

Музыкальная транскрипция при помощи методов машинного обучения

Евгений Нижибицкий

ВМК МГУ

24 сентября 2014 г.

- 1 **Анатомия музыки**
 - Происхождение звуков
 - Разделение звуков
 - Эталонная нота
 - Ноты в музыкальных инструментах
 - Итоговое звучание
- 2 **Цифровая звукозапись**
 - Дискретизация и квантование
 - Цифровые аудиоформаты
 - Общая схема
- 3 **Музыкальная транскрипция**
 - Постановка задачи и мотивация
 - Преобразования Фурье
 - В чем же подвох?
- 4 **Обзор существующих подходов**
 - Предобработка сигнала
 - Подходы к распознаванию
 - Сравнение результатов

1 Анатомия музыки

Происхождение звуков

Разделение звуков

Эталонная нота

Ноты в музыкальных инструментах

Итоговое звучание

2 Цифровая звукозапись

Дискретизация и квантование

Цифровые аудиоформаты

Общая схема

3 Музыкальная транскрипция

Постановка задачи и мотивация

Преобразования Фурье

В чем же подвох?

4 Обзор существующих подходов

Предобработка сигнала

Подходы к распознаванию

Сравнение результатов

Звук — распространение в виде упругих волн механических колебаний в твёрдой, жидкой или газообразной среде.

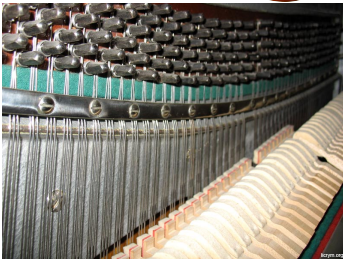
Обычный человек способен слышать звуковые колебания в диапазоне частот от 16 Гц до 20 кГц.



Анатомия музыки

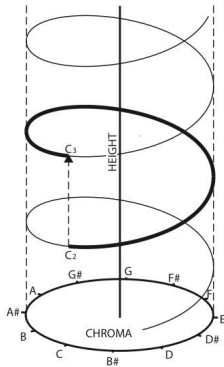
Происхождение звуков

В музыке звук обычно получается колебаниями частей инструмента, исключение — духовые инструменты.



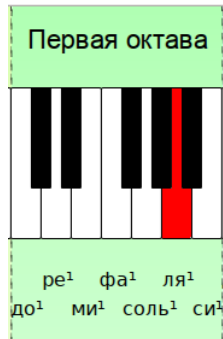
Анатомия музыки

Разделение звуков



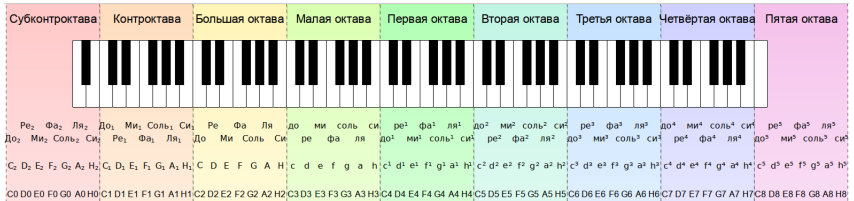
Музыкальные звуки, частота которых отличается в два раза, воспринимаются на слух как очень похожие, как повторение одного звука на разной высоте. Это явление называется октавным сходством звуков. На основе этого весь диапазон частот используемых в музыке звуков делится на участки, называемые октавами, при этом частота звуков в каждой последующей октаве будет в два раза выше чем в предыдущей, а схожие звуки получают одинаковые названия ступеней.

За эталон частоты ноты берётся нота, частота которой должна быть равной 440 Гц. Это нота ля первой октавы.



Анатомия музыки

Ноты в музыкальных инструментах



Клавиатура фортепиано или рояля состоит из 88 клавиш — им соответствуют 7 полных октав и еще 4 ноты. Для многих инструментов такого соответствия не предусмотрено — при игре на скрипке можно надеяться только на свой слух.



Каждая октава делится на математически равные интервалы, в наиболее типичном случае — на двенадцать полутонов (каждый из которых равен $1 : \sqrt[12]{2}$).

Можно математически вычислить частоты для всего звукоряда, пользуясь формулой:

$$f(i) = f_0 \cdot 2^{i/12}$$

где f_0 — частота камертона (Ля, 440 Hz), а i — количество полутонов в интервале от искомого звука к эталону f_0 .

К примеру, можно вычислить частоту звука на тон (2 полутона) ниже от камертона Ля — ноты соль:

$$f(-2) = 440 \text{ Hz} \cdot 2^{-2/12} \approx 391,995 \text{ Hz}$$

Анатомия музыки

Ноты в музыкальных инструментах

Звукам, извлекаемым из фортепиано, в итоге соответствуют частоты от приблизительно 16 Гц до 15800 Гц.

