

РАЗЛИЧЕНИЕ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ С ГРЕБЕНЧАТЫМИ СПЕКТРАМИ В ПРИСУТСТВИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

© 2021 г. М. С. Томозова¹, Д. И. Нечаев¹, О. Н. Милехина¹, А. Я. Супин^{1,*}

¹ Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН 119071 Москва, Ленинский просп., 33, Россия

*E-mail: alex_supin@mail.ru

Поступила в редакцию 29.03.2021 г.

После доработки 15.04.2021 г.

Принята к публикации 28.04.2021 г.

Исследовали различение звуковых сигналов (тестового и референтного) с гребенчатой структурой спектра в условиях, когда на тестовый и референтный сигналы накладывался дополнительный сигнал. В тестовом сигнале каждые 400 мс происходила реверсия фазы гребней. Референтный сигнал имел либо гребенчатый спектр (та же плотность гребней, что в тестовом сигнале, но без изменения фазы гребней), либо спектр с неразличимой гребенчатой структурой. Дополнительный сигнал имел ту же спектральную полосу и тот же уровень, что тестовый и референтный сигналы, и имел спектр либо плоский, либо гребенчатый с плотностью гребней от 2 до 7 цикл/окт. При гребенчатом референтном сигнале разрешение плотности гребней составило 8.7 цикл/окт в контроле (без наложения дополнительного сигнала), 8.5 цикл/окт при плоском дополнительном сигнале и от 8.6 до 9.2 цикл/окт при дополнительном сигнале с плотностью гребней от 2 до 7 цикл/окт; отличия этих значений от контроля не были статистически достоверны. При референтном сигнале с неразличимой спектральной структурой разрешение плотности гребней в тест-сигнале составило 51.0 цикл/окт в контроле, 16.7 цикл/окт при плоском дополнительном сигнале и от 11.0 до 11.1 цикл/окт при дополнительном сигнале с плотностью гребней от 2 до 7 цикл/окт; отличия всех этих значений от контроля были статистически достоверны. Из данных следует, что наложение дополнительного сигнала вызывает эффекты, связанные со спектральным рисунком дополнительного сигнала, причем эти эффекты различны для спектрального и временного механизмов частотного анализа, участвующих в различении сигналов.

Ключевые слова: слух, гребенчатые спектры, частотный анализ

DOI: 10.31857/S0235009221030057

ВВЕДЕНИЕ

Звуковые сигналы с гребенчатыми частотными спектрами активно применяются для тестирования частотной разрешающей способности (ЧРС) слуха. В гребенчатых спектрах чередуются максимумы и минимумы спектральной плотности (гребни), создавая таким образом спектральную “решетку”. Максимальная плотность гребней, при которой слуховая система способна отличить тест-сигнал от сигнала с другим положением спектральных максимумов-минимумов на частотной шкале или от сигнала, спектр которого не имеет гребенчатой структуры (“плоский” спектр) – информативный индикатор ЧРС. Плотность гребней может быть представлена как количество гребней либо на линейную единицу частоты (цикл/кГц), либо на логарифмическую единицу частоты (цикл/окт). Для спектров с равномерным распределением гребней на частотной шкале адекватной является размерность

цикл/кГц, для спектров с логарифмическим распределением – цикл/окт.

Установлено, что ЧРС слуха человека зависит от ряда факторов. В частности, существенно разные оценки ЧРС были получены в зависимости от того, какие сигналы использовались в задаче различения. Если референтный сигнал имеет гребенчатый спектр с той же плотностью гребней, что и тест-сигнал, но с другим расположением гребней на частотной шкале (различие по фазе гребней), то эти два сигнала могут различаться при плотности гребней около 10 цикл/окт (Supin et al., 1994, 1997, 1998, 1999; Anderson et al., 2011; Nechaev, Supin, 2013). При этом возможны варианты: если тест-сигнал содержит несколько сегментов с противоположной фазой гребней, а референтный сигнал характеризуется постоянной фазой гребней, то порог различения составляет 9–10 цикл/окт. Если же и тест-сигнал, и референтный сигнал характеризуются постоянной

фазой гребней, но фаза различна для этих двух сигналов, то порог различения ниже: около 8 цикл/окт (Anderson et al., 2012; Milekhina et al., 2018) или даже 5 цикл/окт (Henry et al., 2005). Различие объяснялось тем, что в первом случае для решения задачи различения кратковременная память не участвует (в тест-сигнале звуки с противоположными фазами гребней спектра непосредственно сменяют друг друга), а во втором случае необходимо участие кратковременной памяти, поскольку тестовый и референтный сигналы предъявляются последовательно, и один из сигналов сравнивается с сохраненным в памяти образом другого.

