

Основанное на громкости обнаружение тестового импульса, предъявляемого до или после периодической последовательности помеховых импульсов

Л. К. Римская-Корсакова^{1,*}, Д. И. Нечаев^{2†}

¹АО Акустический институт имени академика Н. Н. Андреева, Москва, ул. Шверника, д. 4

²Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова, Москва, Ленинский пр., д. 33

(Статья поступила 14.11.2019; Подписана в печать 09/01/2020)

Искали проявления маскировки громкости отдельных импульсов в последовательности с периодом следования T из диапазона 20 – 150 мс. Тестовым был первый или последний импульс последовательности из 12 сходных узкополосных импульсов. Варьировали период и уровень тестового импульса, чтобы определить порог его обнаружения и тот минимальный период следования T_{min} , при котором возможно его обнаружение. При периоде T_{min} определяли сдвиг порога $dIso$, как разность порогов обнаружения замаскированного и одиночного импульсов. Полагали, что показатели T_{min} и $dIso$ характеризовали временное разрешение громкости и изменение громкости тестового импульса вследствие маскировки. Показатели сравнивали с показателями суммации последовательностей импульсов у слушателей с нормальным слухом (первая группа) и кохлеарными потерями (вторая группа). Показатели T_{min} и $dIso$ слушателей первой группы коррелировали с показателями суммации: чем больше суммация, тем больше были показатели T_{min} и $dIso$. Сдвиг $dIso$ при T_{min} достигал 10 – 20 дБ при разных положениях тестового импульса. У слушателей второй группы, хотя суммация была слабой, периоды T_{min} были заметно больше, а сдвиги $dIso$ — меньше, чем у слушателей первой группы. Принимая импульсы за модели фонем согласных, пролагали, что слуховая чувствительность и свойства временной маскировки громкости фонем согласных ответственны за их восприятие, за разборчивость речи.

PACS: 3.66.Cb, 43.66.Ba, 43.66.Sr

УДК: 534.79; 612.85

Ключевые слова: маскировка, громкость, фонема, импульс, последовательность.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение темпа речи может снизить ее разборчивость. Считается, что за разборчивость в большей степени ответственна временная чувствительность, а не абсолютная чувствительность.

Элементарной единицей речи является фонема. При нормальном темпе диктор произносит 9 – 14 фонем за секунду, что соответствует периоду следования фонем в 110–70 мс. Частотный диапазон большинства согласных звуков, играющих ключевую роль в восприятии речи, оценивают в 1 – 5 кГц. Эти звуки имеют небольшую длительность (~ 10 – 70 мс) и интенсивность. Поэтому часто за модель фонемы согласного звука принимают высокочастотный импульс и изучают особенности его обнаружения в последовательности других импульсов [1, 2].

В формировании громкости звуков участвует процесс временной суммации. Суммация отвечает за маскировку громкости первого импульса в последовательности [3, 4] и может быть частью процесса называемого «вызванным снижением громкости» [5] импульса, расположенного в середине или конце последовательности. Благодаря маскировке громкость импульсов последовательности связана с ее периодом следования (темпом). В данной работе искали проявления маскировки громкости отдельных импульсов при раз-

ных периодах следования импульсов последовательности. Для этого оценивали пороги обнаружения первых или последних тестовых импульсов в периодической последовательности импульсов при разных периодах их следования. Параметры последовательностей выбирали так, чтобы слушатель мог обнаружить тестовый импульс на основании его громкости. Показатели обнаружения тестовых импульсов сопоставляли со слуховой чувствительностью слушателей и показателями временной суммации тонов и последовательностей импульсов. Полагали, что такое сопоставление позволит выявить общие и индивидуальные особенности восприятия громкости отдельных импульсов последовательности, как фонем согласных звуков в речевом потоке.

1. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Слуховые эксперименты проводили в звукопоглощающей кабине. Для генерации звуков, управления экспериментов и сбора данных использовали аппаратно-программный комплекс. Звуковая последовательность включала в себя эталонный и целевой стимулы, разделенные паузой в 500 мс. Стимулы формировали цифровым способом и с помощью адаптера E-MU 0204 USB с частотой дискретизации 44.1 кГц преобразовывали в аналоговую форму. Стимулы воспроизводили в случайном порядке и предъявляли слушателю на одно ухо через наушники Sennheiser HD-265.

