

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПЛОДА ПО НЕИНВАЗИВНОМУ ЭКГ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ФИЛЬТРОВ

А. С. Шапошникова • М. Р. Богданов

Аннотация. Анализ сердечного ритма плода на данный момент времени является наиболее эффективным и точным методом для оценки здоровья плода. Существуют два способа получения измерений – инвазивный и неинвазивный. Первый метод используется непосредственно во время родов, электрод от электрокардиографа подключается к голове плода. Этот метод является более точным по сравнению с неинвазивным за счет прямого считывания сигнала сердечного ритма. Однако благодаря неинвазивному методу появляется возможность отслеживать изменения в здоровье плода на 2 и 3 триместрах и применять эффективное лечение к образующимся на ранних стадиях недугам. Основная проблема метода – точность считывания сердечного ритма плода, так как сигнал подвергается искажению за счет материнского сердцебиения и движений плода. В данной статье будет рассмотрен алгоритм по определению сердечного ритма плода, а также будут оцениваться несколько фильтров для удаления артефактов с записи ЭКГ.

Ключевые слова: сердечный ритм плода; неинвазивная электрокардиография плода; определение QRST-волны матери; определение длины RR-интервала плода; фильтр преобразования Фурье; фильтр Савицкого и Голея.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее эффективным методом оценки состояния плода является анализ его сердечного ритма. Нормальным значением сердцебиения плода является вариация ритма от 100 до 180 ударов в минуту. Выход за данные рамки может свидетельствовать о наличии заболеваний сердечной системы или отклонениях в здоровье плода. Согласно заключению специалистов [1], аритмия диагностируется в 1–2 % случаях. Наличие аритмии может свидетельствовать о возникновении у плода дистресса [2], анемии, развитии инфекционных процессов [3], в особо опасных случаях – о возникновении водянки, что может привести к гибели плода.

Благодаря анализу ритма можно выявить сердечные аномалии на 2 и 3 триместре, назначить лечение с помощью специальных препаратов или провести операцию для сохранения жизни матери и малыша. Поэтому становится актуальным вопрос быстрого и точного определения нарушения ритма плода.

Для анализа существующих решений в области анализа данных в перинатальной кардиологии был проведен поиск по зарубежным и отечественным статьям. Существует методология [4] по исследованию аритмий сердца плода с помощью сегментирования исходного кардиосигнала и глубокого обучения. В статье был предложен метод обнаружения ЭКГ плода на общем ЭКГ с помощью первой производной, производилась сегментация исходных данных и передача сегмента в модель глубокого обучения [5], для избавления сигнала от шума использовался автоэнкодер. Помимо данной методологии, был предложен алгоритм по выявлению гипоксии плода [6] по данным ЭКГ с помощью сингулярного разложения и применения усовершенствованного метода FastICA. В данной статье производилось улучшение алгоритма FastICA. После этого алгоритм использовался совместно с сингулярным разложением исходного сигнала, содержащего как ЭКГ матери, так и ЭКГ плода. Также интересные результаты исследований приводятся в статье по применению энтропии вейвлета Клиффорда для извлечения ЭКГ плода [7]. Перед специалистами стояли следующие задачи: сравнение энтропии

Клиффорда с существующими мерами энтропии, сравнение вейвлет-методов Хаара, Фабера–Шодера и Клиффорда, введение новой формы энтропии Шеннона для измерения порядка/беспорядка извлеченных и/или восстановленных сигналов из зашумленных относительно вейвлет-/мультивейвлет-приложения, выделение ЭКГ плода на основном сигнале с помощью перечисленных видов энтропий. Стоит отметить, что перечисленные решения предложены специалистами из иностранных университетов и научных заведений. В российском сегменте подобные работы практически не встречаются. В качестве отечественной работы можно рассмотреть статью, опубликованную в издании сетевого доступа [8]. В данной работе использовались алгоритм амплитудного порога и бутстреп с 95% доверительным интервалом для выделения материнской ЭКГ и ЭКГ плода. Вычитание материнских паттернов проводилось с помощью автокорреляционной функции.

