

11. *Zachinyaev Yu.V., Rumyantsev K.E., Kukuyashnyy A.V.* Formirovanie nanosekundnykh LChM-radiosignalov na volokonno-opticheskikh strukturakh [The formation of the nanosecond chirp radio signals on fiber-optic structures], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical and information complexes and systems], 2011, Vol. 7, No. 3, pp. 32-38.
12. *Gorbunov A.V., Rumyantsev K.E.* Dinamicheskie zapominayushchie ustroystva na osnove binarnykh volokonno-opticheskikh struktur [Dynamic memory devices based on binary fiber-optic structures], *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2002, No. 12, pp. 73.
13. *Gorbunov A.V., Rumyantsev K.E.* Modelirovanie protsessа formirovaniya kopiy v dinamicheskom zapominayushchem ustroystve s binarnoy volokonno-opticheskoy strukturoy [Modeling of process of formation of copies in a dynamic storage device with a binary fiber-optic structure], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronics], 2006, No. 2, pp. 36-41.
14. *Zachinyaev Yu.V., Rumyantsev K.E.* Formirovanie radiosignalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey s ispol'zovaniem fazovoy samomodulyatsii [The formation of radio signals with linear frequency modulation with the use of phase self-modulation], *Tekhnicheskie i estestvennyye nauki: teoriya i praktika: sbornik materialov mezhdunarodnykh nauchnykh e-simpoziumov. Rossiya, g. Moskva, 27-28 marta 2015 g.* [Technical and natural Sciences: theory and practice: materials of the international scientific e-symposia. Russia, Moscow, 27-28 March 2015]. Kirov: MTsNIP, 2015, pp. 47-59.
15. *Zachinyaev Yuriy, Rumyantsev Konstantin.* Self-phase modulation based chirp generator, *Proceedings of the 2016 IEEE Radar Conference*, 2016. DOI: 10.1109/RADAR.2016.7485278.
16. *Zachinyaev Yu.V.* Formirovanie radiosignalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey na osnove yavleniya fazovoy samomodulyatsii [Self-phase modulation based chirp generation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 8 (169), pp. 77-85.
17. *Zachinyaev Yu.V., Plivak S.A., Shumilin A.S.* Formirovanie signalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey na osnove yavleniya fazovoy samomodulyatsii [Formation of signals with linear frequency modulation based on the phenomenon of phase self-modulation], *Sbornik trudov V Mezhdunarodnoy konferentsii po fotonike i informatsionnoy optike* [proceedings of the V International conference on Photonics and information optics], 2016, pp. 345-346.
18. *Agraval G.P.* Nelineynaya volokonnaya optika [Nonlinear fiber optics]: translation from English. Moscow: Mir, 1996, 323 p.
19. *Kochemasov V.N., Belov L.A., Okoneshnikov V.S.* Formirovanie signalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey [Formation of signals with linear frequency modulation]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 192 p.
20. *Ivanov A.B.* Volokonnaya optika: komponenty, sistemy peredachi, izmereniya [Fiber optics: components, transmission systems, measurement]. Moscow: Izd-vo «Syrus System», 1999, 673 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.ф.-м.н., доцент В.М. Федоров.

Зачиняев Юрий Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: yvzach@sfedu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +79044411988; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; старший преподаватель.

Zachinyaev Yuriy Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: yvzach@sfedu.ru; 2, Chehova street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79044411988; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; assistant professor.

