

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КІБЕРБЕЗПЕКА

DOI 10.31891/2307-5732-2021-303-6-31-36
УДК 621.306.6

ГУЛА І. В.
Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0002-4434-5794
e-mail: holmenetwork@gmail.com
ПОЛІКАРОВСЬКИХ О. І.
Одеський національний морський університет
ORCID ID: 0000-0002-1893-7390
e-mail: polalexey@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЙРОМЕРЕЖ ДЛЯ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ SOFTWARE DEFINED RADIO

Наукова стаття присвячена розгляду питань керування системою SDR шляхом розпізнавання видів цифрової модуляції та виконується системою, яка автоматично класифікує вид цифрової модуляції одержуваного сигналу. Запропоновано алгоритм автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції за допомогою багатопшарової нейронної мережі. Досліджено вплив шуму в каналі зв'язку на ймовірності розпізнавання видів цифрової модуляції при відомому значенні носійної частоти.

Ключові слова: розпізнавання цифрової модуляції, багатопшарова нейронна мережа, система SDR.

IHOR HULA
Khmelnitsky National University
OLEKSIY POLIKAROVSKYKH
Odessa National Maritime University

STUDY NEUR NETWORKS FOR SOFTWARE DEFINED RADIO CONTROL

The scientific article is devoted to the issues of SDR system control. Software Defined Radio is a system designed for software control of information transmission processes in a radio communication channel. Recognition of digital modulation types is used, which automatically classifies the type of digital modulation of the received signal. The following issues are covered in the article: the analysis of existing approaches in the task of automatic recognition of types of digital modulation is carried out; the analysis and classification of informative features in the task of automatic recognition is carried out the following types of digital modulation: 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 2-FSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM and OFDM.

This article uses a neural network approach based on cumulative characteristics. To solve these problems, the methods of calculation and selection of informative cumulative features described in the developed model of the system of automatic recognition of digital modulation types by means of a neural network on cumulative features at a known value of carrier frequency are described.

A model of the system of automatic recognition of digital modulation types at a known value is constructed carrier frequency. An algorithm for automatic recognition of digital modulation types has been developed using a multilayer neural network.

The influence of noise in the communication channel on the probability of recognizing the types of digital modulation at a known value of the carrier frequency is investigated. It was found that regardless of the type of noise in the communication channel, the law of error distribution in IQ data becomes close to normal. This fact is one important argument for the use of cumulative features in the task of automatic recognition of types of digital modulation. Therefore, the task of automatic recognition of digital modulation types is quite relevant. Further research may be aimed at expanding the range of high-order cumulative features used, due to which it is possible to increase the probability of correct recognition of types of digital modulation, and solving the recognition problem at an unknown value of the frequency and initial phase of the carrier signal.

Keywords: digital modulation recognition, multilayer neural network, SDR system.

Постановка задачі

Система Software Defined Radio – це система, призначена для програмного керування процесами передачі інформації в радіоканалі зв'язку. У SDR-системі важливим завданням є розпізнавання видів цифрової модуляції. Системи SDR використовуються для радіомоніторингу й радіоконтролю завданням яких є виявлення, пеленгація й аналіз радіосигналів, а також контролю розподілу частот. Завдання розпізнавання видів цифрової модуляції відіграє важливу роль: по-перше, знання виду цифрової модуляції може бути безпосередньо використане для ідентифікації пристрою, що передає сигнал; по-друге, якщо декодування може бути виконане, то після розпізнавання виду цифрової модуляції передане повідомлення може бути відновлене; по-третє, розпізнавання видів цифрової модуляції необхідно для роботи станцій активних перешкод, які порушують передачу сигналів між пристроями. Вони створюють завади, які відповідають виду модуляції сигналу, який передається в просторі [1, 2].

Отже, завдання автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції є досить актуальним. Автоматичне розпізнавання видів цифрової модуляції виконується системою, яка автоматично класифікує вид цифрової модуляції одержуваного сигналу. Існують кілька підходів до розв'язку поставленого завдання: розпізнавання видів цифрової модуляції за формою сигнального сузір'я, граничний підхід і нейромережевий

підхід тощо. Будь-який підхід використовує набір інформативних ознак, отриманих з вихідних даних шляхом використання математичних перетворень і методів. Групи інформативних ознак можемо класифікувати як кумулянтні й спектральні ознаки. У даній статті використовується нейромережевий підхід за кумулянтними ознаками. Для вирішення даних проблем описані методи обчислення й вибору інформативних кумулянтних ознак, які використовуються в розробленій моделі системи автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції за допомогою нейронної мережі за кумулянтними ознакам при відомому значенні носійної частоти[3].

