АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXI 1975 Вып. 6

УДК 534.75

КРИТИЧЕСКАЯ ПОЛОСА СЛУХА. МЕТОД КАТЕГОРИАЛЬНЫХ ГРАНИЦ

А. А. Фрейдин

Предложен метод косвенного измерения областей существования субъективных признаков ощущений, использующий соответствие максимальной неопределенности принятия решения максимуму вариабильности возможных реакций. Применение этого метода к анализу результатов измерения величины критической полосы слуха показало, что для центральной частоты 1000 *гц* в диапазоне характерной ширины полосы сигнала 0,5—300 *гц* обработка сигналов производится по меньшей мере девятью разными механизмами, общими для всех испытуемых и всех использованных методов измерения критической полосы. Каждый механизм выделяет свой субъективный признак и связан со своей областью характерной шириной спектра. При последовательном изменении этого параметра происходит последовательное переключение механизмов обработки сигнала. Предполагается, что эти механизмы ответственны за переход от временного анализа звуковых колебаний к спектральному.

Анализ измерений критической полосы слуха разными методами [1] позволил предположить, что восприятие взаимодействия двух неоднородностей спектра внутри критической полосы определяется набором механизмов, последовательно сменяющих друг друга при монотонном изменении расстройки между неоднородностями. Если с каждым из механизмов связан свой субъективный признак, то, исследуя области этих субъективных признаков, можно получить информацию о структуре критической полосы. Ниже рассматривается метод косвенного измерения границ таких областей и его приложение к проблеме оценки критической полосы.

Основные предпосылки. Раздражитель, воспринимаемый анализатором, можно рассматривать как сообщение, определяющее реакцию в рамках данного контекста. Это значит, что процесс восприятия должен включать элементы опознания, классификации и т. п. Иными словами, восприятию присуща категориальность — свойство, позволяющее не только объединять ощущения в устойчивые категории (классы), но и определять категориальную принадлежность нового ощущения. Так как отнесение ощущения к одному из принятых классов требует решения, категориальное разбиение естественно моделировать набором алгоритмов выделения субъективных признаков и правилами принятия решения.

Под субъективными признаками обычно понимаются любые характеристики ощущений, которые могут применяться человеком для решения задач о сходстве или различии сигналов. Использование субъективных признаков означает, что слуховой анализатор способен использовать описание сигнала по параметрам, т. е. по количественным оценкам «величин» различных субъективных признаков. Комплекс «первичных» субъективных признаков анализатора определяет набор «элементарных» категорий, к которым может быть отнесен сигнал. На основе «первичных» признаков возможно образование «сложных» категорий со «сложными» субъектив-

ными признаками, и в принципе любой категории соответствует свой признак, а каждому признаку может соответствовать своя категория. В этом смысле область существования субъективного признака ощущения на множестве сигналов тождественна области соответствующей категории.

Хорошо известно, что реакции на один и тот же сигнал могут быть разными даже при максимально стабильных условиях эксперимента и минимальных паузах между сигналами. Учитывая эту принципиальную стохастичность восприятия, категориальное разбиение на множестве сигналов естественно описывать вероятностью выбора каждой категории. Ясно, что категориям будут соответствовать вероятности, равные единице, а областям границ — значения вероятности между нулем и единицей. Именно это свойство лежит в основе всех классических пороговых методик психоакустики.

Предположим, что в некоторой задаче реакция человека определяется в первую очередь категориальной принадлежностью сигнала. Так как сигналам «внутри» категорий и сигналам из области границы соответствует отличающаяся неопределенность принятия решения о принадлежности к категории, следует ожидать, что переход через область границы будет сопровождаться резким изменением рассеяния реакции. Прямым подтверждением этому могут служить опыты с имитацией гласных [2]. Измерение частот двух первых формант гласных — реакций показало, что последовательность синтетических гласных — стимулов разбивается на несколько категорий. В тех случаях, когда на область границы приходилось несколько стимулов, отмечались ожидавшиеся пики стандартного отклонения формант гласных — реакций.

