

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОГАСТРОЭНТЕРОГРАФИИ И ИЗМЕРЕНИЕ РИТМИЧНОСТИ СОКРАЩЕНИЙ ЖЕЛУДКА

А. И. ПОПОВ

*Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова,
163002, Архангельск, Россия
E-mail: aleneus@gmail.com*

Рассматривается проблема зашумленности данных электрофизиологических обследований пищеварительной системы человека. Представлен метод контроля качества записей электрогастроэнтерографии, основанный на анализе высокочастотных составляющих измерительных сигналов. Предложен количественный показатель качества измерительного сигнала электрогастроэнтерографии. Индикатор качества на основе данного показателя может использоваться непосредственно при проведении измерительных сеансов. Показан положительный эффект от использования предлагаемого подхода при измерении ритмичности сокращений желудка.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, артефакт, электрофизиология, электрогастроэнтерография, диагностика

Электрогастроэнтерография (ЭГЭГ) — неинвазивный электрофизиологический метод диагностики заболеваний различных отделов желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) [1, 2]. Этот метод появился в результате развития электрогастрографии (ЭГГ), которая исследует только желудок [3, 4]. Данные, регистрируемые при ЭГЭГ, содержат информацию о моторике ЖКТ. Диагностика заболеваний базируется на анализе значений параметров сигнала. Особенностью ЭГЭГ по сравнению с другими электрофизиологическими методами является низкочастотность информативного сигнала. ЖКТ соответствует спектральный участок от 0,02 до 0,22 Гц.

Основная проблема электрофизиологических методов обследования — сильная зашумленность измерительных сигналов [3—12]. Эта проблема присуща и ЭГЭГ [5—9]: даже при строгом соблюдении протокола обследования интерпретация около 70 % записей затруднена из-за их зашумленности [8].

К видам зашумления сигналов ЭГЭГ относятся, в частности, артефакты — кратковременные инородные составляющие в измерительном сигнале, влияющие на значения диагностических параметров [9]. Можно выделить разные типы артефактов. Некоторые из них вызываются самим пациентом во время записи (например, движение, кашель, разговор и т.п.), другие связаны с внешними причинами (прикосновение к проводам измерительного модуля, включение или выключение окружающих электроприборов и др.).

Для устранения или снижения влияния артефактов на сигнал используются различные способы:

- распознавание и удаление артефактов с сохранением длительности сигнала [5—7];
- совершенствование процесса сбора данных, при этом выделяется задача контроля качества, включающая разработку индикатора качества для использования во время измерительных сеансов [3].

При разработке метода контроля качества с помощью оборудования „Гастроскан-ГЭМ“ [13] осуществлялась регистрация сигналов при обследовании здоровых пациентов. Использовалась также специально разработанная вспомогательная программа, запуск которой производился одновременно с началом записи, и в заданные моменты времени программа выдавала

звуковые и текстовые сообщения о том, что испытуемому необходимо совершить то или иное кратковременное действие с целью внесения в сигнал артефакта.

Обработка данных ЭГЭГ базируется на спектральном анализе сигналов. Непосредственная интерпретация записей во временной области затруднена, а информация о частоте, ритмичности и силе сокращений отделов ЖКТ извлекается из спектрограммы ЭГЭГ-сигнала, полученной в результате преобразования Фурье выделенного участка ЭГЭГ. В „Гастроскане-ГЭМ“ выполняется аналого-цифровое преобразование с частотой 2 Гц, т.е. в получаемом цифровом сигнале различимы составляющие с частотами до 1 Гц. Более высокие частоты входного сигнала проявляются в виде ложных частот в спектре цифрового сигнала. В цифровой обработке сигналов это явление носит название алиасинга [14].

На рис. 1 алиасинг продемонстрирован на тестовых сигналах. Здесь воспроизводится ситуация, когда один и тот же аналоговый сигнал оцифрован с разными шагами дискретизации по времени Δt . На рисунке: *a* — сигнал, оцифрованный с высокой частотой; *б* — спектр сигнала „*a*“; *в* — сигнал, оцифрованный с низкой частотой; *г* — спектр сигнала „*в*“.