Эталонные стимулы содержали 11 одинаковых помеховых импульсов, а целевые — 11 помеховых импульсов и 1 тестовый импульс. Тестовым мог быть первый

*E-mail: lkrk@mail.ru

†E-mail: dm.nechaev@yandex.ru

или последний импульс последовательности (рис. 1). Временные профили тестовых и помеховых импульсов были одинаковыми. Центральная частота была равна 4 кГц, а ширина полосы — 240 Гц (менее ширины критической полосы слуха). Уровень помеховых импульсов составлял 80 дБ УЗД. Период следования импульсов T в последовательности варьировал в диапазоне 20 – 150 мс. Полагали, что при таких параметрах слушатели не отличали эталонный и целевой стимулы по длительности, но могли различить их на основании громкости тестового импульса.

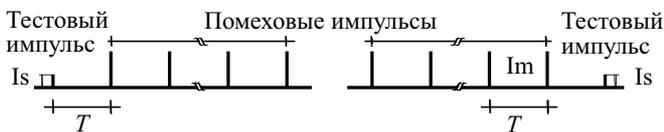


Рис. 1: Временные профили целевых стимулов. Тестовый импульс мог опережать последовательность помеховых импульсов (слева) или следовать за ней (справа). I_m и I_s — амплитуды помехового и тестового импульсов

Пороги обнаружения тестовых импульсов определяли на основании психометрических кривых, т.е. зависимостей вероятности правильного обнаружения тестового импульса от его интенсивности. Кривые получали методом постоянных раздражителей. Тестовый импульс с каждым из заданных уровней предъявляли по 10 раз в случайном порядке. За порог обнаружения принимали уровень тестового импульса, при котором число правильных ответов достигало 75 %.

На основании психометрических кривых определяли: 1) минимальный период следования импульсов в последовательности (T_{min}), при котором слушатели могли обнаружить тестовый импульс, и 2) сдвиг порога ($dIso$), равный разнице между порогами обнаружения замаскированного и одиночного тестовых импульсов ($dIso = M - Ms$, где Ms — порог обнаружения одиночного тестового импульса, M — порог обнаружения тестового импульса в последовательности). Полагали, что период T_{min} характеризовал временное разрешение громкости тестового импульса в последовательности; а сдвиг $dIso$ — изменение пороговой громкости импульсов под влиянием временной маскировки.

Показатели маскировки T_{min} и $dIso$ сравнивали с показателями временной суммации тонов (I_t) и последовательностей импульсов (I_{ps}), с порогом обнаружения одиночных импульсов. Показатели суммации I_t определяла разность порогов обнаружения тона с длительностью из диапазона 15 – 120 мс и тона с длительностью в 240 мс. Показатели суммации I_{ps} определяла разность порогов обнаружения одиночного импульса и последовательности импульсов с периодом следования из диапазона 20 – 80 мс (при этом длительности последовательностей составляли 200, 300, 500 или 800 мс). Для определения порогов обнаружения тонов и последовательностей импульсов использовали адаптивный метод двух интервального двух альтернатив-

ного вынужденного выбора в сочетании с вариациями уровней «два вниз — один вверх».

В измерениях участвовали слушатели двух групп (табл. I). В первую вошли пять слушателей с нормальным слухом и небольшими кохлеарными потерями, во вторую — два слушателя со значительными кохлеарными потерями.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Показатели маскировки T_{min} и $dIso$ (I) первой группы слушателей были получены на основании психометрических кривых, представленных на рис. 2, А. Данные «типичного» слушателя с нормальным слухом I_t были получены путем усреднения сходных кривых трех слушателей И1, И6 и И7. Данные слушателя I_t сравнивали с данными «нетипичного» слушателя И5 с нормальным слухом и слушателя И2 с незначительными кохлеарными потерями.

