Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-140-154

Фильтрация сложных сигналов на основе двухуровневой нечетко-логической модели

А. Е. Архипов ¹ 🖂

¹ Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

🖂 e-mail: alex.76_09@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка метода фильтрации и бинаризации сложных аналоговых радиосигналов, таких как сигнал автоматического зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В), позволяющих повысить чувствительность приемника сигнала АЗН-В и увеличить количество корректно декодированных принятых сообщений.

Методы. Для решения поставленной задачи в работе были применены основы теории фильтрации сигналов и теории нечетких множеств. Предложенный метод основан на совмещении фильтрации сигнала с помощью известных фильтров и двухуровневой нечеткой модели. Первый и второй уровень нечеткой модели содержат три операции: автоматического формирования функций принадлежности, композиционного вывода и дефаззификации. Входные переменные обоих уровней задаются трапециевидными функциями принадлежности. На первом уровне они формируются автоматически в зависимости от характеристик сложного сигнала. Функция вывода на первом уровне задается одноэлементной функцией, а дефаззификация выполняется с использованием упрощенной модели центра тяжести.

Результаты. Предложенный метод был реализован в разработанном устройстве на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Кроме фильтрации, разработанное устройство реализует все функции обработки сигнала, такие как: прием входных данных, декодирование, проверка корректности декодированных данных, хранение и передача сообщений АЗН-В для дальнейшей обработки. Отличительной особенностью устройства являются малые габариты и небольшое энергопотребление, что позволяет использовать его в малых космических аппаратах (МКА) и беспилотных летательных аппаратах.

Заключение. Рассмотрен метод фильтрации сложных сигналов на основе нечетко-логической модели, который может применяться для фильтрации сложных сигналов, таких, как сообщения АЗН-В в модулях МКА. Предложенная реализация метода фильтрации позволяет повысить чувствительность приемника сигнала АЗН-В примерно на 20% и правильно декодировать принятый сигнал. Метод был реализован устройством на базе ПЛИС, что позволило уменьшить габариты и энергопотребление по сравнению с аналогами.

Ключевые слова: АЗН-В; нечеткая логика; фильтрация сложных сигналов; нечеткий фильтр.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания (проект № 0851-2020-0032).

CC BY 4.0

[©] Архипов А. Е., 2023

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2023; 27(2): 140-154

Для цитирования: Архипов А. Е. Фильтрация сложных сигналов на основе двухуровневой нечетко-логической модели // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 140-154. https://doi.org/10.21869/ 2223-1560-2023-27-2-140-154.

Поступила в редакцию 02.07.2023

Подписана в печать 29.07.2023

Опубликована 02.08.2023

Filtering of Complex Signals Based on a Two-Level Fuzzy-Logic Model

Alexander E. Arkhipov ¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

⊠ e-mail: tanygin@yandex.com

Abstract

Purpose of research. Development of a method and algorithm of complex analog radio signals filtering and binarization, such as the signal of Automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B), which allows to increase the sensitivity of the receiver of the AZN-B signal and increase the number of correctly detected received messages.

Methods. To solve this problem, the basics of the theory of signal filtering and the theory of fuzzy sets were applied in the work. The proposed method is based on combining signal filtering by known filters and a two-level fuzzy model. The first and second levels of the fuzzy model contain three operations: automatic formation of membership functions, compositional output and defuzzification. Input variables of both levels are given by trapezoidal membership functions. At the first level, they are formed automatically depending on the characteristics of the complex signal. The output function at the first level is given by a singleton function, and defuzzification is carried out using a simplified center of gravity model.

Results. The proposed algorithm was implemented in the developed device based on a programmable logic integrated circuit (FPGA). In addition to filtering, the developed device implements all signal processing functions, such as: receiving input data, decoding, checking the correctness of decoded data, storing them, transmitting ADS-B messages for further processing. A distinctive feature of the device is its small size and low power consumption, which allows use it in small spacecraft and unmanned aerial vehicles.

Conclusion. A method of filtering complex signals based on a fuzzy logic model is considered, which can be used to filter complex signals, such as ADS-B messages in small spacecraft modules. The proposed implementation of the filtering method makes it possible to increase the sensitivity of the AZN-B signal receiver by 20% and correctly decode the received signal. The method was implemented by an FPGA-based device, which made it possible to reduce the size and power consumption compared to analogues.