УДК 621.391

DOI 10.18522/2311-3103-2016-9-113121

А.Н. Зикий, П.Н. Зламан

РАНГОВЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ ОДИНОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ

При автоматическом обнаружении радиолокационных сигналов на фоне помех неизвестного и меняющегося уровня широко используются обнаружители со стабилизацией частоты ложных тревог. К ним относятся шумовая автоматическая регулировка усиления, регулировка порога квантования, обнаружители контраста, знаковые и ранговые об-

наружители. Предложен новый ранговый тест, основанный на сумме рангов. Рассмотрена возможность его использования в качестве алгоритма обнаружения одиночных импульсов. Приведена функциональная схема обнаружителя, реализующая алгоритм. Кратко описан принцип действия рангового обнаружителя. Проведен анализ характеристик обнаружения в гауссовом приближении. Проводится сравнение с равномерно наиболее мощным алгоритмом обнаружения (тестом Стьюдента). Показан проигрыш рангового алгоритма алгоритму Стьюдента по пороговому сигналу 1 дБ при объемах выборок $M=4$; $N=4$, вероятности правильного обнаружения $P_0=0,9$ и вероятности ложной тревоги $P_{лт}=8*10^{-3}$. Изготовлен макет обнаружителя, реализующий ранговый алгоритм. Проведено его экспериментальное исследование. Представлены расчетные и экспериментальные характеристики обнаружения. Разница в пороговом сигнале между результатами расчета и эксперимента составляет менее 0,33 дБ, что подтверждает правильность методики расчета характеристик обнаружения. Проведено экспериментальное исследование качества стабилизации ложных тревог. Показано, что при изменении среднеквадратического отклонения шума в 33 раза от 30 мВ до 1000 мВ вероятность ложной тревоги возрастает всего в 10,8 раз. Такой результат вполне удовлетворителен для практики. Предложенный ранговый обнаружитель одиночных импульсов может быть использован в одноканальных и многоканальных приемниках радиоконтроля для стабилизации частоты ложных тревог.

Ранговый обнаружитель; тест Стьюдента; формирователь рангов; накопитель; характеристики обнаружения; Гауссово приближение; стабилизация частоты ложных тревог; макет; эксперимент.

A.N. Zikiy, P.N. Zlaman

A RANK DETECTOR SINGLE PULSES

*In automatic detection of radar signals against the background of noises of unknown and changing level widely used are the detectors with the stabilization of the false alarms frequency. They include noise automatic gain control, adjustment of the quantization threshold, detectors of contrast, sign and rank-based detectors. Proposed is a new rank test based on sum of ranks. The possibility of its use as the algorithm of single pulses detection is examined. The functional block diagram of the detector that implements the algorithm is presented. The principle of operation of range detector is briefly described. Characteristics of detection in the Gaussian approximation are analyzed. It is compared with the uniformly most powerful detection algorithm (test of Student). It is shown the loss of ranking algorithm to the Student algorithm by the threshold signal 1 dB for sample sizes of $M=4$; $N=4$, the probability of correct detection $P_0=0.9$ and probability of false alarm $P_{LT}=8*10^{-3}$. It is made the prototype of the detector implementing a ranking algorithm. Carried out is a pilot study of the prototype. The calculated and experimental detection characteristics are presented. The difference in threshold voltage between the results of calculation and experiment is less than 0,33 dB, that confirms the correctness of the methods of calculation of detection characteristics. An experimental study of the stabilization quality of false alarms is carried out. It is shown that the change in root-mean-square error of noise by 33 times from 30 mV to 1000 mV, the probability of false alarm is increased only 10,8 times. This result is quite satisfactory for practice. Proposed rank detector of single pulses can be used in single-channel and multi-channel receivers of the radio control for stabilizing the frequency of false alarms.*

Rank detector; test of Student; rank driver; accumulator; characteristics of detection; Gaussian approximation; stabilization of frequency of false alarms; prototype; experiment.

Введение. Как известно [1], для решения параметрических и непараметрических задач проверки гипотез можно использовать устойчивые методы, не зависящие от распределения, другими словами – сохраняющие вероятность ложных тревог для широкого класса распределений.

В литературе по математической статистике описано множество методов проверки гипотез, не зависящих от распределения, однако в практике обнаружения сигналов немногие из них нашли применение. Наибольшую известность получили знаковый алгоритм и ранговый алгоритм Манна-Уитни [1].

