

**Основы психоакустики. Часть 5**  
**Бинауральный слух (продолжение)**

Ирина Алдошина

Как уже было отмечено в предыдущей статье, кроме эффектов пространственной локализации, наличие бинаурального слуха, то есть двух слуховых приемников, обеспечивает целый ряд других преимуществ в получении и переработке слуховой информации.

К их числу можно отнести: бинауральную чувствительность и суммацию громкости, бинауральные слияния звукового образа и биения, эффект предшествования, бинауральную маскировку и демаскировку, эффекты "правого" и "левого" уха при восприятии речи и музыки и др.

Каждое из этих свойств слуха имеет огромное значение для восприятия окружающего нас звукового пространства и все в большей степени используется в современных звуковых технологиях записи, передачи и воспроизведения, особенно с помощью быстро развивающихся компьютерных методов обработки звука.

Остановимся в данной статье на первых трех свойствах бинаурального слуха, поскольку анализ двух последних требует дополнительных сведений о законах маскировки (на которых постараемся остановиться в дальнейшем).

**Суммация звуков при бинауральном слухе**

Анализ порогов слышимости, выполненный при моноуральном слушании и при бинауральном показал, что уровень слуховых порогов при бинауральном восприятии сигналов (синус, речь, шум, музыка) ниже, чем при моноуральном. Интенсивность звука для достижения порога слышимости при восприятии звука двумя слуховыми приемниками ниже на 3 дБ, то есть нужно создать в два раза больше акустическую мощность, чтобы звуковой сигнал, находящийся на пороге слышимости при прослушивании бинаурально, услышать при переходе на моноуральное прослушивание (одним ухом).

Таким образом, наличие двух слуховых приемников позволяет услышать значительно более тихие звуки, что имеет существенное значение для оценки окружающего звукового пространства.

Бинауральная суммация громкости проявляется в том, что, как показали эксперименты Флетчера, сигнал при заданном уровне громкости, например, 70 дБ, будет звучать в два раза громче, если он подается на два уха, чем на одно, то есть громкость удваивается (суммируется).

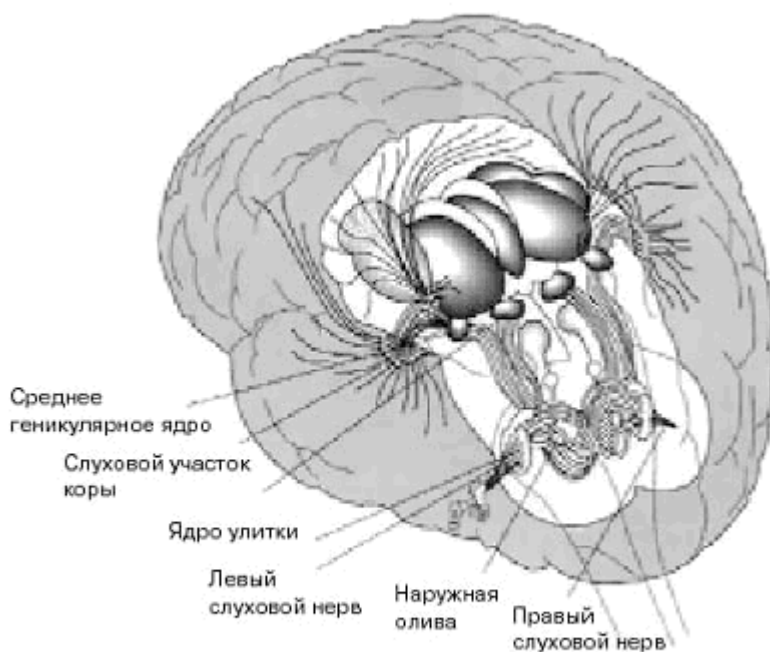
Построенные на разных частотах кривые зависимости оцененной громкости (сон) от уровня подаваемого сигнала показали, что по мере повышения уровня подаваемого сигнала преимущества бинаурального слуха возрастают: при уровне сигнала ниже 35 дБ, чтобы звуки были равногромкими при моно- и бинауральном слушании, подаваемый на два уха сигнал может быть на 3 дБ ниже по интенсивности. При уровне выше 35 дБ эта разница увеличивается, и остается примерно постоянной при дальнейшем увеличении уровня подводимого сигнала.

