

17. Zhenzhen Bao and Jian Guo and San Ling and Yu Sasaki. SoK: Peigen – a Platform for Evaluation, Implementation, and Generation of S-boxes, *Cryptology ePrint Archive, Paper 2019/209*, 2019.
18. Adrián Ranea and Vincent Rijmen. Characteristic Automated Search of Cryptographic Algorithms for Distinguishing Attacks (CASCADA), *Cryptology ePrint Archive, Paper 2022/513*, 2022. DOI: 10.1049/ise2.12077. <https://eprint.iacr.org/2022/513>
19. Frederik Armknecht, Claude Carlet, Philippe Gaborit, Simon Künzli, Willi Meier, and Olivier Ruatta. Efficient computation of algebraic immunity for algebraic and fast algebraic attacks, *In Proceedings of the 24th annual international conference on The Theory and Applications of Cryptographic Techniques (EUROCRYPT'06)*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 147-164. Available at: https://doi.org/10.1007/11761679_10
20. Eichlseder M. et al. An Algebraic Attack on Ciphers with Low-Degree Round Functions: Application to Full MiMC. In: Moriai, S., Wang, H. (eds), *Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2020. ASIACRYPT 2020: Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 12491. Springer, Cham, 2020. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-64837-4_16.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Поликарпов Сергей Витальевич – Южный федеральный университет; e-mail: polikarpovsv@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89085159762; к.т.н.

Прудников Вадим Александрович – e-mail: pruvad@yandex.ru; тел.: 89198961427.

Румянцев Константин Евгеньевич – e-mail: rke2004@mail.ru; тел.: 89281827209; д.т.н.; профессор.

Polikarpov Sergey Vital'evich – Southern Federal University; e-mail: polikarpovsv@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79085159762; cand. of eng. sc.

Prudnikov Vadim Alexandrovich – e-mail: pruvad@yandex.ru; phone: +79198961427.

Rumyantsev Konstantin Evgen'evich – e-mail: rke2004@mail.ru; phone: +79281827209; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.3:519.2

DOI 10.18522/2311-3103-2022-6-162-171

В.П. Федосов, А.И. Приходченко

РАНГОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ДАТЧИКА ВИБРАЦИЙ ДЛЯ СИГНАЛИЗАЦИИ ПРИВОДНЕНИЯ САМОЛЕТА-АМФИБИИ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Цель работы – использование ранговой модели обработки сигналов для сигнализации приводнения самолета-амфибии. Ранговая обработка относится к непараметрическим методам обнаружения сигнала на фоне помех. Непараметрические методы используются, если неизвестен функциональный вид распределения входных данных и указаны только самые общие различия между наличием и отсутствием сигнала. Практически все непараметрические обнаружители содержат в качестве составного элемента устройства, осуществляющие некоторое инвариантное преобразование S массива выборочных значений X . В результате этого преобразования образуется новый массив $Z = SX$, распределение элементов которого при отсутствии сигнала точно известно. Преобразование S , которое выбирается эвристически, позволяет свести задачу обнаружения сигнала на фоне помех с неизвестным распределением к задаче проверки простой гипотезы относительно распределения массива Z . Задачи исследования: 1) предварительная цифровая фильтрация записей полетов самолета-амфибии для применения ранговой обработки; 2) проведение эксперимента для получения характеристик рангового обнаружителя, используемого для сигнализации приводнения самолета-амфибии; 3) анализ полученных результатов. Предложена модель обработки сигналов датчика вибраций для сигнализации приводнения самолета-