Большой вклад в развитие ранговых обнаружителей внесли отечественные ученые Б.Р. Левин и его ученики, П.С. Акимов, А.М. Бриккер, В.А. Корадо, М.Н. Бирюков [1–14]. Огромный интерес вызвали публикации переводов статей Хансена с Ользеном, Дилларда с Энтоньяком, Финна с Джонсоном, Хаббарда [15–18].

В упомянутой литературе [17, 18] описан ранговый радиолокационный обнаружитель пачки импульсов на основе перемешанного теста Манна-Уитни. Может создаться впечатление, что если решена задача рангового обнаружения пачки импульсов, то задача рангового обнаружения одиночных импульсов - тем более. Однако это не так.

В радиолокации практически всегда применяется согласованная фильтрация или близкая к ней. После согласованной фильтрации на интервале, равном длительности импульса, можно взять только один независимый отсчёт шума. Это приводит к тому, что в анализируемой выборке имеется только один элемент, и ВЛТ при обнаружении одного импульса равна $F = 1/(M+1)$, где M – объём группы шумовой выборки. Так как M не может быть чрезвычайно большим, то и ВЛТ получается слишком большой и не может достигать требуемых величин $10^{-3} - 10^{-9}$. Это приводит к тому, что ложные тревоги появляются чаще, чем сигналы.

С целью уменьшения ВЛТ мы предлагаем несколько иное построение рангового обнаружителя одиночных импульсов. При обнаружении сигналов с неточно известной несущей частотой может использоваться неоптимальное приемное устройство типа полосовой фильтр – детектор – видеофильтр, у которого полоса пропускания полосового фильтра Δf и полоса пропускания видеофильтра ΔF в несколько раз шире спектра сигнала:

$$\Delta f \gg \Delta F \geq N * \Delta f_c.$$

Это условие позволяет сделать ряд одинаково распределенных независимых наблюдений на выходе видеофильтра на интервале наблюдения, равном длительности импульса τ_{II} .

Алгоритм и схема. Предлагается новый ранговый алгоритм, удобный для использования в обнаружителях одиночных импульсов

$$W = \sum_{i=1}^N \sum_{j=\lambda(i-1)+1}^{M+\lambda(i-1)} U(x_i - y_j). \quad (1)$$

Следует заметить, что W – тест обобщает как классический тест Манна-Уитни, так и перемешанный тест Манна-Уитни. Например, при $\lambda=0$ получаем классический тест Манна-Уитни.

$$W_{\lambda=M} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M U(x_i - y_j). \quad (2)$$

При $\lambda = M$ из (3.1) имеем перемешанный тест Манна-Уитни.

$$W_{\lambda=M} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=M(i-1)+1}^{M*i} U(x_i - y_j). \quad (3)$$

При $0 < \lambda < M$ из (1) получаются алгоритмы с меньшим объёмом шумовой выборки, чем перемешанный алгоритм Манна-Уитни, и с большим объёмом, чем классический тест Манна-Уитни. Наиболее "экономным" является алгоритм при $\lambda = 1$.

Он позволяет формировать ранги последовательно, а не параллельно, как в классическом алгоритме Манна-Уитни, и в то же время объём шумовой выборки для него в $M*N / (M + N - 1)$ раз меньше, чем объём шумовой выборки для перемешанного алгоритма Манна-Уитни.

$$W_{\lambda=1} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^{M+i-1} U(x_i - y_j), \quad (4)$$

где x_i – элементы анализируемой выборки; y_i – элементы опорной выборки шума; N – число элементов в анализируемой выборке; M – число элементов в опорной выборке шума при формировании одного ранга; $U(x_i - y_i)$ – ступенчатая функция;

$$U = \begin{cases} 1 & \text{при } x_i > y_i \\ 0 & \text{при } x_i < y_i \end{cases}$$

Функциональная схема обнаружителя на основе W_1 -статистики приведена на рис. 1. На нем обозначено: τ_n – длительность импульса; τ_k – интервал корреляции шума.