Понятно, что изменение рассеяния экспериментальных данных может быть использовано для изучения категориальных характеристик анализатора. Конкретная форма изменения рассеяния, естественно, будет определяться методикой эксперимента. Рассмотрим приложение общих предпосылок о стохастичности восприятия, использовании субъективных признаков и корреляции категориальных границ с изменением рассеяния на конкретном примере — методе границ, примененном в наших опытах по измерению критических полос слуха [1].

Метод границ. Рассеяние в области категориальной границы. Как известно, метод границ основан на методе стохастической аппроксимации «вверх — вниз», разработанном для оценки зависимостей, подобных кривым эффекта. Испытуемому задается два типа ответов — положительный и отрицательный, разделяющие множество стимулов на две категории. В начале измерения предъявляется сигнал, с достоверностью относящийся к одной из категорий, например к «положительной» категории K_0. После положительного ответа уровень переменной, по которой ищется граница, уменьшается. Процедура продолжается до получения ответа о принадлежности сигнала к «отрицательной» категории $\overline{K}_0$, после чего уровень переменной в следующих предъявлениях увеличивается до получения положительного ответа и т. д. Число повторений фиксируется заранее либо зависит от стабильности ответов. В результате экспериментатор получает зависимость частоты выбора положительной категории от величины исследуемой переменной — так называемую психометрическую функцию. Математическая модель, лежащая в основе метода границ, предполагает, что:

1. Вероятность положительных ответов есть монотонная стационарная функция переменной.

2. Ответы испытуемого определяются только уровнем исследуемой переменной сигнала, предъявляемого в данный момент.

3. Вероятность положительных ответов вблизи 50%-ной вероятности может быть представлена нормальным распределением.

В большинстве случаев используется только одна характеристика психометрической функции — значение переменной, соответствующее 50%-ной

вероятности ($x_{50\%}$). Это значение трактуется как некоторый порог, а интервал значений $x_{25\%}-x_{75\%}$ используется как мера точности оценки порога.

Для ускорения эксперимента при оценке $x_{50\%}$ обычно регистрируются только первые положительные (после отрицательных) и первые отрицательные (после положительных) ответы, так как усреднение соответствующих значений переменной в рамках предположений дает достаточно точную оценку.

Предположим теперь, что положительная категория K_0 строится из подкатегорий, последовательно сменяющих друг друга при изменении параметра сигнала y. В рамках ряда упрощающих предположений граница по x в области «стыка» подкатегорий K_1 и K_2 будет описываться распределением

$$\varphi(x)=p_y\varphi_1(x)+(1-p_y)\varphi_2(x).$$

Здесь p_y и $(1-p_y)$ — независимые от x вероятности обработки сигнала по альтернативным алгоритмам, определяющим принадлежность ощущений к подкатегориям K_1 и K_2, а функции $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$ — плотности вероятности пороговых значений переменной x для этих подкатегорий, полученные методом границ *.

Если $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$ неизменны в области «стыка» подкатегорий и математические ожидания этих распределений $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ не равны, легко показать, что дисперсия границы по x в указанной области $\sigma^2(x)\geqslant\max\{\sigma_1^2, \sigma_2^2\}$, где σ_1^2 и σ_2^2 — дисперсии границы по x «внутри» подкатегорий. Литературные данные [2] и поведение реальных испытуемых хорошо согласуются с более сильным утверждением о том, что дисперсия измеряемой границы всегда имеет экстремум в области смены субъективных признаков (области «стыка» подкатегорий). Тогда в этой точке должно выполняться соотношение

$$(1)\qquad |\sigma_1^2-\sigma_2^2|\leqslant(\bar{x}_1-\bar{x}_2)^2.$$

Таким образом, если некоторая категориальная граница строится из отрезков границ подкатегорий, то области смены признаков можно определить по максимумам дисперсии экспериментальных выборок. Если предложенное описание такой категориальной границы достаточно близко к реальности, то для максимумов выборочных дисперсий должно выполняться соотношение (1).

Анализ категориальных границ и критические полосы. В общем случае задачу о выделении максимумов дисперсии можно сформулировать следующим образом. Имеется последовательность N выборок разного объема из M разных генеральных совокупностей ($N\geqslant M$). По последовательности N выборочных оценок дисперсии необходимо выделить локальные максимумы соответствующей последовательности дисперсий генеральных совокупностей.

