УДК 621.396.1

С. А. УСЕНКО

АНАЛИЗ ЩЕЛЧКОВ ВКЛЮЧЕНИЯ

Передача звуковой информации с помощью технических средств играет в наш век огромную и все более возрастающую роль во всех областях социальной и общественной жизни. Круг применяемых ныне технических устройств, предназначенных для приема, обработки, консервации и передачи звука, поистине необъятен. Однако каковы бы ни были эти устройства (обычный телефон или сложнейший многоканальный звукотехнический комплекс), монопольным потребителем поставляемой ими продукции является орган слуха человека. Поэтому разработка, проектирование, исследование и эксплуатация любых звуковых и радиотехнических устройств и приборов должна обеспечивать не наилучшее их функционирование вообще, а применительно к свойствам слухового аппарата человека.

Слух человека способен различать тончайшие нюансы звучаний, оценивать различия и искажения, далеко не достигающие величин, поддающихся инструментальной индикации. В этих условиях для прогнозирования ощущений, возникающих у слушателей при различных видах звуковых раздражений, обязательно нужно хорошо знать основные свойства слухового аппарата. В настоящее время известно множество методик для исследования слуха. Все они, как правило, предъявляют определенные требования к физическим параметрам стимулов.

Существуют приборы, позволяющие в широких пределах изменять длительность сигнала, уровень звукового давления, длительность паузы между звуками, если предъявляется пара сигналов. В последнее время приборы, используемые в биакустических экспериментах, позволяют изменять еще один параметр, имеющий отношение к так называемым «щелчкам включения». Щелчок исследовал еще Штойдель в 1933 г. Он установил, что субъективная громкость щелчка зависит от формы нарастания и спадания звукового давления. В связи с этим во многих экспериментальных установках имеется возможность изменять форму переднего и заднего фронтов звуковых посылок. Предложены электронные ключи, в которых форма фронтов звуковой посылки изменяется по экспоненциальному закону. Описаны переключательные схемы, формирующие пилообразную форму фронтов. Известны эксперименты с предъявлением испытуемому звуковых сигналов, промодулированных по амплитуде кривой Гаусса. Отмечено влияние на громкость щелчков начальной фазы включения чистого синусоидального тона.

В настоящее время создан прибор, позволяющий включать синусоидальный сигнал с нулевой начальной фазой. Включение чистого тона с любой другой начальной фазой увеличивало громкость щелчков.

Анализируя изложенное, можно сделать следующий вывод: существует много вариантов уменьшения субъективной громкости щелчков включения, но должен быть наиболее оптимальный вариант, который позволит, очевидно, при незначительной длительности фронтов значительно, уменьшить громкость щелчков. Поиск оптимального фронта имеет большое практическое значение, так как чрезмерное увеличение длительности фронтов затрудняет расчет звуковой энергии в посылке, осложняет определение длительности коротких импульсов и т. д. Наша работа посвящена поиску оптимального фронта. Сначала выясним подробно процесс возникновения щелчков.

Рассмотрим включение чистого синусоидального тона нулевой начальной фазой:

$$f(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ \sin\Omega t & t\geqslant 0\end{cases}. \qquad (1)$$

Текущий спектр такой синусоиды равен [1]:

$$S_t=\int\limits_0^t e^{-j\omega t}\sin\Omega t(dt)=\frac{\Omega}{\Omega^2-\omega^2}\left[1-e^{-j\omega t}\left(\cos\Omega t+j\frac{\omega}{\Omega}\sin\Omega t\right)\right]. \qquad (2)$$

Если рассматривать значения спектральной плотности для дискретных моментов времени $t=n\frac{\pi}{\Omega}$, где n — число полупериодов синусоиды с момента включения, формула (2) значительно упрощается. В этом случае модуль спектра определяется следующим образом:

$$\Phi_t=\left|S_t\right|=\frac{2}{\Omega}\left|\frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2}\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\, n\frac{\pi}{2}\frac{\omega}{\Omega}\right|. \qquad (3)$$

Здесь знак sin относится к четному n, а знак cos — к нечетному n. При $\omega=\Omega$, $\Phi_t\frac{1}{4}nT$, где $T=\frac{2\pi}{\Omega}$ — период синусоиды.

В первые моменты времени текущий спектр такого сигнала однороден. Затем постепенно на несущей частоте формируется максимум, который с течением времени все более и более заостряется. Очевидно, что полезная информация содержится в областях спектра, непосредственно примыкающих к максимуму. Все остальное — сопутствующие шумы, интенсивностью которых и определяется громкость щелчка включения. В течение длительности промежутка времени, начиная с момента включения чистого тона, шумы составляют весовую часть всей энергии сигнала.

Таким образом, задачу уменьшения громкости щелчков можно свести к задаче снижения энергии шумов, так как последние всегда присутствуют при включении звука. Говорить о полной ликвидации щелчков можно лишь в том случае, если имеется в виду понижение интенсивности шумов за порог слышимости.

