

УДК 621.396.62

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ ТИПА СИГНАЛА В АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОМ ПРИЕМНИКЕ

Нгуен Чонг Нхан, аспирант кафедры РЭС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия;

orcid.org/0000-0001-6626-893X, e-mail: 10th20th30th@gmail.com

А. С. Подстригаев, к.т.н., доцент, доцент кафедры РЭС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия;

orcid.org/0000-0003-4144-222X, e-mail: ap0d@yandex.ru

Рассматривается задача исследования эффективности работы автокорреляционного приемника (АКП) средств радиотехнического мониторинга (РТМ) на реальных сигналах. Целью работы является проведение экспериментальной апробации математической модели алгоритма распознавания типа сигнала (простого, линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) и фазокодоманипулированного (ФКМ)) в АКП. Выполнено сравнение характеристик обнаружения имитационных и реальных сигналов в АКП средств РТМ. Экспериментальная проверка математической модели алгоритма распознавания типа сигнала в АКП показала следующее: математическая модель позволяет эффективно распознавать тип сигнала при отношении сигнал-шум (ОСШ) более -2 дБ; при равных условиях обработки ЛЧМ-сигнал обладает наибольшей вероятностью правильного распознавания; идентификация реальных простых, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов требует ОСШ на $0,2...2$ дБ больше, чем идентификация аналогичных имитационных сигналов. Результаты исследования могут быть использованы при разработке средств РТМ.

Ключевые слова: простой сигнал, ЛЧМ-сигнал, ФКМ-сигнал, распознавание типа сигнала, характеристики обнаружения, автокорреляционный приемник, математическая модель, радиотехнический мониторинг.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-46-52

Введение

В средствах радиотехнического мониторинга (РТМ) для определения принадлежности к конкретному типу, экземпляру и режиму работы источника радиоизлучения (ИРИ) в условиях отсутствия априорных данных о сигналах можно использовать автокорреляционный приемник (АКП) [1-7]. В работах [6, 7] разработанный АКП позволяет распознавать тип сигнала для приема простых, линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) и фазокодоманипулированных (ФКМ) сигналов. При оценке характеристик АКП эффективность распознавания типа сигналов определяется качеством обработки реальных сигналов. Поэтому исследование эффективности работы АКП на реальных сигналах является актуальной задачей.

Теоретическая часть

В состав предлагаемого АКП [6, 7] входят: полосовой фильтр высоких частот (ПФВЧ) с полосой пропускания $\Delta f_{\text{вч}}$; линии задержки ЛЗ1 и ЛЗ2 с длительностями задержки $\tau_{\text{з1}}$ и $\tau_{\text{з2}}$ соответственно; множитель частоты; перемножители; фильтры низких частот ФНЧ1 и ФНЧ2 с одинаковой полосой пропускания $\Delta f_{\text{нч}}$; полосовые фильтры на разностных частотах ПФ1 и ПФ2 с полосами пропускания $\Delta f_{\text{раз1}}$ и $\Delta f_{\text{раз2}}$ соответственно; устройства получения спектра УПС1 – УПС4; пороговые устройства ПУ1 – ПУ4; логическое устройство (рисунок 1).

