

# Постановка и решение задачи оптимизации проектирования траекторий в тембральном пространстве

Г.Г. Рогозинский<sup>1, 3\*</sup>, А.А. Таранцев<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: gleb.rogozinsky@gmail.com

## Информация о статье

Поступила в редакцию 09.01.2020

Принята к публикации 29.01.2020

**Ссылка для цитирования:** Рогозинский Г.Г., Таранцев А.А. Постановка и решение задачи оптимизации проектирования траекторий в тембральном пространстве // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 1. С. 14–20. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-14-20

**Аннотация:** В статье дается определение, постановка и решение задачи проектирования траекторий между парами точек в многомерном тембральном пространстве. На примере пространства размерности 3 и заданного набора точек дается решение поставленной задачи с помощью метода Парето, а также мультипликативного и аддитивного критериев. Полученные результаты определяют методику проектирования тембральных пространств для систем неречевого звукового представления информации (сонификации).

**Ключевые слова:** системы синтеза звука, оптимизация по Парето, тембральные пространства.

## Введение

Системы сонификации направлены на представление информации в виде неречевых звуковых сигналов [1, 2, 3]. Как правило, используемые в таких системах классы звуковых сигналов отличаются от сирен и аналогичных им сигналов для оповещений о чрезвычайных ситуациях. Свойственные системам сонификации звуки характеризуются сложным тембральным составом, обусловленным необходимостью обеспечения комфортной акустической фоновой среды для оператора ситуационного центра и высоким значением параметрической мощности.

Как для промышленных приложений, обусловленных конкретными задачами, так и для приложений широкого класса важен методологический базис, который позволил бы максимально упростить и автоматизировать проектирование тембральных пространств.

Безусловно, синтез определенных звуковых объектов, которые бы: а) являлись хорошо отделимыми друг от друга; б) были устойчивыми к акустически зашумленной среде; в) были устойчи-

выми к прохождению через тракт воспроизведения и сопутствующие ему искажения; г) описывались в универсальных терминах какого-либо языка структурного аудио, – является, в первую очередь, задачей звукового дизайнера и/или программиста по звуку. Однако дальнейшие этапы разработки тембрального пространства являются в значительной мере более утилитарными задачами, что позволяет передать их системе автоматизированного проектирования.

Таковыми задачами являются оптимизация структуры алгоритма синтеза и обработки звука с целью исключения однократно или редко используемых модулей, оптимизация количества параметров алгоритма и т. д. Приемлемая заметность и/или отделимость одного класса звуковых объектов от другого обеспечивается не только самими звуковыми объектами, но и характером их динамики в тембральном пространстве [4].

В данной статье рассматривается задача оптимизации проектирования тембрального пространства, решение которой требует оптимального выбора взаимного расположения объектов в данном пространстве.

Вопросам анализа и проектирования тембральных пространств были посвящены работы Г. Альберсхайма [5], Дж.М. Грэя [6], С. Мак-Адамса [7], Р. Шеффера [8] и других акустиков. Значительный вклад в проектирование тембральных пространств был внесен в рамках подготовки стандарта ISO/IEC MPEG 7 [9]. В [10] рассматривается смежная область семантики библиотек звуков. Перечисленные выше исследования были, в основном, направлены на определение базиса тембрального пространства, позволяющего максимально однозначно описать тот или иной звуковой объект. Данная статья, в отличие от предыдущих работ, решает вопросы автоматизированного проектирования динамических звуковых объектов в заданном тембральном пространстве.

Дальнейшие рассуждения требуют определить ряд понятий.

### Определения

Пусть генерация звука, реализуемая в результате выполнения соответствующего алгоритма синтеза, определяется вектором из  $N$  параметров. Тогда  $N$ -мерное пространство, образованное соответствующими координатами, будем называть  $N$ -мерным тембральным пространством  $\Xi_N$  [4, 10, 11]. Таким образом, *размерность тембрального пространства* определяется количеством его параметров. Отметим, что данная величина может в значительной мере превышать реальное количество параметров, используемых в конкретной реализации алгоритма синтеза. В связи с этим, под размерностью тембрального пространства ниже будем понимать *фактическую размерность*, то есть размерность, определяемую исходя из количества параметров алгоритма синтеза звука, реально участвующих в формировании тембра.