Відправник передає сигнал з одним з наступних видів цифрової модуляції: 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 2-FSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM і OFDM, які часто використовуються в практиці. Адресат отримує спотворений адитивним шумом $\xi(t)$ – переданий сигнал $z(t)$, t – безперервний час:

$$z(t) = s(t) + \xi(t), \tag{1}$$

де $s(t)$ – переданий сигнал без шуму.

Потім отриманий сигнал $z(t)$ попередньо обробляється, див. рис. 1, у результаті чого отримуємо IQ дані, які є вихідними даними для поставленого завдання. Основні вихідні параметри представлено в таблиці 1. Одержувачу потрібно розпізнати вид цифрової модуляції, що використовується [7].

Таблиця 1

Параметри сигналів для проведення тестування

Параметр	Значення
Частота дискретизації IQ даних (Гц)	839680
Кількість відліків інформаційного сигналу	3600
Відношення сигналу до шуму в каналі зв'язку (дБ)	с 0 до 20

У таблиці 1 представлено параметри одночастотної модуляції, які необхідні для проведення моделювання. У статті досліджено декілька видів цифрової модуляції, у тому числі OFDM. У більшості робіт досліджені тільки види одночастотної модуляції (M-PSK, M-FSK, M-QAM) або пристрою, які дозволяє розпізнавати тільки два класи сигналів: з одночастотною модуляцією й багаточастотної модуляцією (OFDM) [7, 9, 10]. Дослідження проводиться при різних наборах параметрів OFDM сигналів, які наведено в таблиці 2.

У таблиці 2 представлено чотири варіанти набору вихідних параметрів OFDM сигналів з метою дослідження їх впливу на ймовірності розпізнавання видів цифрової модуляції.

Таблиця 2

Параметри OFDM сигналів

Варіант	1	2	3	4
Кількість підносійних	225	225	101	101
Довжина ЗШПФ	256	256	128	128
Схема модуляції підносійних	16-QAM	64-QAM	64-QAM	16-QAM
Захисний інтервал	32	32	16	16

Моделювання проводиться в середовищі SciLab, і є головним інструментом розв'язку широкого спектра наукових і прикладних завдань, у таких областях як: моделювання, програмування, проектування комунікаційних систем, обробка сигналів і робота з нейронними мережами.

Вихідними даними для поставленого завдання є IQ дані. Для виділення IQ даних використовуються різні засоби, які представлено в рис. 1. [9, 10], де Π – блок перемноження. Залежно від знання інформації про переданий сигнал моделювання проводиться в декількох випадках. Якщо фазова частина носійного сигналу має вигляд $\omega_n(t) + \varphi_0$, то переданий сигнал має вигляд:

$$z(t) = A(t) \cos(\omega_c t) \cos \phi(t) - A(t) \sin(\omega_c t) \sin \phi(t)$$

або

$$z(t) = A(t) \cos[2\pi f t + \varphi_0 + \phi(t)],$$

де f – носійна частота.

У приймачі в загальному випадку частота й початкова фаза не відомі, тоді фазова частина носійного сигналу для синхронізації має вигляд $2\pi \bar{f} t + \bar{\varphi}_0$, де \bar{f} – оцінка значення носійної частоти й $\bar{\varphi}_0$ – оцінка значення початкової фази носійного сигналу. Щоб одержати IQ дані, можна використовувати схему на рис. 1.