амфибии. Модель состоит из полосового фильтра (ПФ), вычислителя СКО, делителя, рангового обнаружителя и формирователя опорной выборки. Ранговый обнаружитель позволяет свести задачу обнаружения сигнала датчика вибраций на фоне помех к задаче проверки простой гипотезы относительно распределения рангов. Для принятия решения о наличии сигнала приводнения применяется непараметрический критерий согласия Ватсона. Предложенная модель обработки обеспечивает следующие параметры системы сигнализации приводнения: 1) нечувствительность к изменяющимся характеристикам сигналов и помех, 2) алгоритм принятия решения гарантирует высокое качество обнаружения в условиях существенной априорной неопределенности. Результаты проведенных исследований показывают: 1) распределение рангов в ситуации отсутствия сигнала всегда аппроксимируется равномерным законом распределения. В ситуациях, когда в смеси присутствует сигнал, равномерное распределение разрушается, и наличие сигнала определяется установленным порогом, 2) датчик на основе ранговых критериев обеспечивает высокое качество обнаружения сигнала приводнения самолета-амфибии. Предлагаемый подход к решению задачи обнаружения может найти место во многих прикладных задачах, где имеет место быть априорная неопределенность. Например, в радиолокации, гидролокации, связи, медицине и других областях науки и техники.

Самолет-амфибия; датчик вибраций; ранговые критерии; априорная неопределенность; критерии согласия; равномерное распределение.

V.P. Fedosov, A.I. Prikhodchenko

RANK PROCESSING OF VIBRATION SENSOR SIGNALS FOR SIGNALING THE LANDING OF AN AMPHIBIOUS AIRCRAFT UNDER CONDITIONS OF A PRIORI UNCERTAINTY

The purpose of the work is to use a rank model of signal processing for signaling the landing of an amphibious aircraft. Rank processing refers to nonparametric methods of detecting a signal against a background of interference. Nonparametric methods are used if the functional type of the input data distribution is unknown and only the most general differences between the presence and absence of a signal are indicated. Almost all nonparametric detectors contain devices as a component element that perform some invariant transformation of the S array of sample values of X . As a result of this transformation, a new array $Z = SX$ is formed, the distribution of elements of which is precisely known in the absence of a signal. The transformation S , which is chosen heuristically, allows us to reduce the problem of detecting a signal against a background of interference with an unknown distribution to the problem of testing a simple hypothesis regarding the distribution of the array Z . Research objectives: 1) preliminary digital filtering of amphibious aircraft flight records for the use of rank processing; 2) conducting an experiment to obtain the characteristics of a rank detector used to signal the landing of an amphibious aircraft; 3) analysis of the results obtained. A model of signal processing of a vibration sensor for signaling the landing of an amphibious aircraft is proposed. The model consists of a bandpass filter (PF), a COEX calculator, a divider, a rank detector and a reference sample generator. The rank detector allows you to reduce the task of detecting the vibration sensor signal against the background of interference to the task of testing a simple hypothesis regarding the distribution of ranks. The nonparametric Watson agreement criterion is used to make a decision on the presence of a drive signal. The proposed processing model provides the following parameters of the flood alarm system: 1) insensitivity to changing characteristics of signals and interference, 2) the decision-making algorithm guarantees high quality of detection in conditions of significant a priori uncertainty. The results of the conducted studies show: 1) the distribution of ranks in the absence of a signal is always approximated by a uniform distribution law. In situations where a signal is present in the mixture, the uniform distribution is destroyed, and the presence of a signal is determined by a set threshold, 2) the sensor based on rank criteria provides high quality detection of the amphibious aircraft landing signal. The proposed approach to solving the detection problem can find a place in many applied problems where there is a priori uncertainty. For example, in radar, sonar, communications, medicine and other fields of science and technology.

Amphibious aircraft; vibration sensor; rank criteria; a priori uncertainty; criteria of agreement; uniform distribution.

Введение. Вопросы повышения безопасности при эксплуатации авиации ставятся на первое место. В частности, при эксплуатации самолетов-амфибий, актуальной задачей является надежное определение момента касания водной поверхности при посадке на воду и отрыва от водной поверхности при взлете с воды.

Научно-конструкторским бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета (НКБ ЦОС ЮФУ) был разработан и запатентован комплекс автоматической сигнализации приводнения (КАСП) [3], который решал задачу автоматического определения среды (воздух/вода) для лодки самолета-амфибии.

