

УДК 519.766.44

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РИТМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
НА МАТЕРИАЛЕ МУЗЫКАЛЬНЫХ ТЕКСТОВ

И. В. Бахмутова, Т. Н. Титкова

В в е д е н и е

В рамках сложившегося в Институте математики направления работ по исследованию символьных последовательностей на основе выявления повторяющихся отрезков текста авторы в течение нескольких лет занимаются компьютерным анализом музыкальных произведений (мелодий песен). Был разработан и апробирован на достаточно больших массивах музыкальных текстов метод обнаружения и классификации сходных музыкальных фрагментов произвольной длины [1], в основу которого положено понятие повтора, являющегося важным структурным элементом текстов любой природы. Первые эксперименты по анализу мелодий ограничивались поиском интервально-метрических закономерностей, характеризующих отдельные мелодии или группы мелодий [1].

Это позволило выявить сходство многих мелодий песен на интонационном уровне, так как интервально-метрическая структура является неким инвариантом, позволяющим такое сходство устанавливать. Однако оказалось, что не всегда удается на слух уловить сходство мелодий с одинаковой интервально-метрической структурой, если их ритмические рисунки различны. Это и обусловило наш интерес к исследованию ритмических закономерностей.

Кроме того, количественные исследования метроритмических закономерностей создают основу для выработки правил формального членения музыкального текста на отдельные фрагменты, являющиеся аналогами элементарных семантических единиц, существующих во всех языковых системах. Известные нам работы на эту тему [2,3] проводились в дедуктивном ключе и в них не в полной мере учитывались особенности метроритмической структуры, присущие реальным мелодиям. Наш подход, носящий индуктивный характер, учитывает в первую очередь эмпирические закономерности и может служить хорошим дополнением к дедуктивному подходу.

Целью работы является выявление закономерностей организации ритмической структуры на большом массиве мелодий, их интерпретация и сопоставление с результатами анализа интервально-метрических характеристик.

Полученные результаты могут быть непосредственно использованы при разработке схем синтеза машинных мелодий [4]. Можно надеяться, что отход от чисто дедуктивных схем синтеза придаст мелодиям большую естественность.

1. Описание эксперимента

Материалом для эксперимента послужили 216 песен советских композиторов ([5], подборка T_1) и 219 русских народных песен ([6], подборка T_2).

Для кодировки ритмической линии мелодии использовались числовые и буквенные символы. Ниже приведены элементы кодировки: o - 1, d - 2, \downarrow - 4, \downarrow - 8, \downarrow - 16, четвертная пауза (ξ) - $p4$, восьмая пауза (ζ) - $p8$ и т.д. Залигованные ноты обозначаются буквой "л", за которой следует символ, соответствующий длительности заливованной ноты, например, $4л4$ кодирует две слигованные четверти , а $4л8$ кодирует комбинацию  (такая кодировка используется для случаев, когда высоты обеих нот совпадают). Тактовая черта коди-

кодировке - 110 символам. Суммарный объем текста, используемого в эксперименте, составил около $3,8 \cdot 10^4$ символов.

Для каждой из подборок были получены полные и совместные частотные спектры, а также совместный частотный спектр для объединения $T_1 \cup T_2$.

Полный частотный спектр текста T_i , $i = 1, 2$, (обозначим его $\Phi(T_i)$) содержит информацию о всех повторах, присутствующих в текстах из T_i . Он состоит из совокупности частотных характеристик l -го порядка $\Phi_l(T_i)$, каждая из которых фиксирует повторы длины l ($l = 1, 2, \dots, l_{\max}$), где l_{\max} - длина максимального повтора.

Совместный частотный спектр подборки T_i , $i = 1, 2$, обозначаемый $\Phi^C(T_i)$, фиксирует все фрагменты, являющиеся общими хотя бы для двух текстов из T_i . Повторы, встречающиеся внутри одной мелодии, но не встречающиеся в других, не рассматриваются (они фигурируют в полном частотном спектре). Аналогично предыдущей конструкции, $\Phi^C(T_i)$ состоит из совокупности совместных частотных характеристик l -го порядка $\Phi_l^C(T_i)$, $l = 1, 2, \dots, l_{\max}$.