Таблица соответствия нот частотам [\[править \]](#) [\[править вики-текст \]](#)

Частоты в герцах (интервал от средней До в полутонах)										
Октава → Нота ↓	Суб-контр	Контр	Большая	Малая	1	2	3	4	5	6
C	16,352 (-48)	32,703 (-36)	65,406 (-24)	130,81 (-12)	261,63 (0)	523,25 (+12)	1046,5 (+24)	2093,0 (+36)	4186,0 (+48)	8372,0 (+60)
C# / D_b	17,324 (-47)	34,648 (-35)	69,296 (-23)	138,59 (-11)	277,18 (+1)	554,37 (+13)	1108,7 (+25)	2217,5 (+37)	4434,9 (+49)	8869,8 (+61)
D	18,354 (-46)	36,708 (-34)	73,416 (-22)	146,83 (-10)	293,66 (+2)	587,33 (+14)	1174,7 (+26)	2349,3 (+38)	4698,6 (+50)	9397,3 (+62)
D# / E_b	19,445 (-45)	38,891 (-33)	77,782 (-21)	155,56 (-9)	311,13 (+3)	622,25 (+15)	1244,5 (+27)	2489,0 (+39)	4978,0 (+51)	9956,1 (+63)
E	20,602 (-44)	41,203 (-32)	82,407 (-20)	164,81 (-8)	329,63 (+4)	659,26 (+16)	1318,5 (+28)	2637,0 (+40)	5274,0 (+52)	10548 (+64)
F	21,827 (-43)	43,654 (-31)	87,307 (-19)	174,61 (-7)	349,23 (+5)	698,46 (+17)	1396,9 (+29)	2793,8 (+41)	5587,7 (+53)	11175 (+65)
F# / G_b	23,125 (-42)	46,249 (-30)	92,499 (-18)	185,00 (-6)	369,99 (+6)	739,99 (+18)	1480,0 (+30)	2960,0 (+42)	5919,9 (+54)	11840 (+66)
G	24,500 (-41)	48,999 (-29)	97,999 (-17)	196,00 (-5)	392,00 (+7)	783,99 (+19)	1568,0 (+31)	3136,0 (+43)	6271,9 (+55)	12544 (+67)
G# / A_b	25,957 (-40)	51,913 (-28)	103,83 (-16)	207,65 (-4)	415,30 (+8)	830,61 (+20)	1661,2 (+32)	3322,4 (+44)	6644,9 (+56)	13290 (+68)
A	27,500 (-39)	55,000 (-27)	110,00 (-15)	220,00 (-3)	440,00 (+9)	880,00 (+21)	1760,0 (+33)	3520,0 (+45)	7040,0 (+57)	14080 (+69)
A# / H_b	29,135 (-38)	58,270 (-26)	116,54 (-14)	233,08 (-2)	466,16 (+10)	932,33 (+22)	1864,7 (+34)	3729,3 (+46)	7458,6 (+58)	14917 (+70)
H	30,868 (-37)	61,735 (-25)	123,47 (-13)	246,94 (-1)	493,88 (+11)	987,77 (+23)	1975,5 (+35)	3951,1 (+47)	7902,1 (+59)	15804 (+71)

Примечание: Иногда нота Си, обозначается как «В» вместо «H».

Анатомия музыки

Ноты в музыкальных инструментах

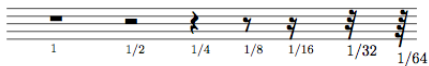
Для записи используются нотные знаки на нотном стане:



Разные длительности нот:



Изображения пауз:



Анатомия музыки

Ноты в музыкальных инструментах

Знаки альтерации:



Пример трезвучия в разных записях (ключах):



Анатомия музыки

Ноты в музыкальных инструментах

Пример нотной записи:

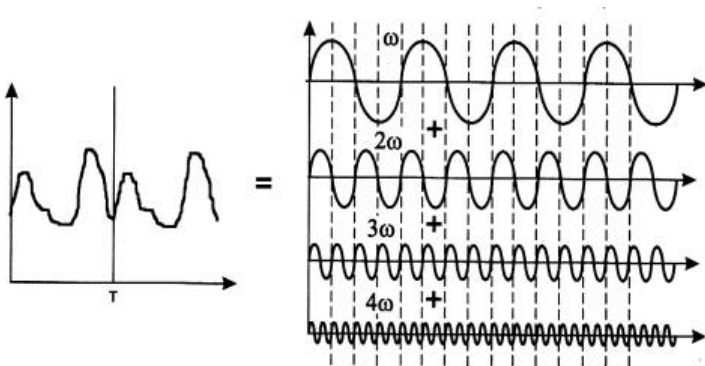
Valse

F. CHOPIN
Op. 64 Nr 2

Tempo giusto

The image shows the first few measures of a musical score for a waltz by Frédéric Chopin. The score is written for piano and consists of two staves: a treble clef staff and a bass clef staff. The key signature is three sharps (F#, C#, G#) and the time signature is 3/4. The tempo marking is "Tempo giusto". The first measure features a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The second measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The third measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The fourth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The fifth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The sixth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The seventh measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The eighth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The ninth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The tenth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The eleventh measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The twelfth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The thirteenth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The fourteenth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The fifteenth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The sixteenth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The seventeenth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The eighteenth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The nineteenth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The twentieth measure has a half note in the treble staff and a quarter note in the bass staff. The score includes fingerings (1-5) and ornaments (marked with a star) in the bass staff. The word "Ped." is written below the bass staff in measures 1, 3, 5, and 7.

Итоговое музыкальное звучание получается наложением всех извлекаемых из инструмента звуков.

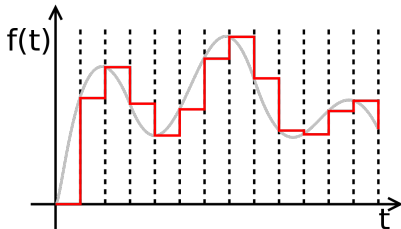


- 1 **Анатомия музыки**
 - Происхождение звуков
 - Разделение звуков
 - Эталонная нота
 - Ноты в музыкальных инструментах
 - Итоговое звучание
- 2 **Цифровая звукозапись**
 - Дискретизация и квантование
 - Цифровые аудиоформаты
 - Общая схема
- 3 **Музыкальная транскрипция**
 - Постановка задачи и мотивация
 - Преобразования Фурье
 - В чем же подвох?
- 4 **Обзор существующих подходов**
 - Предобработка сигнала
 - Подходы к распознаванию
 - Сравнение результатов

Цифровая звукозапись

Дискретизация и квантование

Для сохранения звука в компьютерах используется т.н. дискретизация — мы сохраняем значение колебания звука через равные промежутки времени. Количество таких измерений в секунду — частота дискретизации. Количество возможных измеренных значений — разрядность квантования.



Характеристика для Audio CD — 44100 Гц / 16 бит.

Формат файла определяет структуру и особенности представления звуковых данных при хранении на компьютере. Для устранения избыточности данных используются аудиокодеки, при помощи которых производится сжатие аудиоданных. Выделяют три группы звуковых форматов аудиофайлов:

- форматы без сжатия (WAV, AIFF)
- форматы со сжатием без потерь (APE, FLAC)
- форматы с применением сжатия с потерями (mp3, ogg)

Цифровая звукозапись

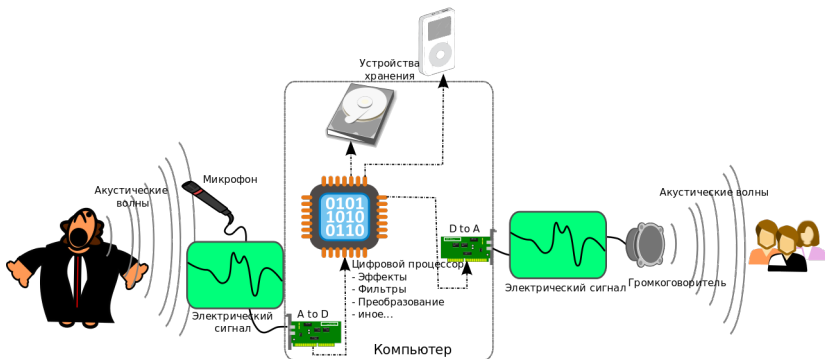
Цифровые аудиоформаты

Некоторые виды цифровых аудиоформатов в сравнении:

Название формата	Квантование, бит	Частота дискретизации, кГц	Число каналов	Величина потока данных с диска, кбит/с	Степень сжатия/упаковки
CD	16	44,1	2	1411,2	1:1 без потерь
Dolby Digital (AC3)	16-24	48	6	до 640	~12:1 с потерями
DTS	20-24	48; 96	до 8	до 1536	3:1 с потерями
DVD-Audio	16; 20; 24	44,1; 48; 88,2; 96	6	6912	1:1 без потерь
DVD-Audio	16; 20; 24	176,4; 192	2	4608	1:1 без потерь
MP3	16-24	до 48	2	до 320	~11:1 с потерями
AAC	16-24	до 96	до 48	до 512	с потерями
AAC+ (SBR)	16-24	до 48	2	до 320	с потерями
Ogg Vorbis	до 32	до 192	до 255	до 500	с потерями
WMA	до 24	до 96	до 8	до 768	2:1, есть версия без потерь

Цифровая звукозапись

Общая схема



- 1 **Анатомия музыки**
 - Происхождение звуков
 - Разделение звуков
 - Эталонная нота
 - Ноты в музыкальных инструментах
 - Итоговое звучание
- 2 **Цифровая звукозапись**
 - Дискретизация и квантование
 - Цифровые аудиоформаты
 - Общая схема
- 3 **Музыкальная транскрипция**
 - Постановка задачи и мотивация
 - Преобразования Фурье
 - В чем же подвох?
- 4 **Обзор существующих подходов**
 - Предобработка сигнала
 - Подходы к распознаванию
 - Сравнение результатов

Исследуются полифонические записи - т.е. записи, на которых воспроизводятся множество нот инструмента одновременно.