Keywords. ADS-B; fuzzy logic; filtering complex signals; fuzzy filter.

Conflict of interest. The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was carried out with the financial support of the State assignment (project No. 0851-2020-0032).

For citation: Arkhipov A. E. Filtering of complex signals based on a two-level fuzzy-logic model. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2023; 27(2): 140-154 (In Russ.). https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2023-27-2-140-154.

Received (02.07.2023
------------	------------

Accepted 29.07.2023

Published 02.08.2023

Введение

В настоящее время нечеткая логика используется для решения задач распознавания данных [1, 2], управления станков с ЧПУ [3], фильтрации сигналов [4]. Использование нечеткой логики в системах приема, фильтрации и детектирования сложных сигналов позволяет не только повысить их чувствительность, но и исправлять некоторые ошибки. Даже при обработке сигнала, где отношение сигнал/шум приближается к единице, используя нечеткую логику, удается правильно детектировать сообщения [5, 6]. К таким сигналам относится сигнал системы автоматического зависимого наблюдениявещания (АЗН-В). Поиск публикаций на сайте https://www.sciencedirect.com показал, что нечеткая логика практически не используется в этой системе. Следует заметить, что с помощью него передается большое количество нужной информации, такой как идентификатор, местоположение, курс, скорость и высота воздушных судов, погодные условия и текстовые полётные рекомендации. Сигнал АЗН-В в режиме Mode-S передается на частоте 1090МГц и подвергается сильному зашумлению, особенно, если приемник находится от воздушного судна на значительном удалении. Приемники сообщений АЗН-В применяют различные аналоговые и цифровые фильтры для обработки принятого сигнала. Сигнал представляет собой частотно-импульсную модуляцию в манчестерском коде длиной 120 бит и длится 120 мкс, при этом передается 112 бит полезной информации, включаю проверочные биты. Пример сигнала АЗН-В в режиме Mode-S показан на рис. 1. На рис. 2 показана его структура, включающая преамбулу и блок данных.

Принятый приемником сигнал сильно искажен, пример такого сигнала показан на рис. 3.



Рис. 1. Сигнал АЗН-В (1090МГц) в режиме Mode-S **Fig. 1.** ADS-B signal (1090 MHz) in Mode-S mode







Рис. 3. Реальный принятый сигнал АЗН-В **Fig. 3.** Real received ADS-B signal

В статье рассматривается подход, использующий нечеткую логику, позволяющий отфильтровать шумы, детектировать сигнал и исправить ошибки, возникшие при бинаризации.

Материалы и методы

Фильтрация сигналов

Для фильтрации сигналов, таких как сигнал АЗН-В, применяют различные аналоговые и цифровые фильтры [7,8]. К цифровым фильтрам относятся усредняющий [9], медианный [10], Калмана [11], КИХ [12-14], БИХ [15], нечеткий [4,16] и др. У каждого фильтра есть свои достоинства и недостатки.

Усредняющий фильтр

Усредняющий фильтр выполняет усреднение нескольких отсчетов сигнала и задается формулой

$$y_{i} = \frac{\sum_{k=i,\frac{n}{2}+1}^{k=i+\frac{n}{2}} x_{k}}{n},$$
 (1)

где x_k – входной сигнал; n – количество отсчетов для усреднения; i – номер текущего отсчета; y_i – значение усредненного сигнала. Усредняющий фильтр уменьшает шум и повышает отношение сигнал/шум. При выполнении фильтрации дважды отношение сигнал/шум увеличится больше, в сравнении с однократной фильтрацией. На рис. 4 показан входной сигнал, отфильтрованный по 4 отсчетам сигнал (*n*=4) и сигнал, отфильтрованный повторно.

К недостаткам фильтра относится сглаживание фронтов сигнала, что приводит к изменению длительности импульсов при бинаризации.