Совместный частотный спектр объединения $T_1 \cup T_2$, обозначаемый $\Phi^C(T_1, T_2)$, фиксирует все фрагменты, являющиеся общими одновременно для T_1 и T_2 . Повторы, встречающиеся только в T_1 или только в T_2 , не рассматриваются (они фигурируют в $\Phi^C(T_1)$ и $\Phi^C(T_2)$). Аналогично предыдущему случаю, $\Phi^C(T_1, T_2) = \{\Phi_l^C(T_1, T_2)\}$, где $\Phi_l^C(T_1, T_2)$ - совместная частотная характеристика l -го порядка подборок T_1 и T_2 .

Важнейшими характеристиками спектров являются значения параметров M_l , E_l^1 , $F_{\max}^{(l)}$, где $l = 1, 2, \dots, l_{\max}$; M_l - число различных l -грамм в $\Phi_l(T)$, E_l^1 - число

единичных l -грамм (не образующих повторы); $F_{\max}^{(l)} =$
 $= \max_{1 \leq i \leq M_l} (F_{il})$, где F_{il} - частота встречаемости i -й
 l -граммы из $\Phi_l(T)$.

Величина M_l характеризует мощность словаря l -грамм (связных цепочек из l символов) для текста T . Часть из них повторяется в тексте T многократно, другие встречаются однократно, т.е. являются уникальными. Количество последних (E_l^1) растет с увеличением параметра l . В мелодии уникальные l -граммы фигурируют как связи между повторяющимися фрагментами. Величина $(M_l - E_l^1)$ характеризует разнообразие повторяющихся l -грамм. Зависимость этой величины от l имеет максимум, положение которого определяется объемом текста (с увеличением объема максимум медленно смещается в сторону увеличения l). Параметр $F_{\max}^{(l)}$ характеризует частоту самой распространенной l -граммы в тексте. Эту l -грамму вместе с группой близких к ней по частоте l -грамм можно отнести к категории "бытующих", без использования которых трудно построить удобное для восприятия и запоминания музыкальное произведение.

Представленные ниже результаты касаются совершенных повторов в ритмической структуре, т.е. речь идет о точно совпадающих фрагментах. Несовершенные повторы в данной работе не рассматриваются, поскольку они тесно связаны с другой важной проблемой - варьированием, требующей отдельного анализа.

2. Описание результатов

2.1. Важнейшие характеристики полных частотных спектров M_l , E_l^1 , $F_{\max}^{(l)}$ представлены в таблице, которая иллюстрирует динамику изменения этих параметров с ростом l .

Вместо параметра M_l в таблице приведен параметр $(M_l - E_l^1)$, характеризующий число кратных l -грамм в тек-

сте. Значение M_1 , $l = 1, 2, \dots, l_{\max}$, легко получить, сложив элементы двух первых столбцов. Из таблицы видно, что мощность реального словаря для песен советских композиторов равна 25, а для русских народных песен - 21 при потенциальной мощности словаря порядка 40-50 элементов. Более интересен тот факт, что средняя мощность словаря для отдельной советской песни составляет 9 элементов, а для русской народной песни - 6 элементов. Таким образом, коэффициент использования словаря для всей подборки мелодий ниже потенциального вдвое, а для отдельных мелодий - в 4-5 раз.

Максимальная мощность словаря отдельных песен советских композиторов равна 13, а всего нашлось 29 из 216 песен с объемом словаря от 10 до 13 элементов, в то время как среди русских народных песен обнаружено лишь 9 из 219 песен, средняя мощность словаря каждой из которых составляет 8-12 элементов. Обратную картину наблюдаем для песен с минимальным объемом словаря равным 3. В их число попали 30 русских народных песен и лишь одна песня советских композиторов. Интересно отметить, что во всех этих песнях качественный состав словаря из трех элементов один и тот же, а именно:  - восьмая,  - четверть и тактовая черта. Длина этих песен в ритмической кодировке колеблется от 26 до 80 символов.

