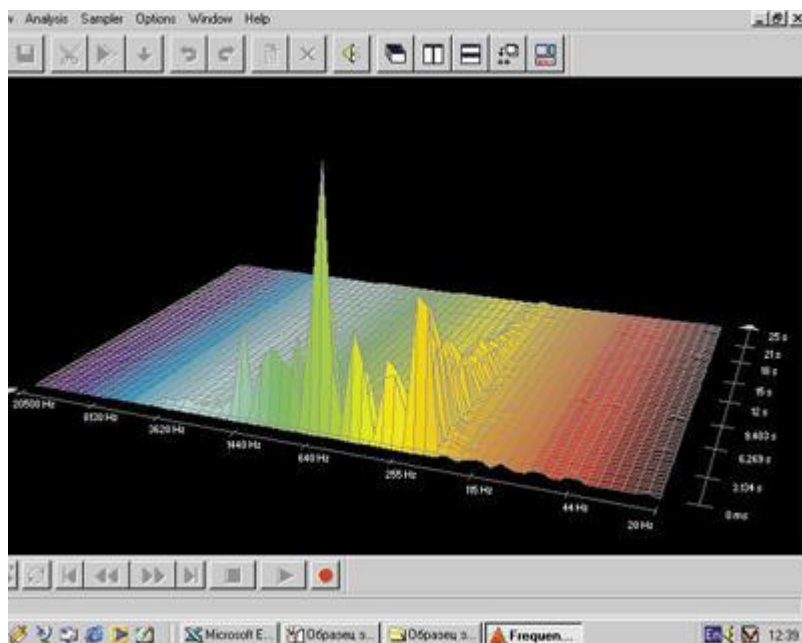


Часть 14.2

Тембр. Часть 2 Ирина Алдошина



Как уже было отмечено в первой части этой статьи ("Звукорежиссер", 2/2001), существенное влияние на восприятие тембра музыкального инструмента или голоса оказывает структура его стационарного (усредненного) спектра: состав обертонов, их расположение на частотной шкале, их частотные соотношения, распределения амплитуд и форма огибающей спектра, наличие и форма формантных областей и т.д., что полностью подтверждает положения классической теории тембра, изложенные еще в трудах

Гельмгольца. Однако экспериментальные материалы, полученные за последние десятилетия, показали, что не менее существенную, а, может быть, и гораздо более существенную роль в распознавании тембра играет нестационарное изменение структуры звука и, соответственно, процесс развертывания во времени его спектра, в первую очередь, на начальном этапе атаки звука.

Процесс изменения спектра во времени особенно наглядно можно "увидеть" с помощью спектрограмм или трехмерных спектров (они могут быть построены с помощью большинства музыкальных редакторов Sound Forge, SpectroLab, Wave Lab и др.). Их анализ для звуков различных инструментов позволяет выявить характерные особенности процессов "развертывания" спектров. Например, на рисунке 1 показан трехмерный спектр звучания колокола, где по одной оси отложена частота в Гц, по другой время в секундах; по третьей амплитуда в дБ. На графике отчетливо видно, как происходит процесс нарастания, установления и спада во времени спектральной огибающей.

Рис.1. Трехмерный спектр звучания колокола

Процесс атаки у большинства музыкальных инструментов и голоса продолжается несколько десятков миллисекунд. За этот период времени (иногда с переходом на стационарную часть) слух воспринимает постепенное расширение спектра во времени, поскольку вступают все новые обертоны с различной скоростью и амплитудой, и распознает тембр данного инструмента. На этот процесс распознавания оказывают влияние также многочисленные другие признаки: начальный скрип смычка, начало ноты на медном инструменте, шум дыхания, начальное прохлопывание язычка, ударный глухой звук молоточка на пианино, небольшая негармоничность обертонов и т.д. все это создает живые акустические признаки идентификации инструмента (об их роли поговорим позднее).

Рис.2. Атака звука для закрытой и открытой лабиальной (флейтовой) органной трубы

Как известно, процесс атаки особенно важен для распознавания тембра также еще и потому, что он является устойчивой характеристикой звучания данного инструмента, менее всего подверженной "окрашиванию" со стороны помещения, в котором данное произведение исполняется, поскольку первые отражения поступают к слушателю с определенным запаздыванием, после того, как фаза атаки звука уже завершена и поступила к слушателю неокрашенной в виде прямого звука. Если бы этого не было, то распознать тембр инструмента при исполнении в различных помещениях было бы практически невозможно. Эксперименты показали, что слушатели не могут распознать инструмент, если фаза атаки удалена или изменена. Если поменять фазы атаки и спада местами (проиграть, например, запись любого инструмента в обратном направлении), то тембр меняется до неузнаваемости.

Измерения показывают существенные различия в структуре атаки у разных инструментов. На рисунках 2...4 показаны примеры уровнеграмм (зависимостей уровня звукового давления от времени) и их спектрограмм (зависимостей частоты обертонов от времени, амплитуда при этом отмечается яркостью) для начального периода установления колебаний (атаки) тона С4 для различных инструментов: органных труб, деревянных духовых и медных духовых.