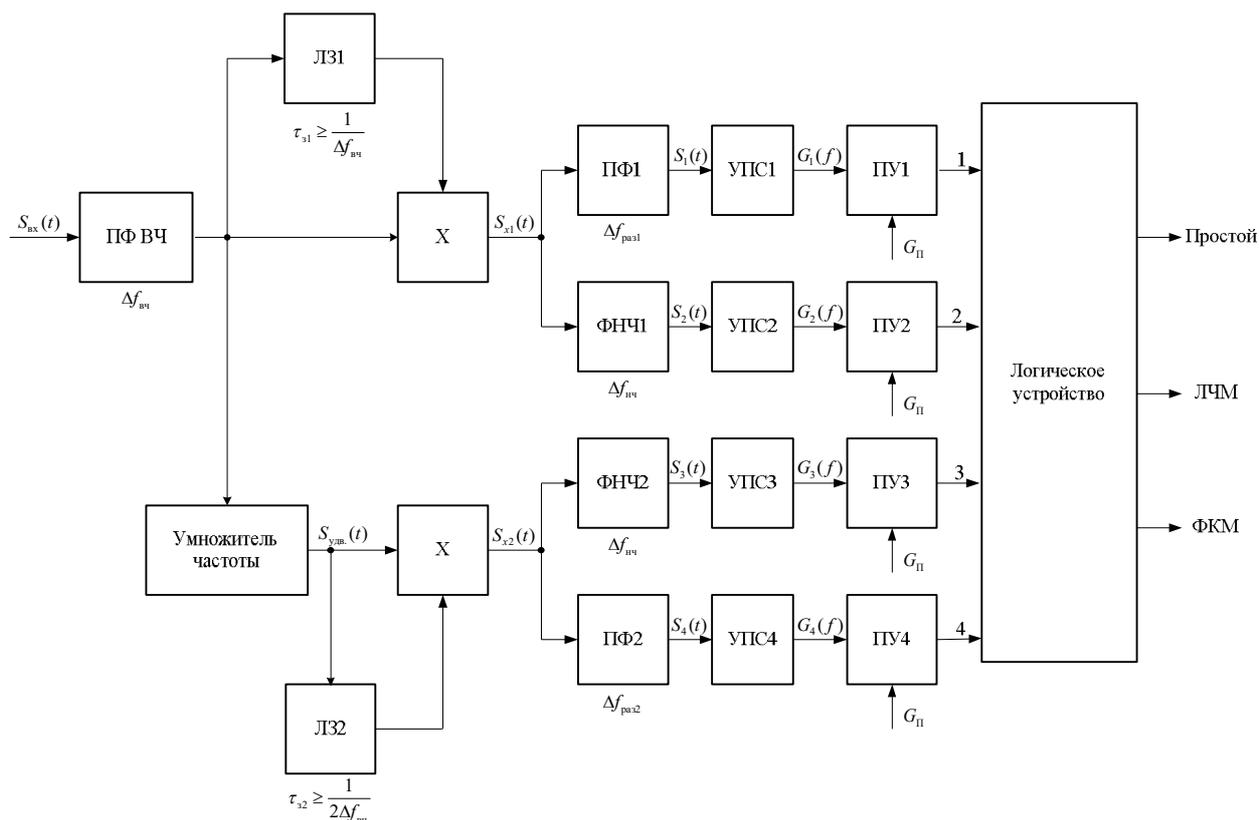


Рисунок 1 – Структурная схема автокорреляционного приемника
Figure 1 – Block diagram of autocorrelation receiver

Принцип действия АКП, представленного на рисунке 1, подробно описан в работе [6]. Он основан на том, что после перемножения принятого сигнала и его задержанной копии выделяют высокочастотную и низкочастотную составляющие. Затем получают спектры этих составляющих. То же самое выполняют с сигналом на удвоенной частоте. Для каждого из четырех полученных спектров (на низкочастотных и высокочастотных составляющих после автокорреляции сигнала на принятой и удвоенной частотах) выполняют сравнение с пороговыми значениями. На основе результатов сравнения определяется тип сигнала.

Математическая модель алгоритма распознавания типа сигнала в АКП (рисунок 1) для приема простых, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов представлена в работе [7]. Эта модель и будет рассмотрена в настоящей статье.

Экспериментальные исследования

Для экспериментальной апробации математической модели алгоритма распознавания типа сигнала проведен эксперимент с помощью лабораторного стенда, структурная схема которого представлена на рисунке 2.

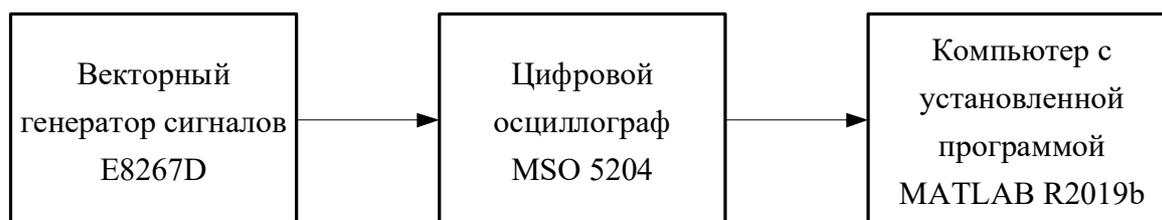


Рисунок 2 – Структурная схема лабораторного стенда формирования и обработки сигналов с различной модуляцией
Figure 2 – Block diagram of laboratory stand to form and process signals with various modulation

Эксперимент заключался в следующем:

а) простые, ЛЧМ- и ФКМ-сигналы с несущей частотой 300 МГц формировались векторным генератором сигналов E8267D (частота 300 МГц соответствует промежуточной частоте реального АКП);

б) с помощью цифрового осциллографа MSO 5204 (с 8-битным аналого-цифровым преобразователем и частотой дискретизации 5 ГГц) выполнялась оцифровка сгенерированных сигналов и их запись в память;

в) сигналы с осциллографа передавались в компьютер для определения вероятности правильного распознавания при помощи разработанной математической модели [7] в среде MATLAB.