Под *предельным шагом* измерения  $X$  будем понимать минимальное приращение значения по оси  $X$   $N$ -мерного тембрального пространства  $\Xi_N$ . Интерфейсы синтезаторов накладывают существенные ограничения на величину шага. Это в ряде случаев обусловлено необходимостью обеспечения совместимости со стандартом MIDI 1.0 [12], который определяет количество значений стандартного 7-битного контроллера как  $2^7$ .

Несмотря на то, что тембр, очевидно, является точкой  $\chi$  в  $N$ -мерном тембральном пространстве  $\Xi_N$ , на практике целесообразнее говорить о некоторой окрестности  $S$  вблизи точки  $\chi \in \Xi_N$ . Для этой окрестности характерна одинаковость (неотличимость) ощущения тембра с точностью до  $\sigma$ . В этой связи под тембром целесообразно понимать данную окрестность  $S$ , а под реализацией тембра – точку  $\chi$  из этой окрестности  $S$ .

В практике синтеза звука, как правило, имеют место нестационарные звуковые объекты, при формировании которых параметры алгоритма синтеза подвергаются различным модуляциям.

Таким образом, более общий случай существования звукового объекта как элемента тембрального пространства следует описывать траекторией движения внутри тембрального пространства  $\Xi_N$ .

*Тембральная траектория* – линия, проходящая через упорядоченную последовательность тембральных классов  $(T_i, T_{i+1} \dots T_j)$  и соединяющая звуковой объект  $A \in T_i$  и звуковой объект  $B \in T_j$ . Если  $A = B$ , то рассматриваемую тембральную траекторию будем называть замкнутой.

*Тембральный кластер* – два (и более) звуковых объекта  $S_1, S_2 \dots S_N$  из различных тембральных классов, таких что  $S_1 \in T_i, S_1 \in T_{i+1} \dots S_1 \in T_j, T_i \neq T_{i+1} \neq \dots \neq T_j$ , воспроизводимые параллельно. По крайней мере, понимаемые в одновременности, так как из-за различных параметров данные звуковые объекты, строго говоря, могут начинаться и/или заканчиваться несинхронно. Тембральный кластер характеризуется составом, коэффициентом полноты, т. е. отношением количества тембральных классов внутри кластера к общему количеству классов, максимальным и минимальным расстояниями внутри группы.

*Тембральная серия* (последовательность) – два и более звуковых объекта, воспроизводимых последовательно. Тембральная серия характеризуется составом серии, коэффициентом полноты (см. выше), периодичностью (при наличии повторяемости), равномерностью представления звуковых объектов.

На дальнейшую систематизацию и анализ тембральных серий или тембральных кластеров может быть распространен аппарат так называемой пост-тональной теории А. Форте, в свою очередь базирующейся на теории множеств.

На рисунке 1 [11] приведено  $N$ -мерное тембральное пространство  $\Xi_N$ , в котором начальный тембр задан окрестностью  $S_{\chi_i}$  и реализацией  $\chi_i$ . Финальный тембр (в момент времени  $t$  от начала формирования звука) задан окрестностью  $S_{\chi_j}$  и реализацией  $\chi_j$ . На рисунке показаны три различные траектории движения в тембральном пространстве между данными точками (и областями). В результате, каждая траектория приводит к формированию отдельного звукового объекта.

В практическом прочтении тембральная траектория, как правило, является результатом работы блока фильтров (например, ФНЧ с резонансом в области среза), а также различного тембрального морфинга, базирующегося на нелинейных преобразованиях. В этой связи, важное значение имеют начальная и конечная точки траектории. Применение определенных ограничений приводит к постановке задачи оптимизации в тембральном пространстве.

