

УДК 519.254

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

К.Я. Кудрявцев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия
e-mail: KYKudryavtsev@mephi.ru

Поступила в редакцию: 14.04.2024

После доработки: 15.04.2024

Принята к публикации: 14.05.2024

Предлагается методика применения цифровых фильтров для классификации управляющих сигналов в режиме реального времени. Сигналы могут поступать от различных управляющих датчиков, установленных на управляемом устройстве, например мобильном роботе. Управляющие сигналы поступают от датчиков, подвергаются обработке, классификации, и в дальнейшем используются для управления мобильным робототехническим устройством. Существует большое количество алгоритмов классификации сигналов, в основе которых лежит выделение характерных особенностей сигнала, таких как амплитуда, частота, среднее значение и др. Большинство алгоритмов классифицируют сигналы на основе характеристик (features) во временном домене. В данной работе предлагается использовать частотные характеристики сигнала и на их основе осуществлять классификацию, применяя узкополосные «гребенчатые» цифровые фильтры. Базовые частоты управляющего сигнала находятся на предварительном этапе с помощью быстрого преобразования Фурье. После того как базовые частоты определены, процесс классификации заключается в фильтрации сырого сигнала набором цифровых узкополосных «гребенчатых» фильтров. Такой подход позволяет классифицировать управляющие воздействия «на лету» в режиме реального времени. Цифровые фильтры могут быть использованы для классификации различных видов сигналов, которые в дальнейшем преобразуются в управляющие команды для мобильного робототехнического устройства.

Ключевые слова: цифровая фильтрация, классификация сигналов, преобразование Фурье, Z-преобразование.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.314
RETWVK

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время человеко-машинные интерфейсы на основе голоса, жестов, ВСИ получают все более широкое распространение [1–3], так как позволяют значительно расширить возможности управления мобильными робототехническими устройствами, особенно для людей с ограниченными возможностями. Однако, несмотря на достигнутый значительный прогресс, существует большое количество проблем при реализации подобных интерфейсов. Принцип управления с помощью человеко-машинного интерфейса заключается в классификации исходного сигнала, получаемого с датчиков, и дальнейшей интерпретации результатов такой классификации в виде их отображения на пространство управляющих команд. Основная проблема классификации сигналов заключается в том, что в сигнале содержится большое количе-

ство помех, приводящих к тому, что сигналы становятся трудноразличимы.

Для реализации классификации необходимо из исходного («сырого») сигнала выделить показатели (features), которые позволяют с определенной степенью уверенности соотнести сигнал с определенным классом и командой. В качестве простого примера можно рассмотреть сигналы, возникающие при сгибании пальцев руки. Если максимальные или средние амплитуды сигналов окажутся различными, то амплитуду можно использовать для классификации сигналов. С другой стороны, если базовые частоты сигналов окажутся различными, то базовую частоту также можно использовать для классификации сигналов. Алгоритмов поиска характеристик (features) сигналов существует большое количество [4–8]. Их можно разделить на три основные группы:

- алгоритмы поиска характеристик во временном домене;

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

- алгоритмы поиска характеристик в частотном домене на основе преобразования Фурье;
- алгоритмы поиска характеристик на основе вейвлет-преобразования.

После того как характеристики (features) определены, их можно использовать для классификации и управления мобильным робототехническим устройством. Однако для вычисления характеристик поступающего рабочего сигнала требуется его полностью считать и далее произвести вычисление характеристики, например, найти среднюю амплитуду. В режиме реального времени это может оказаться ресурсоемкой задачей. Поэтому желательно иметь методы вычисления характеристик, не требующих больших временных затрат.

В данной работе предлагается использовать в качестве характеристик управляющего сигнала базовые частоты, которые находятся с помощью быстрого преобразования Фурье. Определение базовых частот для разного типа сигналов осуществляется на предварительном этапе в процессе обучения оператора работе с мобильным робототехническим устройством. После того как базовые частоты определены, процесс классификации заключается в фильтрации сырого сигнала набором цифровых узкополосных «гребенчатых» фильтров. Сигнал высокого уровня будет присутствовать на выходе только того фильтра, который будет пропускать базовые частоты входного сигнала. На выходе остальных фильтров уровень сигнала будет низким. Использование цифровых фильтров позволяет классифицировать управляющие воздействия «на лету» в режиме реального времени. Далее описывается математический аппарат для классификации сигналов с помощью цифровых узкополосных «гребенчатых» фильтров.