Записанные одиночные простой (ПИ), ЛЧМ- и ФКМ-сигналы имели следующие параметры:

– длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 40$ мкс;

– одинаковые амплитуды $U = 0,1$ В и время анализа $T_{\text{а}} = 120$ мкс;

– для ЛЧМ-сигнала ширина спектра $\Delta f_{\text{с}} = 75$ МГц (база сигнала равна 3000);

– для ФКМ-сигнала закон чередования фаз по коду Баркера с 13 дискретами;

– средняя мощность за время анализа при единичном сопротивлении $P_{\text{ср}} = U^2 \tau_{\text{и}} / T_{\text{а}} = 3,33$ мВт.

Для обработки записанных сигналов с различной модуляцией задавались следующие исходные данные в модели алгоритма:

– длительности задержки $\tau_{\text{з1}} = 200$ нс, $\tau_{\text{з2}} = 100$ нс;

– полосы пропускания фильтров разных типов: $\Delta f_{\text{вч}} = 500$ МГц, $\Delta f_{\text{нч}} = 100$ кГц, $\Delta f_{\text{раз1}} = \Delta f_{\text{раз2}} = 10$ МГц;

– значение отношения сигнал/шум (ОСШ) устанавливалось добавлением к сигналу на входе АКП белого гауссовского шума с изменяемой дисперсией;

– пороговые значения энергетического обнаружения в АКП рассчитывались по критерию Неймана – Пирсона [7-11] для вероятности правильного обнаружения $P_{\text{D}} = 0,9$ и вероятности ложной тревоги $P_{\text{F}} = 10^{-5}$.

В результате моделирования процесса обнаружения сигналов вероятность правильного обнаружения-распознавания P_{D0} определялась как $P_{\text{D0}} = N_1 / N$, где N_1 – число реализаций с обнаружением и правильным распознаванием сигнала, N – общее число реализаций при фиксированном значении дисперсии шума.

Кроме того, с вышеуказанными исходными данными осуществлялась обработка имитационных сигналов, которые были непосредственно сформированы в среде MATLAB.

Для выбора порога обнаружения выполнена оценка вероятности ложной тревоги (в отсутствие сигнала) по 10^7 численных экспериментов.

Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

Из рисунка 3 следует, что при распознавании имитационных и реальных сигналов с различной модуляцией для фиксированного значения вероятности P_{F0} можно оценить значения ОСШ при достижении заданной вероятности P_{D0} (таблица 1).

Полученные результаты моделирования, представленные на рисунке 3 и в таблице 1, показывают следующее:

1. Идентификация имитационного (записи) ЛЧМ-сигнала требует обеспечения ОСШ на 4,8 (5,9) дБ меньше, чем идентификация простого сигнала, и на 1,8 (3,6) дБ меньше, чем идентификация ФКМ-сигнала.

2. Для записанных сигналов при ОСШ более –2 дБ обеспечивается гарантированное распознавание типа сигнала (простого, с ЛЧМ и ФКМ).

3. Для идентификации записанного простого сигнала требуется ОСШ на 1,3 дБ больше, чем для идентификации имитационного простого сигнала. Для идентификации записанного ЛЧМ-сигнала требуется ОСШ на 0,2 дБ больше, чем для идентификации имитационного ЛЧМ-сигнала. Для идентификации записанного ФКМ-сигнала требуется ОСШ на 2 дБ больше, чем для идентификации имитационного ФКМ-сигнала. Это может объясняться внесением шумов квантования сигнала в осциллографе.

