

УДК 534.79

МОНАУРАЛЬНЫЕ ПОРОГИ ТОНА ПРИ БИНАУРАЛЬНОЙ МАСКИРОВКЕ СУММОЙ ДВУХ ВЗАИМНО НЕЗАВИСИМЫХ ШУМОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ИНТЕРАУРАЛЬНЫМИ ВРЕМЕННЫМИ ЗАДЕРЖКАМИ

С. Д. Бурцева

Экспериментально исследована маскировка монаурального тона 500 *гц* суммой двух взаимно независимых шумов одинаковой интенсивности. При этом каждый из шумов подавался бинаурально; временная задержка τ_0 для одного шума вводилась в канал левого телефона, а для другого шума — в канал правого телефона. Получены кривые, показывающие изменение монаурального порога тона в зависимости от τ_0 ($0 \leq \tau_0 \leq 1$ *мсек*) при маскировке одним шумом и суммой двух шумов. Обсуждается вопрос о влиянии интерауральной корреляции маскирующих шумов на монауральные пороги тона.

В предыдущей работе [1] нами были приведены результаты измерения бинауральных порогов тона 500 *гц* при маскировке суммой двух широкополосных шумов, которые подавались от двух взаимно независимых источников белого шума. Каждый из шумов подавался бинаурально с некоторой интерауральной временной задержкой τ_0 . В соответствии с этим интерауральная корреляция для каждого шума зависела только от τ_0 и при $\tau_0 = 0$ была равна единице. Анализ полученных результатов показал, что изменение бинауральных порогов тона с возрастанием τ_0 в основном отражает изменение интерауральной корреляционной функции для двух шумов в узкой (критической) полосе частот со средней частотой, равной частоте маскируемого тона.

В настоящей работе мы продолжили исследование маскировки тона суммой двух взаимно независимых шумов с различными интерауральными временными задержками. Однако теперь тон подавался монаурально и мы следили за изменением монаурального порога тона в зависимости от интерауральных временных задержек маскирующих шумов. В опытах использовалась экспериментальная установка, подробное описание которой дано в работе [1]. С помощью этой установки каждый из двух маскирующих шумов подавался бинаурально через головные телефоны. Независимыми источниками шумов служили два генератора белого шума. Шумы можно было подавать каждый в отдельности или оба одновременно. Для одного из шумов временная задержка вводилась в канал левого телефона, а для другого шума — в канал правого телефона. В результате этого слитный образ, вызываемый одним из шумов, всегда смещался только вправо, а слитный образ, вызываемый другим шумом, — только влево. Тем временным задержкам, при которых шумовой образ смещается для слушателя вправо, мы приписали знак плюс, а временным задержкам, при которых образ смещается для слушателя влево, — знак минус. В наших опытах абсолютная величина интерауральной временной задержки τ_0 ($0 \leq \tau_0 \leq 1$ *мсек*) устанавливалась одинаковой для обоих шумов. В соответствии с этим шум от одного генератора, подаваемый с положительной временной

задержкой, мы обозначили как $N_{+\tau_0}$, шум от другого генератора, подаваемый с отрицательной временной задержкой, как $N_{-\tau_0}$ и, наконец, шум, подаваемый от двух генераторов одновременно, как $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$.

С помощью экспериментальной установки тон на фоне шума можно было подавать как моноаурально (попеременно на левый и правый телефоны), так и бинаурально с различной интерауральной разностью фаз φ .

Опыты проводились в звукоизолированной камере с двумя испытуемыми, у которых абсолютные моноауральные пороги слуха для левого и правого уха были одинаковы. В опытах использовалась обычная пороговая методика; частота тона составляла 500 *гц*, уровень звукового давления тона изменялся с шагом в 1 *дб*, длительность тона составляла 450 *мсек*. Шум на протяжении отдельного опыта подавался на телефоны непрерывно. Уровень спектральной плотности мощности маскирующего шума, поступающего от каждого шумового генератора отдельно, составлял 56 *дб* в полосе частот 100—5000 *гц*.