Одним из устройств, входящего в состав КАСП является датчик вибраций. Его задачей является обнаружение вибраций корпуса лодки самолета-амфибии при глиссировании по водной поверхности на большой скорости. Обнаружение вибраций является устойчивым признаком касания водной поверхности при посадке, а прекращение вибраций – надежный признак отрыва от водной поверхности.

Решение выше поставленной задачи приводит к необходимости обнаружения случайного процесса (сигнала датчика вибраций) на фоне случайных помех. В КАСП используются алгоритмы обработки сигналов, полученные эвристически. Представляет интерес поиск оптимального в статистическом смысле алгоритма обработки сигналов датчика вибраций. В [1] и [2] был найден и обоснован такой оптимальный алгоритм обработки.

Ранговая обработка относится к непараметрическим методам обнаружения сигнала на фоне помех. Обработка статистических данных при использовании ранговых критериев проводится в двух этапах: 1) инвариантное преобразование S входной выборки X , после которого распределение выборки $Z = S(X)$ уже известно в отсутствие сигнала, 2) формирование алгоритма принятия решений, по которому определяется наличие или отсутствие сигнала во входной выборке X .

Далее приведены необходимые теоретические сведения о ранговых критериях. Приведем определение рангов.

Рангом i -го элемента x_i массива выборочных значений X является порядковый номер R_i этого элемента в вариационном ряду $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{(R_i)} \leq \dots \leq x_n$, где n – число элементов выборки. Тогда, вычисление рангов проводится по формуле (1) [4]:

$$R_i = \sum_{k=1}^n \operatorname{sgn}(x_i - x_k). \quad (1)$$

Так как совокупность рангов $\{R_1, \dots, R_n\}$ есть не что иное как перестановка целых чисел от 1 до n , то из статистики известно, что все такие перестановки равновероятны. Поэтому совместное распределение рангов, вычисленных по (1), будет равномерным [3] и не зависит от распределения исходной выборки X :

$$p(R_1, \dots, R_n) = \frac{1}{n!}. \quad (2)$$

Для обнаружения присутствия сигнала во входной выборке X , необходимо проводить вычисление рангов R_i по опорной выборке $Y: \{y_1, \dots, y_m\}$, которая представляет собой чистую помеху. Тогда выражение (1) для вычисления рангов примет вид:

$$R_i = \sum_{k=1}^m \operatorname{sgn}(x_i - y_k). \quad (3)$$

Если входная выборка X отличается от опорной выборки Y , то равномерный закон распределения рангов нарушается, что говорит о наличии сигнала во входной выборке X . Для обнаружения сигнала используется непараметрический крите-

рий согласия Ватсона для проверки равномерного распределения [6–12]. Ранговая обработка дает возможность решения задач, где требуется обнаружение сигнала в условиях непараметрической априорной неопределенности, когда неизвестны ни параметры, ни вид плотностей вероятности сигналов и помех.

1. Постановка задачи. Рассматривается непараметрическая задача обнаружения сигнала $s(t)$ датчика вибраций на фоне аддитивной, стационарной и однородной помехи $y(t)$. Входной процесс $x(t) = s(t) + y(t)$ представлен массивом выборочных значений $X: \{x_1, \dots, x_n\}$. Входные данные в условиях чистой помехи, представлены в виде массива $Y: \{y_1, \dots, y_m\}$.

Задача состоит в применении ранговой модели обработки к сигналам датчика вибраций с целью сигнализации приводнения самолета-амфибии. Зададим следующие уровни вероятности ложной тревоги: $P_{лт} = 10^{-3}, 10^{-5}, 10^{-7}$.

Для упрощения исходных данных рассматривается бинарная задача: 1-ый класс сигналов $s(t)$ – сигналы с датчика вибраций в режиме приводнения (посадки на воду), взлета с воды и забора воды; 2-ой класс сигналов $y(t)$ – все остальные режимы полетов самолета-амфибии (полет, сброс воды и т.д.).