Медианный фильтр

Медианный фильтр выбирает центральное значение из группы отсчетов, отсортированных по возрастанию. Рассчитывается по формуле

$$y_{i} = midpoz(sort(x_{i-\frac{n}{2}+1}, \dots, x_{i+\frac{n}{2}})), \qquad (2)$$

где x_i – входной сигнал; n – количество отсчетов в группе; i – номер текущего отсчета; *sort()* – функция сортировки; *midpoz()* – функция нахождения среднего элемента; y_i – значение усредненного сигнала. На рис. 5 представлен сигнал, отфильтрованный по 7 отсчетам.



Рис. 4. Результат обработки сигнала АЗН-В усредняющим фильтром

Fig. 4. The result of ADS-B signal processing by the averaging filter



Рис. 5. Результат обработки сигнала АЗН-В медианным фильтром

Fig. 5. The result of ADS-B signal processing by the median filter

К недостаткам фильтра относится увеличение вычислительной сложности за счет добавления сортировки на каждый отсчет фильтра, которая зависит от количества сортируемых элементов.

Архипов А. Е.

Фильтр Калмана

Фильтр Калмана является рекурсивным фильтром, который на каждом шаге оценивает состояние системы, при этом базируется на текущем измерении и на предыдущем состоянии системы. Выходное значение фильтра вычисляется по формуле

 $y_i = \alpha^* (x_i + K(x_i - x_{i-n})) + (1 - \alpha) y_{i-1},$ (3) где x_i, x_{i-n} –входной сигнал в текущей позиции *i* и в позиции *i-n*; α , *K* – коэффициенты фильтра; y_i, y_{i-1} – значение отфильтрованного сигнала в текущей и предыдущей позициях.

К недостаткам фильтра относится трудоемкость при подборе коэффициентов.

КИХ фильтр

Фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ фильтр) – нерекурсивный линейный цифровой фильтр. Для вычисления результата находится сумма нескольких отсчетов, каждый из которых умножается на свой коэффициент:

$$y_{i} = \sum_{k=0}^{k=n-1} x_{i-k} * s_{k}, \qquad (4)$$

где x_{i-k} – входной сигнал в позиции *i-k*; s_k – коэффициент фильтра для *k*-го элемента; y_i – значение отфильтрованного сигнала.

На рис. 6 показаны слабо- и сильнозашумленные сигналы, а также результаты их обработки КИХ фильтром.

К недостаткам КИХ фильтра относится трудоемкость при подборе коэффициентов. Результатом фильтрации ранее описанных фильтров является не бинарная функция.



Рис. 6. Результат обработки слабо- и сильнозашумленного сигнала КИХ фильтром **Fig. 6.** The result of processing the signal of a weakly and strongly noisy signals

Нечеткий фильтр

С помощью нечеткого фильтра не только получается необходимая бинарная функция, но и производится коррекция ошибок бинаризации. В общем виде нечеткий фильтр вычисляется по формуле:

$$y_i = F(x_{i-n}, \dots x_i),$$
 (5)

где x_{i-n} , x_i – входной сигнал в позиции *in* и *i*; F() – нечеткая функция; y_i – значение отфильтрованного сигнала.

К недостаткам фильтра относится отсутствие стандартной настройки коэффициентов нечеткой модели.

Фильтрация сложных сигналов на основе нечетко-логической модели

Для фильтрации сложных сигналов предлагается двухуровневая модель, ос-

нованная на нечеткой логике, показанная на рис. 7. Сначала фильтрация сигнала осуществляется одним из фильтров: усредняющим, медианным, КИХ. Для фильтрации сигнала АЗН-В выбран КИХ фильтр, вносящий в сигнал наименьшие искажения и обладающий простой реализацией. Затем сигнал фильтруется нечетким фильтром на основе двухуровневой нечетко-логической модели. Входной сигнал поступает на КИХ фильтр с АЦП разрядностью 14 бит с частотой 25 МГц и является целочисленным. Выходной сигнал КИХ фильтра также является нелочисленным числом с разрядностью 14. На выходе нечеткого фильтра сигнал является бинарным.