ПОИСК ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ В ЧАСТОТНОМ ДОМЕНЕ

Пусть $x(t)$ – сигнал, считываемый на временном интервале $[t_0, t_1]$, с шагом дискретизации T . Количество отсчетов по времени сигнала $x(t)$ равно $N = \frac{t_1 - t_0}{T}$. Частотное представление сигнала основано на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) и записывается как [7]

$$X(\omega) = T \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) e^{-j\omega T n}. \quad (1)$$

Следует отметить, что $X(\omega)$ – периодическая функция с периодом $P = \frac{2\pi}{T}$. Для вычисления

$X(\omega)$ диапазон частот $\left[0, \frac{2\pi}{T}\right]$ разбивается на N интервалов с шагом $\delta = \frac{2\pi}{TN}$, и вычисляются значения $X(\omega_k)$, где $\omega_k = k\delta = k \frac{2\pi}{TN}$, $k = 0, 1, \dots, (N-1)$.

$$\begin{aligned} X(k\delta) &= T \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) e^{-jk\delta T n} = \\ &= T \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) e^{-jk \frac{2\pi}{TN} T n} = \\ &= T \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}; \\ k &= 0, 1, \dots, (N-1). \end{aligned} \quad (2)$$

Вычисление ДПФ выполняется с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ), в основе которых лежит свойство периодичности комплексной экспоненты $e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}$ и перегруппировка слагаемых. Итак, если задан временной диапазон и шаг дискретизации по времени T , то спектр сигнала вычисляется с шагом $\delta = \frac{2\pi}{TN}$. Диапазон спектра составляет $\omega \in \left[0, \frac{2\pi}{T}\right]$ или $\omega \in \left[-\frac{\pi}{T}, \frac{\pi}{T}\right]$. При использовании линейной частоты $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$ спектр находится в диапазоне $f \in \left[0, \frac{1}{T}\right]$ или $f \in \left[-\frac{1}{2T}, \frac{1}{2T}\right]$. В результате применения БПФ вычисляется спектр сигнала, т.е. набор комплексных величин:

$$\begin{aligned} Spectr &= \left[X(0), X\left(\frac{2\pi}{TN}\right), X\left(2 \frac{2\pi}{TN}\right), \dots, \right. \\ &\quad \left. X\left((N-1) \frac{2\pi}{TN}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Спектр сигнала находится при значениях «круговых частот»

$$\omega = \left[0, \frac{2\pi}{TN}, 2 \frac{2\pi}{TN}, \dots, (N-1) \frac{2\pi}{TN} \right]. \quad (4)$$

При этом значения «линейных частот» f будут равны

$$f = \left[0, \frac{1}{TN}, 2 \frac{1}{TN}, \dots, (N-1) \frac{1}{TN} \right]. \quad (5)$$

Для комплексных величин спектра нетрудно установить соотношение

$$X((N-k)\delta) = X^*(k\delta). \quad (6)$$

из которого следует, что на интервале $[t_0, t_1]$ наблюдается симметрия амплитуд спектральных величин относительно середины частотного интервала, т.е. относительно частоты $\frac{1}{2T}$.

Если частотный интервал выбрать симметричным относительно нуля, т.е. $f \in \left[-\frac{1}{2T}, \frac{1}{2T}\right]$, то зависимость амплитуды спектра от частоты будет симметрична относительно оси ординат. Что касается зависимости фазы от частоты, то для диапазона частот $f \in \left[-\frac{1}{2T}, 0\right]$ она берется со знаком минус по отношению к фазе в диапазоне $\left[0, \frac{1}{2T}\right]$. В связи с этим ДПФ вычисляют только для диапазона $f \in \left[0, \frac{1}{2T}\right]$.

