

В.С. ШУПЛЯКОВ

Институт физиологии им. И.П.Павлова АН СССР
Ленинград

РЕЗЮМЕ

Работа посвящена выяснению вопроса о природе нелинейности эффекта маскировки. Показано, что с помощью экспериментов с маскировкой может быть выявлена только частотно-зависимая составляющая амплитудной характеристики слуховой системы. Предлагается гипотеза, что нелинейность маскировки обусловлена нелинейностью колебаний базилярной мембраны улитки внутреннего уха. Получены зависимости, позволяющие перейти от кривых маскировки к кривым возбуждения.

При исследовании механизмов восприятия сложных акустических сигналов, в том числе и речевых, значительное место занимают психоакустические эксперименты с маскировкой. Данные, полученные в этих экспериментах используются при оценке разрешающей способности органа слуха по частоте [1], при определении помехоустойчивости и разборчивости речи, в измерениях громкости [6]. Достоверность предлагаемых моделей обработки сигналов слуховой системой при восприятии в большой степени зависит от интерпретации тех кривых, которые измеряются в экспериментах с маскировкой и адекватности наших представлений относительно механизмов этого явления.

Одна из важнейших проблем, связанных с явлением маскировки заключается в том, что линейная зависимость между уровнем маскира и уровнем маскируемого тона сохраняет-

ся лишь при условии совпадения частот маскира и тест-тона; на всех других частотах тест-тона зависимость нелинейная рис. 1.

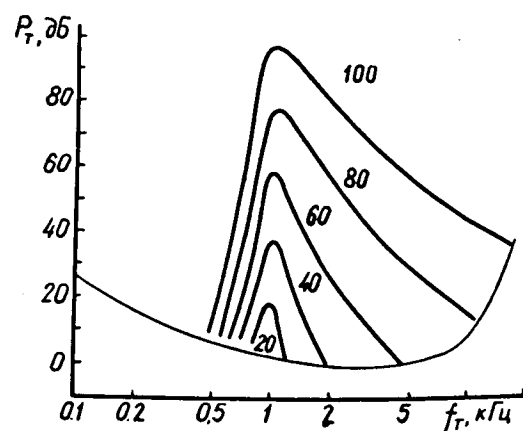


Рис. 1. Кривые маскировки тона узкополосным шумом со средней частотой 1 кГц.

По оси абсцисс - частота тест-тона в кГц; по оси ординат - уровень звукового давления тест-тона в дБ.

Цифры у кривых - уровень маскира в дБ, штриховая линия - абсолютный порог слуха. Начиная с классических опытов Вегеля и Лейна [5] возникновение нелинейных эффектов на высоких частотах объяснялось влиянием гармоник маскира, предположительно появляющихся вследствие нелинейности отделов слуха, предшествующих спектральному анализатору. В дальнейшем оказалось, что система наружного и среднего уха линейна в очень большом диапазоне уровней звуковых давлений, и таким образом, причины нели-

нейности маскировки остаются не выясненными до настоящего времени. Нелинейность кривых маскировки на частотах выше частоты маскира наблюдается и в экспериментах с задержанной маскировкой, а также при использовании в качестве маскира не только тональных, но и шумовых, речевых и других сигналов.

Для объяснения вышеупомянутого явления автор настоящего сообщения предлагает гипотезу, согласно которой нелинейность эффекта маскировки является отображением нелинейных свойств гидродинамической части улитки внутреннего уха и пытается определить вид этой нелинейности из экспериментов с маскировкой. Необходимо отметить, что представление о том, что кривые маскировки, в основном, описывают процессы, происходящие в периферическом отделе органа слуха, существует, начиная с самых первых экспериментов с маскировкой и широко принято в настоящее время. Считается, что кривые маскировки отображают характер распределения возбуждения, возникающего вдоль базилярной мембраны улитки внутреннего уха под воздействием входного сигнала. Такое представление лежит в основе современных расчетов громкости сигналов [6].

В данной работе будем рассматривать случай остаточной маскировки, чтобы упростить ситуацию и избежать необходимости учета не выясненного до настоящего времени механизма двухтонового подавления. При этом будем исходить из того, что картина распределения возбуждения, возникшая вдоль координаты X системы под действием маскира, сохраняется в течение некоторого времени после выключения маскира. Естественно предположить, что для восприятия в этих условиях тест-тона необходимо, чтобы амплитуда возбуждения, вызванного им на некоторой координате X_T была равна амплитуде возбуждения, вызванного маскиром на этой координате, или отличалась от нее на некоторую

небольшую величину ξ , представляющую собой, по существу, дифференциальный порог по интенсивности, т.е.

$$W_M(X_T, P_M) = W_T(X_T, P_T) + \xi(X_T, P_M) \quad (1)$$

Если величиной ξ пренебречь, поскольку она по крайней мере на порядок меньше точности самого метода маскировки, то получается, что какую бы форму амплитудной характеристики $W = W(P)$ не имела наша система, выявить её в экспериментах с маскировкой мы не сможем, поскольку и тест-тон и маскир подвергаются одному и тому же, в общем случае, нелинейному преобразованию. В результате экспериментов с маскировкой мы всегда будем получать линейную зависимость между уровнями маскира и тест-тона на всех частотах.