Принципиально другие результаты получены в экспериментах, в которых требовалось различить тестовый сигнал с гребенчатым спектром и референтный сигнал с плоским спектром. В этом случае различение оказывалось возможным при плотности гребней в тестовом сигнале до 60 цикл/окт (Anderson et al., 2011, 2012) или по крайней мере более 20 цикл/окт (Nechaev et al., 2019). Различие в оценках ЧРС, зависящее от характера референтного сигнала, объясняется тем, что в разных задачах различения слуховая система использует разные механизмы частотного анализа: в одном случае — анализ частотного спектра на уровне слуховой улитки (условно обозначаемый как частотный анализ), в другом — анализ временной структуры сигнала в слуховых нервных центрах (условно обозначаемый как временной анализ). Термины “частотный” и “временной” в данном контексте нужно рассматривать как условные, поскольку любой сигнал и его преобразования могут быть одинаково полно описаны как в частотном, так и во временном представлении, но применительно к анализу сигналов в слуховой системе эти термины обозначают разные физиологические механизмы.

Участие временного механизма в анализе гребенчатых сигналов возможно потому, что они имеют скрытую периодичность: рисунок звуковых колебаний повторяется через временные интервалы, обратные частотным интервалам между гребнями спектра. Эта периодичность проявляется в автокорреляционной функции (АКФ) сигнала как наличие дополнительного сегмента с задержкой $\tau = 1/\delta f$, где τ — задержка и δf — частотный интервал между гребнями. Для широкополосных сигналов с постоянными частотными интервалами между гребнями этот сегмент редуцируется до узкого пика. Участие временного механизма в анализе гребенчатых спектров первоначально предполагалось в работах (Yost et al., 1996; Patterson et al., 1976). Этот же механизм может быть ответственным за различные оценки ЧРС в экспериментах с гребенчатым и с плоским референтным сигналом. Если и тестовый, и референтный сигналы имеют гребенчатую структуру спектров с

одинаковыми интервалами между гребнями, то положение задержанного сегмента в их АКФ одинаково, и различение этих сигналов при помощи временного механизма невозможно; в различении участвует только частотный механизм. Если же референтный сигнал имеет плоский спектр, то задержанный сегмент в его АКФ отсутствует, т.е. сигнал не имеет скрытой периодичности, и по этому признаку тестовый и референтный сигналы могут различаться при помощи временного механизма.

Все приведенные выше данные о значениях ЧРС для обеих задач различения (с применением гребенчатых и плоских референтных сигналов) получены в условиях, когда тестовый и референтный сигналы предъявлялись испытуемому на “чистом” фоне, не содержащем других звуковых сигналов. Такая идеализированная ситуация не соответствует большинству реальных акустических сцен, в которых “целевой” (т.е. подлежащий обнаружению и анализу) сигнал возникает наряду с множеством других звуковых сигналов, которые по отношению к целевому могут рассматриваться как фоновый шум. Поэтому важно знать, каким образом звуковой фон влияет на ЧРС слуха, и как это влияние зависит от характера фоновых звуков.

Можно ожидать, что добавочный сигнал ухудшит различение гребенчатой структуры спектра тестового сигнала ввиду хорошо известного эффекта энергетической маскировки. Применительно к различению гребенчатых спектров этот эффект будет проявляться в том, что добавочный сигнал уменьшит глубину модуляции (перепад между спектральными максимумами и минимумами) тестового сигнала, а уменьшение глубины модуляции приводит к снижению ЧРС. Однако нетривиальный вопрос состоит в том, сводится ли эффект дополнительного сигнала только к энергетической маскировке, или он зависит еще и от характеристик дополнительного сигнала, в частности, от того, насколько структурирован его частотный спектр.

В настоящем исследовании для решения этого вопроса применена следующая экспериментальная модель. Измеряли ЧРС в условиях, когда тестовый и референтный сигналы суммируются с дополнительным сигналом, который имеет либо гребенчатый, либо плоский спектр. Влияние дополнительного сигнала на ЧРС исследовали при двух задачах различения: между двумя гребенчатыми сигналами (тестовым и референтным) и между гребенчатым тестовым и референтным сигналом с неразличимой спектральной структурой.

МЕТОДИКА

Испытуемые. В исследовании принимали участие девять испытуемых (пять мужчин и четыре

женщины) в возрасте от 25 до 54 лет. Перед экспериментами для всех испытуемых была проведена стандартная аудиометрия, которая показала пороги слышимости не выше 10 дБ на частоте 2 кГц, на которой были центрированы все сигналы. Все испытуемые подписали письменное согласие на участие в экспериментах, предполагающих прослушивание звуковых сигналов с уровнем 70 дБ УЗД.

