

УДК 004.8

## **Л-системы в музыке**

*Фазылова Э.Ф., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Системы обработки информации и управления»*

*Научный руководитель: Гапанюк Ю. Е., доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Системы обработки информации и управления»  
[gapyu@bmstu.ru](mailto:gapyu@bmstu.ru)*

### **Организация процесса решения задачи**

Основные направления искусственного интеллекта: экспертные системы, нейронные сети, естественно-языковые системы. Рассмотрим более подробно экспертные системы. При решении конкретных задач человек опирается на собственный или чужой опыт. Человеческий опыт – это сложная смесь теоретических знаний, эвристических правил, примеров прошлых проблем и их решений, навыков восприятия и интерпретации, а также других аспектов, которые можно описать как интуитивные. С годами человек-эксперт вырабатывает очень точные правила поведения в обычных ситуациях. Часто эти правила принимают форму прямых ассоциаций между наблюдаемыми явлениями (симптомами) и окончательными результатами (диагнозами), скрывая их более глубокие причинно-следственные связи.

Экспертная система (система, основанная на знаниях) – это программа, аккумулирующая знания специалистов (экспертов) в определенной предметной области и оперирующая знаниями с целью выработки рекомендаций или решения проблем.

В основе экспертной системы находится обширный запас знаний о конкретной проблемной области. В большинстве случаев эти знания организуются как некоторая совокупность правил, которые позволяют делать заключения на основе исходных данных или предположений. Обобщенно традиционные системы можно представить соотношением «Данные + Алгоритм = Система», а интеллектуальные информационные системы (в частности ЭС) – «Знания + Вывод = Система». К экспертным системам, основанным на знаниях и заданных наборах правил, относятся Л-системы.

## Л-системы

Л-системой называют набор, состоящий из алфавита, аксиомы, и множества правил.

Как только Л-система определена, она начинает развиваться в соответствии с её правилами. Начальным состоянием Л-системы является её аксиома. При дальнейшем развитии эта строка, описывающая состояние, будет меняться. Развитие Л-системы происходит циклически. В каждом цикле развития строка просматривается от начала к концу, символ за символом. Для каждого символа ищется правило, для которого этот символ служит предшественником. Если такого правила не нашлось, символ оставляется без изменений. Иными словами, для тех символов  $X$ , для которых нет явного правила, действует неявное:  $X \rightarrow X$ . Если же соответствующее правило найдено, символ-предшественник заменяется на строку-последователь из этого правила.

Фрактальные множества, и, в частности, фрактальные кривые, замечательны тем, что их части в некотором смысле подобны целому множеству. Это их свойство называется самоподобием. Рассмотрение любого фрагмента фрактального множества под микроскопом при любом увеличении даёт картины, содержащие многочисленные копии (возможно, немного искажённые) исходного множества.

Возвращаясь к Л-системам и проводя аналогию с фракталами, можно сказать, что Л-система оперирует со строкой символов по специальным правилам, начиная с первоначальной простой аксиомы. Таким образом, Л-система является математической грамматикой. Но фундаментальное отличие Л-систем от формальных грамматик состоит в том, что правила применяются одновременно ко всей строке, к каждому символу, плюс, нет понятий терминальных и нетерминальных символов. То есть «вывод» по этой грамматике может продолжаться бесконечно. Рассмотрим различные виды Л-систем:

- Простейшие Л-системы

Самым простым примером являются детерминированные контекстно-свободные Л-системы или сокращенно DOL. Есть некоторый набор символов — алфавит. Этим алфавитом записывается строка, с которой работает Л-система. Есть аксиома — первоначальная строка из одной или более буквы и набор правил вида  $a \rightarrow ab$ . Во время каждой итерации алгоритма, применяя правило к букве из текущей строки, буква заменяется на набор букв справа от стрелки.

Пусть наш алфавит состоит из следующих символов, каждый из которых обозначает некоторую клетку:  $al$   $ar$   $bl$   $br$ .

Аксиома состоит из одного символа:

$\omega$ : ar

И четырех правил.

p1: ar  $\rightarrow$  albr

p2: al  $\rightarrow$  blar

p3: br  $\rightarrow$  ar

p4: bl  $\rightarrow$  al.

- **Стохастические L-системы**

Стохастические L-системы добавляют возможность задания вероятности выполнения того или иного правила, и в общем случае не являются детерминированными, ибо разные правила могут иметь один и тот же символ слева. Это вносит некоторый элемент случайности в получающиеся структуры.

- **Контекстно-зависимые L-системы**

Так же, как и контекстно-зависимость в формальных грамматиках, в L-системы синтаксис правил усложняется и принимает во внимание окружение заменяемого символа.

