

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

Кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии

**«Разработка метода исследования синхронизации контуров вегетативной
регуляции кровообращения на основе анализа статистических свойств
разностей мгновенных фаз»**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 4081 группы

направления 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»

профиль подготовки «Методы и устройства обработки биосигналов»

институт физики

Квасневская Полина Владимировна

Научный руководитель:
доцент, к.ф.-м.н., доцент

Е.И. Боровкова



подпись, дата

14.06.2024

Зав. кафедрой динамического
моделирования и
биомедицинской инженерии,
д.ф.-м.н., профессор

А.С. Карavaев



подпись, дата

14.06.2024

Саратов 2024

Введение. Исследование новых подходов к анализу синхронизации контуров вегетативной регуляции кровообращения посредством анализа статистических характеристик разностей мгновенных фаз представляет собой важную задачу в современной медицине, поскольку разработка новых методов диагностики сердечно-сосудистых заболеваний являются критически важными для улучшения общественного здоровья, снижения экономических затрат и повышения качества медицинской помощи.

Нарушения вегетативной регуляции могут быть связаны с такими патологическими состояниями, как артериальная гипертензия, инфаркт миокарда, диабет и другие заболевания. Введение новых методов анализа, включая исследование синхронизации на основе разностей мгновенных фаз, может значительно улучшить диагностику и мониторинг состояния пациентов, а также предоставить ценные данные для фундаментальных исследований в области физиологии и медицины. В данной работе предложены методики статистического анализа разностей мгновенных фаз, которые могут предоставить новые ключевые данные для исследования вегетативной регуляции кровообращения.

Целью данной работы является разработка метода исследования синхронизации контуров вегетативной регуляции кровообращения на основе анализа статистических свойств разностей мгновенных фаз процессов вегетативной регуляции кровообращения с характерной частотой около 0.1 Гц.

Для выполнения этой цели были поставлены следующие задачи:

1) Оценить параметры распределений разностей фаз: Процессы вегетативной регуляции кровообращения с частотой около 0.1 Гц для здоровых испытуемых и испытуемых с заболеваниями органов кровообращения

2) Оценить статистические свойства фазовых шумов: Разности фаз процессов вегетативной регуляции с частотой около 0.1 Гц.

3) Провести статистический анализ результатов, сделать выводы о характере распределений и статистических свойствах фазовых шумов.

4) Сравнить результаты здоровых и больных: Предложить диагностические критерии для оценки здоровья сердечно-сосудистой системы на основе параметров распределений и свойств фазовых шумов.

В данной работе материалами исследования являются 10 минутные записи сигналов электрокардиограммы (ЭКГ) и фотоплетизмограммы (ФПГ) для трех групп испытуемых:

- 1) Здоровые испытуемые (112 чел.)
- 2) Испытуемые с диагностированной гипертонией (64 чел.)
- 3) Испытуемые, перенесшие инфаркт миокарда (120 чел.)

Из сигналов ЭКГ были получены ряды RR-интервалов. Из RR-интервалов и ФПГ были выделены мгновенные фазы низкочастотных колебаний. Разность этих мгновенных фаз является основным объектом исследования в данной работе.

Работа состоит из трех основных глав:

1. Экспериментальные данные (их описание и первичный анализ).
2. Методы оценки статистических свойств разностей мгновенных фаз (Методы оценки синхронизации фаз, распределения и концентрации распределений, а также методы статистического анализа результатов).
3. Результаты (оценка результатов и выводы).

В данной работе были использованы междисциплинарные методы, например, методы из статистики, теории сигналов и физиологии для исследования вегетативной регуляции кровообращения. Также в этой работе использовался новый метод оценки концентрации распределений.

Основное содержание работы. Первым этапом анализа данных является выделение RR-интервалов, которые представляют собой промежутки между сердечными сокращениями, измеренные от одного R-зубца до следующего на ЭКГ. Сигнал ЭКГ содержит множество информации о сердечной активности, но выделение RR-интервалов упрощает его, позволяя сосредоточиться на анализе ритма. Этот процесс осуществляется с помощью второй производной сигнала

ЭКГ, что увеличивает амплитуду R-зубцов и облегчает их последующую обработку. Вершины R-пиков определяются как локальные минимумы, и на их основе строится ряд RR-интервалов.

