

2015春信号与系统大作业之“小白鲸找妈妈”

谷源涛

July 2, 2015

1

周五早上不到六点，华小强就醒了。想到第一节课是“信号与系统”，他禁不住出声来。

突然，远处传来一阵尖厉的叫声……

“救我！”

2

华小强顺着声音找去，一路找到了北京动物园的海洋馆。映入眼帘的一幕让他大吃一惊……



图 1: 北京海洋馆的小白鲸

这尖叫声分明就是从小白鲸的口中发出的！他穿过熙攘的人群，来到小白鲸面前，而小白鲸也泪眼汪汪的看着他，又大喊了一声：

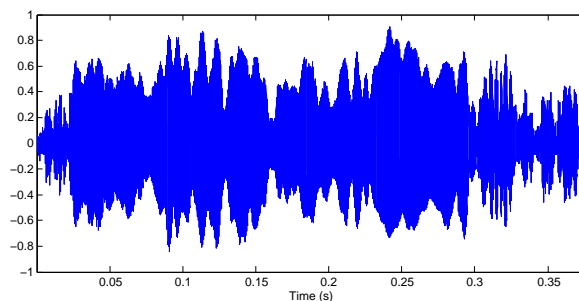


图 2: 小白鲸的歌声（整体）

虽然听不懂是什么意思，但从小白鲸的表情、语气和语调，他敏锐地判断出“小白鲸要找妈妈！”