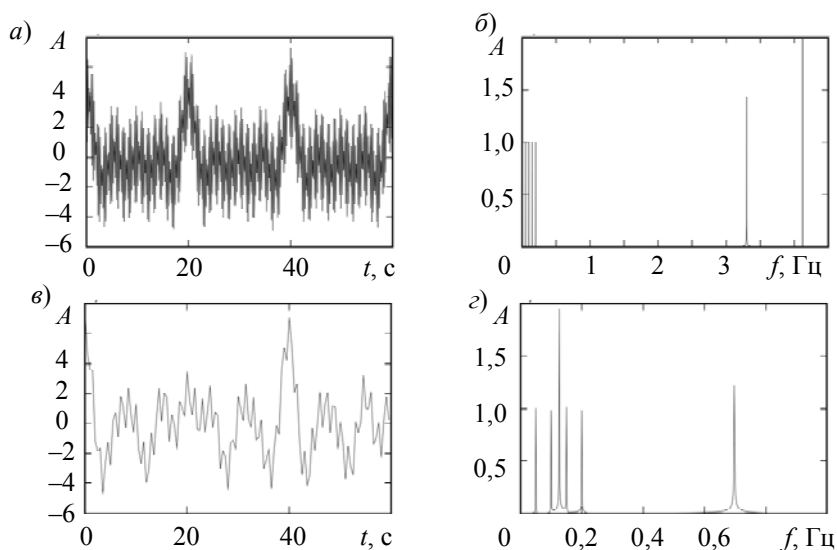


Рис. 1

Аналоговый сигнал представляет собой сумму четырех гармоник с частотами, соответствующими различным отделам ЖКТ (0,05, 0,1, 0,15 и 0,2 Гц) [1, 13], и двух гармоник с частотами 3,3 и 4,123 Гц. Частота дискретизации ($1/\Delta t$) в первом случае (*a*, *б*) составляет 20 Гц, а во втором (*в*, *г*) — 2 Гц (как в „Гастроскане-ГЭМ“). Во втором случае в спектре возникли две ложные составляющие (*г*), причем одна из них попала в область ЖКТ.

Исходя из того, что ложные составляющие имеют частоты в полосе от 0 до частоты Найквиста [14], можно сделать вывод о влиянии алиасинга на информационный состав цифрового ЭГЭГ-сигнала при частоте дискретизации, равной 2 Гц (рис. 2).

Напомним, что в ЭГЭГ информативным считается сигнал в полосе частот от 0,02 до 0,22 Гц. Область частот ниже 0,22 Гц обозначена как X_L , а область от 0,22 до 1 Гц — как X_H . Стрелками показано влияние факторов (событий), проявляющихся на различных спектральных участках непрерывного сигнала, на частотный состав получаемого цифрового сигнала.

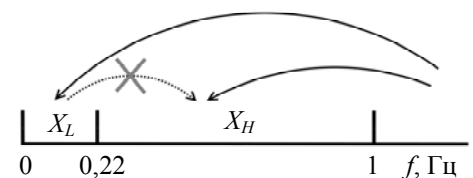


Рис. 2

Высокочастотные факторы могут проявляться как в области X_L , так и в области X_H , при том что события, происходящие в X_L , не влияют на X_H . Таким образом, информация об артефактах содержится в обеих областях, но в области X_H информация о моторике ЖКТ отсутствует. Это позволяет отделить анализ зашумленности сигнала от анализа моторики.

Метод контроля качества включает следующие этапы: 1) фильтрация сигнала с подавлением составляющих с частотами ниже 0,22 Гц; 2) поиск выбросов амплитуды после фильтрации и формирование массива соответствующих значений времени; 3) вычисление показателя качества.

Длительный непрерывный фрагмент сигнала высокого качества представляет наибольшую ценность для диагностики. Поэтому отношение продолжительности L_q самого длительного фрагмента сигнала без артефактов (или с заданным, приемлемым, количеством артефактов) к продолжительности L_s всего сигнала можно принять за количественный показатель качества записи: $Q = L_q/L_s$.