Сравнение спектрограмм для двух типов органных труб открытая флейтовая (principal 8', рис. 2) и закрытая флейтовая (Gedakt 8') показывает, что у открытой трубы первой в спектре начинает устанавливаться вторая гармоника (на октаву выше первой). Она опережает первую гармонику (основную частоту) почти на 30 мс, почти одновременно с основным тоном появляется третья гармоника, четвертая и выше гармоники малы по амплитуде. У закрытой трубы первой в спектре появляется пятая гармоника, на две октавы + большую терцию выше первой; затем появляется первая гармоника; и только затем третья, на дуодециму (октаву + квинту) выше первой. Такое различие в процессе атаки отражает физический механизм звукообразования в разных трубах, поскольку у открытых труб возбуждаются все гармоники, а у закрытых только нечетные, что определяет различный тембр их звучания.

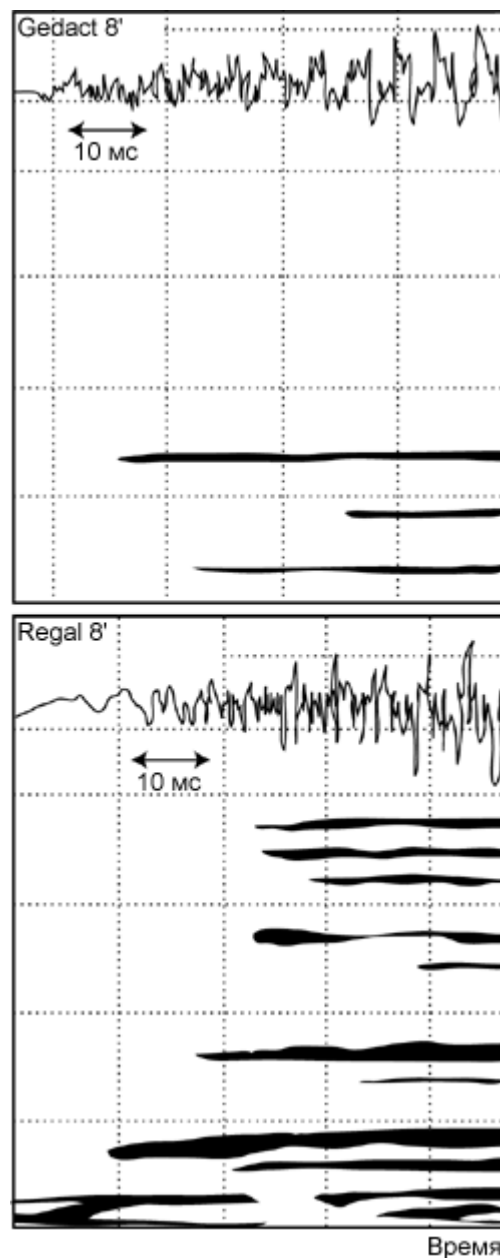


Рис.3. Атака звука для деревянных духовых инструментов: кларнет, гобой, флейта

Сравнение атаки тона С4 у различных деревянных инструментов показывает, что процесс установления колебаний у каждого инструмента имеет свой особый характер (рис. 3):

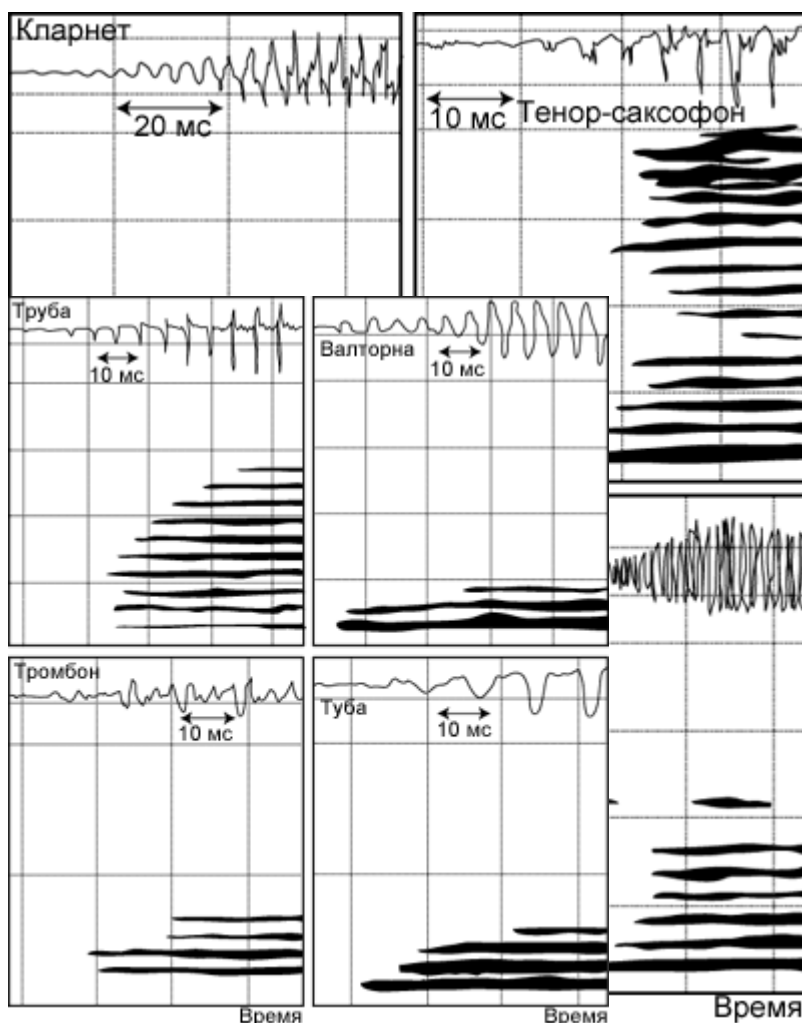
- у кларнета доминируют нечетные гармоники 1/3/5, причем третья гармоника появляется в спектре на 30 мс позже первой, затем постепенно "выстраиваются" более высокие гармоники;
- у гобоя установление колебаний начинается со второй и третьей гармоники, затем появляется четвертая и только через 8 мс начинает появляться первая гармоника;
- у флейты сначала появляется первая гармоника, затем только через 80 мс постепенно вступают все остальные.

