

ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН КОМПРЕССИИ ПРИ РАЗЛИЧЕНИИ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ СО СЛОЖНЫМИ СПЕКТРАМИ

© 2018 г. О. Н. Милехина^а, Д. И. Нечаев^а, А. Я. Супин^{а, *}

^аИнститут проблем экологии и эволюции РАН
Россия, 119071 Москва, Ленинский просп. 33

*e-mail: alex_supin@mail.ru

Поступила в редакцию 28.09.2017 г.

В психофизических экспериментах на нормально слышащих испытуемых исследовали различение гребенчатых спектров звукового сигнала на фоне маскером с различным положением спектральной полосы относительно полосы сигнала. При изменении уровня сигнала от 50 до 80 дБ УЗД уровень изочастотного маскера на пороге маскировки изменялся на 29 дБ, тогда как уровень низкочастотного маскера (положение центра спектральной полосы от -1.25 до -1 октав относительно сигнала) изменялся на 8.7–9.8 дБ. Эти результаты интерпретируются как проявление компрессии ответов на сигнал 0.3 дБ/дБ и отсутствие компрессии эффекта низкочастотных маскером. При частичном перекрытии спектральных полос сигнала и маскера различение спектральной структуры происходит преимущественно в той части спектра, которая не перекрывается со спектром маскера и подвержена низкочастотной маскировке, не проявляющей компрессии.

Ключевые слова: слух, компрессия, маскировка, гребенчатые спектры

DOI: 10.1134/S0320791919010052

ВВЕДЕНИЕ

Компрессивная нелинейность передачи сигналов в слуховой системе — один из фундаментальных механизмов слуха. Компрессия позволяет в несколько раз сжать огромный (до 120 дБ, т.е. 10^{12} раз по мощности) диапазон интенсивностей звуковых сигналов, тем самым делая весь этот диапазон доступным не только для восприятия, но и для анализа. Компрессивная нелинейность передачи сигналов возникает на уровне слуховой улитки [1] и хорошо проявляется в реакциях волокон слухового нерва [2, 3].

Характерной чертой кохлеарной (т.е. возникающей в слуховой улитке) компрессии является то, что она максимальна в тонотопическом представителе воздействующего звука, т.е. в том участке улитки, для которого частота звука является характеристической; в соседних участках улитки компрессия выражена меньше или отсутствует [4]. Это свойство кохлеарной компрессии было использовано для ее измерения в слуховой системе человека с использованием психофизического метода. Для того чтобы выявить эффект компрессии, сравнивали эффекты маскировки для изочастотного (т.е. той же частоты, что и сигнал) и низкочастотного (более низкой, чем сигнал, частоты) маскирующих звуков (маскером). Изочастотный маскер адресуется к тому же участку тонотопической проекции улитки, что и сигнал, так что эф-

фект маскера подвержен компрессии в равной степени с ответом на сигнал. Поэтому при изменении уровня сигнала на некоторую величину порог маскировки достигается с изменением уровня маскера на такую же величину. В результате пороговый уровень маскера линейно зависит от уровня сигнала. Иная ситуация имеет место при действии низкочастотного маскера. Низкочастотный маскер менее эффективен, чем изочастотный, но его эффект в тонотопическом представительстве сигнала не подвержен компрессии. Поэтому при некотором изменении уровня сигнала порог маскировки достигается при значительно меньшем изменении уровня маскера. В результате пороговый уровень низкочастотного маскера нелинейно зависит от уровня сигнала. Отношение (выраженное в дБ/дБ) изменений уровня сигнала и порогового уровня низкочастотного маскера равно фактору компрессии ответа на сигнал [5–7].

Определение фактора компрессии методом маскировки осложняется тем, что помимо собственно маскировки низкочастотный маскер вызывает некоторые дополнительные эффекты, которые могут влиять на проявление компрессии. К таким дополнительным эффектам относятся латеральное подавление и прослушивание на боковых частотах [8]. Латеральное подавление, создаваемое низкочастотным маскером, снижает коэффициент усиления активного механизма улитки

в тонотопическом представительстве сигнала. Поскольку компрессивная нелинейность – свойство активного механизма, снижение его коэффициента усиления приводит к менее выраженной компрессии ответа на сигнал. Прослушивание на боковых частотах проявляется в том, что сигнал обнаруживается не по ответу участка улитки, который является тонотопическим представительством сигнала, а по ответу участка, хотя и менее чувствительного к сигналу, но зато меньше подверженного маскировке. Ответы участка за пределами тонотопического представительства меньше подвержены компрессии.