На предварительном этапе выполняется БПФ исходного сигнала, и выбираются базовые частоты (возможно, это будет только одна частота), которые будут описывать данный сигнал и которые можно рассматривать как характеристики сигнала в частотном домене. Выбор базовых частот выполняется для всех классов сигналов. Таким образом, предварительный этап заканчивается формированием набора базовых частот для каждого класса сигналов. Результаты предварительного этапа можно представить в следующем виде:

Класс_1: $f_{11}; f_{12}; \dots f_{1k}$
 Класс_2: $f_{21}; f_{22}; \dots f_{2k}$
 ...
 Класс_n: $f_{n1}; f_{n2}; \dots f_{nk}$

Данные частоты будут в дальнейшем использоваться для классификации сигналов.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Цель любой фильтрации состоит в выделении «существенной» части сигнала, очистки его от шумов, помех, наложений. В данной работе цифровая фильтрация будет использована для выделения «значимых» частот («значимой» частоты) исходного сигнала и дальнейшей классификации сигналов. В основе данного подхода лежит гипотеза, что каждый класс имеет уникальный набор «характерных» частот [8], которые будут определены на предварительном этапе.

Исходный сигнал одновременно поступает на несколько узкополосных гребенчатых фильтров, каждый из которых настроен на выделение характерных частот определенного жеста. Например, фильтр для класса под номером i будет выделять частоты $f_{i1}; f_{i2}; \dots f_{ik}$. Таким образом, если на вход этого фильтра поступает сигнал, обусловленный классом под номером i , то на выходе этого фильтра будет сигнал с амплитудой, значительно превышающей амплитуду

ды сигналов на выходе других фильтров, так как они настроены на пропуск других частот. Это позволит выполнять фильтрацию «на лету», обеспечив тем самым минимальное время для классификации поступающих сигналов.

Таким образом, с помощью n цифровых узкополосных «гребенчатых» фильтров выделяются «значимые» частоты из сигнала $x(t)$. Амплитуда отфильтрованного сигнала на одном из фильтров должна быть существенно больше остальных. С помощью порогового элемента выбирается данный сигнал, и тем самым осуществляется его классификация.

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Для создания цифровых узкополосных «гребенчатых» фильтров предлагается использовать полосовые БИХ-фильтры [9]. Одним из наиболее простых способов расчета коэффициентов таких фильтров является метод размещения нулей и полюсов передаточной функции фильтра.

Как было указано ранее, при шаге дискретизации T необходимо найти передаточную функцию цифрового фильтра в диапазоне «линейных частот»:

$$f \in \left[0, \frac{1}{2T}\right]. \quad (7)$$

Полосовой фильтр должен пропускать сигнал на определенной частоте и подавлять все остальные частоты. Передаточная функция цифрового фильтра в общем случае представима в виде

$$H(z) = \frac{K \prod_{k=1}^n (z - z_k^0)}{\prod_{k=1}^n (z - z_k^p)}, \quad (8)$$

где z_k^0 – нули передаточной функции; z_k^p – полюса передаточной функции $k = 1, 2, \dots, n$; K – константа; $z = e^{j2\pi T f}$ – комплексная переменная.

Положим $n = 2$ и используем передаточную функцию второго порядка:

$$H(z) = \frac{(z - z_1^0)(z - z_2^0)}{(z - z_1^p)(z - z_2^p)}. \quad (9)$$

Для подавления сигнала на краях частотного диапазона $\left[0, \frac{1}{2T}\right]$ предлагается разместить нули при $f = 0$ и $f = \frac{1}{2T}$. Тогда

$$\begin{aligned} z_1^0 &= e^{j2\pi T \cdot 0} = 1, \\ z_2^0 &= e^{j2\pi T \cdot \frac{1}{2T}} = e^{j\pi} = -1. \end{aligned} \quad (10)$$

Для пропуска сигнала при заданной частоте предлагается разместить два комплексно-сопряженных полюса следующего вида:

$$z_1^p = re^{j2\pi T f_p}, \quad z_2^p = re^{-j2\pi T f_p}, \quad (11)$$

где f_p – частота пропускания, $r \approx 1 - ST\pi$, S [Гц] – ширина полосы пропускания полосового фильтра. Таким образом, получаем передаточную функцию цифрового фильтра в виде [10]:

$$H(z) = \frac{(z-1)(z+1)}{(z-re^{j2\pi T f_p})(z-re^{-j2\pi T f_p})}. \quad (12)$$