В статье будет рассматриваться алгоритм по выявлению сердечного ритма плода на общей записи ЭКГ, включающей пульс матери и ребенка. Также будет проведено сравнение фильтров для получения «чистой» записи ЭКГ плода.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АЛГОРИТМА

Основная задача алгоритма – выявить на общей записи ЭКГ матери и ребенка сердечные сокращения плода и определить длительность RR-интервала (последовательность сердечных сокращений) в секундах. Проблема в определении ЭКГ плода связана с влиянием шумов: сердечных сокращений матери и подвижности тела ребенка. Запись сердца матери является интерферирующим сигналом и превосходит сигнал сердцебиения ребенка во много раз. Поэтому одной из важных задач в области кардиологии плода является определение реперных точек ЭКГ матери, обнаружение образа ее QRST-волны и удаление ее с записи. Другой не менее важной задачей является определение образа QRST-волны плода. На данных после удаления материнской ЭКГ могут оставаться остаточные шумы от удаленной записи, а также звуки движения плода. Таким образом, становится важной задача точной фильтрации сигнала. В данной работе будет приведено сравнение работы двух фильтров для удаления шумов – фильтр с преобразованием Фурье и фильтр Савицкого и Голея с различными режимами обработки сигнала.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

Алгоритм обнаружения сердечного ритма плода выполняется следующим образом:

1. Обработка исходного сигнала ЭКГ и устранение шумов.
2. Выделение ЭКГ матери с помощью амплитудного порога и бутстреп, подсчет в секундах длины RR-интервала.
3. Удаление материнского ЭКГ с записи с помощью автокорреляционной функции.
4. Выделение ЭКГ плода, проведение фильтрации получившегося сигнала.
5. Выделение R-пиков плода, подсчет длины RR-интервала в секундах.

Для получения точных результатов частоты сердечных сокращений плода необходимо «очистить» получившуюся после удаления материнской ЭКГ запись. Для этого в текущей работе рассматривались два фильтра: очистка сигнала с помощью преобразования Фурье и фильтрация Савицкого и Голея с 4 режимами обработки сигнала: *mirror* (повторение значений сигнала по краям в обратном порядке), *nearest* (ближайшее значение сигнала), *constant* (значение, заданное определенным аргументом (в данной статье оно равно 1.5)), *wrap* (использование значений с другого конца массива). Преобразование Фурье исходного сигнала задается следующей формулой:

$$\hat{f}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-ixw} dx.$$

При выполнении фильтрации Савицкого и Голея вычисляется полиномиальная аппроксимация на основе степени полинома и размера окна.

Для проверки работы алгоритма и различных методов фильтрации использовались данные из нескольких наборов открытого доступа [9–11]. Данные представляют собой csv и edf-файлы, разделенные на здоровый сердечный ритм плода и сердечный ритм с аритмией.

На рисунке 1 представлена общая запись ЭКГ матери и плода после определения R -зубцов матери. Программа определила положение R -пикув верно, R -зубец обладает самой высокой амплитудой среди других зубцов QRST-комплекса.