За допомогою фільтра низьких частот видаляються високочастотні компоненти. Отже, вираз для IQ даних можна записати в наступному вигляді:

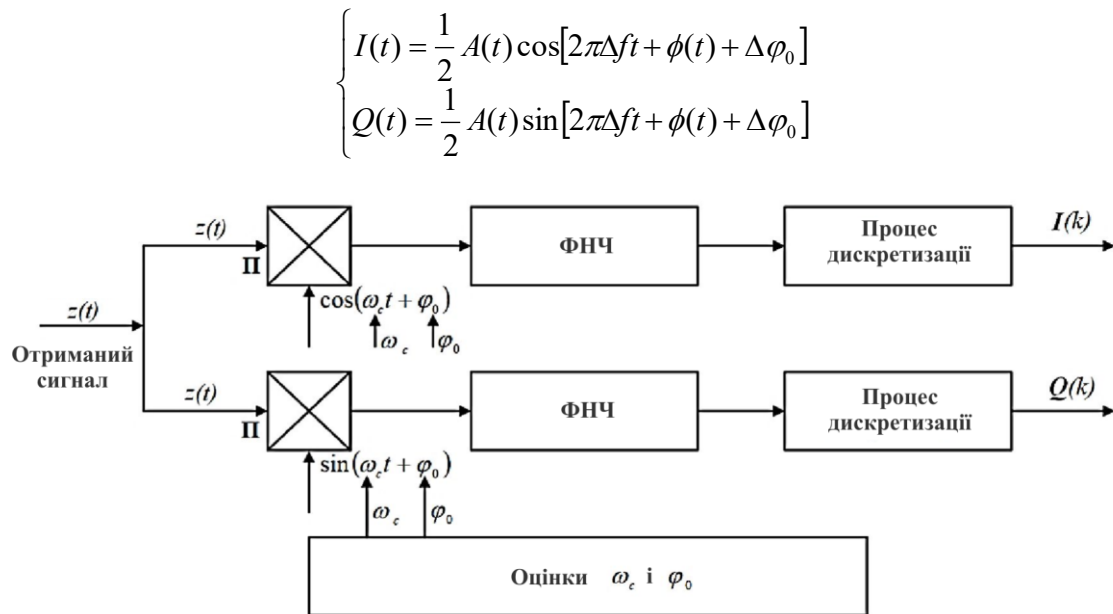


Рис. 1. Схема обробки отриманого сигналу

Якщо носійна частота й початкова фаза відомі, тобто:

$$\begin{cases} \Delta f = 0 \\ \Delta\varphi_0 = 0 \end{cases}$$

то IQ дані надходять в ідеальному вигляді:

$$\begin{cases} I(t) = \frac{1}{2} A(t) \cos[\varphi(t)] \\ Q(t) = \frac{1}{2} A(t) \sin[\varphi(t)] \end{cases}$$

При передачі зазвичай в сигналі присутні службові фрагменти, які містять інформації про несучу частоту й фазі для синхронізації одержуваного сигналу. Але в практиці іноді ці фрагменти відсутні, наприклад, при аналізі сигналів у процесі розв'язку завдань радіоконтролю, радіомоніторингу й радіорозвідки, а також у системах, у яких немає можливості передавати службову інформацію (передача коротких пакетів даних) [1–3, 9]. Тоді для розпізнавання видів цифрової модуляції потрібно проводити оцінки параметрів носійного сигналу. У цій статті проводяться дослідження при відомому значенні носійної частоти.

Загальна модель системи автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції. На основі аналізу підходів розв'язку, інформативних ознак і постановки завдання побудуємо модель системи розпізнавання видів цифрової модуляції, що представлено рис. 2.

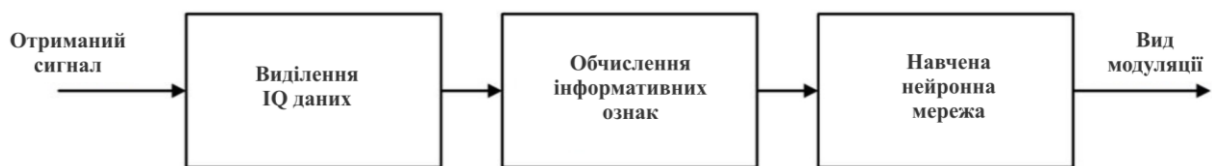


Рис. 2. Система автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції

Система складається із трьох частин: виділення IQ даних, обчислення інформативних ознак і нейронна мережа, навчена розпізнаванню потрібних видів цифрової модуляції. Блок виділення IQ представлено в рис. 1.

