

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОМ ПРИЕМНИКЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Ч.Н.Нгуен, А.С.Подстригаев, Х.Н.Чан

STUDY OF THE SIGNAL-NOISE RATIO NECESSARY FOR IDENTIFICATION OF PHASE-SHIFT KEYED SIGNALS IN THE AUTOCORRELATION RECEIVER OF RADIO FREQUENCY SPECTRUM MONITORING

T.N.Nguyen, A.S.Podstrigaev, H.N.Tran

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина),
10th20th30th@gmail.com

Для разработанного автокорреляционного приемника (АКП) радиотехнического мониторинга (РТМ) выполнена оценка отношения сигнал-шум (ОСШ), необходимого для идентификации фазоманипулированных сигналов (ФМС) с заданным качеством. Исследованы ФМС с законами чередования фаз по кодам Баркера и Фрэнка. Изучена разница между величиной ОСШ, необходимой для идентификации реальных ФМС, и величиной, используемой для идентификации имитационных сигналов, полученных в среде MATLAB. Показано, что идентификация ФМС с законом чередования фаз по коду Фрэнка требует большего на 0,2...1 дБ ОСШ по сравнению с кодом Баркера. Идентификация сигнала при приеме смеси ЛЧМ-сигналов и ФМС требует обеспечения ОСШ на 0,7...1,1 дБ больше, чем при приеме только ФМС. Для идентификации записанных ФМС требуется ОСШ на 1,6...2,5 дБ больше, чем для обнаружения имитационных сигналов. Полученные результаты могут использоваться для оценки чувствительности приемной аппаратуры комплекса РТМ и, соответственно, дальности действия комплекса.

Ключевые слова: фазоманипулированный сигнал, автокорреляционный приемник, радиотехнический мониторинг, радиомониторинг, радиоконтроль, код Баркера, код Фрэнка

Для цитирования: Нгуен Ч.Н., Подстригаев А.С., Чан Х.Н. Исследование отношения сигнал-шум, необходимого для идентификации фазоманипулированных сигналов в автокорреляционном приемнике радиотехнического мониторинга // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №4(125). С.103-107. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).103-107](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).103-107)

The signal-to-noise ratio (SNR) required for the identification of phase-shift keyed (PSK) signals with a given quality in the developed autocorrelation receiver (ACR) for radio frequency (RF) spectrum monitoring has been studied. We have investigated the PSK signals with the laws of phase shifting according to the Barker and Frank codes. In addition, we have investigated the difference between the SNR value required to identify real signals with PSK and the value used to identify signals simulated in MATLAB. The simulation has shown that identifying the PSK with the phase-shifting law by the Frank code requires 0.2 ... 1 dB SNR more than the Barker code. When receiving a mixture of signals with chirp and PSK, signal identification requires providing SNR by 0.7 ... 1.1 dB more than when receiving an only signal with PSK. To identify the recorded signal with PSK, one needs SNR by 1.6 ... 2.5 dB more than detecting simulated signals. The results obtained can be used to assess the sensitivity of the receiving equipment for RF spectrum monitoring and, accordingly, the range of the equipment.

Keywords: phase-shift keyed signal, autocorrelation receiver, RF spectrum monitoring, RF spectrum management, Barker code, Frank code

For citation: Nguyen T.N., Podstrigaev A.S., Tran H.N. Study of the signal-noise ratio necessary for identification of phase-shift keyed signals in the autocorrelation receiver of radio frequency spectrum monitoring // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №4(125). P.103-107. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).103-107](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).103-107)

Введение

В системах радиолокации, связи и навигации широкое распространение получили фазоманипулированные сигналы (ФМС) [1-4]. На практике используются различные законы чередования фаз ФМС, например по кодам Баркера, Фрэнка и др. [5-7].