На рис. 3, а показан входной ЭГЭГ-сигнал длительностью 25 мин. Отмечены выбросы амплитуды как самого сигнала, так и его высокочастотной составляющей. Наименее зашумленный фрагмент длительностью около 8 мин наблюдается на интервале от 700 до 1200 с. С помощью фильтра Баттерворта 4-го порядка с полосой пропускания 0,03...0,07 Гц получена соответствующая данному фрагменту гастрোগрамма (рис. 3, б), т. е. сигнал с информацией о сокращениях желудка.

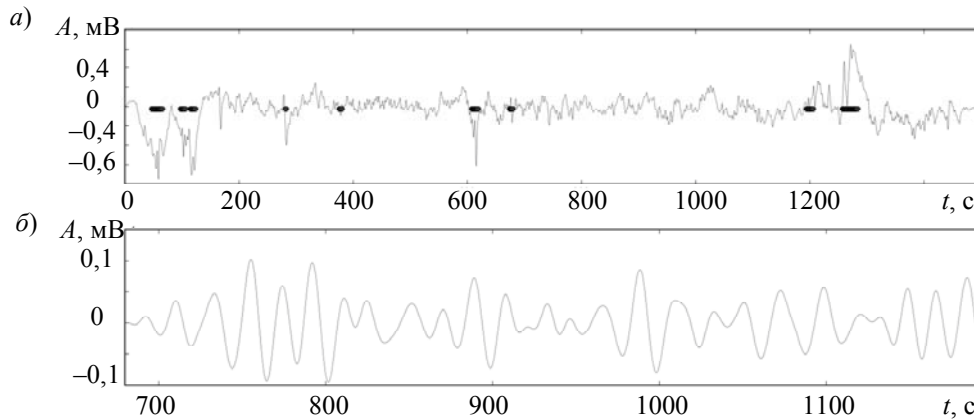


Рис. 3

Для исследования эффективности предлагаемого метода была произведена обработка 68 ЭГЭГ-сигналов длительностью 40 мин, зарегистрированных при обследовании здоровых пациентов. Данные получены авторами работы [2] при помощи оборудования „Гастроскан-ГЭМ“. Все измерения проводились натощак.

Были проанализированы значения специфического для ЭГЭГ показателя ритмичности [13]:

$$K = \frac{\sum_{k=0}^{N-2} \left| |X_{k-1}| - |X_k| \right|}{\max(|X|)(N-1)},$$

где X — массив значений амплитудного спектра на участке, соответствующем исследуемому отделу ЖКТ, N — длина массива X .

Нарушения ритмичности сокращений (аритмичность) приводят к увеличению K . Данный показатель был сформирован и получил распространение в рамках использования „Гастроскана-ГЭМ“ и успешно применяется при диагностике заболеваний [1, 2].

С помощью программного комплекса HFArt [15], реализующего описанный метод контроля качества, выполнялся поиск выбросов амплитуды в полосе частот от 0,22 до 1 Гц. В качестве выбросов отмечались отсчеты амплитуды, превышающей тройное стандартное отклонение. Затем в каждом сигнале был найден максимально продолжительный фрагмент, в котором выбросы амплитуды не были обнаружены — „чистый“ фрагмент. При длительности фрагмента менее 10 мин соответствующий сигнал исключался из дальнейшего исследования.

В результате были сформированы две группы данных: 46 сигналов по 40 мин, для которых $Q \geq 0,25$ (группа 1), и 46 их „чистых“ фрагментов (группа 2). Средняя длительность сигналов из группы 2 составила 15,25 мин (т.е. для группы 1 среднее значение $Q = 0,38$).

При дальнейшей обработке каждого сигнала производились следующие действия:

- дополнение сигнала нулями до 10 000 отсчетов для увеличения разрешения в спектре и обеспечения сопоставимости измерений в рамках решаемой задачи;
- быстрое преобразование Фурье;
- умножение спектра на окно Хемминга [14], расположенное на участке 0,03...0,07 Гц, для выделения части спектра, содержащей информацию о сокращениях желудка [13];
- нормирование (деление на максимум) спектра;
- вычисление показателя ритмичности желудка.

