



综合实验一

音乐合成

人的听觉可以感受到的声音大体可划分为噪声、语音、乐音等几种类型。这里将介绍乐音的基本概念，并用 Matlab 实现音乐合成系统。

1



背景知识

1. 乐音特征

- 音乐是乐音随时间流动而形成的艺术。用通信与电子技术的术语解释就是周期信号频率随时间节奏变化的一种表述。乐谱上的每个音符表达了此时此刻规定出现的信号频率和持续时间。
- 乐音的基本特征：**基波频率**、**谐波频率**和**包络波形**。
- 掌握乐音的规律，就可以借助电子系统从软件或硬件两种角度模仿各种乐器产生的音乐，实现电子音乐系统。

电子音乐系统是一门交叉技术科学，涉及计算机、集成电路、信号处理、声学等多种领域，本实验只是简单的入门介绍。

2

2. 乐音基波构成规律

用C, D, E, F, G, A, B大写英文字母表示每个音的**音名**或称为**音调**。

当指定某一音名时，它对应固定的基波信号频率。

| | | | |
|----------------|------------------|-----------|----------------------------|
| ^b E | E e ² | 622.25 Hz | 659.25 Hz |
| ^b D | D d ² | 554.36 Hz | 587.33 Hz |
| | C c ² | | 523.25 Hz |
| ^b B | B b ¹ | 466.16 Hz | 493.88 Hz |
| ^b A | A a ¹ | 415.30 Hz | 440 Hz (f_{A1}) |
| ^b G | G g ¹ | 369.99 Hz | 392 Hz |
| | F f ¹ | | 349.23 Hz |
| ^b E | E e ¹ | 311.13 Hz | 329.63 Hz |
| ^b D | D d ¹ | 277.18 Hz | 293.66 Hz |
| | C c ¹ | | 261.63 Hz (中央C, f_{C1}) |
| ^b B | B b | 233.08 Hz | 246.94 Hz |
| ^b A | A a | 207.65 Hz | 220 Hz (f_{A0}) |
| ^b G | G g | 184.99 Hz | 196 Hz |
| | F f | | 174.61 Hz |

由“**十二平均律**”可计算出每个琴键对应的频率。从小字组a到小字一组a¹之间共有12个键，其中7个白色键，5个黑色键，其频率值计算规律为相邻音倍乘系数

$$K = 2^{\frac{1}{12}} = 1.05946309$$

例如从 f_{A0} 可导出 f_{A1} 的频率为：

$$220 * K^{12} = 440$$

钢琴键盘和相应频率

可以看到在EF之间和BC之间没有黑键，称为相隔半音，而其他白键之间都有黑键相隔，称为相隔全音。升高半音用“#”表示，降低半音则用“b”表示。

3

唱名的概念：do、re、mi、...

每个唱名并未固定基波频率，当指定乐曲的音调时，才能知道此时唱名对应的音名，也即才能确定对应的频率值。

例如，若指定乐曲为C调，此时唱名与音名对应关系为：

| | | | | | | | | |
|----|---|---|----|---|---|---|----|---|
| | | | 半音 | | | | 半音 | |
| 唱名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | i |
| 音名 | C | D | E | F | G | A | B | C |

(a) C调唱名与音名之对应

它的1对应C，也即基波频率为261.63Hz。全部唱名对应键盘的白色键。3、4分别对应E、F，两者之间是半音阶。7、i之间对应B、C，也属半音。其它唱名之间都为全音。

4

若改为F调，此时唱名与音名对应关系为：

| | | | | | | | | |
|----------------|---|---|----|-----------|---|---|----|---|
| | | | 半音 | | | | 半音 | |
| 唱名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | i |
| 音名 | F | G | A | \flat B | C | D | E | F |
| (b) F调唱名与音名之对应 | | | | | | | | |

它的1对应F，也即基波频率为349.23Hz。为保持3、4之间半音的规律，4对应黑键 \flat B。

小练习：根据下面的简谱，写出每个唱名对应的基波频率值。

（注：该曲的曲调为F。）

1=F $\frac{2}{4}$ | 5 $\underline{56}$ | 2 - | 1 $\underline{16}$ | 2 - |

5

3. 乐音谐波的作用——音色

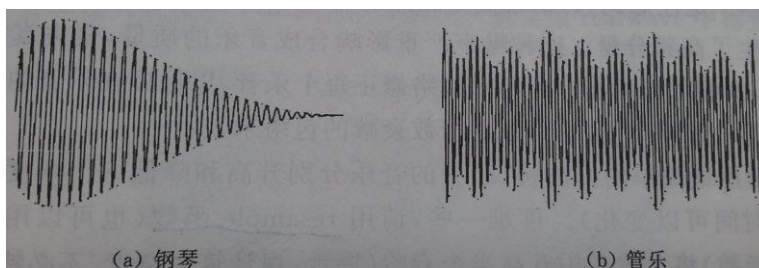
- 当指定音名（调）后仅指定了乐音信号的基波频率，谐波情况并未说明。在音乐领域中称谐波为泛音，由谐波产生的作用称为音色变化。
- 各种乐器都有自己的谐波分布规律，因此频谱结构各异，使得听上去会有不同。在制作电子乐器时，应尽力模仿实际乐器的谐波结构。

