

包络调制率和载波频率对听觉时间调制检测能力的影响*

孟庆林[†] 原猛 牟宏宇 陈友元 冯海泓

(中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

(2011年10月14日收到; 2012年2月8日收到修改稿)

通过心理物理实验探讨了包络调制率 (< 300 Hz) 和纯音载波频率 (< 8 kHz) 对听觉时间调制检测能力的影响. 测试信号为以纯音为载波的正弦幅度调制信号, 采用二选一强迫选择法和自适应调整步长的心理物理实验方法, 测试得到不同载波频率条件下的时间调制传递函数. 实验结果表明, 包络调制率和载波频率均会对听觉的时间调制检测能力产生影响. 当载波频率低于 2 kHz 时, 人耳的检测能力与调制率呈单调递增趋势; 当载波频率高于 3.5 kHz 时, 检测能力也会受到调制率的显著影响, 但没有显著的单调变化趋势. 当调制率在 10 — 100 Hz 之间时, 检测能力不随载波频率明显变化; 当调制率在 150 — 300 Hz 之间时, 调制检测能力随着载波频率上升而下降, 在载波频率达到 3.5 kHz 时, 调制检测能力不随载波频率显著改变.

关键词: 听觉心理物理, 时间调制, 听觉滤波器, 人工耳蜗

PACS: 43.66.Fe, 43.66.Dc, 43.66.Ba, 43.66.Hg

1 引言

在心理声学研究中, 听觉系统的时间特性包含两个方面: 一方面, 时间分辨率 (或称时间敏感度), 指听觉系统检测声音随时间变化的能力; 另一方面, 时间整合能力, 指听觉系统将随时间变化的信息进行累积处理以增强对声音的检测或分辨能力的^[1,2]. 听觉时间调制检测能力 (temporal modulation detection ability, TMDA) 的研究是对时间分辨率研究的一个主要手段. 该研究中常采用测量时间调制传递函数 (temporal modulation transfer function, TMTF) 的方法. TMTF 是调制检测阈和调制率的关系函数^[4], 正弦幅度调制 (sinusoidal amplitude modulation, SAM) 的 TMTF (SAM-TMTF) 描述了听觉系统对 SAM 信号的检测能力, 即在载波信号形式固定的情况下不同调制率的调制深度检测阈. 近年来通过幅度调制增强基频或低阶谐波信息来提高人工耳蜗植入者的声调感知、音乐感知能力

的研究大量涌现^[3,4], SAM-TMTF 的研究意义在于对这些应用的理论基础进行进一步探索.

SAM-TMTF 研究中常用的载波包括噪声载波和纯音载波. 其中噪声载波研究较多, 实验对象包括正常听力者和听力受损者, 其 TMTF 呈现低通特性, 即低频段的检测能力强^[2,5]. 然而在保证调制率落在频率分辨不起主要作用的范围的条件下, 纯音载波 TMTF 研究比噪声载波 TMTF 研究更能从本质上测量听觉系统的时间分辨能力^[4].

时间分辨率通常针对的是信号包络的变化, 而不针对精细结构^[1]. Kohlrausch 等^[6] 研究了纯音载波的频率对调制检测阈的影响, 得到纯音载波 TMTF 与宽带噪声载波 TMTF 有明显不同的结论. 但该研究中所选择的调制率没有根据不同载波频率段的频率分辨能力进行调整, 并且被试者数目较少 (仅 6 名).

本研究的目的是探讨包络调制率和载波频率对正常听力者的 TMDA 的影响. 邀请了更多的被试者 (22 人), 选用更加精细的调制率来研究调制率

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11104316) 和上海市自然科学基金 (批准号: 11ZR1446000) 资助的课题.

[†] E-mail: mengqinglin08@gmail.com

与 TMDA 的关系, 并且探讨调制率不变的条件下载波频率对 TMDA 的影响. 采用听觉滤波器理论对实验结果进行了分析, 发现 TMDA 在听觉滤波器的等效矩形带宽的半宽度转换点附近会发生显著变化.

2 实验设计

2.1 实验信号和实验方法

纯音载波的 SAM 信号, 如图 1(c) 所示, 公式定

义为 [7]

$$s(t) = A(1 + m \cos(2\pi f_m t)) \sin(2\pi f_c t), \quad (1)$$

其中 A 为幅度, m 为调制深度, f_m 为调制频率, 简称调制率, f_c 为载波频率.

采用二选项强迫选择法 (2-alternative forced-choice, 2AFC) 来测量被试者的 SAM 检测阈, 即 TMTF. 引用了 Pfingst 等 [8] 在研究人工耳蜗植入者的调制检测阈时采用的心理物理测试流程, 并针对本研究做适当调整. 测试信号包括一个参考信号、一个调制信号和一个对比信号.