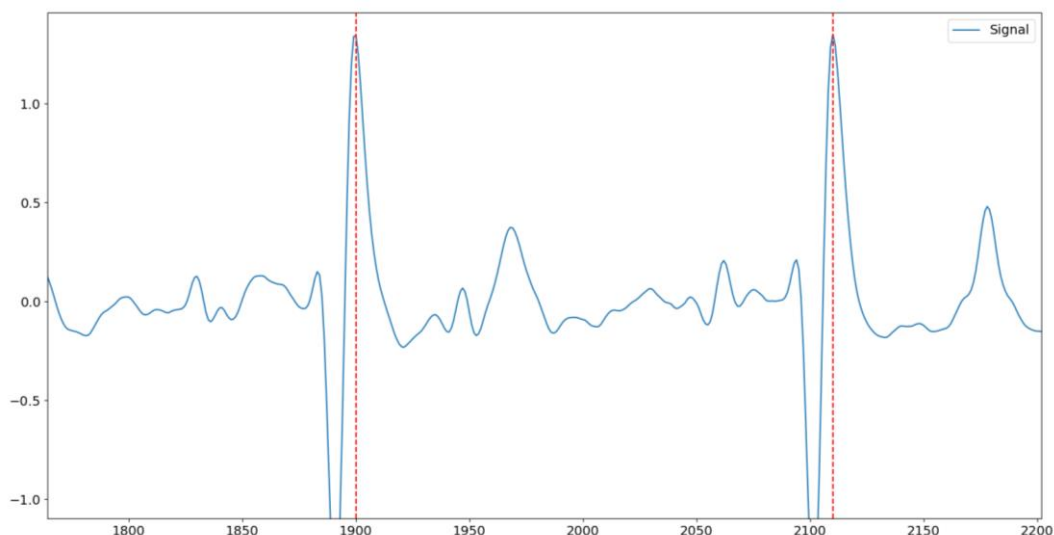


Рис. 1 Отображение данных ЭКГ плода и матери с определенными R -пиками.

На рисунке 2 представлены данные после удаления ЭКГ матери до применения фильтра с распределением Фурье (оранжевый цвет) и после его применения (синий цвет). Как видно из рисунка, после применения фильтра из данных пропали высокие амплитуды и выбросы, основные пики сохранились. На рисунке 3 представлены значения ЭКГ плода до применения фильтра Савицкого и Голея (оранжевый цвет) и после его применения (синий цвет). После применения фильтрации данные практически полностью сохранили свое исходное значение, сгладились некоторые выбросы. Такой результат отображения достигается при любом выборе режима фильтрации.



Рис. 2 Отображение данных ЭКГ плода до и после применения фильтра Фурье.

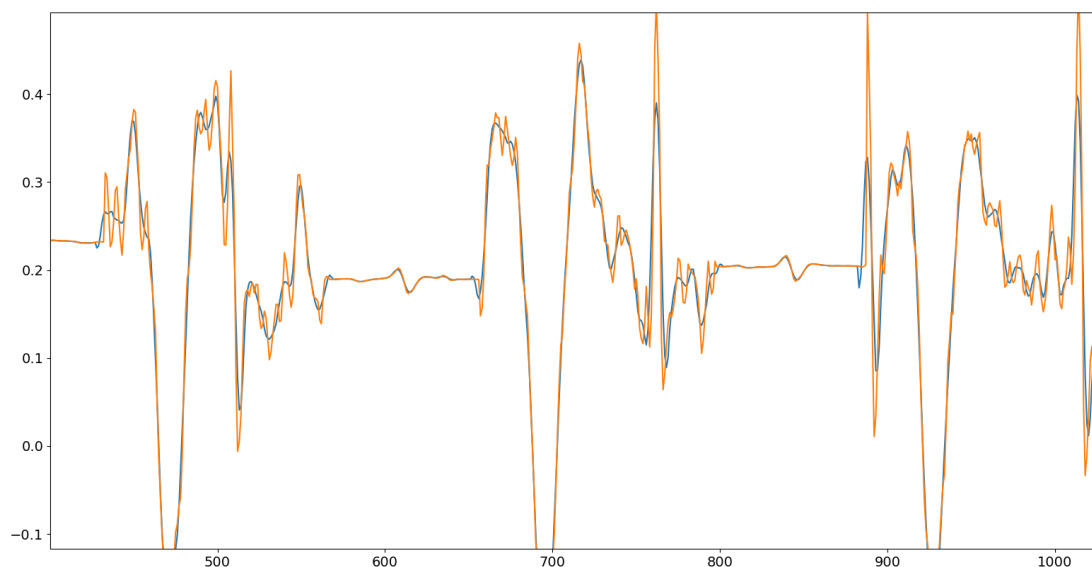


Рис. 3 Отображение данных ЭКГ плода до и после применения фильтра Савицкого и Голея.