Далее, спектры сигналов ФПГ и RR были выделены с помощью преобразования Фурье, используя метод Уэлча для уменьшения дисперсии оценок спектральной плотности мощности. Этот метод включает разбиение сигнала на перекрывающиеся сегменты и применение оконной функции к каждому сегменту. После усреднения периодограмм сегментов получается итоговая оценка спектра мощности.

Для получения низкочастотной составляющей сигналов применялась фильтрация полосным фильтром на частоте 0,06-0,14 Гц. Далее было использовано преобразование Гилберта для выделения мгновенных фаз, которые показывают текущую позицию сигнала в цикле колебаний. Мгновенная фаза вычисляется как арктангенс отношения мнимой части к реальной части аналитического сигнала.

Затем вычислялись разности мгновенных фаз $\Delta\phi$, и выполнялось сглаживание сигналов для устранения резких скачков, вызванных шумами и движениями. Сглаживание проводилось путем корректировки значений фазы, если их разности превышали заданный порог. Затем строились распределения разностей фаз, нормированные на 2π и отображенные в виде гистограммы. Эта предварительная обработка данных позволила подготовить сигналы для дальнейшего анализа синхронизации и выявления закономерностей в вегетативной регуляции кровообращения.

Для исследования были использованы следующие методы:

- 1) Суммарный процент фазовой синхронизации $S\%$;
- 2) Коэффициент фазовой синхронизации ρ ;
- 3) Оценка уровня фазового шума;
- 4) Коэффициент концентрации Джини G
- 5) Т-критерий Стьюдента
- 6) U-критерий Манна-Уитни

1 Суммарный процент фазовой синхронизации

Суммарный процент фазовой синхронизации рассчитывается с помощью разности фаз $\Delta\varphi(t)$. Участки синхронизации фаз между ритмами с частотой около 0.1 Гц из сигналов ЭКГ и ФПГ диагностируются как области, где график $\Delta\varphi(t)$ колеблется около постоянного значения, то есть выполняется условие $|\varphi - C| < \text{const}$, где C — константа. Эти участки выявляются с помощью линейной аппроксимации методом наименьших квадратов. В окне шириной b проводится линейная аппроксимация $\varphi(t)$, и для середины окна вычисляется угловой коэффициент наклона аппроксимирующей прямой α . Участки с малым значением α соответствуют синхронизированным областям, где зависимость $\Delta\varphi(t)$ близка к горизонтальной. Суммарный процент синхронизации S определяется как процентное отношение длины всех синхронных участков разностей фаз к общей длине сигнала.

2 Коэффициент фазовой синхронизации

Коэффициент фазовой синхронизации, как и суммарный процент фазовой синхронизации, используется для количественной оценки уровня синхронизации между колебаниями двух осцилляторов. Этот численный показатель характеризует синхронизованность фаз двух осцилляторов и отражает стабильность разности их фаз. Коэффициент фазовой синхронизации ρ вычисляется по формуле (1).

$$\rho = |\langle e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} \rangle|, \quad (1)$$

где угловые скобки означают процедуру усреднения, φ_1 и φ_2 – мгновенные фазы колебаний осцилляторов.

Коэффициент фазовой синхронизации ρ изменяется от 0 до 1, при полном совпадении фаз коэффициент равен единице, а при отсутствии синхронизации — нулю.

3 Уровень фазового шума

Уровень фазового шума измеряет случайные флуктуации мгновенной фазы сигнала от идеальной синусоиды, отражая стабильность фазы и степень отклонений из-за различных факторов, влияющих на биологические ритмы. Для

его оценки используются скользящие окна, в которых вычисляются среднее арифметическое и срединное значение фаз в окне. Нормированная разница между ними и ее стандартное отклонение определяют уровень фазового шума.

4 Коэффициент Джини

Коэффициент Джини является количественным показателем степени неравномерности распределения какого-либо признака. Он хорошо подходит для отражения степени концентрации распределения разности мгновенных фаз. Коэффициент Джини G рассчитывается по формуле (2).

$$G = \sum p_i q_{i+1} - \sum p_{i+1} q_i \quad (2)$$

где p_i – накопленная частота первых i исследуемых групп; q_i – накопленная доля исследуемого признака в первых i группах.