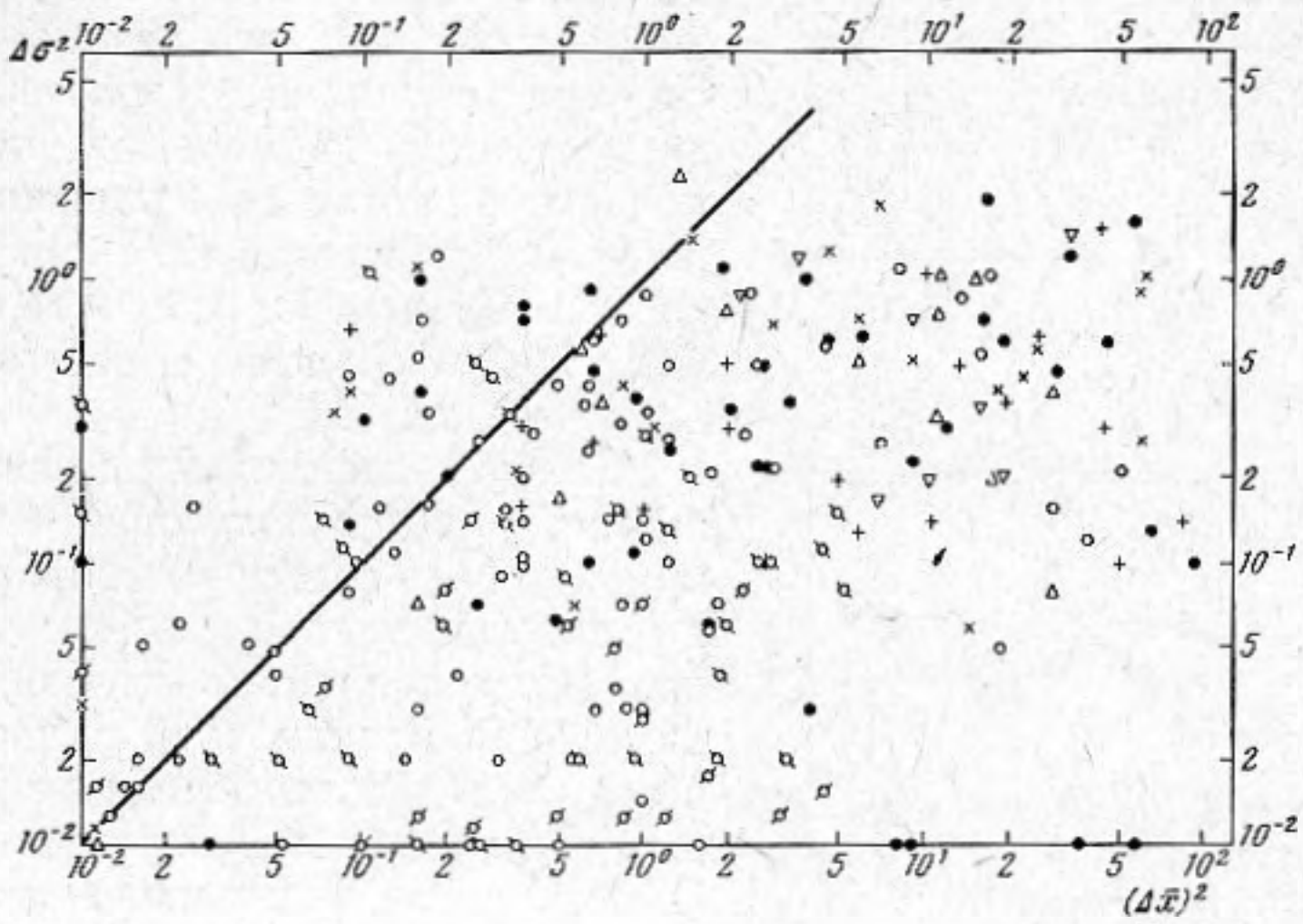
Поскольку статистические критерии анализа дисперсий разработаны только для нормальных распределений, приходится ограничиваться приближенным решением, постулируя нормальность генеральных совокупностей. Процедура выделения максимумов основана на критерии Бартлета или на критерии Фишера и теореме сложения для распределения дисперсии [3–5]. Пороговые измерения, описанные в первой части работы [1], производились для дискретных значений исследуемого параметра (характерной ширины спектра). Поэтому задача о выделении максимумов формулируется теперь как задача выделения минимальной дисперсии в вариационном ряду дисперсионных оценок, и все дисперсии, большие минимальной, считаются максимальными.