Рассмотрим теперь выключение чистого синусоидального тона при нулевой фазе. Пусть функция имеет вид

$$f(t)=\begin{cases}\sin\Omega t & t<0\\ 0 & t>0.\end{cases} \qquad (4)$$

Известно, что сознание человека учитывает прошлое реального процесса с некоторым забыванием. Основное внимание концентрируется на событиях, происходящих в данный момент времени.

Учитывая это, будем пользоваться мгновенным спектром сигнала (4), который отличается тем, что в подынтегральное выражение вводится весовая функция

$$r(x) = e^{\alpha x} \sigma(x), \tag{5}$$

где

$$\sigma(x) = \begin{cases} 1 \text{ при } x \leqslant 0 \\ 0 \text{ при } x > 0 \end{cases}.$$

Эта функция учитывает прошлое процесса с весом, экспоненциально убывающим по мере удаления от настоящего момента, и характеризует затухание в реальных фильтрах с постоянным временем $\frac{1}{2}$. При анализе щелчка включения следует пользоваться мгновенным спектром сигнала (1). Но так как нас интересовало поведение спектральной функции в течение сравнительно незначительного промежутка времени, начиная с момента включения, можно без особого ущерба заменить мгновенный спектр текущим. Мгновенный спектр функции (4) определяем следующим образом:

$$S(\omega, t) = \int_{-\infty}^{0} e^{\alpha(\tau - t)} e^{-j\omega\tau} \sin \Omega t \, d\tau = e^{-\alpha t} \frac{\Omega}{\omega^2 - \Omega^2 - \alpha^2 + 2j\alpha\omega}.$$

Модуль спектра данной функции равен

$$\Phi = \frac{1}{\Omega \sqrt{x^2 + A^2 + 1)^2 - 4x^2}} \; e^{-2\pi a \frac{t}{T}}. \tag{6}$$

Здесь $x = \frac{\omega}{\Omega}$, $A = \frac{\alpha}{\Omega}$, $T = \frac{2\pi}{\Omega}$.

Несложный анализ показывает, что функция (6) определена при всех значениях переменных, за исключением $x = 1$ при $A = 0$.

Как следует из (6), характер кривых, описываемых этой формулой, с течением времени не меняется. Это означает, что в данной ситуации щелчок не возникает. Действительно, аналогично включается белый шум: здесь также, начиная с момента включения, форма кривой спектральной плотности не изменяется во времени, и щелчки не обнаруживаются. Поскольку из психоакустических экспериментов достоверно известно, что выключение чистого тона сопровождается щелчком, который практически не отличается от щелчка при включении этого сигнала, напрашивается следующее предположение: в слуховой системе человека спектральный анализ осуществляется с весовой функцией $\rho(x) = \sigma(x) + \Delta t) - \sigma(x)$,

где

$$\sigma(x) = \begin{cases} 0 \text{ при } x < 0 \\ 1 \text{ при } x > 0 \end{cases}. \tag{7}$$

т. е. мгновенный спектр чистого тона определяется как спектр отрезка синусоиды длительностью Δt, непосредственно предшествующего данному моменту времени.

Тогда для функции (4) получаем

$$S_t(\omega t) = \int\limits_{t-\Delta t}^{0} \rho(\tau - t)\, e^{-j\omega\tau} \sin \Omega\tau d\tau \quad \text{или}$$

$$S_\rho(\omega t) = \begin{cases} \int\limits_{t-\Delta t}^{0} e^{-j\omega\tau} \sin \Omega\tau\, d\tau & \text{при } 0 \leqslant t \leqslant \Delta t \\ 0 & \text{при } t > \Delta t. \end{cases}$$

Для упрощения примем $\Delta t = \frac{T}{2}k$, $t = \frac{T}{2}n$. В этом случае спектральная плотность определяется формулой

$$S_\rho(\omega t) = \begin{cases} \frac{\Omega}{\omega^2 - \Omega^2} \left[1 - (-1)^{nk} e^{-j\frac{\pi\omega}{\Omega}(n-k)} \right] & \text{при } 0 \leqslant n \leqslant k \\ 0 & \text{при } n > k. \end{cases}$$

Модуль спектра равен

$$\Phi_\rho(\omega t) = \begin{cases} \frac{2}{\Omega} \left| \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2} \begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix} \frac{\pi\omega}{2\Omega}(n-k) \right| & \text{при } 0 \leqslant k \\ 0 & \text{при } n > 0. \end{cases} \tag{8}$$

Как видим, формулы (3) и (8) почти не отличаются друг от друга. Отсюда следует, что если принять весовую функцию вида (7), причина появления щелчков как при включении, так и при выключении чистого синусоидального тона одна и та же: наличие сопутствующих шумов. В связи с этим в дальнейшем будем рассматривать только щелчки включения.

Итак, мы рассмотрели причины появления щелков при включении чистого тона. Выясним теперь влияние начальной фазы на громкость щелчков включения чистого тона:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ \sin(\Omega t + \varphi) & \text{при } t \geqslant 0. \end{cases} \tag{9}$$

Для функции (9) с течением времени текущий спектр все плотнее заполняет пространство между осью частот и кривой:

$$\psi_\varphi(\omega) = \frac{2}{\Omega|A|} \sqrt{1 - A\sin^2\varphi}, \tag{10}$$

где $A = 1 - \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2$.

