

О. М. АБРАМОВ, А. Я. ДРЮЧЕНКО, С. А. УСЕНКО,
Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО

ЭФФЕКТ СГЛАЖИВАНИЯ В СЛУХЕ

Как известно, зрительный стимул в процессе преобразования его в ощущение подвергается сглаживанию. Механизм сглаживания выполняет роль фильтра, который ограничивает объем информации, поступающей из внешнего мира в мозг человека. Благодаря сглаживанию мы не замечаем смены отдельных кадров на киноэкране, воспринимаем газетный точечный растр как полутоновую фотографию.

Эффект сглаживания в зрении описывается законом Тальбота [1]. Для периодически изменяющихся во времени однородных зрительных стимулов постоянного спектрального состава закон Тальбота формируется следующим образом [2]. Пусть $B_T(t)$ — яркость стимула S_1 , изменяющаяся во времени t с периодом T по произвольному закону. При достаточно малом T ощущение стимула S_1 совпадает с ощущением неизменного во времени стимула S , яркость B которого равна

$$B = \frac{1}{T} \int_0^T B_T(t) dt. \quad (1)$$

В работе [3] закон Тальбота обобщен на случай непериодических зрительных стимулов и представлен следующим равенством:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_{t_1}^{t_2} B_N(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} B(t) dt. \quad (2)$$

Здесь t_1 и t_2 — произвольные фиксированные моменты времени; $B(t)$ и $B_N(t)$ ($N = 1, 2, \dots$) — функции зависимости яркости от времени для стимулов S и S_N .

Если равенство (2) выполняется, то при достаточно большом N ощущение стимула S_N совпадает с ощущением стимула S .

Закон Гальбота описывает одно из фундаментальных свойств зрения, он широко известен и применяется в технике (кино, телевидение, светотехника, полиграфия и др.).

Казалось бы, естественно ожидать, что эффект сглаживания должен обнаруживаться не только в зрении, но также и в слухе. Однако обращаясь к руководствам по психоакустике, мы не находим там достаточно ясных указаний на существование этого эффекта.

Попытаемся ответить на вопрос, выполняется ли для слуха закон Гальбота в форме (1). Функцию $B_T(t)$ будем теперь интерпретировать как осциллограмму периодически изменяющегося во времени звукового давления слухового стимула S_1 . Сигнал S интерпретируем как слуховой стимул, звуковое давление которого постоянно во времени. При достаточно малом T , например при $T = 30$ мксек, ощущение стимулов S_1 и S совпадают: оба они неслышимы. Таким образом, хотя закон Гальбота в форме (1) и выполняется, однако в применении к слуху этот закон вырождается в совершенно бессодержательное утверждение. Возможно, что именно этим обстоятельством объясняется в значительной степени почти полное отсутствие у исследователей стремления к поискам эффекта сглаживания в слухе.

Несмотря на столь обескураживающее обстоятельство, авторы все же рассмотрели вопрос о применимости к слуху обобщенного закона Гальбота в форме (2). Результаты этого рассмотрения изложены в настоящей работе. В ней авторы пытаются показать, что обобщенный закон Гальбота в форме (2) — вовсе не бессодержательное утверждение. Напротив, этот закон описывает, по-видимому, фундаментальный эффект сглаживания в слухе, который перспективен для применений в технике.

Пусть $A(t)$ — произвольно выбранная осциллограмма звукового давления; $M_T(t)$ — функция с периодом T , заданная следующими условиями:

$$M_T(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } nT \leq t < (n + \lambda)T \\ 0, & \text{если } (n + \lambda)T \leq t < (n + 1)T. \end{cases}$$

Здесь n — произвольное целое число; λ — вещественное число, принимающее значения в пределах от 0 до 1.