Виклад основного матеріалу

В наш час існує ряд підходів до розв'язку завдання автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції, серед них найбільш універсальним служить підхід, заснований на штучних нейронних мережах. Серед великої кількості нейромережових підходів найважливіше значення належить багатошаровим нейронним мережам (БНМ) – багатошаровому перцептрону, який у статті використовується для розпізнавання видів цифрової модуляції [4, 6, 8, 10].

Щоб використовувати БНМ, спочатку необхідно її навчити. Навчання БНМ виконується подачею на її вхід ознак, які характеризують конкретний вид модуляції, вказівкою виду модуляції (вказівки вчителя),

наприклад, її номера в списку розпізнаваних видів модуляції, і наступною корекцією пам'яті БНМ. Для навчання використовуються бази даних для входу БНМ і вказівок учителі, які відповідають даному входу.

Моделювання системи розпізнавання видів цифрової модуляції виконане в середовищі Scilab з використанням пакетів прикладних програм Scilab Application Toolboxes.

Процес навчання проводиться в режимі offline, максимальна кількість епох рівно 1000. Алгоритм навчання – TRAINSCG (метод шкалованих градієнтів). Параметри нейронної мережі наведено в таблиці 3:

Таблиця 3

Основні параметри нейронної мережі

Кількість шарів	2
Кількість входів	17
Кількість нейронів у прихованому шарі	500
Кількість нейронів у вихідному шарі	8
Максимальна кількість епох	1000
Функція активації в прихованому шарі	Сигмоїдальна
Функція активації у вихідному шарі	Сигмоїдальна

Для тестування навченої нейронної мережі було створено 6 баз даних кумулянтних ознак. Із цією метою за аналогією зі створенням бази даних для навчання для кожної бази були згенеровані 1200 переданих інформаційних сигналів (у середньому по 150 сигналів по кожному з 8 видів цифрової модуляції), підданих далі відповідним до видів модуляції.

На високочастотні сигнали в каналі зв'язку накладені шуми так, що в перших 4-х базах перебувають кумулянтні ознаки, яким відповідають розподілені за нормальним законом шуми в каналі зв'язку, в 5-й базі - за рівномірним законом, в 6-й - по релеєвському закону при ВСШ, який випадковим рівномірним чином вибирається з діапазону (0–20) дБ для цілих значень ВСШ. Для одержання IQ даних отриманий високочастотний сигнал був перетворений відповідно до процедур, представлених на рис. 1. У перших чотирьох базах тестування сигнали OFDM відповідають усім 4-м варіантам з таблиці 2. В 5-ї 6-й базах тестування сигнали OFDM представлені першим варіантом з таблиці 2.

Блок-схема алгоритму розпізнавання видів цифрової модуляції при відомому значенні носійної частоти представлено на рис. 3.

У таблиці 4 проведений зведений порівняльний аналіз результатів тестування для перших 4-х баз даних тестування. Наведені результати тестування для всіх розглянутих у роботі видів цифрової модуляції при різних варіантах набору параметрів OFDM сигналів.

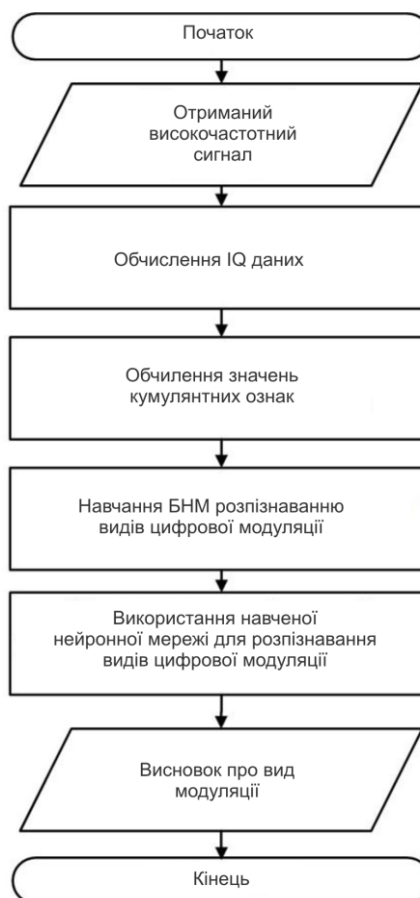


Рис. 3. Блок-схема алгоритму розпізнавання видів цифрової модуляції при відомому значенні носійної частоти