Рис. 7. Фильтрации сложных сигналов на основе нечетко-логической модели

Fig. 7. Filtering complex signals based on the two-level fuzzy model

Первый уровень нечеткой модели состоит из трех блоков: автоматического формирователя функций принадлежности, блока композиционного вывода и дефаззификатора. Второй уровень модели также состоит из трех блоков: формирователя функций принадлежности, блока композиционного вывода и дефаззификатора. Выходные бинарные данные поступают на Декодер, который декодирует входной бинарный сигнал в сообщение АЗН-В.

Первый уровень нечеткой модели

На первом уровне нечеткой модели сначала формируется входная функция принадлежности, которая является трапециевидной и включает две входные переменные DX_1 и DX_2 :

$$DX_{1} = \begin{cases} 1, & \text{если} & x \in [0; P_{0}], \\ \frac{P_{1} - x}{P_{1} - P_{0}}, & \text{если} & x \in [P_{0}; P_{1}], \\ 0, & \text{если} & x \in [P_{0}; P_{0}], \\ 0, & \text{если} & x \in [0; P_{0}], \\ \frac{x - P_{0}}{P_{1} - P_{0}}, & \text{если} & x \in [P_{0}; P_{1}], \\ 1, & \text{если} & x \in [P_{1}; 5000] 6 \\ \text{где } P_{0} = \min(x) + \alpha_{\min}(\max(x) - \min(x)) \\ P_{1} = \min(x) + \alpha_{\max}(\max(x) - \min(x)) \\ \text{где } x - \text{входная переменная; } \alpha_{max} \text{ и са изарачить развилить и по$$

 α_{min} – коэффициенты, задающие уровень чувствительности.

Графически входная функция принадлежности представлена на рис. 8.



Рис. 8. Входная функция принадлежности первого уровня нечеткой модели **Fig. 8.** Input membership function of the first level of the fuzzy model

Входная функция принадлежности формируется автоматически и зависит от минимального и максимального уровня входного сигнала за выбранный промежуток времени. Выходная функция принадлежности является одноэлементной функцией и определяется по формуле (7), представлена на рис. 9.

$$F_1(x) = \min(DX_1, DX_2, Edge), \quad (7)$$



Рис. 9. Выходная функция принадлежности первого уровня нечеткой модели

Fig. 9. Output membership function of the first level of the fuzzy model

Выходные значения, полученные на первом уровне нечеткой модели, являются входными для второго уровня.

Второй уровень нечеткой модели

Цель второго уровня нечеткой модели – скорректировать результат первого уровня – при отношении сигнал/шум, близком к 1, возможно большое число ложных срабатываний. Для этого учитывается несколько значений, полученных на первом уровне, в позиции до текущего отсчета и столько же после (выбрано 3 отсчета, для других сигналов можно выбрать 4 или 5 отсчетов). На втором уровне нечеткой модели входная функция принадлежности также задается трапециевидной функцией и включает две входные переменные DX'₀ и DX'₁:

$$DX'_{0} = \begin{cases} 1, & e c \pi u \quad x \in [0;1], \\ 2-x, & e c \pi u \quad x \in [1;2], \\ 0, & e c \pi u \quad x \in [2;5]. \end{cases}$$
(8)
$$DX'_{1} = \begin{cases} 0, & e c \pi u \quad x \in [0;1], \\ x-1, & e c \pi u \quad x \in [1;2], \\ 1, & e c \pi u \quad x \in [2;5]. \end{cases}$$

Значение переменной DX'_{l} равно 1, если количество отсчетов, равное единице, в выбранном диапазоне больше одного (для других сигналов может быть больше двух или трех). Наоборот, значение переменной DX'_{l} равно 1, если количество отсчетов, равное единице, в выбранном диапазоне меньше двух

На рис. 10 представлена функция принадлежности для сигнала АЗН-В.



Рис. 10. Входная функция принадлежности второго уровня нечеткой модели **Fig. 10.** Input membership function of the second level of the fuzzy model

На рис. 11 показан пример анализа текущего отсчета, предыдущих трех, последующих трех и трех отсчетов с центральным текущим пикселом. В анализе участвуют четыре переменные. Переменная а принимает значение равное единице, если количество единиц в предыдущих трех отсчетах более одного. Переменная b равна единице, если текущий отсчет равен единице. Переменная с принимает значение равное единице, если количество единиц в последующих трех отсчетах более одного. Переменная d принимает значение равное единице если три отсчета с центральным текущем равны единице. На рис. 11 показаны области вычисления для перечисленных переменных.