Однако прием ФМС комплексами радиотехнического мониторинга (РТМ), как правило, сопряжен с технической сложностью оперативного определения типа модуляции и кодовой последовательности [8-12]. Поэтому в [13] предложен подход к решению этой

задачи на основе усовершенствованного автокорреляционного приемника (АКП). Приемник также позволяет различать простой и линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигналы. Однако для разработанного АКП ранее не оценивалось отношение сигнал-шум (ОСШ), необходимое для идентификации с заданным качеством ФМС с законами чередования фаз по кодам Баркера и Фрэнка. Не оценивалась также разница между величиной ОСШ, необходимой для идентификации реальных ФМС, и величиной, используемой для идентификации имитационных сигналов, полученных непосредственно в среде MATLAB.

Соответственно, целью настоящей работы является сравнительный анализ ОСШ, необходимого для идентификации имитационных и записанных ФМС с законами чередования фаз по кодам Баркера и Фрэнка.

Для получения значений ОСШ используется программная модель АКП в среде MATLAB. Записи сигналов для модели получены путем оцифровки с помощью осциллографа.

Описание схемы АКП

В состав схемы усовершенствованного АКП (рис. 1) входят следующие элементы [13]: полосовой фильтр высоких частот (ПФ ВЧ) с полосой пропускания $\Delta f_{ВЧ}$; линии задержки ЛЗ1–ЛЗ3 с длительностями задержки $\tau_{з1}$, $\tau_{з2}$ и $\tau_{з3}$ соответственно; умножитель частоты; перемножители; фильтры низких частот (ФНЧ) с полосой пропускания $\Delta f_{НЧ}$; полосовые фильтры на разностных частотах ПФ $f_{раз1}$ и ПФ $f_{раз2}$; устройства получения спектра УПС1 – УПС4; пороговые устройства ПУ1 – ПУ4; логические устройства ЛУ1 – ЛУ3; ключи 1 и 2; детекторы огибающей ДО1 – ДО3; блоки вычитания БВ1–БВ3; формирователи опорного сигнала ФОС1 и ФОС2.

Принцип действия усовершенствованного АКП основан на разделении низкочастотной и высокочастотной составляющих в спектре сигнала, прошедшего процедуру автокорреляции. Параллельно входной сигнал удваивается по частоте и подвергается такой же обработке. По сочетанию низкочастотной и высокочастотной составляющих можно определить тип модуляции принимаемого сигнала. Логическое устройство ЛУ1 принимает решение о приеме простого, ЛЧМ-сигнала или ФМС. В случае, если идентифицирован ФМС или смесь ФМС и ЛЧМ-сигнала, выполняется обработка составляющей спектра сигнала после полосовой фильтрации на разностной частоте первого канала. Также на основе продетектированной составляющей сигнала на разностной частоте первого канала формируются опорные ФМС по всем возможным кодам Баркера. Затем производится вычитание опорных ФМС из соответствующих нормированных сигналов. По наличию или отсутствию сигнала после вычитания опорного ФМС можно определить конкретный вид принятого ФМС. Более подробно принцип действия АКП описан в [13].