Во время измерения испытуемый находился в звукоизолированной кабине MINI 350, IAC (Германия), обеспечивающей заглушение внешних звуков не менее чем на 40 дБ.

Программа экспериментов была одобрена Комиссией по биоэтике Института проблем экологии и эволюции РАН.

Стимулы. Программа измерений включала предъявление двух видов стимулов: тестовые и референтные.

Тестовый стимул (рис. 1, *а*) имел спектральную полосу, ограниченную косинусоидальной огибающей с периодом 2 окт. Полоса была центрирована на частоте 2 кГц, т.е. вся полоса включала частоты от 1 до 4 кГц. В пределах огибающей спектр имел гребенчатую структуру, т.е. чередующиеся максимумы и минимумы спектральной амплитуды. Форма гребней описывалась косинусоидальной функцией от логарифма частоты, т.е. гребни спектра были частотно-пропорциональными. Плотность гребней задавалась в цикл/окт и могла принимать следующие значения: 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 50, 70, 100 цикл/окт (квасилогарифмическая шкала с шестью ступенями на 10-кратный интервал). Во время действия тестового стимула каждые 400 мс фаза спектральных гребней инвертировала (положения спектральных максимумов и минимумов на частотной шкале менялись на противоположные). Стимул содержал шесть сегментов с противоположными фазами гребней спектра, так что общая длительность стимула составляла 2400 мс.

Референтный стимул имел либо различимую гребенчатую, либо неразличимую структуру спектра. Оба варианта референтного стимула имели такую же огибающую спектра и такую же длительность (2400 мс), как тестовый сигнал.

Референтный стимул с различимой гребенчатой структурой (рис. 1, *б*) имел такую же плотность спектральных гребней, как и тестовый стимул. Отличие от тестового стимула состояло в том, что фаза гребней оставалась постоянной в течение всего времени действия стимула.

Референтный стимул с неразличимой структурой спектра (рис. 1, *в*) имел спектр, в котором максимумы и минимумы амплитуды чередовались с циклическостью $2^9 = 512$ цикл/кГц, что соответствовало 362 цикл/окт на нижнем крае частотной полосы (1 кГц) и 90 цикл/окт на верхнем крае

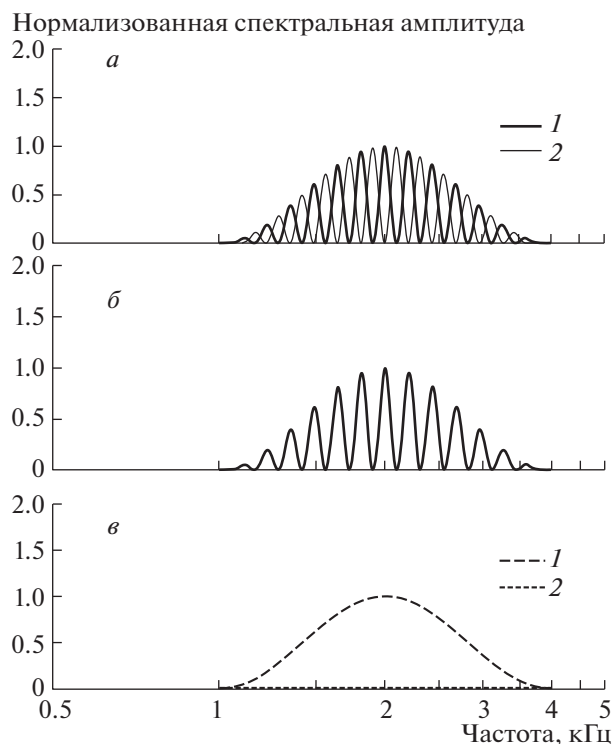


Рис. 1. Частотные характеристики фильтров, используемых для синтеза сигналов (они же – спектры длительных отрезков синтезированных сигналов без наложения дополнительного сигнала).

а – тест-сигнал с плотностью гребней 7 цикл/окт; 1 и 2 – спектры, сменяющие друг друга в течение действия стимула; *б* – референтный сигнал с гребенчатым спектром; *в* – референтный сигнал с неразличимой структурой спектра; гребни высокой плотности не могут быть воспроизведены на рисунке, поэтому показаны только верхняя (1) и нижняя (2) границы спектральных амплитуд.

(4 кГц). Эти значения намного превосходят известные данные о разрешении плотности гребней при любой форме эксперимента. Поэтому мы принимали, что структура спектра в таких стимулах заведомо неразличима, т.е. они могут рассматриваться как имитация стимула с плоским спектром. В отличие от стимулов с реально плоским спектром, они имели такой же перепад между минимумом и максимумом спектральных амплитуд, как у тестовых стимулов, что было принципиально важным при сравнении стимулов, на которые накладывался дополнительный сигнал.

