**Нотная запись** – упорядоченный набор символов музыкальной нотации, предназначенный для того, чтобы передать на письме некий музыкальный материал.

**Синхронизация** – процесс автоматической обработки исполнения музыкальных композиций с целью отслеживания и отображения играемых нот в реальном времени.

Актуальность данной работы заключается в том, что методы существующих систем синхронизации работают предназначены высокопроизводительных системах и носят экспериментальный характер. А также в них нет оценки того, сколько ошибок совершает музыкант. Целью данной работы было создания упрощенного метода для работы на среднестатистическом компьютере пользователя и разработке алгоритма оценки, функционирующего в реальном времени.

Процесс синхронизации музыки и нотных записей состоит из этапов: преобразование звукового потока в последовательность дискретных состояний какой-либо модели, сопоставления полученных временных последовательностей и отображению пользователю текущей позиции, темпа и оценки. Таким образом, в данной работе были проанализированы алгоритмы данных этапов и реализован своя собственная методика на основе выбранных. Далее на основе полученной методики было реализовано ПО и провелись эксперименты.

За основу дискретного состояния был выбран идентификатор ноты в миди-формате, вычисляемый из характеристики фрагмента звукового сигнала, называемой частотой основного тона. Частота основного тона – наиболее ярковыраженная частота квазипериодического сигнала. Алгоритмы первого этапа делятся на алгоритмы во временной и частотных областях, такие как алгоритмы пересечения с нулем, автокорреляции, гармоническое перемножение спектров.

На основе анализа этих алгоритмов был разработан собственный алгоритм на основе автокорреляции, так как для него даже не требуется преобразование Фурье, с двумя модификациями, заключающимися в преобразовании входного звукового фрагмента на два: с низким и высоким разрешением, а также в интерполяции отсчетов методом Хермита для минимизации ошибок частот, особенно высоких, так как в таких звуковых фрагментах отсчеты могут оказаться не целыми числами. После вычисления ЧОТ происходит вычисление идентификатора ноты по следующей формуле в стандартном равнотемперированном музыкальном строе.

Алгоритмы второго этапа делятся на сопоставление строк, динамической трансформации времени и алгоритм Витерби на Скрытых Марковских Сетях. На основе их анализа был выбран модифицированный алгоритм Витерби. Однако данный алгоритм работает на Скрытой Марковской Модели.

В данном слайде описано как нотная запись может быть представлена в виде СММ. СММ – это упорядоченная пятерка, в которой N – количество возможных состояний процесса (в данном случае количество нот), M – количество возможных наблюдений при переходе от состояние в состояние (в данном случае все высоты нот или идентификаторов нот), A – матрица вероятностей перехода из состояния i в состояние j (в данном случае перехода из ноты в ноту), B – матрица вероятностей перехода из состояния i в состояние j по наблюдению o (в данном случае перехода из ноты в ноту по тону), pi – матрица вероятностей запуска состояния в процессе i (в данном случае в определенной ноте). Таким образом, одной из решенной задач было генерация матрицы A, B и pi на основе эмпирических величин.

Однако в построенной СММ оказалось два недостатка: различные длительности нот представлялись одним состоянием и невозможность допустимости вставки лишних неправильных нот.

Для решения первой проблемы было решено квантовать события в нотной записи на минимальные единицы, имеющие одинаковую продолжительность, названные в данной работе квантами.

А для решения второй проблемы к обычным состояниям были добавлены гостевые. Таким образом, количество состояний СММ стало равным данной формуле, в которой di – продолжительность нотного события i, k – количество квантов в одной четверти, а N – количество нот. Благодаря данным улучшением, в алгоритме Витерби стало возможным кодирование ошибок, представленных на рисунке справа, несмотря на значительное увеличение количества состояний.

Так как алгоритм Витерби имеет вычислительную сложность O(M\*N^2), он не применим в задачах реального времени, поскольку M (количество наблюдений) постоянно растет, а значит алгоритм с каждым шагом будет работать все медленнее. Поэтому была введена модификация, заключающаяся в ограничении M сверху константным значением и в ограничении N значением значительно меньшем чем общее количество квантов. Таким образом, был разработан алгоритм Витерби, функционирующем в окне. Также данный алгоритм был распараллен. Данные модификации позволили добиться такой сложности, что позволило использовать модифицированный алгоритм Витерби в реальном времени.

Для отслеживания ритма был создан простой и быстрый алгоритм, заключающийся в просчете средней разницы замеров времен не гостевых квантов, взятых в возрастающей последовательности в количестве 8 с последующим использованием полученного параметра для определения темпа.

Существующий алгоритм Прямого-Обратного хода на СММ не подошел для оценки степени синхронизации по следующим причинам. Поэтому был разработан собственный метод на основе данных требований.

Таким образом, была разработана следующая методика для оценки того, сколько ошибок совершил исполнитель в текущий момент. Она базируется на агентах. Первый агент просчитывает штрафные балы для квантов, второй – для нотных событий, а третий – для темпа. Стоит отметить что разработанная методика сейчас позволяет учесть октавные ошибки и залигованные ноты в реальном режиме без добавления дополнительных состояний в матрицу B.

Разработанная система состоит из модулей: Модуль СММ, Модуль разбора нотных записей, модуль обработки звука и модуль отрисовки. Система разработана с учетом требований кроссплатформенности.