

Выявление фетальной аритмии плода по неинвазивной ЭКГ с помощью анализа псевдофазового портрета

К. С. Старченкова, Л. А. Манило

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

karinasmbatovna@gmail.com, lmanilo@yandex.ru

Аннотация. Диагностика состояния плода во время беременности является одной из важнейших задач в акушерстве и гинекологии. До развития медицинской техники применялась в основном аускультация, позволявшая лишь выслушать сердечный ритм плода. На сегодняшний день благодаря появлению эффективных методов диагностики появились новые возможности для полноценного анализа развития плода. Одним из наиболее важных этапов мониторинга за его состоянием является диагностика сердечбиения. Злокачественный характер целого ряда нарушений ритма сердца и проводимости у плода требует разработки новых автоматизированных комплексов для автоматического обнаружения фетальной аритмии. В наших предыдущих работах были проведены исследования по применению морфологического описания псевдофазового портрета (ПФП) для диагностики мерцательной аритмии и получены хорошие результаты по распознаванию этого нарушения. В данном исследовании усовершенствован набор информативных морфологических признаков и исследована возможность применения данного метода для распознавания фетальной аритмии плода. Целью данной работы является разработка и исследование морфологического описания ПФП для медицинских компьютерных систем, способных осуществлять непрерывный мониторинг сердечбиения плода по неинвазивной ЭКГ. Для достижения поставленной цели был обоснован выбор морфологического описания ПФП, а также сформирован набор информативных признаков, на основе которых решается поставленная задача. В результате проделанной работы получены диагностические показатели, с помощью которых можно оценить выраженность хаотических компонент и обнаружить фетальную аритмию.

Ключевые слова: нелинейная динамика; фазовый портрет; фетальная аритмия

I. ВВЕДЕНИЕ

Фетальные нарушения ритма регистрируются в 1–5 % случаев всех беременностей. При этом около 10 % всех аритмий сопровождаются развитием патологии и внутриутробной смертностью. В настоящее время УЗИ является наиболее доступным методом регистрации сердечного ритма плода, а также достаточно эффективным способом диагностики фетальных аритмий. В тоже время в третьем триместре беременности при наличии подозрений на развитие

аритмии плода рекомендуется проводить ЭКГ исследование [1].

Сердечная аритмия плода определяется как любой нерегулярный сердечный ритм плода или обычный ритм со скоростью, выходящей за пределы диапазона от 100 до 200 ударов в минуту. Аритмии обнаруживаются примерно у 1 % плодов, причем около 10 % из них считаются потенциальными источниками заболеваемости. Хотя большинство аритмий плода являются доброкачественными, некоторые из них могут вызвать отек плода и привести к его гибели. Это означает, что один плод из ста нуждается в тщательном мониторинге аритмий.

В нелинейных методах для представления результатов анализа временных последовательностей используются: показатель корреляционной размерности, старший показатель Ляпунова, энтропии динамической системы, графики аттрактора и др. методы. Рассматриваемая нами задача ранее решалась в основном статистическими и спектральными методами, которые не в полной мере описывали динамические свойства сигналов, поэтому точность распознавания оставалась недостаточно высокой. В литературных источниках [2–3] задача определения аритмии плода по ЭКГ решалась с использованием параметров энтропии: выборочная энтропия, нечёткая энтропия, аппроксимированная энтропия, что дало хорошие результаты. Однако практическое применение энтропийных подходов ограничено требованием большого числа данных, чувствительностью к шумам, сложностью вычислительных алгоритмов. В основу геометрических методов входит анализ графиков и фигур, что позволяет визуализировать биомедицинские сигналы, а также оценивать некоторые показатели формы этих фигур. Главное преимущество этих методов – это нечувствительность к аналитическому качеству временной выборки сигнала, что делает результаты анализа более стабильными. Ранее распознавание фетальной аритмии плода нелинейными геометрическими методами не проводилась. В связи с этим предполагается, что использование геометрического подхода для решения поставленной задачи откроет новые возможности для оценки мониторинга состояния плода.