Все стимулы, как тестовые, так и референтные имели одинаковые времена нарастания-спада 10 мс и УЗД 70 дБ.

Тестовый и референтный стимулы предъявлялись либо в чистом виде, без наложения дополнительных сигналов (рис. 1), либо на них накладывался дополнительный сигнал. Дополнительный сигнал имел либо плоский, либо гребенчатый

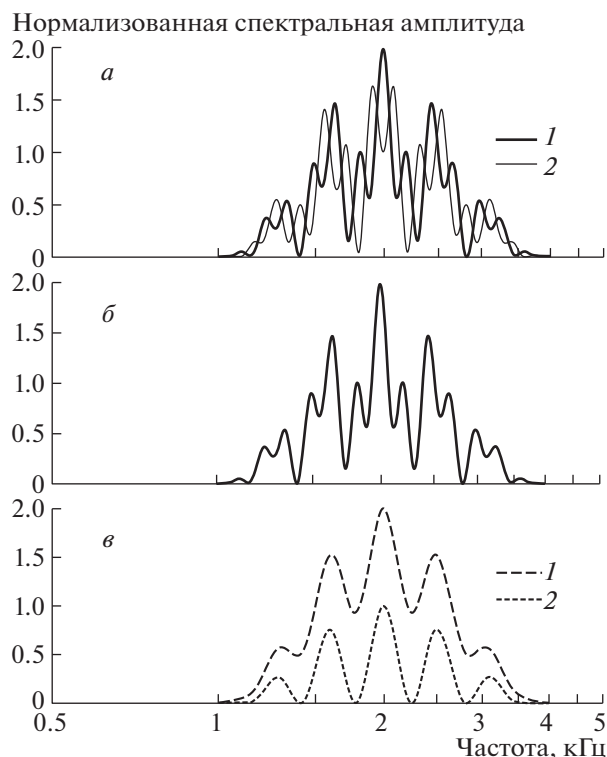


Рис. 2. Спектры тестового и референтного сигналов с наложением дополнительного сигнала с гребенчатым спектром 3 цикл/окт.

а – тест-сигнал с плотностью гребней 7 цикл/окт; 1 и 2 – спектры, сменяющие друг друга в течение действия стимула. *б* – референтный сигнал с гребенчатым спектром; *в* – референтный сигнал с неразличимой структурой спектра; показаны только верхняя и нижняя границы спектральных амплитуд.

спектр с такой же полосой, как у тестового и референтного сигналов. Соотношение спектральных амплитуд тестового или референтного сигнала и дополнительного сигнала составляло 1 : 1.

В случае гребенчатого дополнительного сигнала суммарные сигналы (тестовый + дополнительный и референтный + дополнительный) имели сложные спектры, описываемые суммой двух косинусоид (рис. 2). Плотность гребней в дополнительном сигнале варьировали ступенчато; она могла принимать значения 2, 3, 5 или 7 цикл/окт. Максимальная плотность 7 цикл/окт была выбрана потому, что она не превышала значений ЧРС, ожидаемых, исходя из литературных данных (Введение). Таким образом, обеспечивалось постоянное условие, состоящее в том, что интервал повторения рисунка в дополнительном сигнале не превышал соответствующий интервал в тестовом и референтном стимулах на пороге различения.

В случае плоского дополнительного сигнала его наложение приводило к уменьшению глуби-

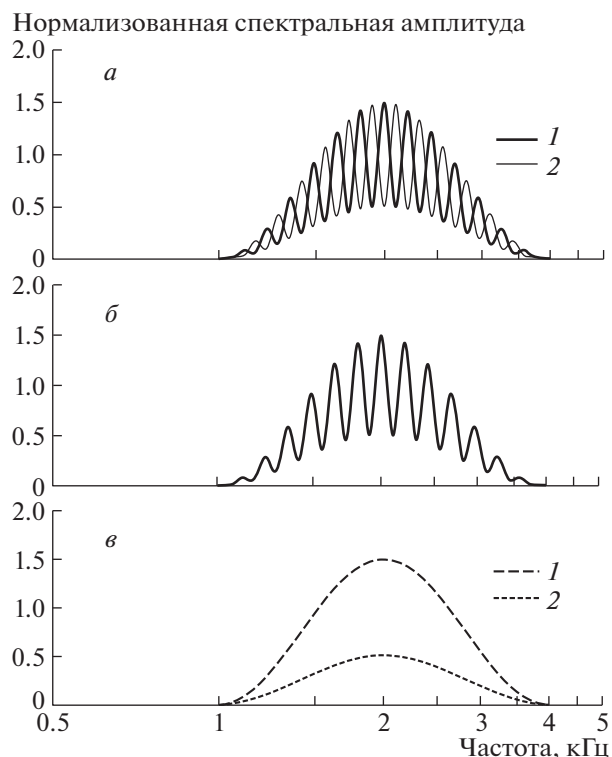


Рис. 3. То же, что рис. 2, для дополнительного сигнала с плоским спектром.