2. Проведение исследований по обнаружению сигнала датчика вибраций с помощью предложенной модели обработки сигналов на основе ранговых критериев. Для синтеза опорной выборки Y необходимо исследовать записи полетов самолета-амфибии, которые НКБ ЦОС ЮФУ согласилось предоставить.

Прежде чем подавать сигналы с датчика вибраций на ранговый обнаружитель, сначала необходимо провести цифровую обработку: 1) ПФ подавить область нулевых частот для устранения нестационарности постоянной составляющей помехи, и область выше частоты Найквиста для подавления шумов квантования; 2) разделить помеху на ее СКО, чтобы ранговый обнаружитель не реагировал на усиление/ослабление помехи. В качестве ПФ можно использовать КИХ фильтр с прямоугольной полосой или же воспользоваться алгоритмом синтеза КИХ фильтра, приведенном в [5].

Было предложено синтезировать опорную выборку Y из 5000 значений случайной величины, плотность вероятности которой будет совпадать со средним распределением реальной помехи.

Ниже предложен алгоритм синтеза опорной выборки Y :

1. По гистограмме, полученной из анализа записей полетов самолета-амфибии 2-го класса сигналов, подобрать подходящую кривую, аппроксимирующую распределение помехи. Для аппроксимации распределения было предложено использовать кривые Джонсона из-за их простоты.

2. Используя полученное теоретическое распределение и метод Неймана, получить 5000 отсчетов с "усредненным" распределением. Проверить полученную синтезированную выборку на соответствие теоретическому распределению (используя критерий Пирсона или Колмогорова-Смирнова). Использовался критерий Пирсона.

3. Если критерий согласия показывает хорошее соответствие синтезированной выборки и теоретического распределения – аппроксимация выполнена успешно. Если нет, повторяем шаг 2.

На рис. 1 приведена структурная схема рангового обнаружителя для обнаружения сигнала датчика вибраций и сигнализации приводнения самолета-амфибии.

На рис. 2 приведена кривая Джонсона, аппроксимирующая плотность распределения помехи.

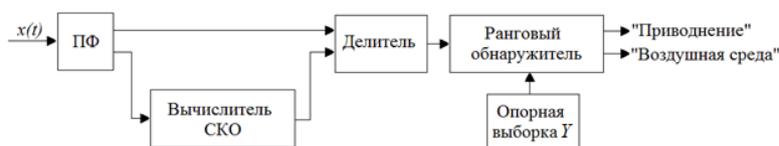


Рис. 1. Структурная схема рангового обнаружителя для обнаружения сигнала датчика вибраций самолета-амфибии

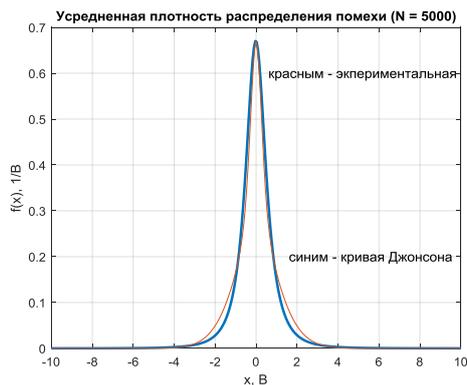


Рис. 2. Аппроксимация кривой Джонсона усредненной плотности вероятности помехи

Опуская описание метода Неймана [14] для синтеза опорной выборки, переходим непосредственно к результатам эксперимента.