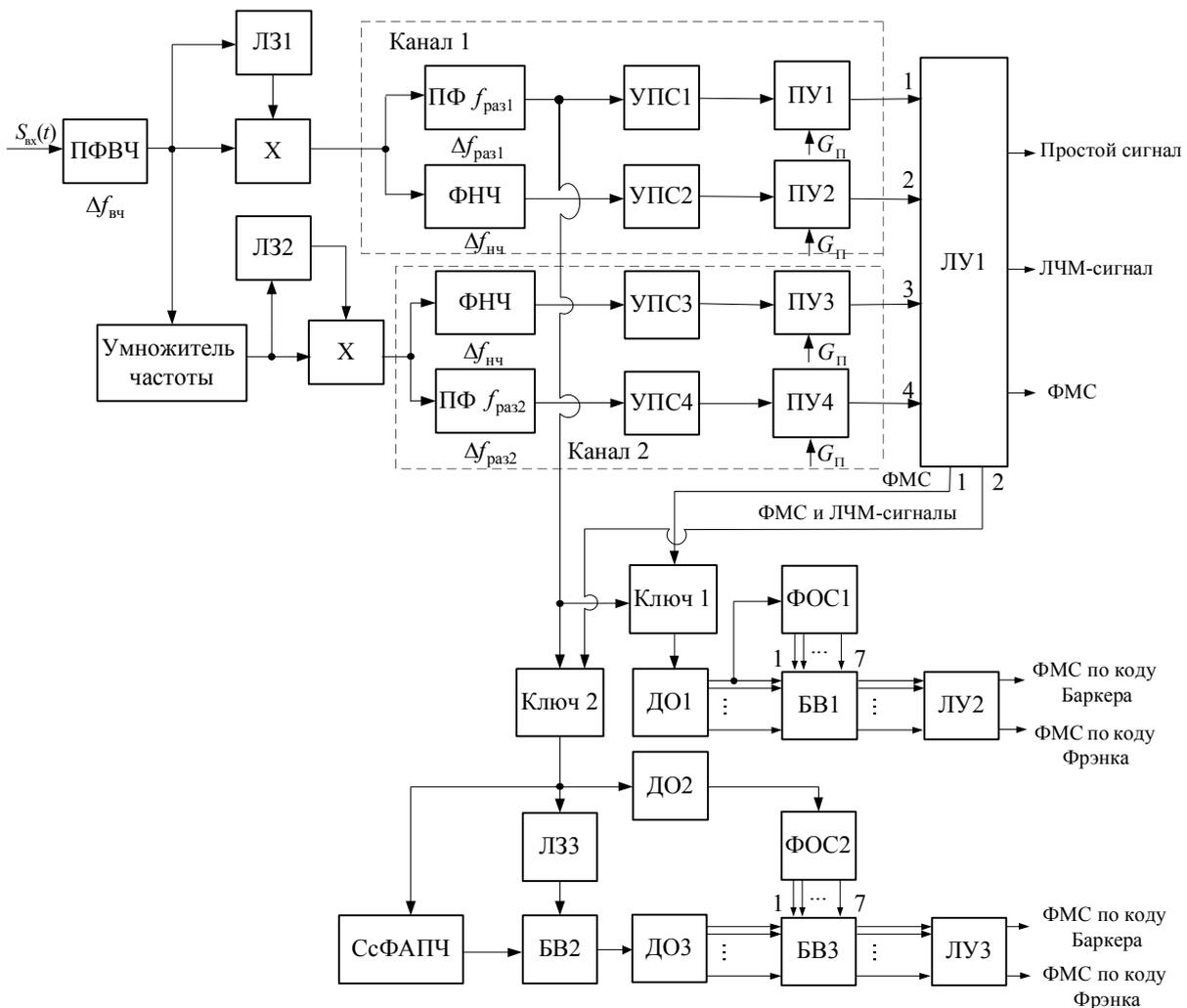


Рис.1. Структурная схема усовершенствованного АКП [13]



Рис.2. Структурная схема стенда формирования и обработки ФМС

Описание эксперимента по идентификации ФМС с различными кодовыми последовательностями в АКП

На рис.2 представлена структурная схема стенда, с помощью которого проводилось исследование ОСШ, необходимого для идентификации записанных ФМС в усовершенствованном АКП.

Эксперимент проводился следующим образом. Генератор сигналов формировал ФМС с разными типами и параметрами кодовых последовательностей. Несущая частота принимаемых сигналов составляла 300 МГц, что соответствует промежуточной частоте реального АКП.

Далее сгенерированные сигналы оцифровывались и записывались в память осциллографа. При оцифровке устанавливалась частота дискретизации 5 ГГц, а разрешение АЦП осциллографа составляло 8 бит.

Затем записанные сигналы передавались на компьютер, где выполнялась обработка с помощью программной модели АКП (рис. 1) в среде MATLAB.

ФМС с законами чередования фаз по кодам Баркера и Фрэнка формировались с длительностью $\tau_{\text{и}} = 8$ мкс и одинаковыми амплитудами. Законы чередования фаз ФМС соответствовали количеству элементов кода по кодам Баркера — $B_i = 4; 13$ ($i = 1, 2$) и Фрэнка — $\Phi_i = 4; 16$. Соответственно, значения длительности дискрета ФМС составили: по кодам Баркера $\tau_{B1} = 2$ мкс, $\tau_{B2} = 0,61$ мкс; по кодам Фрэнка $\tau_{\Phi1} = 2$ мкс, $\tau_{\Phi2} = 0,5$ мкс.