Для получения коэффициентов цифрового фильтра выполним преобразования $H(z)$:

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{z^2 - 1}{z^2 - zr(e^{j2\pi T f_p} + e^{-j2\pi T f_p}) + r^2} = \\ &= \frac{z^2 - 1}{z^2 - 2zr\cos(2\pi T f_p) + r^2} = \\ &= \frac{1 - z^{-2}}{1 - 2r\cos(2\pi T f_p)z^{-1} + r^2z^{-2}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Разностное уравнение цифровой фильтрации может быть представлено как

$$y(n) = 2r\cos(2\pi T f_p)y(n-1) - r^2y(n-2) + x(n) - x(n-2), \quad (14)$$

где $x(n) = x(nT)$ – входной сигнал; $y(n) = y(nT)$ – отфильтрованный сигнал.

Так, например, для полосового фильтра, который пропускает сигнал на частоте 50 Гц, с шириной полосы пропускания $S = 5$ Гц разностное уравнение цифровой фильтрации будет иметь вид

$$y(n) = -0.877y(n-2) + x(n) - x(n-2), \quad (15)$$

где $x(n)$ – входной сигнал; $y(n)$ – отфильтрованный сигнал.

На рис. 1 представлена амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра, который из диапазона [0, 250 Гц] пропускает сигнал на частоте 50 Гц.

При разных частотах пропускания f_p и ширине полосы пропускания S каждый из цифровых фильтров выделяет сигнал на определенной частоте. Если исходный сигнал не содержит заданную частотную составляющую, то на выходе соответствующего фильтра амплитуда отфильтрованного сигнала будет близка к нулю. При классификации выбирается тот канал, на выходе которого сигнал имеет максимальную амплитуду.

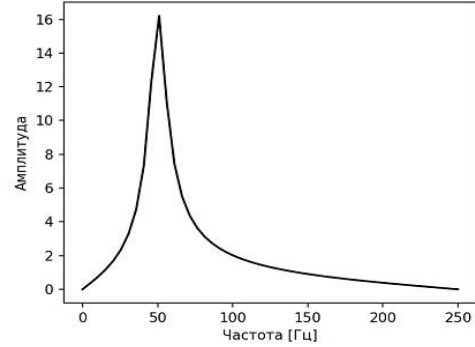


Рис. 1. АЧХ полосового фильтра

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ

Тестирование предложенной методики выполнялось с помощью программы, написанной на языке Python 3.7. Предположим, что каждый класс сигналов представляет собой синусоиду определенной частоты (5, 20, 35, 50 Гц). Было выбрано четыре класса сигналов-синусоид, переключение между которыми осуществлялось нажатием на клавиши <Up>, <Down>, <Left>, <Right>:

<Up> – 5 Гц; <Down> 20 Гц;
<Left> – 35 Гц; <Right> 50 Гц.

Сигнал испускался в диапазоне [0, 0.5 с], шаг дискретизации входного сигнала составлял 0,002 с. В соответствии с формулой (14) было создано четыре узкополосных цифровых фильтров с частотой пропускания 5, 20, 35, 50 Гц и шириной полосы пропускания $S = 5$ Гц. Переключение между классами сигналов приводило к тому, что одновременно на выходе только одного из фильтров амплитуда сигнала была существенно выше, чем на выходе остальных. Пример работы программы приведен на рис. 2, 3 и 4. В левом верхнем углу отображается исходный сигнал заданной частоты, в правом верхнем – выходной сигнал соответствующего фильтра, а внизу – выходные сигналы остальных узкополосных цифровых фильтров.

Так, на рис. 2 выбран входной сигнал с частотой 5 Гц, единичной амплитуды. Выход фильтра 1 (Filter_1), который пропускает частоту 5 Гц, имеет также единичную амплитуду. Амплитуда на выходах остальных фильтров на порядок ниже. На рис. 3 выбран входной сигнал с частотой 20 Гц. В этом случае единичную амплитуду имеет сигнал на выходе фильтра 2 (Filter_2), который пропускает частоту 20 Гц. На рис. 4 выбран входной сигнал с частотой 50 Гц. В этом случае единичную амплитуду имеет сигнал на выходе фильтра 4 (Filter_4), который пропускает частоту 50 Гц.