В экспериментах, целью которых было изменение компрессии при ее максимальном проявлении, принимались специальные меры для устранения латерального подавления и прослушивания на боковых частотах. Чтобы исключить эффект латерального подавления, использовали экспериментальную схему с последовательной, а не одновременной маскировкой [5]. Этот прием основан на том, что латеральное подавление возникает непосредственно во время действия звука и прекращается после его выключения. Чтобы исключить эффект прослушивания на боковых частотах, применяли дополнительный маскер с частотной полосой, перекрывающей возможный частотный диапазон прослушивания на боковой частоте [5], либо использовали сигнал низкого околорогового уровня, чтобы его обнаружение было возможно только в участке улитки, наиболее чувствительном к сигналу [6, 7]. В последнем случае вместо варьирования уровня сигнала применяли варьирование интервала между маскером и сигналом при последовательной маскировке.

Таким образом, чтобы в полной мере выявить компрессию ответа на сигнал в участке его (сигнала) тонотопического представительства, требовалось применение сигналов и маскеров со специфическими характеристиками:

– сигнал должен следовать после маскера, а не на его фоне (последовательная маскировка), причем временной интервал между маскером и сигналом должен быть достаточно большим, чтобы к моменту включения сигнала исчез эффект латерального подавления, создаваемого маскером, но не слишком большим, чтобы не исчез эффект маскировки;

– сигнал должен быть достаточно слабым, чтобы он мог обнаруживаться только за счет ответа в своем тонотопическом представительстве, а не за счет прослушивания на боковой частоте.

Такие условия могли соблюдаться в строго контролируемых экспериментах, но они не характерны для многих натуральных звуков. Это касается как “целевых” звуков, которые играют роль сигнала, так и для прочих звуков, которые играют роль шумового фона, т.е. маскеров. Сигналы и

маскеры могут полностью или частично перекрываться или быть разнесены по частоте и во времени. Поэтому влияние компрессии на действии шумового фона может быть разным для разных частотных и временных компонентов сигнала. Кроме того, для понимания того, как сигналы воспринимаются в шумовом фоне и какую роль в этом играет компрессия, важно установить влияние маскирующего фона не только на *обнаружение*, но и на *различение* сигналов, поскольку опознание сигналов и формирование правильных реакций на них невозможно без успешного их различения.

Цель настоящего исследования – оценить роль компрессии в различении сигналов со сложными спектрами, которые по своим характеристикам могли бы считаться моделью сложных натуральных сигналов. В качестве таких модельных сигналов мы использовали звуки с “гребенчатыми” (rippled, comb-filtered) спектрами, т.е. со спектрами, у которых в пределах некоторой частотной полосы периодически чередуются максимумы и минимумы амплитуды спектральных составляющих. Такой спектр может считаться относительно сложным, поскольку помимо первичной спектральной структуры, определяемой такими параметрами как центральная частота, ширина спектральной полосы и др., гребенчатый спектр имеет более тонкую структуру, которую условно можно назвать вторичной – гребенчатый рисунок спектра. В отличие от многих натуральных сигналов, вторичная структура гребенчатого спектра может быть охарактеризована ограниченным числом параметров (плотность гребней, их глубина и фаза), что делает такие сигналы пригодными для экспериментальных измерений.

Сигналы с гребенчатым спектром показали свою эффективность для тестирования частотной разрешающей способности слуха человека. Способность нормально слышащих испытуемых различать гребенчатую структуру спектра была исследована в нескольких предшествующих работах [9–12]. Тест на различение гребенчатой структуры спектра также нашел широкое применение для контроля эффективности кохлеарных имплантов [13–17].

Частотная разрешающая способность, определяемая как способность к различению гребенчатой структуры спектра, снижается на фоне как изочастотных, так и низкочастотных маскеров [18–20]. Это позволяет применить сигналы с гребенчатыми спектрами в комбинации с хорошо зарекомендовавшим себя приемом маскировки для оценки кохлеарной компрессии. При этом выявляется роль компрессии не в обнаружении, а в различении спектральных рисунков сигнала, что соответствует цели данного исследования.

