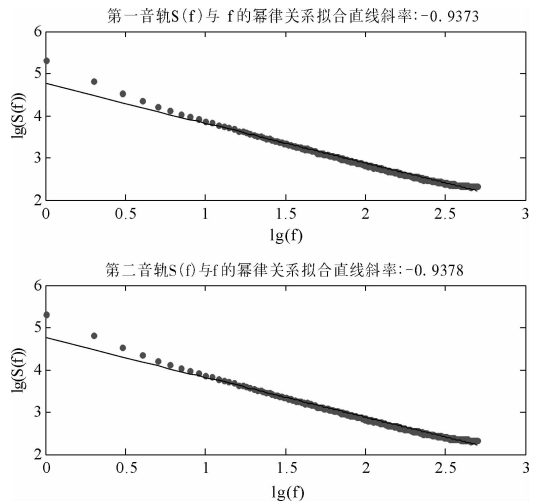


图 6 音调值序列功率谱密度拟合曲线

Fig. 6 Power spectra density curve fitting of a pitch value sequence

表 2 音程及出现次数统计

Tab. 2 Relationship between intervals and their frequency

音程 $i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
频率 $F_i$	16	47	58	73	66	67	52	61	53	47

通过观察表 2 可知, 相同音符(即音程为 0)约占总体的 0.03%, 出现次数较少; 音程为 1(即表示相邻两个音符递增或者递减)的次数为 0.08%, 且相较文献[11]的音乐有明显的下降, 保证了音乐不存在局部连续递增或递减现象. 音程为 7, 8, 9 的音符占总体的 0.1% 左右, 说明音调突变不多, 音乐片段整体较流畅, 没有很大的跳跃感.

分别抽取音程为 2, 4, 8 的音符组成新的序列, 不同音程组成的序列仍具有相似性, 这体现了分形的局部与整体的自相似性. 音程及音符频率变换后的拟合曲线如图 7 所示. 拟合后的斜率较文献[8]有明显的降低, 说明提取音程后的音乐之间变化较小, 音乐流畅度增加.

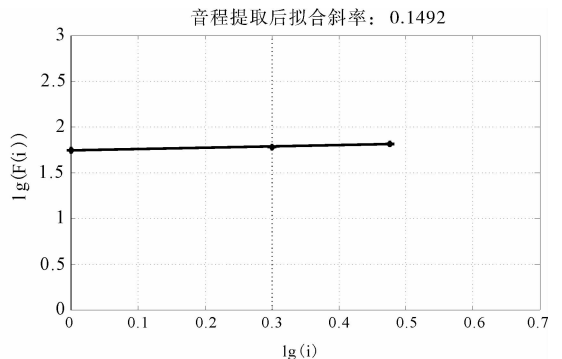


图 7 音程提取拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of notes extracted from original sequence

### 4.3 音符时值分析

目前,对分形音乐的分析,大多集中在对音值的分析,而鲜有提及对音符时值的分析.文献[11]对大量的西方古典音乐进行了分析,论证了音乐节奏的“ $1/f$ 波动”特性,并给出了 $\beta$ 的取值范围 $[0.5, 1]$ .本文将这一规律运用到节奏的合成中,使耳鸣康复音在节奏上也符合音乐的审美特性.

图 8 为基于 IFS 合成的音符时值序列的谱密度拟合曲线,拟合斜率 $\beta = 0.9196$ 在上述范围内,因此符合音乐的审美特性.