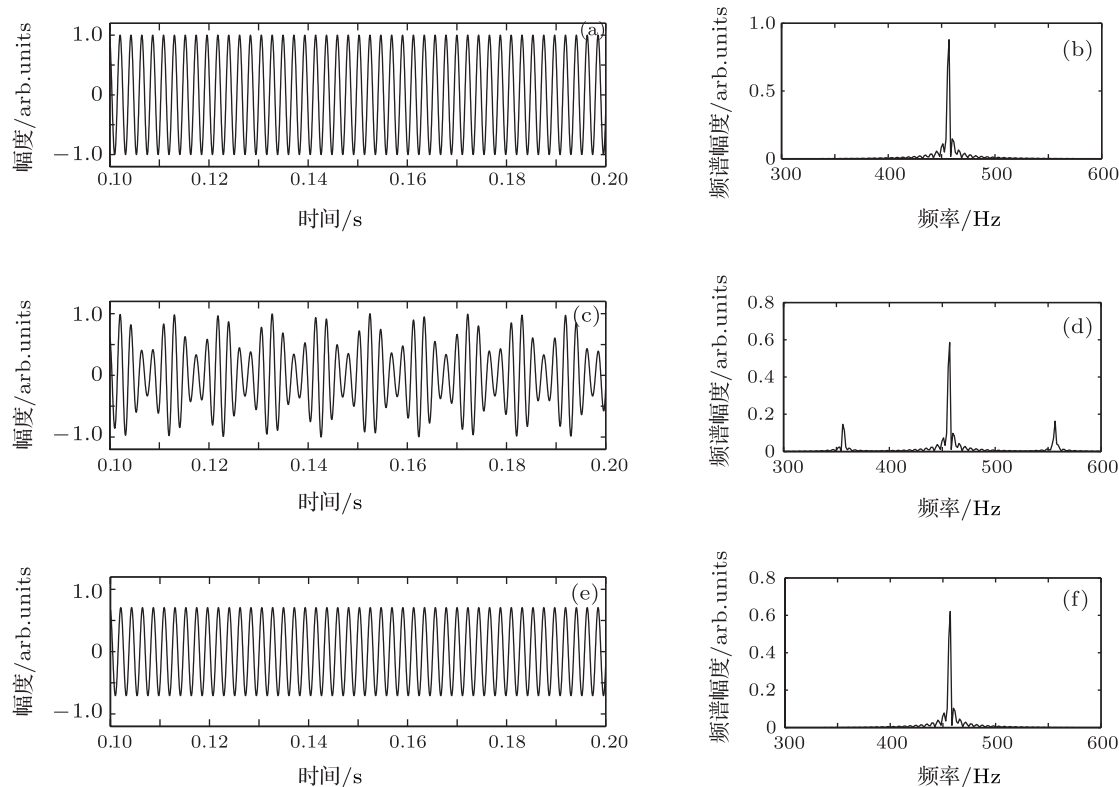


图 1 实验用信号波形和对应的频谱示例 (a) 参考信号; (b) 参考信号频谱; (c) 调制信号; (d) 调制信号频谱; (e) 对比信号; (f) 对比信号频谱

刺激信号的时域波形形式和幅频特性曲线如图 1 所示. 图 1(a) 参考信号为 456.5 Hz 纯音载波, 图 1(c) 调制信号为参考信号的 50% 调制深度的 100 Hz SAM 信号 (截取 0.1—0.2 s 的部分显示), 图 1(e) 对比信号为参考信号归一化到与调制信号能量相同的结果, 此处对于对比信号的能量处理是为了防止被试者在判断调制信号与另外两者的差别时依赖响度差而忽略调制差异. 有研究表明, 当两个刺激的能量相同时, 时域波动较大的一个能给听者以更高的响度感觉 [17]. 调制信号的时域波动对比比信号大, 故其响度也比对比信号大. 这样就保证调

制信号的响度介于对比信号和参考信号之间, 保证被试者不会依赖响度进行选择三者中差异最大的一个. 从图 1(d) 可以看出, SAM 信号相当于原始信号在频谱上进行左右对称搬移并加权后与原始信号叠加, 出现了两个边带信号.

测试主界面如图 2 所示. 三个刺激信号的时长均为 500 ms, 时间间隔为 500 ms, 另外, 为防止开关噪声, 在三个信号的起始或结尾 10 ms 分别采用渐强和减弱处理. 播放顺序为: 参考信号第 2 个播放, 即图 2 中的参考音, 调制信号和对比信号随机出现在声音 1 和声音 2 中, 要求被试者在声音 1 和

声音 2 中选择与第 2 个播放的参考音差别最大的一个. 开始测试前, 利用声级计对载波信号幅度进行校准, 保证输出声压级在 65—70 dBA 之间, 处于听觉舒适的范围. 在预测试时主试者会引导被试者, 例如引导其选择有颤音的一个 (因为在题目开始时调制深度较大, 通常幅度调制信号在听觉感知上会呈现出明显的颤抖感, 但随着调制深度的减小, 这种颤抖感会逐渐消失) 或明显不同的一个.