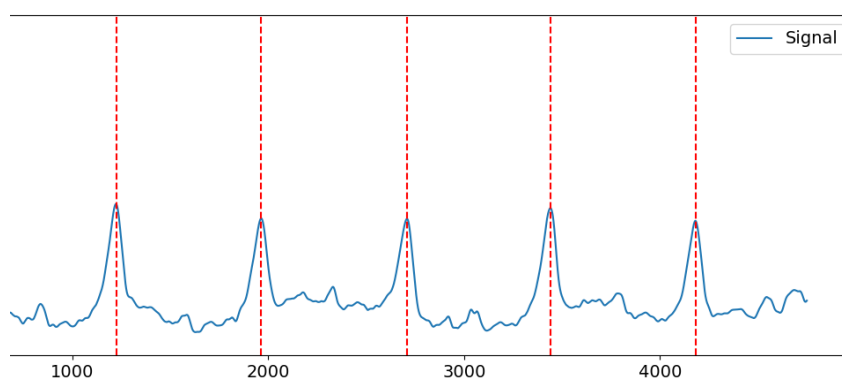


Рис. 4. Определение R-пикув плода.

На рисунке 4 представлен результат поиска *R*-пикув на ЭКГ плода. Программа определила положение *R*-пикув верно, *R*-зубец обладает самой высокой амплитудой среди других зубцов QRST-комплекса.

После проведения серии экспериментов на файлах из трех наборов данных было установлено, что длительность RR-интервала совпадает как при использовании фильтра Савицкого и Голея, так и при применении фильтра преобразования Фурье. Таким образом, можно сделать вывод о том, что работа фильтров не влияет существенно на отображение конечного результата подсчета. На некоторых данных значения длины RR-интервалов после этих фильтров отличались друг от друга порядка 0.1 значений. При этом после анализа полученной длительности интервала можно было сделать вывод о наличии или отсутствии заболевания (разница между значениями длительности не приводила к разным диагнозам). При этом следует учесть, что диагноз в текущей работе – наличие или отсутствие аритмии.

В детской кардиологии существуют следующие виды заболеваний сердца:

- синусовая тахикардия или брадикардия;
- стойкая синусовая тахикардия или брадикардия;
- экстрасистолия. Суправентрикулярная тахикардия;
- экстрасистолия. Вентрикулярная тахикардия;
- пароксизмальная тахикардия.