怎么办？

3

想了整整一周，华小强决定：要帮助小白鲸找到妈妈，并把小白鲸的话转告诉她！

他再次来到海洋馆，一拉自己的左耳朵，以44.1K的采样率，仔细看了看小白鲸叫声的波形……

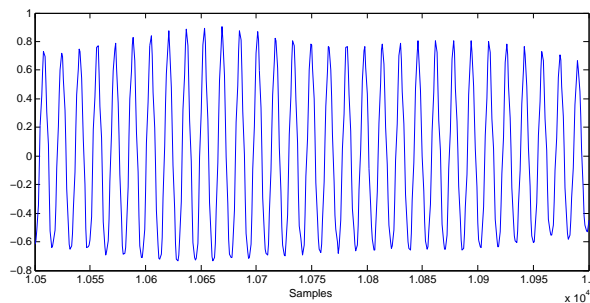


图 3: 小白鲸的歌声（局部）

“这是一个周期信号……也许，我只要把它的频率告诉鲸妈妈，她就能听

懂自己的孩子”。想到这，华小强立刻估计出这个信号的周期。

他兴奋地跑到渤海湾，掏出信号发生器和电声换能器，对着大海播放……¹

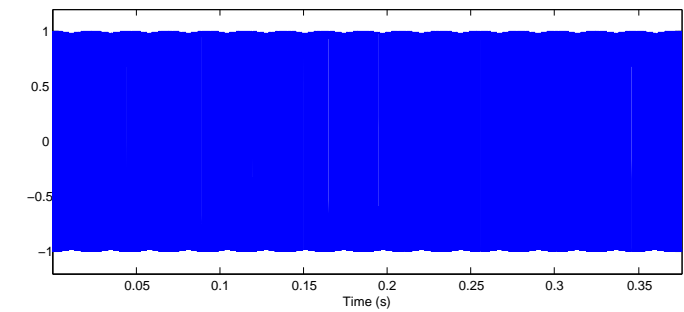


图 4: 模拟白鲸歌声的单频信号（整体）

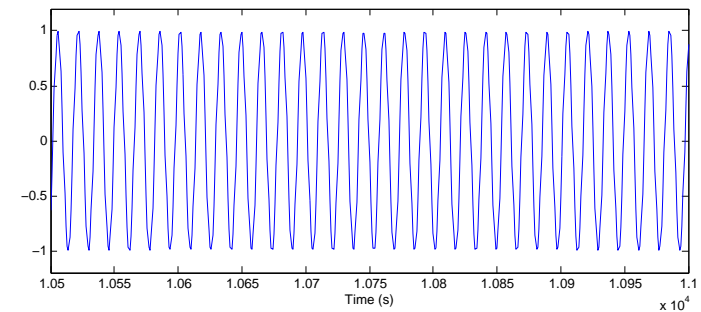


图 5: 模拟白鲸歌声的单频信号（局部）

没有任何回音。

华小强并不觉得奇怪，毕竟，自己都能听出来这俩音相差太多了！

4

又是星期五，华小强来到海洋馆，又听到了小白鲸凄婉的叫声。他猛拉自己的右耳朵，一个汉明窗从天而降，在时域波形上加权并滑动；电光火石之间，小强看到了时频平面上

¹第1题。

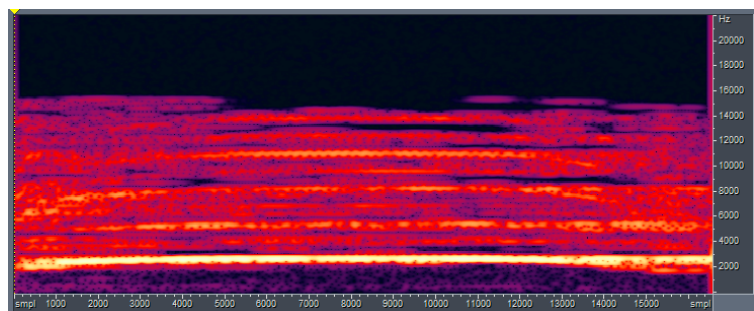


图 6: 白鲸歌声的时频图

频率在变化！

小强敏锐地观察出：按频域特征，叫声可分为三段。其中4000点至12000点之间频率恒定；4000点之前频率单调增加；而12000点之后，频率单调减小。他迅速估计出0时刻、4000时刻和快到结束时（16000时刻）的瞬时频率。

小强又一次来到了渤海湾，他掏出计算机写了一段代码，生成了变频信号，并对着大海播放……²

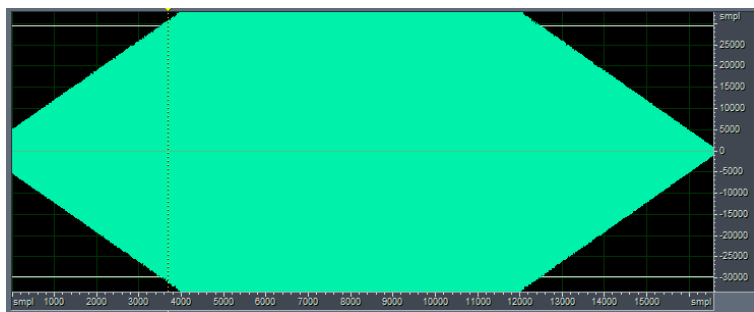


图 7: 模拟白鲸歌声的变频信号（整体）

²第2题

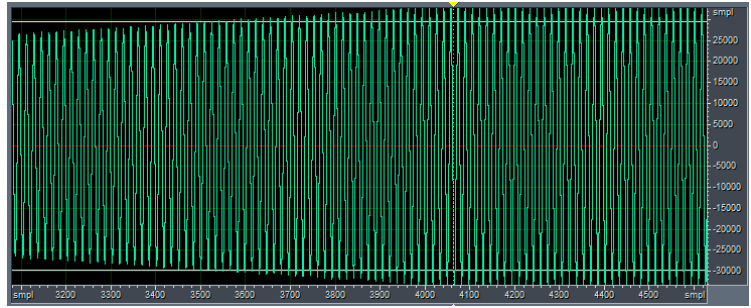


图 8: 模拟白鲸歌声的变频信号（局部）

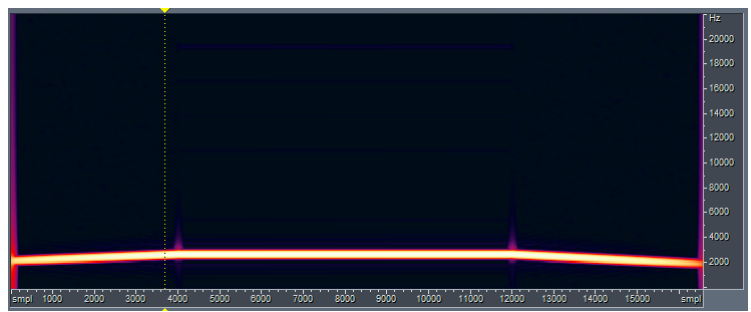


图 9: 模拟白鲸歌声的变频信号（时频图）

海水开始翻腾，白鲸妈妈、蓝鲸妈妈、虎鲸妈妈都游到岸边……大家急切地问小强“是我的孩子吗？”

