

ID: 2015-11-3930-A-5481

Оригинальная статья

Ишбулатов Ю.М., Бутенко А.А.

Методика диагностики синхронизации 0,1 гц ритмов variability сердечного ритма в физиологических тестах с вынужденным дыханием*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского**Научные руководители: к.ф.-м.н. Караваев А.С., д.м.н. Киселев А.Р.*

Ishbulatov Y.M., Butenko A.A.

Method for phase synchronization diagnostics of 0.1 hz rhythms in hart rate variability during experiments with forced breathing*Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky***Резюме**

Существуют экспериментальные доказательства того, что подобно радиофизическим генераторам, в автоколебательных контурах подсистемы вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы (ССС) может наблюдаться эффект фазовой синхронизации внешним сигналом переменной частоты, в частности вынужденным дыханием с линейно изменяющейся частотой. Было также показано, что в последнем случае ширина полосы синхронизации является важным параметром при диагностике патологий ССС. Для диагностики синхронизации, в условиях линейно изменяющейся частоты внешнего воздействия, ранее был предложен специализированный метод, однако его недостатком являлась сложность анализа результатов. Поэтому в данной работе предлагается способ автоматизации данной методики.

Ключевые слова: сердечно-сосудистая система, вегетативная регуляция, фазовая синхронизация, медицинская диагностика

Abstract

It was experimentally proved, that phase synchronization, much similar to the synchronization between radiophysical generators, could appear between self-exciting loops of vegetative regulation of cardiovascular system, particularly during experiments with forced breathing with linearly varying frequency. Significant value of synchronization band width was also shown for CVS conditions diagnostic. Previously proposed method of phase synchronization diagnostics during experiments with linearly varying frequency of external input may cause difficulties during results analysis. Therefore in present work a method of this technic automatization was proposed.

Key words: cardiovascular system, vegetative regulation, phase synchronization, medical diagnostics

Введение

Заболевания сердечно-сосудистой системы (ССС) являются основной причиной смертности и инвалидизации трудоспособного населения развитых стран мира. Поэтому большое прикладное значение имеет диагностика и прогнозирование развития патологий ССС. Анализ активности подсистемы вегетативной регуляции является перспективным способом быстрой и неинвазивной оценки состояния ССС [1-4]. Существует несколько зарекомендовавших себя интегральных показателей, рассчитываемых на основе статистического и спектрального анализов сигналов variability сердечного ритма (ВСР) и фотоплетизмограммы (ФПГ). Но в нашей работе мы использовали другой подход, характерный для анализа поведения радиофизических генераторов.

Существует большое количество экспериментальных работ, в которых приведены доказательства автоколебательного характера некоторых контуров системы вегетативной регуляции, в частности контура барорефлекторной регуляции тонуса артериальных сосудов [5,6]. В наших исследованиях данного контура также наблюдалось поведение характерное для автоколебательных систем [7-9]. В частности была показана синхронизация 0.1 Гц компоненты спектров ВСР вынужденным дыханием с линейно нарастающей частотой. Нами была также показана диагностическая ценность данного эффекта при прогнозировании риска смерти после инфаркта миокарда [10-15]. Также предложенные нами численные модели системы вегетативной регуляции, которые учитывают нелинейный характер контура барорефлекторной регуляции, демонстрируют лучшее качественное и количественное соответствие экспериментальным данным и позволяют воспроизводить эффекты, недоступные в рамках линейных представлений.

Ранее нами был предложен метод диагностики синхронизации 0.1 Гц ритмов variability сердечного ритма вынужденным дыханием, основанный на непрерывном вейвлет преобразовании. Данный метод специально разрабатывался для экспериментов с линейно изменяющей частотой внешнего сигнала. Данный метод показал большую чувствительность, чем классические оценки, основанные на спектральном анализе. Главным недостатком данного метода является сложность анализа результатов, и, как следствие, риск неточной оценки ширины и положения полосы синхронизации. Поэтому в данной работе предлагается автоматизированная версия данной методики, которая значительно упрощает анализ результатов.