На рисунке 4 показан процесс установления колебаний для группы медных инструментов: трубы, тромбона, валторны и тубы. Отчетливо видны различия:

- у трубы компактное появление группы высших гармоник, у тромбона первой появляется вторая гармоника, затем первая, и через 10 мс вторая и третья. У тубы и валторны видна концентрация энергии в первых трех гармониках, высшие гармоники практически отсутствуют.

Рис.4. Атака звука для медных духовых инструментов: труба, тромбон, валторна, туба

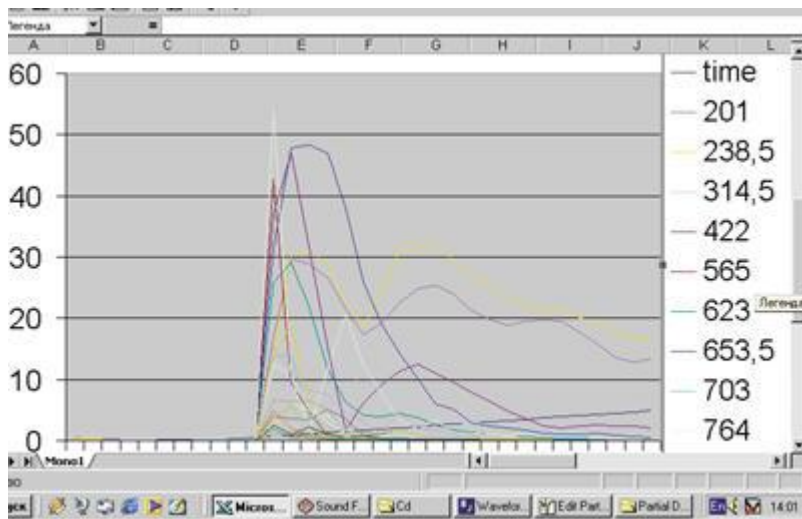
Анализ полученных результатов показывает, что процесс атаки звука существенно зависит от физической природы звукоизвлечения на данном инструменте:



- от использования амбушюров или тростей, которые, в свою очередь, делятся на одинарные или двойные;
- от различных форм труб (прямые узкомензурные или конусные широкомензурные) и т.д.

Это определяет количество гармоник, время их появления, скорость выстраивания их амплитуды, а соответственно и форму огибающей временной структуры звука. У некоторых инструментов, например, флейты (Рис. 5а), огибающая в период атаки имеет плавный экспоненциальный характер, а у некоторых, например, фагота (Рис.5б), отчетливо видны биения, что и является одной из причин существенных различий в их тембре.

Во время атаки высшие гармоники иногда опережают основной тон, поэтому могут происходить флуктуации высоты тона периодичность, а значит, и высота суммарного тона, выстраиваются постепенно. Иногда эти изменения периодичности носят квазислучайный характер. Все эти признаки помогают



слуховой системе "опознать" тембр того или иного инструмента в начальный момент звучания.

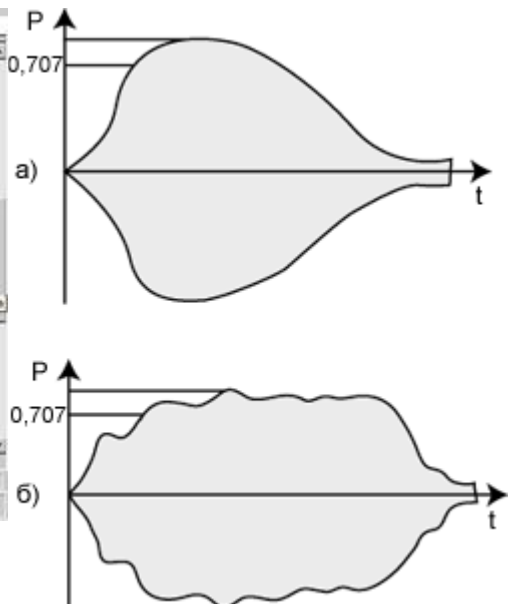


Рис.5. Временная огибающая атаки: а) флейты, б) фагота

Для оценки тембра звучания важен не только момент его распознавания (т.е. способность отличить один инструмент от другого), но и возможность оценить изменение тембра в процессе исполнения. Здесь важнейшую роль играет динамика изменения спектральной огибающей во времени на всех этапах звучания: атаки, стационарной части, спада.