На рис. 4 показан типичный пример изменения спектра при переходе от полного сигнала (а) к его „чистому“ фрагменту (б).

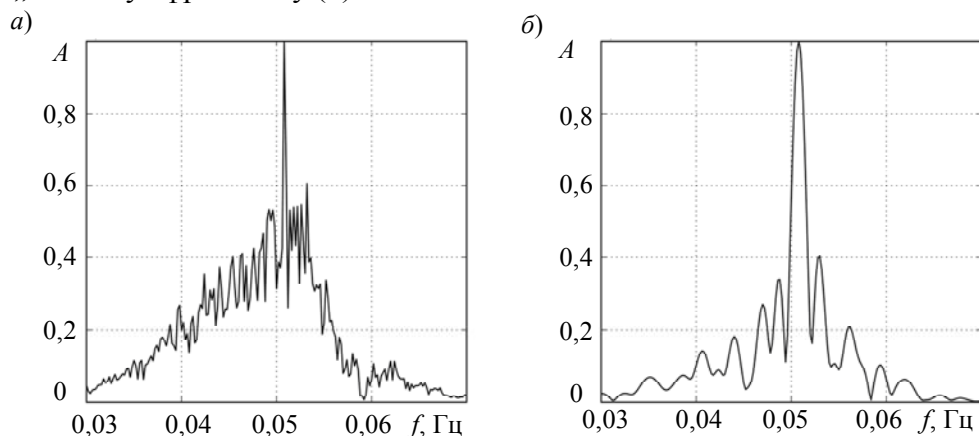


Рис. 4

Для проверки гипотезы о различии среднего значения показателя ритмичности K в 1-й и 2-й группах данных использовался Т-критерий Уилкоксона [16]. Для группы 1 $K_{\text{ср}} = 0,101$, стандартное отклонение $\sigma = 0,030$; для группы 2 $K_{\text{ср}} = 0,057$, $\sigma = 0,020$. Сдвиг значения K в сторону уменьшения достоверно (с вероятностью $p < 0,01$) преобладает при анализе „чистых“ фрагментов вместо полных сигналов. Таким образом, использование сравнительно качественных фрагментов ЭГЭГ-сигналов вместо полных сигналов приводит к уменьшению значений показателя ритмичности, а также к уменьшению их разброса.

В заключение отметим особенность представленного в статье подхода к контролю качества записей ЭГЭГ, которая заключается в том, что анализу подвергается высокочастотная составляющая сигнала, присутствующая как побочный эффект, вызванный увеличением частоты дискретизации по сравнению с удвоенной верхней границей частотного диапазона информативного сигнала.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке в рамках гос. задания „Создание вычислительной инфраструктуры для решения наукоемких прикладных задач“ (проект № 3628).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косенко П. М., Вавринчук С. А., Куликов Л. К., Подвальный Е. С., Плотников А. В. Математическое моделирование моторно-эвакуаторных нарушений желудочно-кишечного тракта у пациентов с язвенным пилоро-дуоденальным стенозом // Новости хирургии. 2014. Т. 22, №. 2. С. 224—229.
2. Kosenko P. M., Vavrinchuk S. A. Electrogastroenterography in Patients with Complicated Peptic Ulcer. Yelm, USA: Science Book Publ. House, 2013.