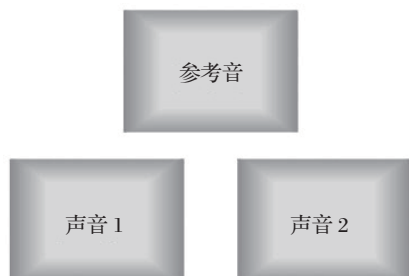


图 2 测试主界面

2.2 参数选择和实验流程

调制率 f_m 和载波频率 f_c 的选择情况如表 1 所示, 在此用通道来表示不同的 f_c 选择. 实验 1, 2 的详细说明如下.

实验 1 在不同频段随机选择了 4 个频率作为 f_c . 另外, 根据临界带宽的性质^[1] 知听觉系统对低频的频率分辨率高, 而对高频的频率分辨率低, 实验 1 中每个通道针对性地选择了不同的 6 个 f_m . 从通道 1 到通道 4, 最大值包络调制率分别为 60, 90, 200, 300 Hz.

实验 2 不考虑听觉系统对不同频段信号的频率分辨力差异. 为便于通道间相同 f_m 情况的比较, 各通道采用相同的 6 个 f_m , 重点关注相同 f_m 条件下不同 f_c 对调制检测阈的影响. 其中 n3 通道与实验 1 的 4 通道的 f_c 选择接近, f_m 选择相同, 主要是为了比较不同时刻受试者完成本测试的结果

稳定程度.

f_m 和 f_c 的一种选择情况作为 1 组题目, 即 7 个通道, 每个通道 6 组题目, 共 42 组题目. 在两个实验中, 分别以组为单位将题目的出现顺序进行随机排列. 每组题目中采用自适应步长调整方法, 逐步调整调制深度为 m , 按照“2 下 -1 上”的心理物理实验步骤^[9] 进行. m 初始值为 0.8, 在第 1 个拐点 (“从对到错” 和 “从错到对” 均称为一个拐点) 出现前步长为 6 dB, 在第 3 个拐点出现前步长为 2 dB, 在第 12 个拐点出现前步长为 1 dB. 遇到第 12 个拐点时该组题目结束, 最后 8 个拐点处 m 的均值为在 f_c 纯音载波频率下调制率为 f_m 的 SAM 检测阈, 结果通常用 $20 \lg m$ 这种对数形式来表示. 同一个 f_c 不同 f_m 条件下的检测阈构成了该 f_c 频率载波条件下的一个 TMTF, 作为本实验的直接结果, 供后续分析使用. 测试中测试软件不会向被试者反馈作答情况信息.

2.3 被试者和设备

年龄在 22—29 岁的 22 名正常听力者参加了本项研究测试 (9 男 13 女). 正式测试前主试者给被试者进行纯音测听, 被试者的纯音听阈 (125—8000 Hz) 均低于 25 dB HL (测试中发现有 3 名男性被试的右耳听阈大于 25 dB HL, 但左耳听阈均小于 25 dB HL, 满足要求). 被试者均为在校本科生或研究生, 都在实验前被充分告知实验内容, 签署知情同意书, 并按小时获得测试补贴. 主试者引导被试者开展实验预测试, 通过三组题目确认其掌握测试方法后开始正式测试.

实验环境为本底噪声 23 dBA 的隔音室 (宽 2 m, 长 5 m, 高 2.5 m), 采用的外置声卡为 US-144KII 型, 音箱为雅马哈 HS50 型监听音箱, 测试软件基于 VC++ 编程实现. 测试时被试者正向面对扬声器, 被试者的头部与扬声器处于同一高度, 距离为 1 m.

表 1 载波频率 f_c 和包络调制率 f_m 选择

实验	通道号	f_c /Hz	f_m /Hz					
1	1	456.5	10	20	30	40	50	60
	2	1705.5	10	20	40	60	80	90
	3	3534.0	10	50	80	100	150	200
	4	5758.0	10	50	90	150	200	300
2	n1	650.0	10	50	90	150	200	300
	n2	1850.0	10	50	90	150	200	300
	n3	5650.0	10	50	90	150	200	300

3 结果

3.1 包络调制率的影响

实验 1 的结果箱型图和平均值连线如图 3 所示, 即实验 1 的 TMTF 图. 其中连线的空心圆为平均值, “+” 为箱型图的离群点, 纵坐标为调制深度 m 的对数值, 即 $20\lg m$, 单位为 dB.

