

"Теперь послушайте это".

Наши уши - это самая сложная и самая ценная звуковая аппаратура из той, что у нас есть, была или будет. Джим Лесёрф обсуждает тонкости человеческого слуха.

Две недавние разработки в аудио – супертвитеры и «апсэмплинг» в ЦАП-ах вызвали противоречивую реакцию из-за того, что не очень понятно, как они могут иметь слышимый эффект. Разумеется, такого рода разногласия бывали и раньше. Десятилетиями шли (и продолжают идти) споры о том, почему часть людей предпочитает ламповые усилители или что звучит лучше – винил или компакт диск?

Хорошо, с одной стороны, возможно, что те различия, о которых некоторые люди говорят, что они их слышат, на самом деле не существуют. Может быть, они только мерещатся этим людям. С другой стороны, так же возможно, что хотя бы часть этих различий реальны. Но если это так, то как мы можем объяснить их? Похоже, что существует конфликт между так называемым «традиционным» взглядом на то, какой должна быть хорошая аудио система, и тем, что многие люди предпочитают на самом деле. Может ли причиной для этого разногласия быть тот факт, что человеческий слух много страннее, чем предполагают люди, занимающиеся Хай-Фай? Возможно ли, что некоторые вещи, которые мы считаем неслышимыми, на самом деле слышны? Возможно ли, что технические недостатки виниловых пластинок и ламповых усилителей с неглубокой обратной связью изменяют звук таким образом, что изменяется наша способность слышать и получать удовольствие от музыки?

Ища ответы на подобные вопросы, стоит взглянуть на новейшие достижения в области изучения человеческого слуха. Результат этого может оказаться неожиданным.

На рисунке 1 показана упрощённая схема физического устройства человеческого уха. Оно состоит из нескольких основных частей. Звуковые волны входят в ушной канал, достигают барабанной перепонки (тонкой перегородки закрывающей среднее ухо) и приводят её в движение. Колебания перепонки передаются во внутреннее ухо набором миниатюрных слуховых косточек, работающих как своего рода механический трансформатор. Эти косточки приводят в движение структуры внутреннего уха, передавая звуковые колебания через ещё одну перепонку в улитку, представляющую из себя длинную трубку. Эта трубка на самом деле свёрнута в спираль, но для простоты я изобразил её на рисунке выпрямленной.

Вдоль всей длины трубка улитки поделена тонкой мембраной пополам. Разделы трубки заполнены жидкостью. На поверхности мембраны находится большое количество слуховых волосков. Эти волоски являются датчиками, которые превращают вибрации в нервные сигналы, поступающие затем в мозг. Звуковые колебания двигают мембрану, раскачивают волосики и производят серию нервных импульсов. В результате мы слышим музыку, речь и т.п. после того, как наш мозг проанализирует нервные импульсы, полученные от этой системы слуховых волосков.

Традиционное представление сводится к тому, что мембрана и волосики работают подобно арфе. Волосики изменяются в размере вдоль мембраны. В одном конце улитки волосики крупнее и резонируют на низких частотах, так же как длинные и более тяжелые струны на арфе. По мере того, как мы двигаемся вдоль улитки, размеры волосиков изменяются и они реагируют на разные частоты. В результате мы можем слышать, какие частоты присутствуют в звуковой волне, если наш мозг получает сигналы от тех или иных волосиков. Наша способность отличать одну частоту от другой улучшается ещё и из-за того, что высокие частоты проникают в улитку только на небольшое расстояние. Низкие частоты проходят далеко в глубь улитки, тогда как высокие воздействуют только на самое её начало. Чем выше частота, тем меньше колеблющаяся часть мембраны в улитке.

Новый подход.

Рисунок 1 и описание, которое я привёл выше – это заметно упрощённая картина традиционного подхода и я опустил ряд деталей. Тем не менее, мне кажется, что большинство людей в области аудио представляют себе работу слуха примерно так, как я её описал.

Подвох здесь состоит в том, что к настоящему времени существует заметное количество экспериментальных данных, показывающих, что традиционный подход не может объяснить многое из того, что мы знаем о свойствах слуха человека. Здесь я коротко затрону только три примера – 1) тона биений, 2) диапазон интенсивностей слышимого звука и 3) звуковое излучение из ушей (называемое также отоакустическим излучением).

