АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXV 1979 Вып. 5

УДК 534.323.001.573

МОДЕЛЬ СЛУХОВОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИРАЩЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ УЗКОПОЛОСНЫХ ШУМОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Ю. А. Индлин

Экспериментально выявленный логарифмически нормальный вид распределения амплитуд узкополосных шумовых импульсов позволил математически описать работу амплитудной модели слухового обнаружения приращений интенсивности таких импульсов, что в свою очередь подтверждено экспериментально.

В работе [1] показано, что слуховое обнаружение приращений интенсивности узкополосного шумового импульса может хорошо моделироваться устройством, которое при сравнении двух импульсов, отличающихся средним уровнем *, указывает на наличие приращения среднего уровня того из импульсов, амплитуда (максимальное значение) которого больше.

Для количественного описания работы такой модели прежде всего необходимо знать статистики распределения амплитуд узкополосных шумовых импульсов. Поскольку теория этого вопроса не разработана [2], нам остается прибегнуть к экспериментальному исследованию.

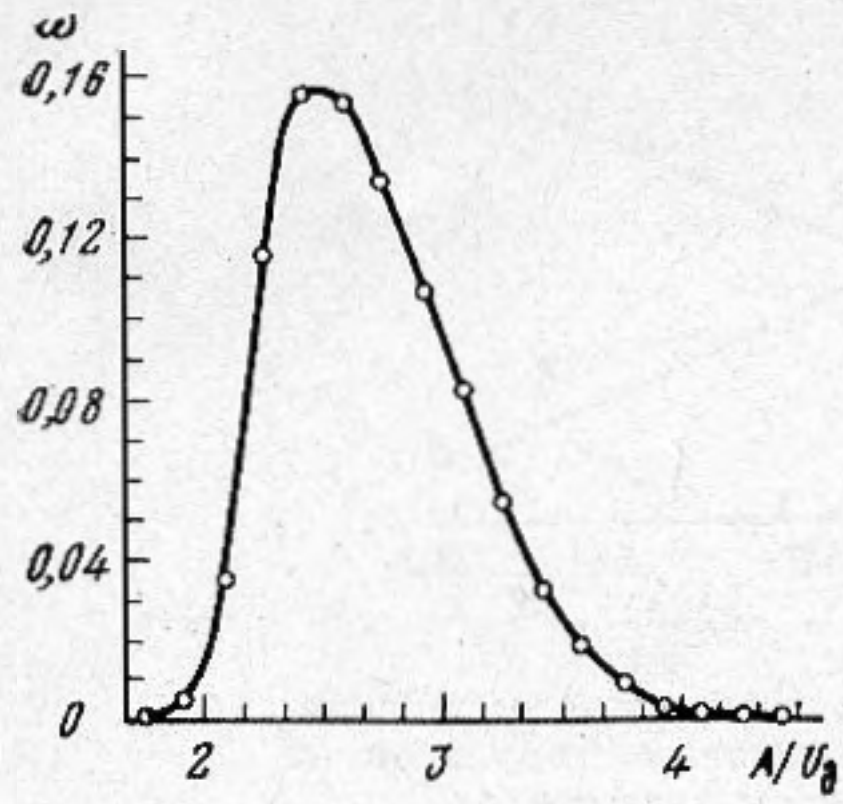
В проведенном эксперименте выходной сигнал с генератора белого шума формировался с помощью реле в периодические шумовые импульсы длительностью 0,1 с, которые проходили через один из фильтров с шириной эффективной полосы 37, 59, 91, 125, 250 и 720 Гц при средней частоте 1000 Гц на осциллограф с памятью, экран которого был разделен эквидистантными горизонтальными линиями. Распределение амплитуд импульсов получалось в результате подсчета числа импульсов, амплитуды которых попадали в интервал между соседними линиями. Одно из таких распределений, полученное по 1000 измерений, представлено на фиг. 1; действующее (среднеквадратичное) значение напряжения показывал вольтметр случайного шума (Брюль и Кьер, тип 2417) с постоянной 100 с.

Распределение замечательно тем, что при логарифмическом масштабе оси абсцисс, предусматривающем группировку экспериментальных данных в логарифмически равные интервалы, оно оказывается близким к нормальному (коэффициент асимметрии и эксцесса близки к нулю). Это иллюстрирует фигура 2, на которой нормальному распределению соответствует прямая линия.