Обнаружитель состоит из амплитудного детектора, многоотводной линии задержки, ряда компараторов, сумматора, накопителя и порогового устройства.

Анализ. Проведем анализ этого обнаружителя в гауссовом приближении. Математическое ожидание W_1 – статистики равно (по аналогии с [19])

$$M_1(W_1) = M_1\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^{M+i-1} U(x_i - y_j)\right) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^{M+i-1} p(x_i > y_j) = M * N * a,$$

где a определяется формулой $G(x)$ – функция распределения смеси сигнала и шума на выходе видеофильтра:

$$a = p(x_i > y_j) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x) dF(x)$$

$F(x)$ – функция распределения шума на выходе видеофильтра.

Дисперсия статистики (4) рассчитывается по той же методике, что и дисперсия статистики (2) в [19] для случая $M \geq N$:

$$\begin{aligned} \sigma^2(W_1 / H_1) &= M \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^{M+i-1} U(x_i - y_j) \right)^2 - [M_1 \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^{M+i-1} U(x_i - y_j) \right)]^2 = \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^{M+i-1} p(x_i > y_j) + \\ &+ \sum_{i=1, i \neq k}^N \sum_{j=i, j \neq k}^{M+i-1} \sum_{l=i}^{M+i-1} p(x_i > y_j; x_k > y_l) + \\ &+ \sum_{i=1, j=l}^N \sum_{j=i, i \neq k}^{M+i-1} \sum_{k=1}^N p(x_i > y_j; x_k > y_j) + \\ &+ \sum_{i=1, i \neq k}^N \sum_{j=i, j \neq l}^{M+i-1} \sum_{k=1}^N \sum_{l=k}^{M+k-1} p(x_i > y_j) p(x_k > y_l) - \\ &- \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^{M+i-1} p(x_i > y_j) \right]^2 = M * N * a + M * N * (M - 1) b + \\ &+ N(N - 1)(M + 1 - N) c_1 a_2 + 2c_1 \sum_{i=1}^{N-2} (N - i)(N - 1 - i) + MN(M - 1)(N - 1) a^2 - \\ &M^2 * N^2 * a^2, \end{aligned}$$

$$a_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } M + 1 - N \geq 0 \\ 0, & \text{если } M + 1 - N < 0 \end{cases}$$

где величины b и c_1 определяются формулами

$$b = \int_{-\infty}^{\infty} G^2(x) dF(x),$$

$$c_1 = \int_{-\infty}^{\infty} [1 - F(x)]^2 dG(x).$$

В этом случае вероятность правильного обнаружения в гауссовом приближении определяется формулой

$$D = 1 - \Phi\left(\frac{C - M_1(W_1)}{\sigma(W_1)}\right).$$

Проведенный выше анализ обнаружителя на основе W_1 – статистики не накладывает ограничений на тип распределения смеси сигнала и шума на входе обнаружения (кроме непрерывности). Предположим, что выполняется дополнительное – условие нормализации процесса в видеофильтре [1]

$$\Delta f \gg \Delta F,$$

и шум на выходе видеофильтра предполагается центрированным. Тогда плотность распределения вероятностей смеси сигнала и шума на выходе видеофильтра можно представить в следующем виде:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-A)^2}{2\pi\sigma^2}\right],$$

где x – случайная величина на выходе видеофильтра; σ^2 – дисперсия случайной величины x ; A – амплитуда сигнала на выходе видеофильтра.

При записи плотности $f(x)$ предполагалось, что пороговый сигнал, определенный на входе детектора, будет значительно меньше единицы и увеличением дисперсии на выходе детектора при наличии сигнала можно пренебречь.