ны модуляции спектра тестового и референтного сигналов вдвое по сравнению с “чистым” сигналом (рис. 3).

Генерация стимулов. Все стимулы синтезировали цифровым способом с использованием оригинальной программы, составленной в среде LabVIEW (National Instruments, США). Частота стробирования при синтезе сигналов составляла $2^5 = 32$ кГц, и число точек стробирования составляло $2^{14} = 16384$, что давало дробность цифрового описания спектра $2^9 = 512$ точек/кГц. Программа синтеза включала следующие шаги.

- Создавалось цифровое описание спектров тестового, референтного и дополнительного сигналов. Для тестового сигнала создавали цифровое описание двух спектров с одинаковой плотностью гребней, но с противоположными фазами гребней (противоположным положением максимумов и минимумов спектральной амплитуды на шкале частот).

- Если предполагалось применение дополнительного сигнала, то амплитудно-частотные спектры тестового и референтного сигналов суммировали с амплитудно-частотным спектром дополнительного сигнала.

- Обратным преобразованием Фурье получали временные передаточные функции тестового сигнала (с наложенным дополнительным сигна-

лом или без него, в зависимости от задачи эксперимента) и референтного сигнала (также с наложенным дополнительным сигналом или без него).

- Создавали цифровое описание белого шума как гауссовой последовательности чисел.

- Выполняли фильтрацию белого шума соответствующим цифровым фильтром. Фильтрацию проводили путем свертки белого шума с временной передаточной функцией фильтра. Для получения тестового сигнала каждые 400 мс белый шум перенаправляли со входа одного из двух фильтров с противоположными фазами спектральных гребней на вход другого и обратно; выходы фильтров суммировали. Шесть чередующихся сегментов с противоположными фазами спектральных гребней составляли цифровое описание тестового сигнала длительностью 2400 мс. Для получения референтного сигнала использовали один фильтр и отрезок белого шума длительностью 2400 мс.

- К полученному сигналу длительностью 2400 мс применяли амплитудную модуляцию, которая создавала линейное нарастание амплитуды в течение 10 мс и линейный спад в течение такого же времени.

- Амплитуду сигнала устанавливали на таком уровне, чтобы с учетом характеристик головных телефонов уровень выходного сигнала составил 70 дБ УЗД.

Полученные цифровые описания сигналов преобразовывали в аналоговую форму цифроаналоговым преобразователем карты сбора данных NI DAQ-6512 и воспроизводили диотически (идентично на оба уха) через головные телефоны Sennheiser HD580 (Германия).

Процедура измерения. ЧРС измеряли психофизическим методом с использованием трехальтернативной процедуры с принудительным выбором. В каждой пробе испытуемому предъявляли последовательность из трех стимулов (каждый длительностью 2400 мс) с паузами 400 мс между ними: один тестовый и два референтных стимула. Последовательность стимулов (тестовый стимул первый, второй или третий в последовательности) меняли от пробы к пробе в случайном порядке. Задача испытуемого состояла в том, чтобы указать, какой из трех стимулов отличается по звучанию от двух других, т.е. является тестовым.

От пробы к пробе плотность гребней в тестовом стимуле меняли по адаптивной процедуре, т.е. в зависимости от предыдущего ответа испытуемого. В случае правильных ответов в двух последовательных пробах плотность спектральных гребней в следующей пробе повышали на один шаг. В случае ошибки плотность спектральных гребней в следующей пробе понижали на один шаг. Такая процедура приводила плотность гребней к значению, которое обеспечивало 71% пра-

вильных обнаружений тестового стимула (Levitt, 1971), что близко к среднему значению (67%) между 100% при безошибочном определении тестового стимула и 33% при случайном угадывании одного стимула из трех. Поэтому значение плотности гребней, к которому приводила адаптивная процедура, принимали за разрешение плотности гребней структуры спектра, т.е. ЧРС. Если использовали референтный сигнал с гребенчатым спектром, то плотность его спектральных гребней меняли от пробы к пробе так же, как в тестовом сигнале. Плотность гребней в дополнительном сигнале при этом не меняли.

Предъявления стимулов с плотностью спектральных гребней, варьирующей от пробы к пробе, продолжали до получения 10 точек реверсии, т.е. перехода от повышения плотности спектральных гребней к понижению и обратно. Среднее геометрическое значение плотности спектральных гребней в этих 10 точках принимали за значение ЧРС в данной измерительной сессии, т.е. для комбинации параметров референтного и дополнительного сигналов, использованной в этой сессии.