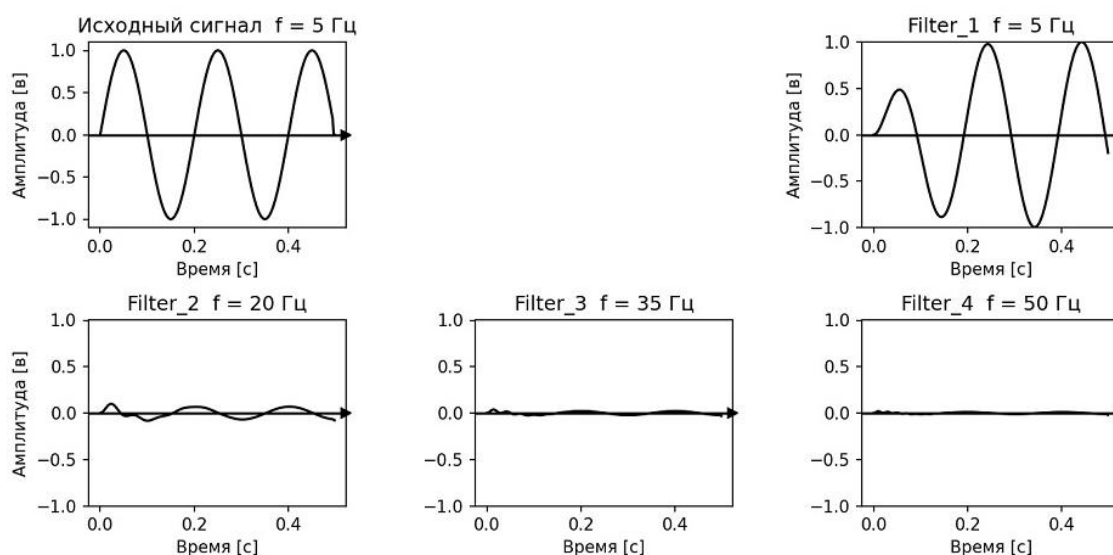


Рис. 2. Фильтрация сигнала на частоте 5 Гц

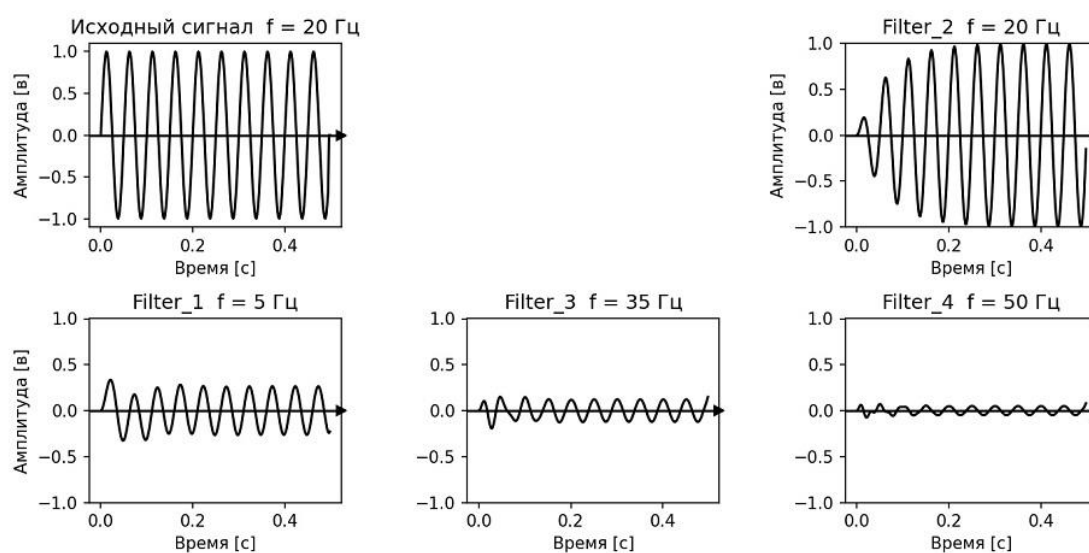


Рис. 3. Фильтрация сигнала на частоте 20 Гц

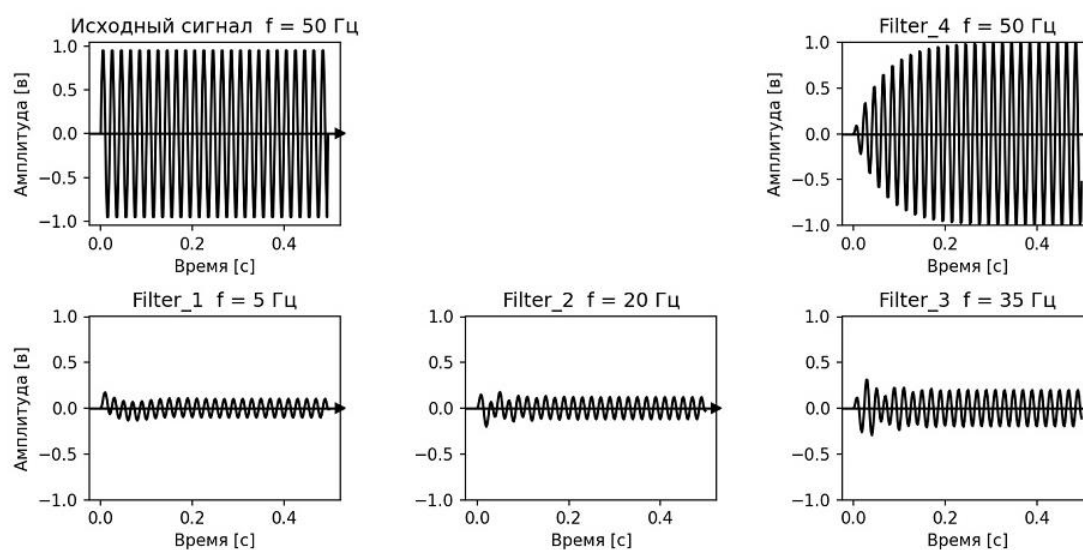


Рис. 4. Фильтрация сигнала на частоте 50 Гц

Тем самым получено экспериментальное подтверждение предложенной методики классификации сигналов в режиме реального времени на основе узкополосных цифровых фильтров.

ВЫВОДЫ

В данной работе предложено и экспериментально проверено использование узкополосных «гребенчатых» цифровых фильтров для классификации сигналов на основе их частотных характеристик. Данный подход позволяет классифицировать сигналы «на лету» в режиме реального времени. Выбор частотных характеристик сигналов и настройка узкополосных «гребенчатых» цифровых фильтров выполняется на предварительном этапе. Данную методику планируется использовать для классификации сигналов, формирующихся в результате жестов и субвокального произношения команд, с дальнейшим преобразованием в управляющие команды для мобильного робототехнического устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kapur A., Kapur S., Maes P. *Alterego: A personalized wearable silent speech interface* // In 23rd International conference on intelligent user interfaces, 2018, P. 43–53. DOI: 10.1145/3172944.3172977.
2. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Kudryavtsev K.Y., Chepin E.V. The Decomposition Method of Multi-channel Control System Based on Extended BCI for a Robotic Wheelchair // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, V. 948. P. 562–567. DOI: 10.1007/978-3-030-25719-4_73.
3. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Chepin E.V., Kudryavtsev K.Y. The command interpretation in decomposition method of multi-channel control for a robotic device // *Procedia Computer Science*, 2020. V. 169, P. 152–157. DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.127.
4. Khokhar Z.O., Xiao Z.G., Menon C. Surface EMG pattern recognition for real-time control of a wrist exoskeleton // *Biomedical engineering online*, 2010. V. 9, № 1, P. 1–17. DOI: 10.1186/1475-925X-9-41.
5. Soledad G. Alternative Feature Selection Methods in Machine Learning. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kdnuggets.com/2021/12/alternative-feature-selection-methods-machinelearning> (дата обращения: 04.04.2022).
6. Brownlee J. How to choose a feature selection method for machine learning // *Machine Learning Mastery*, 2019. V. 10.
7. Тагунов В.В., Кудрявцев К.Я., Петрова А.И., Возненко Т.И. Методика выбора входных признаков для алгоритмов машинного обучения // *Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ*, 2022. Т. 11. № 1. С. 51–58. DOI: 10.56304/S2304487X22010114.
8. Igrevskaia A., Kachina A., Petrova A., Kudryavtsev K. The Research of Characteristic Frequencies for Gesture-based EMG Control Channels. In: Klimov V.V., Kelley D.J. (eds). *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2021*. BICA 2021: 2022, 623 p. DOI: 10.1007/978-3-030-96993-6_14
9. Ifeakor E.C., Jervis B.W. *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. Pearson Education, 2002. 933 p.
10. Айфичер Э.С., Джервис У. *Цифровая обработка сигналов: практический подход / Пер. с англ.* М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 992 с.