Характеристики обнаружения, рассчитанные по этим формулам, изображены на рис. 2. Для сравнения на этом же рисунке приведена характеристика обнаружения обнаружителя, основанного на тесте Стьюдента, для случая $m=16$, $F=8 \cdot 10^{-3}$. Видеофильтр обнаружителя Стьюдента согласован с длительностью импульса, а видеофильтр рангового обнаружителя в N раз широкополоснее (N – объем анализируемой выборки). Поэтому отношение сигнал/шум (по мощности) на видеовыходе обнаружителя Стьюдента в N раз больше, чем у рангового.

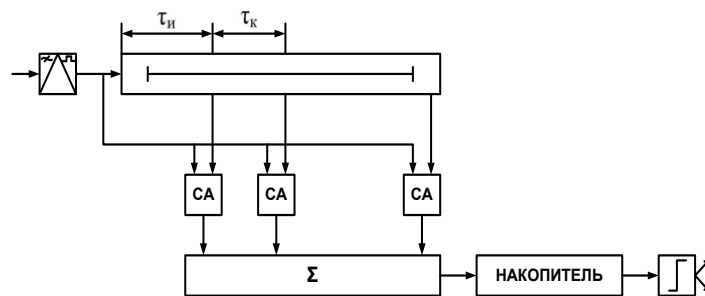


Рис. 1. Ранговый обнаружитель одиночных импульсов на основе W_1 -статистики

Эксперимент. Для проверки правильности расчета характеристик обнаружения был изготовлен макет обнаружителя, реализующий ранговый алгоритм (3) для $\lambda=1$, $m=4$, $N=4$.

В макете рангового обнаружителя использованы следующая элементная база: в формирователе рангов линия задержки ММЛЗ – 1,0 – 600, в накопителе использованы линия задержки типа МЛЗ – 1,0 – 1200. Параметры и характеристики этих линий задержки приведены в книге [20]. В качестве компараторов и порогового устройства использованы операционные усилители типа 140УД1Б [21]. Сумматоры в формирователе рангов и в накопителе построены на резисторах.

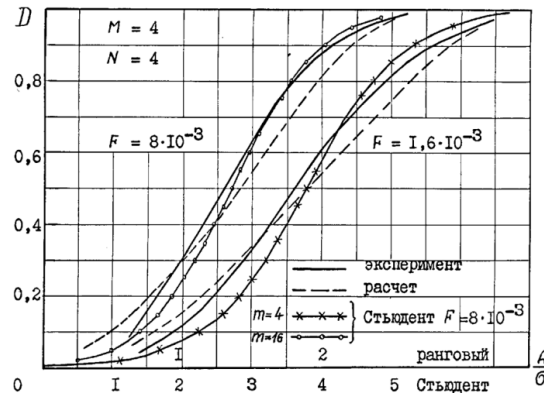


Рис. 2. Характеристики обнаружения рангового обнаружителя одиночных импульсов на основе W1-статистики

Эксперимент проводился на установке, содержащей генератор импульсов Г5-56, генератор шума Г2-37, сумматор для получения смеси сигнала и шума на операционном усилителе, стробирующий каскад для фиксации числа опытов, частотомер электронно-счетный типа ЧЗ-63 для подсчета числа ложных тревог и правильных обнаружений, источник питания +12 В и минус 12 В, осциллограф С1-114/1 для наблюдения процессов в различных точках обнаружителя. Особенно важно с помощью осциллографа добиться совмещения максимума суммы рангов и центра стробирующего импульса. В первом и втором экспериментах снимались характеристики обнаружения. Длительность импульса 7 мкс. Ширина спектра шума 600 кГц. Отводы линии задержки использовались через 2 мкс.

Две экспериментальные характеристики обнаружения представлены на рис. 2 сплошными линиями для двух значений вероятности ложной тревоги: $F=8 \cdot 10^{-3}$ и $F=1,6 \cdot 10^{-3}$. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик по пороговому сигналу при $D=0,9$ дает максимальное расхождение не более 0,33 дБ, что вполне удовлетворительно для практики.

