



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2021. Т. 29, № 6
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2021;29(6)

Научная статья

УДК 530.182, 537.86

DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-892-904

Повышение чувствительности метода диагностики в реальном времени фазовой синхронизации автогенераторов по их нестационарным временным рядам

А. В. Курбако^{1,2}✉, Д. Д. Кульминский^{2,3}, Е. И. Боровкова^{1,2,4}, А. Р. Киселев^{1,4,5}, В. В. Сказкина¹,
В. И. Пономаренко^{1,2}, М. Д. Прохоров², Б. П. Безручко^{1,2}, В. И. Гриднев^{1,4}, А. С. Караваяев^{1,2,4,6}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Россия

³Научно-технологический университет «Сириус», Сочи, Россия

⁴Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского, Россия

⁵Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины, Москва, Россия

⁶Университет Иннополис, Россия

E-mail: ✉kurbako.sasha@mail.ru, kulminskydd@gmail.com, rubanei@mail.ru, kiselev@cardio-it.ru,
skazkinavv@yandex.ru, ponomarenkovi@gmail.com, mdprokhorov@yandex.ru,
bezruchkobp@gmail.com, gridnev@cardio-it.ru, karavaevas@gmail.com

Поступила в редакцию 21.04.2021, принята к публикации 27.10.2021, опубликована 30.11.2021

Аннотация. Цель исследования – модификация предложенного ранее метода диагностики интервалов фазовой синхронизации систем по их нестационарным временным реализациям, ориентированного на анализ сигналов объектов биологической природы в реальном масштабе времени для повышения чувствительности диагностики. **Методы.** В ходе статистического анализа ансамбля искусственных временных реализаций разностей мгновенных фаз колебаний, воспроизводящих статистические свойства экспериментальных данных биологической природы, сопоставлялись статистические свойства трех подходов диагностики синхронизации. В сравнении участвовали два предложенных ранее подхода, включая метод, основанный на линейной интерполяции разности фаз в скользящем окне, и подход, основанный на усреднении разности фаз в скользящих окнах, ориентированный на анализ данных в реальном времени. Эти известные методы сопоставлялись с предложенной в данной работе модификацией последнего, основанной на алгоритмическом контроле и исключении коротких нетипичных для данного участка разности фаз интервалов. **Результаты.** Предложенная модификация метода диагностики в реальном времени фазовой синхронизации автогенераторов по их нестационарным реализациям продемонстрировала статистические свойства, близкие к известному методу, основанному на линейной интерполяции разности фаз. При этом предложенный ранее подход реального времени продемонстрировал меньшую чувствительность и специфичность. Сопоставление быстродействия методики, предложенной в данной работе, и метода, основанного на линейной интерполяции разности фаз, продемонстрировало значительные преимущества предложенной методики. **Заключение.** Предложена модифицированная методика диагностики фазовой синхронизации автоколебательных систем по их экспериментальным нестационарным временным рядам, ориентированная на анализ данных в реальном времени. Показано, что чувствительность предложенного подхода превышает таковую для предложенного ранее метода реального времени, практически сравниваясь с известным подходом, основанным на линейной интерполяции разности фаз. Однако быстродействие предложенного подхода на два порядка выше известного метода, основанного на интерполяции. Определены параметры предложенной методики, соответствующие оптимальному соотношению чувствительности и специфичности.

Ключевые слова: фазовая синхронизация, чувствительность, специфичность, автогенератор, временной ряд, нестационарность.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант номер 20-02-00702, гранта Президента РФ для поддержки молодых кандидатов наук № МК-2723.2021.4, гранта Президента РФ для поддержки научных школ НШ-2594.2020.2.

Для цитирования: Курбако А. В., Кульминский Д. Д., Боровкова Е. И., Киселев А. Р., Сказкина В. В., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Безручко Б. П., Гриднев В. И., Караваев А. С. Повышение чувствительности метода диагностики в реальном времени фазовой синхронизации автогенераторов по их нестационарным временным рядам // Известия вузов. ПНД. 2021. Т. 29, № 6. С. 892–904. DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-892-904

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Article

DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-892-904

Increasing the sensitivity of real-time method for diagnostic of autogenerators phase synchronization based on their non-stationary time series

A. V. Kurbako^{1,2}✉, D. D. Kulminsky^{2,3}, E. I. Borovkova^{1,2,4}, A. R. Kiselev^{1,4,5}, V. V. Skazkina¹, V. I. Ponomarenko^{1,2}, M. D. Prokhorov², B. P. Bezruchko^{1,2}, V. I. Gridnev^{1,4}, A. S. Karavaev^{1,2,4,6}

¹Saratov State University, Russia

²Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Russia

³Sirius University of Science and Technology, Sochi, Russia

⁴Saratov State Medical University, Russia

⁵National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow, Russia

⁶University Inopolis, Russia

E-mail: ✉kurbako.sasha@mail.ru, kulminskydd@gmail.com, rubanei@mail.ru, kiselev@cardio-it.ru, skazkinavv@yandex.ru, ponomarenkovi@gmail.com, mdprokhorov@yandex.ru, bezruchkobp@gmail.com, gridnev@cardio-it.ru, karavaevas@gmail.com