Возникновение тонов биений – это хорошо известный феномен, который использовался на практике, например, строителями церковных органов. При извлечении звука на двух выбранных частотах, этот эффект приводит к тому, что слушатель воспринимает ноту на совсем другой частоте. Это позволяет конструктору органа создавать звук самых низких тонов, не применяя труб очень большой длины, настроенных на эти частоты. Любопытный момент здесь тот, что созданная звуковая волна в воздухе не содержит той частоты, которую ощущает слушатель! Из этого можно заключить, что человеческое ухо имеет определённую нелинейность, «смешивающую» частоты, которые есть в реальности, создавая ощущение тона, который не присутствует на самом деле.

Самые громкие звуки, которые человек может выдержать, слушая, примерно в миллион миллионов раз (120 дБ) мощнее самых тихих звуков, которые мы можем едва услышать. В простой линейной системе амплитуда вибраций,

произведённых звуком, должна быть пропорциональна квадратному корню из мощности. Увеличение мощности в 100 раз (20 дБ) должно приводить к вибрациям в десять раз большего размаха. Поэтому мы можем ожидать, что изменение уровня мощности на 120 дБ приведёт к изменению амплитуды колебаний в миллион раз. Но если мы согласимся, что это правило работает, то мы натываемся на загадку.

Предположим, что самый тихий звук, который мы можем слышать, приводит к перемещению звуковых волосков на 1 микрон – 1 миллионную долю метра. Тогда увеличение мощности на 120 дБ должно привести к колебаниям амплитудой в 1 метр. Безусловно, это невозможно, так как тогда наши уши выпрыгнули бы из головы!

С другой стороны, если мы предположим, что самые громкие звуки двигают волоски на разумное расстояние, скажем 1 миллиметр, то в этом случае самые тихие звуки должны двигать их всего на один нанометр – одну миллиардную метра, то есть примерно на десять размеров типичного атома. Это настолько маленькое движение, что странно, как мы можем его почувствовать. Диапазон амплитуды движения от самых тихих до самых громких звуков таков, что трудно поверить, как наши уши могут функционировать во всём этом диапазоне. Тем не менее это так и люди слышат звуки в диапазоне мощности 120 дБ.

Похоже, что мы можем разрешить эту загадку, изменив одно из упрощённых предположений, сделанных раньше. Чтобы понять, в чём дело, давайте рассмотрим третий и наиболее поразительный пример, а именно отоакустическое излучение. Это относится к способности наших ушей производить звуки. Мы обычно думаем о наших ушах как о пассивных приёмниках, вроде микрофонов, но несколько десятилетий назад было открыто, что наши уши могут излучать звуки, а не только воспринимать их. Физиологи теперь могут помещать микрофоны и датчики движения внутрь уха и фиксировать вибрации, произведённые самим ухом. Это используется для диагностики потери слуха от травм и возраста.

Недавние исследования уха привели к современному пониманию слуха как физически активного процесса. Пучки слуховых волосков в наших ушах соединены с микроскопическими стимуляторами, которые своими усилиями пытаются раскачивать волоски вплоть до колебаний. В нормальных обстоятельствах приложенные усилия слишком малы для того, чтобы произвести заметную вибрацию. Но величина этого усилия зависит от движения самих волосков. В результате мы имеем активную приёмную систему, с локальной обратной связью. В здоровом ухе каждый датчик (пучок волосков) находится на самой грани перехода в самопроизвольные колебания. В этой ситуации приложенное усилие позволяет волоскам легче двигаться под воздействием слабого звука, как бы помогая им колебаться. В электронике такого рода поведение знакомо инженерам как форма положительной обратной связи. Более того, в ранних радиоприёмниках иногда использовали именно такой способ для получения очень большого коэффициента усиления от всего одной лампы, хотя недостатком такого способа была тенденция такого приёмника превращаться в генератор колебаний при потере контроля.

Чувствительность слуховых волосков к внешнему звуку будет зависеть от того, насколько велико это дополнительное усилие, приложенное к ним внутренними стимуляторами. Эксперименты, проведенные в течение последних двух десятилетий, показали, что ухо быстро регулирует величину этого дополнительного усилия для каждого отдельного пучка слуховых волосков в зависимости от громкости воспринимаемого звука. Когда уровень звука небольшой, усилие велико и чувствительность высока. Поэтому для тихих звуков очень небольшой мощности достаточно для заметного движения волосков. Когда уровень звука увеличивается, ухо реагирует на это снижением приложенного стимуляторами усилия. Таким образом ухо как система обладает изменяемым усилением и быстро адаптирует свою чувствительность в зависимости от уровня громкости (Рисунок 2) .