Характер поведения каждого обертона во времени также несет важнейшую информацию о тембре. Например, в звучании колоколов особенно четко видна динамика изменения, как по составу спектра, так и по характеру изменения во времени амплитуд его отдельных обертонов: если в первый момент после удара в спектре отчетливо видно несколько десятков спектральных составляющих, что создает шумовой характер тембра, то через несколько секунд в спектре остаются несколько основных обертонов (основной тон, октава, дуодецима и минорная терция через две октавы), остальные затухают, и это создает особый тонально окрашенный тембр звучания.

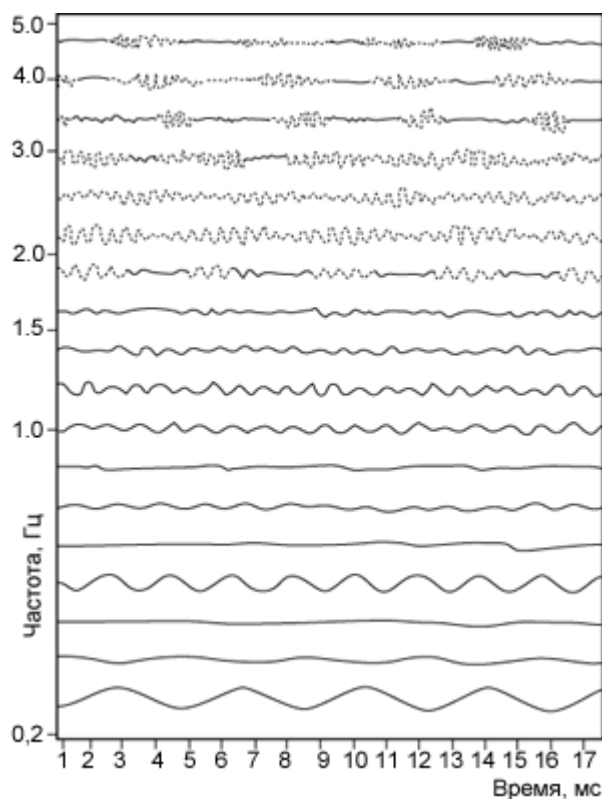
Рис.6. Изменения во времени амплитуд обертонов для звука колокола

Пример изменения амплитуд основных обертонов во времени для колокола показан на рисунке 6. Видно, что для него характерна короткая атака и длинный период затухания, при этом скорость вступления и спада обертонов различных порядков и характер изменения их амплитуд во времени существенно отличаются. Поведение различных обертонов во времени зависит от типа инструмента: в звучании рояля, органа, гитары и др. процесс изменения амплитуд обертонов имеет совершенно разный характер.

Опыт показывает, что аддитивный компьютерный синтез звуков, учитывающий специфику развертывания отдельных обертонов во времени, позволяет получить значительно более "жизненное" звучание.

Вопрос о том, динамика изменения каких именно обертонов несет информацию о тембре, связан с существованием критических полос слуха. Как уже было сказано в первой статье цикла ("Звукорежиссер", 6/1999), посвященной определению высоты тона, периферическая слуховая система выполняет спектральный анализ поступившего звука. Базиллярная мембрана в улитке действует как линейка полосовых фильтров, ширина полосы которых зависит от частоты: выше 500 Гц она равна примерно 1/3 октавы, ниже 500 Гц она составляет примерно 100 Гц. Ширина полосы этих слуховых фильтров называется "критической полосой слуха" (существует специальная единица измерения 1 барк, равная ширине критической полосы во всем диапазоне слышимых частот).

Внутри критической полосы слух производит интегрирование поступившей звуковой информации, что



играет также важную роль в процессах слуховой маскировки. Если проанализировать сигналы на выходе слуховых фильтров, то можно видеть, что первые пять-семь гармоник в спектре звучания любого инструмента попадают обычно каждая в свою критическую полосу, поскольку они достаточно далеко отстоят друг от друга в таких случаях говорят, что гармоники "развертываются" слуховой системой. Разряды нейронов на выходе таких фильтров синхронизированы с периодом каждой гармоники.

