

人耳对信号频率瞬时变化的听觉响应研究

张叔英 孙 勇 孙耀秋

(中国科学院上海声学实验室, 上海, 200032)

1992年6月11日收到

摘要 从探讨人耳在噪声背景中听测具有复杂时间-频率结构的主动声呐信号的模型出发, 研究了人耳对信号频率发生短时间变化的听觉敏感性. 根据在 850—1130Hz 频段内的测量结果, 得出了人耳听觉对频率变化响应的模糊区域由 $\tau\Delta F=1-2$ 决定, 这里 τ 是频率发生变化的时间间隔, ΔF 为频率变化的差值. 当 $\tau\Delta F\leq 1$ 时, 人耳感觉不到频率短时间的变化; 当 $\tau\Delta F\geq 2$ 时, 人耳不仅能明显分辨频率发生过短时间的变化, 而且能对两个频率有不同的音调感觉.

A study of the auditory response to transitions between signal frequencies

ZHANG Shuying SUN Yong and SUN Yaoqiu

(Shanghai Acoustics Laboratory, Academia Sinica)

Received June 11, 1992

Abstract For the study of detecting sonar signals with complex time-frequency compositions under a noise-background by human auditory system, the problem of auditory response to the transition between signal frequencies has been examined through a number of tests. According to the results of measurement within the frequency region of 850—1130 Hz, an equation ($\tau\Delta F=1-2$) to define the ambiguity region of responding to frequency transitions by human auditory system is found, where ΔF and τ are the difference and duration of the transition between two frequencies, respectively. When $\tau \cdot \Delta F \leq 1$, the human auditory system hardly can sense the transition between two frequencies, however when $\tau \cdot \Delta F \geq 2$, not only can clearly sense the transition but the different tonalities of two frequencies as well.

一、引 言

在近代主动声呐检测中, 常常使用脉冲内频率按一定时间规律变化的复杂信号, 如熟知的线性调频信号^[1]或跳频信号^[2]等作为发射信号, 并通过相应的匹配滤波器处理而实现对回波信号的最佳接收. 在实际情况下, 声呐操作者除了从显示器荧光屏上观测经过处理后输出的回波信号以外, 还需要直接听测输入的回波信号, 然后再有把握地作出探测目标存在与否的判断.

从听测的角度来看,一个有兴趣的问题是:在噪声背景中,人耳对一个脉冲内频率变化的复杂信号和对一个脉冲内频率不变的简单信号的听测性能有何不同.可以设想,如果人耳能分辨出复杂信号的频率变化规律(即音调模式),则人的记忆就能把这个已知的模式作为参考信号储存起来,因此有可能对听到的这个发射信号的回波音调进行模式识别,从而实现“音调相关”处理,或称 PDMP 处理^[3].这将提高在噪声背景中人耳听测回波信号的能力.但是如果人耳不能分辨复杂信号的频率变化规律,那么只能从能量检测的观点去考虑噪声背景中的听测问题^[4],并且,由于复杂信号的频谱展宽而听测效果可能会变差.

显然,为了研究人耳的听测模型,首先要搞清楚的问题是:人耳能否感觉到在一个短时间内信号频率发生变化,具体地说,这个时间多长,是否与频率变化的差值有关,是本文所要讨论的主要问题.

Wier 等(1977)的结果表明,人耳听觉系统的频率分辨率可达0.1—0.2%,即人耳能感觉到在1000Hz 附近1—2Hz 的声波频率变化^[5].但这是对听测连续声波而得出的结果,正如 Durrant 等(1984)所指出,判断不同频率的瞬时变化是相当困难的^[6].实际上,这个问题涉及到对具有复杂频谱和时间模式的复合声的听觉研究,这正是当前心理声学研究的主要趋向^[7].

本文说明了开展人耳对信号频率瞬时变化的听觉响应研究的实验方法.虽然研究的目的是仅仅考虑主动声呐信号的听测问题,但是得出的一些结果在心理声学方面可能仍有一定的普遍意义.