Когда наши уши повреждены, или иногда когда мы нездоровы, усиление может быть слишком большим и привести к нежелательным осцилляциям волосков («звон в ушах») . Но в обычной ситуации это свойство уха приводит к тому, что амплитуда колебаний волосков-датчиков не увеличивается с ростом мощности так быстро, как мы предположили раньше. Поэтому наши уши могут справляться с огромными изменениями в уровне громкости, а амплитуда вибраций волосков изменяется значительно слабее. Измерения, проведенные недавно, показали, что амплитуда вибраций отдельных пучков волосков, «настроенных» на определённую частоту, изменяется пропорционально корню кубическому от вибрационного усилия, производимого воспринимаемой звуковой волной. В результате этого изменение в мощности звука, скажем, на 60 дБ (в миллион раз) изменяет амплитуду колебаний пучка волосков всего в 10 раз.

Как всё это применимо к практике в Hi-Fi .

Вышеизложенные результаты поразительны сами по себе. Но , возможно, ещё более поразительно то, что теории, которые использованы для объяснения упомянутых парадоксов, говорят о внутренней нелинейности нашего слуха даже при малых уровнях громкости. Например, современные исследования показывают, что если некоторый датчик (пучок волосков) будет реагировать на частоту F , то он может также отреагировать, если на него воздействовать парой частот F_a и F_b , при условии что $2F_a - F_b = F$.

Это может привести к интересным соображениям на тему того, как мы слышим музыку и почему некоторые люди предпочитают аудио системы, которые на первый взгляд ущербны. На этом месте я должен поставить флажок, чтобы ясно отделить то, что я говорил выше о человеческом слухе – это всё подтверждено достаточно строгими научными данными. То, что я собираюсь сказать дальше – в большой степени спекуляции, мысли о том, как современная нелинейная модель слуха может повлиять на наше понимание восприятия музыки, в особенности через «несовершенную» звуковую систему.

Давайте начнём с супертвитеров и ультразвуковых составляющих на выходе звуковых систем. Традиционный взгляд – основанный большей частью на

измерениях слухового восприятия с помощью синусоидальных тонов – говорит, что средний человек с хорошим слухом может слышать частоты примерно до 20 кГц. Точное значение варьирует от человека к человеку, но 20 кГц в целом принято за типичную величину. На этой основе присутствие или отсутствие сигналов много выше 20 кГц не должно иметь никакого слышимого эффекта. Тем не менее некоторые люди говорят, что они способны услышать разницу, когда такие компоненты добавлены или удалены из звуковой картины.

Спекуляция 1 : Возможно этот эффект объясним нелинейным смешением ультразвуковых компонент со звуками, лежащими много ниже 20 кГц? Может быть, когда ультразвуковые составляющие сопутствуют слышимым звукам они как-то изменяют наше восприятие этих звуков?

Подавляющая часть измерений с целью определить диапазон слышимых человеком частот проводились с использованием синусоидальных тестовых сигналов, когда присутствует только одна определённая частота. Эти исследования не могли показать те эффекты, которые требуют нелинейного смешения или эффекта «биений». Были проведены отдельные эксперименты в которых два ультразвуковых тона, F_a и F_b , проигрывались вместе, чтобы увидеть, если слушатель может затем зафиксировать разностный тон $F_a - F_b$. Например, проигрывали 30 кГц и 30,5 кГц одновременно и пытались понять, если при этом можно услышать разностный тон 500 Гц. В своём большинстве эти эксперименты не дали положительных результатов. Несмотря на это, нельзя полностью исключить ультразвуковые ощущения по двум причинам.

Во-первых, модели человеческих датчиков слуха показывают наличие чувствительности к компонентам смешения более высоких порядков, например $2F_a - F_b$. В примере выше это привело бы к необходимости услышать $2 \times 30 \text{ кГц} - 30,5 \text{ кГц} = 29,5 \text{ кГц}$, то есть тоже в ультразвуковом диапазоне. Поэтому результирующие тона во многих экспериментах попадали так же в неслышимый диапазон частот, а не в звуковой диапазон.

Во-вторых, система из мембраны и жидкости в улитке, вдоль которой распространяются звуковые волны, сама по себе обладает распределённой нелинейностью. Свойства этой системы варьируют на протяжении её длины и к тому же активно зависят от поведения чувствительных волосков.