---

* В принципе можно было бы рассматривать и плотности вероятности, соответствующие психометрической функции.

Так как критерий Фишера менее чувствителен к нарушениям нормальности [6], вероятно, целесообразнее использовать именно его, учитывая, что результаты, полученные с применением критерия Бартлета и критерия Фишера, оказались весьма схожими.

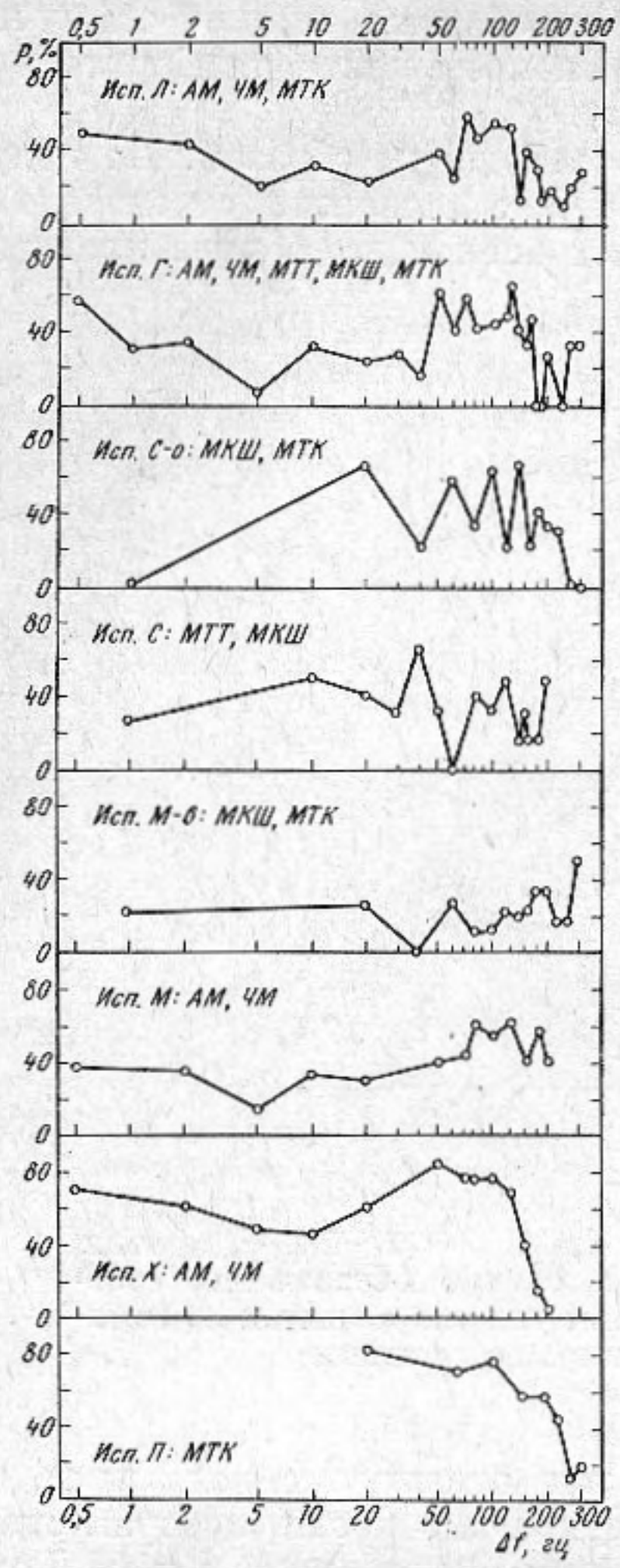
Выделение максимумов производилось следующим образом. По полученной последовательности выборочных оценок дисперсии строился вариационный ряд. Однородность двух первых оценок этого ряда проверя-