Для обработки записей ФМС задавались следующие исходные данные: $\Delta f_{\text{БЧ}} = 500$ МГц, $\tau_{31} = 200$ нс, $\tau_{32} = 0,5\tau_{31}$, $\Delta f_{\text{НЧ}} = 100$ кГц, $\Delta f_{\text{раз1}} = \Delta f_{\text{раз2}} = 10$ МГц. Изменение ОСШ обеспечивалось за счет выбора соответствующего значения дисперсии аддитивного гауссовского шума на входе модели. Пороговые значения рассчитаны по критерию Неймана—Пирсона [14,15] для вероятности правильного обнаружения $P_D = 0,9$ и вероятности ложной тревоги $P_{F0} = 10^{-5}$. Вероятность P_{D0} оценивалась как $P_{D0} = N_1/N$, где N_1 — число реализаций с идентификацией сигнала, N — общее число реализаций при фиксированном значении дисперсии шума.

Также исследовалась обработка смеси ФМС и ЛЧМ-сигналов. При этом для ЛЧМ-сигнала устанавливались следующие параметры: длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 8$ мкс, ширина спектра $\Delta f_c = 30$ МГц и амплитуда, равная амплитуде ФМС.

Кроме того, с вышеуказанными исходными данными обрабатывались имитационные сигналы, сформированные непосредственно в среде MATLAB.

Результаты моделирования процесса обработки ФМС в АКП

Результаты вычислений по 1000 измерений представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

ОСШ, при котором достигаются вероятности $P_{D0} = 0,9$ и $P_{F0} = 10^{-5}$, при обнаружении записанных и имитационных ФМС по кодам Баркера и Фрэнка в случае приема только ФМС

Вид сигнала	ОСШ, дБ			
	ФМС по кодам Баркера с разными B_i		ФМС по кодам Фрэнка с разными Φ_i	
	4	13	4	16
Имитационный	-6,6	-5,6	-6,3	-4,7
Запись сигнала	-4,5	-4,0	-4,3	-3,0

Таблица 2

ОСШ, при котором достигаются вероятности $P_{D0} = 0,9$ и $P_{F0} = 10^{-5}$, при обнаружении записанных и имитационных ФМС по кодам Баркера и Фрэнка в случае приема смеси ФМС и ЛЧМ-сигнала

Вид сигнала	ОСШ, дБ			
	ФМС по кодам Баркера с разными B_i		ФМС по кодам Фрэнка с разными Φ_i	
	4	13	4	16
Имитационный	-5,5	-5,0	-5,3	-4,0
Запись сигнала	-3,3	-2,5	-3,0	-2,0

Анализ результатов моделирования, представленных в табл. 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы:

1. При равной (близкой) длине кодовой последовательности идентификация ФМС с законом чередования фаз по коду Фрэнка требует обеспечения ОСШ на 0,2...1 дБ больше, чем идентификация ФМС с законом чередования фаз по коду Баркера.

2. Идентификация сигнала при приеме смеси ЛЧМ-сигнала и ФМС требует обеспечения ОСШ на 0,7...1,1 дБ больше, чем при приеме только ФМС.

3. Для идентификации записанных ФМС требуется ОСШ на 1,6...2,5 дБ больше, чем для обнаружения имитационных сигналов. Это связано с внесением шумов дискретизации при оцифровке сигнала осциллографом.

Заключение

Полученные результаты могут использоваться для оценки чувствительности приемной аппаратуры комплекса РТМ. В свою очередь, это позволяет оценить одну из наиболее важных характеристик комплекса — дальность действия.

Отметим, что в условиях сложной сигнальной обстановки на вход приемного устройства комплекса РТМ может поступать смешанный поток сигналов с высокой плотностью следования импульсов. Поэтому решение задачи обнаружения и селекции сигналов различных источников радиоизлучения с перекрывающимися частотно-временными параметрами будет затруднено. Соответственно, в дальнейшие планы авторов входят задачи совершенствования алгоритма обработки сигналов в условиях наложения во времени и изучения характеристик распознавания сигналов.