Образуем последовательность $T_1, T_2, \dots, T_N, \dots$ таким образом, чтобы

$$\lim_{N \rightarrow \infty} T_N = 0$$

и рассмотрим слуховой стимул S_N , характеризующийся следующей осциллограммой звукового давления:

$$B_N(t) = A(t) M_{TN}(t) = \begin{cases} A(t), & \text{если } nT_N \leq t < (n + \lambda) T_N \\ 0, & \text{если } (n + \lambda) T_N \leq t < (n + 1) T_N. \end{cases} \quad (5)$$

Сигнал $B_N(t)$ может быть практически сформирован прерыванием сигнала $A(t)$ с периодом прерывания T_N и параметром λ (рис. 1, а, б).

Введем в рассмотрение также слуховой стимул S , характеризующийся осциллограммой звукового давления

$$B(t) = \lambda A(t). \quad (6)$$

Сигнал $B_N(t)$ практически можно получить, ослабляя в λ раз сигнал $A(t)$ (рис. 1, в).

Если обобщенный закон Тальбота справедлив, то при достаточно большом N ощущение стимула S_N должно совпасть с ощущением стимула S . Практически это означает, что при достаточно малом периоде прерывания с параметром λ любой слуховой стимул должен звучать так, как если он был ослаблен без прерывания в λ раз.

Действительно, нетрудно показать, что при любых t_1 и t_2

$$\lim_{T_N \rightarrow 0} \int_{t_1}^{t_2} B_N(t) dt = \lim_{T_N \rightarrow 0} \int_{t_1}^{t_2} A(t) M_{TN}(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \lambda A(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} B(t) dt. \quad (7)$$

В целях экспериментальной проверки этого следствия обобщенного закона Тальбота были выполнены специальные опыты.

В одном из опытов в качестве сигнала $A(t)$ использовались шумы произвольно выбранного спектрального состава. Источником шума служил генератор Г2-12 белого шума, спектр которого деформировался до желаемого вида с помощью фильтров. Воспроизведение звучания осуществлялось с помощью телефона ТД-6. На рис. 2, а, б, в изображены диаграммы зависимости уровня спектральной плотности шума от частоты для некоторых из шумов, используемых в экспериментах.

Сигнал $B_N(t)$ формировался с помощью прерывания сигнала $A(t)$ с периодом T и параметром λ . Прерывание производилось

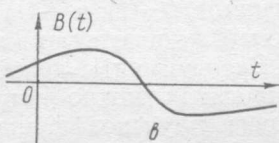
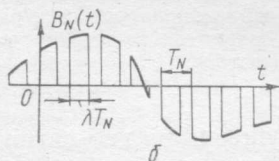
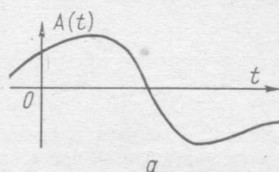


Рис. 1. Диаграммы звукового давления, используемые для демонстрации эффекта сглаживания в слухе: а — исходный; б — прерванный; в — ослабленный сигнал.

специально сконструированной схемой, управляемой прямоугольными импульсами от генератора Г5-6А (рис. 3). Длительность импульса и период следования импульсов измерялись частотным мером — хронометром Ф599 с точностью до 0,1%. Точность дозировки параметра λ составляла величину порядка 0,1%. Сигнал $B(t) = kA(t)$ формировался многооборотным потенциометром ПС-3, обеспечивающим дозировку коэффициента усиления с точностью около 0,3%.

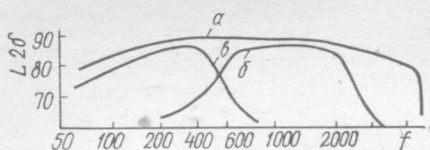


Рис. 2. Спектры шумов, использованных в экспериментах по проверке обобщенного закона Гальбота: 1, 3 — широкополосные спектры; 2 — полосовой спектр низкой частоты; f — частота; L — уровень спектральной плотности.

слушающим эти сигналы, ставилась задача обнаружить факт переключения телефона с одного сигнала на другой. Ощущения сигналов $B_N(t)$ и $B(t)$ будут равны в том случае, когда испытуемый не реагирует на факт переключения.