У слушателей I_t , И5 и И2 периоды T_{min} оказались разными. Самые низкие T_{min} в 25 мс были получены у слушателя I_t при любых положениях тестового импульса. У слушателей И5 и И2 пороги T_{min} зависели от положения тестового импульса. Они, соответственно, были равны 80 и 50 мс, если тестовый импульс опережал помеху, или 50 и 30 мс, если тестовый импульс следовал за помехой. Максимальные значения сдвигов $dIso$ обнаружены при периоде следования T_{min} . При увеличении T сверх T_{min} сдвиги $dIso$ уменьшались. У слушателя I_t наибольший $dIso$ при T_{min} в 25 мс составил 27 дБ, если тестовый импульс следовал за помехой, но 9 дБ, если тестовый импульс опережал помеху. У слушателя И5 сдвиги $dIso$ составили 23 дБ при T_{min} в 50 мс, если тестовый импульс следовал за помехой, и при T_{min} в 80 мс, если тестовый импульс опережал помеху. У слушателя И2 сдвиг $dIso$ был равен 14 дБ при T_{min} в 30 мс, если тестовый импульс следовал за помехой, и 17 дБ при T_{min} 50 мс, если тестовый импульс следовал за помехой. Таким образом, $dIso$ и T_{min} не были связаны с слуховой чувствительностью слушателей. Самые высокие T_{min} и $dIso$ были обнаружены у «нетипичного» слушателя И5 с нормальным слухом, а самые низкие — у «типичного» слушателя I_t с нормальным слухом.

У слушателей второй группы И3 и И4 (рис. 2 и табл. I) пороги T_{min} были больше, чем у слушателей первой группы. Пороги T_{min} были равны 80 (И3) и 150 (И4) мс, если импульс опережал помеху, но 120 мс (И3 и И4), если импульс следовал за помехой. Сдвиги $dIso$ при T_{min} у слушателя И3 составили 2 дБ, если импульс опережал помеху, но 9 дБ, если импульс следовал за помехой. У слушателя И4 сдвиги $dIso$ были равны нулю при всех положениях тестового импульса относительно помехи.

Полученные у слушателей двух групп показатели временной суммации для тонов (I_t) и последовательностей из 11 импульсов (I_{ps}) с разными периодами следования T представлены в табл. II. Показатели I_t