В пределах одной работы невозможно исследовать влияние компрессии на различение сигналов при всех возможных комбинациях параметров сигнала и маскира. Конкретная задача данного исследования состояла в том, чтобы установить, как роль компрессии в различении сигналов с гребенчатыми спектрами зависит от частотного соотношения сигнала и маскира. В зависимости от соотношения частотных полос сигнала и маскира они могут быть либо полностью разнесены по частоте, либо частично перекрываться, либо перекрываться полностью. При этом различные компоненты сигнала и маскира могут взаимодействовать между собой по правилам либо изочастотной, либо низкочастотной маскировки, либо по некоторым промежуточным правилам. От того, как взаимодействуют компоненты сигнала и маскира, зависит вклад компрессии в суммарный эффект маскира. Некоторые варианты такого взаимодействия рассматриваются в данном исследовании.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Испытуемые

В исследовании участвовали семь испытуемых – три мужчины и четыре женщины, в возрасте от 20 до 45 лет. Для всех испытуемых имелись стандартные аудиограммы, которые показали слуховые пороги не выше 15 дБ в диапазоне частот, в котором производили измерения: от 0.5 до 4 кГц. Все испытуемые дали информированное согласие на участие в экспериментах с прослушиванием звуков с уровнем, не превышающим 100 дБ УЗД.

Сигналы

Сигнал имел полосовой гребенчатый спектр. Огибающая спектра имела вид одного октавного периода косинусоиды от логарифма частоты, центрированного на частоте 2 кГц (рис. 1а). Ширина спектральной полосы на уровне 0.5 от максимума составляла 0.5 октавы (окт). Плавная (косинусоидальная) форма огибающей спектра была выбрана, чтобы избежать эффектов, которые могли бы появиться при крутых краях спектральной полосы [21]. В пределах огибающей спектр имел чередующиеся максимумы и минимумы спектральной амплитуды, т.е. имел гребенчатую структуру. Этот гребенчатый рисунок описывался также косинусоидальной функцией от логарифма частоты, т.е. интервалы между соседними гребнями были частотно-пропорциональными. Плотность расположения таких гребней на частотной шкале принято обозначать количеством периодов на октавный интервал частоты (окт⁻¹). В данном исследовании плотность гребней всегда составляла 3.5 окт⁻¹.

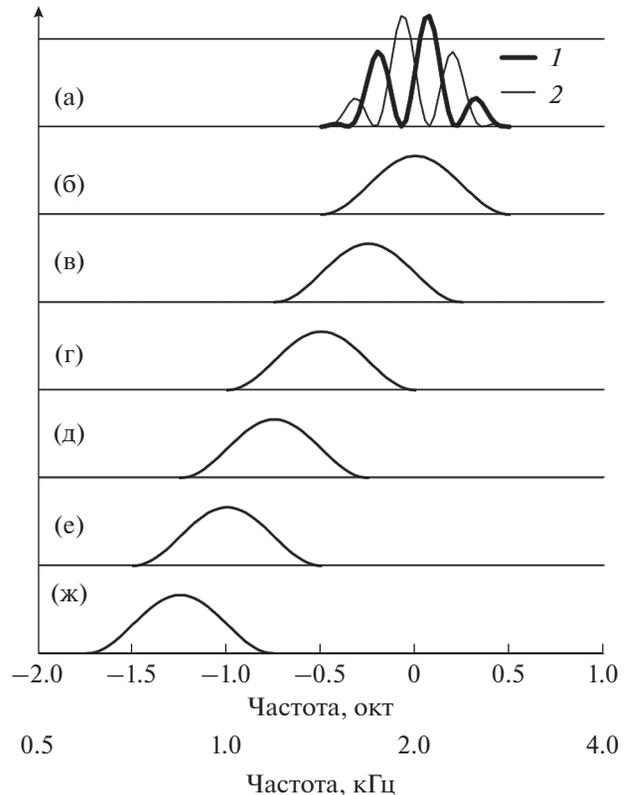


Рис. 1. Спектры сигнала и маскеров. (а) Спектр сигнала, 1 и 2 – спектры, замещающие друг друга при реверсии фазы гребней; (б)–(ж) спектры маскеров, сдвинутых относительно спектра сигнала от 0 до –1.25 окт. Шкала частот представлена в октавах относительно центральной частоты сигнала (верхняя шкала) и в килогерцах (нижняя шкала).