……

5

小强并不气馁。他下个周五再次来到海洋馆，一会拉拉左耳朵，一会扭扭右耳朵……

谐波分量？多个频率？他迅速合成了这样一个信号……³

³第3题

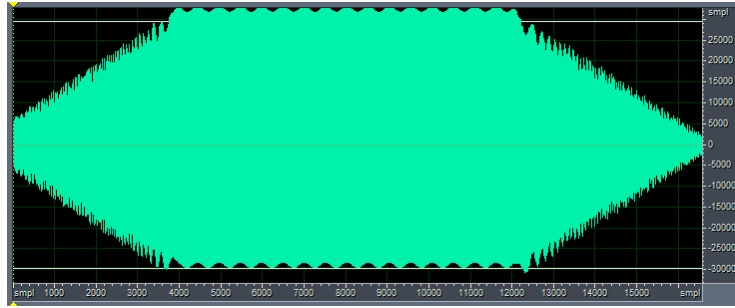


图 10: 模拟白鲸歌声的多变频信号（整体）

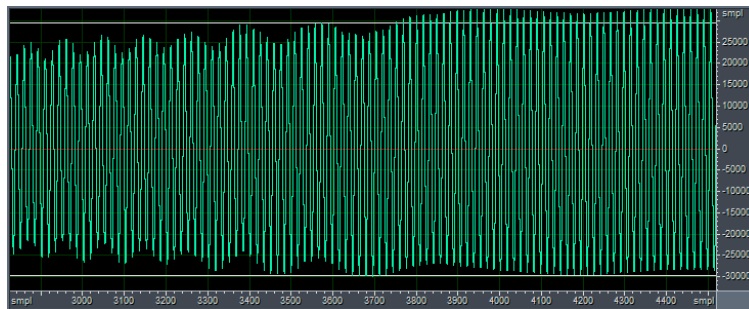


图 11: 模拟白鲸歌声的多变频信号（局部）

虽然时域很难看，但时频平面上表现为

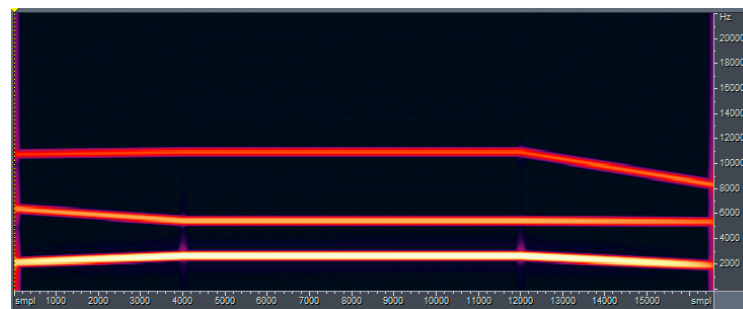


图 12: 模拟白鲸歌声的多变频信号（时频图）

当这个声音在渤海湾想起的时候，白鲸妈妈惊喜地喊道“这是我的孩子！”

但是，鲸妈妈好像有些怀疑“我的孩子在哪儿里？他好像在一个很远很远的地方，我感觉不到他的真实！”

6

这个周五的天空灰蒙蒙的。小强又来到小白鲸面前。他有些沮丧：为什么自己合成的声音还是不像呢？

抬头望着海洋馆空旷的大堂，小白鲸的叫声再次响起。

“混响！因为我没有合成大堂里的回声效果，所以白鲸妈妈判断不出小白鲸在哪里！”

小强立刻掏出计算机，启动cooledit pro，调用混响功能……这次看起来确实不错……⁴

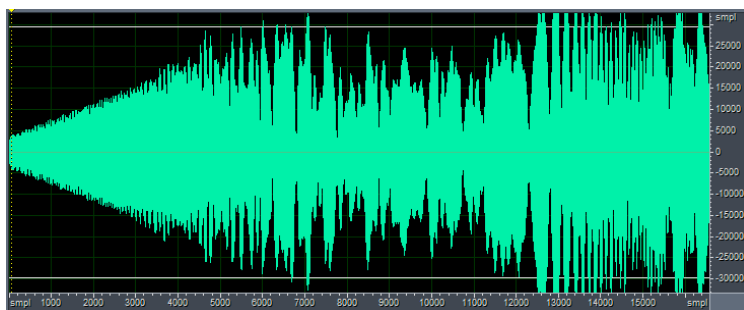


图 13: 模拟白鲸歌声的多变频混响信号

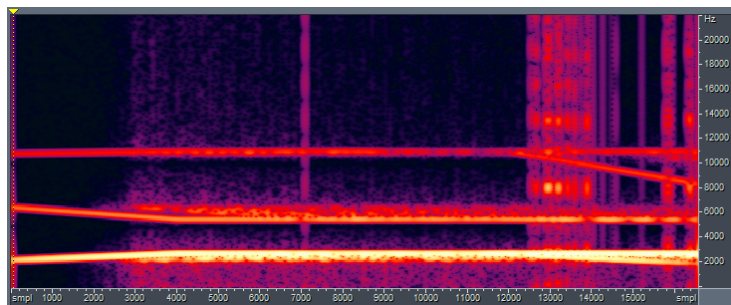


图 14: 模拟白鲸歌声的多变频混响信号（时频图）

7

白鲸妈妈听到小强带来的声音后，一跃而起飞出水面，向着海洋馆的方向飞

⁴第4题

去……



图 15: 大白鲸 (海报)

8

“老师，你现在知道我为什么周五上午总是迟到了吧！”