При анализе записей полетов самолета-амфибии, было выяснено не только то, что помеха меняет свои параметры от одной записи к другой, также в ней присутствуют случайные выбросы, обусловленные, либо дрожанием фюзеляжа, либо от погодных условий (шквалистый ветер, гром), либо от включения турбин для ускорения полета. Для предотвращения ложного срабатывания датчика, дополнительно к вышеописанному алгоритму добавилась еще компенсация гистограммы распределения рангов в отсутствии сигнала. Компенсация заключалась в выравнивании соседних столбцов гистограммы в случае, когда точно известно, что сигнала нет. Тогда, в случае же присутствия сигнала, компенсация на принятие решения не повлияет, при этом дополнительно минимизируется ложное срабатывание.

На рис. 3 и 4 приведены гистограммы распределения рангов при отсутствии сигнала и при наличии сигнала соответственно. Наличие «колокола» в середине гистограммы в ситуации присутствия сигнала обусловлено компенсацией, описанной выше.

На рис. 5 приведена временная диаграмма данной записи и выходной сигнал рангового обнаружителя. По вертикальной оси безразмерная величина (так как выполнялось деление на СКО).

Из анализа рис. 5 следует, что сигнал с датчика вибраций (входной сигнал рангового обнаружителя) в режиме приводнения превышает уровень помех в несколько раз (отношение сигнал/помеха больше 0 dB). Поэтому, вероятность правильного обнаружения $P_{по}$ рангового обнаружителя будет не хуже чем заявленная в табл. 2 в [1] и [2].

Для сравнения характеристик обнаружения (зависимость $P_{по}$ от отношения сигнал/помеха, в данном случае по уровню) рангового обнаружителя был выбран контрастный метод, который заключается в обычном превышении порога уровня

сигнала на входе, при заданной вероятности ложной тревоги $P_{лт}$. Характеристики обнаружения для рангового обнаружителя рассматривались для случая, когда полезным сигналом является гармоническая функция, а помехой – белый шум с нормальным распределением. На рис. 6 приведены характеристики обнаружения для рангового обнаружителя и обнаружителя на основе контрастного метода. Видно, что характеристики обнаружения рангового обнаружителя имеют менее выраженную зависимость от вероятности ложной тревоги, нежели метод контраста.

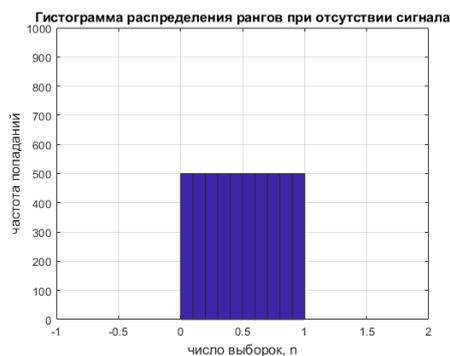


Рис. 3. Гистограмма распределения при отсутствии сигнала

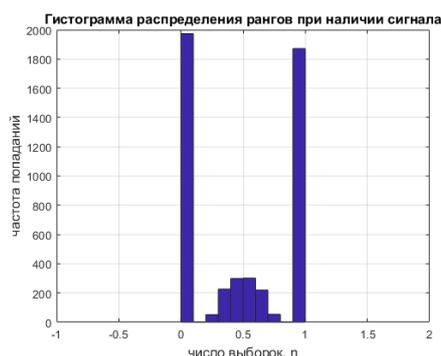


Рис. 4. Гистограмма распределения при наличии сигнала

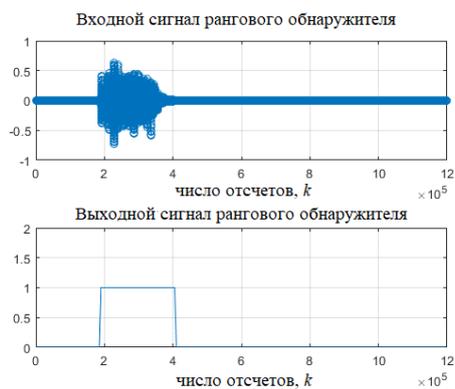


Рис. 5. Сигнал с датчика вибраций и выход рангового обнаружителя (0 - «воздушная среда», 1 – «приводнение»)