- **Параметрические L-системы**

К каждому символу добавляется параметр-переменная, возможно не одна. Пример параметрической L-системы.

$\omega$ : B(2)A(4, 4)

p1: A(x, y) : y  $\leq$  3  $\rightarrow$  A(x \* 2, x + y)

p2: A(x, y) : y > 3  $\rightarrow$  B(x)A(x/y, 0)

p3: B(x) : x < 1  $\rightarrow$  C

p4: B(x) : x  $\geq$  1  $\rightarrow$  B(x - 1)

Параметрические контекстно-зависимые L-системы позволяют моделировать рост многоклеточных организмов и растений с учетом биохимических процессов и окружающей среды.

### **Теория хаоса. Самоподобие в алгоритмической композиции.**

Теория хаоса — математический аппарат, описывающий поведение некоторых нелинейных динамических систем, подверженных при определённых условиях явлению, известному как хаос (динамический хаос, детерминированный хаос). Поведение такой системы кажется случайным, даже если модель, описывающая систему, является детерминированной.

В контексте разнородной области теории хаоса алгоритмической композиции часто присваиваются разные подходы, связанные с музыкальной реализацией дробного шума, отображением фракталов и аттракторов, а также с различными аспектами самоподобия. Не рассматривая теорию хаоса в целом, самоподобные структуры в области алгоритмической композиции можно очень хорошо смоделировать с помощью систем Линденмайера, которые, аналогично генеративной грамматике, делают возможной реализацию сложных композиционных решений.

Часто применяемая форма генерации музыкальной структуры из области теории хаоса использует различные формы того, что известно как дробный шум. Данный термин описывает различные формы шума, различающиеся по своей спектральной плотности, выражая распределение мощности шума с частотой. Белый шум характеризуется отношением  $1/f$  и описывает стохастический процесс некоррелированных случайных значений. Как и в случае с повторно бросаемыми костями, числа на сторонах костей никак не связаны друг с другом. Высоко коррелированным вариантом, означающим, что значения в последовательности сильно зависят друг от друга, является броуновский шум показывающий спектральную плотность  $1/f$ . Наиболее интересной формой, касающейся генезиса музыкальной структуры, является розовый шум, также называемый  $1/f$ -шумом, поведение которого находится где-то между вышеупомянутыми крайними значениями.

При музыкальном отображении, например, по высотам звука, характеристики розового шума представляются в виде прогрессии, в которой ступенчатое движение и мелодичные скачки находятся в сбалансированном соотношении. Рихард Ф. Фосс и Джон Кларк описали характеристики спектральной плотности в записях различных музыкальных жанров и показали их параллели с особенностями  $1/f$ -шума: «Наблюдения за музыкой указывают на то, что  $1/f$ -шум является хорошим выбором для стохастической композиции. Композиции, в которых частота и длительность каждой ноты определялись источниками  $1/f$ -шума, имели приятное звучание. Композиции, которые создавались источниками белого шума, звучали слишком беспорядочно и хаотично, в то время как те, что создавались  $1/f$  шумом, звучали слишком коррелированно». Фосс и Кларк распространили свою одномерную модель на двухголосовую структуру, которая является частично коррелированной и ритмическая форма которой также может быть разработана с использованием  $1/f$ -шума. На основе трудов Фосса и Кларка Чарлз Додж и Томас А. Джерс описали генерацию  $1/f$ -последовательностей и привели примеры музыкальных отображений этих различных форм шума. Додж описал музыкальную структуру, состоящую из трех мелодических строк (голосов) на основе  $1/f$ -шума. Для каждой строки

определяется конкретное число разных классов высоты звука, которые должны быть произведены выходом 1/f-шума. Это означает, что новые классы высоты звука производятся до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое количество разных значений. После того как таким образом будет генерирована первая строка, программа создаст вторую строку с помощью той же процедуры: для каждой ноты в первой строке производится последовательность нот второй строки, пока не будут генерированы все ноты второй строки. Этот процесс осуществляется также для генерации третьей строки путем создания последовательности нот третьей строки для каждой ноты во второй строке. Результатом является трехголосовая структура возрастающей плотности. Для определения текущих длительностей создается четвертая строка, ноты которой, однако, не включены в партитуру, но определяют ритмическую длину для каждой ноты третьей строки. Если, например, первой ноте третьей строки будут присвоены четыре ноты четвертой строки, а второй ноте — восемь нот, то в результате мы получим двойную длительность второй ноты, и т. д. Следовательно, данный процесс будет продолжаться до первого голоса, пока не будут получены все ритмические значения. Результатом является самоподобная структура, ритмическая тонкая сегментация которой создается в зависимости от достижения конкретного «тонального разнообразия».