В третьем эксперименте снималась зависимость вероятности ложной тревоги от уровня шума. Амплитуда сигнала при этом была нулевой. Среднеквадратическое значение шума менялось от 30 до 1000 мВ. Результаты третьего эксперимента приведены в табл. 1, откуда видно, что вероятность ложной тревоги выросла в 10,8 раза.

Таблица 1

Зависимость ВЛТ от СКО шума

σ [мВ]	30	100	300	1000
F	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$

Выводы

1. Предложен ранговый алгоритм обнаружения одиночных импульсов, основанный на сумме рангов.

2. Проведен математический анализ характеристик обнаружения в гауссовом приближении.

3. Сравнение с характеристиками обнаружителя Стьюдента дает проигрыш рангового обнаружения в пороговом сигнале 1дБ при $M=4, N=4, F=1,6 \cdot 10^{-3}, D=0,9$.

4. Изготовлен макет рангового обнаружителя, на котором сняты экспериментальные характеристики обнаружения. Расхождение экспериментальных и расчетных характеристик обнаружения не превышает 0,33 дБ, что подтверждает правильность методики расчета.

5. При изменении напряжения шума в 33 раза на входе обнаружителя вероятность ложных тревог выросла в 10,8 раза, что вполне удовлетворительно для практики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. Книга третья. – М.: Сов. Радио, 1976. – 288 с.
2. *Румянцев К.Е., Прокофьев В.Н.* Инвариантные алгоритмы обнаружения сигналов при априорной неопределенности помеховой обстановки: учеб. пособие. – Таганрог: ТРТИ, 1990. – 45 с.
3. *Ломакин Д.В.* Устройство для стабилизации вероятности ложной тревоги. Авторское свидетельство СССР №373672, G01 S' 7/30, публ. 14.06.73.
4. *Белецкий Ю.С.* Методы и алгоритмы контрастного обнаружения сигналов на фоне помех с априори неизвестными характеристиками. – М.: Радиотехника, 2011. – 436 с.
5. Теория обнаружения сигналов / под. ред. П.А. Бакута. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
6. *Богданович В.А., Вострецов А.Г.* Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов. – М.: Физматлит, 2004. – 320 с.
7. *Оводенко А.А.* Робастные локационные устройства. – Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1981. – 184 с.
8. Адаптивные системы и их приложения: Сборник статей / под ред. А.В. Медведева. Новосибирск, «Наука», 1978. – 191 с.
9. *Зикий А.Н.* Обнаружение одиночных импульсов методом контраста // Известия вузов СССР. Сер. «Радиоэлектроника». – 1980. – Т. XXIII, № 7. – С. 80-81.
10. *Бирюков М.Н.* Разработка и исследование непараметрических обнаружителей сигналов, помехоустойчивых в условиях воздействия шума и потока помех: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 33 с.
11. *Вострецов А.Г.* Методы устойчивого обнаружения и оценивания сигналов в системах технического контроля и оптимизации их структуры: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск: НГТУ, 1997. – 32 с.
12. *Сосулин Ю.Г., Шлыков Д.В.* Непараметрические к-этапные процедуры обнаружения // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49, № 5. – С. 587-594.
13. Обнаружение радиосигналов / под. ред. А.А. Колосова. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
14. *Лапий В.Ю., Калюжный А.Я., Красный Л.Г.* Устройства ранговой обработки информации. – Киев: Техника, 1986. – 120 с.
15. *Gibson J.D., Melsa J.L.* Introduction to Nonparametric Detection With Application. N.Y., Academic Press, 1975.
16. Пат. США №3.775.770, кл. 343-100 СЛ (H04 в 1/10). Способ обнаружения сигналов на фоне шума с любым распределением / Диллард Дж.М., Энтоньяк Ч.Е. публ. 27.10.73. Т. 916, № 16.
17. *Диллард Дж.М., Энтоньяк Ч.Е.* Инвариантная относительно распределения входного сигнала процедура обнаружения для РЛС // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – № 8. – С. 3-15.
18. *Хансен, Ользен.* Непараметрическое обнаружение сигналов с использованием обобщенного знакового критерия // Зарубежная радиоэлектроника. – 1972. – № 9. – С. 28-41.
19. *Уилкс С.* Математическая статистика. – М.: Наука, 1967. – 632 с.
20. *Баев Е.Ф., Бурьлин Е.И.* Миниатюрные электрические линии задержки. – М.: Сов. радио, 1977. – 248 с.
21. *Булычев А.Л., Галкин В.И., Прохоренко В.А.* Аналоговые интегральные схемы. Справочник. – 2-е изд. – Минск: Беларусь, 1993. – 383 с.