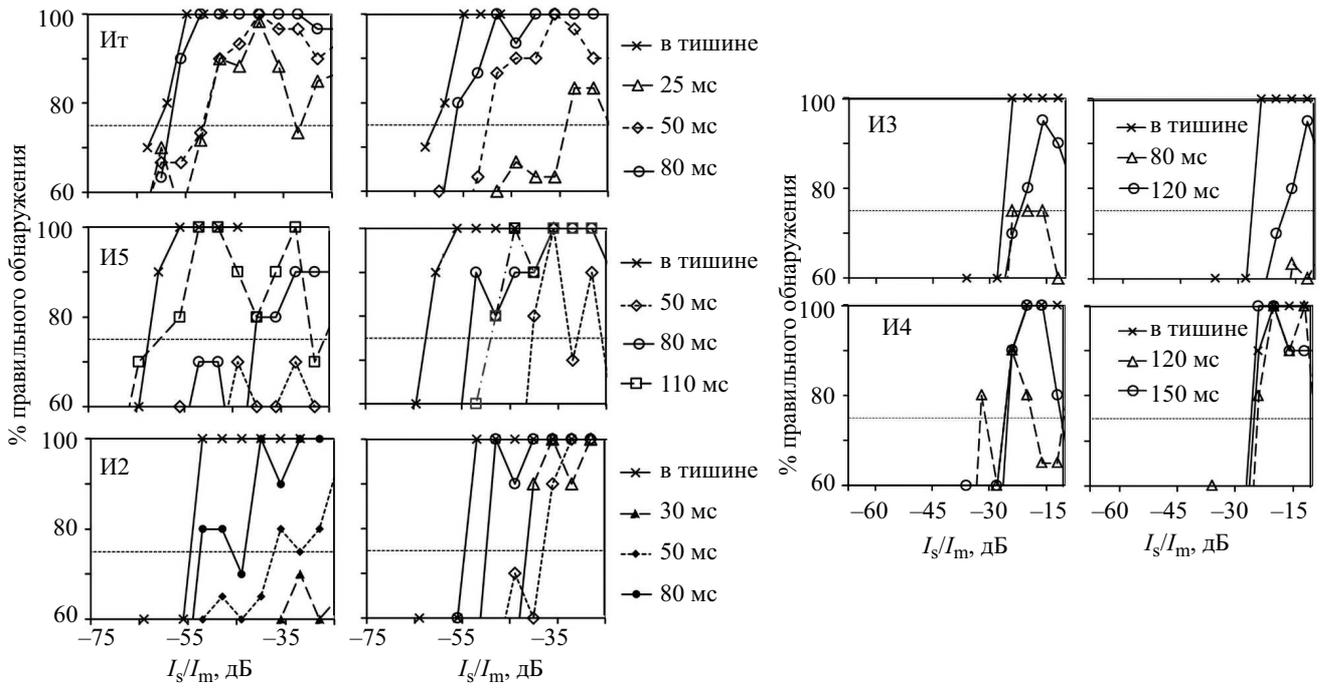


Рис. 2: Психометрические кривые или зависимости % правильного обнаружения тестового импульса, предъявляемого в тишине (кресты), а также до (I) или после (II) последовательности помеховых импульсов от уровня тестового импульса. А — данные слушателей первой группы; Б — второй группы. Абсцисс — отношение I_s/I_m в дБ, где I_s и I_m уровни тестового и помехового импульсов. Ординат — число правильных ответов в % (пунктир — 75 %). Легенда — слушатель; предъявление импульса в тишине или в последовательности импульсов с периодом следования в мс

Таблица I: Сведения о слушателях и пороги временного разрешения громкости (T_{min}) и сдвиги порогов обнаружения громкости тестовых импульсов ($dIso$)

Слушатель	Возраст, г	Пол	Слуховой опыт (*музыкант-любитель)	Порог для одиночного импульса, дБ	Тестовый импульс первый		Тестовый импульс последний	
					T_{min} , мс	$dIso$, дБ	T_{min} , мс	$dIso$, дБ
Первая группа								
И1	35	М	> 60 часов *	17	—	—	—	—
И6	25	Ж	> 20 часов	10	—	—	—	—
И7	35	М	~ 20 часов *	15	—	—	—	—
Ит (рис. 2)				14	25	9	25	27
И2	63	Ж	> 60 часов	26	50	17	30	14
И5	35	М	~ 3 часа*	16	80	23	50	23
Вторая группа								
И3	58	Ж	> 60 часов	59	80	2	120	9
И4	75	Ж	> 60 часов	59	150	0	120	0

у слушателей с нормальным слухом (Ит, И5 и И2) превысили таковые у слушателей с кохлеарными потерями (И3 и И4).

Свойства суммация последовательностей импульсов не соответствовали таковым тонов. В первой группе у слушателя Ит показатели I_{ps} варьировали в пределах 2 дБ при разных T , выявляя слабую суммацию. У слушателей И5 и И2 такие показатели были выше

(6–8 дБ) и указывали на значительную суммацию. Показатели I_{ps} слушателей первой группы не коррелировали со слуховой чувствительностью, но коррелировали с показателями T_{min} и $dIso$. Чем больше I_{ps} , тем больше показатели T_{min} и $dIso$. У слушателей второй группы регистрировали незначительную суммацию последовательностей импульсов I_{ps} , более высокие периоды T_{min} и меньшие сдвиги dso , чем у слушателей

Таблица II: Сведения о слушателях и пороги временного разрешения громкости (T_{min}) и сдвиги порогов обнаружения громкости тестовых импульсов ($dIso$)

Слушатели	Суммация тонов					Суммация последовательностей			
	Порог, дБ/тон в 240 мс	Длительность тона, мс				Период следования, мс			
		15	30	60	120	20	30	50	80
		Показатель $I_{_t}$, дБ					Показатель $I_{_ps}$, дБ		
Первая группа									
Ит (сред)	3.9	11.3	7.4	4.9	1.5	0.9	1.8	0.3	-0.6
И5	0.9	10.9	8.0	5.0	3.0	9.5	9.1	6.9	4.9
И2	15.0	7.4	5.9	2.6	0.7	7.7	6.4	8.5	7.9
Вторая группа									
И3	57.3	5.1	-1.1	0.6	0.1	-3.0	0.3	-	0.9
И4	54.2	4.4	1.9	-0.1	1.1	1.5	0.9	0.7	-0.6