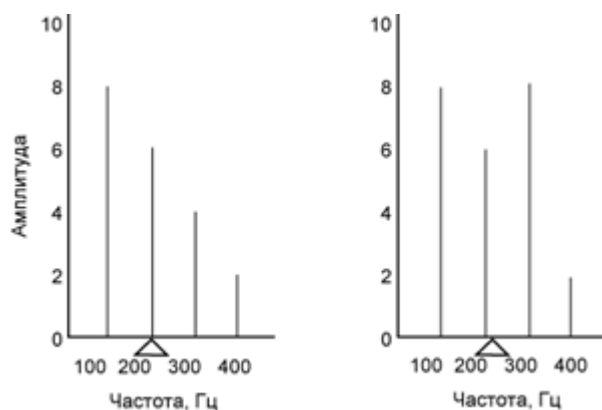
Рис.7. Вид сигналов на выходе слуховых фильтров для "развернутых" и "неразвернутых" гармоник

Гармоники выше седьмой обычно находятся достаточно близко друг к другу по частотной шкале, и не "развертываются" слуховой системой внутрь одной критической полосы попадает несколько гармоник, а на выходе слуховых фильтров получается сложный сигнал. Разряды нейронов в этом случае синхронизированы с частотой огибающей, т.е. основного тона (рис. 7). Соответственно, механизм обработки информации слуховой системой для развернутых и неразвернутых гармоник несколько отличается в первом случае используется информация "по времени", во втором "по месту".

Существенную роль при распознавании высоты тона, как было показано в предыдущих статьях, играют первые пятнадцать-восемнадцать гармоник. Эксперименты с помощью компьютерного аддитивного синтеза звуков показывают, что поведение именно этих гармоник оказывает также наиболее существенное влияние на изменение тембра.

Поэтому в ряде исследований предлагалось размерность тембра считать равной пятнадцати-восемнадцати, и оценивать его изменение по этому количеству шкал это одно из принципиальных отличий тембра от таких характеристик слухового восприятия, как высота или громкость, которые могут быть шкалированы по двум-трем параметрам (например, громкость), зависящих в основном от интенсивности, частоты и длительности сигнала.

Достаточно хорошо известно, что если в спектре сигнала присутствует достаточно много гармоник с

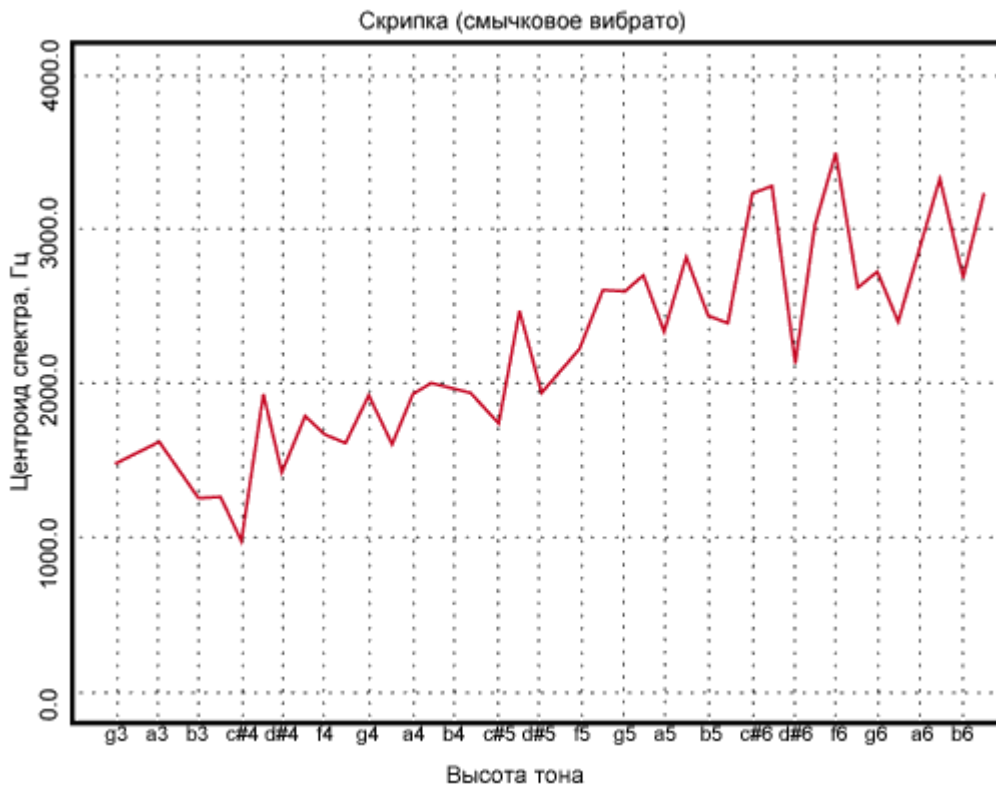


номерах от 7-ой до 15...18-ой, с достаточно большими амплитудами, например, у трубы, скрипки, язычковых труб органа и т.п., то тембр воспринимается как яркий, звонкий, резкий и т. д. Если в спектре присутствуют в основном низшие гармоники, например, у тубы, валторны, тромбона, то тембр характеризуется как темный, глухой и т.д. (см. рис. 2...4). Кларнет, у которого в спектре доминируют нечетные гармоники, обладает несколько "носовым" тембром и т.д.

В соответствии с современными взглядами, важнейшую роль для восприятия тембра имеет изменение динамики распределения максимума энергии между обертонами спектра.