При этом решаются следующие задачи:

- pitch detection — определяем, когда какие ноты воспроизводились исполнителем
- beat detection — какой ритм у музыки (как часто надо стучать ногой «в такт» музыке :)

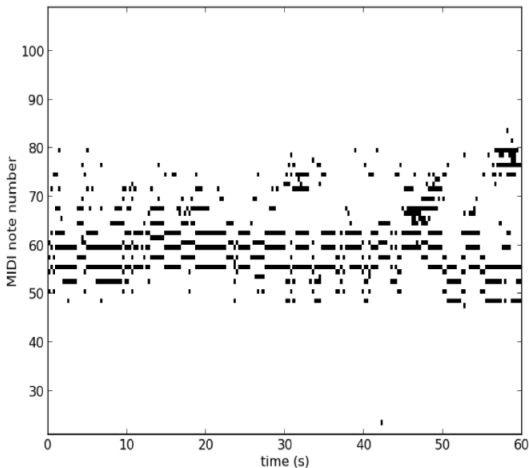
Для чего?

- помощь при обучении, *составлении нот*
- определение жанра
- определение автора/композитора
- поиск плагиата в музыке

Музыкальная транскрипция

Постановка задачи и мотивация

Хотелось бы получить что-то вроде этого:



Если звук в своем самом простом виде — синусоида, и музыка состоит из множества таких звуков, то сигнал можно разложить в сумму таких синусоид? Тригонометрический ряд Фурье — представление функции f с периодом τ в виде ряда

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx).$$

Для дискретизованного сигнала будем использовать дискретное преобразование Фурье:

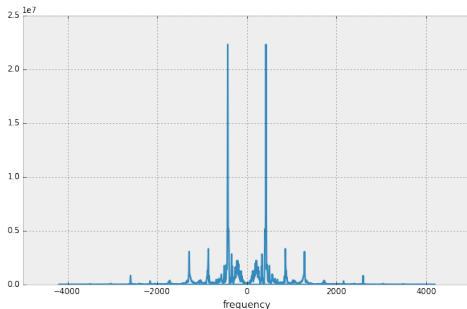
$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad k = 0, \dots, N-1.$$

Быстрое преобразование Фурье (FFT) — алгоритм для его быстрого подсчета.

Музыкальная транскрипция

Преобразования Фурье

На основе преобразования Фурье для малого промежутка времени можно также рассмотреть спектр частот, чтобы понять, какие частоты преобладают для этого промежутка.

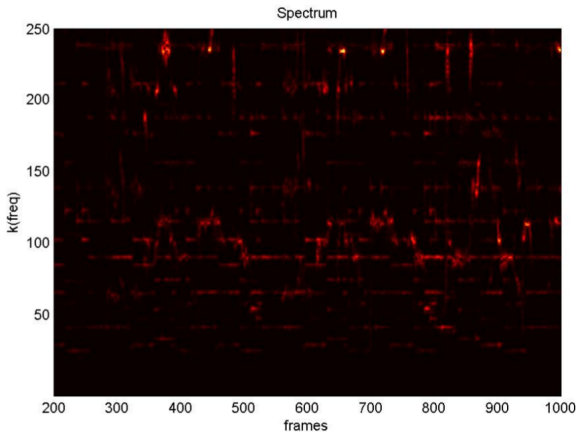


(на рисунке спектр участка с звучащей с ля-бемоль 1-й октавы)

Музыкальная транскрипция

Преобразования Фурье

Все произведение можно представить в виде спектрограммы.

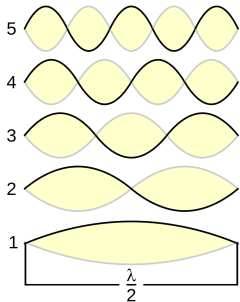


Музыкальная транскрипция

В чем же подвох?

Казалось бы - все просто, по спектрограмме ищем внезапно возросшие частоты наших синусоид и определяем, какие ноты для этого нажимались (потом объединяем в аккорды).