первой группы. Сравнение данных слушателей двух групп обнаружило связь показателя T_{min} со слуховой чувствительностью.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбирая параметры стимулов, мы стремились, чтобы слушатель обнаруживал тестовый импульс на основании его громкости. Поэтому минимальный период следования импульсов последовательности (T_{min}), при котором слушатель обнаруживал тестовый импульс, мог определять временное разрешение громкости, а сдвиг порога обнаружения импульсов ($dIso$) — изменения громкости тестового импульса. На это указывает сопоставление наших и известных данных. Так, разрешение громкости импульса, равное 25 мс, у «типичного» слушателя Ит, вполне соответствует пороговой частоте амплитудной модуляции шума в 30–40 Гц [6]. Считается, что если частота модуляции меньше пороговой, то слуховая система анализирует амплитудные изменения шума. Чувствительность к амплитудным модуляциям у слушателей с кохлеарными потерями как правило хуже [7–9]. У наших слушателей И3 и И4 с кохлеарными потерями слуха (И2), также период T_{min} возрос до 80 – 150 мс.

Временная суммация тонов наших слушателей соответствует известным данным [10–12]. У слушателей с нормальным слухом она была больше, чем у слушателей со кохлеарными потерями. Свойства суммация последовательностей импульсов отличались от таковых тонов, так как последние были связаны не только с процессами суммации, но и разрешения. Показатели суммации последовательности, полученные для слушателя Ит, варьировали в пределах 2 дБ при изменении периода от 20 до 80 мс, и соответствовали известным данным [13]. Однако показатели суммации у слушателей И5 и И2 имели индивидуальные особенности — они были

больше и составили 6 – 8 дБ. Полагаем, поэтому у этих слушателей показатели временного разрешения и изменений громкости T_{min} и $dIso$ были больше, чем у слушателя Ит.

В случае обнаружения первого импульса было справедливо правило (табл. I): чем больше период T_{min} , тем больше сдвиг $dIso$. По-видимому, кратковременный процесс суммации (с постоянной менее 110 мс), участвовал в формировании громкости первого импульса, вызывая эффект частичной маскировки громкости [4].

В случае обнаружения последнего импульса было справедливо другое правило: чем меньше период T_{min} , тем больше смещение $dIso$. В формировании громкости последнего импульса, скорее, участвовал другой процесс. Он вызывал эффект уменьшения громкости импульсов, известный как «вызванное уменьшение громкости» [5].

Сравнение данных слушателей двух групп, как и известные данные ([7–9]), указывают, что временное разрешение громкости связано со слуховой чувствительностью. У слушателей второй группы периоды T_{min} были больше, а сдвиги $dIso$ были меньше, чем у слушателей первой группы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, уменьшение периода следования импульсов периодической последовательности повышает маскировку громкости ее отдельных импульсов. Однако связь между слуховой чувствительностью слушателя, показателями суммации последовательностей импульсов ($I_{_ps}$), временным разрешением громкости (T_{min}), изменением громкости импульсов на пороге временного разрешения ($dIso$ при T_{min}) была разной у двух групп слушателей. У слушателей с нормальным слухом или незначительными кохлеарными потерями сдвиги $dIso$ при T_{min} могли достигать 10 – 20 дБ не

зависимо от положения тестового импульса. Показатели T_{min} и $dIso$ коррелировали с показателями суммации последовательностей импульсов I_{ps} , обнаруживая роль процесса суммации в разрешении и маскировке громкости отдельных импульсов. У слушателей второй группы за счет падения слуховой чувствительности суммация последовательностей импульсов была слабой (низкие показатели I_{ps}), временное разрешение громкости импульсов было низким (большие периоды T_{min}), а измерения *пороговой* громкости отдельных импульсов на пороге временного разрешения ($dIso$ при T_{min}) либо отсутствовали, либо были меньше, чем у слушателей первой группы.

