

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623432>

Циклопные режимы в сети тета-нейронов с отталкивающими связями

М.И. Болотов^{1*}, В.О. Муняев¹, Л.А. Смирнов¹, Г.В. Осипов¹, И. Белых²¹ Институт информационных технологий, математики и механики, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация;² Department of Mathematics and Statistics and Neuroscience Institute, Georgia State University, Атланта, США

АННОТАЦИЯ

Ансамбли фазовых осцилляторов широко применяются в качестве базовой модели, описывающей возникновение коллективной динамики в многокомпонентных реальных объектах, включая нейронные сети, популяции химических осцилляторов, электрические и социальные сети. Модель Курамото одномерных или двумерных фазовых осцилляторов является ключевым примером таких систем, которые могут демонстрировать нетривиальную коллективную динамику, включая полную, частичную или индуцированную асимметрией синхронизацию, химерные состояния, уединённые состояния, кластерные режимы, градиентные состояния. Примечательно, что полная синхронизация является доминирующим ритмом, вызываемым ростом силы связи в классической модели Курамото. Распределённые и кластерные распределённые состояния обычно наблюдаются в сетях Курамото с отталкивающей связью; однако полного понимания, при каких условиях тот или иной ритм может возникнуть и стать устойчивым в широкой области фазового пространства, нет.

Не менее важным для понимания связи сетей осцилляторов Курамото с реальными физическими системами является определение роли компонент взаимодействия более высокого порядка, которые представляют собой члены разложения в ряд Фурье общей 2π -периодической функции силы связи [1]. Добавление слагаемых более высокого порядка к функции связи в классической модели осцилляторов Курамото может приводить к мультистабильности синхронных состояний. Однако роль мод связи более высокого порядка в ритмогенезе сетей с отталкивающим взаимодействием ещё предстоит установить.

В данной работе представлены существенные шаги к решению этой критической проблемы для сетей фазовых осцилляторов Курамото–Сакагучи с отталкивающими связями, содержащими гармоники высокого порядка. Сначала устанавливается, что двухкластерные и трёхкластерные состояния являются доминирующими ритмами в слабоотталкивающих сетях с чётным и нечётным числом осцилляторов со связью, содержащей только первую гармонику. Трёхкластерные режимы при этом образованы двумя когерентными по фазе кластерами равного размера и одним уединённым осциллятором. Эти триподные состояния можно рассматривать как гибридный режим, сочетающий химеру двух больших кластеров с одиночным уединённым состоянием. Обращаясь к греческой мифологии, мы называем эти трёхкластерные режимы циклопными состояниями, где одиночный осциллятор и синхронные кластеры представляют соответственно глаз и плечи циклопа. Особо отметим, что добавление мод связи более высокого порядка приводит к глобальной устойчивости циклопных состояний практически во всём диапазоне значений фазового сдвига, контролирующего степень отталкивания элементов [2].

Помимо осцилляторов Курамото, мы показываем, что этот эффект сильно проявляется в сетях тета-нейронов с адаптивной связью. На более общем уровне наши результаты предлагают варианты для поиска доминирующих ритмов в физических и биологических сетях с отталкивающими связями.

Ключевые слова: синхронизация; коллективные моды; популяция нейронов; глобальная связь; тета-нейрон.

Как цитировать:

Болотов М.И., Муняев В.О., Смирнов Л.А., Осипов Г.В., Белых И. Циклопные режимы в сети тета-нейронов с отталкивающими связями // Гены и клетки. 2023. Т. 18, № 4. С. 844–846. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623432>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00348).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Рукопись получена: 20.05.2023

Рукопись одобрена: 26.11.2023

Опубликована online: 20.01.2024

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Delabays R. Dynamical equivalence between Kuramoto models with first- and higher-order coupling // *Chaos*. 2019. Vol. 29, N 11. P. 113129. doi: 10.1063/1.5118941
2. Munyayev V.O., Bolotov M.I., Smirnov L.A., et al. Cyclops states in repulsive kuramoto networks: the role of higher-order coupling // *Phys Rev Lett*. 2023. Vol. 130, N 10. P. 107201. doi: 10.1103/PhysRevLett.130.107201