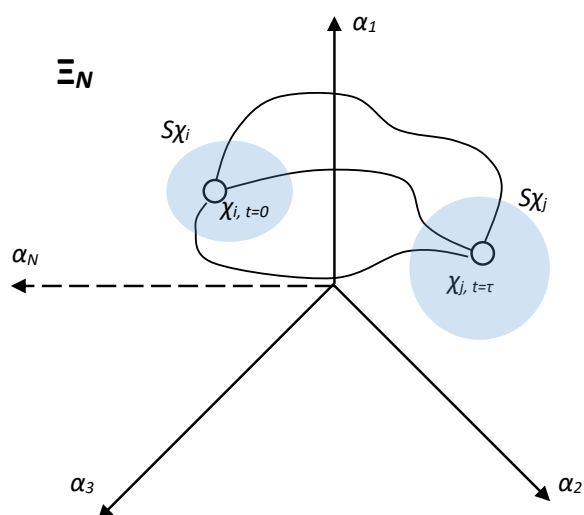


Рис. 1. Несколько траекторий формирования тембра в  $N$ -мерном тембральном пространстве  $E_N$

Fig. 1. Some Trajectories of Timbre Forming in the  $N$ -Dimensional Space  $E_N$

### Постановка задачи

В  $N$ -мерном пространстве заданы пары точек с координатами  $\{[k_1, k_2, \dots, k_N], [m_1, m_2, \dots, m_N]\}$  и  $\{[x_1, x_2, \dots, x_N], [y_1, y_2, \dots, y_N]\}$ . Требуется соединить данные пары траекториями так, чтобы эти маршруты не пересекались. Пересечение исключается, так как в противном случае один и тот же звук на некотором временном промежутке будет принадлежать разным траекториям, что способно привести к неоднозначности восприятия и, как следствие, принятию неправильного решения. Кроме того, между траекториями должен быть обеспечен как можно больший защитный интервал. При этом важна компактность гиперпараллелепипеда размерности  $N$ , образованного максимальными продолжительностями траекторий вдоль каждой из осей, так как компактность гарантирует локализацию траекторий в объеме  $V < V_0$  в пределе допустимых значений параметров.

Описываемые ограничения делают данную задачу внешне схожей с задачей проектирования печатных плат, где защитный интервал соответствует минимальному расстоянию между проводниками, а компактность коррелирует с размером платы. Тем не менее, принципиальным отличием является требование к длине траекторий. В случае с макетами печатных плат, минимальность длины проводника – важное условие оптимизации.

В то же время, в случае с траекториями в тембральном пространстве минимальность траектории означает малое изменение звука. Специфика систем компьютерной музыки заключается в том, что все без исключения системы (как программные, так и аппаратные) должны обеспечивать поддержку протокола MIDI. Каждый стандартный MIDI контроллер поддерживает изменение значений в диапазоне от 0 до 127.

Таким образом, нежелательно отклонение длины тембральной траектории от 128. Это будет означать, что возможно использование стандартного семиразрядного MIDI-контроллера в соответствующем диапазоне для управления перемещения звукового объекта вдоль выбранной траектории, что существенно упрощает использование стандартных контроллеров.

Таким образом, можно выделить три критерия оптимизации с соответствующими условиями:

- 1) критерий 1 – максимизация защитного интервала между тембральными траекториями;
- 2) критерий 2 – минимизация объема гиперпараллелепипеда, содержащего заданную группу тембральных траекторий;
- 3) критерий 3 – минимизация наибольшего абсолютного отклонения длины тембральной траектории от 128.

Задача в такой постановке является задачей дискретной многомерной локальной оптимизации, то есть решаемой для дискретного ограниченного набора решений. Ниже, начав с предельного случая для размерности 1, рассмотрим модель для частного решения поставленной задачи.

### Модель

Реальное количество размерностей в данной задаче определяется конкретной проектируемой системой, однако нам следует исключить размерность 1, при которой невозможно размещение двух отрезков  $x_1x_2$  и  $x_3x_4$ , без их хотя бы частичного наложения, если  $x_1$  и/или  $x_2$  принадлежат интервалу  $[x_3, x_4]$ . Размерность 2 (решение на плоскости) дает больше вариантов, однако при существовании двух точек  $A$  и  $B$ , таких, что каждая из них принадлежит противоположным сторонам прямоугольника, наличие траектории  $AB$  требует поиска обходных путей для всех других траекторий, образованных точками, разделенными траекторией  $AB$ , что противоречит изначальному смыслу тембральной траектории.