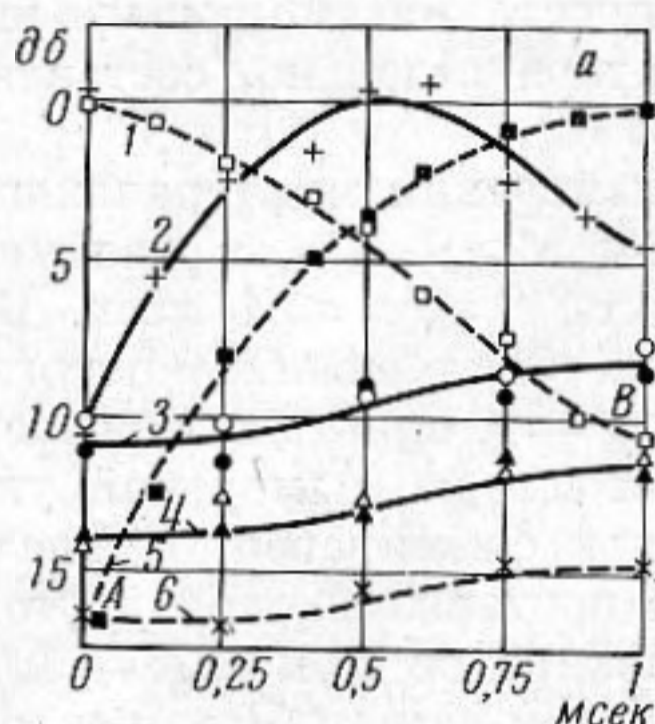
Основной эксперимент заключался в измерении моноаурального порога тона при маскировке шумом $N_{+\tau_0}$ и шумом $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$ с различными интерауральными временными задержками τ_0 , $0 \leq \tau_0 \leq 1$ *мсек*. В тех же опытах были измерены для сопоставления бинауральные пороги тона с интерауральной разностью фаз $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi$ при маскировке шумом $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$. Каждый отдельный опыт состоял из измерений указанных моноауральных и бинауральных порогов при фиксированном значении τ_0 . После перерыва на отдых все измерения повторялись при другом значении τ_0 . Моноауральные пороги тона при маскировке шумом $N_{+\tau_0}$ были измерены как на левом, так и на правом ухе, и тем самым было исчерпано все разнообразие взаимного расположения тонального и шумового образов при маскировке одним шумом. В связи с этим измерения моноаурального порога при маскировке шумом $N_{-\tau_0}$ в полном объеме не проводились. Пробные же измерения показали, что изменения моноауральных порогов при маскировке шумом $N_{-\tau_0}$ совершенно идентичны изменениям таковых при маскировке шумом $N_{+\tau_0}$.

Полученные экспериментальные данные приведены на фиг. 1, 2 отдельно для испытуемого I (фиг. 1) и для испытуемого II (фиг. 2). На графиках по оси абсцисс отложена абсолютная величина интерауральной временной задержки шума τ_0 в миллисекундах, по оси ординат — пороговый уровень звукового давления тона в децибелах относительно порогового уровня моноаурального тона 500 *гц* при ипсилатеральной маскировке его суммой двух шумов. На каждом графике изменение моноауральных порогов в зависимости от τ_0 показано сплошными линиями, а изменение бинауральных порогов — штриховыми. Кривая 2 (прямые крестики) показывает изменение моноауральных порогов при маскировке шумом $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$. Кривая 4 показывает изменение моноауральных порогов при маскировке шумом $N_{+\tau_0}$ (полыми и залитыми треугольниками отмечены пороги, полученные соответственно на левом и на правом ухе). Кривые 1 и 5 показывают изменение бинауральных порогов тона при маскировке шумом $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$ соответственно для случая $\varphi = 0$ (полые квадратики) и для случая $\varphi = \pi$ (залитые квадратики).