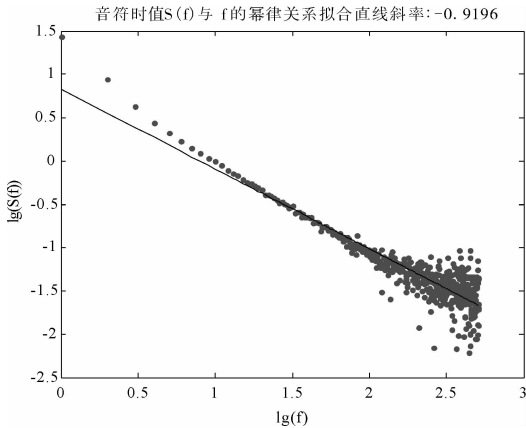


图 8 音符时值功率谱密度拟合曲线

Fig. 8 Power spectra density curve fitting of the duration of notes

### 4.4 仿真试听

文献[7,8]均是利用分形生成耳鸣康复音,本次试听实验分别采用文献[7,8]生成的分形音乐 frag\_1、frag\_2 以及本文合成的音乐 frag\_3,让 30 名试听人员分别针对音乐的重复度、突变度、流畅度、舒缓度等四项标准在 0~10 范围内进行打分.分数越高表示该项特征越强,将所有评分取平均值如表 3 所示.

表 3 音乐评分表

Tab. 3 The scores of music

音乐片段	frag_1	frag_2	frag_3
重复度	5.2	3.1	3.3
突变度	6.3	4.6	2.7
流畅度	4.5	5.2	7.1
舒缓度	3.5	3.8	5.7

通过对试听人员的听觉感受统计得知,大部分人能感到 frag\_1 的音乐具有明显的突变性,而多数人表示 frag\_2 的试听音乐重复性减小,但却存在局部的音阶攀升、音乐的舒缓性略弱的现象.而对于本文合成的音乐则表示音乐连贯性较好,且具有一定的舒缓放松的作用.

以上试听结果表明基于 IFS 和分解和弦合成

的分形音乐具有相似但不重复的特征,并且音乐节奏舒缓,可以起到放松作用.该试听结果是对康复音的主观检验,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较好的治疗效果.

## 5 结论

本文提出了一种基于 IFS 分形算法和分解和弦的耳鸣康复音合成新方法.该方法不仅保证了耳鸣康复音具有相似但不重复的特点,还使得生成的音调值序列和音符时值序列符合“ $1/f$ 波动”特性.在加入了分解和弦之后使得耳鸣康复音更加流畅舒缓,可以使听者身心得到一定的放松.因此,本文提出的音乐合成方法对运用习服疗法治疗耳鸣具有一定借鉴意义.

### 参考文献:

- [1] 龚晓龙,何培宇,潘帆.一种蝉鸣声数字化建模的改进方法[J].四川大学学报:自然科学版,2015,52(4):819.
- [2] 王洪田,黄治物,李明,等.耳鸣诊治基本原则与耳鸣习服疗法[J].听力学及言语疾病杂志,2007,15(5):346.
- [3] 龚树生,俞晴.耳鸣诊疗研究的现状[J].中华耳鼻咽喉头颈外科杂志,2012,47(9):788.
- [4] 陈丹萍,崔勇.耳鸣习服疗法[J].国际耳鼻咽喉头颈外科杂志,2014,38(6):351.
- [5] 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[J].生物医学工程学杂志,2015,32(6):1329.
- [6] Sweetow R W, Sabes J H. Effects of acoustical stimuli delivered through hearing aids on tinnitus[J]. J Am Acad Audiol, 2010, 21(7): 461.
- [7] 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[J].生物医学工程学杂志,2014,31(4):888.
- [8] 程冉,何培宇,陈杰梅.一种基于 LS 文法的耳鸣康复音合成新方法[C]//第九届全国信号和智能信息处理与应用学术会议专刊.北京:中国高科技产业化研究会,2015.
- [9] Hoare D J, Searchfield G D, El Refaie A, et al. Sound therapy for tinnitus management: practicable options[J]. J Am Acad Audiol, 2014, 25: 62.
- [10] 朱华.分形理论及其应用[M].北京:科学出版社,2011.
- [11] Levitina D J, Chordia P, Menon V. Musical rhythm spectra from Bach to Joplin obey a  $1/f$  power law[J]. P Natl Acad Sci USA, 2012, 109: 3716.