Received 21.04.2021, accepted 27.10.2021, published 30.11.2021

Abstract. Purpose of this work is to of the research – Increasing the sensitivity of a method for diagnosing phase synchronization of autogenerators based on their non-stationary time series in real time, and also a comparison of the statistical properties of the proposed modification of the method with the well-known method for diagnostics of loop synchronization, which has proven itself in the analysis of experimental data. *Methods.* The paper compares the probabilities of the appearance of an error of the second kind of the developed modified method for diagnostics of phase synchronization with the probabilities of occurrence of an error of the second kind of the known method at equal values of sensitivity. When comparing the methods, generated test time realizations with a priori known boundaries of the phase synchronization sections are used, which repeat the statistical properties of the experimental data. It also compares the computational complexity of the two methods. *Results.* A modification of the method for diagnosing phase synchronization of autonomic regulation circuits in real time is proposed. It is shown that the proposed modification provides similar values of sensitivity and probability of appearance of errors of the second kind as the previously proposed approach. The developed method has less computational complexity than the previously proposed method. The values of free parameters corresponding to different values of sensitivity and probability of appearance of errors of the second kind are obtained. *Conclusion.* The area of application of the developed method with modification is formulated. The low computational complexity of the proposed method, as well as the possibility of switching devices to integer computations in calculations, makes it possible to use it for wearable registrations performing calculations in real time, based on small-sized low-power processors that do not support floating-point arithmetic operations.

Keywords: phase synchronization, sensitivity, specificity, oscillator, time series, nonstationarity.

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No 20-02-00702, by the President of the Russian Federation, Grant No. MK-2723.2021.4, by the President of the Russian Federation, Grant No. NS-2594.2020.2.

For citation: Kurbako AV, Kulminsky DD, Borovkova EI, Kiselev AR, Skazkina VV, Ponomarenko VI, Prokhorov MD, Bezruchko BP, Gridnev VI, Karavaev AS. Increasing the sensitivity of real-time method for diagnostic of autogenerators phase synchronization based on their non-stationary time series. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2021;29(6):892–904. DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-892-904

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Курбако А. В., Кульминский Д. Д., Боровкова Е. И., Киселев А. Р., Сказкина В. В., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Безручко Б. П., Гриднев В. И., Караваев А. С.
Известия вузов. ПНД, 2021, т. 29, № 6

Введение

Диагностика фазовой синхронизации автогенераторов по их экспериментальным временным рядам является актуальным вопросом при решении целого ряда фундаментальных и прикладных исследовательских задач [1, 2]. Известен целый ряд методов, которые зарекомендовали себя при исследовании данных различной природы. В частности, известен подход, основанный на оценке первой фурье-моды распределения свернутой разности мгновенных фаз [3], на стробоскопическом сечении свернутой фазы одного сигнала с учетом значений фазы второго [4], на оценке в скользящем окне дисперсии разности мгновенных фаз [5] и другие. Однако при анализе нестационарных сигналов, для которых характерно чередование интервалов синхронизации и несинхронного поведения, например, в связи с модуляцией коэффициента связи между генераторами внешними воздействиями, такие подходы зачастую оказываются неприменимы или демонстрируют низкую чувствительность анализа [6]. Такая динамика особенно характерна для сложных систем биологической природы. Поэтому ранее был предложен специализированный метод, ориентированный на анализ нестационарных данных [7, 8]. Метод продемонстрировал ранее свои возможности при решении фундаментальных [9–11] и прикладных задач [12, 13].

Однако данный подход не лишен недостатков. Метод основан на аппроксимации ряда разностей мгновенных фаз в скользящем окне, отличается значительной вычислительной сложностью и при его технической реализации требуется активно использовать возможности аппаратных модулей арифметико-логического устройства, поддерживающих арифметику вещественных чисел. Поэтому техническая реализация метода на базе мобильных устройств, основанных на низкопотребляющих микроконтроллерах и сигнальных процессорах, не представляется возможной. Кроме того, метод имеет три свободных параметра, априорная оценка которых из физических соображений затруднительна и требует реализации специализированных процедур выбора значений этих параметров, что является отдельной нетривиальной задачей [14, 15].

Указанные проблемы были частично решены в другом предложенном ранее подходе, ориентированном на анализ сигналов в реальном времени [16]. Однако, как было показано в работе [17], его чувствительность при выявлении участков фазовой синхронизации уступает методу, основанному на интерполяции разности фаз.

Поэтому в данной работе предложен модифицированный подход, направленный на повышение чувствительности анализа при сохранении невысокой вычислительной сложности и возможности анализа сигналов в реальном времени. Предложенный подход в ходе анализа тестовых временных реализаций, воспроизводящих нестационарные и стохастические свойства экспериментальных сигналов биологического объекта, сопоставляется с двумя известными ранее подходами [7, 16].

1. Методы

В работе сопоставляется чувствительность и специфичность трех методов диагностики фазовой синхронизации.

В работе [7] был предложен метод диагностики участков фазовой синхронизации по сигналам сердечно-сосудистой системы. Метод основан на интерполяции сигнала мгновенной разности фаз $\Delta\phi(t)$ прямой в скользящих во временной области с единичным сдвигом окнах и контроле порогового значения угла наклона такой прямой для выявления пологих участков разности мгновенных фаз колебаний исследуемых автогенераторов, соответствующих интервалам фазовой синхронизации.

В работе [16] был предложен метод для выявления интервалов синхронного поведения разности фаз, основанный на квантовании усредненной разности фаз по уровню. Участки фазовой

синхронизации идентифицируются при постоянстве такого квантованного значения на интервале времени, длительность которого должна превышать фиксированное пороговое значение.