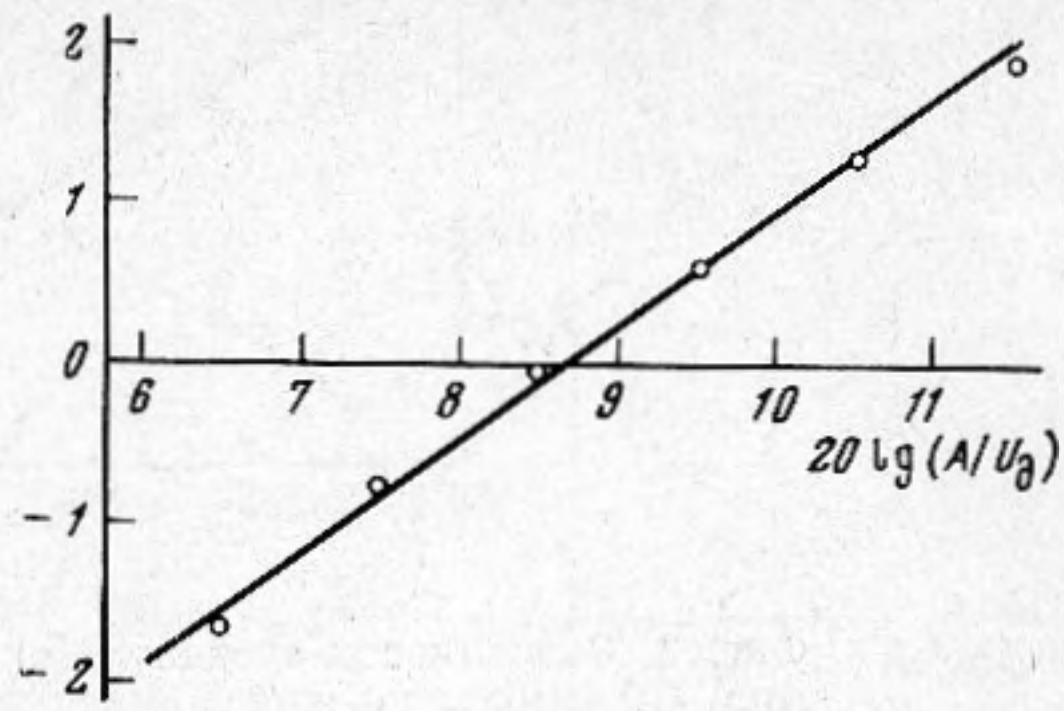
Форма распределения, а также расположение экспериментальных точек относительно прямой линии в графике фиг. 2 типичны и для других частотных полос; изменяются лишь статистики распределения: с расширением полосы частот растет среднее и уменьшается стандартное отклонение (на фиг. 2 это можно было бы изобразить смещением прямой вправо и увеличением угла ее наклона), что количественно описывает фигура 3.

Следует отметить, что статистики амплитуд импульсов зависят также и от других параметров экспериментальной ситуации. Одним из таких

* Под средним уровнем здесь и ниже подразумевается уровень интенсивности реализации шума, из которой вырезается шумовой импульс.



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Распределение амплитуд импульсов шириной эффективной полосы 91 Гц при средней частоте полосы 1000 Гц; ω — частость, A — амплитуда; $U_д$ — действующее значение напряжения непрерываемого шума

Фиг. 2. Представление экспериментальных данных в форме, указывающей на близость к нормальному распределению: на оси ординат отложены единицы стандартных отклонений, полученные из накопленных частостей с помощью интеграла Лапласа

параметров является пик-фактор шума (в нашем эксперименте использовался генератор фирмы Брюль и Кьер, тип 1402, дающий шум нормального распределения до 4σ при полном выходном напряжении).