При измерениях использовали сигналы двух типов: тест-сигнал и сигнал сравнения (референтный). Тест-сигнал имел гребенчатый спектр. Каждые 400 мс происходила реверсия фазы гребней спектра, т.е. один из спектров, представленных на рис. 1а (спектр 1) заменялся на альтернативный (спектр 2), и обратно. Сигнал содержал шесть сегментов с альтернативным расположением гребней спектра, т.е. вся длительность сигнала составляла 2400 мс. Сигнал сравнения имел гребенчатый спектр 1 или 2 (рис. 1а); один из этих двух спектров выбирался случайно от пробы к пробе. Выбранный спектр оставался постоянным в течение всей длительности сигнала, которая составляла, как и у тест-сигнала, 2400 мс.

Маскеры

Спектр маскира описывался одним октавным периодом косинусоиды от логарифма частоты, т.е. такой же функцией, как огибающая спектра сигналов. В отличие от сигналов, спектр маскира не имел гребенчатой структуры (рис. 1б–1ж).

Спектры маскеров были центрированы на одной из частот от 0.84 до 2 кГц, т.е. от -1.25 до 0 окт относительно сигнала, с шагом 0.25 окт. Длительность маскера составляла 2400 мс, т.е. столько же, сколько длительность тест-сигнала и сигнала сравнения.

Синтез сигналов и маскеров

Сигналы и маскеры синтезировали цифровым способом с частотой стробирования 32 кГц. Программа синтеза включала фильтрацию белого шума (случайная последовательность чисел) через один из фильтров, форма которых показана на рис. 1. На выходе фильтра получали фильтрованный шум, имеющий заданные для сигнала или маскера спектральные характеристики. При генерации сигналов использовали фильтры 1 и 2, представленные на рис. 1а; при генерации маскеров использовали один из фильтров, представленных на рис. 1б–1ж. Время нарастания–спада при включении и выключении, как и время смены спектра при реверсии фазы гребней тест-сигнала, определялось переходными функциями фильтров. Благодаря этому отсутствовали широкополосные щелчки при включении–выключении или смене спектра. Более детально программа синтеза описана ранее [11].

Сигналы и маскеры синтезировали непосредственно по ходу эксперимента (on-line), так что сигналы или маскеры с идентичными спектральными характеристиками не были точной копией друг друга, а различались от пробы к пробе в пределах случайных флуктуаций, собственных шумам.

Процедура эксперимента

Во время эксперимента испытуемый находился в кабине, обеспечивающей заглушение внешних звуков на 40 дБ. Сигналы и маскеры подавали через головные телефоны диотически, т.е. одинаково на оба уха.

При измерениях применена адаптивная двухальтернативная процедура с принудительным выбором. В каждой пробе испытуемому последовательно предъявляли два сигнала – тест-сигнал и сигнал сравнения – длительностью 2400 мс каждый, с паузой длительностью 400 мс между ними. Порядок предъявления (сначала тест-сигнал, потом сигнал сравнения или наоборот) меняли от пробы к пробе в случайном порядке. Задача испытуемого состояла в том, чтобы определить, в каком из двух сигналов – первом или втором – происходит периодические изменения тембра звука, сопровождающие реверсию фазы гребней спектра, т.е. какой из двух сигналов является тест-сигналом. Такая постановка задачи основывалась на допущении, что реверсия фазы

гребней может быть обнаружена только в том случае, если гребенчатая структура спектра доступна для различения, так как по всем параметрам, кроме фазы гребней, спектры сигнала до и после реверсии фазы гребней идентичны. Поскольку задача включала обязательный выбор испытуемым одного из двух сигналов, процедура является двухальтернативной с принудительным выбором.

Маскеры длительностью 2400 мс каждый подавались одновременно с тест-сигналом и сигналом сравнения. Маскеры, сопровождающие оба сигнала в одной пробе, были одинаковыми.

Для оценки фактора компрессии требовалось установить, как пороговый уровень звукового давления (УЗД) маскера зависит от УЗД сигнала. Поэтому в каждой измерительной сессии варьировали уровень маскера при постоянном для данной сессии уровне сигнала. Адаптивный характер процедуры состоял в том, что УЗД маскера в очередной пробе устанавливали в зависимости от ответа испытуемого в предшествующей пробе. Применяли вариант адаптивной процедуры “три – вверх, один – вниз”. После трех подряд правильных обнаружений тест-сигнала УЗД маскера повышали на 2 дБ; после каждой ошибки УЗД маскера в следующей пробе снижали на 2 дБ. Процедура “три – вверх, один – вниз” приводит УЗД маскера к значениям, обеспечивающим среднюю вероятность правильных ответов, равную $(0.5)^{1/3} = 0.79$ [22]. Эта величина близка к середине интервала между вероятностью 1.0 при безошибочном определении тест-сигнала и вероятностью 0.5 при невозможности определить тест-сигнал, когда правильные ответы возможны за счет случайных угадываний; поэтому соответствующий УЗД маскера может быть принят за порог. В процессе измерения адаптивное варьирование УЗД маскера продолжали до получения 10 точек перегиба (переход от увеличения УЗД маскера к уменьшению, и наоборот). Среднее значение этих 10 точек принимали за оценку порогового значения УЗД маскера в данной сессии.