Свободные параметры данных подходов были оценены в работах [6, 14, 15] при анализе специальным образом подготовленных тестовых данных на примере анализа динамики мгновенных фаз контуров автономного контроля кровообращения. Предложенная в работе [6] методика генерации таких данных позволяет воспроизвести характерные для сигналов контуров вегетативного контроля кровообращения длительности синхронных и несинхронных участков, скорость нарастания разности фаз на несинхронных участках и уровень фазовых шумов. При этом имеется априорная информация о наличии интервалов фазовой синхронизации, что обеспечивает объективность тестирования методов.

Предлагаемый в данной работе подход развивает идеи, предложенные в [17]. Принцип работы метода проиллюстрирован на рис. 1. Метод основан на усреднении значений разности мгновенных фаз $\Delta\phi(t)$ в скользящих окнах длительностью Ω . Разность фаз усредняется в каждом i -м окне для уменьшения влияния шумов различной природы. В результате формируется последовательность усредненных значений $\Delta\phi_i$ (рад), которые обозначены точками на рис. 1. Участок разности мгновенных фаз $\Delta\phi(t)$ в i -м окне считается интервалом фазовой синхронизации, если выполняется условие: $|\Delta\phi_i - \Delta\phi_{i-1}| < \Phi$, где Φ – свободный параметр метода (пороговое значение детекции).

Модификация метода предполагает дополнительную алгоритмическую обработку результатов в реальном времени. Соседние окна, идентифицированные как участки фазовой синхронизации, суммируются в общий интервал, длина полученного интервала сравнивается с минимальной длиной интервала синхронизации T_s , являющейся свободным параметром метода. Если длительность суммарного интервала синхронизации оказывается меньше минимального порога T_s , то интервал считается участком несинхронного поведения и суммируется с предыдущим и последующим участком несинхронного поведения. Аналогичная логика применяется к участкам несинхронного поведения и минимальной длине T_n несинхронного участка. T_s и T_n являются свободными параметрами метода и могут быть оценены, исходя из характерной минимальной длины участков синхронного и несинхронного поведения.

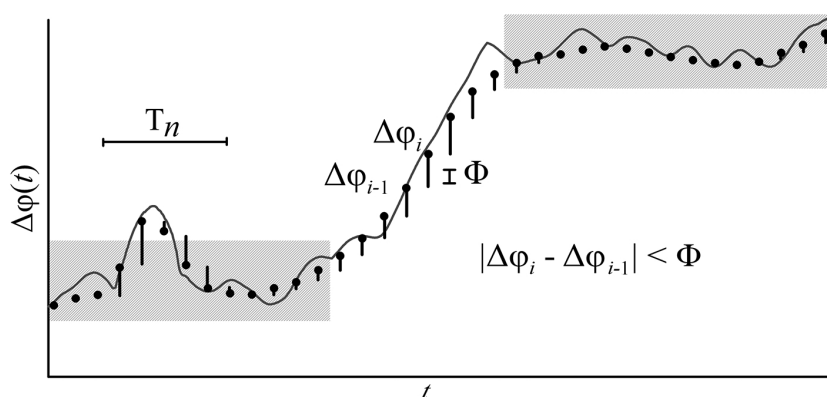


Рис. 1. Иллюстрация используемого в работе метода диагностики синхронизации в реальном времени. Точками на графике изображены усредненные значения мгновенной разности фаз в окне $\Delta\phi_i$, жирными вертикальными линиями – разность между соседними усредненными значениями. Серыми прямоугольниками обозначены диагностированные интервалы фазовой синхронизации

Fig. 1. The calculation principle of the modified method proposed in the work. The points on the graph show the averaged values of the instantaneous phase difference in the window $\Delta\phi_i$, the bold vertical lines show the difference between adjacent averaged values. The gray boxes indicate the diagnosed phase synchronization intervals

Результаты

Для сопоставления трех рассматриваемых подходов был сгенерирован тестовый ансамбль из 100 временных реализаций разностей мгновенных фаз длительностью по 50000 дискретных отсчетов. Свойства генерируемых разностей фаз соответствовали случаю, когда на характерный период колебаний условных тестовых автогенераторов, «порождавших» анализируемые временные ряды, приходилось около 50 дискретных отсчетов. Суммарное время синхронной динамики в ансамбле сгенерированных временных реализаций составляло около половины их длительности.

Методы сопоставлялись в ходе ROC-анализа (ROC – Receiver Operator Characteristic) [18], где при переборе значений параметров методов выявлялся набор параметров, обеспечивающий наилучшую чувствительность TPR (True Positive Rate) при данном значении специфичности FPR (False Positive Rate) [18]. Соответствующие такому набору параметров значения FPR и TPR откладывались по осям графика на рис. 2.

Из рис. 2, *a* видно, что ROC-кривая, соответствующая предложенному ранее в [17] методу (пунктирная линия), ориентированному на анализ сигналов в реальном времени, лежит ниже ROC-кривых, соответствующих другим двум методам. Таким образом, чувствительность этого подхода наименьшая из всех сопоставляемых методов. Соответствующее этой кривой значение интегральной характеристики ROC-кривой AUC (Area Under the Curve) [18] составляет 0.900. При этом известный подход (тонкая линия на рис. 2, *a*) и модификация метода, предложенная в данной работе (толстая линия на рис. 2, *a*) демонстрируют близкие ROC-кривые, значения их AUC: 0.911 и 0.910, соответственно. При некоторых значениях FPR предложенная в данной работе модификация демонстрирует лучшую чувствительность, так как ROC-кривая, соответствующая известному методу, имеет пульсирующий характер, демонстрируя немонотонную зависимость от набора значений свободных параметров.