В первых двух случаях вывод об отсутствии или наличии заболевания делается на основе длительности RR-интервала и длительности возникновения аномалии. В остальных, более опасных случаях, анализировать необходимо не только частоту сердечных сокращений, но и форму QRST-волны. Поэтому в дальнейшем будет проводиться работа по анализу вида QRST-волны, и уже там применение различных фильтров может привести к возникновению отличных друг от друга результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье была рассмотрена проблема определения сердечного ритма плода на неинвазивном ЭКГ. Были проведен краткий анализ существующих решений и предложен алгоритм по выявлению длины RR-интервала плода. Были рассмотрены два вида фильтров по удалению артефактов и шумов с записи ЭКГ плода – фильтр преобразования Фурье и фильтр Савицкого и Голея. Как показал вычислительный эксперимент, после применения фильтров их результаты были схожими или расходились на 0.1 значений. Расхождение результатов не приводило к возникновению противоречий в постановке диагноза – есть аритмия или она отсутствует. В дальнейшем будет проводиться работа по доработке алгоритма и анализу QRST-волны плода.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование поддержано грантом РФФИ 22-19-00471.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Томчик Н. В., Янковская Н. И. Неонатальные и фетальные нарушения сердечного ритма [Электронный ресурс] // КиберЛенинка: [сайт]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neonatalnye-i-fetalnye-narusheniya-serdechnogo-ritma/viewer> (дата обращения: 14.12.2023). [[Tomchik N. V., Yankovskaya N. I. "Neonatal and fetal heart rhythm disturbances" // CyberLeninka. <https://cyberleninka.ru/article/n/neonatalnye-i-fetalnye-narusheniya-serdechnogo-ritma/viewer> (In Russian).]]
2. Шахмамметова Г. Р., Христодуло А. Д., Береговая С. П. Анализ эндокринологических данных на основе моделей классификации // Системная инженерия и информационные технологии. 2022. Т. 4. № 2(9). С. 30-36. EDN LBZVZL. [[Shakhmamatova G. R., Christodoulo A. D., Beregovaya S. P. "Analysis of endocrinological data based on classification models" // System Engineering and Information Technologies. 2022. Vol. 4, No. 2(9), pp. 30-36. (In Russian).]]
3. Юсупова Н. И., Нургаянова О. С., Зулкарнеев Р. Х. Формализация этапов риск-анализа в СППР с учетом оценок клинических рисков при бронхолегочных заболеваниях // Системная инженерия и информационные технологии. 2023. Т. 5. № 1(10). С. 11-24. EDN KHIINT. [[Yusupova N. I., Nurgayanova O. S., Zulkarneev R. Kh. "Formalization of risk analysis stages in DSS taking into account clinical risk assessments for bronchopulmonary diseases" // System Engineering and Information Technologies. 2023. T. 5, No. 1(10), pp. 11-24. (In Russian).]]
4. Накатани С., Ямамото К., Оцуки Т. Обнаружение аритмий плода на основе разметки интервала сердцебиения [Электронный ресурс] // MDPI: [сайт]. URL: <https://www.mdpi.com/2306-5354/10/1/48> (дата обращения: 14.12.2023). [[Sara Nakatani, Kohei Yamamoto, Tomoaki Otsuki. "Detection of fetal arrhythmias based on heartbeat interval markings" [Electronic resource] // MDPI: [website]. URL: <https://www.mdpi.com/2306-5354/10/1/48> (In Russian).]]
5. Жумажанова С. С., Сулавко А. Е., Ложников П. С. Распознавание психофизиологического состояния субъектов-операторов на основе анализа термографических изображений лица с применением сверточных нейронных сетей // Системная инженерия и информационные технологии. 2023. Т. 5. № 2(11). С. 41-55. EDN NNZWLV. [[Zhumazhanova S. S., Sulavko A. E., Lozhnikov P. S. Recognition of the psychophysiological state of subject-operators based on the analysis of thermographic images of the face using convolutional neural networks // System Engineering and Information Technologies. 2023. Vol. 5, No. 2(11), pp. 41-55. (In Russian).]]
6. Хао Ц., Ян Ю., Чжоу Ч., Ву Ш. Извлечение сигнала электрокардиограммы плода на основе быстрого анализа независимых компонентов и разложения по сингулярным значениям [Электронный ресурс] // MDPI : [сайт]. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/10/3705> (дата обращения: 14.12.2023). [[Jingyu Hao, Yuyao Yang, Zhuhuang Zhou, Shuikai Wu. "Extraction of the fetal electrocardiogram signal based on fast analysis of independent components and singular value decomposition" [Electronic resource] // MDPI: [website]. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/10/3705> (access date: 12/14/2023). (In Russian).]]
7. Джаллули М., Арфауи С., Мабрук А. Бен, Каттани К. Энтропия вейвлета Клиффорда для извлечения ЭКГ плода [Электронный ресурс] // MDPI: [сайт]. URL: <https://www.mdpi.com/1099-4300/23/7/844> (дата обращения: 14.12.2023). [[Malika Jallouli, Sabrina Arfaoui, Anouar Ben Mabrouk, Carlo Cattani. "Clifford wavelet entropy for fetal ECG extraction" [Electronic resource] // MDPI: [website]. URL: <https://www.mdpi.com/1099-4300/23/7/844> (access date: 12/14/2023). (In Russian).]]
8. Юсупова Н. И., Богданов М. Р. Снижение риска при распознавании аритмии у плода с использованием методов машинного обучения // 90 лет УГАТУ на службе науке, образованию и бизнесу: Мат-лы Всероссийской научно-практической конференции, Уфа, 21–22 ноября 2022 года. Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2022. С. 171-174. EDN RVHVML.

[[Malika Jallouli, Sabrina Arfaoui, Anouar Ben Mabrouk, Carlo Cattani. Clifford wavelet entropy for fetal ECG extraction [Electronic resource] // MDPI: [website]. URL: <https://www.mdpi.com/1099-4300/23/7/844> (access date: 12/14/2023). (In Russian).]]