Параметр $M_1 - E_1^1$, характеризующий максимальное разнообразие повторяющихся 1-грамм, достигает своего максимума при $l = 9-10$, в то время как для интервально-метрических структур максимум выразительных средств музыкального языка приходился на $l = 4-5$. Заметим при этом, что средняя длина повтора в советских песнях для IS-представления равна 10, а для R-представления (ритмического) - 26 символом.

Сравнение словарей по частоте встречаемости элементов показывает, что на первых четырех местах в обоих словарях стоят одни и те же элементы, т.е. базисом построения ритмических ри-

сунков служат: ♩ - восьмая, ♪ - четвертная, тактовая черта, ♩ - шестнадцатая, а также ♩ - половинная, ♩ , ♩ . (речь идет о наиболее частых однограммах). При $l = 2$ часть комбинаций становится запретной, например, повтор "тактовая черта - тактовая черта", так как они бессмысленны с точки зрения музыкального языка. Интересно отметить, что начиная с $l = 2$, l -граммы, состоящие только из восьмых и восьмых с тактовой чертой, не уступают своего первенства по частоте встречаемости в T_1 до $l = 7$, а в T_2 (русских народных песнях) до $l = 17$. Аналогичную картину сохранения частотного места наблюдаем и для l -грамм, состоящих только из четвертных, четвертных с тактовой чертой или из четвертных и восьмых.

2.2. Самые длинные повторы, состоящие из наиболее высоко-частотных однограмм, имеют вид: $l = 20$: 8888=8888=8888=8888 (текст T_1), $l = 21$: (=8888)⁴, т.е. четырехкратное повторение элементов в скобках или 888888=888888=888888= (текст T_1). Повторы из четвертных длительностей: $l = 16$: =4444= =44444=44444= или $l = 24$: (=488)⁶ и т.п.

В [1] речь шла "о бытующих" интонациях, состоящих из самых частых однограмм, которые встречаются во многих произведениях разных авторов. По аналогии с ними можно говорить и о "бытующих" ритмических рисунках, которые также весьма распространены и очень просты по конструкции (см. примеры, приведенные выше), т.е. не отличаются оригинальностью, как и "бытующие" интонации.

2.3. Позиционно повторы можно разбить на две группы: разнесенные и зацепленные, т.е. с совпадающими концами: $\underline{\alpha\beta} \alpha$, $\beta \underline{\alpha}$.

Наиболее часто зацепленные повторы возникают при многократном повторении какого-либо фрагмента: $\underline{\alpha \alpha \alpha} \alpha$. Если длина повторяющегося фрагмента мала (например, 1-2 символа), то

зацепленные повторы будут сдвинуты относительно друг друга на 1-2 позиции, т.е. будут почти совпадать позиционно. Сравнительный анализ локализации максимальных ритмических и **IS**-повторов в мелодиях из T_1 показал следующее: **IS**-повторы четко разбиваются на две группы: 8% - зацепленные повторы и 92% - разнесенные. Ритмические повторы можно разделить так: 70% - зацепленные (из них 30% позиционно почти совпадающие) и 30% - разнесенные. Отсюда видно, что "разнесенность" повторов более характерна для **IS**-повторов (у них она в 3 раза выше), а ритмические повторы, особенно длинные, практически все зацепленные. Это относится и к выделенным в таблице (они обведены) самым длинным повторам - оба они зацепленные вследствие внутренней периодичности. Так, ритмический повтор длиной 125 символов в песне "В лесу прифронтовом" Блантера является пятикратной конкатенацией фрагмента длиной 25 символов (это примерно средняя длина ритмического повтора), а максимальный ритмический повтор в русской народной песне "Береза, береза" длиной 55 символов - также 6-кратная конкатенация фрагмента из 9 символов.

2.4. Ритмические повторы, являясь важными структурными элементами, нередко покрывают весь ритмический рисунок мелодии. В таких случаях рисунок удобно представлять в компактной форме, которую можно назвать ритмической схемой мелодии. Полный частотный спектр обеспечивает всю информацию, необходимую для построения схемы. В [4] уже шла речь о схемах мелодий, построенных на базе полного частотного спектра **IS**-повторов, т.е. об "интонационных" схемах. Имея полные частотные спектры ритмических повторов для каждой мелодии из T_1 и T_2 , мы попытались, где это возможно, построить "ритмические" схемы мелодий. Например, ритмическая схема песни "Не слышно шуму городского" (длина 56 символов) имеет вид: **XX**, где **X** - повтор из 28 символов, а ритмические схемы песен "Из-под дуба, из-под

вяза" и "Посев лебеду" выглядят так: XXY , где X - повторы длиной 11 и 8 символов, а Y - повторы длиной 9 и 11 символов соответственно.