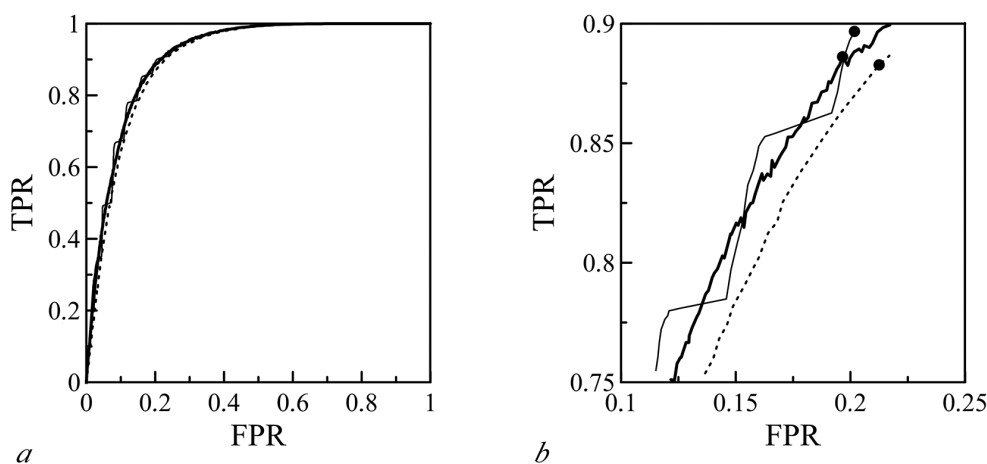


Рис. 2. Результаты сопоставления методов в ходе анализа тестовых данных, воспроизводящих статистические свойства сигналов биологической природы: *a* – ROC-кривые, построенные в ходе перебора параметров методов, *b* – увеличенный фрагмент на участке минимального расстояния от ROC-кривых до точки в TPR=1, FPR=0. Толстая линия – предложенный модифицированный метод, тонкая линия – известный метод, основанный на интерполяции разности фаз, пунктирная линия – известный метод анализа в реальном времени. Точками указаны минимальные расстояния от кривых до точки [0, 1] (оптимальные значения)

Fig. 2. Results of the comparison of methods in the course of analysis of test data that reproduce the statistical properties of signals of biological nature: *a* – ROC-curves constructed during enumeration of method parameters, *b* – an enlarged fragment in the area of the ROC-curves section by the diagonal. Bold line proposed method, thin line known method based on the approximation of the phase difference, dotted line known real-time analysis method. The dots indicate the minimum distances from the curves to the point [0, 1] (optimal values)

Для практического использования методов по результатам ROC-анализа часто выбирают наборы параметров, соответствующие точке ROC-кривой, наиболее близкой к точке с $TPR = 1$ и $FPR = 0$ [18]. В этой точке предложенный подход демонстрирует значения $TPR = 0.886$, $FPR = 0.197$ (рис. 2, *b*). Соответствующие значения свободных параметров предложенного подхода составляют: $\Omega = 115$ дискретных отсчетов (2.3 характерных периодов колебаний), сдвиг окна $s = 7$ дискретных отсчетов (0.14 характерных периодов колебаний) $\Phi = 0.036$ (рад), $T_s = 65$ дискретных отсчетов (1.3 характерных периодов колебаний), $T_n = 25$ дискретных отсчетов (0.5 характерных периодов колебаний). Для известного метода, основанного на линейной интерполяции: $TPR = 0.883$, $FPR = 0.212$. Для предложенного ранее метода, ориентированного на анализ данных в реальном времени: $TPR = 0.897$, $FPR = 0.202$.

Для сопоставления вычислительной сложности предложенного в данной работе и известного методов была оценена зависимость времени анализа τ (мс) от длительности реализации (рис. 3, *a*). Для этого методы были реализованы на языке Python 3. Тесты проводились на базе персонального компьютера, работающего под управлением операционной системы Windows 10, процессор: Core i5-11600, объем оперативной памяти составлял 8 Гб. Во время тестирования никакие другие программы, кроме стандартных системных служб, не были запущены. Длительность реализации в ходе тестирования изменялась от 500000 дискретных отсчетов до 5000000 с шагом 500000. Длительность окна Ω во временной области для обоих методов в этом случае составляла 100 дискретных отсчетов (2 характерных периода колебаний), сдвиг окна – один дискретный отсчет. Для тестирования методов использовались одни и те же временные реализации.

В ходе тестирования было выявлено, что при анализе временной реализации длительностью 500000 отсчетов время работы программы, реализующей предложенный метод, составило 35.9 мс, а известный метод – 7339.2 мс. То есть предложенный метод демонстрировал в 200 раз более высокое быстродействие. При анализе реализации длительностью 5000000 отсчетов время работы программы, реализующей предложенный метод, составило 312.2 мс, а известный метод – 76742.2 мс, отношение составило 245.8.