Для каждой комбинации параметров сигнала и маскера измерения повторяли трижды на каждом из семи испытуемых. Среднее значение 21 оценки с соответствующей стандартной ошибкой принимали за окончательную оценку порогового значения УЗД маскера для данной комбинации параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пороговые уровни маскера были измерены при двух значениях уровня сигнала, 50 и 80 дБ УЗД, и для шести положений частотной полосы маскера относительно сигнала: от -1.25 до 0 окт с шагом 0.25 окт. Полученные результаты суммированы на рис. 2.

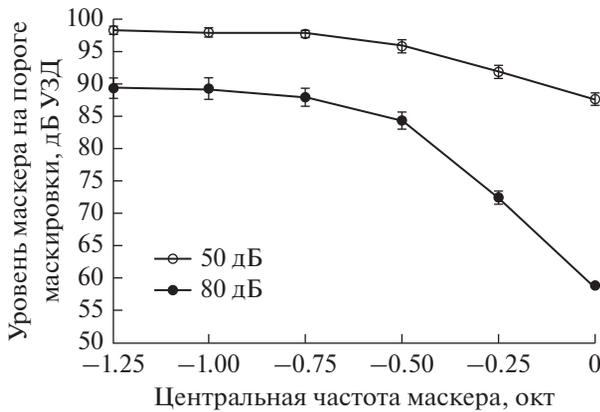


Рис. 2. Зависимость уровня маскиера на пороге маскировки от положения полосы маскиера на частотной шкале. Центральная частота маскиера указана в октавах относительно центральной частоты сигнала. Результаты для двух уровней сигнала: 50 и 80 дБ УЗД, как указано в легенде. Планки погрешностей – стандартные ошибки среднего значения.

Пороговый уровень маскиера был минимален при изочастотной маскировке. Он составил 58.8 дБ для сигнала с уровнем 50 и 87.8 дБ для сигнала с уровнем 80 дБ. Таким образом, пороговый уровень изочастотного маскиера превышал уровень сигнала на величину от 7.8 до 8.8 дБ при обоих значениях уровня сигнала. При повышении уровня сигнала на 30 дБ (от 50 до 80 дБ УЗД) достижение порога маскировки требовало повышения уровня маскиера на 29.0 дБ.

С увеличением частотного интервала между сигналом и маскиером, т.е. при переходе от изочастотной к низкочастотной маскировке, пороговый уровень маскиера возрастал, т.е. эффективность маскиера снижалась. Для низкочастотных маскиеров, расположенных на шкале частот ниже сигнала на 1–1.25 окт, пороговые уровни маскиера составляли соответственно 89.4 и 89.7 дБ УЗД для сигнала с уровнем 50 дБ и 98.1 и 98.5 дБ УЗД для сигнала с уровнем 80 дБ. Таким образом, при повышении уровня сигнала на 30 дБ (от 50 до 80 дБ УЗД) достижение порога маскировки требовало повышения уровня маскиера всего на 8.7–9.8 дБ.

Исходя из полученных данных, был рассчитан градиент маскировки для изочастотного и низкочастотных маскиеров. Градиент маскировки определялся как

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta M},$$

где G – градиент маскировки, ΔT – изменение порога маскировки и ΔM – изменение уровня маскиера. Для приведенных выше экспериментальных данных принимали $\Delta T = 30$ дБ, а ΔM принимали равным разности между функциями, приведенными на рис. 2. Рассчитанный таким образом гради-



Рис. 3. Зависимость градиента маскировки от центральной частоты маскиера. Частота указана в октавах относительно центральной частоты сигнала.