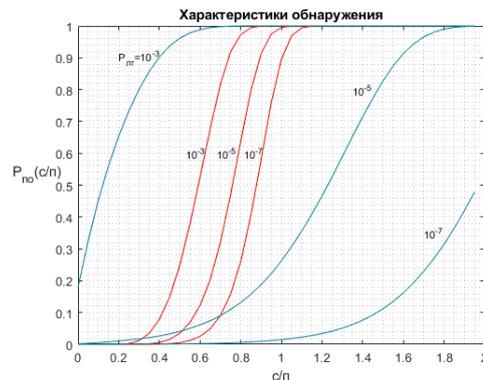


Рис. 6. Характеристики обнаружения для рангового обнаружителя (красным) и контрастного метода (синим)

Заключение. Результаты проведенного эксперимента показывают, что распределение рангов в ситуации отсутствия сигнала с датчика вибраций всегда аппроксимируется равномерным законом распределения. В ситуациях, когда во входной выборке присутствуют сигналы 1-го класса, равномерное распределение нарушается, и наличие сигнала определяется непараметрическим критерием согласия Ватсона. Рис. 2.5 показывает, что система позволяет точно определить момент касания лодки самолета-амфибии с водной поверхностью.

Результаты исследования могут быть полезны не только разработчикам и конструкторам предприятия НКБ ЦОС ЮФУ, но и другим организациям, эксплуатирующим самолеты-амфибии. Модель обработки сигнала на основе ранговых критериев может найти применение во многих областях науки и техники, где стоит задача обнаружения в условиях существенной априорной неопределенности. Все записи полетов были предоставлены НКБ ЦОС ЮФУ, за что авторы выражают искреннюю благодарность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приходченко А.И. Выбор статистически оптимального критерия согласия равномерного распределения для ранговой обработки сигналов в условиях априорной неопределенности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 3 (220).
2. Приходченко А.И. Непараметрический критерий согласия равномерного распределения для ранговой обработки сигналов в условиях априорной неопределенности // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2021»: Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021.
3. Патент № 2611466 Российская Федерация, МПК В54Д 45/04, G08G 5/02. Способ сигнализации приводнения и взлета с водной поверхности самолета-амфибии и устройство для его осуществления / Маркович И.И., Душенин Ю.В., Марьев А.А., Долгошеев Ю.Б.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»; заявл. 05.10.2015; опубл. 22.02.2017, Бюл. № 6. – 12 с.
4. Лапий В.Ю., Калюжный А.Я., Красный Л.Г. и др. Устройства ранговой обработки информации. – К.: Техника, 1986. – 120 с. – С. 119-120.
5. Марьев А.А., Приходченко А.И. Алгоритм синтеза цифровых нерекурсивных фильтров с амплитудно-частотными характеристиками произвольной формы // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2020»: Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020.