Джефф Прессинг отобразил орбиту систем нелинейных уравнений (также называемых нелинейными отображениями) на музыкальные параметры. Вывод отображения используется для регулирования высоты звука, длительности, времени обработки входного воздействия, динамики, структурной плотности и времени между нотами отдельных событий синтезированных звуков. Так, например, объем совокупности (вывод) логистического уравнения преобразуется в соответствующий диапазон высот звука через  $F = 2^{(cx+d)}$ , где постоянная  $c$  равна диапазону в октавах, а  $2d$  — самой низкой высоте производимого звука (в Гц). Так как значение объема совокупности находится в диапазоне между 0 и 1, оно также непосредственно используется для выражения времени между нотами. Другие параметры, такие как динамика и обработка входного воздействия, также вытекают из получающихся значений, подвергаясь различным арифметическим операциям. Чтобы получить разные, но тем не менее скоррелированные значения для музыкальных параметров, указываются сложные стратегии отображения для систем уравнений с размерами до четырех.

Такая интерпретация данных структурообразующего алгоритма делает возможным (не только при использовании теории хаоса) творческий подход к реализации отдельных композиционных решений. Другой интересный подход, примененный Джереми Личем и

Джоном Фитчем, позволяет вывести древовидную структуру из орбиты хаотической системы. Конкретные значения нот производятся путем интерпретации узлов более высокого иерархического порядка как высот звука, структурирующих мелодическую прогрессию. Эти высоты звука служат поворотными пунктами получающейся мелодической прогрессии. Кроме того, в зависимости от их расстояния до следующего сегмента (т. е. поддрева), они указывают разный размер для сегмента интервала.

### **Системы Линденмайера в алгоритмической композиции**

Джон Маккормак сравнил стохастические подходы, модели Маркова, разные варианты генеративной грамматики и системы Линденмайера с точки зрения их пригодности для создания музыки. В конструкции растяжимой системы Маккормак вводит программную архитектуру для алгоритмической композиции. Система предусматривает возможность применения контекстно-независимых и параметрических L-систем; при использовании иерархически структурированных грамматик предусматриваются изменяющиеся возможности генезиса музыкальной структуры. Иерархические грамматики построены подобно D0L-системам; однако целые грамматики могут использоваться для отдельных символов последующего элемента. Хотя каждая из различных грамматик расширяется независимо, можно установить структурные отношения между отдельными системами перезаписи посредством параметризации. Система Маккормака использует понятие «виртуальных игроков», модулей, ответственных за голос или инструмент и каждый из которых регулируется своей собственной системой перезаписи. Схема обработки: чтение и синтаксический анализ, применение аксиомы к текущей символьной цепочке, рекурсивное применение подстановок на текущей символьной цепочке и, наконец, вывод результатов как значений MIDI. В этой системе такие параметры, как высота звука, длительность, тембр и различные управляющие устройства могут регулироваться внутри полифонической структуры. Для этого определяются дополнительные символы в рамках правил перезаписи, которые, в зависимости от позиции, могут выразить контекстуальные зависимости, характерные для музыки. В этом смысле, например, выражение «(CE)|(GC) → D(CE)» означает: если текущая гармония состоит из нот G и C, проигрываемых одновременно, и им предшествовали C и E, проигрывавшиеся одновременно, то необходимо проиграть D текущей длительности, после чего следуют C и E, проигрываемые одновременно.

«Самая большая привлекательность нелинейных динамических систем для композиционных целей состоит в их естественном родстве с характером явлений в реальном мире наряду с механической эффективностью их вычисления и регулирования. Хаотические системы позволяют генерировать множество сырых материалов в условиях, которые, тем не менее, в глобальном смысле являются единообразными. Хаотические последовательности олицетворяют процесс трансформации, внутренняя связь которых обеспечивается правилами, закодированными в уравнениях». Системы Линденмайера представляют собой системы перезаписи, подобные генеративным грамматикам, и генерируют символьные цепочки, применяя порождающие правила; первоначально они были разработаны для моделирования процессов роста. В противоположность генеративным грамматикам, где в общем требуемый вывод производится только после выполнения всех подстановок, в традиционной системе Линденмайера отдельные терминалы заменяются большим числом терминалов. Следовательно, после каждого процесса подстановки имеются символы для музыкального отображения. Вследствие этого, с одной стороны, число произведенных символов обычно значительно увеличивается в каждой генерации; с другой стороны, система Линденмайера подвержена также развитию во времени и, следовательно, может отражать процессоподобные композиционные подходы. Благодаря этой главной особенности система Линденмайера также очень хорошо подходит для представления самоподобных структур и позволяет эффективно отображать фрактальные концепции на музыкальные параметры. Представление музыкальной интерпретации результатов системы Линденмайера имеет большое значение. Однако стратегии, основанные на музыкальной интерпретации «черепашьих» графиков, т. е. на использовании уже выполненного отображения как отправной точки для дальнейшего отображения, в общем не способны полностью отражать специфичное поведение системы Линденмайера в музыкальном отображении. Работа Дюбуа показывает ряд альтернативных стратегий, в которых разные формализмы системы Линденмайера используются для музыкального отображения. Именно это разнообразие возможных форм системы Линденмайера открывает широкое поле генезиса музыкальной структуры для алгоритмической композиции. Генерация музыкальной структуры может применяться как для простого музыкального представления самоподобия, так и для создания сложных музыкальных структур в рамках современного музыкального творчества. Для большинства вышеупомянутых подходов понятие масштаба является важным аспектом генерации музыкальной структуры. Данный термин получает новое интересное измерение у Мандельброта, который проводит различие