Метод

При изучении синхронизации хаотических систем выделяют различные типы синхронизации: полную и обобщенную синхронизацию, синхронизацию с запаздыванием и фазовую синхронизацию. Рассматриваемый метод позволяет диагностировать фазовую синхронизацию, при которой происходит захват фаз сигналов, а амплитуды остаются хаотическими. Для введения

непрерывной фазы хаотического сигнала используется подход, основанный на вейвлет преобразовании. При этом в качестве материнского вейвлета используется морлет-вейвлет. Параметры вейвлета подобраны таким образом, чтобы величина обратная временному масштабу совпадала с частотой сигнала в Герцах. Принцип работы метода подробно описан в работах [16, 17]. Результатом применения данной методики является зависимость разности фаз синхронизируемого и синхронизирующего сигналов. В случае, рассматриваемом в данной работе, будет получена разность между мгновенными фазами сигналов ВСП и вынужденного дыхания с линейно меняющейся частотой. При этом полосе захвата фаз на данной зависимости, согласно [16, 17], будет соответствовать участок линейного уменьшения разности фаз ровно на Пи радиан.

Суть процесса автоматизации заключается в алгоритмизации поиска линейного участка, соответствующего полосе захвата. Для этого производилась линейная аппроксимация зависимости в скользящих окнах. При этом конец окна определялся тем, когда аппроксимирующая прямая спадает на Пи. Дальнейший поиск линейного участка основан на предположении о том, что его удастся аппроксимировать прямой с наименьшей среднеквадратичной ошибкой.

Эксперимент

При использовании неавтоматизированного метода на практике возникают осложнения даже при анализе модельных данных. В частности могут возникнуть сложности с определением границ полосы захвата из-за ее искривления вблизи краев. В данном случае наличие алгоритма поиска полосы значительно упрощает применение методики. На Рис. 1 представлен результат применения метода к реализации автоколебательной модели [18] контура барорефлекторной регуляции тонуса артериальных сосудов, находящейся под воздействием дыханием с линейно меняющейся частотой. Длительность модельной реализации составляет 30 минут, частота дыхания, моделируемого синусоидой, линейно нарастает от 0.05 Гц до 0.25 Гц.

В случае с экспериментальными зависимостями ситуация значительно усугубляется. Тем не менее, как видно из Рис. 2 даже в случае анализа реального сигнала ВСП, автоматизированной методике удастся отыскать полосу синхронизации.

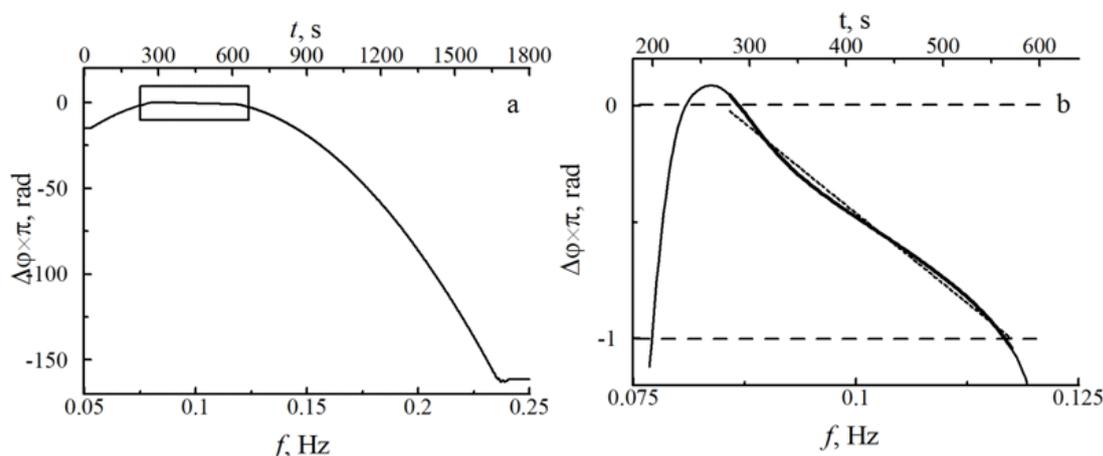


Рисунок 1. Результат применения автоматизированной методики к модельным данным; светлая линия – разность фаз в мелком (а) и увеличенном (б) масштабах; пунктирная линия – аппроксимирующая прямая; жирная линия – полоса синхронизации