3. Yin J., Chen J. D. Z. Electrogastrography: methodology, validation and applications // J. of Neurogastroenterology and Motility. 2013. Vol. 19, N 1. P. 5. DOI: 10.5056/jnm.2013.19.1.5.
4. Rangayyan R. M. Biomedical Signal Analysis. John Wiley & Sons, 2015.
5. Komorowski D., Tkacz E. A new method for attenuation of respiration artifacts in electrogastrographic (EGG) signals // Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC): 37th Annual Intern. Conf. of the IEEE. 2015. P. 6006—6009. DOI: 10.1109/EMBC.2015.7319760.
6. Liang H., Lin Z., McCallum R. W. Artifact reduction in electrogastrogram based on empirical mode decomposition method // Medical and Biological Engineering and Computing. 2000. Vol. 38, N 1. P. 35—41. DOI: 10.1007/BF02344686.
7. Liang J., Cheung J. Y., Chen J. D. Z. Detection and deletion of motion artifacts in electrogastrogram using feature analysis and neural networks // Annals of Biomedical Engineering. 1997. Vol. 25, N 5. P. 850—857. DOI: 10.1007/BF02684169.
8. Попов А. И., Тюльпин А. А., Косенко П. М., Вавринчук С. А. Проблемы качества и организации данных периферической электрогастроэнтерографии // Рос. журн. гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии. Прил. № 44: Материалы Юбилейной 20-й объединенной Российской гастроэнтерологической недели, 6—8 окт. 2014 г. С. 134.
9. Попов А. И., Тюльпин А. А., Кузьмина А. А. Влияние артефактов движения на диагностические показатели ритмичности в электрогастрографии // Сб. материалов Междунар. науч. конф. „Теоретические и прикладные аспекты математики, информатики и образования“, 16—21 нояб. 2014 г. Архангельск: САФУ им. М. В. Ломоносова, 2014. С. 172—177.
10. Liu M., Hui M., Liu M., Dong L., Zhao Z., Zhao Y. ECG signals denoising using wavelet transform and independent component analysis // Proc. of the Intern. Conf. on Optical Instruments and Technology. 2015. P. 962213—962213-8. DOI: 10.1117/12.2193108.
11. Huang H. P., Liu Y. H., Wang Ch. P., Huang Tz. H. Automatic artifact removal in EEG using independent component analysis and one-class classification strategy // J. of Neuroscience and Neuroengineering. 2013. Vol. 2, N 2. P. 73—78. DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jnsne.2013.1043>.
12. Abbaspour S., Lindén M., Gholamhosseini H. ECG artifact removal from surface EMG signal using an automated method based on wavelet-ICA // Proc. of the 12th Intern. Conf. on Wearable Micro and Nanotechnologies for Personalized Health, Sweden: Västerås. 2015. P. 91—7 (PubMed PMID: 25980853).
13. Электрогастроэнтерография: исследование электрической активности желудка и кишечника [Электронный ресурс]: <<http://www.gastroscan.ru/physician/egg/>>.
14. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: БХВ-Петербург, 2013.
15. Попов А. И., Кузьмина А. А. Программный комплекс для контроля качества сигналов электрогастроэнтерографии (HFArt): Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2015660209.
16. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006.

Сведения об авторе

Александр Игоревич Попов — канд. техн. наук, доцент; САФУ им. М. В. Ломоносова, кафедра прикладной информатики; E-mail: aleneus@gmail.com

Рекомендована кафедрой
прикладной информатики

Поступила в редакцию
28.06.16 г.

Ссылка для цитирования: Попов А. И. Контроль качества сигналов электрогастроэнтерографии и измерение ритмичности сокращений желудка // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 1. С. 90—95.

**QUALITY CONTROL OF ELECTROGASTROENTEROGRAPHY SIGNALS
AND MEASUREMENT OF GASTRIC CONTRACTIONS RHYTHMICITY**

A. I. Popov

*M. V. Lomonosov Northern (Arctic) Federal University
163002, Arkhangelsk, Russia
E-mail: aleneus@gmail.com*

The problem of noise component of data obtained with electrophysiological study of gastrointestinal tract is considered. A method of quality data control in electrogastroenterography records based on analysis of high-frequency components of measuring signals is presented. A quantitative indicator of measuring signal quality is proposed, the indicator may be used directly during the measurements recording. A positive effect of the proposed method as applied to measurement of gastric contractions rhythmicity is demonstrated.

Keywords: digital signal processing, artifact, electrophysiology, electrogastroenterography, diagnostics

Data on author

Aleksander I. Popov — PhD, Associate Professor; M. V. Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, Department of Applied Informatics;
E-mail: aleneus@gmail.com

For citation: *Popov A. I.* Quality control of electrogastroenterography signals and measurement of gastric contractions rhythmicity // *Izv. vuzov. Priborostroenie.* 2017. Vol. 60, N 1. P. 90—95 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-90-95