USING DIGITAL FILTERS FOR REAL-TIME SIGNAL CLASSIFICATION

K.Ya. Kudryavtsev

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia
e-mail: KYKudryavtsev@mephi.ru*

Received April 14, 2024; revised April 15, 2024; accepted May 14, 2024

A technique for using digital filters to classify control signals in real time is proposed. Signals can come from various control sensors installed on a controlled device, such as a mobile robot. Control signals come from sensors, are processed, classified, and are subsequently used to control a mobile robotic device. There are a large number of signal classification algorithms, which are based on identifying the characteristic features of the signal, such as amplitude, frequency, average value, etc. Most algorithms classify signals based on characteristics in the time domain. In this work, it is proposed to use the frequency characteristics of the signal and, on their basis, carry out classification using narrow-band «comb» digital filters. The base frequencies of the control signal are pre-staged using fast Fourier transform. Once the base frequencies are determined, the classification process consists of filtering the raw

signal with a set of digital narrow-band «comb» filters. This approach allows you to classify control actions «on the fly» in real time. Digital filters can be used to classify different types of signals, which are further converted into control commands for a mobile robotic device.

Keywords: Digital filtering, signal classification, Fourier transform, Z-transform.

REFERENCES

1. Kapur A., Kapur S., Maes P. *Alterege*: A personalized wearable silent speech interface. In 23rd International conference on intelligent user interfaces, 2018. Pp. 43–53. DOI:10.1145/3172944.3172977.
2. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Kudryavtsev K.Y., Chepin E.V. The Decomposition Method of Multi-channel Control System Based on Extended BCI for a Robotic Wheelchair. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 948. Pp. 562–567. DOI: 10.1007/978-3-030-25719-4_73.
3. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Chepin E.V., Kudryavtsev K.Y. The command interpretation in decomposition method of multi-channel control for a robotic device. *Procedia Computer Science*, 2020. Vol. 169. Pp. 152–157. DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.127.
4. Khokhar Z.O., Xiao Z.G., Menon C. Surface EMG pattern recognition for real-time control of a wrist exoskeleton. *Biomedical engineering online*, 2010. Vol. 9. No. 1. Pp. 1–17. DOI:10.1186/1475-925X-9-41.
5. Soledad G. Alternative Feature Selection Methods in Machine Learning. Available at: <https://www.kdnuggets.com/2021/12/alternative-feature-selection-methods-machinelearning> (accessed: 04.04.2022).
6. Brownlee J. How to choose a feature selection method for machine learning. *Machine Learning Mastery*, 2019. Vol. 10.
7. Tagunov V.V., Kudryavtsev K.Ya, Petrova A.I., Voznenko T.I. Methodology for selecting input features for machine learning algorithms. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2022. Vol. 11. No. 1. Pp. 51–58 (in Russian). DOI: 10.56304/S2304487X22010114.
8. Igreyskaya A., Kachina A., Petrova A., Kudryavtsev K. The Research of Characteristic Frequencies for Gesture-based EMG Control Channels. In: Klimov V.V., Kelley D.J. (eds) *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2021. BICA 2021 : Proceedings of the 12th Annual Meeting of the BICA Society*. Springer Nature, 2022. 623p. doi: 10.1007/978-3-030-96993-6_14.
9. Ifeachor E.C., Jervis B.W. *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. Pearson Education, 2002. 933 p.
10. Ifeachor E.C., Jervis W. *Digital signal processing: a practical approach*: Trans. from English. Moscow. Williams Publishing House, 2004. 992 p.