6. Р 50.1.033–2001. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Ч. I. Критерии типа хи-квадрат. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 87 с.
7. Лемешко Б.Ю., Блинов П.Ю. Критерии проверки отклонения распределения от равномерного закона. – Новосибирск, 2015. – 182 с.
8. Лемешко Б.Ю., Блинов П.Ю., Лемешко С.Б. О критериях проверки равномерности закона распределения вероятностей // Автометрия. – 2016. – Т. 52, № 2.
9. Лемешко Б.Ю., Горбунова А.А. О применении и мощности непараметрических критериев согласия Купера, Ватсона и Жанга // Измерительная техника. – 2013. – № 5. – С. 3-9.
10. Lemeshko B.Yu., Gorbunova A.A. Application of nonparametric Kuiper and Watson tests of goodness-of-fit for composite hypotheses // Measurement Techniques. – 2013. – Vol. 56, No. 9. – P. 965-973.
11. Watson G.S. Goodness-of-fit tests on a circle. I // Bio-metrika. – 1961. – Vol. 48, No. 1-2. – P. 109-114.
12. Watson G.S. Goodness-of-fit tests on a circle. II // Bio-metrika. – 1962. – Vol. 49, No. 1-2. – P. 57-63.
13. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных сотрудников. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
14. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – М.: Изд-во «Советское радио», 1971. – 328 с.
15. Федосов В.П. Прикладные математические методы в статистической радиотехнике: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 74 с.
16. Рыжов В.П., Федосов В.П. Оптимальные методы обработки сигналов на фоне помех: Текст лекций. – Таганрог: Изд-во ТРТИ, 1990. – 54 с.
17. Федосов В.П. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. – 282 с.
18. Рыжов В.П., Федосов В.П. Анализ радиотехнических устройств при воздействии случайных процессов. – Таганрог: ТРТИ, 1986.
19. Рыжов В.П., Федосов В.П. Статистические методы обработки сигналов. – Таганрог: ТРТИ, 1986.
20. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. – М.: Советское радио, 1977. – 432 с.
21. Богданович В.А., Вострецов А.Г. Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов. – М.: Физматлит, 2003. – 320 с.
22. Гаек Я., Шидак З. Теория ранговых критериев: пер. с англ. – М.: Наука, 1971.
23. Рабинер Л., Гоулд Р. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978.
24. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Изд-во «Питер», 2002. – 608 с.

REFERENCES

1. Prikhodchenko A.I. Vybora statisticheskii optimal'nogo kriteriya soglasiya ravnomernogo raspredeleniya dlya rangovoy obrabotki signalov v usloviyakh apriornoy neopredelennosti [Selection of statistically optimal criterion of uniform distribution agreement for rank signal processing under conditions of a priori uncertainty], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 3 (220).
2. Prikhodchenko A.I. Neparametricheskii kriteriy soglasiya ravnomernogo raspredeleniya dlya rangovoy obrabotki signalov v usloviyakh apriornoy neopredelennosti [Nonparametric criterion of uniform distribution agreement for rank signal processing under conditions of a priori uncertainty], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii «KomTekh-2021»: Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Computer and information technologies in science, engineering and management "Komtech-2021": Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation]; in 2 vol. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021.
3. Markovich I.I., Dushenin Yu. V., Mar'ev A.A., Dolgosheev Yu.B. Patent № 2611466 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B54D 45/04, G08G 5/02. Sposob signalizatsii privodneniya i vzleta s vodnoy poverkhnosti samoleta-amfibii i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Method of signaling landing and take-off from the water surface of an amphibious aircraft and