Но существует проблема:

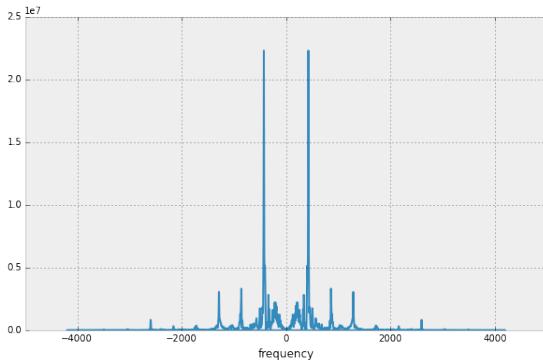


Обертон - колебания частей звучащего тела, которые создают звуки повышенной частоты в простом случае кратной начальной (гармонический обертон). Начальные 10 обертонов прослушиваются по высоте и сливаются друг с другом в аккорды. Уже первый обертон доставит нам не мало хлопот — как отличить при игре октаву (интервал) от обертонов? Помимо этого есть еще просто шум.

Музыкальная транскрипция

В чем же подвох?

Пример, рассмотренный ранее - звучит ля бемоль 1-й октавы.

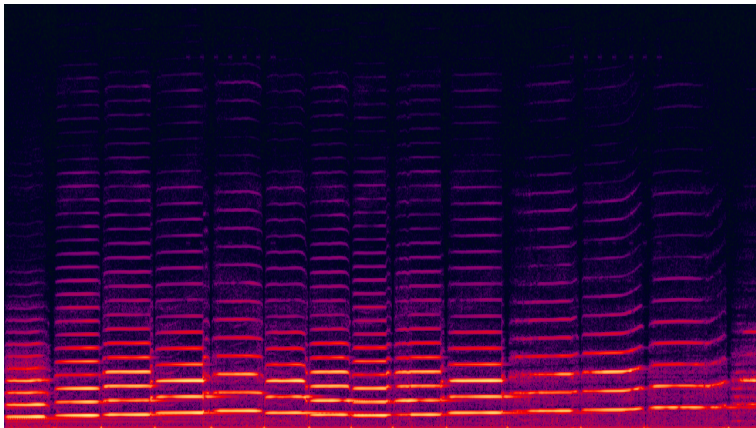


На графике заметны пики мощности, соответствующие первым двум обертонам нашего звука.

Музыкальная транскрипция

В чем же подвох?

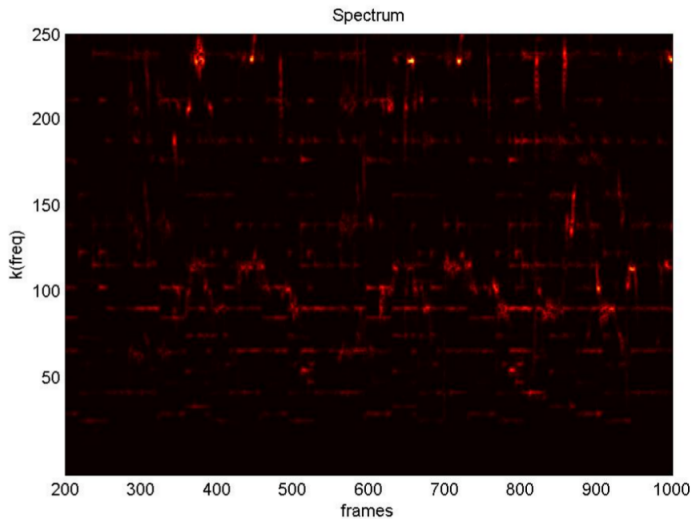
Пример — спектрограмма игры на скрипке (всего 4 струны).



- 1 **Анатомия музыки**
 - Происхождение звуков
 - Разделение звуков
 - Эталонная нота
 - Ноты в музыкальных инструментах
 - Итоговое звучание
- 2 **Цифровая звукозапись**
 - Дискретизация и квантование
 - Цифровые аудиоформаты
 - Общая схема
- 3 **Музыкальная транскрипция**
 - Постановка задачи и мотивация
 - Преобразования Фурье
 - В чем же подвох?
- 4 **Обзор существующих подходов**
 - Предобработка сигнала
 - Подходы к распознаванию
 - Сравнение результатов