Поскольку, как уже было сказано выше, это противоречит экспериментальным данным, остается предположить, что амплитудные характеристики преобразования уровней звукового давления маскира и тест-тона в уровень возбуждения различны для маскира и тест-тона. Учитывая, что тест-тон отличается от маскира только частотой, остается принять, что амплитудная характеристика преобразования уровня звукового давления в уровень возбуждения частотно-зависима, т.е. каждая "координата" описывается не одной, а семейством амплитудных характеристик, зависящих от воздействующей частоты и специфичных для данной координаты.

Попытаемся теперь установить связь между кривыми, представленными на рис. 1 и амплитудными характеристиками системы. Пусть на рис. 2 схематически изображены две амплитудные характеристики $W_M(P)$ и $W_T(P)$ некоторой координаты X_T системы, соответствующие частотам маскира и тест-тона. Приращение уровня маскира на величину ΔP_M вызовет увеличение уровня возбуждения системы на некоторую величину λ . Для того, чтобы тест-тон был воспринят,

необходимо увеличить его уровень на такую величину ΔP_T , которая приведет к увеличению уровня возбуждения на ту же величину.

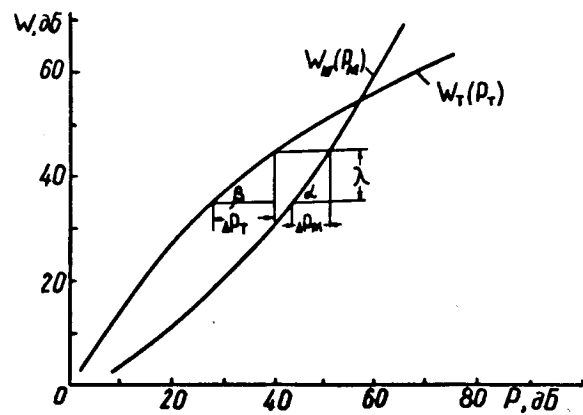


Рис. 2. Схематическое изображение двух амплитудных характеристик (для тест-тона и маскира) одной и той же координаты X_T базилярной мембраны.

По оси абсцисс - уровень звукового давления в дБ; по оси ординат - уровень возбуждения в дБ. Остальные пояснения в тексте.

Другими словами, можно записать:

$$\lambda = \Delta P_M \frac{\partial W_M(P_M)}{\partial P_M} = \Delta P_T \frac{\partial W_T(P_T)}{\partial P_T}$$

и отсюда

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}$$

где γ - угол наклона характеристики $P_T(P_M)$ в точке X_T , а α и β - углы наклонов характеристик $W_M(P_M)$ и $W_T(P_T)$. Отсюда видно, что если, например, характеристики $W_M(P_M)$ и $W_T(P_T)$ совпадают, или просто сдвинуты по горизонтали, $\operatorname{tg} \gamma$ всегда будет равен 1, т.е. мы получим прямые под углом 45° , что мы и наблюдаем в случае, если частоты маскира и тест-тона совпадают (Рис. 3).

Из выражения (3) также следует, что на основании экспериментов с маскировкой определить вид амплитудной характеристики системы на частоте тест-тона можно лишь

при условии, если известна амплитудная характеристика системы на частоте маскира и наоборот.

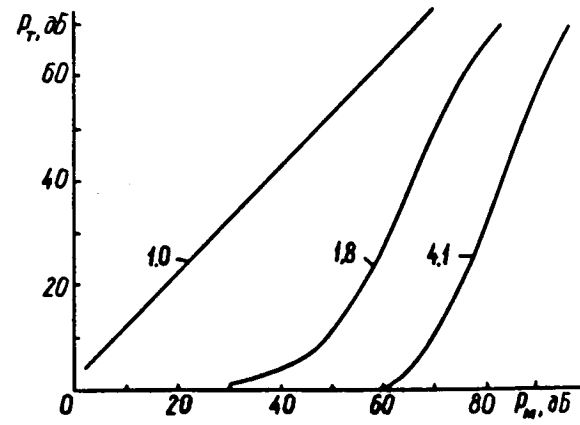


Рис. 3. Зависимость уровня звукового давления тест-тона от уровня звукового давления маскира, представляющего узкополосный шум со средней частотой 1 кГц.