Дифференциальная чувствительность (то есть способность замечать различия в звуках, как по частоте, так и по интенсивности), как показали многочисленные эксперименты, при бинауральном слушании выше, чем при моноуральном.

Результаты, полученные в различных исследованиях, позволяют считать, что при бинауральном слушании дифференциальная чувствительность по интенсивности выше в 1,65 раза, по частоте выше в 1,44 раза.

Таким образом, наличие двух слуховых приемников позволяет услышать более тонкое

различие звуков по высоте и по громкости, что имеет принципиально важное значение как для аудиотехники, так и для восприятия музыки.



*Слуховой путь головного мозга*

### **Бинауральное слияние звуков и биения**

Несмотря на то, что в обычных условиях в оба уха звуки поступают с определенным различием во времени, по интенсивности и спектру, мы воспринимаем один слуховой образ. Мы воспринимаем один мир двумя ушами. Точнее, в оба уха поступают подобные, но не идентичные звуки, сливающиеся в единый образ. Этот процесс носит название бинаурального слияния.

Слуховая система воспроизводит бинауральное слияние в течение всего времени подачи в оба уха звуков, сходных в определенном отношении (однако совершенно разные звуки не сливаются).

Наиболее важным для бинаурального слияния являются звуки с частотой ниже 1500 Гц. Эксперименты показали, что если подавать через наушники два высокочастотных звука с разными частотами, то они воспринимаются как отдельные звуковые сигналы, однако если эти сигналы промодулировать каким-либо низкочастотным звуком, то оба сигнала сливаются в единый слуховой образ.

Полученный результат свидетельствует о том, что для бинаурального слияния слуховая система использует низкочастотную огибающую комплексного звука (его макроструктуру), несмотря на то, что детали составляющих комплексного звука (его микроструктура) различны.

Бинауральное слияние речи, например, выявляется, когда в одно ухо поступают только высокочастотные компоненты речевого звука, а в другое - только низкочастотные. Несмотря на то, что ни одно ухо не получает достаточной информации для распознавания речевого сигнала, получаемый в результате бинаурального слияния слуховой образ позволяет понять речь.

Бинауральное слияние может быть показано на эффекте "пропущенной фундаментальной" (о

котором мы говорили в первой статье). При бинауральном прослушивании он может иметь место даже в том случае, если мы на одно ухо подаем четные гармоники: 200 Гц, 400 Гц, 600 Гц..., а на другое - нечетные: 300, 500, 700..., все равно будет идентифицироваться одна высота основного тона (в данном случае соответствующая 100 Гц).

Механизм бинаурального слияния звуков описан в виде математической модели, которая основывается на поиске центральной слуховой нервной системой перекрестных корреляций между звуковыми сигналами в обоих ушах. Другими словами, звуки, поступающие в уши, рассматриваются как статистические события, а механизм бинаурального слияния использует поиск общности между ними. Этот же процесс позволяет выделять периодические компоненты сигналов из шума, что важно для расширения динамического диапазона воспринимаемых звуковых сигналов при бинауральном слушании.

Когда один тон подается в правое ухо, а другой, незначительно отличающийся по частоте, - в левое, в слившемся слуховом образе воспринимаются биения, которые лежат в основе определения консонансных и диссонансных интервалов звуков. Интересная особенность бинауральных биений состоит в том, что они проявляются при полной акустической изоляции обоих звуков, поступающих в левое и правое уши. Очевидно, бинауральные биения возникают в определенном месте центральной нервной системы при взаимодействии нейронной активности, кодирующей поступающие в оба уха звуки. Нейроны, дающие ответную реакцию на огибающую бинауральных биений, обнаружены в нижних отделах головного мозга (на рисунке Superior olive (B)).

Бинауральные биения отличаются от моноуральных некоторыми особенностями: в то время как моноуральные биения могут быть слышимы при взаимодействии тонов всего воспринимаемого диапазона частот, бинауральные биения связаны с низкими частотами, и наибольшие бинауральные биения воспроизводятся при взаимодействии звуков с частотой от 300 до 600 Гц. Кроме того, бинауральные биения воспринимаются при существенной разнице в интенсивности между звуками, подаваемыми в оба уха, даже в случае, когда один из звуков подается на подпороговом уровне его интенсивности. Как уже было показано в предыдущей статье, биения возникают, когда разность частот обоих подаваемых звуков находится в пределах до 15 Гц.