В данной работе рассмотрен геометрический метод нелинейного анализа сигнала сердечного ритма

(построение ПфП), который является на сегодняшний день принципиально новой методикой. Данный метод относится к графическим методам анализа временных рядов на фазовой плоскости. Фазовая плоскость – координатная плоскость, в которой по осям откладываются фазовые координаты, однозначно определяющие состояние системы второго порядка. Такая плоскость является частным случаем фазового пространства, которое может иметь большую размерность. В фазовом пространстве состояние сколь угодно сложной системы представляется одной единственной точкой, а «эволюция» этой системы – траекторией перемещения этой точки [4]. В нашем исследовании нелинейная динамика временного ряда анализировалась путем построения ломаной линии в системе координат, где по оси абсцисс откладываются полученные значения кардиоинтервалов в диапазоне x_1, \dots, x_{n-1} , а по оси ординат в диапазоне x_2, \dots, x_n , т. е. со смещением на один интервал [5–6].

В связи с тем, что в сигналах при наличии разной хаотической составляющей сложно найти отличия только по визуальной оценке ПфП, было решено выявить параметры, которые могли бы количественно характеризовать отличительные свойства аттрактора. В работе приведены семь признаков, оценивающих морфологию ПфП.

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПфП

Вначале в качестве морфологических признаков были выделены периметр и площадь контура, ограничивающего ПфП. Для построения контура в среде MATLAB использована функция `convhull`. Чтобы построить выпуклый контур на вход функции подаются значения координат точек, а на выходе получаем номера точек образующих вершины. Зная координаты полученных точек, можно определить длину контура по формуле:

$$L_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}, \quad (1)$$

где (x_i, y_i) , (x_{i+1}, y_{i+1}) – координаты начала и конца i -го того отрезка.

Расчет площади происходит с помощью функции `convhull`, но эту функцию нужно вызвать со вторым входным аргументом s , в который будет записана площадь под контуром. Этот параметр полезен для анализа в связи с тем, что при одной и той же величине периметра контура, площадь ограниченная им, может быть различна.

Из-за разности масштабов сигналов было решено ввести еще один параметр – коэффициент, который равен отношению квадрата периметра к площади контура.

Следующим морфологическим признаком выбрана длина линии составляющей ПфП. Этот параметр характеризует степень его разброса. Чем большей нерегулярностью обладает изучаемый сигнал, тем дальше будут располагаться точки, которые ориентируют линии, составляющие ПфП. Зная координаты точек, образующих ломаную линию, легко найти её длину в соответствии с (1).

Также целесообразно произвести оценку средней длины линий, образующих ПфП. Среднюю длину линий можно определить делением длины ломаной линии, образующей ПфП, на количество прямых, составляющих его.

В качестве шестого параметра было предложено использовать количественную оценку «скачка» (перехода от больших длин к малым). За «скачок» принимались те линии, у которых перепад значений от текущей точки к последующей был больше одной трети текущего значения:

$$((x(i) - x(i + 1)) > \frac{x(i)}{3}).$$

В качестве последнего морфологического признака выбрано количество точек фигуры, попадающих в диапазон от 0 до 45 градусов. Абсцисса координатной плоскости для определения выбранного диапазона проходила через нижнюю точку фигуры, а ордината через центр масс фигуры (рис. 1). Такой угловой диапазон был выбран в связи с тем, что в нерегулярных сигналах наблюдается значительный разброс точек и в эту область попадает ПфП тех ритмов, которые имеют более выраженную хаотическую компоненту.

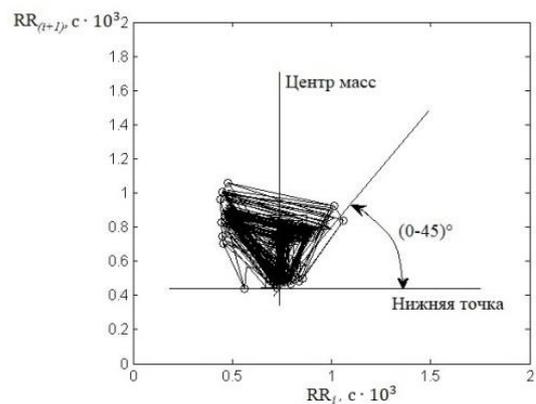


Рис. 1. Выбор количества точек фигуры, попадающих в диапазон от 0 до 45 градусов

III. РАСЧЕТ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПфП

Для проведения исследования была использована база данных Non Invasive Fetal ECG Arrhythmia Database. Эта база данных содержит серию записей аритмий плода и ряд контрольных записей нормального ритма, выполненных с использованием неинвазивной ЭКГ плода. Перед съемом ЭКГ с помощью аппарата УЗИ устанавливалось местоположение плода. Затем к животу матери прикрепляли пять электродов, так, что электрод №1 был на уровне головы плода, а №2 в области грудной клетки плода. Частота дискретизации сигналов составляет 500 Гц.