ент маскировки возрастал с увеличением частотного интервала между сигналом и маскиером (рис. 3). Он менялся от 1.0 дБ/дБ для изочастотного маскиера (центральная частота маскиера 0 окт относительно частоты сигнала) до 3.3 дБ/дБ для низкочастотных маскиеров (центральные частоты маскиера –1 и –1.25 окт).

ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка компрессии по данным маскировки

Тест на различение структуры гребенчатого спектра, примененный в данном исследовании, выявил значительное различие между градиентами (growth of masking, отношение уровня сигнала к уровню маскиера на пороге маскировки) изочастотной и низкочастотной маскировки. По этому признаку результаты согласуются с ранее полученными данными (см. Введение), в которых маскировка определялась по обнаружению тонального сигнала. При изменении уровня сигнала на 30 дБ порог маскировки достигался при изменении уровня низкочастотного маскиера менее чем на 10 дБ, что может объясняться компрессией ответа на сигнал 0.3 дБ/дБ, тогда как эффект низкочастотного маскиера не был подвержен компрессии. Такая интерпретация подразумевает, что изочастотный маскиер был подвержен почти такой же компрессии, как сигнал.

Полученная компрессии 0.3 дБ/дБ отличается от компрессии, полученной при маскировке обнаружения тонального сигнала: 0.16–0.17 дБ/дБ [5]. Однако в других работах [6, 7] была получена компрессия от 0.2 до 0.4 дБ/дБ, что ближе к результатам данного исследования. Модель, описывающая коэффициент усиления активного механизма улитки в зависимости от уровня входного сигнала [23], также предсказывает компрессию,

равную 0.28 дБ/дБ в диапазоне уровней входного сигнала 50–80 дБ при предельном коэффициенте усиления активного механизма 60 дБ или 0.4 дБ/дБ при предельном коэффициенте усиления 50 дБ. Эти оценки также согласуются с результатами настоящего исследования. К тому же компрессия зависит от частоты тест-сигнала. В улитке компрессия наиболее выражена в ее проксимальной части (представительство высоких частот) и слабо – в дистальной части (представительство низких частот). В психофизических экспериментах [7] в зависимости от частоты сигнала компрессия варьировалась от 1 : 3 до 1 : 5. С учетом всех этих данных можно считать, что полученные в данном исследовании оценки компрессии не выходят за пределы, известные по предшествующим работам.

Побочные эффекты низкочастотных маскеро

При оценке компрессии по маскировке тональных сигналов принимались специальные меры, обеспечивающие отсутствие побочных эффектов низкочастотного маскера (латерального подавления и прослушивания на боковых частотах), поскольку эти эффекты приводили к недооценке компрессии (см. Введение). Такими мерами были применение последовательной, а не одновременной маскировки [5, 24, 25], использование дополнительного маскера в частотной области прослушивания на боковых частотах [5] и использование сигналов околопорогового уровня [6, 7]. Ни одна из этих мер не применялась в данном исследовании, поскольку они не совмещались с применяемым сигналом (сигнал секундной длительности с относительно широким и сложным спектром). Тем не менее, был получен значительный эффект компрессии. Это может быть обусловлено следующими причинами.

1. Различение сигналов со сложными спектрами подразумевает анализ соотношения спектральных составляющих в надпороговом диапазоне. В широком диапазоне надпороговых уровней активный кохлеарный механизм доминирует над пассивным до тех пор, пока его коэффициент усиления составляет хотя бы единицы децибел. Поэтому даже если латеральное подавление приводит к некоторому (не слишком значительному) снижению коэффициента усиления активного механизма, это не препятствует проявлению его свойств, включая компрессивную нелинейность.

2. Различение сигналов со сложными спектрами подразумевает анализ в относительно широкой полосе частот. В наших экспериментах дробность спектра (плотность гребней) была постоянной во всей частотной полосе сигнала. Поэтому даже если область наилучшего различения сигнала несколько сдвигалась в пределах этой полосы

из-за прослушивания на боковых частотах, это мало влияло на способность к различению спектрального рисунка.