Для примера решения выберем трехмерное пространство как пространство с наибольшим числом размерностей, которое можно изобразить графически, не прибегая к специальным методам. Кроме того, трехмерная модель может быть наглядно реализована средствами систем компьютерного моделирования. Требование по защитному интервалу (критерий 1) фактически превращает траекторию  $l$  в трубку сечением  $D_l$ . На рисунках 2a и 2b представлены два решения подобной задачи. Первое является «наивным», пары точек соединены по кратчайшим расстояниям, что не позволяет достичь существенных значений защитных интервалов. 3D-моделирование выполнено в программе Blender версии 2.80.

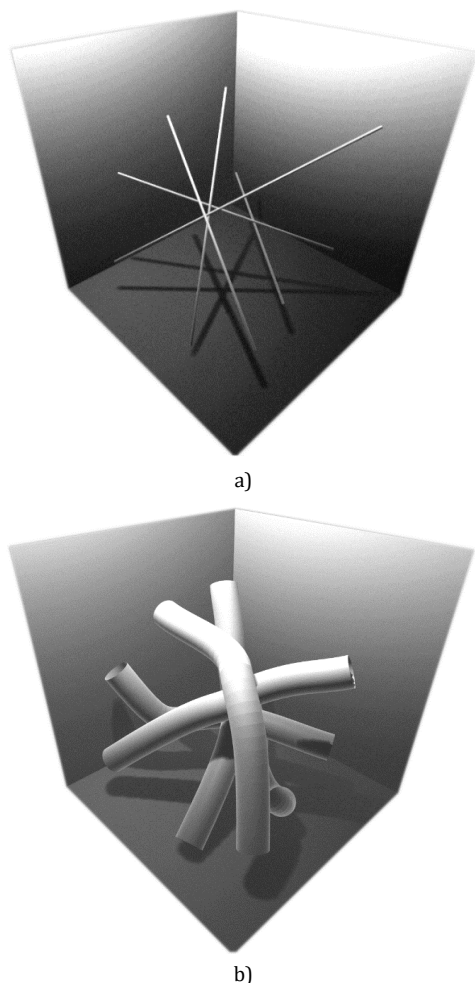


Рис. 2. Два решения задачи проектирования тембральных траекторий между заданными парами точек в трехмерном тембральном пространстве

Fig. 2. Two Solutions of Timbral Trajectory Projection Between Given Pairs of Points in 3D Space

Так же, как и более распространенная задача проектирования печатных плат, рассматриваемая в данной статье задача является задачей оптимизации в локальном смысле, т. е. для выбранного количества решений. Системы сонификации требуют от оператора знания используемого тезауруса звуковых символов, поэтому в процессе эксплуатации не должны подвергаться существенным изменениям.

В соответствии с выбранными критериями оптимизации, в задаче используются три параметра. Параметр  $X_1$  – максимальное значение диаметра трубки  $D_l$  вдоль траектории  $l$ , при котором еще не происходит пересечение каких-либо трубок между собой. Параметр  $X_2$  – максимальное значение модуля отклонения длины траектории  $l$  от 128:

$$X_2 = \max(\text{abs}(\|l_i\| - l_0)), \quad (1)$$

где  $l_0$  – номинальная длина траектории (128),  $\|l_i\|$  – длина траектории  $l_i$ .

Параметр  $X_3$  – относительный объем параллелограмма, включающего заданное множество траекторий  $l_i$ :

$$X_3 = V_j - V_{\min}, \quad (2)$$

где  $V_j$  – объем для решения  $j$ ;  $V_{\min}$  – объем для «наивного» решения, соответствующего соединению пар точек по кратчайшему расстоянию и являющийся минимальным.

В качестве примера возьмем 50 решений (таблица 1), среди которых будет найден оптимум по Парето [13]. Соответствующая трехмерная карта решений представлена на рисунке 3а, каждая из трех плоскостей решений  $X_1X_2$ ,  $X_1X_3$  и  $X_2X_3$  даны на рисунках 3б – 3д, соответственно.