二、实验方法

首先,制作一套提供听测试验用的记录了典型信号样本的磁带,信号由一个数控跳频信号源产生^[8],每一个信号的持续时间内包含8个相继输出的振幅和时间宽度相等的单元正弦信号,它们的频率值由下式决定:

$$f_n = 850 + n \cdot 40 \text{ Hz} \quad (1)$$

这里 $n=0, 1, \dots, 7$ 可以任意选择.因此,一个提供听测的信号频率变化模式 $\{n\}$ 由8个所取的 n 值决定.如果 n 都取零,即频变模式 $\{n\} = (00000000)$,则就是频率为 $f_0 = 850 \text{ Hz}$ 的单频信号.在磁带上录制的听测信号样本有两类:第1类是参考信号为低单频(850Hz),比较信号为其中有一个单元的频率变高,并分别出现在信号的前、中、后位置;第2类是参考信号为高单频(1130Hz),比较信号为其中有一个单元的频率变低,并分别出现在信号的前、中、后位置.具体频变模式如表1所示.

在表1上列信号中, R_1 和 R_2 分别为二种参考信号,对应的频率分别是 f_0 和 f_7 . S_m 是比较信号,其中第 m 位单元发生频率变化,其频率值从参考频率 f_0 或 f_7 改变为 f_n ,单元的时间宽度分别取 $\tau = 6.25, 12.5, 25$ 和 50 ms .

听测磁带的录制方式是:对 $\tau = 6.25 \text{ ms}$,先录4次参考信号 R_1 ,再录4次比较信号 S_{18} ,接着又改录4次参考信号 R_1 ,再录4次比较信号 S_{15} ,然后又改录4次 R_1 ,再录4次 S_{11} .如此,一直按顺序直到录完4次比较信号 S_{11} ,接下来就改变一个 τ 值(12.5ms),再重复上述过程.因此,对每一类听测信号样本取97种比较信号,4种单元宽度,而每一种情况录8个信号(4个参考,4个比

表1 听测信号样本的频变模式和频率值

第1类听测信号			第2类听测信号		
频变模式	频率值(Hz)		频变模式	频率值(Hz)	
	f_0	ΔF		f_1	ΔF
$R_1(00000000)$	850		$R_2(77777777)$	1130	
$S_{18}(00000001)$	850,	+40	$S_{68}(77777776)$	1130,	-40
$S_{15}(00001000)$	850,	+40	$S_{65}(77776777)$	1130,	-40
$S_{11}(10000000)$	850,	+40	$S_{61}(67777777)$	1130,	-40
$S_{48}(00000004)$	850,	+160	$S_{38}(77777773)$	1130,	-160
$S_{45}(00004000)$	850,	+160	$S_{35}(77773777)$	1130,	-160
$S_{41}(40000000)$	850,	+160	$S_{31}(37777777)$	1130,	-160
$S_{78}(00000007)$	850,	+280	$S_{08}(77777770)$	1130,	-280
$S_{75}(00007000)$	850,	+280	$S_{05}(77770777)$	1130,	-280
$S_{71}(70000000)$	850,	+280	$S_{01}(07777777)$	1130,	-280

较),所以总计在磁带上记录 $8 \times 9 \times 4 = 288$ 个信号,记录每个信号的时间间隔为4秒,则总共听测时间不到20分钟。

三、结果分析

对10名听测者多次试验后的记分取平均,得到了如表2和表3所示的相应于2类听测信号样本所作出的,人耳对信号频率瞬时改变的感觉灵敏性估计值.这10名听测者的听觉系统正常并具有大学毕业以上的文化水平,对试验的要求能很好领会.听测试验在专门布置的房间内进行,室内和外界都保持安静.磁带回放信号通过转接盒输送给10付耳机由听测者同时监听,音量统一调节到听测者们都感到清晰的同一水平后就固定不变.听测者对频率变化感觉灵敏性估计的记分标准约定为:如果对听测的比较信号人耳能清楚听出相应于二个跳变频率有不同音调的记3分;如果能感觉到信号频率有明显的间隔变化,但是对该间隔内频率的音调感觉不明显的记2分;当然感觉到信号频率有间隔变化的记1分;根本觉察不到有频率变化的记0分。