Рис. 11. Логический вывод **Fig. 11.** Logic inference

Выходная функция принадлежности F₂(x) вычисляется по формуле (9). Она принимает значение равное единице в четырех случаях:

 когда переменные а и b равны единице, т.е. когда текущий отсчет равен единице и, хотя бы два из трех предыдущих равны единице;

 когда переменные b и с равны единице, т.е. когда текущий отсчет равен единице и, хотя бы два из трех последующих равны единице;

когда переменные а и с равны единице, т.е. когда хотя бы два из трех предыдущих равны единице и, хотя бы два из трех последующих равны единице;

– когда переменная d равна единице, т.е. когда все три отсчета с центральным текущим равны единице. $F_{a}(x)=max(min(a,b),min(b,c),min(a,c),d),$

где
$$a = \begin{cases} 1, e c \pi u & \sum_{k=i-3}^{k=i-1} D X'_{1k} \ge 2, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

 $c = \begin{cases} 1, e c \pi u & \sum_{k=i+1}^{k=i+3} D X'_{1k} \ge 2, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$
 $d = \begin{cases} 1, e c \pi u & \sum_{k=i-1}^{k=i+1} D X'_{1k} \ge 2, \\ 0, & \text{иначe} \end{cases}$
 $a = \begin{cases} 1, e c \pi u & \sum_{k=i-1}^{k=i-1} D X'_{1k} = 3, \\ 0, & \text{иначe} \end{cases}$ (9)
 $a = \begin{cases} 1, e c \pi u & \sum_{k=i-3}^{k=i-1} D X'_{1k} \ge 2, \\ 0, & \text{иначe} \end{cases}$

Предложенная функция позволяет точно определять начало и конец импульса и удалять ложные срабатывания.

Результаты и их обсуждение

Предложенная нечетко-логическая модель была реализована на базе ПЛИС Xilinx XC7A35T. Результаты обработки сигнала с хорошим показателем отношения сигнал/шум представлены на рис. 12. На рис. 12.а показан входной (полученных с выхода КИХ фильтра) сигнал. На рис. 12.б – бинаризованный сигнал на выходе первого уровня. На рис. 12.в – исправленный сигнал на выходе второго уровня.

Результаты обработки сигнала с плохим показателем отношения сигнал/шум представлены на рис. 13. На рис. 13.а показан входной (полученных с выхода КИХ фильтра) сигнал. На рис. 13.6 – бинаризованный сигнал на выходе первого уровня. На рис. 13.в – исправленный сигнал на выходе второго уровня.

В качестве оценки предложенной двухуровневой нечеткой модели использован показатель FPR (частота ложноположительных результатов) [20]. FPR определяется следующим образом:

150 Информатика, вычислительная техника и управление / Computer science, computer engineering and control



Рис. 12. Результат обработки сигнала слабозашумленного сигнала двухуровневым нечетким фильтром



Fig. 12. The result of processing a low-noise signal by a two-level fuzzy filter





На рис. 14 показано сравнение показателя FPR при декодировании сообщений ADS-B с использованием предложенной двухуровневой нечеткой модели и без нее, для входного сигнала с различным коэффициентом SNR.



Рис. 14. Результат сравнительного анализа декодирования сообщений АЗН-В с помощью двухуровневой нечеткой модели и без нее

Fig. 14. The result of a comparative analysis of the AZN-B messages decoding using a two-level fuzzy model and without it

Количество правильно распознанных сообщений ADS-В больше при использовании двухуровневой нечеткой модели, чем без ее использования (см. рис. 14). Этот вывод сделан на основе расчета коэффициента FPR. Из графика видно, что, используя двухуровневую модель, можно правильно декодировать сообщения A3H-В при снижении отношения сигнал/шум с 5 дВ до 4 дВ, что соответствует увеличению чувствительности примерно на 20%.