Для анализа фетальной аритмии плода с помощью метода ПфП было использовано отведение №2, снятое с области грудной клетки плода. Для каждой группы сигналов было обработано по пятьдесят реализаций, представляющих собой десятисекундные записи ЭКГ.

Для построения ПфП в качестве размерности пространства вложения использовано значение $m=2$.

Рассмотрим полученные псевдоаттракторы исследуемых сигналов и рассчитаем их морфологические признаки. Анализ проводится на пятидесяти реализациях каждого ритма. Примеры построения ПФП представлены на рис. 2. Результаты статистической обработки полученных данных представлены в табл. I.

Проанализировав полученные данные, можно заключить, что значения периметра, коэффициента, длины ломаной линии, количества скачков и количества точек в диапазоне (0–45)° имеют явные отличия для рассматриваемых сигналов. Значения данных признаков у фетальной аритмии больше, чем у нормального ритма. Площадь контура и средняя длина линий наоборот уменьшаются при аритмии плода, но, тем не менее, по данным признакам можно провести распознавание аритмии плода.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор наиболее информативных признаков является одной из важных проблем классификации. Совокупность признаков должна обладать высокой информативностью, чтобы обеспечить эффективную работу алгоритмов распознавания, и в то же время размерность описания должна быть небольшой, чтобы упростить процедуру классификации и, соответственно, повысить быстродействие системы диагностики [7–9].

В работе информативность морфологических признаков оценивалась с помощью методов накопленных частот (МНЧ), Шеннона и Фишера. В

методе МНЧ оценивается модуль разности накопленных частот. Метод Шеннона оценивает информативность как средневзвешенное количество информации, приходящееся на различные интервалы признака. А с помощью метода Фишера можно найти такую ориентацию весового вектора, для которой спроецированные выборки будут хорошо разделены. При этом можно численно оценить меру разделимости двух классов объектов в направлении полученного весового вектора.

В ходе экспериментов проведена оценка информативности полученных признаков. Использована нормировка признаков по величине рассеяния. Сводная таблица II отражает результат оценки информативности полученных морфологических признаков.

Проанализировав данные таблицы, можно прийти к выводу о том, что каждый из морфологических признаков справился с поставленной задачей, по каждому признаку можно осуществить распознавание фетальной аритмии. Информативность, оцененная методами накопленных частот и Шеннона, показывает, что все признаки имеют высокую информативность. Метод Фишера определяет, как наиболее информативный признак – периметр ПФП, а как менее информативный – количество точек в диапазоне (0–45)°.

Результаты вычислений показывают, что различные методы достаточно высоко оценивают информативность предложенных морфологических признаков, что позволяет применить их для распознавания фетальной аритмии.