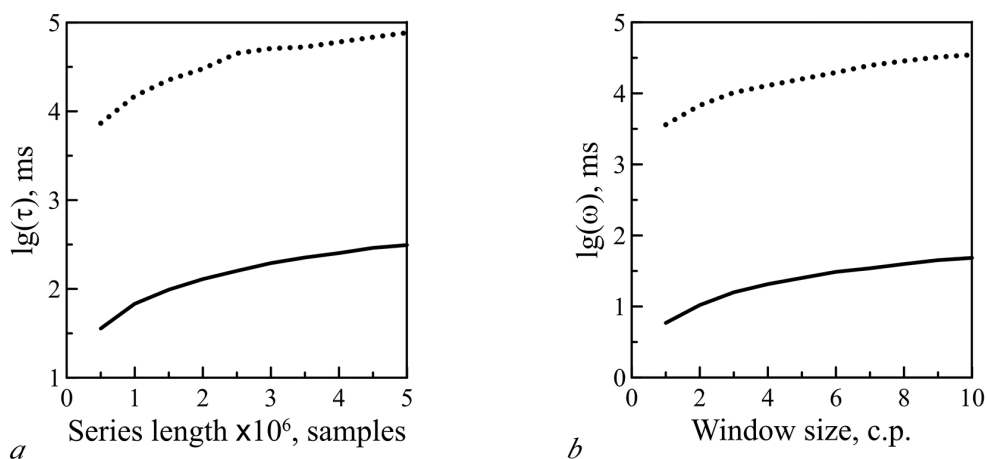


Рис. 3. Результаты сопоставления времени работы программ, реализующих известный подход, основанный на аппроксимации (точечная линия), и предложенного в данной работе модифицированного метода (тонкая линия): *a* – при анализе временных реализаций различной длины, *b* – при анализе реализации фиксированной длины в 50000 отсчетов при переборе длины окна, скользящего во временной области (приведено в единицах характерных периодов колебаний – characteristic period (c.p.))

Fig. 3. Results of comparing the running time of programs that implement the known approach based on approximation (dotted line) and the method proposed in this work (thin line): *a* – when analyzing time series of various lengths, *b* – when analyzing a fixed-length time series in 50000 samples when searching for the length of a window sliding in the time domain, given in units of characteristic periods of oscillations (c.p.)

Также проводилось сопоставление времени работы методов ω (мс) в зависимости от длительности скользящего во временной области окна Ω при фиксированной длине реализации в 500000 дискретных отсчетов (рис. 3, *b*). Анализировалась одна и та же реализация, размер окна перебирался от 50 до 500 отсчетов (от 1 до 10 характерных периодов колебаний).

В результате было показано, что при $\Omega = 50$ дискретных отсчетов время работы программы, реализующей предложенный метод, составило 5.9 мс, а известный метод – 3626.6 мс, отношение составило 614.7. При $\Omega = 500$ время работы программы, реализующей предложенный метод, составило 48.4 мс, а известный метод – 34992.3 мс, отношение составило 773.0.

Нелинейный характер зависимостей на рис. 3 объясняется оптимизацией использования оперативной памяти, реализуемой модулями Python 3.

Заключение

Предложена модификация метода диагностики фазовой синхронизации автогенераторов по их нестационарным экспериментальным временным рядам, включающая алгоритмическую обработку коротких (не превышающих минимальную длину) интервалов синхронного и несинхронного поведения. Модифицированный подход допускает анализ данных в реальном масштабе времени, превосходит предложенный ранее в [17] метод по чувствительности, демонстрируя возможности по детекции интервалов синхронизации, близкие методу, основанному на аппроксимации реализации разности мгновенных фаз в скользящем окне [7, 8]. При этом быстродействие предложенного подхода на два порядка превышает быстродействие метода, основанного на аппроксимации разности фаз. Кроме того, реализующий модифицированный метод алгоритм включает лишь операции усреднения и проверки условий, что делает развиваемый метод перспективным для реализации на базе низкопотребляющих микроконтроллеров и сигнальных процессоров, не имеющих аппаратной поддержки вещественной арифметики, для анализа данных в реальном масштабе времени.

В ходе исследований были определены параметры метода, обеспечивающие различные соотношения чувствительности и специфичности анализа.

Список литературы

1. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 496 с.
2. Безручко Б. П., Смирнов Д. А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2005. 320 с.
3. Mormann F., Lehnertz K., David P., Elger C. E. Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2000. Vol. 144, no. 3–4. P. 358–369. DOI: 10.1016/S0167-2789(00)00087-7.
4. Schäfer C., Rosenblum M. G., Abel H. H., Kurths J. Synchronization in the human cardiorespiratory system // *Physical Review E*. 1999. Vol. 60, no. 1. P. 857–870. DOI: 10.1103/PhysRevE.60.857.
5. Lai Y.-C., Frei M. G., Osorio I. Detecting and characterizing phase synchronization in nonstationary dynamical systems // *Physical Review E*. 2006. Vol. 73, no. 2. P. 026214. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.026214.
6. Боровкова Е. И., Караваев А. С., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Сопоставление методов диагностики фазовой синхронизованности по тестовым данным, моделирующим нестационарные сигналы биологической природы // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика*. 2015. Т. 15, № 3. С. 36–42. DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-36-42.