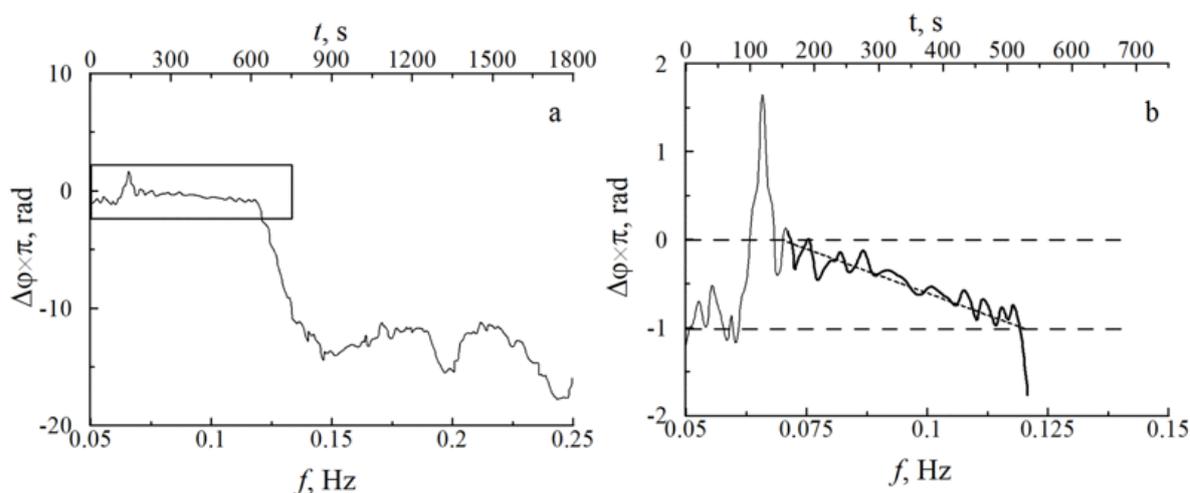


Рисунок 2. Результат применения автоматизированной методики к реальному сигналу variability сердечного ритма; светлая линия – разность фаз в мелком (а) и увеличенном (б) масштабах; пунктирная линия – аппроксимирующая прямая; жирная линия – полоса синхронизации

Вывод

В работе представлена методика автоматической диагностики синхронизации между 0.1 Гц составляющей сигнала variability сердечного ритма и вынужденным дыханием с линейно изменяющейся частотой. Введение алгоритма поиска полосы синхронизации, основанного на минимизации среднеквадратичной ошибки линейной аппроксимации участка временной реализации разности фаз, позволило упростить получение объективной оценки положения и ширины полосы захвата фаз.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-08-31145 и грантов Президента РФ МК-2267.2014.8 и МД-4368.2015.7.