表2 第1类听测试验结果(参考信号 R_1 , 850Hz)

比较信号	$\Delta F(\text{Hz})$	$\tau(\text{ms})$			
		6.25	12.5	25	50
后变 S_{18}	+40	0	1.2(0.19)	1.8(0.19)	3.0
中变 S_{15}	+40	0.2(0.15)	1.4(0.15)	2.0	3.0
前变 S_{11}	+40	0.1(0.09)	0.9(0.22)	1.3(0.2)	3.0
后变 S_{48}	+160	1.9(0.09)	2.0	2.4(0.15)	3.0
中变 S_{45}	+160	1.9(0.09)	2.0	2.4(0.15)	3.0
前变 S_{41}	+160	1.0(0.24)	2.0	2.3(0.14)	3.0
后变 S_{78}	+280	2.0	2.1(0.09)	3.0	3.0
中变 S_{75}	+280	2.0	2.1(0.09)	3.0	3.0
前变 S_{71}	+280	1.7(0.14)	2.1	2.4(0.15)	3.0

注:表中括号内的数据为均方根误差

根据听测试验人员的共同判断,对表2和表3中的平均记分可以划分为4个区域:1.0分以下的,人耳基本上分辨不出声音频率有瞬时的变化;1.0—2.0分,能感觉到声音的频率有一个间隔变化,但对发生变化的那个间隔内的频率没有音调感觉;2.1—2.5分,则不但能明显听到声音频率发生变化,而且能从音调上分辨出频率发生变化;2.6—3.0分,人耳能够十分清晰地听出两个频率有不同音调.在表2和表3中圆括号内的数据是相应于听测试验平均记分的统计均方根误差.在有的情况下,由于10位听测者作出的判断一致,没有统计误差出现.如果有更多的听测者参予试验,这种现象则就会减少.但是对平均记分为3.0的情况,听测者都能清楚分辨信号频率的变化而作出一致的判断是有其必然性的.

表3 第2类听测试验结果(参考信号 $R_2, 1130\text{Hz}$)

比较信号	$\Delta F(\text{Hz})$	$\tau(\text{ms})$			
		6.25	12.5	25	50
后变 S_{68}	-40	0	0.9(0.2)	2.0	3.0
中变 S_{65}	-40	0.2(0.14)	0.9(0.15)	2.0	2.9(0.09)
前变 S_{61}	-40	0	0.3(0.15)	0.9(0.09)	1.5(0.21)
后变 S_{38}	-160	1.1(0.09)	1.8(0.13)	2.3(0.14)	3.0
中变 S_{35}	-160	1.1(0.09)	2.0	2.5(0.16)	3.0
前变 S_{31}	-160	1.0	1.8(0.13)	2.4(0.15)	2.9(0.09)
后变 S_{08}	-280	1.5(0.16)	2.0	3.0	3.0
中变 S_{05}	-280	1.7(0.15)	2.1(0.09)	3.0	3.0
前变 S_{01}	-280	1.4(0.13)	2.0	2.4(0.15)	3.0

注:表中括号内的数据为均方根误差

从表2和表3所示的听测试验结果可以看出以下几点:

(1)在一个确定频率的长声音信号中出现短时间的频率变化时,若这个短时间的间隔 τ 愈长,和(或)这个频率变化的差值愈大,则人耳对频率变化的分辨愈明显,即人耳对信号频率瞬时变化的感知,不仅是 τ 而且是 ΔF 的递增函数.