可以发现检测阈值多集中在 -30 — -20 dB 之间, 1 通道中前面三个测试点和后面三个测试点分别呈现上升趋势, 2 通道和 3 通道基本平稳, 均

值在 -26 dB 附近, 4 通道中前四个测试点平稳于 -27.5 dB 附近, 后面三个测试点呈现下降趋势.

采用 MATLAB7.0 软件的统计工具箱中的单因素方差分析 (one-way ANOVA; 在 MATLAB 中为 anova1 函数; 后面文章中将用 ANOVA 代替) 方法, 结果显示, 1 和 4 通道 (低频通道和高频通道) 中调制率对结果有显著影响 ($[F = 3.98, p = 0.0022]$, $[F = 3.3, p = 0.0078]$), 2 和 3 通道 (中频通道) 中调制率对结果无显著影响 (都满足 $p > 0.05$).

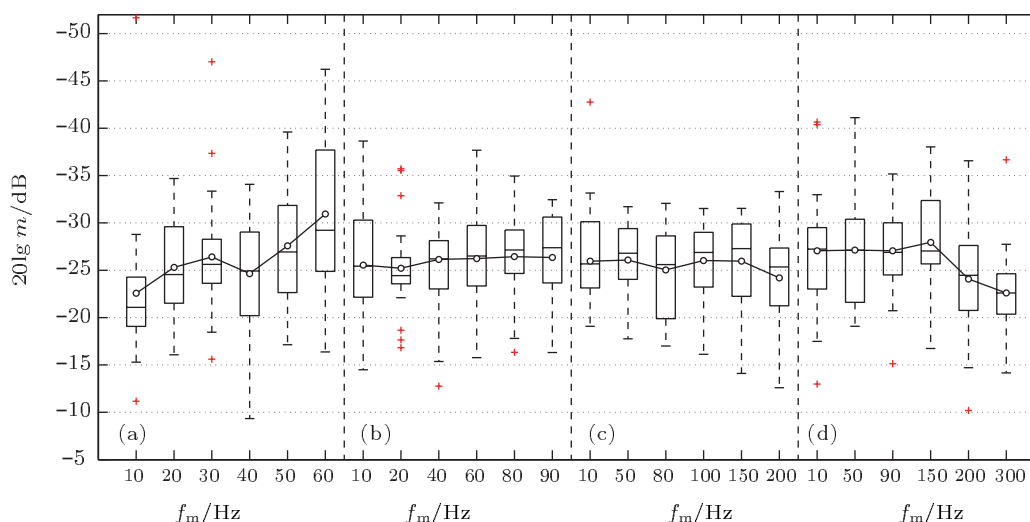


图 3 实验 1 结果箱型图和平均值 (a) 通道 1; (b) 通道 2; (c) 通道 3; (d) 通道 4

采用 STATISTICA6.0 统计分析软件中的事后分析 (post hoc) 对 1 或 4 通道内不同调制率 f_m 间进行两两比较分析. 结果显示, 在 1 通道中, f_m 为 10 Hz 时与 f_m 为 30, 50, 60 Hz 时结果间存在显著差异 ($p < 0.05$), f_m 为 60 Hz 时与 f_m 为 10, 20, 30, 40 和 50 Hz 时的结果间均存在显著差异 ($p < 0.05$). 在 4 通道中, f_m 为 200 Hz 时与 f_m 为 10, 50, 90 和 150 Hz 时的结果间均存在显著差异 ($p < 0.05$), f_m 为 300 Hz 时与 f_m 为 10, 50, 90 和 150 Hz 时的结果间均存在显著差异 ($p < 0.05$). 在 1, 4 通道内除上述调制率对间均不存在结果的显著差异 (均满足 $p > 0.05$).

实验 2 的结果箱型图和平均值连线如图 4 所示, 即实验 2 的 TMTF 图. 图 4(a)—(c) 中, 连线空心圆为平均值; 图 4(d) 为其他三个图中的平均值连线的比较; “+” 为箱型图的离群点; 纵坐标为调制深度 m 的对数值, 即 $20\lg m$, 单位为 dB.

在 n1 和 n2 通道中, 平均检测能力随着 f_m

从 10—300 Hz 呈上升趋势 (n1 通道的平均值为 -24 — -43 dB 左右, n2 通道的平均值为 -24 — -36 dB 左右), 而在 n3 通道中, 则呈现轻微的带通趋势, 平均检测能力稍好的为 90—150 Hz 之间的区域.

ANOVA 分析结果显示, n1, n2 和 n3 通道 (低频、中频、高频通道) 中 f_m (10—300 Hz) 对结果都有显著影响 ($[F = 35.73, p = 0.0000]$, $[F = 16.42, p = 0.0000]$, $[F = 2.87, p = 0.0173]$).