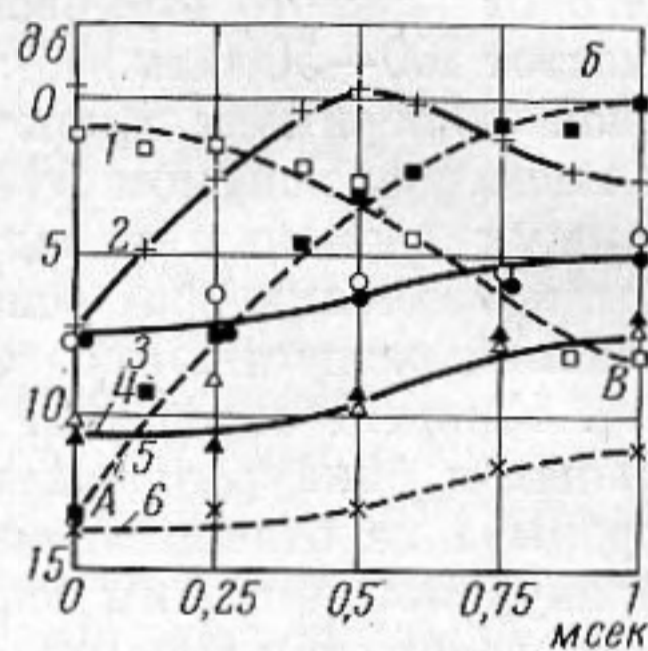
На этих графиках представлены также результаты другого эксперимента, проведенного нами в дополнение к вышеописанному. В этом эксперименте тон 500 *гц* маскировался одним шумом удвоенной мощности, который мы обозначили $N_{+\tau_0}$. Такой шум на каждом телефоне равен по мощности сумме двух шумов $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$. Каждый отдельный опыт дополнительного эксперимента состоял из измерений моноауральных порогов на левом и на правом ухе и бинауральных порогов тона с интерауральной разностью фаз $\varphi = 2\pi \left(1 - \frac{\tau_0}{T}\right)$ при маскировке шумом $N_{+\tau_0}^*$ (T — период маскируемого тона). Каждый опыт проводился при фикси-

рованном значении τ_0 . Абсолютная величина интерауральной временной задержки τ_0 изменялась от опыта к опыту в пределах $0 \leq \tau_0 \leq 1$ мсек. На графиках монауральные пороги при маскировке шумом $N_{+\tau_0}$ показаны кружками (кривая 3), причем полыми и залитыми кружками отмечены соответственно пороги на левом и на правом ухе. Бинауральные пороги тона с интерауральной разностью фаз $\varphi = 2\pi \left(1 - \frac{\tau_0}{T}\right)$ при маскировке шумом $N_{+\tau_0}$ отмечены косыми крестиками (кривая 6).

Каждая точка на графиках соответствует 16 измерениям порога (для данных, показанных крестиками, каждая точка соответствует 32 измере-



Фиг. 1



Фиг. 2

ниям, т. к. взято среднее для левого и правого уха). Среднеквадратичное отклонение в подавляющем большинстве случаев не превышает 1 дБ.

Результаты проведенных опытов показывают, что с увеличением τ_0 от 0 до 1 мсек монауральные пороги при маскировке суммой двух шумов $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$ (кривая 2) изменяются немонотонно в отличие от монауральных порогов тона при маскировке одним шумом $N_{+\tau_0}$ (кривая 4) или шумом $N_{+\tau_0}$ (кривая 3). При этих условиях маскировки наибольшее бинауральное демаскирование монаурального тона происходит при $\tau_0 = 0$. В наших опытах это демаскирование в среднем для двух испытуемых составляет 8,7 дБ, что согласуется с данными других авторов [2, 3]. Сопоставление трех кривых для монауральных порогов тона показывает, что при добавлении к маскирующему шуму $N_{+\tau_0}$ шума $N_{-\tau_0}$ происходит значительно большее повышение монауральных порогов, чем при добавлении шума $N_{+\tau_0}$ при одинаковой суммарной мощности шумов на каждом телефоне. Кривая 3, как и следовало ожидать, повторяет ход кривой 4: при всех значениях τ_0 разница между монауральными порогами тона при маскировке шумом $N_{+\tau_0}$ и шумом $N_{+\tau_0}$ составляет приблизительно 3 дБ. Кривые 2 и 3, полученные при одинаковой мощности шума на телефонах, имеют только одну общую точку при $\tau_0 = 0$. Кривая 2 имеет максимум при