Среди ритмических схем, составленных для 219 русских народных песен, преобладают схемы типа: а) XX , XXX' или XXX' , где X' - варьированный X -повтор, б) XYX , в) YXY , г) YXX . Столь же четкие ритмические схемы встречаются и среди песен советских композиторов, но значительно реже. Среди советских песен довольно много песен с более сложными структурами схем, например, типа: $X^2Y^2Z^2W^2 = X^2YZZW, X^2Y^4Z^3, X^2Y^2XZ^4$, где X, Y, Z, W - ритмические повторы различной длины. Для русских народных песен такие ритмические построения не характерны.

Заметим, что наиболее точные схемы мелодий, как интонационные, так и ритмические, можно будет составлять, перейдя к поиску несовершенных (варьированных) повторов, используя при этом метод, уже апробированный на генетических и музыкальных текстах [7,8].

2.5. После составления ритмических схем мелодий был проведен анализ ритмических структур схем типа XX русских народных песен длиной 8 тактов. Выбор только 8-тактовых мелодий объясняется тем, что в работах по машинному синтезу мелодий [9] алгоритм рассчитан именно на такой вид ритмической структуры. Алгоритмом предусмотрено и введение правил, задающих повторность ритмических фигур мелодии, причем запрограммированы 4 варианта повторности: $S_{R_1} = 1111$, $S_{R_2} = 1122$, $S_{R_3} = 1212$ и $S_{R_4} = 1221$, где одна цифра соответствует одному двутакту, а одинаковые цифры означают, что во всех этих двутактах повторяется один и тот же ритмический рисунок. Например, в S_{R_1} все четыре двутакта имеют одинаковый ритмический рисунок, в S_{R_2} для первых двух двутактов он один, а для двух других - иной.

Для сопоставления было отобрано 13 мелодий длиной 8 тактов с вышеописанной структурой (столько нашлось среди 219 песен). Представив схемы этих мелодий в виде ритмических структур, мы получили следующие результаты: самой распространенной ритмической структурой в русских народных песнях является S_{R_3} (7 песен); другие ритмические структуры имеют вид: 1112, 1213, 1234, 1232, 1223. Таким образом, эксперимент показывает, что сочинение 8-тактовых мелодий по четырем вышеприведенным ритмическим структурам плохо согласуется с реальностью.

Еще более пеструю картину ритмических структур имеем для мелодий из 16 тактов, где возможны такие ритмические структуры из двутактов: 11121312 или 12341564 (разные цифры соответствуют разным ритмическим рисункам двутактов). При машинном синтезе мелодий повторность ритмических фигур не сводится к точному их копированию. Благодаря случайному выбору других элементов мелодии при повторности обеспечивается некоторая вариативность. Хотелось бы заметить, что такое варьирование носит искусственный характер и вряд ли обеспечит "естественность" звучания синтезированной мелодии. Более полезным представляется исследовать закономерности ритмического варьирования на реальном материале большого объема и создать базу ритмических заготовок (полученных экспериментально), использование которой при машинном синтезе мелодий могло бы приблизить звучание синтезированных мелодий к народным или сочиненным композиторами.