采用 post hoc 对 n1, n2 和 n3 各个通道内不同 f_m 间进行两两比较分析. 结果显示, 在 n1 通道中, f_m 为 10 和 50 Hz 的结果间不存在显著差异 ($p > 0.05$), f_m 为 150 和 200 Hz 的结果间不存在显著差异 ($p > 0.05$), 其余调制率对间均存在结果的显著差异 ($p < 0.05$). 在 n2 通道中, f_m 为 10, 50, 90, 150 和 200 时相邻调制率的两两结果间不存在显著差异 ($p > 0.05$), f_m 为 10 和 90 Hz 的结果间不存在显著差异 ($p = 0.0690 > 0.05$), 其余调制率对

间均存在结果的显著差异 ($p < 0.05$). 在 n3 通道中, f_m 为 300 Hz 时与 f_m 为 10, 50, 90, 150 和 200 Hz 时的结果间存在显著差异 ($p < 0.05$), 其余调制率对间不存在结果的显著差异 ($p > 0.05$).

从图 3 和图 4 及相应的 ANOVA 分析和 post hoc 分析的结果, 可以总结出以下规律: 1) 包络调制率 ($f_m = 10\text{--}300$ Hz) 对幅度调制检测能力有着显著影响; 2) 载波的低频 (650 Hz 左右) 和中频

段 (1850 Hz 左右) 检测能力随 f_m 的上升而大致呈上升趋势; 3) 载波的高频段 (3500 Hz 左右以上) 检测能力也会受到 f_m 的影响, 但未呈现单调趋势; 4) 在各个频段上, f_m 较低时, 如 1 通道的 40 Hz 以下, 2 通道的 90 Hz 以下, 3 通道的 200 Hz 以下, 4 通道的 150 Hz 以下, n1 通道的 50 Hz 以下, n2 通道的 90 Hz 以下, n3 通道的 200 Hz 以下, 检测能力未受到 f_m 变化的显著影响.

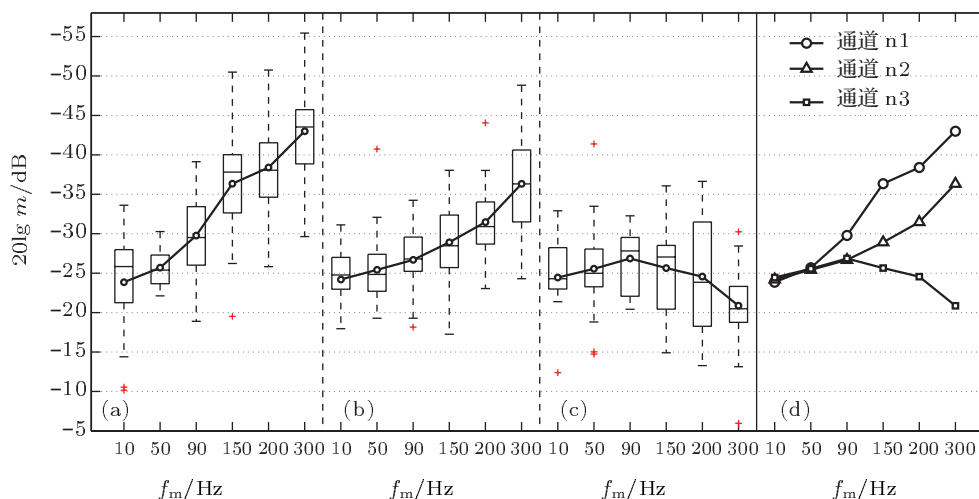


图 4 实验 2 结果箱型图和平均值 (a) 通道 n1; (b) 通道 n2; (c) 通道 n3; (d) 三通道比较

3.2 载波频率的影响

TMTF 用于表示载波信号形式固定的情况下不同调制率 f_m 的调制深度检测阈, 然而在不同的载波频率 f_c 条件下的 TMTF 函数间也可以进行比较, 用于研究相同包络调制率条件下载波频率对检测能力的影响. 图 5 为相同 f_m 间比较的箱型图和平均值连线. 观察发现 f_m 在 100 Hz 以下时结果不存在明显的通道间差异; f_m 在 150, 200 和 300 Hz 时结果呈现随 f_c 升高而下降的趋势. ANOVA 分析结果显示, f_m 为 60 Hz 时通道 1 和通道 2 的载波频率的差异对结果有显著影响 ($F = 5.1$, $p = 0.0292 < 0.05$), f_m 在 150, 200 和 300 Hz 时 f_c 的变化对结果有显著影响 ($F = 13.55$, $p < 0.000$), ($F = 25.19$, $p < 0.000$), ($F = 69.17$, $p < 0.000$); f_m 在 10, 20, 40, 50, 80 和 90 Hz 时 f_c 的变化没有对结果产生显著影响 ($p > 0.05$).