Эксперименты должны были дать ответ на следующие два вопроса: 1) можно ли при достаточно малом периоде прерывания T , регулируя коэффициент усиления k , достичь равенства ощущений, возбуждаемых сигналами $B_N(t)$ и $B(t)$; 2) если да, то будет ли при этом выполняться равенство $k = \lambda$, как того требует обобщенный закон Гальбота. Ответ на оба вопроса, полученный в результате проведенных экспериментов, оказался положительным.

Опишем подробно один из выполненных опытов. Для опыта взят сигнал $A(t)$ со спектром, указанным на рис. 2, а. Сигнал $B_T(t)$ сформирован по сигналу $A(t)$ при $\lambda = 0,400$. При назначении периода прерывания T в пределах от 100 мсек до 25 мсек сигнал $B_T(t)$ слышится как хлопающий шум, выравнивание его по ощущению с сигналом $B(t) = kA(t)$ невозможно ни при каком значении k , поскольку сигнал $B(t)$ слышится как однородное во времени звучание. При уменьшении T с 25 до 4 мсек хлопание сигнала $B_T(t)$ исчезает, тем не менее испытуемый при любом значении k улавливает момент переключения сигналов, опираясь на некоторое небольшое различие сигналов $B_T(t)$ и $B(t)$ по тону. При T менее 2,5 мсек сигналы $B_T(t)$ и $B(t)$ отличаются своим звучанием лишь по громкости, и существует некоторая зона изменения для коэффициента усиления k , внутри которой сигналы не различаются испытуемым. Уменьшение величины T , осуществлявшееся вплоть до значения 20 мсек, не приводит к какому-либо изменению ощущения сигнала $B_T(t)$, зона неразличения для k остается той же самой.

Вопрос о характере ответов испытуемого при значениях k в окрестности зоны неразличения сигналов $B_N(t)$ и $B(t)$ был изучен особо. В результате была построена диаграмма, изображенная на рис. 4. На этой диаграмме показана вероятность σ обнаружения испытуемым факта переключения сигналов в зави-

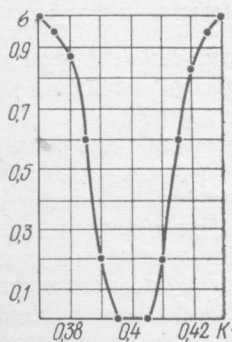
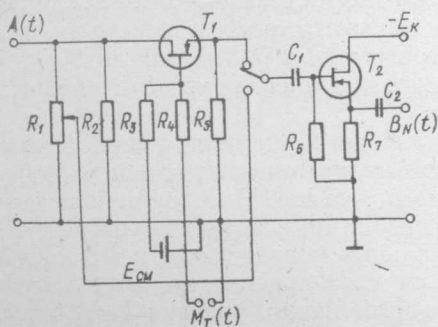


Рис. 3. Схема устройства для формирования прерванного сигнала:

$R_1 = 33 \text{ k}$; $R_2 = 1 \text{ k}$; $R_3 = R_4 = 200 \text{ k}$;
 $R_5 = 51 \text{ k}$; $R_6 = 1 \text{ k}$; $R_7 = 4,7 \text{ k}$; $C_1 =$
 $= 0,1 \text{ мкф}$; $C_2 = 0,15 \text{ мкф}$; T_1 ; T_2 — КП105.

Рис. 4. Зона неразличения прерванного и ослабленного сигналов.

симости от величины коэффициента усиления k . Каждая точка диаграммы построена на базе ста предъявлений сигналов. Как видим, кривая опускается до нулевого значения в окрестности $k = 0,400$, что в точности совпадает со значением λ , принятым в данной серии испытаний. Таким образом, описанный опыт подтверждает справедливость обобщенного закона Тальбота.

Любопытно отметить, что точно такая же кривая $\sigma(k)$ получается, если вместо сигнала $B_N(t)$ взять непрерывный сигнал $B(t)$. Этот факт свидетельствует о том, что ощущение прерванного сигнала $B_N(t)$ идентично ощущению непрерывного сигнала $B(t)$, удовлетворяющего требованию (2) обобщенного закона Тальбота.