От сессии к сессии параметры референтного и дополнительного сигналов меняли. Для каждой комбинации параметров измерения повторяли трижды на каждом испытуемом. Средние значения по всем измерениям принимали за окончательную оценку ЧРС при данной комбинации параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гребенчатый референтный сигнал. В контроле (в отсутствие дополнительного сигнала) максимальная плотность гребней, при которой тестовый сигнал отличался от референтного, составила в среднем по всем измерениям 8.7 цикл/окт при стандартном отклонении 0.75 цикл/окт (рис. 4).

При наложении плоского (без гребенчатой структуры) дополнительного сигнала разрешение плотности гребней составило в среднем 8.5 ± 0.6 цикл/окт. Отличие от контрольного значения в 0.2 цикл/окт не было статистически достоверным ($p = 0.34$ по двухвыборочному t -тесту).

При наложении дополнительного сигнала с гребенчатой структурой разрешение плотности гребней в тест-сигнале также мало отличалось от контрольного: от 8.6 ± 0.4 цикл/окт при плотности гребней в дополнительном сигнале 2 цикл/окт до 9.2 ± 1.3 цикл/окт при плотности гребней в дополнительном сигнале 7 цикл/окт. Ни одно из этих значений не отличалось статистически достоверно от контрольного значения: от $p = 0.52$ при плотности гребней в дополнительном сигнале 2 цикл/окт до $p = 0.14$ при плотности гребней в дополнительном сигнале 7 цикл/окт.

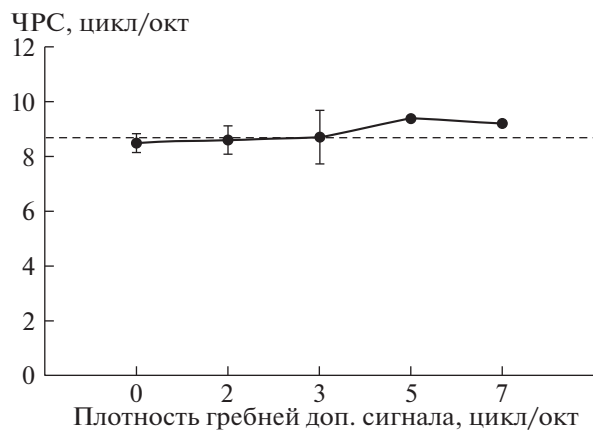


Рис. 4. Зависимость оценки ЧРС от плотности гребней в спектре дополнительного сигнала в экспериментах с гребенчатым референтным сигналом.

Нулевая плотность гребней – плоский (без гребенчатой структуры) спектр дополнительного сигнала. Горизонтальная пунктирная линия – контрольное (без дополнительного сигнала) значение ЧРС. Планки погрешностей – стандартные отклонения по всем измерениям.

Референтный сигнал с неразличимой структурой спектра. В контроле (в отсутствие дополнительного сигнала) максимальная плотность гребней, при которой тестовый сигнал отличался от референтного, составила в среднем по всем измерениям 51.0 цикл/окт при стандартном отклонении 30.3 цикл/окт (рис. 5).

При наложении плоского (без гребенчатой структуры) дополнительного сигнала разрешение плотности гребней значительно снижалось по сравнению с контролем (рис. 4): оно составило в среднем 16.7 ± 5.9 цикл/окт. Отличие от контрольного значения в 34.3 цикл/окт было статистически достоверно ($P < 0.001$).

При наложении дополнительного сигнала с гребенчатой структурой спектра разрешение плотности гребней в тест-сигнале также существенно снижалось по сравнению с контролем, причем было еще ниже, чем при дополнительном сигнале с неразличимой структурой спектра (рис. 5): от 11.0 ± 3.5 цикл/окт при дополнительном сигнале 2 цикл/окт до 11.1 ± 2.0 цикл/окт при дополнительном сигнале 7 цикл/окт. При всех значениях плотности гребней в спектре дополнительного сигнала отличие показателей от таковых для дополнительного сигнала с неразличимой структурой спектра было статистически достоверно ($p = 0.02$ для всех значений плотности гребней в дополнительном сигнале). С еще более высокой достоверностью эти значения отличались от контрольных (без дополнительного сигнала) значений ($p < 0.001$ для всех значений плотности гребней в дополнительном сигнале).

