

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

наименование кафедры

Разработка программного продукта для исследования
перемежающегося поведения в сети фазовых осцилляторов
Курамото с адаптивными связями в присутствии шума

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 235 группы

направления 09.04.02 Информационные системы и технологии

код и наименование направления

Факультета нелинейных процессов

наименование факультета

Кириллова Олега Александровича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель:

профессор, д.ф.-м. наук, доцент

должность, уч. ст., уч. зв.

личная подпись,
дата

О.И.Москаленко

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики открытых систем:

профессор, д.ф.-м. наук, профессор

должность, уч. ст., уч. зв.

личная подпись,
дата

А.А.Короновский

инициалы, фамилия

Саратов 2020 г.

Введение

Синхронизация — универсальный феномен, играющий огромную роль во множестве процессов в разных областях науки. Изучением синхронизации занимаются многие современные ученые, так как понимание механики этого процесса помогает более подробно изучить поведение сложных систем, найти причины эпилепсии, каскадного отключения электрических систем и, даже, возникновения нелинейного поведения трафика в сети Интернет. Влияние шумов разного рода на поведение систем неизбежно. Исследование этой области позволит разработать методы для более точного изучения данных систем. Удобной и распространенной моделью для изучения синхронизации в сложных системах является сеть фазовых осцилляторов Курамото. Она позволяет моделировать большинство таких ситуаций путем незначительного изменения параметров и/или уравнений системы.

Фундаментальное явление перемежаемости представляет большой интерес для исследователей, так как его можно наблюдать в самых различных системах — физических, биологических, химических, социальных и т.д. Перемежаемость классифицируют по нескольким типам: перемежаемость типов I-III, on-off перемежаемость, перемежаемость игольного ушка, перемежаемость кольца. Одним из наиболее интересных вопросов при исследовании явления перемежаемости является переход в системе связанных осцилляторов от асинхронной динамики к синхронной через перемежаемость.

Целью магистерской работы является разработка комплексного программного пакета для моделирования сети фазовых осцилляторов Курамото и изучение влияния шума на перемежающееся поведение в данной системе на основе разработанного программного кода.

К сожалению, для получения наглядных результатов, необходимо моделировать сеть с большим количеством узлов, что отрицательно сказывается на времени выполнения. Применение технологий параллельных вычислений также является приоритетной задачей.

Магистерская работа состоит из 29 страниц текста, включая 12 иллюстраций и 1 листинга. Список источников содержит 11 наименований.

1 Сеть фазовых осцилляторов Курамото

Сеть фазовых осцилляторов Курамото — математическая модель, описывающая поведение большого количества осцилляторов, используемая для изучения явления синхронизации, предложена японским физиком Йосики Курамото (Kuramoto Yoshiki). Классическая модель имеет вид:

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \lambda \sum_{j=1}^N A_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i), \quad (1)$$

где θ_i — фаза осциллятора; ω_i — собственная частота осциллятора; λ — параметр связи (coupling parameter), показывающий влияние связей на осциллятор; A — матрица связей, показывающая топологию связей в ансамбле; N — количество осцилляторов в ансамбле.

Показателем синхронизации является параметр порядка (order parameter, R):

$$Re^{i\psi} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N e^{i\theta_l}, \quad (2)$$

где R — глобальный параметр порядка; θ_l — фаза осциллятора; ψ — средняя фаза осцилляторов в ансамбле; N — количество осцилляторов в ансамбле.

Данный параметр изменяется от 0 до 1, где 0 — асинхронный режим, 1 — синхронный режим. Данная модель хорошо описывает биологические, химические, а также, нейробиологические и термодинамические процессы.

Адаптивная модель

В ходе исследований классической системы была открыта взрывная синхронизация (explosive synchronisation), которая появляется при условии некоторой корреляции между собственными частотами осцилляторов. Для изучения взрывной синхронизации без присутствия корреляции в системе была разработана адаптивная модель:

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \lambda \alpha_i \sum_{j=1}^N A_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i); \quad (3)$$

$$r_i(t) e^{i\psi} = \frac{1}{k_i} \sum_{l=1}^{k_i} e^{i\theta_l}, \quad (4)$$

где θ_i и θ_l – фазы осцилляторов; ω_i – собственная частота осциллятора; λ – параметр связи, показывающий влияние связей на осциллятор; α_i – параметр адаптации, равный r_i ; A – матрица связей, показывающая топологию связей в ансамбле; N – количество осцилляторов в ансамбле; r_i – локальный параметр порядка, показывающий степень синхронизации кластера осцилляторов; k_i – размер кластера осцилляторов (исследуемого осциллятора и его ближайших соседей), $k_i = \sum_{j=1}^N A_{ij}$ – степень узла.

2 Перемежаемость

Перемежаемость является универсальным явлением и характерно для систем различной природы. Первое проявление перемежаемости было обнаружено как сценарий перехода от периодических колебаний к хаотическим. В этом случае сигнал представляет собой чередующуюся последовательность регулярных (ламинарных) фаз и хаотических всплесков (турбулентных фаз). При увеличении управляющего параметра турбулентные всплески становятся все более частыми до тех пор, пока система не перейдет в хаотический режим. В зависимости от характера потери устойчивости периодическим режимом выделяют перемежаемость I–III типов. Перемежающееся поведение широко распространено в природе и технике и одним из классов явлений, связанных с перемежаемостью, является синхронизация. Перемежающееся поведение наблюдается вблизи границ различных типов хаотической синхронизации, причем механизмы возникновения и характеристики перемежаемости оказываются различными для разных типов синхронного поведения.