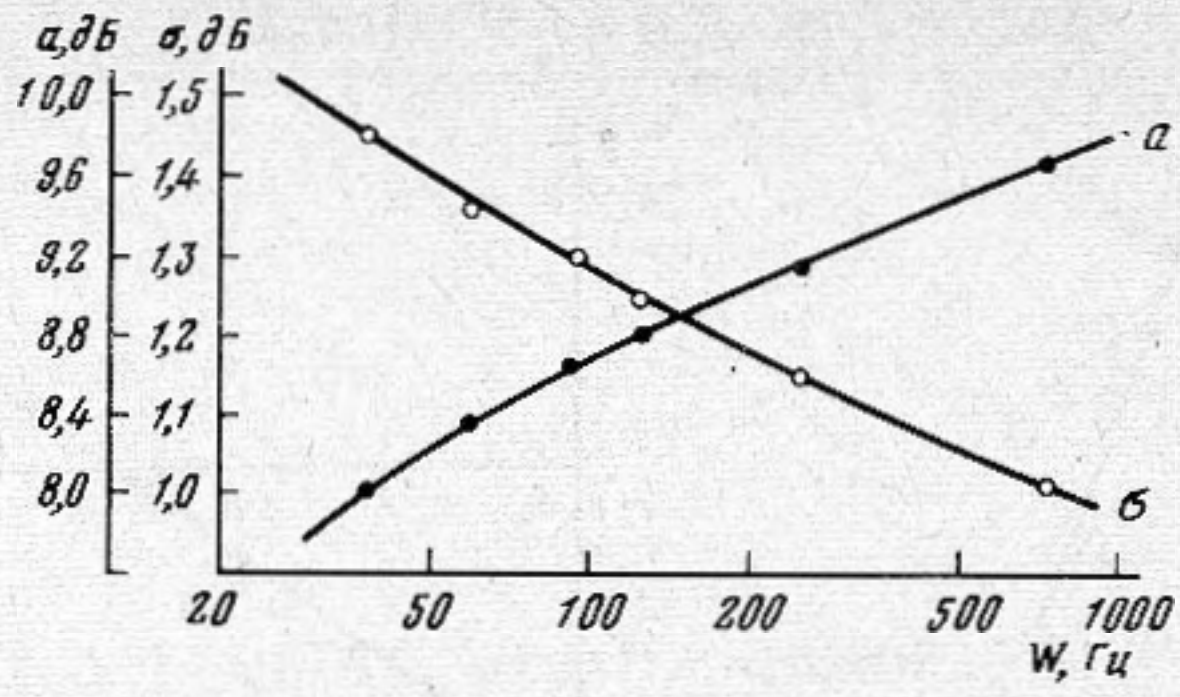
Другим параметром, влияющим на положение кривых на фиг. 3, является средняя частота полосы; с ростом частоты кривая a смещается вверх, кривая σ — вниз. И, наконец, существенное влияние оказывают характеристики фильтра, из которых главную роль играет отношение k эффективной полосы W (определяемой из энергетических соображений) к полосе пропускания (определяемой на уровне — 3 дБ). В использованных нами фильтрах k постепенно изменялось от 1,42 при $W=37$ Гц до 1,03 при $W=720$ Гц *. Чтобы оценить влияние характеристик фильтра, описанные выше измерения были проведены с использованием фильтра Чебышева пятого порядка с $W=59$ Гц и $k=1{,}02$. Среднее распределения оказалось на 0,5 дБ меньше, чем полученное для использованного в нашем эксперименте фильтра с той же эффективной полосой и с $k=1{,}34$, хотя стандартное отклонение практически не изменилось.

Отмечая зависимость статистик распределения амплитуд импульсов от различных параметров экспериментальной ситуации, следует подчеркнуть то важное обстоятельство, что изменение этих параметров не сопровождалось заметным искажением формы распределения: оно остается нормальным при логарифмическом масштабе оси абсцисс. Это позволяет весьма просто описать работу нашей модели.

Действительно, пусть распределение амплитуд импульсов исходного среднего уровня (стандартных импульсов) имеет в логарифмическом масштабе статистики a (среднее) и σ (стандартное отклонение); тогда распределение амплитуд импульсов увеличенного среднего уровня (переменных импульсов) будет иметь параметры $a+\Delta L$ и σ, где ΔL — приращение среднего уровня. При предъявлении двух импульсов, стандартного и переменного, модель оценивает их амплитуды и определяет как переменный тот из импульсов, который имеет бóльшую амплитуду. Какова в этих условиях вероятность правильного решения?

---

* В эксперименте использовалась обычная аппаратура: частотный анализатор (Брюль и Кьер, тип 2105) и спектрометр (Брюль и Кьер, тип 2112), последовательное соединение которых позволяло формировать указанные полосы.