Коэффициент Джини изменяется от 0 до 1. Чем ближе значение к 0, тем более равномерным является распределение изучаемого признака.

5 Т-критерий Стьюдента

Критерий Стьюдента (t-критерий) — это статистический метод, используемый для проверки гипотез о равенстве средних значений в двух выборках. Он применяется для сравнения средних значений двух независимых или зависимых выборок, чтобы определить наличие статистически значимой разницы между ними. Например, его можно использовать для сравнения результатов тестирования двух разных групп.

В данной работе был использован двухвыборочный t-тест для оценки статистической значимости разницы между выборками. Полученное значение Т-критерия сравнивается с критическим значением из таблицы распределения Стьюдента для заданного уровня значимости (например, 0,05 или 0,01) и степеней свободы. Если Т-критерий превышает критическое значение, нулевая гипотеза о равенстве средних значений отвергается.

Кроме того, для значения Т-критерия может быть рассчитано Р-значение, которое показывает вероятность получения наблюдаемых данных или более экстремальных результатов при условии, что нулевая гипотеза верна. Р-значение

вычисляется с использованием кумулятивной функции распределения (CDF) T-распределения и демонстрирует вероятность того, что T-статистика будет столь же экстремальной или более экстремальной, как наблюдаемое значение, при верности нулевой гипотезы. T-критерий Стьюдента рассчитывается по формуле (3)

$$t = \frac{X_1^2 - X_2^2}{\sqrt{M_1^2 + M_2^2}}, \quad (3)$$

где X_1 и X_2 – средние арифметические значения переменных в выборках;
 M_1 и M_2 – величины средних ошибок, равные среднему квадратичному отклонению, деленному на объем выборки.

6 U-критерий Манна-Уитни

Критерий Манна-Уитни (U-тест) — непараметрический метод для сравнения двух независимых выборок, используемый для определения различий между группами по непрерывным или порядковым признакам без предположения о нормальности данных. Процедура включает ранжирование объединенных значений двух выборок, присвоение рангов, суммирование рангов для каждой выборки и вычисление U-статистики. Если U-статистика меньше или равна критическому значению для заданного уровня значимости, нулевая гипотеза о равенстве распределений отвергается.

U-статистике рассчитываются по формуле (4).

$$U_1 = n_1 n_2 \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1$$
$$U_2 = n_1 n_2 \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2, \quad (4)$$

где n_1 и n_2 — размеры выборок;

R_1 и R_2 — суммы рангов выборок.

Далее была проведена оценка результатов, полученных с помощью описанных методов. Для всех испытуемых был рассчитан суммарный процент синхронизации, коэффициент фазовой синхронизации, уровень фазового шума и коэффициент Джини. Затем была произведена статистическая оценка разниц

между группами испытуемых с помощью Т-критерия Стьюдента и U-критерия Манна-Уитни. На рисунке 1 представлены полученные результаты.