ТАБЛИЦА 1. Варианты решений  
TABLE 1. List of Solutions

| №  | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | №  | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ |
|----|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|
| 1  | 0,03  | 3,37  | 0,00  | 26 | 0,16  | 1,25  | 10,40 |
| 2  | 0,12  | 2,71  | 2,96  | 27 | 0,18  | 0,99  | 8,10  |
| 3  | 0,18  | 3,40  | 3,76  | 28 | 0,16  | 0,94  | 8,22  |
| 4  | 0,19  | 3,28  | 16,09 | 29 | 0,19  | 1,37  | 13,03 |
| 5  | 0,15  | 3,45  | 5,19  | 30 | 0,05  | 2,11  | 7,89  |
| 6  | 0,17  | 1,84  | 2,85  | 31 | 0,06  | 1,11  | 10,43 |
| 7  | 0,12  | 1,20  | 4,82  | 32 | 0,13  | 1,78  | 17,03 |
| 8  | 0,09  | 0,82  | 8,97  | 33 | 0,11  | 2,04  | 10,44 |
| 9  | 0,17  | 0,82  | 21,23 | 34 | 0,17  | 0,94  | 8,11  |
| 10 | 0,14  | 1,29  | 4,50  | 35 | 0,15  | 0,91  | 4,47  |
| 11 | 0,09  | 1,80  | 3,04  | 36 | 0,21  | 2,04  | 13,02 |
| 12 | 0,19  | 1,28  | 5,16  | 37 | 0,11  | 2,06  | 16,23 |
| 13 | 0,01  | 1,33  | 1,50  | 38 | 0,19  | 1,54  | 3,87  |
| 14 | 0,20  | 1,35  | 3,04  | 39 | 0,12  | 1,44  | 3,87  |
| 15 | 0,17  | 1,04  | 4,27  | 40 | 0,11  | 1,42  | 2,49  |
| 16 | 0,14  | 2,70  | 22,81 | 41 | 0,17  | 5,77  | 8,45  |
| 17 | 0,11  | 1,74  | 4,05  | 42 | 0,14  | 5,82  | 8,45  |
| 18 | 0,16  | 1,42  | 4,16  | 43 | 0,14  | 2,02  | 2,61  |
| 19 | 0,11  | 1,46  | 3,34  | 44 | 0,11  | 3,50  | 1,36  |
| 20 | 0,10  | 1,90  | 2,94  | 45 | 0,08  | 3,50  | 1,36  |
| 21 | 0,14  | 1,41  | 3,56  | 46 | 0,08  | 3,49  | 2,39  |
| 22 | 0,19  | 1,62  | 3,56  | 47 | 0,09  | 1,42  | 2,39  |
| 23 | 0,20  | 1,67  | 4,00  | 48 | 0,14  | 1,88  | 2,39  |
| 24 | 0,12  | 1,33  | 3,02  | 49 | 0,14  | 1,48  | 4,45  |
| 25 | 0,21  | 1,27  | 12,58 | 50 | 0,15  | 1,50  | 6,05  |

Красным цветом на графиках и в таблице 1 выделены точки, принадлежащие границе оптимальности. Для данного множества решений таких точек 26. С целью определения оптимального решения (в таблице 1 выделено зеленым цветом) применим метод сверток. Использование мультипликативной свертки исключено, так как при «наивном» решении нулевое значение параметра  $X_3$  делает данное решение оптимальным вне зависимости от других параметров.



Аддитивная свертка, имеющая вид суммы:

$$P_a = \sum_{j=1}^M a_j y_j(x_j), \quad (3)$$

где  $a_j$  – весовой коэффициент при  $j$ -ом нормированном параметре;  $y_j$  –  $j$ -ый нормированный параметр. Сумма весовых коэффициентов должна быть равна 1. Значимость весового коэффициента  $a_j$  определяется его близостью к 1.

Для параметров, которые требуется увеличить ( $X_1$ ):

$$y_{ji} = \frac{x_{ji} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (4)$$

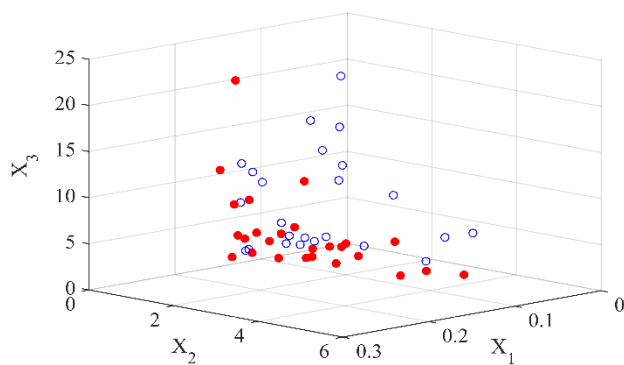
где  $x_j^{\max}$ ,  $x_j^{\min}$  – наибольшее и наименьшее значения  $j$ -го параметра по выборке из  $N$  решений.