$\tau_0 = 0,5$ мсек $= \frac{1}{4} T$; в этой точке монауральный порог при бинауральной

маскировке шумом $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$ в пределах точности опыта совпадает с монауральным порогом при монауральной маскировке шумом той же мощности, т. е. в этой точке бинауральное демаскирование монаурального тона равно нулю. Кроме того, известно [2, 4], что монауральный порог тона при монауральной маскировке шумом равны монауральному порогу тона при бинауральной маскировке шумом той же мощности, но с нулевой интерауральной корреляцией (в этом случае шум на каждый телефон подается от одного из двух взаимно независимых источников). Следовательно,

в точке $\tau_0 = \frac{1}{4}T$ монауральный порог тона при маскировке шумом $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$ равен монауральному порогу при маскировке шумом с нулевой интерауральной корреляцией. (Для контроля нами был измерен монауральный порог тона при бинауральной маскировке шумом с нулевой интерауральной корреляцией, величина его показана на графиках прямым крестиком на оси ординат вблизи нуля).

На интервале $0 \leq \tau_0 \leq 1$ мсек кривая 2 принимает минимальные значения в точках $\tau_0 = 0$ и $\tau_0 = 1$ мсек $= \frac{1}{2}T$, причем разница монауральных

порогов в этих точках составляет в среднем для двух испытуемых 5,4 дб. Примерно на такую же величину (5,3 дб) отличаются и бинауральные пороги при маскировке шумом $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$ для «антифазных» условий маскировки тона шумом, т. е. условий $\tau_0 = 0$, $\varphi = \pi$ (точка А на кривой 5) и $\tau_0 = \frac{1}{2}T$, $\varphi = 0$ (точка В на кривой 1). В работе [1] мы отме-

чали, что это отличие бинауральных порогов нельзя объяснить изменением интерауральной корреляционной функции R шумов в узкой полосе частот и что его, по-видимому, следует связывать с изменением работы бинаурального механизма слуха при $\tau_0 > 0,6$ мсек, т. е. при временных задержках, превышающих время распространения звука на расстояние, равное размеру головы слушателя. Монотонное же изменение бинауральных порогов на интервале $0 \leq \tau_0 \leq 1$ мсек при маскировке шумом $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$ (кривые 1 и 5) отражают монотонное изменение R в этом случае:

$$R \sim \cos 2\pi \frac{\tau_0}{T} \cdot \cos 2\pi \frac{\tau}{T},$$

где τ определяет положение маскируемого тона на шкале интерауральных временных задержек и равно $\tau = \frac{\varphi}{2\pi}T$. В точке $\tau_0 = \frac{1}{4}T$ бинауральные

пороги тона при маскировке шумом $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$ аналогично монауральным порогам (кривая 2) оказываются по величине такими, как при маскировке интераурально некоррелированным шумом и не зависят от φ . В соответствии с этим при $\tau_0 \approx 0,5$ мсек $= \frac{1}{4}T$ экспериментальные кривые 1 и 5 на

обоих графиках имеют точку пересечения.

При маскировке одним шумом монауральные пороги на интервале $0 \leq \tau_0 \leq 1$ мсек изменяются монотонно (кривые 3 и 4), причем это изменение весьма точно повторяет изменение бинауральных порогов тона с интерауральной разностью фаз $\varphi = 2\pi \left(1 - \frac{\tau_0}{T}\right)$, т. е. для бинауральных

порогов при антифазных условиях маскировки (кривая 6). В точке $\tau_0 = 1$ мсек монауральные пороги возрастают в среднем на 2,5 дб, а бинауральные пороги — на 2,1 дб. Это изменение бинауральных порогов тона с ростом τ_0 при «антифазных» условиях маскировки одним шумом связывают с особенностями работы корреляционного механизма слуха при $\tau_0 > 0,6$ мсек. Эти особенности еще мало изучены, однако существование их установлено во многих экспериментах (см., напр., [5—7]). Вызваны они, по-видимому, снижением точности работы корреляционного механизма слуха при больших τ_0 , что приводит к появлению «внутренней» частичной раскорреляции бинауральных шумов. Наблюдаемое монотонное возрастание монауральных порогов с увеличением τ_0 при маскировке одним

шумом (кривые 3 и 4), по-видимому, также следует отнести на счет изменений в работе корреляционного механизма при $\tau_0 > 0,6$ мсек.