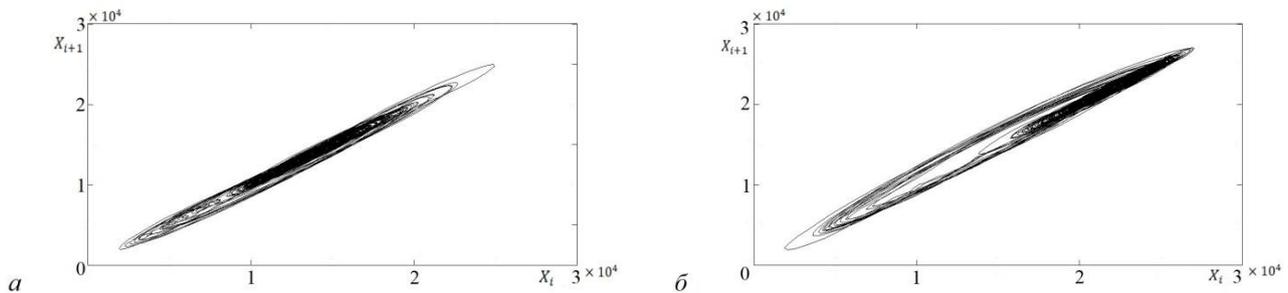


Рис. 2. ПФП: а – нормального ритма, б – фетальной аритмии

ТАБЛИЦА I. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПФП

Номер признака	Параметры ПФП	Вид ритма	
		Нормальный ритм	Фетальная аритмия
1	Периметр контура, *10 ³	15.77±20.76	28.39±0.73
2	Площадь контура, *10 ⁸	3.53±0.88	1.90±0.04
3	Коэффициент, *10 ⁻²	73.06±5.48	920.88±3.49
4	Длина ломаной, *10 ⁷	1.33±0.48	9.60±0.16
5	Средняя длина линий, *10 ⁷	1.24±0.48	0.45±0.06
6	Число «скачков»	9542.23±29.96	9939.90±3.19
7	Количество точек в диапазоне (0-45)°	0.00±0.00	4.28±1.14

ТАБЛИЦА II. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНОСТИ СЕМИ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

Методы	Периметр	Площадь	Коэф.	Длина кривой	Средняя длина	Скачки	Кол-во точек (0–45)°
	1	2	3	4	5	6	7
Метод Фишера	121.96	59.75	51.47	52.25	44.91	115.21	2.90
МНЧ	50	50	50	50	50	50	50
Метод Шеннона	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

В данной работе использовался линейный дискриминантный анализ на основе критерия Фишера. При решении двухклассовой задачи распознавания фетальной аритмии в пространстве предложенных морфологических признаков показатели чувствительности, специфичности и точности метода составили 96.0 %.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема своевременной и правильной диагностики обнаружения фетальной аритмии плода относится к актуальным задачам. Разработка новых систем мониторинга и диагностики дает возможность повысить качество медицинской помощи. В настоящее время технические и программные средства дают качественно новые возможности обработки медицинских данных. В представленной работе было проведено исследование применения морфологического описания ПфП на сигналах ЭКГ нормального ритма и при фетальной аритмии. Съём ЭКГ осуществлялся с помощью пяти электродов с живота матери, так, что электрод №1 был на уровне головы плода, а №2 в области грудной клетки плода. С помощью расчета информативности морфологических признаков ПфП были оценены возможности использования каждого признака для распознавания фетальной аритмии плода. Показано, что на основе морфологического описания ПфП сердечного ритма плода можно достаточно эффективно распознавать опасные для жизни аритмии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Jaeggi E., Fouron J.C., Drblik S.P. Fetal atrial flutter: diagnosis, clinical features, treatment, and outcome // *J. Pediatr.* 1998. Vol. 132, № 2. P. 335–339.
- [2] Гудков Г.В. Нелинейные свойства сердечного ритма плода в прогнозировании пренатальных исходов // *ВНМТ.* 2009. №4.
- [3] Keenan E, Udhayakumar RK, Karmakar CK, Brownfoot FC, Palaniswami M. Entropy Profiling for Detection of Fetal Arrhythmias in Short Length Fetal Heart Rate Recordings. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2020 Jul; 2020:621-624. doi: 10.1109/EMBC44109.2020.9175892. PMID: 33018064.
- [4] Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б., Подлазов А.В. *Нелинейная динамика.* Москва, Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2011. 280 с.
- [5] Khachatryan K., Manilo L., Anisimov A. The method of analysis pseudo-phase portrait in the problem of recognition of biomedical signals. 20th Conference of Open Innovations Association (FRUCT) - IEEE, 2017. P. 146-153.
- [6] Хачатрян К.С., Манило Л.А. Метод анализа псевдофазового портрета в задаче распознавания биомедицинских сигналов. *Биотехносфера, Издательство «Политехника».* 2016. №5. С.14-18.
- [7] Khachatryan K., Manilo L., Estimation of informational contents of morphological features of pseudo-phase portrait of rhythmograms on the basis of cluster analysis, 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), Yekaterinburg, Russia. 2018. P. 120-123.
- [8] Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. (2001) *Pattern Classification, Part 1,* (Wiley, New York).
- [9] Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. *Статистическая теория распознавания образов.* М.: Радио и связь, 1986. 264 с.