Фиг. 1. Объяснения в тексте. $\Delta\sigma^2=|\sigma_i^2-\sigma^2_{i+1}|$; $(\Delta\bar{x})^2=(\bar{x}_i-\bar{x}_{i+1})^2$; прямая задается равенством $|\sigma_i^2-\sigma^2_{i+1}|=(\bar{x}_i-\bar{x}_{i+1})^2$. Разные обозначения соответствуют разным испытуемым, принимавшим участие в опытах по измерению критической полосы четырьмя методами

лась по критерию Фишера. Если дисперсии оказывались равными, по теореме сложения строилась суммарная оценка дисперсии, которая сравнивалась по тому же критерию со следующим членом ряда и т. д. Если дисперсии оказывались разными, все дисперсии, начиная со второй (третьей и т. д.), считались относящимися к максимумам.

В пределах каждой методики измерения критической полосы максимумы дисперсии выделялись для каждого испытуемого по каждому опыту в отдельности, чтобы в известной мере нормализовать изменение чувствительности анализатора от опыта к опыту. Оказалось, что при любой методике измерения критической полосы для каждого испытуемого существуют достоверные максимумы дисперсии, причем в одном опыте может быть несколько максимумов, отделенных достоверными минимумами. Для выделенных максимумов построена зависимость модуля разности оценок дисперсий от квадрата разности оценок средних значений экспериментальных выборок, ближайших «справа» и «слева» к достоверно выделенному максимуму (фиг. 1). В рамках наших экспериментов эта зависимость — наилучшее приближение для проверки соотношения (1). Видно, что подавляющее большинство точек лежит ниже прямой $|\sigma_i^2-\sigma^2_{i+1}|=(\bar{x}_i-\bar{x}_{i+1})^2$, т. е. данные эксперимента по измерению критической полосы согласуются с рассмотренной моделью категориальной границы. Это обстоятельство, а также соответствие максимумов рассеяния категориальным границам [2], отчеты наших испытуемых об использовании ими субъективных признаков и реальная возможность действительно оценивать субъективные признаки в экспериментах по методу границ (отсутствие ошибок типа «ложная тревога») позволяют считать, что вы-



Фиг. 2. Частота появления максимумов дисперсии (p) для разных испытуемых. АМ – измерение порогов восприятия амплитудной модуляции, ЧМ – аналогичные пороги для частотной модуляции, МТТ – маскировка тона тоном, МКШ – маскировка комплекса тонов шумом, МТК – маскировка тона двумя симметричными комплексами тонов

деленные максимумы дисперсии определяют области смены субъективных признаков, а пики распределений частоты появления максимумов будут указывать средние положения, вокруг которых флуктуируют категориальные границы.

Индивидуальные зависимости частоты (частости) появления максимумов дисперсии от характерной ширины спектра сигналов, суммированные по всем методам измерения критической полосы, в которых принимал участие данный испытуемый, показаны на фиг. 2. Суммарная характеристика по всем методам и всем испытуемым показана на фиг. 3.

Чтобы выяснить, как зависит положение границы категорий от характерной ширины спектра сигнала, является ли категориальное разбиение индивидуальным и зависит ли оно от метода измерения критической полосы, необходимо исследовать распределения частоты дисперсионных максимумов.