Для параметров, которые требуется уменьшать ( $X_2$  и  $X_3$ ):

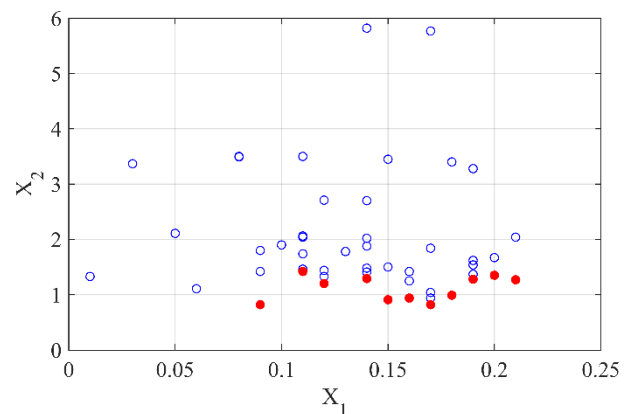
$$y_{ji} = \frac{x_j^{\max} - x_{ji}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (5)$$

В соответствии с аддитивной сверткой оптимальным принимается решение 14 (0,20; 1,35; 3,04),  $P_a = 0,90$ . При принятии в качестве более значимого параметра ширины защитного интервала  $X_1$  и, соответственно, увеличении весового коэффициента  $a_1$  значение  $P_a$  возрастает.

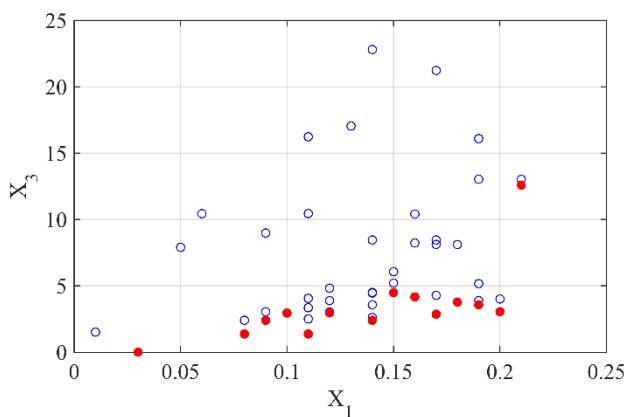
Таким образом, использование метода аддитивной свертки на множестве решений задачи оптимизации по Парето позволяет найти локальное оптимальное решение.



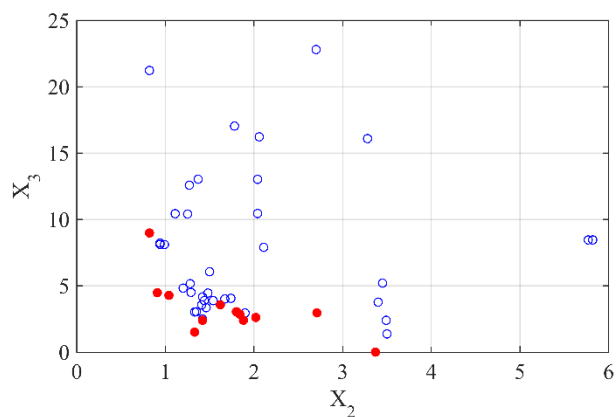
a)



b)



c)



d)

Рис. 3. Множество решений: трехмерная карта (a); плоскости  $X_1X_2$  (b),  $X_1X_3$  (c) и  $X_2X_3$  (d)

Fig. 3. Solution Space: 3D Map (a),  $X_1X_2$  Plane (b),  $X_1X_3$  Plane (c),  $X_2X_3$  Plane (d)

## Заключение

Полученное частное решение задачи оптимизации проектирования непересекающихся тембральных траекторий в пространстве размерности 3 дает основу для обобщения данного подхода на различные тембральные пространства произвольной размерности. В частности, в параметрических системах процедурного синтеза звука размерности могут достигать десятков и сотен (в

случае с мультиоператорным ФМ-синтезом, аддитивным спектральным ресинтезом или гранулярными инструментами), что приведет к многомерным моделям при необходимости алгоритмического проектирования, отображения и построения траекторий.