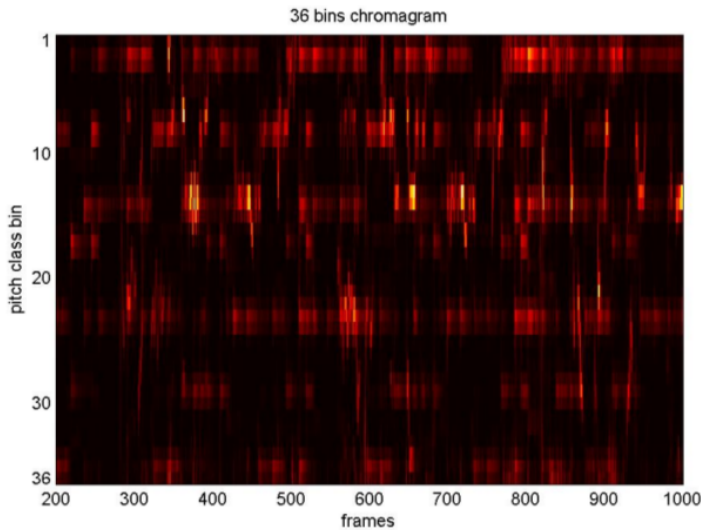
Обзор существующих подходов

Предобработка сигнала



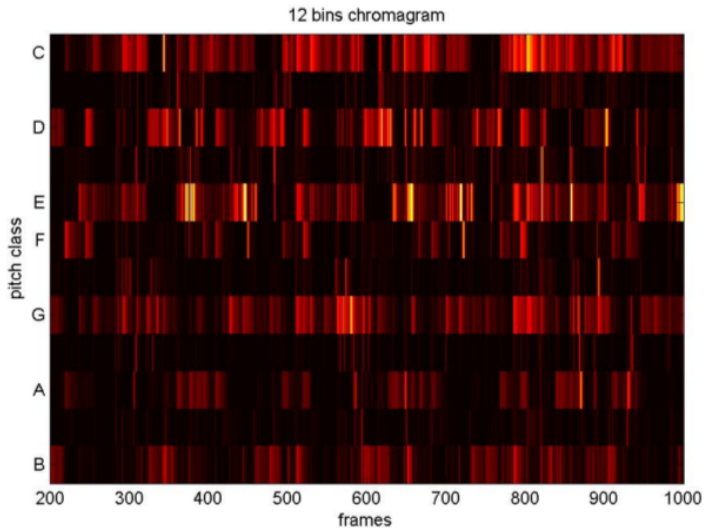
Обзор существующих подходов

Предобработка сигнала



Обзор существующих подходов

Предобработка сигнала



Обзор существующих подходов

Подходы к распознаванию

- E. Poliner, P. W. Ellis — A Discriminative Model for Polyphonic Piano Transcription (2006)
- M. Marolt — A Connectionist Approach to Automatic Transcription of Polyphonic Piano Music (2004)
- M. Ryyänen, A. Klapuri — Polyphonic Music Transcription Using Note Event Modeling for MIREX 2008
- A. Zalani, A. Mittal — Polyphonic Music Transcription: A Deep Learning Approach (2014)

Обзор существующих подходов

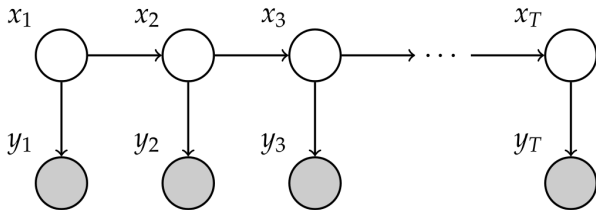
Подходы к распознаванию

Poliner, Ellis (2006)

- стандартный спектральный анализ
- 87 SVM-RBF-классификаторов One-vs-All
- пост-процессинг скрытыми марковскими моделями:

$$\prod_t p(c_t|q_t)p(q_t|q_{t-1}) \rightarrow \max$$

$$p(q_t|x_t) \propto p(x_t|q_t)p(q_t)$$



Обзор существующих подходов

Подходы к распознаванию

Poliner, Ellis (2006)



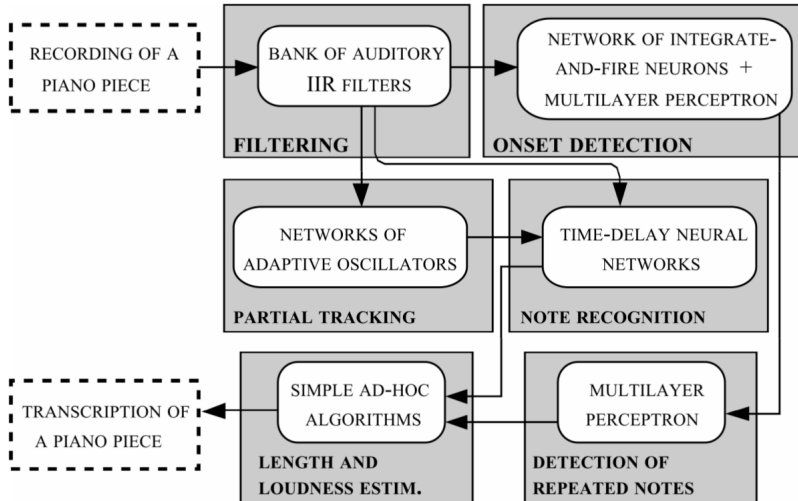
Marolt (2004)