Высокочастотные сигналы обычно проникают только на очень небольшое расстояние вдоль мембраны и поэтому считается, что они вообще не могут достичь волосков, реагирующих на более низкие частоты. Но активные системы с распределённой нелинейностью могут обладать весьма странными свойствами. Возможно, например, что наличие более низкой частоты может усилить способность системы к передаче вполне определённых более высоких частот. Поэтому, хотя бы в принципе, возможно, что ультразвуковые компоненты могут более эффективно проникать в ухо, если сопровождаются слышимым низкочастотным звуком, с которым они связаны подходящим образом. И это, в свою очередь, может объяснить слышимый эффект ультразвуковых составляющих – но только вместе с уже слышимыми частотами.

Проверка этой моей спекуляции может оказаться довольно затруднительной, так как она потребует экспериментов по регистрации зависимости реакции людей на уже слышимые звуки, от присутствия или отсутствия ультразвуковых компонент. Простое «Слышно ли хоть что-нибудь?» - не годится. Надо также быть внимательным к возможности влияния искажений используемого для тестирования оборудования на имитацию или маскировку результата. Если этот эффект реально существует, он может оказаться весьма слабым, и, возможно, далеко не каждый человек сможет услышать или зафиксировать его. Но если такие эффекты имеют место, то это поможет объяснить, почему некоторые люди говорят, что они могут услышать эффект от супертвитера или чувствительны к эффектам фильтрации ультразвуковых частот.

Спекуляция 2: Не может ли оказаться, что нелинейность человеческого слуха используется теми аудиосистемами, которые создают значительные уровни искажений низких порядков, в результате чего некоторые люди находят такие системы лучше для восприятия музыки и получения от неё удовольствия?

Значительное число людей говорит, что им больше нравится звук ламповых усилителей и/или виниловых грампластинок по сравнению с высоколинейными транзисторными усилителями и компакт-дисками. Отличительная особенность как ламповых усилителей с неглубокой ООС, так и проигрывателей виниловых пластинок – это относительно высокий уровень гармонических искажений низких порядков, который к тому же растёт с увеличением громкости. О звуке такой аппаратуры некоторые люди говорят, что он более динамичен. Но подобные системы, когда они оцениваются традиционными инженерными мерками, имеют динамический диапазон меньше, чем, например, CD-проигрыватель.

Может ли быть, что иногда искажения, вносимые вариантами ламповых усилителей или виниловыми проигрывателями изменяют наше восприятие музыки и улучшают нашу способность слышать её? Например, когда нота резко начинается и заканчивается, требуется некоторое время для того, чтобы чувствительные элементы в наших ушах отреагировали и подстроили уровень своей чувствительности. При том, что эти элементы от природы нелинейны, наличие определённых искажений сигнала может изменить начальную реакцию на резкое изменение уровня, делая его субъективно более заметным. В том же ключе, изменение уровня искажений с громкостью может также повлиять на настройку чувствительности рецепторов, приводя к изменению субъективно воспринимаемой громкости звука. В результате может возникнуть ощущение улучшенного восприятия динамики звука.

В настоящее время трудно сказать, имеют ли эти мои спекуляции под собой какую-либо твёрдую почву – у меня есть сильные сомнения в том, что они правильны. Я лично предпочитаю в основном аудиосистемы с минимальными искажениями и воспроизводящие звук настолько аккуратно, насколько возможно. Несмотря на это, ясно, что многие люди предпочитают использовать системы, от которых можно ожидать внесения определённых изменений в звук.

Какие бы наука и инженерное искусство не были бы вовлечены в звукотехнику, главная цель домашнего Хай-Фай оборудования – это дать людям возможность

получать удовольствие от восприятия музыки и голоса. Более глубокое понимание слухового восприятия может помочь нам сделать лучше звучащие звуковые системы, и этим увеличить наше удовольствие от прослушивания музыки. Для различных же эффектов, типа тех, которые я описал, увлекательный вопрос остаётся: «Можете ли Вы это услышать?»

Литература:

- 1) T Duke, “The Power of Hearing”, Physics World, May 2002, pp 29-33
- 2) L Robles and M A Ruggero, “Mechanics of the Mammalian Cochlea”
Physiological Reviews, volume 31, pp 1305-52, July 2001
- 3) V M Egufluz et al, “Essential Nonlinearities in Hearing”, Physical Review
Letters 29, volume 84, number 22, pp 5232-5, May 2000 .