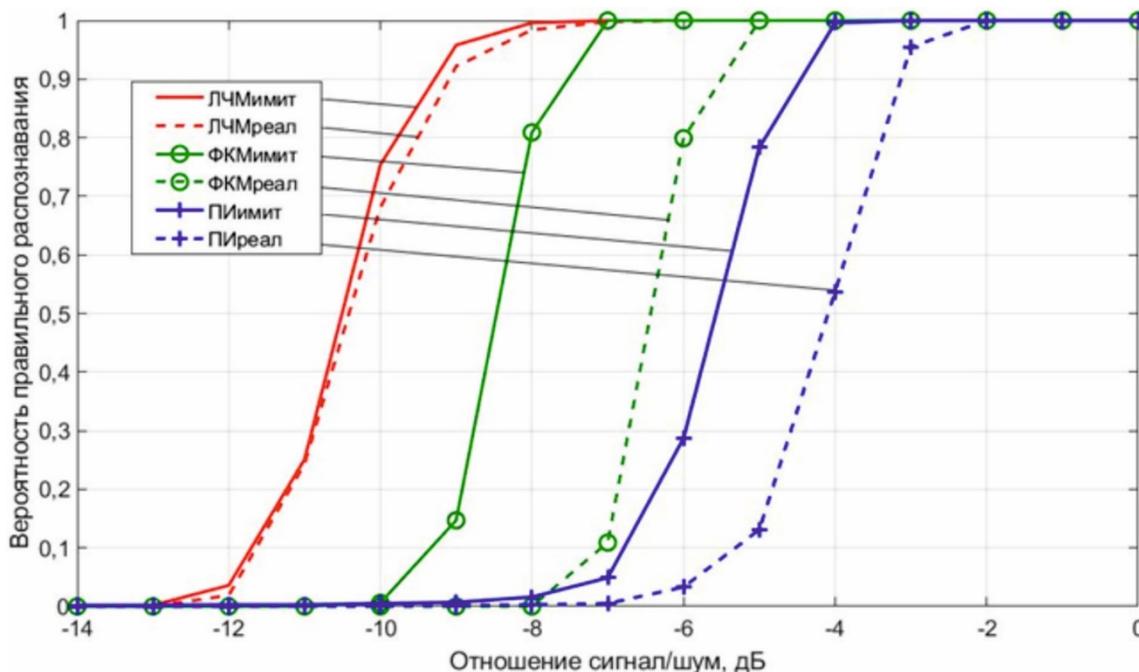


Рисунок 3 – Характеристики распознавания имитационных и реальных сигналов с различной модуляцией в автокорреляционном приемнике
Figure 3 – Recognition characteristics of simulated and real signals with different modulation in autocorrelation receiver

Таблица 1 – ОСШ, при котором достигается вероятность $P_{D0} = 0,9$ при обнаружении-распознавании имитационных и реальных сигналов разных типов

Table 1 – SNR, at which probability $P_{D0} = 0,9$ is reached when detecting-recognition of simulated and real signals of different types

Тип модуляции сигнала	ОСШ, дБ	
	Имитационный сигнал	Запись сигнала
Простой сигнал	-4,5	-3,2
ЛЧМ-сигнал	-9,3	-9,1
ФКМ-сигнал	-7,5	-5,5

Заключение

Экспериментальная проверка математической модели [7] алгоритма распознавания типа сигнала в АКП показала, что при равных условиях наблюдения ЛЧМ-сигнал обладает наибольшей вероятностью правильного распознавания по сравнению с простым и ФКМ-сигналами. Кроме того, разработанная математическая модель может эффективно распознавать сигналы при низком ОСШ (более -2 дБ). Это позволяет рекомендовать разработанный АКП [6, 7] для распознавания сигналов современных ИРИ в средствах РТМ.

Следуя методикам, предложенным в [12, 13], было показано, что вероятность перекрытия импульсов во времени в сложной сигнальной среде может быть очень высокой. Например, при работе даже 20 импульсных излучателей со скважностью сигнала 20 вероятность пере-

крытия импульсов во времени уже достигает 27 % [14, 15]. Перекрытия ухудшают качество обработки. Поэтому в дальнейшие планы авторов входит совершенствование алгоритма обработки сигналов в АКП в условиях перекрытия, а также исследование характеристик распознавания сигналов в этих условиях.