- используются нейросети и их обобщения
- вводятся «адаптивные осцилляторы» для определения частот звуков
- с помощью особой синхронизации осцилляторов удается учитывать обертоны в музыке
- объединяя такие осцилляторы в сети, получем систему для отслеживания целых групп обертонов, т.е. фактически получаем необходимую транскрипцию

Обзор существующих подходов

Подходы к распознаванию

Marolt (2004)



Обзор существующих подходов

Подходы к распознаванию

Marolt (2004)

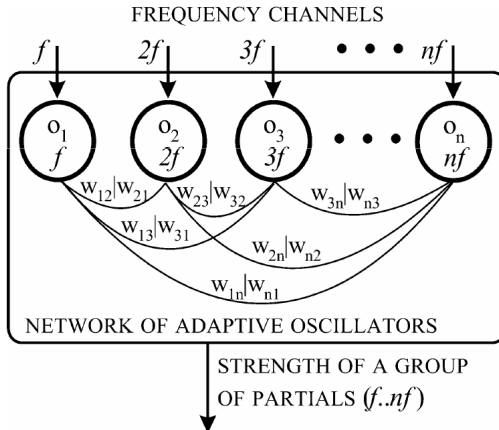


Fig. 3. A network of adaptive oscillators.

Обзор существующих подходов

Подходы к распознаванию

Marolt (2004)

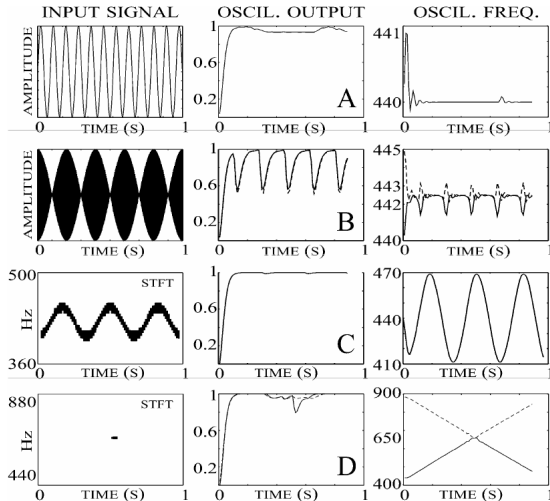


Fig. 2. Partial tracking with adaptive oscillators.

Ruynänen, Klapuri (2005)

- первичная обработка — multiple-F0 estimator
- НММ для нот, модель тишины и музыкологическая модель
- музыкологическая модель отвечает за поиск переходов между НММ и моделью тишины

Ryynänen, Klapuri (2005)

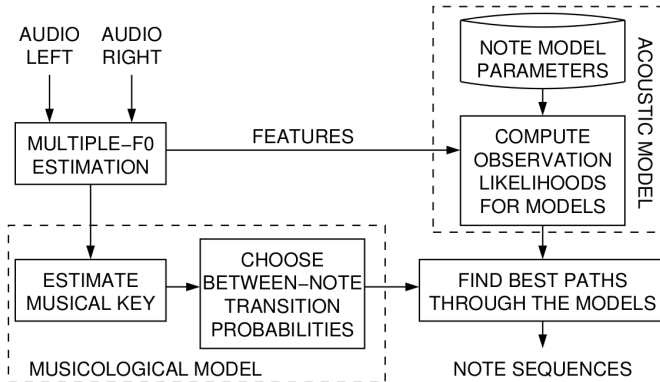


Figure 1. A block diagram of the transcription method.

Ryynänen, Klapuri (2005)

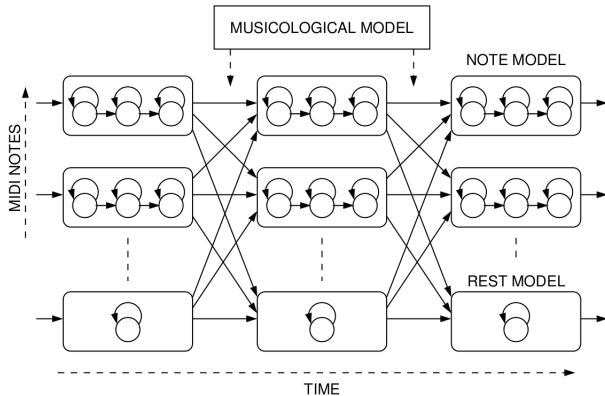


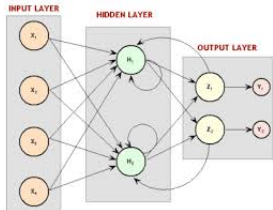
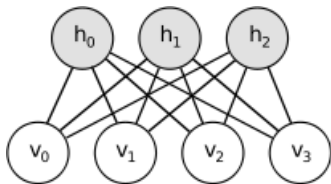
Figure 2. The network of note models and the rest model.