(2)人耳对信号频率瞬时变化的感知存在一个模糊界限.从表2和表3的数据看出:当 $\tau \cdot \Delta F \leq 1$ 时,人耳基本上感觉不到频率发生瞬时变化;当 $\tau \cdot \Delta F \geq 2$ 时,人耳不仅能明显分辨出信号频率发生了变化,而且对这两个频率有不同的音调感觉;在 $\tau \cdot \Delta F = 1-2$ 的区域内,人耳对频率瞬时变化的感觉是模糊的.进一步的听测试验表明,这种对频率的音调感觉随 τ 的增加更为敏感.从 $\tau = 6.25\text{ms}$ 向 50ms 变化,听觉上对相应间隔内频率的感觉表现为从短促的节拍声向谐音过渡,当 $\tau \geq 25\text{ms}$ 时,对该频率的谐音就比较明显了*.从物理上看,随着一个正弦脉冲信号的时间长度的增加,相应的频谱向正弦振荡的频率 f_0 集中,当频谱宽度小于人耳听觉相应的临界带宽时,对 f_0 的音调感觉就愈趋明显.

(3)从试验结果看出,一般来说,人耳对短时间间隔的频率变化发生在长信号中部或后部时的感知,要比发生在前部时的感知相对地比较灵敏.特别是在表3中 S_{01} 的听测记分相对地最

* 这里是指人耳有谐音的音调感觉.随着这个频率的正弦脉冲宽度 τ 增,人主观音调感觉会有些变化,当 $\tau > 200\text{ms}$ 以上时对这个频率的谐音感觉就基本不变.

低. 这表明, 当短时间的频率降低(-40Hz)出现在一个频率相近的长信号的前部时, 人耳似乎最不敏感, 这可能是人的听觉系统在接受了长时间的一个信号频率刺激后会冲淡对在此信号前面的一个相近频率的短信号的记忆.

四、结束语

从探讨主动声呐检测中人耳对复杂信号的听测模型出发, 本文研究了人耳对信号频率发生短间隔变化的感觉灵敏性问题. 因为这是人耳听觉系统能否对具有复杂的时-频结构的声信号进行音调模式识别的基础.

根据在主动声呐常用听测频段之一, $850-1130\text{Hz}$ 内进行听测试验的结果可以看出: 人耳听觉对频率变化感知的模糊区域由 $\tau \cdot \Delta F = 1-2$ 决定; 当 $\tau \cdot \Delta F \leq 1$ 时, 人的听觉不能分辨频率发生短时间的变化; 当 $\tau \cdot \Delta F \geq 2$ 时, 则人的听觉不仅能明显分辨出信号频率发生过变化, 并且能对这两个差值为 ΔF 的频率有不同的音调感觉. 这一现象和主动声呐检测中频率分辨率由信号长度的倒数所决定的结论相一致.

本文得出的一些实验结果对主动声呐设计中的听测问题有一定的参考价值: 特别是表明了作者在他提出的“FS-PDMP 信号检测系统”中所确定的声呐信号参数 ($\tau = 25, 50\text{ms}$, $\Delta F = 40, 80\text{Hz}$) 从人耳听测的角度来看也是合理的^[3].

当然人耳听觉的频率分辨是一个十分复杂的问题^[9]. 从心理声学的角度来看, 本文所讨论的问题还可以做进一步的工作. 特别是如何从人耳的生理基础去说明对具有复杂时-频结构的复合声的听觉过程还有待进一步深入研究.

参 考 文 献

- [1] 侯自强, 李贵斌, “声呐信号处理——原理与设备”, 第四章 (科学出版社, 1986年).
- [2] 张叔英, “脉内跳频信号研究”, 声学学报, 7(1982), 290—301.
- [3] 张叔英, “A Study of FS-PDMP System”, *Chinese Journal of Acoustics*, 5 (1986), 205—213.
- [4] Urick, J., “工程水声原理”第12章 (国防工业出版社, 1967年).
- [5] Wier C. C. et al., “Frequency discrimination as a function of frequency and sensation”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 61(1977), 178—184.
- [6] Durrant J. D. et al., “*Bases of Hearing Science*”, Chap. 7, Introduction of Psychoacoustics, (Williams and Wilkins, 1984).
- [7] 方至, “听觉基础研究的若干问题展望(2)”, 应用声学, 9(1990), No. 6, 7—10.
- [8] 易培林, 郭祥生, “数控跳频信号源”, 声学技术, 2—1(1983), 51—52.
- [9] 李允武, 丁东, “声音”, 第7章, (科学出版社), 1981年.