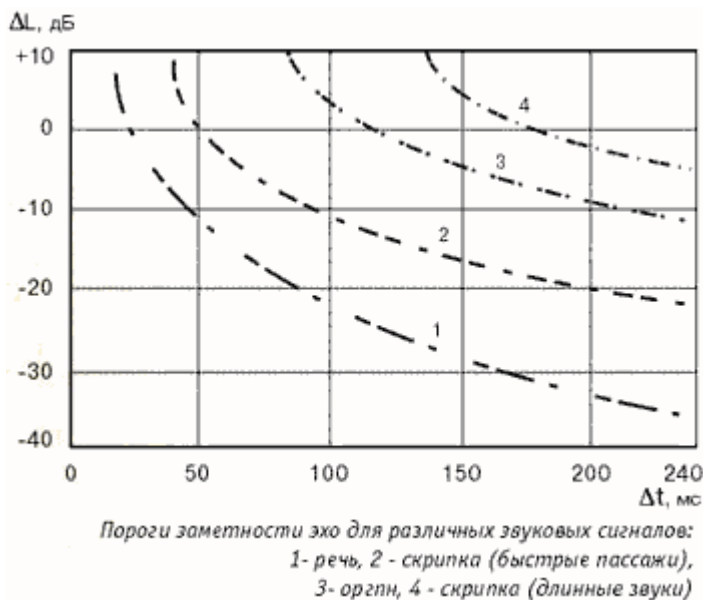
Неожиданное применение нашла способность слуха различать бинауральные биения в создании так называемых "генераторов мозговых волн" (brain wave generator). Если подобрать разность частот двух сигналов поступающих в оба уха через наушники, совпадающих с альфа-, бета- и другими ритмами мозга, то можно, по мнению авторов, улучшить сон, память и др. (подробнее об этом можно узнать в Интернете <http://www.bwgen.com>).

### **Эффект предшествования (эффект Хааса)**

Анализ этой проблемы - одна из старейших тем в исследованиях бинаурального слуха. Эффект предшествования впервые детально описан в 1949 г., хотя о нем было известно и раньше.

В общем виде эффект предшествования заключается в том, что в пределах определенного отрезка времени ранее поступивший звуковой сигнал (фронт звуковой волны) доминирует в слуховом восприятии над звуками, поступившими позднее (эхо).

Рассмотрим, например, ситуацию, когда две акустические системы воспроизводят одинаковый сигнал одного уровня. Если слушатель находится на определенном расстоянии от них на средней линии, то в этом случае звук исходит из мнимого источника, находящегося между



собственно слуховая система продолжает его слышать. Однако звук, приходящий от второй акустической системы, создает определенные ощущения объема.

При дальнейшем увеличении задержки от 30 до 50 мс, слушатель ощущает, что звук идет и из второй системы, хотя локализация продолжает идти на первую. Только при задержке более ~50 мс (это зависит от характера сигнала - речь, музыка и др.), ощущается звук второй системы, как эхо.

Разумеется, эти эффекты зависят от соотношения интенсивностей сигналов, от степени их подобия и их спектрального состава.

Это свойство бинауральной слуховой системы имеет огромное значение для оценки акустики помещения. В любом помещении слушатель воспринимает прямой звук от источника сигнала (певца, музыканта, лектора и др.) и отраженные звуки от стен помещения. Отраженные звуки поступят в уши позже, и будут иметь другое направление, чем прямой звук. Источник звука в этом случае локализуется по направлению прямого звука, а не отраженного. Хотя отраженные звуки и будут окрашивать, качественно изменять слышимый звук, восприниматься будет только ранее прибывший прямой звук. Сказанное применимо к отраженным звукам, поступившим только в определенном отрезке времени после поступления прямого звука.

В реверберационном процессе можно выделить два отрезка - "ранние" дискретные отражения до 80 мс (в зависимости от типа помещения), и "поздние" отражения со временем запаздывания больше 80 мс. Эффект предшествования подавляет ранние отраженные звуки, они интегрируются с прямым звуком в единый слуховой образ, сохраняя локализацию на источник прямого звука. Однако отраженные звуки вносят свою окраску в воспринимаемый звук, они несут информацию о пространственности, интимности, ясности и других субъективных параметрах, играющих решающую роль в оценке качества звучания в помещениях. Это показали работы известного акустика Беранека, выполненные им на протяжении многих лет в лучших залах мира. Отраженные звуки имеют важное значение для определения разборчивости речи в помещениях.