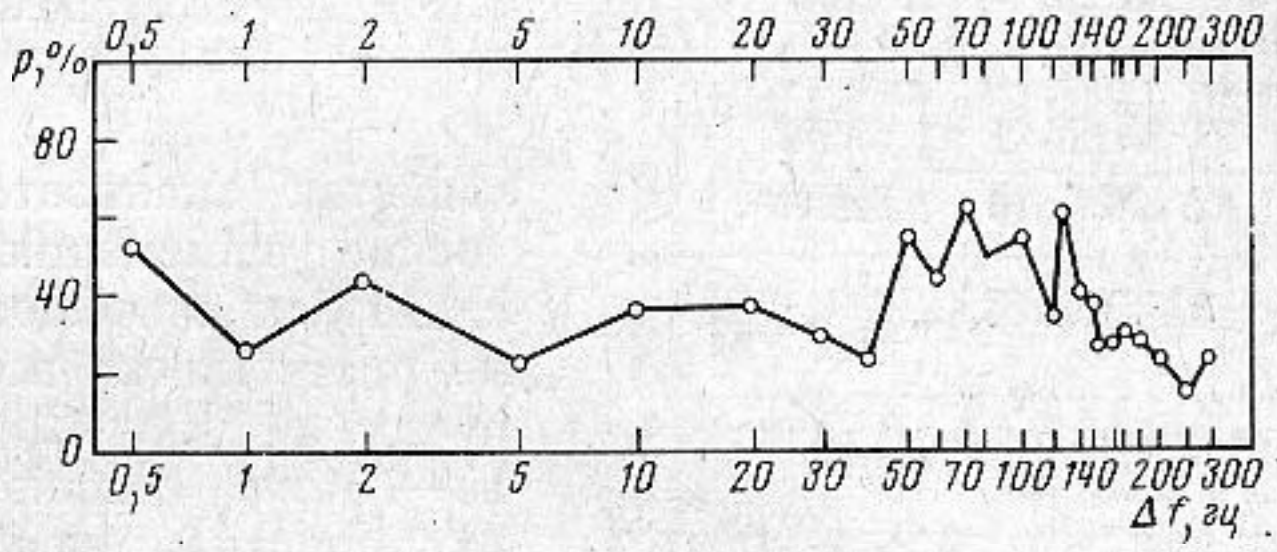
Если категориальные границы связаны с определенными величинами характерной ширины спектра, то вероятность появления максимума дисперсии при этих значениях параметра должна быть достоверно больше, чем «внутри» категорий. Если положение границ для каждого испытуемого изменяется случайным образом даже в пределах одного метода измерения критической полосы, вероятность появления максимума дисперсии должна быть распределена равномерно.

Так как разные опыты можно считать статистически независимыми, частоты появления дисперсионных максимумов при каждом значении параметра подчиняются биноминальному распределению, и для сравнения вероятностей можно применить соответствующие критерии [3—5].

Выделение максимумов вероятности производится аналогично ранее описанному выделению максимумов дисперсий. Для вариационного ряда оценок частот строится новый ряд с помощью преобразования арксинусов, и на основании квантилей нормального распределения с принятым уровнем достоверности проверяется гипотеза о равенстве двух первых частот. Если частоты равны, то строится объединенная оценка частоты появления максимума дисперсии и проверяется гипотеза о равенстве этой частоты и следующей оценки частоты в вариационном ряду. Если же гипотеза отвергается, все члены вариационного ряда, начиная со второго (третьего и т. д.), считаются максимальными.

Результаты такого анализа для характеристик, приведенных на фиг. 2—3, показаны на фиг. 4. Диаграммы выделенных максимальных

значений вероятности показывают, что для каждого испытуемого категориальные границы связаны с определенными значениями характерной ширины спектра сигналов. Наличие подобных максимумов вероятности на аналогичных характеристиках, построенных для разных методов измерения критической полосы, доказывает, что границы имеют четко выраженные «центры группировки», и индивидуальные категориальные разбиения в первую очередь определяются этими «центрами». Эти результаты позволяют предположить, что зависимости частоты появления дисперсионных максимумов от параметра одинаковы для всех испытуе-