- a device for its implementation]; applicant and patent holder Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Southern Federal University"; application 05.10.2015; publ. 22.02.2017, Bull. No. 6, 12 p.
4. Lapiy V.Yu., Kalyuzhnyy A.Ya., Krasnyy L.G. i dr. Ustroystva rangovoy obrabotki informatsii [Devices of rank processing of information]. K.: Tekhnika, 1986, 120 p., pp. 119-120.
 5. Mar'ev A.A., Prikhodchenko A.I. Algoritm sinteza tsifrovyykh nerekursivnykh fil'trov s amplitudno-chastotnymi kharakteristikami proizvol'noy formy [Algorithm of synthesis of digital non-recursive filters with amplitude-frequency characteristics of arbitrary shape], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii «KomTekh-2020»*: Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation]: in 2 vol. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020.
 6. R 50.1.033–2001. Rekomendatsii po standartizatsii. Prikladnaya statistika. Pravila proverki soglasiya opytnogo raspredeleniya s teoreticheskim. Ch. I. Kriterii tipa khi-kvadrat [P 50.1.033–2001. Recommendations for standardization. Applied statistics. Rules for verifying the agreement of the experimental distribution with the theoretical one. Part I. Criteria of the chi-square type]. Moscow: Izd-vo standartov, 2002, 87 p.
 7. Lemeshko B.Yu., Blinov P.Yu. Kriterii proverki otkloneniya raspredeleniya ot ravnomernogo zakona [Criteria for checking the deviation of the distribution from the uniform law]. Novosibirsk, 2015, 182 p.
 8. Lemeshko B.Yu., Blinov P.Yu., Lemeshko S.B. O kriteriyakh proverki ravnomernosti zakona raspredeleniya veroyatnostey [On the criteria for checking the uniformity of the probability distribution law], *Avtometriya* [Autometry], 2016, Vol. 52, No. 2.
 9. Lemeshko B.Yu., Gorbunova A.A. O primeneni i moshchnosti neparametricheskikh kriteriev soglasiya Kupera, Vatsona i Zhanga [On the application and power of nonparametric criteria of Cooper, Watson and Zhang agreement], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring Technique], 2013, No. 5, pp. 3-9.
 10. Lemeshko B.Yu., Gorbunova A.A. Application of nonparametric Kuiper and Watson tests of goodness-of-fit for composite hypotheses, *Measurement Techniques*, 2013, Vol. 56, No. 9, pp. 965-973.
 11. Watson G.S. Goodness-of-fit tests on a circle. I, *Bio-metrika*, 1961. – Vol. 48, No. 1-2, pp. 109-114.
 12. Watson G.S. Goodness-of-fit tests on a circle. II, *Bio-metrika*, 1962, Vol. 49, No. 1-2, pp. 57-63.
 13. Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh sotrudnikov [Applied mathematical statistics. For engineers and researchers]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 816 p.
 14. Bykov V.V. TSifrovoe modelirovanie v statisticheskoy radiotekhnike [Digital modeling in statistical radio engineering]. Moscow: Izd-vo «Sovetskoe radio», 1971, 328 p.
 15. Fedosov V.P. Prikladnye matematicheskie metody v statisticheskoy radiotekhnike: ucheb. posobie [Applied mathematical methods in statistical radio engineering: a textbook]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 74 p.
 16. Ryzhov V.P., Fedosov V.P. Optimal'nye metody obrabotki signalov na fone pomekh: Tekst lektsiy [Optimal methods of signal processing against the background of interference: Text of lectures]. Taganrog: Izd-vo TRTI, 1990, 54 p.
 17. Fedosov V.P. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: ucheb. posobie [Radio engineering circuits and signals: textbook]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2017, 282 p.
 18. Ryzhov V.P., Fedosov V.P. Analiz radiotekhnicheskikh ustroystv pri vozdeystvii sluchaynykh protsessov [Analysis of radio engineering devices under the influence of random processes]. Taganrog: TRTI, 1986.
 19. Ryzhov V.P., Fedosov V.P. Statisticheskie metody obrabotki signalov [Statistical methods of signal processing]. Taganrog: TRTI, 1986.
 20. Repin V.G., Tartakovskiy G.P. Statisticheskiy sintez pri apriornoy neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh sistem [Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems]. Moscow: Sovetskoe radio, 1977, 432 p.
 21. Bogdanovich V.A., Vostretsov A.G. Teoriya ustoychivogo obnaruzheniya, razlicheniya i otsenivaniya signalov [Theory of stable detection, discrimination and evaluation of signals]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 320 p.

22. *Gaek Ya., Shidak Z.* Teoriya rangovykh kriteriev [Theory of rank criteria]: trans. from engl. Moscow: Nauka, 1971.
23. *Rabiner L., Gould R.* Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov [Theory and application of digital signal processing]. Moscow: Mir, 1978.
24. *Sergienko A.B.* Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. Saint Petersburg: Izd-vo «Piter», 2002, 608 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Федосов Валентин Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: vpfed@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634360415; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Приходченко Алексей Иванович – e-mail: zzalexeizz@yandex.ru; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Fedosov Valentin Petrovich – Southern Federal University; e-mail: vpfed@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634360415; the department of fundamentals of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.

Prihodchenko Alexey Ivanovich – e-mail: zzalexeizz@yandex.ru; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; postgraduate.