Курбако А. В., Кульминский Д. Д., Боровкова Е. И., Киселев А. Р., Сказкина В. В., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Безручко Б. П., Гриднев В. И., Караваев А. С.
Известия вузов. ПНД, 2021, т. 29, № 6

7. Karavaev A. S., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Kiselev A. R., Gridnev V. I., Ruban E. I., Bezruchko B. P. Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system // *Chaos*. 2009. Vol. 19, no. 3. P. 033112. DOI: 10.1063/1.3187794.
8. Kiselev A. R., Karavaev A. S., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Borovkova E. I., Shvartz V. A., Ishbulatov Y. M., Posnenkova O. M., Bezruchko B. P. Method of estimation of synchronization strength between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmographic waveform variability // *Russian Open Medical Journal*. 2016. Vol. 5, no. 1. P. e0101. DOI: 10.15275/rusomj.2016.0101.
9. Kiselev A. R., Borovkova E. I., Shvartz V. A., Skazkina V. V., Karavaev A. S., Prokhorov M. D., Ispiryan A. Y., Mironov S. A., Bockeria O. L. Low-frequency variability in photoplethysmographic waveform and heart rate during on-pump cardiac surgery with or without cardioplegia // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 2118. DOI: 10.1038/s41598-020-58196-z.
10. Караваев А. С., Ишбулатов Ю. М., Киселев А. Р., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Миронов С. А., Шварц В. А., Гриднев В. И., Безручко Б. П. Модель сердечно-сосудистой системы человека с автономным контуром регуляции среднего артериального давления // *Физиология человека*. 2017. Т. 43, № 1. С. 70–80. DOI: 10.7868/S0131164616060096.
11. Karavaev A. S., Kiselev A. R., Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Borovkova E. I., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Pchelintseva S. V., Efremova T. Y., Koronovskii A. A., Hramov A. E. Synchronization of infra-slow oscillations of brain potentials with respiration // *Chaos*. 2018. Vol. 28, no. 8. P. 081102. DOI: 10.1063/1.5046758.
12. Kiselev A. R., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Shvartz V. A. Evaluation of 5-year risk of cardiovascular events in patients after acute myocardial infarction using synchronization of 0.1-Hz rhythms in cardiovascular system // *Annals of Noninvasive Electrocardiology*. 2012. Vol. 17, no. 3. P. 204–213. DOI: 10.1111/j.1542-474X.2012.00514.x.
13. Киселев А. Р., Караваев А. С., Гриднев В. И., Посненкова О. М., Шварц В. А., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Безручко Б. П. Сравнение динамики показателей вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы на фоне лечения эналаприлом и метопрололом у больных артериальной гипертензией // *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2010. Т. 6, № 1. С. 61–72.
14. Безручко Б. П., Гриднев В. И., Караваев А. С., Киселев А. Р., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Боровкова Е. И. Методика исследования синхронизации колебательных процессов с частотой 0.1 Гц в сердечно-сосудистой системе человека // *Известия вузов. ПНД*. 2009. Т. 17, № 6. С. 44–56. DOI: 10.18500/0869-6632-2009-17-6-44-56.
15. Borovkova E. I., Karavaev A. S., Kiselev A. R., Gridnev V. I., Hramkov A. N., Chernets E. P., Bezruchko B. P. Comparison of methods of quantitative analysis of phase synchronization according to test data modeling non-stationary signals of biological nature // In: 2020 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). 7–9 Sept. 2020, Innopolis, Russia. New York: IEEE, 2020. P. 59–61. DOI: 10.1109/DCNAIR50402.2020.9216742.
16. Боровкова Е. И., Караваев А. С., Киселев А. Р., Шварц В. А., Миронов С. А., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Метод диагностики синхронизованности 0,1 Гц ритмов вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы в реальном времени // *Анналы аритмологии*. 2014. Т. 11, № 2. С. 129–136. DOI: 10.15275/annaritm.2014.2.7.
17. Курбако А. В., Боровкова Е. И., Киселев А. Р., Сказкина В. В., Пономаренко В. И., Безручко Б. П., Караваев А. С. Метод диагностики фазовой синхронизации контуров вегетативного контроля кровообращения в реальном времени // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика*. 2021. Т. 21, № 3. С. 213–221. DOI: 10.18500/1817-3020-2021-21-3-213-221.

18. Трухачева Н. В. Математическая статистика в медико-биологических исследованиях с применением пакета Statistica. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012. 379 с.