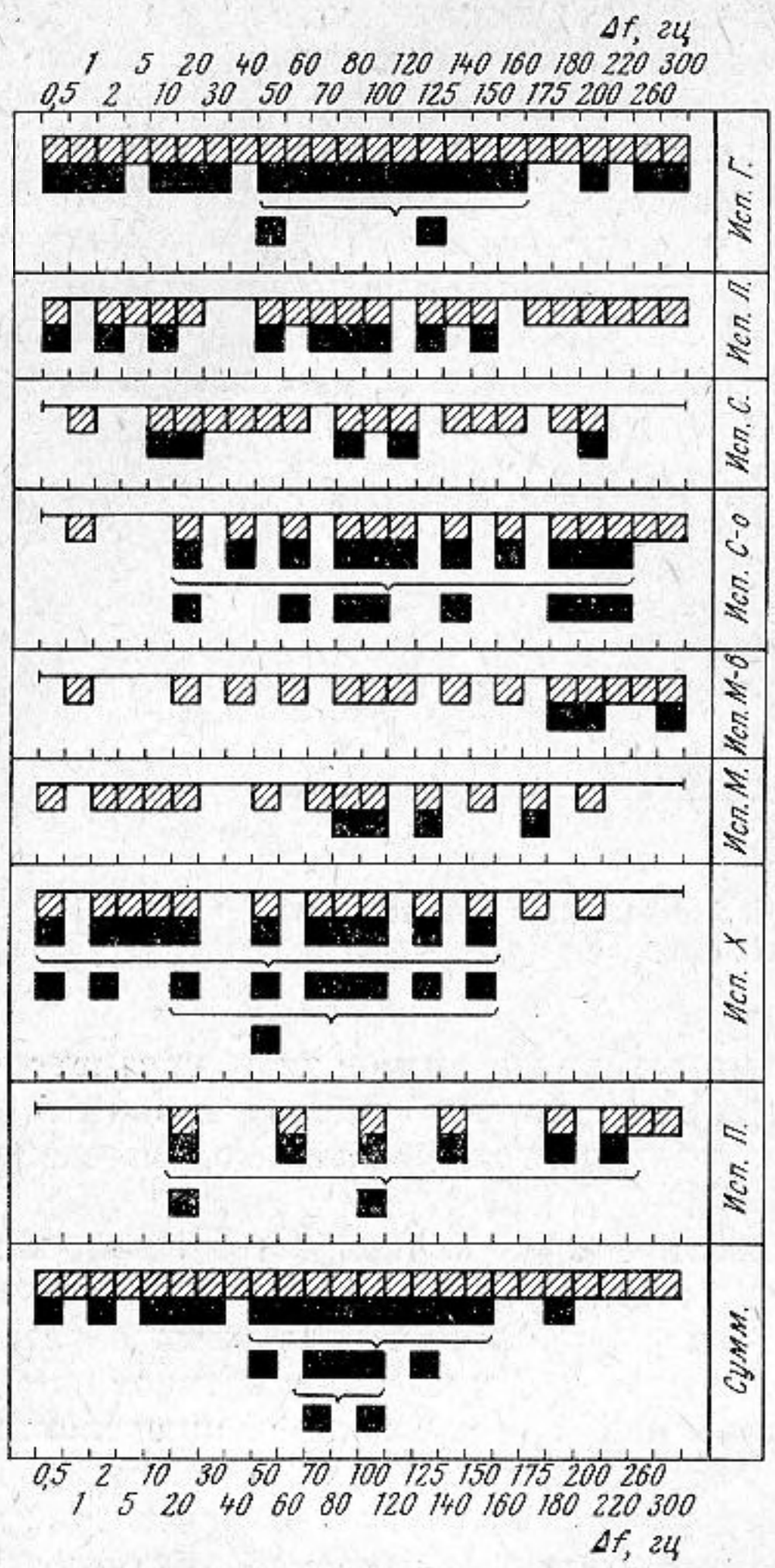
Фиг. 3. Суммарная характеристика частоты появления максимумов дисперсии (p)

мых и слуховые характеристики в опытах по измерению критической полосы определяются одним категориальным разбиением, границы которого для разных испытуемых флуктуируют относительно определенных значений параметра.

Проверка проводилась с помощью критерия знаков [3—5]. Для каждой пары индивидуальных характеристик составлялись разности частот появления максимумов дисперсии при совпадающих значениях параметра. Проверяемая гипотеза состояла в том, что при каждом таком значении параметра обе частоты — независимые и одинаково распределенные случайные величины. Для 24 пар испытуемых из 28 возможных комбинаций гипотеза была принята, для двух пар гипотезу проверить не удалось и для двух пар гипотеза была отвергнута. В последнем случае трое испытуемых из четырех были наименее тренированы. Аналогичные результаты получены и при сравнении характеристик методов измерения критической полосы.