Рис.8. Определение центрида

Для оценки этого параметра введено понятие "центроид спектра", который определяется как средняя



точка распределения спектральной энергии звука, его иногда определяют как "балансную точку" спектра. Способ определения его состоит в том, что рассчитывается значение некоторой средней частоты: $F = \frac{\sum A_i f_i}{\sum f_i}$, где A_i амплитуда составляющих спектра, f_i их частота. Для примера, показанного на рисунке 8, это значение центроида составляет 200 Гц.

$$F = (8 \times 100 + 6 \times 200 + 4 \times 300 + 2 \times 400) / (8 + 6 + 4 + 2) = 200.$$

Смещение центроида в сторону высоких частот ощущается как повышение яркости тембра.

Существенное влияние распределения спектральной энергии по частотному диапазону и ее изменения во времени на восприятие тембра связано, вероятно, с опытом распознавания звуков речи по формантным признакам, которые и несут информацию о концентрации энергии в различных областях спектра (неизвестно, правда, что было первичным).

Эта способность слуха имеет существенное значение при оценке тембров музыкальных инструментов, поскольку наличие формантных областей характерно для большинства музыкальных инструментов, например, у скрипок в областях 800...1000 Гц и 2800...4000 Гц, у кларнетов 1400...2000 Гц и т.д. Соответственно, их положение и динамика изменения во времени влияют на восприятие индивидуальных особенностей тембра.

Известно, какое значительное влияние на восприятие тембра певческого голоса оказывает наличие высокой певческой форманты (в области 2100...2500 Гц у басов, 2500...2800 Гц у теноров, 3000...3500 Гц у сопрано). В этой области у оперных певцов сосредоточивается до 30% акустической энергии, что обеспечивает звонкость и полетность голоса. Удаление с помощью фильтров певческой форманты из записей различных голосов (эти опыты были выполнены в исследованиях проф. В.П. Морозова) показывает, что тембр голоса становится тусклым, глуховатым и вялым.

Рис.9. Изменение положения центроида для звуков скрипки

Изменение тембра при изменении громкости исполнения и транспонировании по высоте также сопровождается сдвигом центроида за счет изменения количества обертонов. Пример изменения положения центроида для звуков скрипки разной высоты показан на рисунке 9 (по оси абсцисс отложена частота расположения центроида в спектре). Исследования показали, что у многих музыкальных инструментов имеется почти монотонная связь между увеличением интенсивности (громкости) и сдвигом центроида в высокочастотную область, за счет чего тембр становится ярче.

По-видимому, при синтезе звуков и создании различных компьютерных композиций следует учитывать динамическую связь между интенсивностью и положением центроида в спектре для того, чтобы получать более естественный тембр.

Наконец, различие в восприятии тембров реальных звуков и звуков с "виртуальной высотой", т.е. звуков, высоту которых мозг "дистраивает" по нескольким целочисленным обертонам спектра (это характерно, например, для звуков колоколов), можно объяснить с позиций положения центроида спектра. Поскольку у этих звуков значение частоты основного тона, т.е. высоты, может быть одинаковым, а положение центроида разное из-за разного состава обертонов, то, соответственно, тембр будет восприниматься по-разному.

Интересно отметить, что еще более десяти лет назад для измерения акустической аппаратуры был предложен новый параметр, а именно трехмерный спектр распределения энергии по частоте и по времени, так называемое распределение Вигнера, которое достаточно активно используется различными фирмами для оценки аппаратуры, поскольку, как показывает опыт, позволяет установить наилучшее соответствие с ее качеством звучания. Учитывая изложенное выше свойство слуховой системы использовать динамику изменения энергетических признаков звукового сигнала для определения тембра, можно предположить, что этот параметр распределение Вигнера может быть полезен и для оценки музыкальных инструментов.

Оценка тембров различных инструментов всегда носит субъективный характер, но если при оценке высоты и громкости можно на основе субъективных оценок расположить звуки по определенной шкале (и даже ввести специальные единицы измерения "сон" для громкости и "мел" для высоты), то оценка тембра значительно более трудная задача. Обычно для субъективной оценки тембра слушателям предъявляются пары звуков, одинаковых по высоте и громкости, и их просят расположить эти звуки по разным шкалам между различными противоположными описательными признаками: "яркий"/"темный", "звонкий"/"глухой" и т.д. (О выборе различных терминов для описания тембров и о рекомендациях международных стандартов по этому вопросу мы обязательно поговорим в дальнейшем).

Существенное влияние на определение таких параметров звука, как высота, тембр и др., оказывает поведение во времени первых пяти-семи гармоник, а также ряда "неразвернутых" гармоник до 15...17-ой. Однако, как известно из общих законов психологии, кратковременная память человека может одновременно оперировать не более чем семью-восемью символами. Поэтому очевидно, что и при распознавании и оценке тембра используется не более семи-восьми существенных признаков.