References

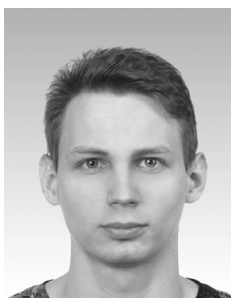
1. Pikovsky A, Rosenblum M, Kurths J. Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. 411 p. DOI: 10.1017/CBO9780511755743.
2. Bezruchko BP, Smirnov DA. Extracting Knowledge From Time Series: An Introduction to Nonlinear Empirical Modeling. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010. 410 p. DOI: 10.1007/978-3-642-12601-7.
3. Mormann F, Lehnertz K, David P, Elger CE. Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2000;144(3–4):358–369. DOI: 10.1016/S0167-2789(00)00087-7.
4. Schäfer C, Rosenblum MG, Abel HH, Kurths J. Synchronization in the human cardiorespiratory system. *Physical Review E*. 1999;60(1):857–870. DOI: 10.1103/PhysRevE.60.857.
5. Lai YC, Frei MG, Osorio I. Detecting and characterizing phase synchronization in nonstationary dynamical systems. *Physical Review E*. 2006;73(2):026214. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.026214.
6. Borovkova EI, Karavaev AS, Ponomarenko VI, Prokhorov MD. Comparison of methods for phase synchronization diagnostics from test data modeling nonstationary signals of biological nature. *Izvestiya of Saratov University. Physics*. 2015;15(3):36–42 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-36-42.
7. Karavaev AS, Prokhorov MD, Ponomarenko VI, Kiselev AR, Gridnev VI, Ruban EI, Bezruchko BP. Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system. *Chaos*. 2009;19(3):033112. DOI: 10.1063/1.3187794.
8. Kiselev AR, Karavaev AS, Gridnev VI, Prokhorov MD, Ponomarenko VI, Borovkova EI, Shvartz VA, Ishbulatov YM, Posnenkova OM, Bezruchko BP. Method of estimation of synchronization strength between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmographic waveform variability. *Russian Open Medical Journal*. 2016;5(1):e0101. DOI: 10.15275/rusomj.2016.0101.
9. Kiselev AR, Borovkova EI, Shvartz VA, Skazkina VV, Karavaev AS, Prokhorov MD, Ispiryay AY, Mironov SA, Bockeria OL. Low-frequency variability in photoplethysmographic waveform and heart rate during on-pump cardiac surgery with or without cardioplegia. *Scientific Reports*. 2020;10(1):2118. DOI: 10.1038/s41598-020-58196-z.
10. Karavaev AS, Ishbulatov YM, Kiselev AR, Ponomarenko VI, Gridnev VI, Bezruchko BP, Prokhorov MD, Shvartz VA, Mironov SA. A model of human cardiovascular system containing a loop for the autonomic control of mean blood pressure. *Human Physiology*. 2017;43(1):61–70. DOI: 10.1134/S0362119716060098.
11. Karavaev AS, Kiselev AR, Runnova AE, Zhuravlev MO, Borovkova EI, Prokhorov MD, Ponomarenko VI, Pchelintseva SV, Efremova TY, Koronovskii AA, Hramov AE. Synchronization of infra-slow oscillations of brain potentials with respiration. *Chaos*. 2018;28(8):081102. DOI: 10.1063/1.5046758.
12. Kiselev AR, Gridnev VI, Prokhorov MD, Karavaev AS, Posnenkova OM, Ponomarenko VI, Bezruchko BP, Shvartz VA. Evaluation of 5-year risk of cardiovascular events in patients after acute myocardial infarction using synchronization of 0.1-Hz rhythms in cardiovascular system. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*. 2012;17(3):204–213. DOI: 10.1111/j.1542-474X.2012.00514.x.
13. Kiselev AR, Karavaev AS, Gridnev VI, Posnenkova OM, Shvartz VA, Ponomarenko VI, Prokhorov MD, Bezruchko BP. Comparison of dynamic of autonomic control indices in cardiovascular

*Курбако А. В., Кульминский Д. Д., Боровкова Е. И., Киселев А. Р., Сказкина В. В.,
Пonomarenko В. И., Прохоров М. Д., Безручко Б. П., Гриднев В. И., Караваев А. С.*

system under the treatment by ACE inhibitor (Enalapril) and beta-blocker (Metoprolol) in patients with hypertension. *Saratov Journal of Medical Scientific Research*. 2010;6(1):61–72 (in Russian).

14. Bezruchko BP, Gridnev VI, Karavaev AS, Kiselev AR, Ponomarenko VI, Prokhorov MD, Borovkova EI. Technique of investigation of synchronization between oscillatory processes with the frequency of 0.1 Hz in the human cardiovascular system. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2009;17(6):44–56 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2009-17-6-44-56.
15. Borovkova EI, Karavaev AS, Kiselev AR, Gridnev VI, Hramkov AN, Chernets EP, Bezruchko BP. Comparison of methods of quantitative analysis of phase synchronization according to test data modeling non-stationary signals of biological nature. In: 2020 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). 7-9 Sept. 2020, Innopolis, Russia. New York: IEEE; 2020. P. 59–61. DOI: 10.1109/DCNAIR50402.2020.9216742.
16. Borovkova EI, Karavaev AS, Kiselev AR, Shvartz VA, Mironov SA, Ponomarenko VI, Prokhorov MD. Method for diagnostics of synchronization of 0.1 Hz rhythms of cardiovascular system autonomic regulation in real time. *Annals of Arrhythmology*. 2014;11(2):129–136 (in Russian). DOI: 10.15275/annaritmol.2014.2.7.
17. Kurbako AV, Borovkova EI, Kiselev AR, Skazkina VV, Ponomarenko VI, Bezruchko BP, Karavaev AS. The method for diagnostics of the phase synchronization of the vegetative control of blood circulation in real time. *Izvestiya of Saratov University. Physics*. 2021;21(3):213–221 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2021-21-3-213-221.
18. Trukhacheva NV. *Mathematical Statistics in Biomedical Research Using the Statistica Package*. Moscow: GEOTAR-Media; 2012. 379 p. (in Russian).

Курбако Александр Васильевич – родился в Знаменске (1997). Студент магистратуры факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета по направлению «Биотехнические системы и технологии». Область научных интересов – анализ временных рядов.



Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН
E-mail: kurbako.sasha@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3479-4609
AuthorID: 1055278

Кульминский Данил Дмитриевич – родился в Саратове (1991). Окончил Саратовский государственный университет (2014). После окончания СГУ работал научным сотрудником в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН и доцентом кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ. В настоящее время работает в Научно-технологическом университете «Сириус» (Сочи). Область научных интересов: теория динамических систем, анализ временных рядов, математическое моделирование. Автор 20 научных статей в отечественных и зарубежных журналах. Стипендиат фонда «Династия».



Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН
Россия, Краснодарский край, 354340 Сочи, Олимпийский пр., 1
Научно-технологический университет «Сириус»
E-mail: kulminskydd@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3936-2813
AuthorID: 721334

Боровкова Екатерина Игоревна – родилась в Энгельсе (1989). Окончила факультет нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета (СГУ, 2012). Защитила диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук на тему «Разработка и апробация методов определения границ интервалов синхронизации по нестационарным временным рядам» по специальности «радиофизика» (СГУ, 2018). Доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ, научный сотрудник отдела продвижения новых кардиологических информационных технологий Саратовского государственного медицинского университета имени В. И. Разумовского. Научные интересы – методы обработки и анализа сигналов сложных систем. Опубликовала свыше 20 научных статей.



Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Большая Казачья, 112
Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского
E-mail: rubancei@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9621-039X
AuthorID: 682183

Киселев Антон Робертович – родился в Ленинградской области (1981). Окончил Саратовский государственный медицинский университет (СГМУ, 2004). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата медицинских наук (2006) и доктора медицинских наук (2011). Профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ, ведущий научный сотрудник НИИ кардиологии СГМУ. Область научных интересов – физиология сердечно-сосудистой системы, клиническая кардиология, анализ открытых систем. Имеет более 50 научных публикаций.



Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012 Саратов, ул. Большая Казачья, 112
Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского
Россия, 101990 Москва, Петроверигский пер., д. 10, стр. 3
Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины
E-mail: antonkis@list.ru
ORCID: 0000-0003-3967-3950
AuthorID: 156156

Сказкина Виктория Викторовна – родилась в Саратове (1995). Окончила Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского (СГУ, 2016). Аспирант факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ, инженер кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ. Область научных интересов – анализ временных рядов, развитие методов диагностики синхронизованности по временным рядам, применение методов нелинейной динамики к задачам диагностики состояния сердечно-сосудистой системы человека. Имеет несколько научных публикаций по указанным направлениям.



Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: skazkinavv@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-9380-8292
AuthorID: 854717

Курбако А. В., Кульминский Д. Д., Боровкова Е. И., Киселев А. Р., Сказкина В. В., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Безручко Б. П., Гриднев В. И., Караваев А. С.
Известия вузов. ПНД, 2021, т. 29, № 6

Пономаренко Владимир Иванович – родился в Саратове (1960). Окончил Саратовский государственный университет (СГУ, 1982). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1992) и доктора физико-математических наук (2008). Ведущий научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ. Область научных интересов – статистическая радиофизика, анализ временных рядов, нелинейная динамика и ее приложения. Автор более 130 научных публикаций.



Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
имени В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
E-mail: ponomarenkovi@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1579-6465
AuthorID: 39986

Прохоров Михаил Дмитриевич – родился в Саратове (1968). Окончил Саратовский государственный университет (1992). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1997) и доктора физико-математических наук (2008). Заведующий лабораторией моделирования в нелинейной динамике Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Область научных интересов: нелинейная динамика и ее приложения, математическое моделирование, анализ временных рядов. Имеет более 200 научных публикаций.



Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
имени В. А. Котельникова РАН
E-mail: mdprokhorov@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-4069-9410
AuthorID: 39985

Безручко Борис Петрович – родился в 1946 году. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (СГУ, 1969). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (СГУ, 1980) и доктора физико-математических наук (СГУ, 1994). Профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Действительный член Международной Академии наук высшей школы (МАНВШ). Область научных интересов – радиофизика и электроника, нелинейная динамика, моделирование по временным рядам с приложением к задачам физиологии и медицинской диагностики, физический эксперимент. Опубликовал более 100 статей в научных журналах и 2 монографии (в соавторстве)



Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
имени В. А. Котельникова РАН
E-mail: bezruchkobp@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6691-8653
AuthorID: 484



Гриднев Владимир Иванович – родился в городе Марксе (1955). Окончил Саратовский медицинский институт (1978). Доктор медицинских наук (2010). Профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ. Руководитель Центра кардиологических информационных технологий Саратовского НИИ кардиологии СГМУ. Область научных интересов – физиология сердечно-сосудистой системы, клиническая кардиология, анализ открытых систем. Имеет более 50 научных публикаций.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского

Россия, 410012 Саратов, ул. Большая Казачья, 112
Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского
E-mail: gridnev@cardio-it.ru
ORCID: 0000-0001-6807-7934
AuthorID: 501260



Караваяев Анатолий Сергеевич – родился в Саратове (1981). Окончил факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2004). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Восстановление параметров систем с запаздыванием по временным рядам» по специальности «радиофизика» (2007, СГУ). Получил ученое звание доцента по специальности «радиофизика» (2018). Защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук на тему «Математическое моделирование механизмов функционирования и синхронизация элементов системы кровообращения» по специальности «Математическое моделирование» (2019, СГТУ). Профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ, старший научный сотрудник отдела продвижения новых кардиологических информационных технологий Саратовского государственного медицинского университета имени В. И. Разумовского, старший научный сотрудник лаборатории нелинейной динамики Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Научные интересы – радиофизические устройства регистрации и анализа сигналов биологических объектов, разработка программного обеспечения для персональных компьютеров и цифровых сигнальных процессоров. Имеет около 300 научных публикаций.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
имени В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Большая Казачья, 112
Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского
E-mail: karavaevas@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4678-3648
AuthorID: 128455