Фиг. 3. Зависимость среднего (a) и стандартного отклонения (σ) распределения амплитуд шумовых импульсов от ширины эффективной полосы частот

Вероятность правильного решения, очевидно, равна вероятности того, что амплитуда переменного импульса будет больше амплитуды стандартного импульса. Последнее в свою очередь равно вероятности того, что разность двух случайных нормально распределенных величин со статистиками $a+\Delta L$, σ и a, σ положительна. Разность этих величин — нормально распределенная величина со статистиками ΔL и $\sqrt{2}\sigma$, принимающая положительные значения с вероятностью

$$p=F(\Delta L/\sqrt{2}\sigma), \tag{1}$$

где F — знак интеграла Лапласа.

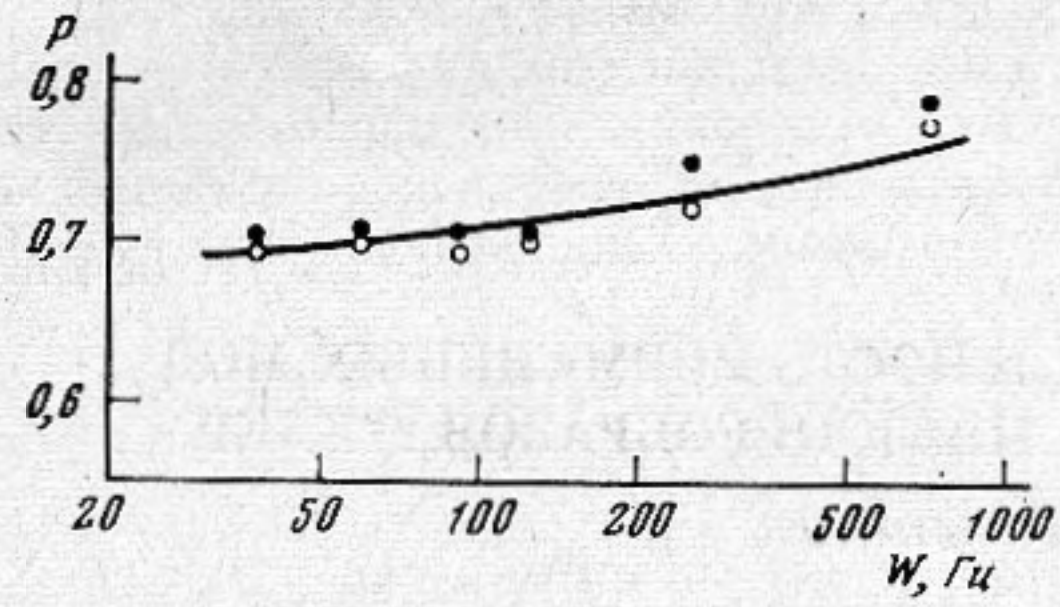
Выражение (1) дает описание нашей модели: зная стандартное отклонение распределения амплитуд узкополосных шумовых импульсов, можно предсказать вероятность правильного обнаружения переменного импульса с данным ΔL, которая, согласно работе [1], должна хорошо согласовываться с вероятностью его слухового обнаружения. Проверим это.

В работе [1] и в настоящей работе использовался одинаковый комплекс аппаратуры. Это позволяет сопоставить экспериментальные результаты, полученные в работе [1] при $\Delta L=1$ дБ, с теоретическими значениями вероятности обнаружения переменного импульса, вычисленными при подстановке в (1) $\Delta L=1$ дБ и измеренных выше значений σ.