9 作业和要求

要求提交报告和源程序。截止时间是7月13日（周一24:00），通过网络学堂作业形式提交。

要求各人独立完成。禁止任何形式的抄袭。任何抄袭、剽窃等学术不端行为必将受到严厉打击。

1. 从信号角度感受小白鲸的歌声，并用单频信号进行模拟。
 - (a) 读入whalesong.wav文件，听一听声音；绘制波形（如图2和3），解释波形和声音的关系；
 - (b) 如果要用一个单频信号模拟（近似）上述声音，请计算该信号的频率；
 - (c) 用计算得到的频率合成一个单频信号，绘制波形（如图4和5），听听声音，解释和白鲸的歌声有何异同；

- (d) 将上述单频信号保存为synfixed.wav文件。
2. 从时频平面观察小白鲸的歌声，并用变频信号进行模拟。
- (a) 读入whalesong.wav文件，绘制时频图（如图6），解释其含义；
 - (b) 如果要用一个包络和频率都随时间变化的单频信号模拟上述声音，请描述该频率变化的特征（参考第4节第3段）；
 - (c) 用上题结果合成一个变频信号，绘制波形（如图7和8）和时频图（如图9），听听声音，解释和白鲸的歌声有何异同。
 - (d) 将上述单频信号保存为synsingle.wav文件。
3. 从时频平面仔细观察小白鲸的歌声，并用多变频信号进行模拟。
- (a) 认真观察whalesong的时频图（如图6），思考什么结构的合成信号能更好的模拟它；
 - (b) 参考第2题，如果允许用多个包络和频率都随时间变化的单频信号模拟白鲸歌声，请描述这些频率变化的特征（参考第2题解答）；
 - (c) 用上题结果合成一个多变频信号，绘制波形（如图10和11）和时频图（如图12），听听声音，解释和白鲸的歌声有何异同。
 - (d) 将上述单频信号保存为synmulti.wav文件。
4. 揣摩小白鲸唱歌的环境，并模拟其混响效果。
- (a) 戴上耳机闭上眼，用心灵感受小白鲸歌声里的混响效果，思考如何模拟混响效果（参考图13和14）；
 - (b) 使用Cooledit处理上题的合成音，模拟混响效果，试听结果，并保存为synmultireverb1.wav文件；
 - (c) 设计一个产生混响（产生回声）的滤波器，对上题的合成音进行处理，试听结果，并保存为synmultireverb2.wav文件；
 - (d) 解释混响后的多变频声音和白鲸的歌声有何异同。

10 信号处理方法简介

10.1 时域加窗

我们感兴趣的信号往往无限长，但受资源所限，我们只能截取它的一段（即用无限长信号乘以矩形窗）进行处理。在时域（无限长信号）和矩形窗相乘，在频域原（无限长信号的）频谱则和矩形窗的谱（Sa）卷积。Sa的旁瓣很高，意味着把（无限长信号的）谱向两侧做（严重）混叠，所以直接计算有限长信号的谱并不能很好的估计原（无限长）信号的谱。

如果用某些非矩形的窗截取（在频域和能量更集中的谱卷积）则能极大地改善频谱估计的质量，这就是时域加窗。常见的窗函数包括升余弦窗、hanning窗、blackman窗、高斯窗等。

10.2 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换（Short-time Fourier Transform, STFT）就是对信号加窗后再做傅里叶变换，而窗的位置可以变化，从而度量不同时间点上的能量在频域的分布，或者理解为不同频率点上的能量在时间上的分布，再或者，信号能量在时频平面上的分布。

$$\text{STFT}_w\{f(t)\} = F(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt$$

其中 $w(t)$ 是一个以0为中心的时间窗，如果选用宽为 T 的矩形窗的话，则有

$$w(t) = \begin{cases} 1/T, & |t| < T/2; \\ 0, & \text{elsewhere.} \end{cases}$$

11 文件操作和绘图工具介绍

可以用MATLAB编程实现，可能用到的专业功能函数如下表所示。

函数名	类型	说明
wavread	MATLAB标准	将wav文件中的数据读入内存
wavwrite	MATLAB标准	将内存中的数据写入wav文件
plot	MATLAB标准	绘制波形
sound	MATLAB标准	播放声音
window	MATLAB标准	窗函数
spectrogram	MATLAB标准	短时傅里叶变换并绘图

也可以用C语言实现，附件软件包通过C调用了MATLAB的专业功能函数，供参考使用。

致谢

软件21的耿正霖同学设计了“C语言调用MATLAB的例程”，并写了详细的说明和代码注释，在此表示诚挚的感谢！

参考资料

1. 郑版《信号与系统》上册§5.8(2)频率窗函数的运用
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Window_function
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Short-time_Fourier_transform
4. 夏季小学期MATLAB课件