采用 post hoc 对 f_m 为 150, 200 和 300 Hz 时不同载波频率 f_c 间进行两两比较分析. f_m 为 150 Hz 对应的通道有 n1, n2, 3, n3 和 4 通道. 此时, 3 和 n3

通道的结果间不存在显著差异 ($p > 0.05$), n2 和 4 通道的结果间不存在显著差异 ($p > 0.05$), n3 和 4 通道的结果间不存在显著差异 ($p = 0.0905$), 其余通道对间均存在显著差异 ($p < 0.05$). f_m 为 200 Hz 对应的通道有 n1, n2, 3, n3 和 4 通道, 此时, 3, n3 和 4 通道的结果间不存在显著差异 ($[3, n3: p = 0.7934][3, 4: p = 0.9330]$, $[n3, 4: p = 0.7293]$), 其余通道对间均存在显著差异 ($p < 0.05$). f_m 为 300 Hz 对应的通道有 n1, n2, n3 和 4 通道, 此时, n3 和 4 通道的结果间不存在显著差异 ($p > 0.05$), 其余通道对间均存在显著差异 ($p < 0.05$).

另外, 通道 n3 与实验 1 通道 4 的参数选择基本一致, 且数据分析表明两者的结果间不存在显著差异 ($p > 0.05$), 证明了实验设计的稳定性良好.

从图 5 和上述分析可总结出以下规律: 当 $f_m < 100$ Hz 时, 幅度调制检测能力不受载波频率的显著影响; 当 $f_m > 150$ Hz 时, 幅度调制检测能力受到载波频率的显著影响, 并且检测能力随着载波频率的上升而呈现递减趋势, 但载波频率上升到 3.5 kHz 以上后载波频率的变化对检测能力的影响较小.

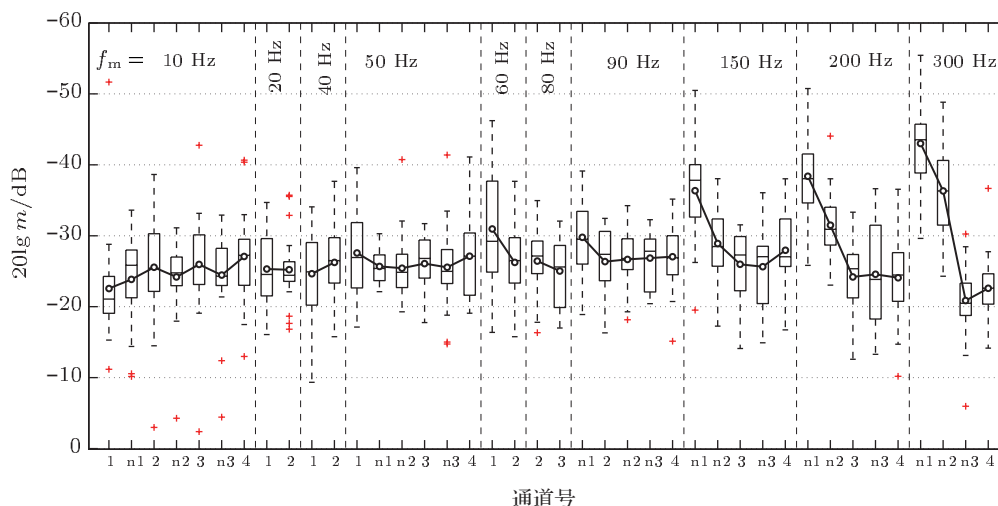


图5 调制率相同的条件下载波频率变化的影响

4 分析与讨论

4.1 研究结果与音高感知理论间的关系

正弦载波 SAM 信号可以看作三个纯音信号 (pure tone) 叠加形成的复合音 (complex tone), 复合音可能使人产生音高的感觉 [13,14]. 在测试过程中发现, 在调制深度较浅且载波频率较高时被试者会依赖音高差别进行判断.

纯音音高感知的心理物理理论有: 位置理论, 即纯音对基底膜的刺激最大的位置决定了纯音的音高; 时间理论, 即音高取决于时间编码, 而该编码取决于听神经产生刺激与声波相位的同步性 (相位锁定现象) [1,10,11]. 复合音音高感知的心理物理理论有: 模式识别模型, 认为低频的可分辨谐波的模式对复合音音高感知最重要, 以位置理论为基础; 时间模型, 认为高频的不可分辨谐波对复合音音高感知最重要, 以时间理论为基础 [1,15]. 位置理论和时间理论对于纯音信号的解释比较清楚, 模式识别模型和时间模型对有谐波成分的复合音的解释较为有效.

而本研究中没有专门针对载波频率与调制率的谐波关系进行设计, 虽然音高感知对被试者的判断产生了影响, 但对于 SAM 信号或更复杂的信号难以找到其音高感知与时间检测能力间的关系.