Выводы

В статье рассмотрена двухуровневая нечеткая модель, позволяющая преобразовывать слабо и сильно зашумленные сигналы в двоичный код. Предложенная модель может применяться для фильтрации сложных сигналов, таких, как сообщения АЗН-В в модулях МКА, позволяет повысить чувствительность приемника сигнала АЗН-В и правильно детектировать принятый сигнал.

Список литературы

1. Ghosh S.K., Ghosh A., Bhattacharyya S. Recognition of cancer mediating biomarkers using rough approximations enabled intuitionistic fuzzy soft sets based similarity measure // Applied Soft Computing, 2022. Vol. 124. P. 109052. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109052.

2. Piegat A. Fuzzy Modelling and Control. Physica-Verlag. Heidelberg. 2001, 728 p. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6.

3. Bobyr M., Yakushev A., Dorodnykh A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2020. Vol. 152. P. 107378. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378.

4. Bobyr M., Milostnaya N., Bulatnikov V. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio // Applied Soft Computing. 2022. Vol. 117. Pp. 108449. https://doi.org/10.1016/ j.asoc.2022.108449.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2023; 27(2): 140-154

5. Ganjeh-Alamdari M., Alikhani R., Perfilieva I. Fuzzy logic approach in salt and pepper noise // Computers and Electrical Engineering. 2022. Vol. 102. P. 108264. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108264.

6. Rizaner A., Ulusoy A. H., Amca H. Adaptive fuzzy assisted detector under impulsive noise for DVB-T systems // Optik. 2016. Vol.127(13). Pp. 5196–5199. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.02.079.

7. Engelberg S. Digital signal processing. Springer London. 2008. 212 P. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-119-0.

8. Deergha Rao K., Swamy M.N.S. Digital signal processing. Springer Singapore. 2018. 789 p. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8081-4.

9. Lin Y. D., Tan Y. K., Tian B. A novel approach for decomposition of biomedical signals in different applications based on data-adaptive Gaussian average filtering // Biomedical Signal Processing and Control. 2022. Vol. 71(A). P. 103104. https://doi.org/ 10.1016/ j.bspc.2021.103104.

10. Tay D. Sensor network data denoising via recursive graph median filters // Signal Processing. 2021. Vol. 189. P. 108302. https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108302.

11. Sharma S., Kulkarni R., Ajithaprasad S., Gannavarpu R. Fringe pattern normalization algorithm using Kalman filter // Results in Optics. 2021. Vol. 5. P. 100152. https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100152.

12. Patali P., Kassim S. High throughput and energy efficient linear phase FIR filter architectures // Microprocessors and Microsystems. 2021. Vol. 87. P. 104367. https://doi.org/ 10.1016/j.micpro.2021.104367.

13. Sun J., Wang Y., Shen Y., Lu S. Multisegment optimization design of variable fractional delay FIR filters // Digital Signal Processing. 2021. Vol. 112. P. 103005. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103005.

14. Paquelet S., Vincent S. On the symmetry of FIR filter with linear phase // Digital Signal Processing. 2018. Vol. 81. P. 57-60. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2018.07.011.

15. Design of a nearly linear-phase IIR filter and JPEG compression ECG signal in realtime system / N. Bui, T. Nguyen, S. Park, J. Choi, T. Vo, Y. Kang, J. Oh // Biomedical Signal Processing and Control, 2021. Vol. 67. P. 102431. https://doi.org/10.1016/ j.bspc.2021.102431.

16. Бобырь М.В., Архипов А.Е., Якушев А.С. Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. № 2. С. 407-434. https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.6.

17. Bobyr M., Kulabukhov S., Milostnaya N. Fuzzy control system of robot angular attitude // In. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2016. Pp. 1-6. https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7910970. Архипов А. Е.

18. Bobyr M., Titov V., Belyaev A. Fuzzy System of Distribution of Braking Forces on the Engines of a Mobile Robot // In MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 79. https://doi.org/10.1051/matecconf/20167901052.

19. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Моделирование процесса управления температурным режимом в зоне резания на основе нечеткой логики // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. №3. С. 76–82.