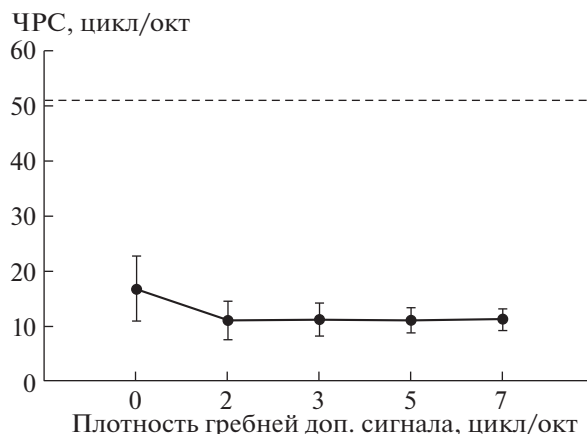


Рис. 5. То же, что рис. 4, для экспериментов с референтным сигналом с неразличимой плотностью гребней. Плотность “0” дополнительного сигнала – плоский спектр.

ОБСУЖДЕНИЕ

Присутствие дополнительного сигнала уменьшает глубину модуляции спектра тестового и референтного сигналов, что делает их менее различимыми. Однако приведенные выше данные показывают, что действие дополнительного сигнала не может быть сведено к этому тривиальному эффекту. Действие дополнительного сигнала оказалось принципиально различным при разных задачах различения: между гребенчатым тест-сигналом и гребенчатым референтным сигналом (рис. 4) или между гребенчатым тест-сигналом и негребенчатым референтным сигналом (рис. 5).

Различение сигналов с гребенчатыми спектрами. На основании ранее полученных данных (Введение) можно принять, что различение двух сигналов с гребенчатыми спектрами преимущественно происходит с участием спектрального механизма частотного анализа.

В данном исследовании парадоксальным выглядит тот факт, что при добавлении дополнительного сигнала разрешение плотности гребней тест-сигнала заметно не снижалось по сравнению с контролем. Ранее было показано, что с увеличением плотности гребней повышается порог спектрального контраста: при низкой плотности гребней он составляет всего 8.5%, но при повышении плотности гребней сверх 7 цикл/окт порог спектрального контраста приближается к максимальной возможной величине 100%, что обуславливает порог плотности гребней 8.9 цикл/окт (Supin et al., 2019). Отсюда следует и обратная зависимость: чем меньше спектральный контраст, тем ниже должна быть разрешаемая плотность гребней. Однако в экспериментах, описанных выше, при наложении как гребенчатого, так и негребенчатого

го дополнительного сигнала порог плотности гребней не снижался по сравнению с контролем.

На самом деле, нет противоречия между данными настоящего исследования и ранее полученными данными. При наложении добавочного сигнала, который имеет плоский спектр и уровень которого равен уровню тестового и референтного сигналов, спектральный контраст снижается вдвое. Если спектральный контраст “чистых” тестового и референтного сигналов составлял 100%, то с наложением дополнительного сигнала он понижается до 50%. Пороги спектрального контраста 50 и 100% могут соответствовать лишь небольшой разнице в плотности спектральных гребней, так что понижение спектрального контраста со 100 до 50% в результате наложения “плоского” дополнительного сигнала может вызывать лишь небольшое снижение разрешения плотности гребней, которое не выявляется на фоне разброса данных.

Что касается дополнительных сигналов с гребенчатым спектром, их эффект может быть еще менее заметен, чем эффект плоского дополнительного сигнала. Наложение спектральных максимумов и минимумов двух сигналов — тестового или референтного и дополнительного — создает спектральный рисунок, в котором присутствуют как пики максимально возможной величины, так и провалы почти до нуля, что хорошо видно на рис. 2, а и б. Спектры с таким контрастом могут обеспечивать практически такое же разрешение плотности гребней, как и спектры с 100%-ной глубиной модуляции в отсутствие дополнительного сигнала.

Различение между тестовым сигналом с гребенчатым спектром и референтным сигналом с неразличаемой структурой спектра. В этом случае различение тестового и референтного сигналов происходит преимущественно за счет временного механизма частотного анализа (Anderson et al., 2011; Nechaev et al., 2019). В отсутствие дополнительного сигнала разрешение плотности гребней в несколько раз выше, чем при применении гребенчатого референтного сигнала: 51.0 против 8.7 цикл/окт.

При высоком спектральном контрасте сигнала временной механизм может обеспечить разрешение более высокой плотности гребней, чем спектральный механизм. Однако порог спектрального контраста для временного механизма выше 50% даже при низкой плотности гребней. Поэтому наложение дополнительного сигнала, снижающее спектральный контраст до 50%, делает временной механизм неэффективным. В результате разрешение плотности гребней должно падать до величины, характерной для спектрального механизма, что и наблюдалось в данном исследовании: разрешение снижалось с 51 цикл/окт в контроле

до 10–11 цикл/окт при наложении дополнительного сигнала с любой плотностью гребней, в том числе негребенчатого дополнительного сигнала.