Сопоставление бинауральных и моноуральных порогов тона при маскировке шумом $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$ и шумом $N_{+\tau_0}$ показывает, что изменение моноуральных порогов тона с возрастанием τ_0 тоже зависит от изменения интерауральной функции корреляции R маскирующих шумов в узкой полосе частот со средней частотой, равной частоте маскируемого тона. Относительно характера этой зависимости определенно можно сказать только следующее: с уменьшением (увеличением) модуля интерауральной корреляции R моноуральный порог тона возрастает (понижается); при тех значениях τ_0 , при которых модуль R обращается в нуль, моноуральные пороги становятся такими, как при маскировке интераурально некоррелированным шумом.

Действительно, с возрастанием τ_0 на интервале $0 \leq \tau_0 \leq \frac{1}{2}T$ модуль интерауральной корреляции R для шума $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$ в узкой полосе изменяется периодически с удвоенной частотой маскируемого тона, $|R| \sim \left| \cos 2\pi \frac{\tau_0}{T} \right|$. В соответствии с этим колеблется и кривая 2, описы-

вающая изменение моноурального порога тона при маскировке шумом $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$. В случае же маскировки одним шумом (кривые 3 и 4) модуль R изменяется монотонно и обращается в нуль лишь при значениях τ_0 , равных нескольким периодам маскируемого тона [8], а на интервале $0 \leq \tau_0 \leq 1$ мсек модуль R изменяется несущественно. И как уже упоминалось выше, наблюдаемое в этом случае изменение моноуральных порогов, по-видимому, целиком определяется влиянием «внутренней» раскорреляции шумов при интерауральных временных задержках $\tau_0 > 0,6$ мсек. Это же влияние накладывается на изменение моноуральных порогов и в случае маскировки тона суммой двух шумов $N_{+\tau_0} + N_{-\tau_0}$.

Интересно было бы сравнить зависимость моноуральных порогов от интерауральной корреляции, полученную в наших опытах при изменении τ_0 , с аналогичной зависимостью при непосредственном изменении интерауральной корреляции маскирующих шумов, например, в опыте с шумами от трех генераторов. Однако в настоящее время такие данные в литературе отсутствуют.

Автор выражает благодарность В. Д. Дроздовой, осуществлявшей технический контроль за работой экспериментальной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Д. Бурцев а. Бинауральные пороги тона при маскировке суммой двух взаимно независимых шумов с различными интерауральными временными задержками. Акуст. ж. 17, 2, 1971.
2. J. P. Egan. Masking-level differences as a function of interaural disparities in intensity of signal and of noise. J. Acous. Soc. Am. 38, 6, 1043—1049, 1965.
3. H. S. Colburn, N. I. Durlach. Time-intensity relations in binaural unmasking. J. Acous. Soc. Am. 38, 1, 93—103, 1965.
4. L. A. Jeffress, H. C. Blodgett, T. T. Sandel, C. L. Wood. «III Masking of tonal signals». J. Acous. Soc. Am. 28, 3, 416—426, 1956.
5. I. J. Hirsh, M. Burgeat. Binaural effects in remote masjing. J. Acous. Soc. Am. 30, 9, 827—832, 1958.
6. L. A. Jeffress, H. C. Blodgett, B. H. Deatherage. Masking and interaural phase. II 167 cycles. J. Acous. Soc. Am., 34, 8, 1124—1126, 1962.
7. L. R. Rabiner, C. L. Laurence, N. I. Durlach. Further results on binaural unmasking and EC — model. J. Acous. Soc. Am. 40, 1, 62—70, 1966.
8. T. L. Langford, L. A. Jeffress. Effect of Noise Crosscorrelation on Binaural Signal Detection. J. Acous. Soc. Am. 36, 8, 1455—1458, 1964.

Акустический институт
АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию
30 апреля 1971 г.