2.6. В [3] упоминалось и о "малоповторных" мелодиях, к которым были отнесены мелодии с небольшим числом повторов длины не более трех символов. Построение схем мелодий для них затруднительно. Такие малоповторные в ритмическом отношении мелодии встретились и в T_1 , и в T_2 . В их число попало 15 русских народных песен и 9 песен советских композиторов. Надо заметить, что их интонационная малоповторность часто компенсируется ритмической повторностью: например, в песне Туликова "Курский со-

ловей" **IS**-повтор длины 4 компенсируется ритмическим повтором длиной в 35 символов, причем разнесенным. Однако есть и другие примеры: песня В.Макарова "Широки поля под Сталингра - дом" демонстрирует малоповторность на обоих уровнях: **IS**-повтор длины 4 и два ритмических повтора длины 7 (при средней - 26), причем один из них зацепленный (с наложением). То же самое можно сказать и о песне Дм. и Дан. Покрасов "Прощание": **IS** -повтор длины 4, **R**-повтор длины 10. Возможным следствием малоповторности мелодий на интонационном и ритмическом уровнях является затрудненность их запоминания и восприятия, что, в свою очередь, может сказаться на популярности мелодий.

2.7. Выше уже говорилось о получении совместных частотных спектров для T_1, T_2 и $T_1 \cup T_2$. В предыдущих экспериментах [1] совместные частотные спектры послужили материалом для исследования заимствований и самозаимствований интонационных структур, которые больше, чем другие структуры (ритмическая, длительностная, ладовая) отражают "индивидуальность" мелодии, интонационную манеру композитора. Оказывается, что композиторы склонны также использовать в разных песнях одинаковые ритмические рисунки довольно большой длины. Причем речь идет не только о ритмических рисунках, характерных для какого-либо жанра (например, Дунаевский часто переносит одинаковые ритмические фрагменты из одного марша в другой: "Марш энтузиастов" и "Физкультурный марш" имеют ритмический повтор длиной 20 символов, "Марш трактористов" и "Спой нам, ветер" имеют ритмический повтор длины 25). Бывает, что довольно длинные общие ритмические рисунки используются в совершенно противоположных по характеру мелодиях: лирическая песня "Соловьи" и маршеобразная "Пора в путь-дорогу" Соловьева-Седого имеют повтор длины 29, "Эх, хорошо" и "Далеко-далеко" Дунаевского содержат повтор длины 21; "Песня о Волге" и "Заветный камень" Мокроусова содержат повтор 20 символов.

Интересен и тот факт, что для некоторых самозаимствований, приведенных в [1], совпали и ритмические рисунки. Например, в песне Соловьева-Седого "Поет гармонь за Вологдой" и "Моя родная сторона" совершенный **IS**-повтор длины 10 имеет сходные ритмические рисунки с переменным метром (определение "сходные", а не "одинаковые" употреблено потому, что песни написаны на разный размер $3/4$ и $3/8$, но это не меняет характер ритмического рисунка).

2.8. Многообразие ритмических повторов, общих для двух и более мелодий, очень велико и для T_1 , и для T_2 . Мы разбили их на группы в соответствии с размером - группы ритмических повторов на $2/4$, $3/4$, $4/4$ (числитель дроби указывает число длительностей в такте, а знаменатель - величину длительности), чтобы иметь возможность качественно сравнить эти многообразия, ограничившись поэторами длиной от 16 до 26 символов.

Следует отметить, что если численное разнообразие ритмических повторов на $2/4$ в русских народных песнях больше, чем в советских, то для размера $4/4$ имеем обратную картину. В русских народных песнях отсутствуют синкопированные ритмические рисунки, характерные для маршей, гимнов и песен аналогичных жанров. Это естественно, так как русские народные песни, в основном, лирические или шуточные. Ниже для наглядности приведены группы ритмических повторов на $3/4$, обнаруженные при анализе совместных частотных спектров T_1 и T_2 . В эти группы вошли повторы длиной от трех до шести тактов (16-25 символов). Число повторов, представленных в этих группах, невелико, ритмические рисунки в них различны (рис.2). Совместная обработка текстов T_1 и T_2 дает возможность сопоставить множества ритмических повторов, характеризующих не только песни разных эпох (русские и советские), но и разных жанров (лирические, марши, гимны). Оказалось, что пересечение этих множеств очень мало для повторов длиной от 11 до 26 символов. Начиная с $l =$

Русские народные песни



Советские песни



Рис. 2

= 27, ритмические повторы встречались лишь в одном тексте. Всего в пересечение попало 7 русских и 7 советских песен. Качественно эти общие для T_1 и T_2 ритмические повторы можно отнести к "бытующим". Так, повтор длиной 26 символов, общий для песни Милютина "Сирень-черемуха" и русской песни "Меж крутых бережков", имеет вид:  ⁵, а повтор длины 16 в

песне Захарова "Вдоль деревни" и русской песне "Не будите меня молодую" выглядит так: . Этот несколько неожиданный результат для данных такого объема наглядно свидетельствует о различии ритмических языков русских народных и советских песен.