Литература

1. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем: методические рекомендации // Вестник аритмологии. -2001. - No. 24. -С. 65-87.
2. Appel M.L., Berger R.D., Saul J.P., Smith J.M., Cohen R.J. Beat to Beat Variability in Cardiovascular Variables: Noise or Music? // Journal of the American College of Cardiology. -1989. -V. 14. -P. 1139-1148.
3. Berntson G.G., Bigger J.T., Eckberg D.L., Grossman P., Kaufmann P.G., Malik M., Nagaraja H.N., Porges S.W., Saul J.P., Stone P.H., van der Molen M.W. Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats // Psychophysiology. -1997. -V. 34. -P. 623-648.
4. Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. // Circulation. -1996. -V. 93. -P. 1043-1065.
5. Malliani A., Pagani M., Lombardi F., Cerutti S. Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain // Circulation. -1991. -V. 84. -P. 482-492.
6. Cooley R.L., Montano N., Cogliati C., van de Borne P., Richenbacher W., Oren R., Somers V.K. Evidence for a central origin of the low-frequency oscillation in RR-interval variability // Circulation. 1998. V. 98. P. 556.
7. Киселев А.Р., Хорев В.С., Гриднев В.И., Прохоров М.Д., Караваев А.С., Посненкова О.М., Пономаренко В.И., Безручко Б.П., Шварц В.А. Взаимодействие 0.1 гц-колебаний в variability ритма сердца и variability кровенаполнения дистального сосудистого русла // Физиология человека. -2012. -Т. 38. -No 3. -С. 92-99.
8. Караваев А.С., Киселев А.Р., Гриднев В.И., Боровкова Е.И., Прохоров М.Д., Посненкова О.М., Пономаренко В.И., Безручко Б.П., Шварц В.А. Фазовый и частотный захват 0.1 гц-колебаний в ритме сердца и барорефлекторной регуляции артериального давления дыханием с линейно изменяющейся частотой у здоровых лиц // Физиология человека. -2013. -Т. 39. -No. 4. -С. 93-104.
9. Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Bespyatov A.B., Bodrov M.B., Gridnev V.I. Deriving main rhythms of the human cardiovascular system from the heartbeat time series and detecting their synchronization // Chaos, Solitons & Fractals. -2005. -V. 23. -No. 4. -P. 1429-1438.
10. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С., Посненкова О.М., Прохоров М.Д., Пономаренко В.И., Безручко Б.П. Персонализация подхода к назначению гипотензивной терапии у больных артериальной гипертензией на основе индивидуальных особенностей вегетативной дисфункции сердечно-сосудистой системы // Артериальная гипертензия. -2011.-Т. 17. -No 4. -С. 354-360.
11. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Посненкова О.М., Беспятов А.Б., Довгалецкий П.Я., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Котельникова Е.В. Оценка на основе определения синхронизации низкочастотных ритмов динамики вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы при применении метопролола у больных ибс, перенесших инфаркт миокарда // Терапевтический архив. -2007. -Т. 79. -No. 4. -С. 23-30.
12. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С., Посненкова О.М., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Безручко Б.П. Сравнительная оценка влияния фозиноприла и ателнола на синхронизацию колебаний с частотой около 0,1 гц в ритме сердца и микроциркуляции крови у больных артериальной гипертензией // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. -2010. -Т. 6. -No. 6. -С. 803-811.
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. -No. 1. -С. 061-072.
14. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С., Посненкова О.М., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Безручко Б.П., Шварц В.А. Оценка пятилетнего риска летального исхода и развития сердечно-сосудистых событий у пациентов с острым инфарктом миокарда на основе синхронизации 0,1 Гц-ритмов в сердечно-сосудистой системе // Саратовский научно-медицинский журнал. -2010, -Т. 6, -No. 2, -С. 328-338.
15. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Посненкова О.М., Струнина А.Н., Шварц В.А., Довгалецкий Я.П. Динамика мощности низко- и высокочастотного диапазонов спектра variability сердечного ритма у больных ишемической болезнью сердца с различной тяжестью коронарного атеросклероза в ходе нагрузочных проб // Физиология человека. -2008. -Т. 34. -No. 3. -С. 57-64.
16. Hramov A.E., Koronovsky A.A., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D. Detecting synchronization of self-sustained oscillators by external driving with varying frequency // Physical Review E. -2006. -V. 73. -026208.
17. Короновский А.А., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Храмов А.Е. Изучение синхронизации автоколебаний по универсальным данным при изменении частоты внешнего воздействия с использованием вейвлетного анализа // Письма в ЖТФ. -2006. -Т. 32. -В. 11. -С. 81-88.
18. Ringwood J., Malpas S. Dynamic relationship between sympathetic nerve activity and renal blood flow: a frequency domain approach // American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology. -2001. -V. 280. -No. 4. -P. R1105-R1115.