Частотные диапазоны компрессивного и некомпрессивного эффекта маскеро

Поскольку и сигнал, и все варианты маскеро имели спектральную полосу шириной 1 окт, во многих случаях маскер не мог быть квалифицирован как строго изочастотный или строго низкочастотный. Маскер мог считаться строго низкочастотным, если его спектральная полоса не перекрывалась с полосой сигнала, что имело место при положениях полосы маскера –1 и –1.25 окт относительно полосы сигнала. При частичном перекрытии спектральных полос сигнала и маскера (положение полосы от –0.75 до –0.25 окт относительно полосы сигнала) часть спектральной полосы маскера действовала как низкочастотный маскер, часть – как изочастотный. То же касается и спектральной полосы сигнала: частично она была подвержена низкочастотной маскировке, частично – изочастотной. Даже при совпадении спектральных полос сигнала и маскера (сдвиг 0 окт) сигнал был подвержен частично изочастотной маскировке, а частично – низкочастотной в результате влияния низкочастотной части полосы маскера на высокочастотную часть полосы сигнала.

Экспериментальные данные, представленные выше, показывают суммарный эффект взаимодействий сигнала и маскера, в частности позволяют оценить роль компрессивных эффектов в этих взаимодействиях. При неперекрывающихся спектральных полосах сигнала и маскера (положения полосы маскера –1 и –1.25 окт относительно полосы сигнала) высокий градиент маскировки (3.3 дБ/дБ) свидетельствует о незначительной компрессии или об отсутствии компрессии эффекта маскера при значительной компрессии ответа на сигнал. При небольшом перекрытии спектральных полос сигнала и маскера (положения полосы маскера –0.75 окт относительно полосы сигнала) градиент маскировки оставался высоким (3 дБ/дБ), что свидетельствует о преимущественно не компрессированном эффекте маскера. Снижение градиента маскировки до 2.6 дБ/дБ, наблюдавшееся при полуоктавном перекрытии спектральных полос сигнала и маскера (положения полосы маскера –0.5 окт относительно полосы сигнала), свидетельствует о заметном вмешательстве компрессии эффекта маскера. Однако и в этом случае градиент маскировки был существенно выше, чем для изочастотного маскера. Это позволяет предположить, что при такой степени перекрытия различение спектра сигнала происходило преимущественно в той части, которая не перекрывалась со спектром маскера и была подвержена некомпрессированной низкочастот-

ной маскировке. Снижение градиента маскировки до значения, лишь немного превышающего 1 дБ/дБ, наблюдалось при значительном перекрытии спектральных полос сигнала и маски (положение полосы маскиера -0.25 окт относительно полосы сигнала). Можно предполагать, что при этом различие спектра сигнала происходило преимущественно в той части, которая перекрывалась со спектром маскиера, и эффект маскиера был в значительной степени подвержен компрессии. Наконец, снижение градиента маскировки до 1 дБ/дБ при полном перекрытии спектральных полос сигнала и маскиера свидетельствует о том, что в этом случае взаимодействие сигнала и маскиера происходило по принципу изочастотной маскировки.

Таким образом, можно заключить, что при примененном в данном исследовании способе тестирования различие сигнала происходит в зависимости от степени перекрытия сигнала и маскиера.

При неперекрывающихся спектральных полосах сигнала и маскиера различие сигнала происходило в условиях некомпрессированной низкочастотной маскировки.

При частичном перекрытии различие происходило преимущественно в той части спектра сигнала, которая была подвержена некомпрессированной низкочастотной маскировке. Предположительно, низкочастотная (перекрывающаяся с маскиером) часть спектра сигнала эффективно подавляется изочастотной маскировкой, так что условия для различения остаются в высокочастотной (неперекрывающейся) части спектра сигнала.

При полном перекрытии эффект маскиера был подвержен компрессии одинаково с ответом на сигнал.