Существование метода оптимального проектирования тембральных пространств позволит автоматизировать процесс разработки звуковых тезау-

русов и оценки характеристик новых систем сонификации, в том числе, адаптивных к текущим задачам полимодального представления информации, например, на основе визуально-аудиальных пар.

Кроме того, результаты, изложенные в статье, являются актуальными для широкого класса систем генеративной музыкальной композиции, в том числе, для управления инструментами, выполняющими функцию бурдона (тона, выдержанного на протяжении значительной части формы), посредством изменений качественных характери-

стик звука, а также для задач интеллектуального управления сложными алгоритмами синтеза звука, например, для алгоритмического тембрального морфинга.

Представленный в статье подход может быть реализован в виде алгоритма непосредственно на языках компьютерного синтеза и обработки звука, например, Csound, SuperCollider или PureData, что в значительной мере упрощает проектирование будущих систем сонификации.

#### Список используемых источников

1. Hermann T., Hunt A., Neuhoﬀ J. The Soniﬁcation Handbook. Berlin: Logos Publishing House, 2011. 584 p.
2. Kramer G. An introduction to Auditory Display // In: G. Kramer (ed.) Auditory Display, Soniﬁcation, Audiﬁcation and Auditory Interfaces. Boca Raton: CRC Press, 1994. PP. 1–78.
3. Gaver W.W. Auditory Icons: Using Sound in Computer Interfaces // Human–Computer Interaction. 1986. Vol. 2. № 2. PP. 167–177. DOI: 10.1207/s15327051hci0202\_3
4. Iverson P., Krumhansl C.L. Isolating the dynamic attributes of musical timbre // J. Acoust. Soc. Am. 1993. Vol. 94. Iss. 5. PP. 2595–2603.
5. Albersheim G. Zur Psychologie der Toneigenschaften. Strassburg: Heltz, 1939.
6. Grey J.M. An exploration of musical timbre using computer based techniques of analysis, synthesis and perceptual scaling. Stanford: University of Stanford Press, 1975.
7. McAdams S., Winsberg S., Donnadieu S., de Soete G., Krimphoﬀ J. Perceptual scaling of synthesized musical timbres: Common dimensions, speciﬁcities, and latent subject classes // Psychol. Res. 1995. Vol. 58. Iss. 3. PP. 177–192. DOI:10.1007/BF00419633
8. Schaeﬀer P. In search of a concrete music. Berkley, CA: UC Press, 2012. 228 p.
9. ISO/IEC 15938-4: 2002. MPEG-7: Information Technology – Multimedia Content Description Interface – Part 4: Audio. 106 p.
10. Cherny E., Lilius J., Brusila J., Mouromtsev D., Rogozinsky G. An Approach for Structuring Sound Sample Libraries Using Ontology // In: Ngonga Ngomo AC., Křemen P. (eds) Knowledge Engineering and Semantic Web. KESW 2016. Communications in Computer and Information Science. Vol. 649. Cham: Springer, 2016. DOI:10.5281/zenodo. 56833
11. Рогозинский Г.Г. О решении задачи оптимального размещения звуковых объектов в N-мерных тембральных пространствах // T-comm. 2018. Т. 12. № 5. С. 54–58. DOI:10.24411/2072-8735-2018-10087
12. The Complete MIDI 1.0 Detailed Speciﬁcation V96.1, Second Edition. The MIDI Manufacturers Association, Los Angeles, 2001. 334 p.
13. Таранцев А.А., Шилин К.Ю. Методы многопараметрической оптимизации в задачах выбора решений. СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, ИПТ РАН, 2019.