Следовательно, в наших опытах категориальные разбиения у разных испытуемых при разных методах измерения критической полосы действительно очень сходны и определяются, вероятно, одинаковым фиксированным набором механизмов обработки сигнала. Поэтому для оценки средних положений границ мы вправе использовать суммарную характеристику частоты появления максимумов дисперсии (фиг. 3). Ее анализ (фиг. 4) позволяет выделить для центральной частоты 1000 *гц* в диапазоне 0,5—300 *гц* девять категорий со средним положением границ 2,10—30, 50, 70, 100, 125, 150, 180 и 300 *гц*. Так как диапазон 200—300 *гц* исследован не слишком подробно, возможно, что категорий больше (10—12).

Для решения вопроса о числе категорий и о конкретных механизмах выделения субъективных признаков необходимы дополнительные исследования. Пока можно с большей или меньшей степенью уверенности указать характеристики ощущений, связанные с некоторыми категориями. Первая категория (доли герца — 2 *гц*), вероятно, характеризуется определением факта наличия изменения ощущения во времени и отражает дифференцирующие свойства слухового анализатора [7]. Вторая категория (2 *гц* — 10—30 *гц*) характеризуется переходом на выделение четко ощущаемых временны́х ритмичных изменений громкости и высоты. Категория 10—30 *гц* — 50 *гц*, вероятно, отражает интегрирующие



Фиг. 4. Диаграммы выделенных максимумов вероятности появления максимумов дисперсий экспериментальных выборок для разных испытуемых и по суммарной характеристике. Заштрихованные квадраты соответствуют тем значениям параметра, при которых производились измерения; черные квадраты соответствуют выделенным максимумам вероятности. Фигурными скобками обозначены «слитные» максимумы, для которых проводилось повторное выделение максимумов вероятности

свойства анализатора (ритмические изменения начинают сливаться в общее ощущение, но ритмичность все еще чувствует) [7]. С категорией 50—70 *гц* связано ощущение «хриплости», «шероховатости», «дребезжания». Этому же диапазону соответствует максимально диссонирующая (для центральной частоты 1000 *гц*) разность частот [8]. С какими субъективными признаками соотносятся остальные категории, пока не ясно.

Изменение ощущений при последовательной смене категорий позволяет считать, что категориальные механизмы ответственны за переход от временнóго анализа звуковых колебаний к спектральному, а общепринятую величину критической полосы слуха, вероятно, следует рассматривать как некоторую приближенную оценку величины такой переходной зоны. И хотя в принципе можно было бы однозначно определять величину критической полосы при любом методе ее измерения по переходу на какой-либо обусловленный заранее признак, проблема измерения критической полосы (в традиционном смысле) теряет свою остроту, сменяясь проблемой исследования границ спектрального и временнóго анализа в слуховой системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *А. А. Фрейдин.* Критическая полоса слуха. Измерение критической полосы разными методами. Акуст. ж., 1975, *21*, 5, 806–814.
2. *L. A. Chistovich, G. Fant, A. de Serpa Leitâo, P. Tjernlund.* Mimicking of synthetic vowels. Speech Transmission Lab. Quart. Progr. a. Status Report, 1966, *2*, 1–18.
3. *А. Хальд.* Математическая статистика с техническими приложениями, М., Изд-во иностр. лит., 1956.
4. *Б. Л. ван дер Варден.* Математическая статистика, М., Изд-во иностр. лит., 1960.
5. *Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов.* Таблицы математической статистики, М., «Наука», 1965.
6. *В. В. Налимов.* Теория эксперимента, М., «Наука», 1971.
7. *Н. А. Дубровский, Л. Н. Тумаркина.* Исследование восприятия человеком амплитудно-модулированных шумов. Акуст. ж., 1967, *13*, 1, 51–59.
8. *R. Plomp, W. J. Levelt.* Tonal consonance and the critical bandwidth, J. Acoust. Soc. America, 1965, *38*, 4, 548–560.

Институт биологической физики
Академии наук СССР

Поступила
5 апреля 1974 г.