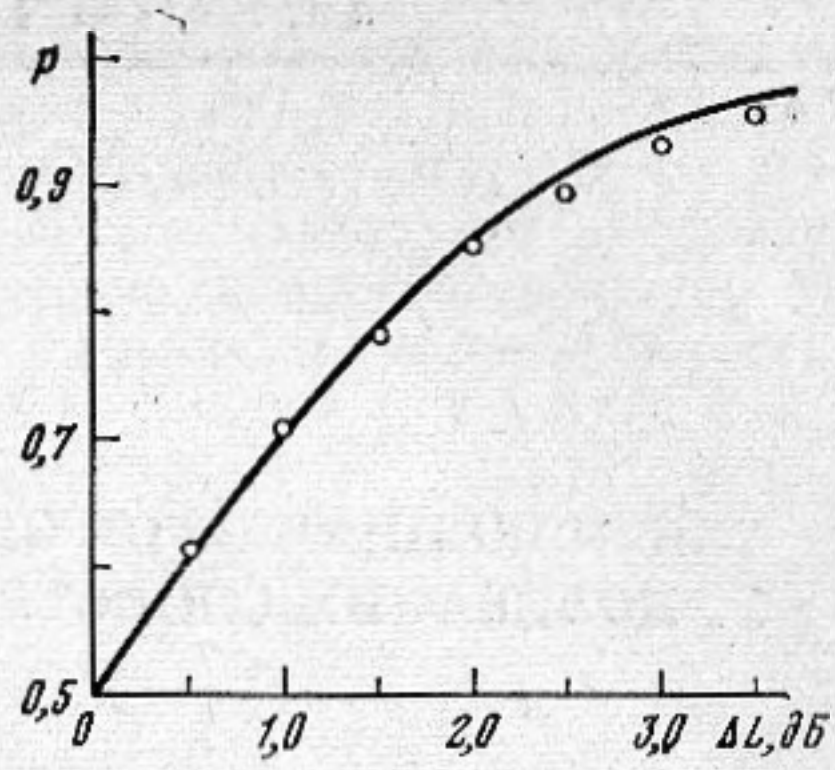
Результаты этого сопоставления (фиг. 4) говорят о том, что непосредственное (визуальное) обнаружение переменного импульса хорошо описывается выражением (1) во всем используемом частотном диапазоне, в то время как слуховое обнаружение, как и утверждалось в работе [1],— в сравнительно узком диапазоне частот.

Таким образом, при достаточно узком диапазоне частот и при $\Delta L=1$ дБ амплитудная модель хорошо описывает слуховое обнаружение переменного импульса. Чтобы убедиться в справедливости формулы (1) при разных ΔL, был проведен эксперимент по слуховому обнаружению переменного импульса при $W=91$ Гц ($\sigma=1{,}3$ дБ) по методике, описанной в работе [1]. Полученные результаты (фиг. 5) хорошо описываются теоретической зависимостью; систематический характер незначительных отклонений экспериментальных точек от теоретической кривой предопределяется характером отклонений точек на фиг. 2 от прямой линии и, таким образом, объясняется некоторым отличием распределения амплитуд импульсов (в логарифмическом масштабе) от нормального распределения.

Если ввести в рассмотрение порог обнаружения, определяемый через 75% правильных ответов, то можно утверждать, что в случае узкополосных шумовых импульсов порог слухового обнаружения для идеального слушателя (безошибочно различающего громкости импульсов) определен



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Сравнение экспериментальных и теоретических данных: кривая линия — вероятность обнаружения переменного импульса, согласно формуле (1), в функции эффективной полосы фильтра, белые кружки дают относительное число визуальных обнаружений переменного импульса из работы [1], черные кружки — относительное число слуховых обнаружений переменного импульса из работы [1]

Фиг. 5. Сравнение экспериментальных и теоретических данных: кривая линия получена по формуле (1) при $\sigma=1{,}3$ дБ, кружки — результаты слухового обнаружения, полученные усреднением 400 ответов на точку

физическими параметрами экспериментальной ситуации, и потому его можно рассматривать как границу, к которой стремится порог обнаружения реального слушателя в процессе его тренировки. Отсюда следует интересная возможность непосредственного использования полученных данных: мера различия идеального и реального порогов позволяет оценить квалификацию слушателя по отношению к различению громкости сигналов.

Выводы

Распределение амплитуд узкополосных шумовых импульсов логарифмически нормально. Амплитудная модель, использующая характеристики этого распределения, хорошо описывает слуховое обнаружение приращений среднего уровня узкополосных шумовых импульсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Индлин Ю. А.* О громкости узкополосных шумовых импульсов. Акуст. ж., 1979, *25*, 4, 528–535.
2. *Тихонов В. И.* Статистическая радиотехника. М., «Советское радио», 1966, 386–389.

Всесоюзный научно-исследовательский
кинофотоинститут

Поступила
23 ноября 1978 г.