Таблиця 4

Зведені результати розпізнавання видів цифрової модуляції при наявності шуму в каналі зв'язку (у відсотках)

Вид модуляції	Номери баз даних тестування			
	1	2	3	4
2-PSK	100	100	100	100
4-PSK	100	100	100	100
8-PSK	100	100	100	100
2-FSK	100	100	100	100
8-QAM	100	100	100	100
16-QAM	98,17	99,34	100	100
64-QAM	97,81	99,35	98,10	97,65
OFDM	99,30	100	100	100

З таблиці 4 випливає, що використання кумулянтних ознак у навченій багат шаровій нейронній мережі дозволило виконати розпізнавання всіх досліджуваних видів цифрової модуляції в умовах шумів з імовірністю, близької до одиниці.

Незалежно від щільності розподілу ймовірностей шуму в каналі зв'язку закон розподілу помилки в IQ даних стає близьким до нормального. Цей факт є ще одним важливим аргументом для використання кумулянтних ознак у завданні автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції. Наведені далі результати розпізнавання різних видів цифрової модуляції з різними законами розподілу шуму в каналі зв'язку підтверджують зроблений вище висновок [9, 10].

Таблиця 5

**Зведені результати розпізнавання видів цифрової модуляції
при різних законах розподілу шуму в каналі зв'язку (%)**

Вид модуляції	Вид шуму в каналі зв'язку		
	Нормальний	Рівномірний	Релеєвський
2-PSK	100	100	100
4-PSK	100	100	100
8-PSK	100	100	100
2-FSK	100	100	100
8-QAM	100	100	100
16-QAM	98,17	99,29	100
64-QAM	97,81	98,74	95,74
OFDM	99,30	100	100

Результати розпізнавання, наведені в таблиці 5, ще раз підтверджують, що високі результати розпізнавання видів цифрової модуляції, одержувані за допомогою багат шарової нейронної мережі з використанням кумулянтних ознак, практично не залежать від закону розподілу шуму в каналі зв'язку.

У багат шарових нейронних мережах приховані шари відіграють украй важливу роль, оскільки вони виступають у ролі детекторів ознак. У ході навчання приховані нейронні шари поступово виявляють характерні риси даних навчання [9, 10]. Проводиться дослідження впливів кількості прихованих шарів і нейронів у прихованих шарах на точність розпізнавання видів цифрової модуляції. Тестування навчених БНМ виконувалося за даними з бази даних тестування 1.

Таблиця 6

**Зведені результати розпізнавання видів цифрової модуляції
з різними кількостями нейронів у прихованому шарі (%)**

Вид модуляції	Кількість нейронів у прихованому шарі				
	80 нейронів	150 нейронів	300 нейронів	500 нейронів	700 нейронів
2-PSK	100	100	100	100	100
4-PSK	100	100	100	100	100
8-PSK	100	100	100	100	100
2-FSK	100	100	100	100	100
8-QAM	100	100	100	100	100
16-QAM	97,56	96,95	96,34	98,17	98,78
64-QAM	94,20	92,03	91,30	97,81	95,65
OFDM	100	100	99,30	99,30	99,30

Аналіз таблиці 6 показує, що при 500 нейронах у прихованому шарі показаний кращий результат (99,41 % у середньому). Проведене дослідження, пов'язане із застосуванням багат шарової нейронної мережі для розв'язку завдання автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції з використанням кумулянтних ознак. Імовірності правильного розпізнавання видів цифрової модуляції 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 2-FSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, OFDM у середньому складає 99,41 %. Досліджені різні структури БНМ, при цьому нейронна мережа з одним прихованим шаром з 500 нейронами показала найкращий результат.

Висновки

Проведено дослідження й розробка алгоритмів автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції при відомому значенні носійної частоти за допомогою багат шарової нейронної мережі по кумулянтним ознакам. З'ясовано, що незалежно від виду шуму в каналі зв'язку закон розподілу помилки в IQ даних стає близьким до нормального. Цей факт є одним важливим аргументом для використання кумулянтних ознак у завданні автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції.

Побудовано модель системи автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції при відомому значенні носійної частоти. Розроблений алгоритм оцінки значення носійної частоти для розв'язку завдання розпізнавання видів цифрової модуляції при відомому значенні носійної частоти.