Библиографический список

1. **Leus G., Van der Veen A.** A weighted autocorrelation receiver for transmitted reference ultra wide-band communications // IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. 2005, pp. 965-969.
2. **Romme J., Witrisal K.** Oversampled weighted autocorrelation receivers for transmitted-reference UWB systems // IEEE 61st Vehicular Technology Conference. 2005, vol. 2. pp. 1375-1380.
3. **Bagga S., Zhang L., Serdijin W. A., Long J. R., Busking E. B.** A quantized analog delay for an ir-UWB quadrature downconversion autocorrelation receiver // IEEE International Conference on Ultra-Wideband. 2005, pp. 328-332.
4. **Dang Q. H., Van der Veen A.** A Decorrelating Multiuser Receiver for Transmit-Reference UWB Systems // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2007, vol. 1, no. 3, pp. 431-442.
5. **Stefan M., Frederik T.** Joint ambient noise autocorrelation and receiver function analysis of the Mo-ho // Geophysical Journal International. 2021. Vol. 225. Pp. 1920-1934.
6. **Лихачев В. П., Веселков А. А., Нгуен Ч. Н.** Пат. 2683791 РФ, МПК G01S 7/40 Способ определения видов радиолокационных сигналов в автокорреляционном приемнике. № 2018112916; Завл. 09.04.2018; Оpubл. 02.04.2019. Бюл. № 10. С. 10.
7. **Нгуен Ч. Н., Подстригаев А. С., Леонов И. Е.** Математическая модель алгоритма распознавания типа модуляции сигнала в автокорреляционном приемнике средств радиотехнического мониторинга // Труды МАИ. 2020. № 113. DOI: 10.34759/trd-2020-113-09.
8. **Blum R. S.** Necessary conditions for optimum distributed sensor detectors under the Neyman-Pearson criterion // IEEE Transactions on Information Theory. 1996, vol. 42, no. 3, pp. 990-994.
9. **Conte E., De Maio A., Galdi C.** Signal detection in compound-Gaussian noise: Neyman-Pearson and CFAR detectors // IEEE Transactions on Signal Processing. 2000, vol. 48, No. 2, pp. 419-428.
10. **Yan Q., Blum R. S.** Distributed signal detection under the Neyman-Pearson criterion // IEEE Transactions on Information Theory. 2001, vol. 47, no. 4. pp. 1368-1377.
11. **Sung Y., Tong L., Poor H. V.** Neyman-pearson detection of gauss-Markov signals in noise: closed-form error exponent and properties // IEEE Transactions on Information Theory. 2006, vol. 52, no. 4, pp. 1354-1365.
12. **Hoang T., Kirichek R., Paramonov A., Koucheryavy A.** Influence of intentional electromagnetic interference on the functioning of the terrestrial segment of flying ubiquitous sensor network // Information Science and Applications (ICISA). 2016, vol. 376, pp. 1249-1259.
13. **Podstrigaev A. S., Smolyakov A. V., Davydov V. V., Myazin N. S., Grebenikova N. M., Davydov R. V.** New Method for Determining the Probability of Signals Overlapping for the Estimation of the Stability of the Radio Monitoring Systems in a Complex Signal Environment // Lecture Notes in Computer Science. 2019, vol. 11660, pp. 525-533.
14. **Albaker B. M., Rahim N. A.** Signal Acquisition and Parameter Estimation of Radio Frequency Pulse Radar Using Novel Method // IETE Journal of Research. 2009, vol. 55, no. 3, pp.128-134.
15. **Podstrigaev A. S., Smolyakov A. V., Maslov I. V.** Probability of Pulse Overlap as a Quantitative Indicator of Signal Environment Complexity // Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, no. 5, pp. 37-45.

UDC 621.396.62

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF SIGNAL TYPE RECOGNIZING ALGORITHM IN THE AUTOCORRELATION RECEIVER

Nguyen Trong Nhan, post-graduate student, department of Radio-Electronic Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia;

orcid.org/0000-0001-6626-893X, e-mail: 10th20th30th@gmail.com

A. S. Podstrigaev, Ph.D. (Tech.), associate Professor, Department of Radio-Electronic Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia;

orcid.org/0000-0003-4144-222X, e-mail: ap0d@yandex.ru

We consider the task of studying the efficiency of autocorrelation receiver (ACR) for RF spectrum monitoring on real signals. The work aims to conduct experimental testing of the mathematical model of signal type recognition algorithm (simple, chirp and phase-shift keyed (PSK) signals) in ACR. Comparison of detection characteristics for imitated and real signals in the ACR of RF spectrum monitoring means is carried out. Experimental verification of the mathematical model for signal type recognition algorithm in the ACR showed the following: a mathematical model makes it possible to effectively identify the type of signal when SNR is more than -2 dB; under identical processing conditions, a chirp signal has the highest probability of correct recognition; identification of real simple, chirp and PSK signals requires SNR of $0.2...2$ dB more than the identification of similar simulated signals. The research results can be used to develop RF spectrum monitoring means.