Рассмотрим перемежающееся поведение на границе фазовой синхронизации. В зависимости от величины расстройки управляющих параметров взаимодействующих систем существуют два различных сценария возникновения фазовой синхронизации. При достаточно малой расстройке параметров

разрушение синхронного режима связано с нарушением общего ритма колебаний. Если расстройка достаточно велика, то по крайней мере одна из взаимодействующих систем, теряет фазовую когерентность.

Наличие двух сценариев говорит о наличии двух разных типов поведения на границе ее возникновения. В то же самое время, известно, что переход к фазовой синхронизации в обоих случаях осуществляется через перемежаемость. В этом случае зависимость разности фаз $\Delta\phi(t)$ этих систем от времени характеризуется наличием участков синхронного поведения (ламинарных фаз), прерывающихся внезапными скачками, когда значение разности фаз меняются на величину 2π (турбулентные фазы). При определении типа перемежаемости играет роль статистика длительностей ламинарных (турбулентных) фаз. Если параметры взаимодействующих систем отличаются на достаточно малую величину, по мере приближения к границе фазовой синхронизации наблюдается режим перемежаемости I-типа, а в непосредственной близости к границе хаотической фазовой синхронизации существует режим свердолгого ламинарного поведения, названного перемежаемостью "игольного ушка". Если расстройка управляющих параметров достаточно сильная, вблизи границы фазовой синхронизации имеет место перемежаемость "кольца".

3 Стек технологий и разработка ПО

Для реализации программного пакета `kron` был выбран язык программирования Python версии 3. Данный выбор обоснован его широкими возможностями, низким порогом входа и обширными библиотеками.

В качестве технологии параллельных вычислений был выбран OpenCL. Данная технология позволяет существенно ускорить вычисления, путем задействования практически любого устройства, будь то центральный процессор или графический ускоритель.

В процессе моделирования, программа производит большое количество данных. Для работы с такими объемами была выбрана библиотека HDF5. Данная библиотека позволяет структурировано хранить данные в бинарном формате, что существенно сокращает затраты на транспортировку данных и минимизирует возможные потери.

Для построения графического интерфейса был выбран фреймворк Qt. Данный фреймворк выгодно выделяется на фоне других кроссплатформенностью, удобством использования, большой библиотекой встроенных виджетов, обширной и качественной документацией, а также позитивным и отзывчивым сообществом.

3.1 KRON

В ходе работы был разработан прикладной программный пакет для исследования сети фазовых осцилляторов в присутствии шума¹. Архитектура проекта классическая для модулей на данном языке: скрипты, реализующие основную функциональность и интерфейс пользователя. Использование технологии параллельных вычислений OpenCL позволяет существенно сократить время моделирования, без потери гибкости программного пакета. Тонкости реализации сокрыты от конечного пользователя, а конфигурирование сети доступно через встроенные генераторы. Несмотря на это, у опытного пользователя есть возможность полностью управлять программным пакетом через переменные окружения и необязательные аргументы для генераторов. Реализация полноценного графического интерфейса потребовала бы несравненно больше ресурсов и времени, в связи с этим основной функционал доступен через написание скриптов, а визуализация данных через графический интерфейс.

4 Исследование перемежающегося поведения

Целью работы является исследование влияния шума на перемежающееся поведение в сети фазовых осцилляторов Курамото с адаптивными связями. Необходимо определить параметр порядка (λ), при котором может наблюдаться перемежаемость в системе. Для этого на зависимости параметра порядка (R) от параметра связи (λ) для прямого и обратного направления и выбирается такое значение параметра порядка, чтобы оно было внутри полученной петли гистерезиса. Для текущей конфигурации сети было выбрано значение 0.014.

¹Репозиторий доступен по ссылке: <https://bitbucket.org/kirillova/kron>

После численного моделирования системы на длительном времени и при разной интенсивности шума ($D\xi$, где D — интенсивность шума ($D \in [0.0; 1.0]$), ξ — нормально распределенный шум с нулевым средним и отклонением π), случайным образом был выбран "базовый" осциллятор, который сравнивался с остальной сетью.

Как и предполагалось, шум сильно влияет на динамику системы. В отсутствии шума в системе наблюдается, преимущественно, синхронное поведение, а длительность ламинарных (турбулентных) фаз примерно одинаковые, что характерно для перемежаемости I-типа. При небольшом воздействии шума на систему перемежаемость наблюдается для большинства пар осцилляторов, длительность ламинарных фаз увеличивается и становится нерегулярной. Данное поведение характерно для перемежаемости I-типа в присутствии шума и может говорить о наличии перемежаемости "игольного ушка". При сильном внешнем воздействии в системе превалирует асинхронный режим и наблюдается сильная кластеризация сети.

Заключение

В ходе работы были изучены современные средства разработки ПО и технология параллельных вычислений OpenCL. Был разработан программный пакет `крон`, предназначенный для моделирования сети фазовых осцилляторов Курамото. Данный программный пакет может быть использован в текущих и последующих исследованиях данной сети. При помощи данного программного пакета было изучено влияние перемежаемости на сеть с адаптивными связями. В отсутствии внешнего воздействия фазы осцилляторов преимущественно синхронны, при небольшом воздействии — находятся в режиме перемежаемости, а при сильном воздействии шума — в асинхронном режиме. В связи с этим можно сделать вывод, что внешнее шумовое воздействие сильно влияет на динамику сети в целом.