REFERENCES

1. *Levin B.R.* Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki [The theoretical foundations of statistical radio engineering]. Kniga 3 [Book 3]. Moscow: Sov. Radio, 1976, 288 p.
2. *Rumyantsev K.E., Prokof'ev V.N.* Invariantnye algoritmy obnaruzheniya signalov pri apriornoy neopredelennosti pomexkovoy obstanovki: uchebnoe posobie [Invariant algorithms for detection of signals under a priori uncertainty noise conditions: Tutorial]. Taganrog: TRTI, 1990, 45 p.
3. *Lomakin D.V.* Ustroystvo dlya stabilizatsii veroyatnosti lozhnoy trevogi [The device for stabilizing the probability of false alarm]. *Avtorskoe svidetel'stvo SSSR* [Inventor's certificate USSR No.373672, G01 S 7/30, publ. 14.06.73].
4. *Beletskiy U.S.* Metody i algoritmy kontrastnogo obnaruzheniya signalov na fone pomexk s apriori neizvestnymi karakteristikami [Methods and algorithms for contrast detection of signals in background noise with a priori unknown characteristics]. Moscow: Radiotekhnika, 2011, 436 p.
5. *Teoriya obnaruzheniya signalov* [The theory of signal detection], ed. by P.A. Bakuta. Moscow: Radio i svyaz, 1984, 440 p.
6. *Bogdanovich V.A., Vostretsov A.G.* Teoriya ustoychivogo obnaruzheniya, razlicheniya i otsenivaniya signalov [The theory of robust detection, discrimination and estimation of signals]. Moscow: Fizmatlit, 2004.
7. *Ovodenko A.A.* Robastnye lokatsionnye ustroystva [Robust locating device]. Leningrad: Izd-vo Leningradskogo universiteta, 1981, 184 p.
8. *Adaptivnye sistemy i ikh prilozheniya*: [Adaptive systems and their applications], *Sbornik statey* [A collection of articles], ed. by A.V. Medvedeva. Novosibirsk: Nauka, 1978, 191 p.
9. *Zikiy A.N.* Obnaruzhenie odinichnykh impul'sov metodom kontrasta [Detection of single pulses by the method of contrast], *Izvestiya vuzov SSSR. Seriya «Radioelektronika»* [Radioelectronics and Communications Systems], 1980, Vol. XXIII, No. 7, pp. 80-81.
10. *Biryukov M.A.* Razrabotka i issledovanie neparametricheskikh obnaruzhiteley signalov, pomexhoustoychivyykh v usloviyakh vozdeystviya shuma i potoka pomexk: avtoref. diss. d-ra tekhn. nauk [Development and research of nonparametric signals detector, noise immunity in the conditions of influence of noise and flow noise: autoabstract dr. of eng. sc. diss.]. Moscow: MGTU im Baumana, 2002, 33 p.
11. *Vostretsov A.G.* Metody ustoychivogo obnaruzheniya i otsenivaniya signalov v sistemakh tekhnicheskogo kontrolya i optimizatsii ikh struktury: avtoref. diss. d-ra tekhn. nauk [Methods for robust detection and estimation of signals in engineering control systems and optimization of their structure: autoabstract dr. of eng. sc. diss.]. Novosibirsk, NGTU, 1997, 37 p.
12. *Sosulin U.G., Shlykov D.V.* Neparametricheskie k-etalpnye protsedury obnaruzheniya [Non-parametric K – stage detection procedures], *Rafiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2004, Vol 49, No. 5, pp. 587-594.
13. *Obnaruzhenie radiosignalov* [Detection of radio signals], ed. by A.A. Kolosova. Moscow: Radio i svyaz, 1989, 288 p.
14. *Lapiy V.U., Kaluzhniy A.Ya., Krasniy L.G.* Ustroystva rangovoy obrabotki informatsii [The device of ranked information processing]. Kiev: Tehnika, 1986, 120 p.
15. *Gibson J.D., Melsa J.L.* Introduction to Nonparametric Detection With Application. N.Y., Academic Press, 1975.
16. *Dillard D.M., Antonyak Ch.E.* Sposob obnaruzheniya signalov na fone shuma s lubym raspredeleniem [Method of detecting signals in background noise with any distribution]. Patent USA No. 3.775.770, kl. 343-100 CL (H04 v 1/40), publ. 27.10.73, t. 916, No. 16.
17. *Dillard D.M., Antonyak Ch.E.* Invariantnaya odnositel'no vkhodnogo signala protsedura obnaruzheniya dlya RLS [Invariant distribution of input signal detection for radar], *Zarubezhnaya radioelektronika* [Foreign electronics], 1971, No. 8, pp. 3-14.
18. *Hansen Olzen.* Neparametricheskoe obnaruzhenie signalov s ispol'zovaniem obobshchennogo znakovogo kriteriya [Nonparametric detection of signals using the generalized symbolic criterion], *Zarubezhnaya radioelektronika* [Foreign electronics], 1972, No. 9, pp. 28-41.
19. *Uilks S.* Matematicheskaya statistika [Mathematical statistics]. Moscow: Nauka, 1967, 632 p.
20. *Baev E.F., Burylin E.I.* Miniaturnye elektricheskie linii zaderzhki [Miniature electric delay lines]. Moscow: Sov. Radio, 1978, 248 p.
21. *Bulychev A.L., Galkin V.I., Prohorenko V.A.* Analogovye integrirnyye chemy: Spravochnik [Analog integrated circuit: Reference], 2nd ed. Minsk: Belarus, 1994, 383 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент Д.П. Рублев.