По оси абсцисс - уровень звукового давления маскира в дБ; по оси ординат - уровень звукового давления тест-тона в дБ.

Цифры у кривых - частота тест-тона в кГц.

В настоящее время имеется достаточное число фактов, говорящих о том, что слуховая система уже на уровне механических колебаний базилярной мембраны улитки внутреннего уха колеблется нелинейно, причем эта нелинейность частотно-зависима [4], [2]. Нелинейность этой амплитудной характеристики наиболее выражена на координатах мембраны, колеблющихся с резонансной частотой; на удаленных от резонанса частотах система линейна.

Естественно использовать этот факт для анализа амплитудных характеристик эффекта маскировки. В приложении к нашему случаю это означает, что если частота тест-тона достаточно удалена от частоты маскира, то амплитудная характеристика $W_M(P_M)$ на этой частоте линейна, т.е. $\operatorname{tg} \alpha = 1$ во всем диапазоне уровней маскира, а нелинейность кривых маскировки объясняется нели-

нейностью амплитудной характеристики на частоте тест-тона, т.е. $W_T(P_T)$. Тогда можно записать:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{1}{\operatorname{tg} \beta}$$

Зависимость $P_T(P_M)$ может быть легко измерена (Рис. 3); зная эту характеристику, на основании (4) можно получить кривую зависимости $W_T(P_T)$ (Рис. 4).

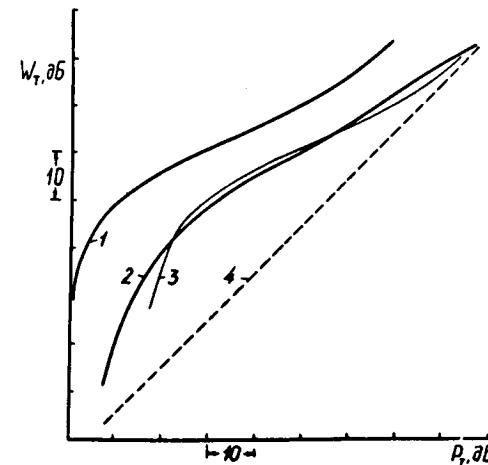


Рис. 4. Зависимость уровня возбуждения (кривые 1 и 3) и субъективной громкости тона 1 кГц (кривая 2) от уровня звукового давления тест-тона.

По оси абсцисс - уровень звукового давления тест-тона; по оси ординат - уровень возбуждения и субъективная громкость (по: 1) в логарифмическом масштабе.

Кривая 3 получена путем сдвига кривой 1; кривая 4 - прямая под углом 45° . (Характеристика $W_T(P_T)$ получается путем поворота на 90° зеркального изображения характеристики $P_T(P_M)$).

Как видно, эта кривая имеет три участка с характерными особенностями: при малых уровнях с ростом входного сигнала наблюдается непропорционально быстрое возрастание, "усиление" уровня возбуждения, что хорошо согласуется с современными представлениями об активном механизме формирования частотной избирательности периферического отдела слуха [3]. В области средних уровней наблюдается "насы-

щение" характеристики, это происходит за счет уменьшения избирательности (точнее, коэффициента неравномерности) частотно-избирательных кривых. При этом интересно отметить большое сходство этой кривой с кривой субъективной громкости (кривая 2 на рис. 4). Наконец, в области высоких уровней система становится все более линейной, что также хорошо согласуется с известными физиологическими экспериментами.

С учетом полученных результатов, характеристики распределения возбуждения вдоль базилярной мембраны приобретают совсем другой вид, чем это получается непосредственно из экспериментов по маскировке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цвикер Э., Р.Фельдкеллер. Ухо как приемник информации. Изд. "Связь", Л., 1971.
2. Щупляков В.С. Колебательные свойства структур улитки внутреннего уха. В сб. "Анализ сигналов на периферии слуховой системы", 1981. Изд. "Наука", Л., с.5-35.
3. Щупляков В.С. Математические модели гидродинамики улитки внутреннего уха. В сб. "Сенсорные системы. Слух", 1982. Изд. "Наука", Л., с. 3-17.
4. Rhode W.S., Robles L. Evidence from Mössbauer experiments for nonlinear vibration in the cochlea. - J. Acoust. Soc. Amer., 1974, v. 55, p. 588-596.
5. Wegel R.L., Lane C.E. The Auditory Masking of One Pure Tone by Another and its Probable Relation to the Dynamics of the Inner Ear. - Phys. Rev., 1924, v. 23, p. 266.
6. Zwicker E., Scharf B. A model of Loudness Summation. - Psychological Review, 1965, v. 72, No 1, p. 3-26.