稍后将看到，若只考虑乐音的基波成分，每个音名对应不同频率的正弦波；当引入谐波分量之后，波形不再是简单的正弦函数，例如可能接近矩形、锯齿波等。

6

4. 乐音波形包络

不同类型的乐器乐音的包络形状也不相同，在电子乐器制作中通常称此包络为**音形**或**音型**。



在乐音合成实验中，为简化编程描述，通常把复杂的包络函数用少量直线近似，于是，乐音波形的包络呈折线。

7

5. 音调持续时间

- 每个音调都可以用连续的一段正弦信号并带有一小段静音（停顿）来表示，停顿是为了保证我们可以区分开连续的相同音调。
- 每个音调的持续时间取决于它是全音符、二分音符、四分音符、八分音符等。每个音符之后的停顿时间应是相同的。在乐谱中，更长一些的停顿用休止符表示。

例： $1=F \frac{2}{4} \quad | \quad 5 \quad \underline{\underline{56}} | \quad 2 - | \quad 1 \quad \underline{\underline{16}} | \quad 2 - |$

其中 $\frac{2}{4}$ 表示每小节二拍，一个四分音符一拍，该段乐曲一拍大约0.5s。

8

6. 音符的叠接

某些艺术家演奏乐器时相邻的音符会有些重叠，也即当一个音调消失的时候，另一个被演奏出来，这样听起来会更连续，较少断音。

数学的表示就是两个信号有些重叠。

这与之前要求的停顿并不矛盾，叠接时两个信号的幅度差别必须足够大以保证被区分开。

9

音乐合成综合实验


1. 简单的合成音乐

1=F $\frac{2}{4}$ | 5 $\widehat{56}$ | 2 - | 1 $\widehat{16}$ | 2 - |

(1) 根据简谱和“十二平均律”计算各个乐音的频率，在matlab中生成幅度为1，抽样频率为8kHz的正弦信号表示这些乐音(注：该段乐曲一拍大约0.5s)。用sound函数播放每个乐音，听一听音调是否正确。

用这一系列乐音信号拼出第一小节，注意控制每个乐音持续时间要符合节拍，用sound函数播放合成的音乐，听听感觉如何。

10



(2) 可以注意到(1)的乐曲中相邻乐音之间有杂声，这是由于相位的不连续性产生了高频分量，严重影响合成音乐的质量，丧失真实感。为了消除它，可以通过包络（如梯形）来修正每个乐音，以保证乐音的邻接处信号幅度为0。


(3) 将(2)中的音乐分别升高和降低八度。

(4) 试着在(2)的音乐中增加一些谐波分量，听一听音乐是否更有“厚度”了。注意谐波分量的能量要小，否则掩盖住基音导致听不清音调。看看加入谐波之后的波形。

(5) 自选其他音乐合成。

11

2. 用傅里叶级数/变换分析音乐




现在开始处理真实的音乐信号。用 `load` 命令载入文件 `guitar.mat`。

画出两个变量的波形，其中 `realwave` 是从一段吉他乐曲中截取下来的真实信号，`wave2proc` 是用信号处理方法得到的这段信号的理论值。

(1) 用 `wavread` 函数载入 `fmt.wav` 文件，播放出来听听效果如何，是否比刚才合成音乐真实多了？

12



(2) 如何从真实值`realwave`中得到待处理的`wave2proc`? 这个过程可以去除真实乐曲中的噪声, 对于正确分析音调非常重要。

(提示: 从时域做, 可使用`resample`函数。)


(3) 这段音乐的基频是多少? 是哪个音调? 请用傅里叶级数或变换的方法分析它的谐波分量是什么。

(4) 再次载入`fmt.wav`, 编写一段程序, 自动分析出这段乐曲的音调(包括基频和谐波分量)。

(注: 如果觉得太难, 可手工标定出每个音调的起止时间。)

13

3. 基于傅里叶级数/变换的合成音乐



现在进入合成音乐的高级境界, 要用演奏`fmt.wav`的吉他合成出一段音乐。

(1) 利用第2部分中第(3)题得到的谐波信息再次完成第1部分中的第(4)题, 听一听是否像演奏`fmt.wav`的吉他演奏出来的?

(2) 也许(1)还不是很像, 因为对于一把泛音丰富的吉他而言, 不可能每个音调对应的泛音数量和幅度都相同。通过第2部分的第(4)题, 已经提取出`fmt.wav`中的很多音调, 大致了解了这把吉他的特征, 现在就用这些信息演奏第1部分的那段音乐吧(也可自选音乐)。

(注: 如果音调信息不够, 可利用相邻音调的信息近似。)

14