9. Ежевски Дж., Матония А., Купка Т., Рой Д., Чабанский Р. База данных инвазивных и неинвазивных ЭКГ плода [Электронный ресурс] // Kaggle: [сайт]. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/sachinjohn/abdominal-direct-fetal-ecg-database-csv-format> (дата обращения: 12.10.2023). [[Jerzewski J., Matonia A., Kupka T., Roy D., Chabansky R. "Database of invasive and non-invasive fetal ECGs" [Electronic resource] // Kaggle: [site]. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/sachinjohn/abdominal-direct-fetal-ecg-database-csv-format> (access date: 10/12/2023). (In Russian).]]

10. Сильва И., Бехар И., Самени Р., Чжу Т., Клиффорд Г. Д., Муди Д. Неинвазивная ЭКГ плода [Электронный ресурс] // PhysioNet: [сайт]. URL: <https://physionet.org/content/challenge-2013/1.0.0/> (дата обращения: 09.11.2023). [[Icaro Silva, Joachim Behar, Reza Sameni, Tingting Zhu, Gary D. Clifford, George Moody "Non-invasive fetal ECG" [Electronic resource] // PhysioNet: [site]. URL: <https://physionet.org/content/challenge-2013/1.0.0/> (access date: 11/09/2023). (In Russian).]]

11. Бехар И. База данных неинвазивных ЭКГ плода [Электронный ресурс] // PhysioNet: [сайт]. URL: <https://physionet.org/content/nifeadb/1.0.0/> (дата обращения: 12.10.2023). [[Joachim Behar. "Database of non-invasive fetal ECG" [Electronic resource] // PhysioNet: [website]. URL: <https://physionet.org/content/nifeadb/1.0.0/> (access date: 10/12/2023). (In Russian).]]

Поступила в редакцию 16 декабря 2023 г.

МЕТАДААННЫЕ / METADATA

Title: Non-invasive fetal heart rate detection by using different filters.

Abstract: In our time fetal heart rate analysis the most effective and best method for assessing fetal health. There are two ways to obtain measurements - invasive and non-invasive methods. The first method is used during childbirth; an electrode from an electrocardiograph is applied to the fetal head. This method is more accurate than non-invasive method by direct reading of the heart rate signal. However, if we use non-invasive method, we can monitor changes in fetal health in the 2nd and 3rd trimesters and apply effective treatment in the early stages of diseases. The main method's problem is that the accuracy of fetal heart rate is easily distorted by maternal heartbeat and fetal body movements. This article will discuss a method for fetal heart rate detection and will also evaluate several filters for removing background noises from the ECG recordings.

Key words: fetal heart rate, non-invasive fetal ECG, maternal QRST-wave detection, fetal RR-interval detection, Fourier transform filter, Savitzky–Golay filter.

Язык статьи / Language: русский / Russian.

Об авторе / About the author:

ШАПОШНИКОВА Анастасия Сергеевна

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Россия.
Студ. каф. вычислительной математики и кибернетики. Дипл. бакалавр (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2022).
E-mail: ShaposhnikovaAS@yandex.ru

SHAPOSHNIKOVA Anatasiya Sergeevna

Ufa University of Science and Technologies, Russia.
Student of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Dipl. undergraduate qualification (UGATU, 2022).
E-mail: ShaposhnikovaAS@yandex.ru

БОГДАНОВ Марат Робертович

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Россия.
Доц. каф. вычислительной математики и кибернетики. Дипл. биолог, преподаватель биологии и химии (Баш. гос. ун-т, 1991). Канд. биол. наук (Всерос. НИИ защиты растений, 1997). Иссл. в обл. интелл. анализа биомедицинских данных.
E-mail: bogdanov_marat@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1775-5920>

BOGDANOV Marat Robertovich

Ufa University of Science and Technologies, Russia.
Docent, Dept. of Geographic Information Systems. Dipl. biologist, teacher of biology and chemistry (Bashkir State University, 1991).
Cand. Biol. Sci. (All-Russian Inst. of Plant Protection, 1997). Research in the field of biomedical data mining.
E-mail: bogdanov_marat@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1775-5920>