Из семейства кривых (10) наиболее отличаются спектры синусоидального ($\varphi = 0$) и косинусоидального ($\varphi = 90°$) сигналов. В области низких частот ($\omega < \Omega$) — наоборот.

Так как полные энергии косинусоидальный и синусоидальный сигналы за одинаковое число периодов совпадают, то изменение начальной фазы ведет к перемещению энергии из одной области частот в другую.

Слух обладает наибольшей чувствительностью в области, лежащей несколько выше средних частот ($2\div3$ *кгц*). Поэтому начальная фаза включения сигнала влияет на громкость щелчка, если значение приходится на низкие частоты. Подбором нулевой фазы можно уменьшить сопутствующие шумы в области частот соответствующей максимальной чувствительности слуха.

Если значение Ω приходится на область частот 2—3 *кгц*, начальная фаза практически не влияет на громкость щелчка. И, наконец, когда несущая находится в высокочастотной области, оптимальной фазой будет значение 90°. При этом повышается уровень шумов за верхней границей звукового диапазона. Таким образом, при включении чистого тона не всегда подбор нулевой фазы ведет к ослаблению щелчка. Кроме того, этот способ не годится, если прослушивается созвучие, т. е. сигнал, который состоит из нескольких гармонических составляющих.

Гораздо лучше обстоит дело с изменением формы нарастания и спада звукового давления. Будем искать форму оптимального фронта исходя из требования минимальности энергии сопутствующих шумов.

Рассмотрим следующую задачу. Необходимо включить синусоидальный сигнал на временном интервале $0\div1$.

Пусть $F_t=f_t\sin(\Omega t+\varphi)$, где $f_t=0$ при $0\geqslant t\geqslant 1$ и $f_t>0$ при $0<t<1$.

Функцию f_t надо подобрать так, чтобы шумы были минимальны. Требование минимальности энергии шумов в общем случае эквивалентно требованию минимальности ширины спектра сигнала F_t. При этом имеются две функции с одинаковой шириной спектра, предпочтение следует отдать той, которая имеет меньшую длительность Δt. Поэтому требование минимальности энергии шумов можно заменить требованием минимальности произведения $\Delta f\Delta t$ для функции F_t. В дальнейшем ограничим множество звуковых сигналов условием $\Omega\gg2\pi$, т. е. длительность звуковой посылки значительно больше периода повторения несущего сигнала. В этом случае длительности функции F_t и f_t практически совпадают. Сигнал $F(t)$ представляет собой балансно-модулированное колебание, его спектр вдвое шире спектра функции f_t. Учитывая это, достаточно найти функцию f_t с минимально возможным произведением $\Delta f\Delta t$.

В работе [1] проанализированы спектры некоторых функций. Мы несколько расширили класс исследуемых сигналов и провели расчеты на ЭЦВМ. Первоначально для вычисления $\Delta f\Delta t$ использовались понятия эквивалентной длительности и ширины спектра. Под эквивалентной длительностью понимается промежуток времени, в котором сосредоточена часть энергии сигнала (например, $k=0{,}9$). Аналогично вводится понятие эквивалентной ширины спектра. Однако предварительные расчеты показали ненадежность этих определений. Оказалось, что степень предпочтения одного сигнала перед другим может зависеть от выбора коэффициента k. Поэтому окончательные вычисления производились по другому, более острому критерию, предложенному в [1]. Новые определения длительности и ширины спектра основаны на применении понятия о моментах функции. Результаты расчетов сведены в таблицу. Два сигнала из пяти, приведенных в таблице, рассматриваются впервые.

В начале статьи отмечалось, что в некоторых приборах фронт звуковых посылок изменяется по экспоненциальному закону. Так как экспоненциальные сигналы бесконечны во времени, было решено синтезировать сигнал подобной формы, но конечной длительности. Такой импульс был назван квазиэкспоненциальным. Квазиколокольный импульс представляет собой один период синусоиды, смещенной отосительно временной оси.

Форма импульса	$\Delta f \Delta t$
Треугольный	0,05991
Квазиэкспоненциальный	0,05347
Косинусоидальный	0,5731
Квазиколокольный	0,4828
Колокольный	0,04797

Как видно из таблицы, лучшие значения произведения $\Delta f \Delta t$ у квазиколокольного и колокольного сигналов. Теоретически возможный минимум равен 0,04594. Колокольный сигнал имеет несколько лучшее $\Delta f \Delta t$, однако, учитывая бесконечную протяженность во времени этого импульса, можно считать оптимальной формой фронта для звуковых посылок полупериод синусоидального сигнала, смещенного относительно временной оси на величину, равную максимальной амплитуде синусоиды.

В работе [2] описана структура, реализующая подобные сигналы. Психоакустические эксперименты, проведенные на испытуемых при помощи этой аппаратуры, подтвердили отсутствие щелчка при прослушивании данных сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М., «Наука», 1962. 234 с.
2. Еремин Г. С. Об одном способе исследования слуха. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, 1972, с. 3—9.