Ранее [26] высказывалось предположение, что изочастотный и низкочастотный маскиеры действуют на различие спектральных рисунков через разные механизмы. Данное исследование показывает, что различие механизмов может состоять, в частности, в разном проявлении компрессии эффекта маскиера в зависимости от частотного соотношения маскиера и сигнала. Это обстоятельство может быть важным фактором, определяющим различие сложных сигналов в фоновом шуме.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант 16-15-10046.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Robles L., Ruggero M.A.* Mechanics of the mammalian cochlea // *Physiol. Rev.* 2001. V. 81. P. 1305–1352.
2. *Sachs M.B., Winslow R.L., Sokolowski B.H.* A computational model for rate-level functions from cat auditory-nerve fibers // *Hearing Res.* 1989. V. 41. P. 61–69.
3. *Yates G.K., Winter I.M., Robertson D.* Basilar membrane nonlinearity determines auditory nerve rate-intensity functions and cochlear dynamic range // *Hearing Res.* 1990. V. 45. P. 203–219.
4. *Robles L., Ruggero M.A., Rich N.C.* Basilar membrane mechanics at the base of the chinchilla cochlea. I. Input–output functions, tuning curves, and response phases // *J. Acoust. Soc. Am.* 1986. V. 80. P. 1364–1374.
5. *Oxenham A.J., Plack C.J.* A behavioral measure of basilar-membrane nonlinearity in listeners with normal and impaired hearing // *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V. 101. P. 3666–3675.
6. *Nelson D.A., Schroder A.C., Wojtczak M.* A new procedure for measuring peripheral compression in normal-hearing and hearing-impaired listeners // *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. V. 110. P. 2045–2064.
7. *Lopez-Poveda E.A., Plack C.J., Meddis R.* Cochlear nonlinearity between 500 and 8,000 Hz in listeners with normal hearing // *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. V. 113. P. 951–960.
8. *Oxenham A.J., Bacon S.P.* Psychophysical manifestations of compression: Normal-hearing listeners / Ed. Bacon S.P., Fay R.R., Popper A.N. *Compression: from cochlea to cochlear implants.* 2004. Springer-Verlag, New York. P. 62–106.
9. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* Frequency resolving power measured by rippled noise // *Hearing Res.* 1994. V. 78. P. 31–40.
10. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* Ripple depth and density resolution of rippled noise // *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. P. 2800–2804.
11. *Nechaev D.I., Supin A.Ya.* Hearing sensitivity to shifts of rippled-spectrum patterns // *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. V. 134. P. 2913–2922.
12. *Aronoff J.M., Landsberger D.M.* The development of a modified spectral ripple test // *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. V. 134. P. 217–222.
13. *Litvak L.V., Spahr A.J., Saoji A.A., Fridman G.Y.* Relationship between perception of spectral ripple and speech recognition in cochlear implant and vocoder listeners // *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. V. 122. P. 982–991.
14. *Won J.H., Drennan W.R., Rubinstein J.T.* Spectral-ripple resolution correlates with speech reception in noise in cochlear implant users // *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 2007. V. 8. P. 384–392.
15. *Saoji A.A., Litvak L., Spahr A.J., Eddins D.A.* Spectral modulation detection and vowel and consonant identification in cochlear implant listeners // *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. V. 126. P. 955–958.
16. *Anderson E.S., Nelson D.A., Kreft H., Nelson P.B., Oxenham A.J.* Comparing spatial tuning curves, spectral ripple resolution, and speech perception in cochlear implant users // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. V. 130. P. 364–375.
17. *Anderson E.S., Oxenham A.J., Nelson P.B., Nelson D.A.* Assessing the role of spectral and intensity cues in spectral ripple detection and discrimination in cochlear-implant users // *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. V. 132. P. 3925–3934.
18. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* The effect of masking noise on rippled-spectrum resolution // *Hearing Res.* 2001. V. 151. P. 157–166.

19. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* Rippled-spectrum resolution dependence on level // *Hearing Res.* 2003. V. 185. P. 1–12.
20. *Nechaev D.I., Milekhina O.N., Supin A.Ya.* Hearing sensitivity to shifts of rippled-spectrum sound signals in masking noise // *PLoS One.* 2015. V. 10. e0140313.
21. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* Ripple density resolution for various rippled-noise patterns // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 103. P. 2042–2050.
22. *Levitt H.* Transformed up-down methods in psychoacoustics // *J. Acoust. Soc. Am.* 1971. V. 49. P. 467–477.
23. *Glasberg B.R., Moore B.C.* Frequency selectivity as a function of level and frequency measured with uniformly exciting notched noise // *J. Acoust. Soc. Am.* 2000. V. 108. P. 2318–2328.
24. *Rimskaya-Korsakova L.K., Lalayants M.R., Supin A.Y., Tavartkiladze G.A.* Masking of short stimuli by noises with spiked spectra: I. Compressive nonlinearity of cochlea and evaluation of frequency resolution // *Acoust. Phys.* 2011. V. 57. P. 106–113.
25. *Rimskaya-Korsakova L.K., Lalayants M.R., Tavartkiladze G.A., Supin A.Y.* Masking of short stimuli by noises with spiked spectra: II. Time summation and frequency selectivity of hearing in a narrow frequency range // *Acoust. Phys.* 2011. V. 57. P. 216–223.
26. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* Rippled-spectrum resolution dependence on masker-to-probe ratio // *Hearing Res.* 2005. V. 204. P. 191–199.