Отраженные сигналы в помещении могут восприниматься и как отдельные повторяющиеся сигналы - эхо, при этом уровень их осознанного восприятия зависит от времени задержки, соотношения их интенсивностей с прямым звуком, спектрального состава сигнала, степени заполнения паузы между приходом отраженных сигналов и др. Наличие эхо-сигналов в

ними. Однако, если ввести задержку во вторую акустическую систему, то звук начнет перемещаться в сторону первой акустической системы. Как показал Хаас, при изменении задержки от 0 до 10 мс мнимый источник переместится и совпадет с первой акустической системой. При изменении задержки на второй акустической системе от 10 до 30 мс, звук будет казаться исходящим только из первой акустической системы (хотя вторая система будет продолжать воспроизводить звук той же интенсивности), то есть локализация будет производиться только по опережающему сигналу - в этом и состоит эффект Хааса. Звук второй системы как бы подавляется мозгом, хотя

помещении оказывает отрицательное влияние на качество звучания музыки и разборчивость речи. Взаимосвязь порогов заметности эха от времени запаздывания и интенсивности отраженных звуков для разных сигналов (речи, скрипки, органа) показана на графике.

Наиболее низкими пороги оказываются для речи: чтобы отраженные сигналы не ухудшали разборчивость речи, необходимо, чтобы при задержке 50 мс они были ниже по уровню основного сигнала на -10 дБ, при 100 мс на -20 дБ и т.д., поэтому для повышения разборчивости речи необходимо обеспечивать высокий уровень прямого звука. Существенное влияние на пороги заметности эха оказывает спектр запаздывающих сигналов: исследования показали, что порог эха при высокочастотных сигналах ниже, чем при низкочастотных. При высокочастотных шумах, а еще в большей степени при высокочастотных импульсах, направление прихода звука распознается по бинауральной разности времени. В таких случаях (начиная с частоты 1,6 кГц) сравниваются, по-видимому, изменения огибающих сигнала за малые интервалы времени.

Наконец, влияние на пороги заметности эха оказывает направление прихода отраженных звуков: оценка мешающего влияния отраженных сигналов на речевой сигнал показала, что при боковом падении звука порог эха на 5 дБ ниже чем при фронтальном. Все эти данные особенно важно учитывать при построении систем звукоусиления, т.к. иначе это может привести к появлению сильных эхо-сигналов и потере разборчивости речи.

В помещениях, не имеющих сильных концентраций отражений, правильная локализация на источник звука благодаря действию эффекта предшествования сохраняется, даже когда энергия отражений превышает энергию прямого звука (до определенных пределов ~10дБ). Появление мешающего эха следует рассматривать как границу возможностей использования эффекта предшествования (первой волны).

В 1987 г. были опубликованы исследования Клифтона, который показал, что этот эффект является динамическим, и требует определенного времени для "обучения" слуховой системы: если в заглушенной камере установить два громкоговорителя и подать на них два коротких импульса, следующих друг за другом, то в первый момент времени слушатель воспринимает их как отдельные щелчки, затем (при повторении их со скважностью 10-12 периодов в секунду), восприятие второго импульса ослабевает и становится слышен только один импульс от первого громкоговорителя, а второй добавляет только некоторую объемность. Интересно, что если сделать небольшую паузу и повторить эксперимент, то слушатель сразу слышит один звуковой образ от первого громкоговорителя. Можно предположить, что слуховая система за период "обучения" строит определенную модель акустического пространства, создавая таким образом основу для распознавания прямых звуков от их отражений. Задача создания модели (образа) акустического пространства - важная работа, выполняемая высшими отделами нервной системы.

Все эти свойства бинауральной слуховой системы (пространственная локализация, слияние слухового образа, эффект предшествования и др.), используются в настоящее время в развитии мощной индустрии "бинауральных технологий", включающих в себя создание программно-аппаратных средств, новых приборов, технологий звукозаписи и др. К числу наиболее эффективно развивающихся технологий в настоящее время можно отнести создание трехмерных виртуальных звуковых пространств (т.н. "аурализация", бинауральная стереофония, адаптивные процессоры и др.). Основные принципы их создания мы постараемся изложить в следующих публикациях.