\* \* \*

## On Statement and Solution of Optimization Problem of Timbral Space Trajectories Design

G. Rogozinsky<sup>1, 3</sup> , A. Tarantsev<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

<sup>2</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

<sup>3</sup>Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

#### Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-14-20

Received 9th January 2020

Accepted 29th January 2020

**For citation:** Rogozinsky G., Tarantsev A. On Statement and Solution of Optimization Problem of Timbral Space Trajectories Design. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(1):14–20. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-14-20

**Abstract:** This article presents the definition, the statement and the solution of problem optimization for the trajectory between pairs of points in multidimensional timbral space. We see the solution which is implemented on Pareto optimality multiplicative and additive criteria, based on the example of given point set and the space of dimension 3. For given point set and the space of dimension 3, we present the corresponding. The obtained results define the method of timbral spaces for the non-speech audial systems reporting, also known as the sonification systems.

**Keywords:** sound synthesis systems, Pareto optimality, timbral spaces.

## References

1. Hermann T., Hunt A., Neuhoﬀ J. *The Sonification Handbook*. Berlin: Logos Publishing House; 2011. 584 p.
2. Kramer G. An introduction to Auditory Display. In: G. Kramer (ed.) *Auditory Display, Sonification, Audification and Auditory Interfaces*. Boca Raton: CRC Press; 1994. p. 1–78.
3. Gaver W.W. Auditory Icons: Using Sound in Computer Interfaces. *Human–Computer Interaction*. 1986;2(2):167–177. DOI:10.1207/s15327051hci0202\_3.
4. Iverson P., Krumhansl C.L. Isolating the dynamic attributes of musical timbre. *J. Acoust. Soc. Am.* 1993;94(5): 2595–2603.
5. Albersheim G. *Zur Psychologie der Toneigenschaften*. Strassburg: Hertz; 1939.
6. Grey J.M. *An exploration of musical timbre using computer based techniques of analysis, synthesis and perceptual scaling*. Stanford: University of Stanford Press; 1975.
7. McAdams S., Winsberg S., Donnadiu S., de Soete G., Krimphoff J. Perceptual scaling of synthesized musical timbres: Common dimensions, specificities, and latent subject classes. *Psychol. Res.* 1995;58(3):177–192. DOI:10.1007/BF00419633
8. Schaeffer P. *In search of a concrete music*. Berkley, CA: UC Press, 2012. 228 p.
9. ISO/IEC 15938-4: 2002. MPEG-7: Information Technology – Multimedia Content Description Interface – Part 4: Audio. 106 p.
10. Cherny E., Lilius J., Brusila J., Mouromtsev D., Rogozinsky G. An Approach for Structuring Sound Sample Libraries Using Ontology. In: Ngonga Ngomo A.C., Křemen P. (eds) *Knowledge Engineering and Semantic Web. KESW 2016. Communications in Computer and Information Science*. Cham: Springer; 2016. vol.649. DOI:10.5281/zenodo.56833
11. Rogozinsky G.G. On solution of optimal sound objects placement problem in n-dimensional timbral spaces. *T-Comm*. 2018;12(5):54–58. DOI:10.24411/2072-8735-2018-10087
12. The MIDI 1.0 Specification V96.1, Second Edition. The MIDI Manufacturers Association, Los Angeles, 2001. 334 p.
13. Tarantsev A.A., Shilin K.Y. *Multiparameter optimization methods in decision making problems*. St. Petersburg: Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ.; 2019.

## Сведения об авторах:

**РОГОЗИНСКИЙ**  
**Глеб Гендрихович**

кандидат технических наук, начальник НОЦ «Медиацентр», доцент кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, старший научный сотрудник лаборатории проблем экологии транспортных систем Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, [gleb.rogozinsky@gmail.com](mailto:gleb.rogozinsky@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0001-5698-2347>

**ТАРАНЦЕВ**  
**Александр Алексеевич**

доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, заведующий лабораторией проблем безопасности транспортных систем Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, профессор кафедры организации пожаротушения и проведения АСР Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, [t\\_54@mail.ru](mailto:t_54@mail.ru)

## **РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

**05.12.04 – Радиотехника, в том числе  
системы и устройства телевидения**

**05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства  
и их технологии**

**05.12.13 – Системы, сети  
и устройства телекоммуникаций**

**05.12.14 – Радиолокация и навигация**