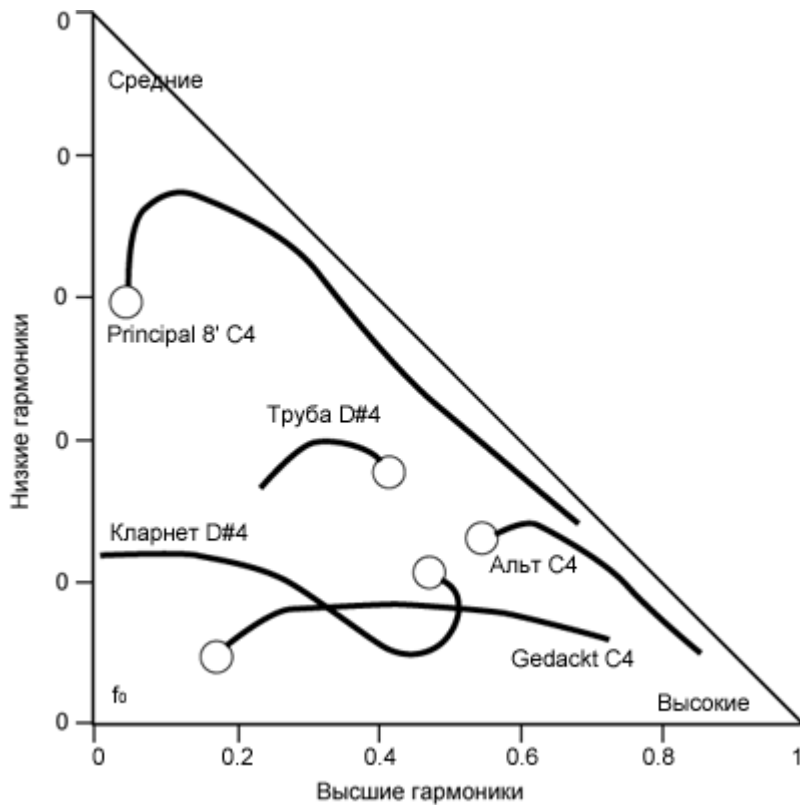
Попытки установить эти признаки путем систематизации и усреднения результатов экспериментов, найти обобщенные шкалы, по которым можно было бы идентифицировать тембры звуков различных инструментов, связать эти шкалы с различными временно-спектральными характеристиками звука, предпринимаются уже давно.

Одной из самых известных является работа Грея (1977 г.), где было проведено статистическое сравнение оценок по различным признакам тембров звуков различных инструментов струнных, деревянных, перкуссионных и др. Звуки были синтезированы на компьютере, что позволяло менять в требуемых направлениях их временные и спектральные характеристики. Классификация тембральных признаков была выполнена в трехмерном (ортогональном) пространстве, где в качестве шкал, по которым производилась сравнительная оценка степени подобия тембральных признаков (в пределах от 1 до 30), были выбраны следующие:

- первая шкала - значение центроида амплитудного спектра (по шкале отложено смещение центроида, т.е. максимума спектральной энергии от низких к высоким гармоникам);
- вторая - синхронность спектральных флуктуаций, т.е. степень синхронности вступления и развития отдельных обертонов спектра;
- третья - степень наличия низкоамплитудной негармонической высокочастотной энергии шума в период атаки.

Обработка полученных результатов с помощью специального пакета программ для кластерного анализа позволила выявить возможность достаточно четкой классификации инструментов по тембрам внутри предложенного трехмерного пространства .

Рис.10. Двухмерная диаграмма для классификации тембров инструментов



Попытка визуализировать тембральное различие звуков музыкальных инструментов в соответствии с динамикой изменения их спектра в период атаки была предпринята в работе Полларда (1982 г.), результаты показаны на рисунке 10. По оси Y отложена величина, пропорциональная общей энергии низших ("развернутых") гармоник, по оси X энергии высших "неразвернутых" гармоник. Если рассмотреть, как меняется энергия, приходящаяся на долю гармоник в период атаки звука (который продолжается от 10 до 160 мс для кларнета, от 10 до 65 мс для скрипки, от 10...100 мс для трубы), то можно достаточно четко разделить звуки различных инструментов по этим признакам. Процесс изменения

соотношения гармоник в разные периоды атаки показан черной линией, переход к стационарному состоянию белым кружком. У кларнета в начальный период превалирует спектральная энергия в низших гармониках (0,25), затем увеличивается доля энергии высших гармоник (до 0,55), затем, при переходе к стационарному состоянию (отмечено кружком), устанавливается определенное соотношение в распределении энергии между низшими и высшими гармониками (0,2/0,45).

У скрипки в начальный период превалируют (энергетически) высокие гармоники, затем, по мере перехода к стационарному состоянию, уменьшается доля высоких гармоник, возрастает энергия в низших гармониках. Особенно наглядно видно перемещение энергетического максимума от высших гармоник в начальный момент атаки к низшим гармоникам по мере перехода к стационарному состоянию у органной трубы (principal 8'). Как следует из данных, приведенных на рисунке 10, все инструменты достаточно четко разделяются по этим спектральным признакам, что еще раз подчеркивает важность динамики изменения спектра в период атаки для идентификации тембра различных инструментов.