4.2 从听觉滤波器角度分析结果

听觉滤波器 (auditory filter, AF) 的绝对带宽随着中心频率的升高而加宽 [10], 耳蜗对声音的频率分辨率随着声音频率的升高而降低. AF 在频域

非对称, 且有多种不同的计算模型 [12]. 本文仅通过 AF 的等效矩形带宽 (equivalent rectangular bandwidth, ERB) 来进行分析, 不考虑具体的计算方法.

正常听力年轻人的听觉滤波器等效矩形带宽 (ERB_N) 的公式为 [1]

$$ERB_N = 24.7(4.37f_0 + 1), \quad (2)$$

其中 AF 中心频率 f_0 的单位为 kHz, ERB_N 的单位为 Hz. 以各通道载波频率 f_c 为中心频率的 AF 的 ERB_N 和各通道最大包络调制率 $f_{m,max}$ 见表 2.

表 2 各通道载波频率 f_c 对应的 ERB_N 和各通道最大包络调制率 $f_{m,max}$

实验	通道号	f_c /kHz	ERB _N /Hz	$f_{m,max}$ /Hz
1	1	0.4565	74.0	60
	2	1.7055	208.8	90
	3	3.5340	406.2	200
	4	5.7580	646.2	300
2	n1	0.6500	94.9	300
	n2	1.8500	224.4	300
	n3	5.6500	634.6	300

如前所述, 以纯音为载波的 SAM 信号从频谱上看是由一条载波谱线和两条边带信号谱线叠加构成的, 当调制率小于以当前载波频率为中心频率的 AF 的 ERB_N 的一半时, 载波信号和边带信号落在该 AF 内, 此时得到的结果很有可能反应的是听觉系统的时间分辨而不是频率分辨 [1]. 这里提出用 AF-ERB_N 理论来分析实验结果的两条假设.

假设 1 当包络调制率小于该 ERB_N 的一半时, 包络调制率的变化不会带来调制检测能力的明

显变化.

假设 2 包络调制率从小于该 ERB_N 的一半向大于该 ERB_N 的一半的过渡时,会带来检测能力的显著提升.

实验 1 的 2, 3, 4 通道和实验 2 的 n3 通道均满足最大包络调制率 $f_{m,max} < ERB_N/2$. 根据 3.1 节的规律 4) 知, 2 和 3 通道包络调制率变化未带来检测能力的显著变化, 实验证实了上述假设 1; 根据 3.1 节的规律 3) 知, 在实验 1 的 4 通道和实验 2 的 n3 通道中包络调制率变化显著影响了检测能力, 但整体变化范围不大 (10 dB 以内), 且未呈现明显单调趋势, 然而在 $f_m > 90$ Hz 时, 检测能力开始随着 f_m 的增长而略微下降, 这可能是受到人耳对不同频率纯音信号的最小可听阈不同的影响.

实验 1 的 1 通道和实验 2 的 n1 和 n2 通道中, 部分包络调制率大于其载波频率对应的 $ERB_N/2$. 根据 3.1 节的规律 1) 和 2) 知在这两个通道中, 检测能力受包络调制率显著影响, 且呈单调递增趋势, 实验证实了上述假设 2. 对这三个通道中调制率小于或接近 $ERB_N/2$ 的情况进行分析, 对于 1 通道的前四个调制率 ($f_m = 10, 20, 30, 40$), n1 通道的两个调制率 ($f_m = 10, 50$), n2 通道的三个调制率 ($f_m = 10, 50, 90$), post hoc 分析显示在每个通道中均未发现调制率引起的显著差异 (均满足 $p > 0.05$), 即调制率变化未对检测能力产生显著影响, 这也在实验上证实了假设 1 的有效性. 上述假设通过实验得到了验证.

4.3 对人工耳蜗的 SAM-TMTF 仿真研究的启示

本研究中采用的测试信号与人工耳蜗电刺激听觉的脉冲幅度调制在包络形式上一致, 但实际物理意义有明显差别. 本研究中的测试用调制信号为

纯音的 SAM, 频谱形式为载波谱线加两侧的边带谱线, 通过扬声器播放给人耳听; 而人工耳蜗的 SAM 测试信号通常为双向电脉冲串的 SAM 信号, 通过电极直接产生电刺激信号刺激听神经. 通过本研究与 Shannon^[16] 的人工耳蜗 SAM-TMTF 研究结果对比发现, 两者间没有相似规律, 所以本研究中的这种以纯音为载波的 SAM-TMTF 不能用作人工耳蜗 SAM-TMTF 的仿真研究方法. 但从 AF 的角度, 两种信号均可以在同一个 AF 内对人的听觉系统产生刺激 (即落在一个 AF 内的载波信号和边带信号或加在一个电极通道上的 SAM 的电刺激脉冲), 本研究为人工耳蜗电刺激听觉的 SAM-TMTF 研究及其仿真研究提供了参考.