Обзор существующих подходов

Подходы к распознаванию

Zalani, Mittal (2014)

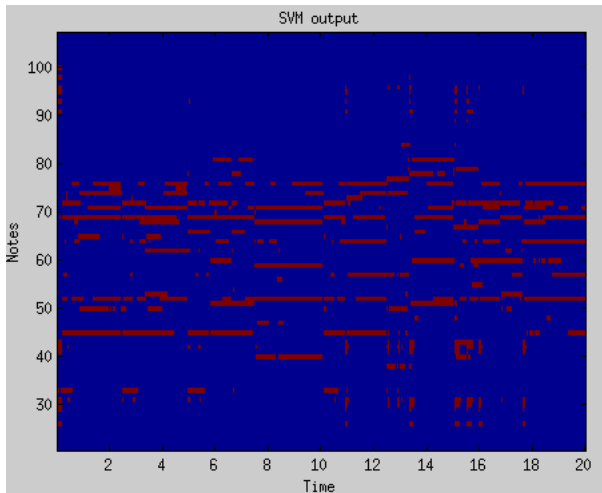
- RNN-RBM для обучения признаков
- STFT тоже учитывается как признаки
- 88 SVM-классификаторов One-vs-All
- пост-процессинг скрытыми марковскими моделями



Обзор существующих подходов

Подходы к распознаванию

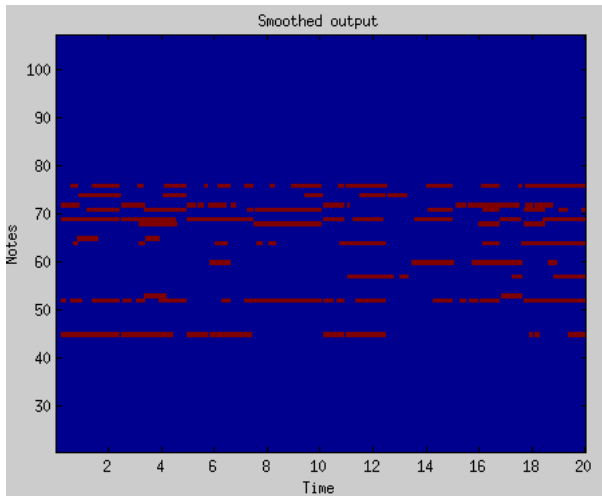
Zalani, Mittal (2014)



Обзор существующих подходов

Подходы к распознаванию

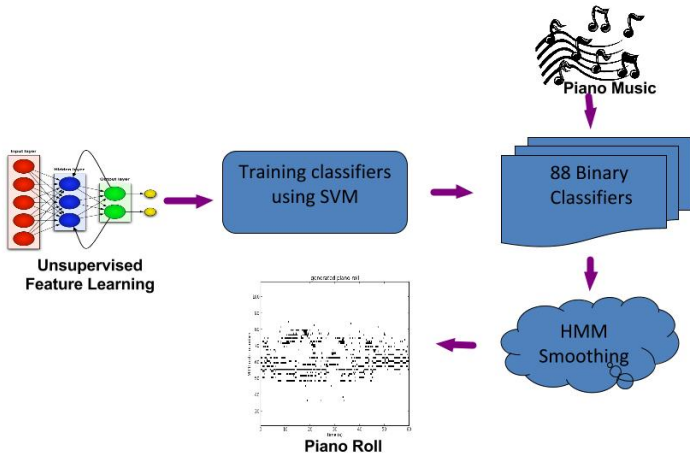
Zalani, Mittal (2014)



Обзор существующих подходов

Подходы к распознаванию

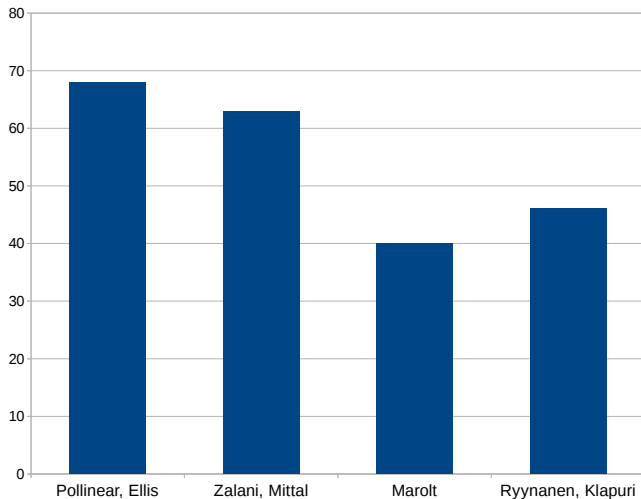
Zalani, Mittal (2014)



Обзор существующих подходов

Сравнение результатов

Точность распознавания (сравнение — Zalani, Mittal):



Спасибо за внимание!