2.9. Во введении уже упоминалось о работах по сегментации текста, базирующихся на выделении строго определенных единиц **Р**-мотивов, членящих мелодию однозначно и без пропусков. Обычно мелодия делится на непересекающиеся **Р**-мотивы [3].

На первый взгляд, предлагаемая сегментация ритмического рисунка кажется естественной, но экспериментальная обработка ритмических рисунков песен советских композиторов и русских народных песен показывает, что разбиения такого рода приводят к разрушению устойчивых образований, которые можно условно называть "семантическими единицами". В качестве примера можно привести комбинацию , которая, по алгоритму членения Бороды М.Г., разбивается посередине, в то время как частота встречаемости  и  в нашем массиве одинакова, т.е. комбинация  неразбиваема (аналогично буквенному сочетанию "qu" в английском языке).

З а к л ю ч е н и е

Получены и проанализированы статистики ритмических структур мелодий 435 песен, участвовавших в эксперименте. Проведено сопоставление этих результатов с результатами анализа интервально-метрических характеристик. Наибольший интерес представляют итоги сравнения количественных оценок повторности на интервально-метрическом и ритмическом уровне, а также качественные различия ритмических закономерностей в песнях разных эпох и жанров.

Получены частотные словари элементарных и производных от них ритмических единиц, которые могут быть использованы для

сегментации текста, составления схем мелодий и служить базой ритмических заготовок при машинном синтезе мелодий.

Дальнейшее исследование закономерностей варьирования ритмических рисунков с помощью аппарата несовершенных повторов позволит получить не имеющие аналогов данные, которые можно использовать в программах, имитирующих деятельность композиторов.

Л и т е р а т у р а

1. БАХМУТОВА И.В., ГУСЕВ В.Д., ЗАРИПОВ Р.Х., ТИТКОВА Т.Н. Выявление и анализ сходных фрагментов в музыкальных произведениях //Анализ символьных последовательностей. - Новосибирск. - 1985. - Вып. 113: Вычислительные системы. -С. 3-45.

2. БОРОДА М.Г. К вопросу о метроритмической элементарной единице в музыке //Сообщение АН ГССР. - 1973. - Т.71, № 3.

3. БОРОДА М.Г. О некоторых закономерностях ритмической повторности в народной и профессиональной музыке //Комплексное изучение музыкального творчества: концепции, проблемы, перспективы. - Тбилиси, 1985. -С. 76-97. (Сб. науч. тр.).

4. БАХМУТОВА И.В., ГУСЕВ В.Д., ТИТКОВА Т.Н. Поиск и классификация несовершенных повторов в мелодиях песен // Квантитативная лингвистика и автоматический анализ текстов.- Тарту, 1988.- С.20-32 (Учен.зап.Тартуского госуниверситета,вып.827).

5. Русские песни. Выпуск 3. Песни советских композиторов. - Л.: Музгиз, 1955.

6. Русские народные песни. - М.: Музыка, 1985.

7. ГУСЕВ В.Д., КУЛИЧКОВ В.А., НИКУЛИН А.Е. Алгоритмы поиска несовершенных повторов в генетических текстах //Анализ символьных последовательностей. - Новосибирск. - 1985. - Вып. 113: Вычислительные системы. - С. 107-122.

8. БАХМУТОВА И.В., ГУСЕВ В.Д., ТИТКОВА Т.Н. Закономерности варьирования в текстах различной природы и методика их количественного исследования //Анализ текстов и сигналов.-Новосибирск.- 1987. - Вып. 123: Вычислительные системы. -С. 25-49.

9. ЗАРИПОВ Р.Х. Кибернетика и музыка. -М.: Наука, 1971.

Поступила в ред.-изд.отд.

16 сентября 1991 года