5 结论

通过实验测量正常听力者在不同频率的纯音载波条件下的 SAM 的听觉 TMTF, 研究了包络调制率 ($f_m = 10—300$ Hz) 和载波频率 ($f_c < 8$ kHz) 对正常听力人耳的听觉 TMTF 影响, 得出包络调制率 ($f_m = 10—300$ Hz) 和载波频率 ($f_c < 8$ kHz) 均会影响人耳对纯音载波的 SAM 的检测能力; 当载波频率位于中低频段 (约 2kHz 以下) 时, 检测能力随调制率升高而增强, 在高频段 (3.5 kHz 左右以上) 检测能力也会受到调制率的影响, 但不呈现单调变化趋势; $f_m = 10—100$ Hz 时, 调制检测能力随载波频率的变化不显著; $f_m = 150—300$ Hz 时, 调制检测能力随着载波频率上升而下降, 但当 $f_c > 3.5$ kHz 时, 不再对调制检测能力产生显著影响.

衷心感谢全部参与测试的 22 位被试者. 感谢对本文早期版本提出宝贵意见的朋友们, 其中特别感谢平利川、韦峻峰、范雪莉.

- [1] Moore B C J 2008 *An Introduction to the Psychology of Hearing* (5th Ed.) (UK: Emerald) p65
- [2] Bacon S P, Viemeister N F 1985 *Audiology* **24** 117
- [3] Yuan M, Lee T, Yuan K C P, Sigfrid D S, Hasselt C A V, Tong M C F 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **126** 327
- [4] Milczynski M, Wouters J, Wieringen A V 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 2260
- [5] Viemerster N F 1979 *J. Acoust. Soc. Am.* **66** 1364
- [6] Kohlrausch A, Fassel R, Dau T 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **108** 723
- [7] Joris P X, Schreiner C E, Rees A 2003 *Physiol. Rev.* **84** 541
- [8] Pfingst B E, Xu L, Thompson C S 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 2236
- [9] Levitt H J. *Acoust. Soc. Am.* **49** 467
- [10] Plack C J, Oxenham A J, Fay R R, Popper A N 2005 *Pitch: Neural Coding and Perception* (New York: Springer) p7
- [11] Feng H H, Meng Q L, Ping L C, Tang G F, Yuan M 2010 *Technical Acoustics* **29** 607 (in Chinese) [冯海泓, 孟庆林, 平利川, 唐国芳, 原猛 2010 声学技术 **29** 607]
- [12] Lyon R F, Katsiamis A G, Drakakis E M 2010 *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (IS-*

- CAS) Paris, France, May 30 – June 2, 2010 p3809
[13] Ritsma R J 1962 *J. Acoust. Soc. Am.* **34** 1224
[14] Meddis R, Hewitt M J 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **89** 2866

- [15] Licklider J C R 1951 *Experientia* **7** 128
[16] Shannon R V 1992 *J. Acoust. Soc. Am.* **91** 2156
[17] Zhang C Y, Zeng F G 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **102** 2925

Effects of envelope modulation rate and carrier frequency on auditory temporal modulation detection*

Meng Qing-Lin[†] Yuan Meng Mou Hong-Yu Chen You-Yuan Feng Hai-Hong

(Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

(Received 14 October 2011; revised manuscript received 8 February 2012)

Abstract

The effects of envelope modulation rate (below 300 Hz) and pure-tone carrier frequency (below 8 kHz) on auditory temporal modulation detection ability (TMDA) are investigated through psychophysical experiments. The stimuli are sinusoidal amplitude-modulated signals with pure tone carriers. Two-alternative-forced-choice procedure with adaptive step is used. The temporal modulation transfer functions with different carrier frequencies are measured. Twenty-two normal-hearing subjects (22 to 29 years old) are recruited for this study. Experimental results show that both envelope modulation rate and carrier frequency have significant effects on TMDA. When carrier frequency is below 2 kHz, TMDA improves with the increase of modulation rate. When carrier frequency is above about 3.5 kHz, TMDA is influenced by the variation of carrier frequency, but without significant monotonic trend. When modulation rate is between 10 and 100 Hz, carrier frequency does not affect TMDA. When the modulation rate is between 150 and 300 Hz, TMDA decreases with the increase of carrier frequency until the carrier frequency is above 3.5 kHz.

Keywords: auditory psychophysics, temporal modulation, auditory filter, cochlear implant

PACS: 43.66.Fe, 43.66.Dc, 43.66.Ba, 43.66.Hg

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11104316) and the Natural Science Foundation of Shanghai, China (Grant No. 11ZR1446000).

[†] E-mail: mengqinglin08@gmail.com