Отдельного рассмотрения заслуживает тот факт, что при наложении негребенчатого дополнительного сигнала разрешение плотности гребней оказывалось хотя и ниже, чем в контроле, но выше, чем при наложении гребенчатого сигнала с любой плотностью гребней, т.е. негативный эффект дополнительного сигнала без гребенчатой структуры спектра был слабее, чем сигнала с гребенчатой структурой. Этот факт не может быть объяснен влиянием сниженного спектрального контраста. Можно допустить, что гребенчатый дополнительный сигнал вызывает срабатывание нейронных структур, которые включают линии задержки, соответствующие частотному интервалу между гребнями спектра дополнительного сигнала. Возможно, активация таких структур подавляет (по типу латерального торможения) активность аналогичных структур, “настроенных” на частотные интервалы между гребнями тестового и референтного сигнала, что затрудняет различение последних.

Таким образом, помимо маскировки наложение дополнительного сигнала на сигналы, подлежащие различению, вызывает специфические эффекты, зависящие от спектрального рисунка дополнительного сигнала. Эти эффекты различны для спектрального и временного механизмов частотного анализа, участвующих в различении сигналов.

Работа поддержана РФФИ (грант № 20-015-00054).

REFERENCES

- 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.
- 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 on cochlear-implant users. *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. V. 132. P. 3925–3934.
- Henry B.A., Turner C.W., Behrens A. Spectral peak resolution and speech recognition in quiet: Normal hearing, hearing impaired, and cochlear implant listeners. *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. V. 118. P. 1111–1121.
- Levitt H. Transformed up-down methods in psychoacoustics. *J. Acoust. Soc. Am.* 1971. V. 49. P. 467–477.
- Milekhina O.N., Nechaev D.I., Supin A.Ya. Estimation of frequency resolving power of human hearing by different methods: Roles of sensory and cognitive factors. *Human Physiol.* 2018. V. 44. P. 123–130.
- Nechaev D.I., Milekhina O.N., Supin A.Ya. Estimates of ripple-density resolution based on the discrimination

- from rippled and nonrippled reference signals. *Trends Hearing*. 2019. V. 23. P. 1–9.
- Nechaev D.I., Supin A.Ya. Hearing sensitivity to shifts of rippled-spectrum patterns. *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. V. 134. P. 2913–2922.
- Patterson R.D. Auditory filter shapes derived with noise stimuli. *J. Acoust. Soc. Am.* 1976. V. 59. P. 640–654.
- Supin A.Ya., Milekhina O.N., Nechaev D.I. Rippled depth thresholds: Estimates obtained by discrimination from rippled and nonrippled reference signals. *Acta Acust. United Acust.* 2019. V. 105. P. 1198–1205.
- Supin A.Y., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B. Frequency resolving power measured by rippled noise. *Hearing Res.* 1994. V. 78. P. 31–40.
- Supin A.Y., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B. Frequency-temporal resolution of hearing measured by rippled noise. *Hearing Res.* 1997. V. 108. P. 17–27.
- Supin A.Y., 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.
- Supin A. Y., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B. Ripple depth and density resolution in rippled noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. P. 2800–2804.
- Yost W.A., Patterson R.D., Sheft S. A time domain description for the pitch strength of iterated rippled noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 99. P. 1066–1078.

Discrimination of rippled sound signals with overlapping additional signals

M. S. Tomozova^a, D. I. Nechaev^a, O. N. Milekhina^a, and A. Ya. Supin^{a, #}

^a Institute of Ecology and Evolution RAS 119071 Moscow, Leninsky Prospect, 33, Russia

[#]E-mail: alex_supin@mail.ru

Discrimination between test and reference rippled sound signals with overlapping additional signals was measured. In the test signal, ripple phase inverted every 400 ms. The reference signal had either a rippled spectrum with the same ripple density as the test or a spectrum with unresolvable ripple pattern. The additional signal had the same spectrum band as the test and reference signals, either flat or rippled 2 to 7 ripples/oct. With a rippled reference signal, the ripple-density resolution was 8.7 ripples/oct in control (no additional signal), 8.5 ripples/oct with a flat additional signal, and 8.6 to 9.2 ripples/oct with a rippled additional signal) of 2 to 7 ripples/oct (all insignificantly differing from control). With a nonrippled reference signal, the ripple density resolution was 51.0 ripple/oct in control, 16.7 ripples/oct with a flat additional signal, and 11.0 to 11.1 ripples/oct with a rippled additional signal 2 to 7 ripples/oct (all significantly differing from control). The conclusion: overlapping additional signals result in specific effects depending on the spectrum pattern of the additional signal, with these effects differing for spectral and temporal mechanisms of frequency analysis.

Key words: hearing, rippled spectra, frequency analysis