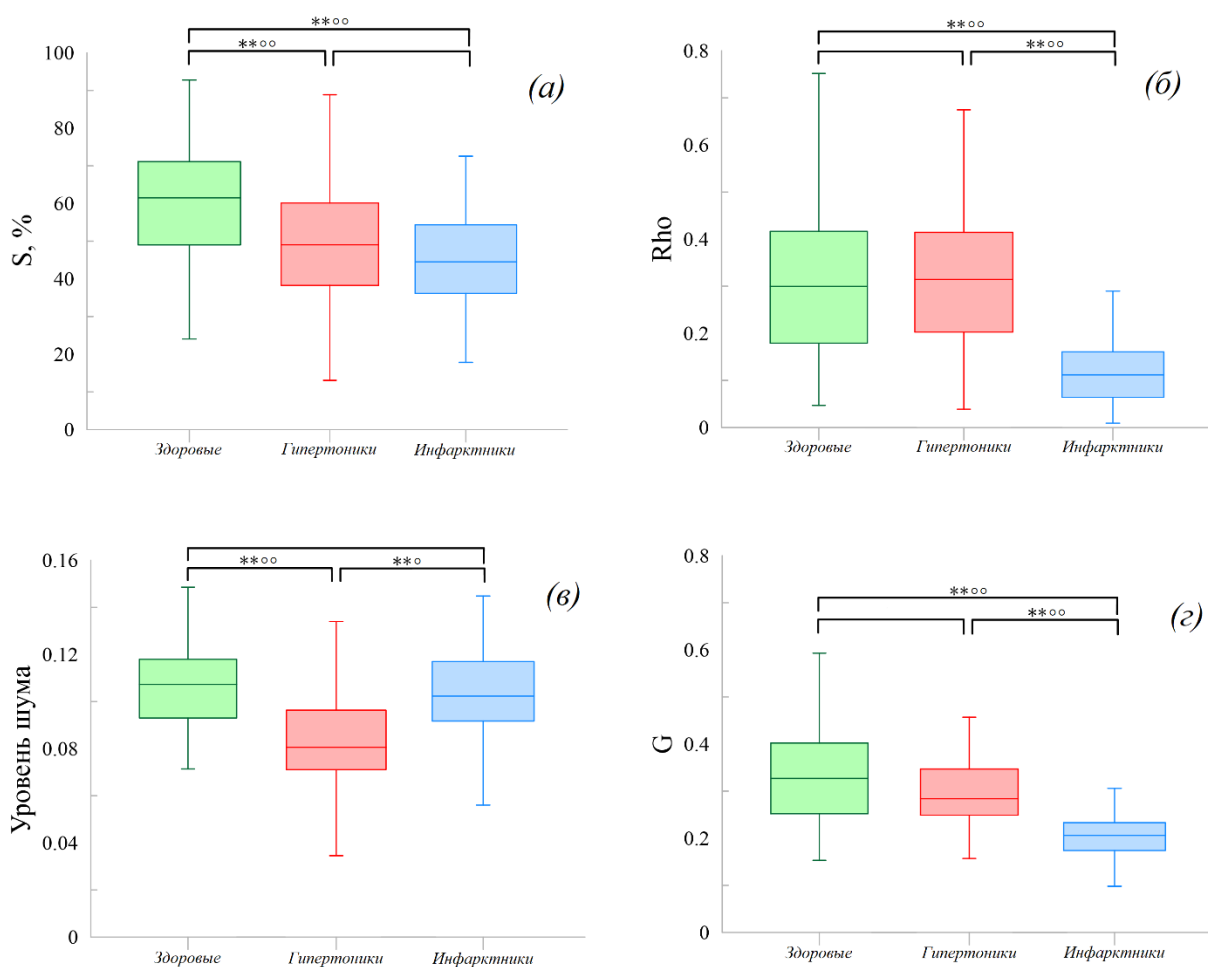


Рисунок 1 – Оценка результатов использования методов исследования (а) – суммарного процента фазовой синхронизации $S\%$, (б) – коэффициента фазовой синхронизации ρ , (в) – уровня фазового шума, (г) – коэффициента концентрации Джини G , ** – Т-критерий Стьюдента при уровне значимости 0.01, * – Т-критерий Стьюдента при уровне значимости 0.05, °° – U-критерий Манна-Уитни при уровне значимости 0.01, ° – U-критерий Манна-Уитни при уровне значимости 0.05

После анализа полученных результатов были сделаны следующие выводы:

1) Коэффициент фазовой синхронизации ρ позволяет наиболее заметно отличить испытуемых с гипертонией от здоровых.

2) Для всех 4 методов у здоровых испытуемых наблюдаются самые высокие значения коэффициентов.

3) Метод оценки фазового шума позволяет обнаружить наиболее явную разницу между здоровыми испытуемыми и гипертониками, которая не так заметна при использовании других методов.

4) Исследуемые методы коррелируются между собой и дополняют друг друга. Поэтому наиболее эффективным является их одновременное использование.

Заключение. Таким образом, в рамках данной работы удалось применить различные статистические методы оценки распределений и корреляционных свойств фазовых шумов разностей фаз процессов вегетативной регуляции кровообращения для разработки методов анализа состояний сердечно-сосудистой системы. При совместном использовании все методы показали себя эффективными для различия здоровых испытуемых и испытуемых с различными заболеваниями сердечно-сосудистой системы.

14.06.2024

 Квасневская Полина Владимировна