Повышение темпа речи оказывает влияние на временное разрешение и восприятие громкости фонем согласных. При этом изменения отношения громкостей фонем согласных и гласных может влиять на разборчивость речи. Индивидуальные особенности восприятия громкости фонем согласных связаны со слуховой чувствительностью и свойствами суммации последовательностей импульсов. Эти особенности выявляют пороги временного разрешения громкости отдельных импульсов последовательностей (T_{min}).

Авторы выражают благодарность профессору А. Я. Супину за полезные замечания, высказанные при обсуждении работы. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-04-00155 и 17-04-00096).

-
- | | |
|---|--|
| [1] Fitzgibbons P.J., Gordon–Salant S. // Hearing Research. 2010. 264 . P. 41. | [8] Bacon S.P., Viemeister N.F. // Audiology. 1985. 24 . P. 117. |
| [2] Fitzgibbons P.J., Gordon–Salant S. // J. Acoust. Soc. Am. 2011. 129 . P. 1490. | [9] Moore B.C., Shailer M.J., Scho oneveldt G.P. // British. J. of Audiol. 1992. 26 . P. 229. |
| [3] Fastl H. // Acta Acustica united with Acustica. 1984. 54 . P. 145. | [10] Zwillocki J.J. // J. Acoust. Soc. Am. 1960. 32 . P. 1046. |
| [4] Fastl H., Zwicker E. Psychoacoustics: Facts and Models. 2008. Springer. | [11] Elliott L.L. // Audiology. 1975. 14 . P. 336. |
| [5] Epstein M.J. // Acoust. Soc. Am. 2007. 122 . P. 74; | [12] Florentine M., Fastl H., Buus S. // J. Acoust. Soc. Am. 1988. 84 . P. 195. |
| [6] Viemeister N.F. // J. Acoust. Soc. Am. 1979. 66 . P. 136. | [13] Garner W.R., Miller G.A. // J. Exp. Psychol. 1947. 37 . P. 293. |
| [7] Formby C. // Audiology. 1987. 26 . P. 89. | |
-

Detection of test pulses based on loudness that were presented before or after a periodic sequence of masking pulses

L. K. Rimskaya–Korsakova^{1,a}, D. I. Nechaev^{2,b}

¹Joint-stock company «Acoustic Institute named after academician N.N. Andreyev»

²A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution

E-mail: ^alkrk@mail.ru, ^bdm.nechaev@yandex.ru

We looked for manifestations of the masking of the loudness of single pulses of a sequence with repetition periods T from a range of 20 – 150 ms. The test was the first or last pulse of the sequence of 12 similar narrowband pulses. The period T and the level of the test pulse were varied to determine the threshold for its detection and the minimum repetition period T_{min} at which its detection is possible. For the period T_{min} , the threshold shift $dIso$ was determined as the difference between the detection thresholds for masked and single pulses. It was believed that the T_{min} and $dIso$ characterized the temporal resolution of the loudness and the changes in the loudness of the test pulse under masking. The indicators T_{min} and $dIso$ were compared with the indicators of the temporal summation of pulse sequences in listeners with normal hearing (the first group) and cochlear losses (the second group). The T_{min} and $dIso$ indicators of the first group of listeners correlated with the summation indicators: the higher the summation, the greater were the T_{min} and $dIso$ indicators. The shifts $dIso$ at T_{min} were equal 10 – 20 dB at different positions of the test pulse. For listeners of the second group, the summation was weak, the periods T_{min} were noticeably larger, and the shifts $dIso$ were smaller than those for listeners of the first group. Taking the pulses for phoneme consonant models, it was assumed that the auditory sensitivity and temporal masking properties of consonants phoneme loudness are responsible for their perception, for speech intelligibility. Keywords: masking, loudness, phoneme model, pulse, sequence

PACS: 3.66.Cb, 43.66.Ba, 43.66.Sr

Keywords: masking, loudness, phoneme model, pulse, sequence.

Received 14 November 2019.

Сведения об авторах

1. Римская–Корсакова Людмила Красармовна — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (499) 723-62-11, e-mail: lkrk@mail.ru.

2. Нечаев Дмитрий Игоревич — канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 952-37-86, e-mail: dm.nechaev@yandex.ru.