1. Nikolaev D., Chetiy V., Dudkin V., Davydov V. Determining the location of an object during environmental monitoring in conditions of limited possibilities for the use of satellite positioning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol.578(1). P.012052. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/578/1/012052>
2. Podstrigaev A.S., Davydov R.V., Rud V.Y., Davydov V.V. Features of transmission of intermediate frequency signals over fiber-optical communication system in radar station // Lecture Notes in Computer Science. 2018. Vol.11118. P.624-630. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0_56
3. Аджемов С.С., Косилов И.С., Лобов Е.М. Экспериментальная оценка параметров частотной дисперсии ионосферного канала с помощью широкополосного фазоманипулированного сигнала // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2013. №4. С.199-201.
4. Ипанов Р.Н. Импульсные фазоманипулированные сигналы с нулевой зоной автокорреляции // Радиотехника и электроника. 2018. Т.63. №8. С.823-830. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0033849418080077>
5. Lewis B.L., Kretschmer F.F. A new class of polyphase pulse compression codes and techniques // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1981. Vol. AES-17. №3. P.364-372. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.1981.309063>
6. Калениченко С.П., Сокольников В.А. Обработка радиолокационных сигналов в цифровых фильтрах с подавлением боковых лепестков функции отклика // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2009. №2. С.69-75.
7. Коробейников А.В., Осипов В.С. О бинарных кодах с низким средним уровнем боковых лепестков // Вопро-

- сы радиоэлектроники. 2019. №10. С.52-55. DOI: <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2019-10-52-55>
8. Дятлов А.П., Дятлов П.А., Шостак А.Н. Вскрытие временной структуры пакетных фазоманипулированных сигналов // Журнал радиоэлектроники. 2015. №3. С.1-1.
9. Дятлов А.П., Дятлов П.А., Кульбикаян Б.Х. Радиомониторинг сложных квазипериодических фазоманипулированных сигналов с неизвестной формой // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2006. №2. С.45-49.
10. Дятлов А.П., Дятлов П.А., Шостак А.Н. Автокорреляционный экспресс-анализатор при радиомониторинге фазоманипулированных сигналов // Специальная техника. 2015. №5. С.51-60.
11. Nhan N.T., Podstrigaev A.S., Likhachev V.P. et al. Study of detection characteristics in recognition of simple radio pulses and signals with LFM and PSK in the autocorrelation receiver // Lecture Notes in Computer Science. 2020. Vol.12525. P.415-423. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65726-0_37
12. Нгуен Ч.Н., Подстригаев А.С., Леонов И.Е. Математическая модель алгоритма распознавания типа модуляции сигнала в автокорреляционном приемнике средств радиотехнического мониторинга [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2020. №113. С.18. URL: <http://trudymai.ru/> (дата обращения: 14.11.2021). DOI: <https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-09>
13. Патент №2716017 РФ, МПК G01S 13/32. Способ определения видов радиолокационных сигналов в автокорреляционном приемнике / Ч.Н.Нгуен, В.П.Лихачев, А.А.Веселков. Заявл. 21.08.2019. Опубл. 05.03.2020. Бюл. №7. С.10.
14. Berliant M. A characterization of the demand for land // Journal of Economic Theory. 1984. Vol.33(2). P.289-300. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-0531\(84\)90091-7](https://doi.org/10.1016/0022-0531(84)90091-7)
15. Jarabo-Amores M.P. et al. Study of two error functions to approximate the Neyman-Pearson detector using supervised learning machines // IEEE Transactions on Signal Processing. 2009. Vol.57(11). P.4175-4181. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSP.2009.2025077>