AUTHORS' CONTACT INFO

* М.И. Болотов; адрес: 603022, Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 23; e-mail: maxim.i.bolotov@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623432>

Cyclops states in repulsive theta-neuron networks

M.I. Bolotov¹*, V.O. Munyayev¹, L.A. Smirnov¹, G.V. Osipov¹, I. Belykh²¹ National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Russian Federation;² Department of Mathematics and Statistics and Neuroscience Institute, Georgia State University, Atlanta, USA

ABSTRACT

Networks of phase oscillators have become a widely established paradigmatic model for studying emergent collective behavior across several real-world systems, including neuronal networks, populations of chemical oscillators, and power grids. The Kuramoto model, involving one-dimensional or two-dimensional phase oscillators, demonstrates the potential for networks to showcase exceptional collective dynamics. This encompasses various outcomes such as full, partial, explosive, and asymmetry-induced synchronization, clusters, chimeras, solitary states, and generalized splay states. Notably, increasing all-to-all coupling in the classical Kuramoto model induces full synchronization as the most probable outcome and dominant rhythm. Kuramoto networks with repulsive coupling usually display splay, generalized, and cluster splay states, but the conditions under which a certain rhythm can arise and prevail are not entirely understood.

Equally important for connecting Kuramoto networks to practical physical systems is understanding the function of higher-order coupling terms. These terms display a Fourier decomposition of a general 2π -periodic interaction function [1]. Previous studies have demonstrated that the inclusion of higher-order terms in the classical Kuramoto model of oscillators with all-to-all attractive coupling can lead to multiple synchronous states and switching between synchronization clusters. However, the impact of higher-order coupling modes on rhythm generation in repulsive networks remains unexplored.

In this work, we present significant progress in addressing the critical issue related to repulsive Kuramoto–Sakaguchi networks of phase oscillators with phase-lagged first-order and higher-order coupling. We demonstrate that weakly repulsive networks of even and odd numbers of oscillators with first-order coupling are dominated by two-cluster and three-cluster splay states, respectively. The three-cluster splay states consist of two distinct coherent clusters and one solitary oscillator. These tripod states can be considered a fusion of a two-body chimera and a solitary state. We have dubbed these patterns of three oscillators as “Cyclops states” in reference to the Greek mythological giant with a single eye. The solitary oscillator and synchronous clusters respectively represent the Cyclops’ eye and shoulders. We present a remarkable discovery that the inclusion of higher-order coupling modes leads to worldwide stability of cyclops states across almost the entire range of the phase-lag parameter controlling repulsion [2].

Beyond the Kuramoto oscillators, we demonstrate the robust presence of this effect in networks of canonical theta-neurons with adaptive coupling. Furthermore, our results provide insight into identifying dominant rhythms within repulsive physical and biological networks.

Keywords: synchronization; collective modes; neuron population; global coupling; theta-neuron.

To cite this article:

Bolotov MI, Munyayev VO, Smirnov LA, Osipov GV, Belykh I. Cyclops states in repulsive theta-neuron networks. *Genes & cells*. 2023;18(4):844–846. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623432>

ADDITIONAL INFORMATION

Authors’ contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Funding sources. This study was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 22-12-00348).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

REFERENCES

1. Delabays R. Dynamical equivalence between Kuramoto models with first- and higher-order coupling. *Chaos*. 2019;29(11):113129. doi: 10.1063/1.5118941
2. Munyayev VO, Bolotov MI, Smirnov LA, et al. Cyclops states in repulsive kuramoto networks: the role of higher-order coupling. *Phys Rev Lett*. 2023;130(10):107201. doi: 10.1103/PhysRevLett.130.107201

AUTHORS’ CONTACT INFO

* M.I. Bolotov; address: 23 Gagarin avenue, 603022 Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: maxim.i.bolotov@gmail.com

Received: 20.05.2023

Accepted: 26.11.2023

Published online: 20.01.2024