Key words: simple signals, chirp signals, PSK signals, signal type recognition, detection characteristics, autocorrelation receiver, mathematical model, RF spectrum monitoring.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-46-52

References

1. **Leus G., Van der Veen A.** A weighted autocorrelation receiver for transmitted reference ultra wide-band communications. *IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*. 2005, pp. 965-969.
2. **Romme J., Witrisal K.** Oversampled weighted autocorrelation receivers for transmitted-reference UWB systems. *IEEE 61st Vehicular Technology Conference*. 2005, vol. 2, pp. 1375-1380.
3. **Bagga S., Zhang L., Serdijin W. A., Long J. R., Busking E. B.** A quantized analog delay for an ir-UWB quadrature downconversion autocorrelation receiver. *IEEE International Conference on Ultra-Wideband*. 2005, pp. 328-332.
4. **Dang Q. H., Van der Veen A.** A Decorrelating Multiuser Receiver for Transmit-Reference UWB Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2007, vol. 1, no. 3, pp. 431-442.
5. **Stefan M., Frederik T.** Joint ambient noise autocorrelation and receiver function analysis of the Mo-ho. *Geophysical Journal International*. 2021, vol. 225, pp. 1920-1934.
6. **Likhachev V. P., Veselkov A. A., Nguen T. N.** Sposob opredeleniya vidov radiolokatsionnykh signalov v avtokorrelyatsionnom priyemnike [Method of determining the types of radar signals in an autocorrelation receiver]. Patent RF, no. 2683791, 2019. (in Russian).
7. **Nguyen T. N., Podstrigaev A. S., Leonov I. E.** Matematicheskaja model' algoritma raspoznavanija tipa moduljacii signala v avtokorreljacionnom priyemnike sredstv radiotehničeskogo monitoring [Mathematical model of signal modulation type recognizing algorithm in the autocorrelation receiver for radio engineering monitoring means]. *Trudy MAI*. 2020, no. 113. DOI: 10.34759/trd-2020-113-09. (in Russian).
8. **Blum R. S.** Necessary conditions for optimum distributed sensor detectors under the Neyman-Pearson criterion. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1996, vol. 42, no. 3, pp. 990-994.
9. **Conte E., De Maio A., Galdi C.** Signal detection in compound-Gaussian noise: Neyman-Pearson and CFAR detectors. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2000, vol. 48, no. 2, pp. 419-428.

10. **Yan Q., Blum R. S.** Distributed signal detection under the Neyman-Pearson criterion. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2001, vol. 47, no. 4, pp. 1368-1377.
11. **Sung Y., Tong L., Poor H. V.** Neyman-pearson detection of gauss-Markov signals in noise: closed-form error exponent and properties. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2006, vol. 52, no. 4, pp. 1354-1365.
12. **Hoang T., Kirichek R., Paramonov A., Koucheryavy A.** Influence of intentional electromagnetic interference on the functioning of the terrestrial segment of flying ubiquitous sensor network. *Information Science and Applications (ICISA)*. 2016, vol. 376, pp. 1249-1259.
13. **Podstrigaev A. S., Smolyakov A. V., Davydov V. V., Myazin N. S., Grebenikova N. M., Davydov R. V.** New Method for Determining the Probability of Signals Overlapping for the Estimation of the Stability of the Radio Monitoring Systems in a Complex Signal Environment. *Lecture Notes in Computer Science*. 2019, vol. 11660, pp. 525-533.
14. **Albaker B. M., Rahim N. A.** Signal Acquisition and Parameter Estimation of Radio Frequency Pulse Radar Using Novel Method. *IETE Journal of Research*. 2009, vol. 55, no. 3, pp.128-134.
15. **Podstrigaev A. S., Smolyakov A. V., Maslov I. V.** Probability of Pulse Overlap as a Quantitative Indicator of Signal Environment Complexity. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2020, no. 5, pp. 37-45