20. Performance metrics in machine learning. URL: https://www.javatpoint.com/ per-formance-metrics-in-machine-learning.

References

1. Ghosh S.K., Ghosh A., Bhattacharyya S. Recognition of cancer mediating biomarkers using rough approximations enabled intuitionistic fuzzy soft sets based similarity measure. *Applied Soft Computing*, 2022, vol. 124, p. 109052. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109052.

2. Piegat A. Fuzzy Modelling and Control. Physica-Verlag, Heidelberg, 2001, 728 p. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6.

3. Bobyr M., Yakushev A., Dorodnykh A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2020, vol. 152, p. 107378. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378.

4. Bobyr M. Milostnaya N. Bulatnikov V. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio. *Applied Soft Computing*, 2022, vol. 117, pp. 108449. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108449.

5. Ganjeh-Alamdari M., Alikhani R., Perfilieva I. Fuzzy logic approach in salt and pepper noise. *Computers and Electrical Engineering*, 2022, vol. 102, p. 108264. https:// doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108264.

6. Rizaner A., Ulusoy A. H., Amca H. Adaptive fuzzy assisted detector under impulsive noise for DVB-T systems. *Optik*, 2016, vol.127(13), pp. 5196–5199. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.02.079.

7. Engelberg S. Digital signal processing. Springer London. 2008. 212 p. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-119-0.

8. Deergha Rao K., Swamy M.N.S. Digital signal processing. Springer Singapore. 2018. 789 p. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8081-4.

9. Lin Y. D., Tan Y. K., Tian B. A novel approach for decomposition of biomedical signals in different applications based on data-adaptive Gaussian average filtering. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022, vol. 71(A), p. 103104. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103104.

10. Tay D. Sensor network data denoising via recursive graph median filters. *Signal Processing*, 2021, vol. 189. p. 108302. https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108302.

11. Sharma S., Kulkarni R., Ajithaprasad S., Gannavarpu R. Fringe pattern normalization algorithm using Kalman filter. *Results in Optics*, 2021, vol. 5, p. 100152. https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100152.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2023; 27(2): 140-154

12. Patali P., Kassim S. High throughput and energy efficient linear phase FIR filter architectures. *Microprocessors and Microsystems*, 2021, vol. 87. p. 104367. https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.104367.

13. Sun J., Wang Y., Shen Y., Lu S. Multisegment optimization design of variable fractional delay FIR filters. *Digital Signal Processing*, 2021, vol. 112, p. 103005. https:// doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103005.

14. Paquelet S., Vincent S. On the symmetry of FIR filter with linear phase. *Digital Signal Processing*, 2018, vol. 81, p. 57-60. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2018.07.011.

15. Bui N., Nguyen T., Park S., Choi J., Vo T., Kang Y., Oh J. Design of a nearly linearphase IIR filter and JPEG compression ECG signal in real-time system. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, vol. 67. p. 102431. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102431.

16. Bobyr M., Arkhipov A., Yakushev A. Raspoznavanie ottenka tsvetovoy metki na osnove nechetkoy klasterizatsii. [Shade recognition of the color label based on the fuzzy clustering]. *Informatica i avtomatizatsiya=Informatics and Automation*, 2021, vol. 20, no. 2, pp. 407-434. https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.6.

17. Bobyr M., Kulabukhov S., Milostnaya N. Fuzzy control system of robot angular attitude. *In. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2016, pp. 1-6. https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7910970.

18. Bobyr M., Titov V., Belyaev A. Fuzzy System of Distribution of Braking Forces on the Engines of a Mobile Robot. *In MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 79. https://doi.org/10.1051/matecconf/20167901052.

19. Bobyr M., Kulabukhov S. Modelirovanie protsessa upravleniya tempera-turnym rezhimom v zone rezaniya na osnove nechetkoi logiki [Simulation of control of temperature mode in cutting area on the basis of fuzzy logic]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, pp. 288–295. https://doi.org/10.3103/S1052618817030049.

20. Performance metrics in machine learning. Available at: https://www.javatpoint.com/ performance-metrics-in-machine-learning.

Информация об авторе / Information about the Author

Архипов Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, Юго-Западный государственный университет г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alex.76_09@mail.ru

Alexander E. Arkhipov, Cand. of Sci. (Engineering), Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alex.76_09@mail.ru