References

1. Nikolaev D., Chetiy V., Dudkin V., Davydov V. Determining the location of an object during environmental monitoring in conditions of limited possibilities for the use of satellite positioning. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, vol. 578, no. 1, pp. 012052. doi: 10.1088/1755-1315/578/1/012052
2. Podstrigaev A.S., Davydov R.V., Rud V.Y., Davydov V.V. Features of Transmission of Intermediate Frequency Signals over Fiber-Optical Communication System in Radar Station. NEW2AN 2018. Lecture Notes in Computer Science, 2018, vol. 11118, pp. 624-630. doi:10.1007/978-3-030-01168-0_56
3. Adzhemov S.S., Kosilov I.S., Lobov Y.E.M. Eksperimental'naya otsenka parametrov chastotnoy dispersii ionosfernogo kanala s pomoshch'yu shirokopolosnogo fazomanipulirovannogo signala [Experimental assessment of the parameters of the frequency dispersion of the ionospheric channel using a broadband phase-shift keyed signal]. Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov – Systems of synchronization, formation and processing of signals, 2013, no. 4, pp. 199-201.
4. Ipanov R.N. Impul'snyye fazomanipulirovannyye signaly s nulevoy zonoy avtokorrelyatsii [Pulse phase-shift keyed signals with a zero autocorrelation zone]. Radiotekhnika i elektronika – Radio engineering and electronics, 2018, no. 8. pp. 823-830. doi:10.1134/S0033849418080077
5. Lewis B.L., Kretschmer F.F. A new class of polyphase pulse compression codes and techniques. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1981, no. 3, pp. 364-372. doi:10.1109/TAES.1981.309063
6. Kalenichenko S.P., Sokol'nikov V.A. Obrabotka radiolokatsionnykh signalov v tsifrovyykh fil'trakh s podavleniyem bokovykh lepestkov funktsii otklika [Processing of radar signals in digital filters with suppression of side lobes of the response function]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika – Radioelectronics and Communications Systems, 2009, no. 2. pp. 69-75.

7. Korobeynikov A.V., Osipov V.S. O binarnykh kodakh s nizkim srednim urovnem bokovykh lepestkov [On binary codes with a low average level of side lobes]. *Voprosy radioelektroniki – Questions of radio electronics*, 2019, no. 10, pp. 52-55. doi:10.21778/2218-5453-2019-10-52-55
8. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A., Shostak A.N. Vskrytiye vremennoy struktury paketnykh fazomanipulirovannykh signalov [Opening of the temporal structure of phase-shift keyed signals]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*, 2015, no. 3. pp. 1-1.
9. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A., Kulbikayan B.KH. Radiomonitoring slozhnykh kvaziperiodicheskikh fazomanipulirovannykh signalov s neizvestnoy formoy [Radio monitoring of complex quasi-periodic phase-shift keyed signals with an unknown shape]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Series: Natural Sciences*, 2006, no. 2. pp. 45-49.
10. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A., Shostak A.N. Avtokorrelyatsionnyy ekspres-analizator pri radiomonitoringe fazomanipulirovannykh signalov [Autocorrelation express analyzer for radio monitoring of phase-shift keyed signals]. *Spetsial'naya tekhnika*, 2015, no. 5. pp. 51-60.
11. Nhan N.T., Podstrigaev A.S., Likhachev V.P., Veselkov A.A., Davydov V.V., Myazin N.S., Makeev S.S. Study of Detection Characteristics in Recognition of Simple Radio Pulses and Signals with LFM and PSK in the Autocorrelation Receiver. *Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12525, pp. 415-423. doi: 10.1007/978-3-030-65726-0_37
12. Nguyen T.N., Podstrigayev A.S., Leonov I.E. Matematicheskaya model' algoritma raspoznavaniya tipa modulyatsii signala v avtokorrelyatsionnom priyemnike sredstv radiotekhnicheskogo monitoring. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. p. 18. doi:10.34759/trd-2020-113-09
13. Nguen T.N., Likhachev V.P., Veselkov A.A. Sposob opredeleniya vidov radiolokatsionnykh signalov v avtokorrelyatsionnom priyemnike [Method of determining the types of radar signals in an autocorrelation receiver]. *Patent RF*, no. 2019126538, 2020.
14. Berliant M. A characterization of the demand for land. *Journal of Economic Theory*, 1984, vol. 33, no. 2, pp. 289-300. doi:10.1016/0022-0531(84)90091-7
15. Jarabo-Amores M.P. et al. Study of two error functions to approximate the Neyman–Pearson detector using supervised learning machines. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, vol. 57, no. 11, pp. 4175-4181. doi: 10.1109/TSP.2009.2025077