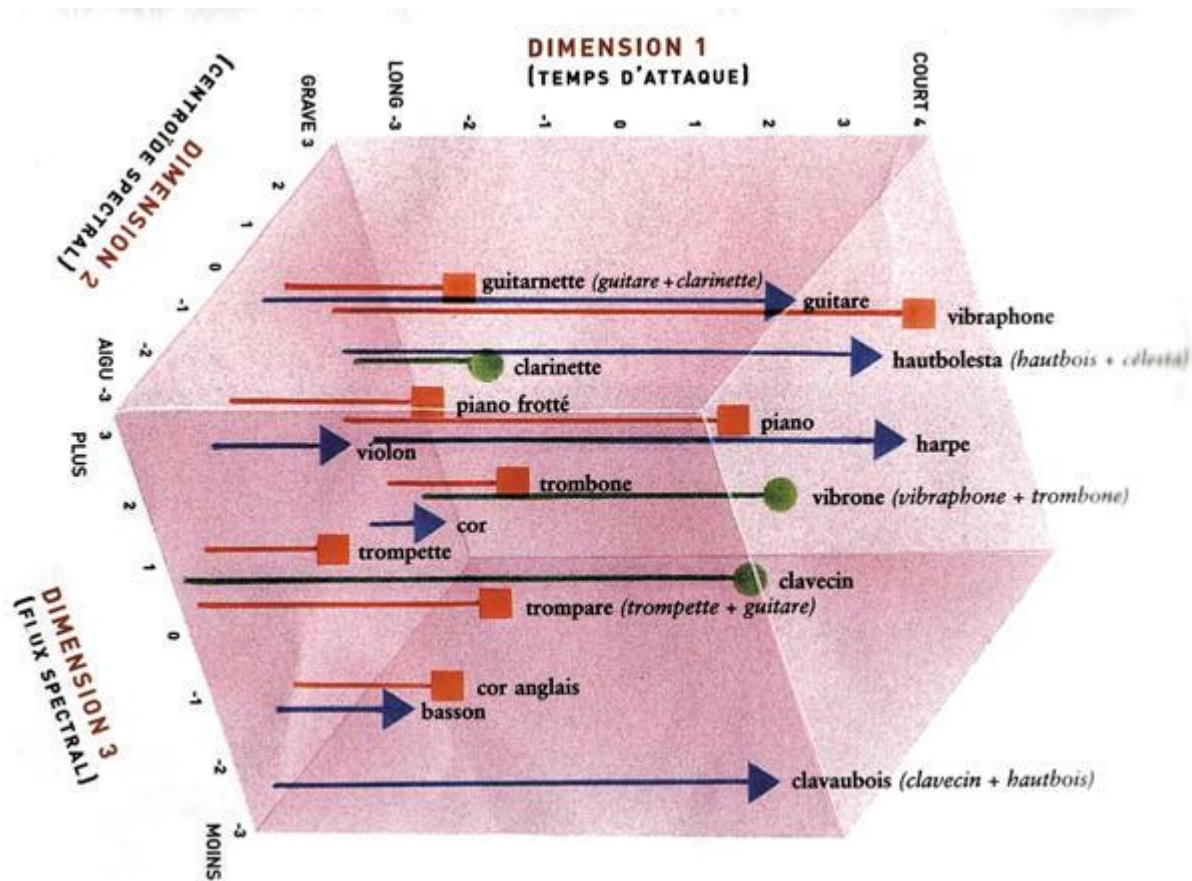


Рис.11. Трехмерное пространство тембров

Поиски методов многомерного шкалирования тембров и установление их связей с спектрально-временными характеристиками звуков активно продолжают. Эти результаты чрезвычайно важны для развития технологий компьютерного синтеза звуков, для создания различных электронных музыкальных композиций, для коррекции и обработки звука в звукорежиссерской практике и т.д.

Интересно отметить, что еще в начале века великий композитор XX века Арнольд Шёнберг высказал идею, что "...если рассматривать высоту тона, как одну из размерностей тембра, а современную музыку построенной на вариации этой размерности, то почему бы не попробовать использовать другие размерности тембра для создания композиций". Эта идея реализуется в настоящее время в творчестве композиторов, создающих спектральную (электроакустическую) музыку. Именно поэтому интерес к проблемам восприятия тембра и его связям с объективными характеристиками звука настолько высок.

Таким образом, полученные результаты показывают, что, если в первый период изучения восприятия тембра (на основе классической теории Гельмгольца) была установлена четкая связь изменения тембра с изменением спектрального состава стационарной части звучания (составом обертонов, соотношением их частот и амплитуд и др.), то второй период этих исследований (с начала 60-х годов) позволил установить принципиальную важность спектрально-временных характеристик.

Это изменение структуры временной огибающей на всех этапах развития звука: атаки (что особенно важно для распознавания тембров различных источников), стационарной части и спада. Это и динамическое изменение во времени спектральной огибающей, в т.ч. смещение центроида спектра, т.е. смещение максимума спектральной энергии во времени, а также развитие во времени амплитуд спектральных составляющих, особенно первых пяти-семи "неразвернутых" гармоник спектра.

В настоящее время начался третий период изучения проблемы тембра центр исследований переместился в сторону изучения влияния фазового спектра, а также к использованию психофизических критериев в распознавании тембров, лежащих в основе общего механизма распознавания звукового образа (группировка в потоки, оценка синхронности и др.). О полученных в

этом направлении результатах в следующих статьях.