Подобные опыты проводились с шумами различного спектра на десяти испытуемых. Громкость звучания варьировалась в пределах от 20 до 90 дб, период прерывания изменялся в пределах от 50 до 2500 мсек, скважность прерывания — в пределах от 1,2 до 25. Ни в одном случае не отмечено каких-либо отклонений от обобщенного закона Тальбота, которые бы выходили за пределы аппаратурных и методических погрешностей эксперимента.

Особо изучался вопрос о критической частоте $n_{кр} = \frac{1}{T_{кр}}$ прерывания шумов, где $T_{кр}$ — максимальный период прерывания

шума, при котором еще достигается полное выравнивание сигналов $B_N(t)$ и $B(t)$. Было установлено, что величина критической частоты резко меняется в зависимости от характера шума. Так, для широкополосных шумов, подобных тем, спектры которых представлены на рис. 2, а, б, $n_{кр}$ колеблется в пределах 0,4—2 кгц. Для узкополосных шумов низкой частоты (рис. 2, в) критическая частота резко возрастает: $n_{кр} \geq 20$ кгц. Отмечается уменьшение критической частоты с ростом громкости шума. Так, при изменении уровня громкости шума от 20 до 90 дб, спектр которого указан на рис. 2 а, критическая частота уменьшается от 2—0,4 кгц.

Опыты с прерыванием звука выполнялись не только с шумами, но также и с периодическими сигналами различной частоты и различного спектрального состава. Производились опыты также и с произвольными сигналами, в качестве которых использовались различные музыкальные произведения и дикторская речь. Во всех без исключения случаях при достаточно высокой частоте прерывания сигнала и выполнении условия $k = \lambda$ наблюдается полное тождество прерванного и непрерывного сигналов. Вместе с тем, достаточно лишь незначительно (на 5%) изменить значение k , и испытуемый легко обнаруживает факт переключения сигналов.

Важно отметить, что в опытах со звуками, содержащими гармонические составляющие, критические частоты резко возрастают и составляют величину порядка $n_{кр} = 30$ кгц. Однако не исключено, что эта величина даже несколько занижена в связи с возможным ослаблением высших звуковых частот телефонами. Таким образом, в этом случае для достижения полного равенства ощущений приходится использовать частоты прерывания, значительно превосходящие верхний предел частот, слышимых человеческим ухом (20 кгц).

В заключение необходимо особо отметить следующие важные обстоятельства, которые, по нашему мнению, надолго задержали открытие эффекта сглаживания в слухе. Закон Тальбота в той традиционной формулировке, которая использовалась на протяжении многих десятилетий в физиологической оптике, будучи применен к слуху, вырождается в бессодержательное утверждение. Несмотря на это, в обобщенной форме закон Тальбота к слуху вполне применим и описывает интересный эффект сглаживания слуховых ощущений.

Как в первоначальной, так и в обобщенной формулировке закона Тальбота для зрения фигурирует не осциллограмма электромагнитных колебаний, а мощность светового стимула, изменяющаяся во времени. Однако попытка сформулировать закон Тальбота для слуха аналогичным образом — в терминах силы звука — терпит фиаско: в такой формулировке закон Тальбота противоречит фактам слуха. Чтобы обобщенный закон Тальбота соответствовал экспериментальным данным, нужно сформу-

лизовать его для осциллограммы звукового давления, а не силы звука.

Наконец, неожиданным оказалось и то, что критические частоты в случае неизмеримо выше, чем в зрении. В наиболее важных для практики случаях эти частоты для слуха примерно в тысячу раз превосходят критические частоты слияния световых мельканий и выходят за пределы частот, слышимых ухом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таббот Н. Ф. Experiments on light. Phil. Mag., 1834, № 5, p. 8—11.
2. Луизов А. В. Инерция зрения. М., Оборонгиз. 1961. 247 с.
3. Шабанов-Кушнаренок Ю. П. Математическое моделирование некоторых функций человеческого зрения. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук, Киев. 45 с.

Поступила 26 марта 1976 г.