Надалі дослідження можуть бути спрямовані на розширення набору використовуваних кумулянтних ознак високих порядків, за рахунок яких можна підвищити ймовірності правильного розпізнавання видів цифрової модуляції, і розв'язок завдання розпізнавання при невідомому значенні частоти і початкової фази носійного сигналу.

Література

1. Аведьян, Э.Д. К выбору кумулянтных признаков в задаче распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов / Э.Д. Аведьян, В.Н. Дам // Информатизация и связь. – 2015. – № 4. – С. 11–15.
2. Аджемов, С.С. Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов в когнитивных радиосистемах / С. С. Аджемов, Н. В. Кленов, М. В. Терешонок, Д. С. Чиров // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2015. – № 6. – С. 19–27.
3. Бакулин, М.Г. Технология OFDM: Учебное пособие для вузов / М. Г. Бакулин, В. В. Крейнделин, А.М. Шлома, А.П Шумов. - М.: Горячая линия - Телеком, 2017. - 352 с.
4. Дьяконов, В.П. Scilab полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
5. Магда, Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков / Ю.С. Магда. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.
6. Медведев, В.С. Нейронные сети. Scilab 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. – 630 с.
7. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин ; пер. с англ. под ред. Н.Н. Куссуль. – 2-е изд. – М. : Издательный дом “Вильямс”, 2006. – 1104 с.
8. Marko, M. R. Application of artificial neural networks in classification of digital modulations for software defined radio / M. R. Marko, M. N. Aleksandar, J.N. Natasa // IEEE EUROCON 2009. – P. 1700–1706.
9. Taira, S. Automatic classification of QAM signals by neural networks / S. Taira // Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '01), 2001. – Vol. 2. – P. 1309–1312.
10. Young, A. F. Classification of digital modulation types in multipath environments /A.F. Young // Master’s Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943-5000, California. June 2008. P. 1–65.

References

1. Avedjjan, Э.Д. К выбору кумулянтных признаков в задаче распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов / Э.Д. Аведьян, В.Н. Дам // Информатизация и связь. - 2015. - # 4. - С. 11 - 15.
2. Adzhemov, S.S. Metody raspoznavaniya vidov cyfrovoy moduljacji syghnalov v koghnityvnykh radyosystemakh / S.S. Adzhemov, N.V. Klenov, M.V. Tereshonok, D.S. Chyrov // Vestnyk Moskovskogho Unyversyteta. Seryja 3. Fyzyka. Astronomyja. - 2015. - # 6. - S. 19 - 27.
3. Bakulyln, M.Gh. Tekhnologhyja OFDM: Uchebnoe posobyje dlja vuzov / M.Gh. Bakulyln, B.V. Krejndelyn, A.M. Shloma, A.P Shumov. - M.: Ghorjachaja lynyja - Telekom, 2017. - 352 s.
4. Djjakonov, V.P. Scilab polnyj samouchytelj / V.P. Djjakonov. - M.: DMK Press, 2012. - 768 s.
5. Maghda, Ju.S. LabVIEW: prakticheskyj kurs dlja ynzhenеров y razrabotchykov / Ju.S. Maghda. - M.: DMK Press, 2012. - 208 s.
6. Medvedev, V.S. Nejronnye sety. Scilab 6 / V.S. Medvedev, V.Gh. Potemkyn.- M.: DYALOGh-MYFY, 2001. - 630 s.
7. Khajkyn, S. Nejronnye sety: polnyj kurs / S. Khajkyn; per. s anghl. pod red. N.N. Kussulj. - 2-e yzd. - M.: Yzdatelnyj dom “Vyljjams”, 2006. - 1104 s.
8. Marko, M. R. Application of artificial neural networks in classification of digital modulations for software defined radio / M.R. Marko, M.N. Aleksandar, J.N. Natasa // IEEE EUROCON 2009. - P. 1700 - 1706.
9. Taira, S. Automatic classification of QAM signals by neural networks / S. Taira // Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 01), 2001. -Vol. 2. - P. 1309 - 1312.
10. Young, A. F. Classification of digital modulation types in multipath environshtents /A.F. Young // Masters Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943-5000, California. June 2008. P. 1 - 65.

Рецензія/Peer review : 19.11.2021

Надрукована/Printed :30.12.2021