Зикий Анатолий Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: zikiy50@mail.ru; 347922 г. Таганрог, ул. Чехова, 2; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

Зламан Павел Николаевич – e-mail: otde124d@nkbmius.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем; ведущий инженер-конструктор.

Zikiy Aatoliy Nikolaecich – Southern Federal University; e-mail: zikiy50@mail.ru; 2, Chekhova street, Taganrog, 347900, Russia; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior researcher; assistant professor.

Zlaman Pavel Nikolaevich – e-mail: otde124d@nkbmius.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; scientific and design Bureau of modelling and controlling systems; lead design engineer.

УДК 004.724

DOI 10.18522/2311-3103-2016-9-121133

С.В. Галич, М.С. Деогенов, В.Г. Каргашевский, А. О. Пасюк, Е. С. Семенов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПКС-КОНТРОЛЛЕРА OPENDAYLIGHT НА СЕТЯХ РАЗНЫХ МАСШТАБОВ

Программно-конфигурируемые сети (ПКС) – одна из наиболее обсуждаемых тем в современной индустрии информационных технологий. Данная концепция организации сетей подразумевает, что весь функционал управления сетью сконцентрирован в едином логическом центре, также называемом ПКС-контроллером. Контроллер представляет собой программное обеспечение, выполняющее функции управления сетью и развёрнутое на одиночном сервере или вычислительном серверном кластере. Статья посвящена исследованию производительности контроллера программно-конфигурируемых сетей OpenDaylight. