

В. А. САПРЫКИН, А. А. САГАЛ

**ПРИНЦИП ИНВАРИАНТНОСТИ ВОСПРИНИМАЮЩИХ СВОЙСТВ  
СЛУХОВОГО АНАЛИЗАТОРА ЧЕЛОВЕКА ОТНОСИТЕЛЬНО  
ОПЕРАЦИИ СЖАТИЯ (РАСШИРЕНИЯ) СИГНАЛА**

*(Представлено академиком Е. М. Кренсом 10 V 1972)*

В современной психофизике становится общепринятой необходимость определения анализаторной системы как стохастической системы связи с помехами, памятью и другими свойствами, осуществляющей процесс статистического решения о свойствах сигнала. С точки зрения аппаратов общей теории связи статистических решений такая формализация анализатора, в частности, требует полного учета всех априорных ограничений статистического приема и возможностей оценки преобразований сигнала инвариантных относительно свойств воспринимающей системы<sup>(1-3)</sup>. Указанная система требует представления входа (совокупностей сигналов), включающего выделение в нем двух основных параметров: неопределенности  $h$  сигнала и их энергетического уровня  $\epsilon$ .

Данная работа посвящена некоторым результатам экспериментального исследования адекватности представления и характеристик параметров анализатора как указанной системы связи. Конкретно, исследован слуховой анализатор человека (с.а.ч.) в условиях порогового восприятия (обнаружения) тональных сигналов на фоне равномерного гауссовского шума. Существенность выбранных условий исследования определяется, во-первых, простотой учета неопределенности тональных сигналов, во-вторых, возможностью использования принципа суперпозиции при изучении восприятия пороговых сигналов.

Для тонально-импульсных звуковых сигналов их неопределенность выступает как частотно-временная неопределенность, т. е. требование фиксации уровня  $h$  эквивалентно требованию постоянства произведения  $h = \omega\tau$ , где  $\omega$  — частота тонального раздражителя, а  $\tau$  — его длительность. В качестве пороговых рассматриваются сигналы, лежащие на уровне отношения сигнал/шум, соответствующем пределу обнаружения слуховой системы.

Экспериментальное исследование анализатора как стохастической решающей системы должно включать проверку адекватности отмеченных ограничений действительным воспринимающим свойствам системы. Иными словами, должно быть проверено, что в описанных условиях с.а.ч. действительно ведет себя как линейная система, воспринимающие свойства которой определяются энергетическими и едиными частотно-временными свойствами сигналов. Доказательство факта линейности системы в пороговых условиях показано в работе<sup>(4)</sup>. Этот факт следует из нормальности условных психометрических распределений величины сигнала при условии определения его заданной категорией суждения «есть сигнал».

Основу методики данной работы составляет методика работы<sup>(4)</sup>. В ней испытуемым на фоне непрерывного маскирующего шума в случайном порядке предъявляли тоновые сигналы со средним интервалом следования 10,4 сек. От испытуемых требовали стабилизации частоты ложных решений и минимизации ошибки пропуска сигнала, т. е. следо-

вания критерию Неймана — Пирсона. В результате длительной предварительной тренировки удалось привести с.а.ч. к условиям данного типа оптимальной системы со средней вероятностью ложной тревоги  $\alpha = 0,01$ . Было выбрано отношение сигнал/шум  $\sqrt{2E/N} = 7$ . Здесь  $E$  — энергия сигнала, а  $N$  — спектральная плотность мощности шума.

Важное отличие настоящей методики от описанной в работе (1) состоит в том, что сигналы предъявляли как моноаурально, так и бинаурально (в других сериях опытов). При бинауральном предъявлении тональные

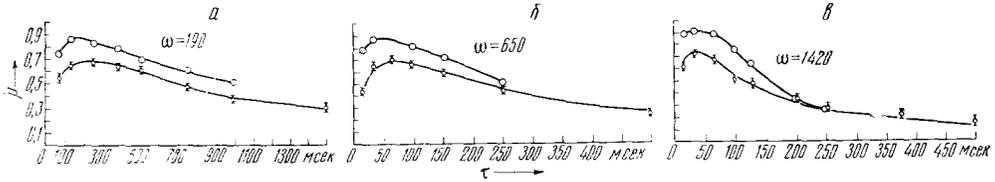


Рис. 1

сигналы подавали в одинаковой фазе на оба уха. При этом шумовые сигналы подавали на оба уха от одного генератора или — в других опытах — на каждое ухо подавали сигналы от отдельного генератора. Шумовой сигнал в первой постановке опытов назван коррелированным, во второй — некоррелированным.

В эксперименте для ряда значений частот  $\omega \in (200; 5000)$  гц испытуемым предъявляли тональный сигнал с фиксированной энергией и диапазоном изменений длительности  $\tau$  от 6 до 1500 мсек. В каждой серии опытов использовали различные значения частоты и длительности сигналов. Полоса частот  $\Delta\omega$  маскирующего шума для центральной частоты  $\omega = 267$  гц равнялась 210 гц и, соответственно, с увеличением частоты расширялась — из условия  $\omega : \Delta\omega = 1,27$ . Спектральная плотность мощности шума  $N$  в пределах всех полос была постоянной.

На рис. 1 показаны осредненные по всем испытуемым данные для некоторых из исследованных частот. Данные показывают, что для сигналов большей частоты максимум вероятности правильного обнаружения  $P = P_{пр}$  соответствует меньшей длительности сигналов. При этом  $P_{пр\ max} = 0,75$  при условии бинаурального некоррелированного приема и фиксированной частоты ложных тревог.

Максимум  $P_{пр}$ , при данной частоте  $\omega$ , соответствует таким значениям длительности  $\tau$ , для которых  $h = \omega\tau = 42,5$  во всех исследованных условиях. Таким образом, при увеличении рабочей частоты  $\omega$  область наибольшей эффективности слухового приема смещается в сторону меньших длительностей  $\tau$ .

Существенно, что в условиях приема сигналов, эталонированных по неопределенности, наблюдали суммационную способность с.а.ч. по отношению ко всем исследованным частотам: можно видеть из рис. 1, что во всех случаях при некоррелированном приеме вероятность  $P_{пр}$  статистически значимо (на уровне  $P < 0,01$ ) больше, чем в тех же прочих условиях при некоррелированном приеме (ср. (2)).

Можно показать, что эффективность приема  $P_{пр}$  может быть представлена функцией

$$P = \theta \exp(-1/2(\ln \omega + \ln \tau - k)^2 / \sigma^2),$$

где оказалось в среднем для всех исследованных условий  $\sigma = 1,4$  и  $k = 3,8$ . Отсюда следует, что произведение

$$\omega\tau = \exp \{k \pm \sqrt{\ln(1/c)} / \sigma\},$$

где  $c = P_{пр}$ .

Полученные данные позволяют считать справедливым это соотношение в частотном диапазоне  $\omega \in (200; 5000)$  гц.

Таким образом, проведенные опыты показали, что частотные и временные свойства сигнала в точке приема выровнены таким образом, что нельзя отдать предпочтение ни одному из них. Этот факт наблюдается в широком классе случаев порогового приема тональных сигналов: широком диапазоне частот и длительностей, моно- или бинауральном приеме, коррелированной или некоррелированной шумовой помехе. Эффективность приема, т. е. вероятность правильного обнаружения, зависит только от произведения  $\omega t$ , а не от частоты или длительности в отдельности, при условиях фиксации энергии сигнала  $\varepsilon$  и частоты ложных тревог  $\alpha$ . Иными словами, неопределенность  $h$  действительно является инвариантом, определяющим воспринимающие свойства с.а.ч. Постоянство  $\omega t$  означает, что эффективность порогового восприятия определяется числом  $n$  волн гармонического сигнала  $x = a \cos \omega t$ , т. е. она инвариантна относительно операции сжатия или расширения сигнала: изменение сомножителей  $\omega$  и  $t$  в  $h$  при постоянном  $h = n$  означает расширение или сжатие сигнала, имеющего постоянное число  $n$  волн. Наконец, данные позволяют заключить, что характеристическими (функциональными) параметрами тонально-импульсных сигналов являются не их частота и длительность, как принимают обычно (<sup>4</sup>), а неопределенность сигналов и их энергия (точнее, отношение сигнал / шум).

Институт эволюционной физиологии и биохимии  
им. И. М. Сеченова  
Академии наук СССР  
Ленинград

Поступило  
11 IV 1972

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. А. Сапрыкин, Б. И. Белов, Биофизика, 13, в. 6, 1085 (1968). <sup>2</sup> В. В. Питерсен и др., В сборн. Теория информации и ее применения, М., 1959. <sup>3</sup> Д. Миддлтон, Введение в статистическую теорию связи, 2, М., 1962. <sup>4</sup> I. Hirsch, The Measurement of Hearing, N. Y., 1952.