между скейлингом и структурами, связанными масштабированием. Структуры, связанные масштабированием, независимо от того, являются ли они искусственными или естественными, характеризуются несколькими доминирующими элементами масштаба. Это различие также могло бы быть использовано при классификации музыкальной структуры, которая может быть создана с использованием нескольких доминирующих формальных принципов, таких, как строгий самоподобный принцип (по аналогии с объектом, связанном масштабированием), или возникает в результате различных решений, стохастических принципов и т. п. (по аналогии с объектом масштабирования). Часто характер композиции изменяется на различных стадиях создания: начинаясь как «объект, связанный масштабированием» с помощью формального принципа, возникшая структура меняется в соответствии с личными эстетическими предпочтениями и в силу этого постепенно трансформируется в «объект масштабирования». Помимо различных структурирующих элементов композиции, «успешное» музыкальное произведение всегда будет показывать феномен возникновения, и поэтому будет казаться, что оно преодолевает ограничения своих формальных принципов, или, как указывает Мандельброт, приводя пример из области визуального искусства: «Между прочим, в то время как максимальный размер картины равен размеру всего полотна, многим художникам удается производить такое впечатление, будто она изображает объекты большего размера.» Аналогичным образом мазок кистью определяет минимальный размер, но многие шедевры портретной живописи как будто включают детали, которые физически невозможно изобразить при данном масштабе изображения»

### **Заключение**

Стоит заметить, что существует множество методов решения интеллектуальных задач с помощью различных направлений ИИ: экспертных систем, нейронных сетей, естественно-языковых систем. В данной статье были рассмотрены экспертные системы, теория хаоса, L-системы и фрактальные множества. На примере решения задачи по алгоритмической композиции, описаны системы Линденмайера. Проблема технического творчества систем искусственного интеллекта является актуальной среди музыкантов, программистов, экспериментаторов.

### **Список литературы**

1. Гальцев А. Синтез фракталов: IFS и L-системы Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/134616/>, свободный\_(дата обращения 01.02.2015).



2. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М: Постмаркет, 2000. 352 с.
3. Нирхаус Г. Наука и музыка. Гармония из хаоса. Режим доступа: <http://314159.ru/nierhaus/nierhaus1.pdf> (дата обращения 01.02.2015).
4. Stelios Manousakis Musical L-system. Available at: [http://modularbrains.net/support/SteliosManousakis-Musical\\_L-systems.pdf](http://modularbrains.net/support/SteliosManousakis-Musical_L-systems.pdf), accessed 01.02.2015.
5. Maximos A Kaliakatsos, Papakostas, Andreas Floros, Nikolaos Kanellopoulos, Michael N Vrahatis. Intelligent generation of rhythmic sequences using finite L-systems. Available at: [http://www.researchgate.net/publication/230833320\\_Intelligent\\_generation\\_of\\_rhythmic\\_sequences\\_using\\_finite\\_L-systems](http://www.researchgate.net/publication/230833320_Intelligent_generation_of_rhythmic_sequences_using_finite_L-systems), accessed 01.02.2015.
6. John R. Francis. Computer Music Algorithms 2014. Режим доступа: <http://sourceforge.net/projects/musicalgorithm1/> (дата обращения 01.02.2015).
7. Князев Б. А., Гапанюк Ю. Е. Распознавание аномального поведения человека по его эмоциональному состоянию и уровню напряженности с использованием экспертных правил решений // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 5. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/568250.html> (дата обращения 20.02.2015).
8. Постников В.М. Анализ подходов к формированию состава экспертной группы, ориентированной на подготовку и принятие решений // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2012. № 5. DOI: 10.7463/0512.0360720.
9. Самохвалов Э.Н., Ревунков Г.И., Гапанюк Ю.Е. Использование метаграфов для описания семантики и прагматики информационных систем. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 1. Режим доступа: <http://vestnikprib.bmstu.ru/catalog/icec/infth/673.html> (дата обращения 20.02.2015).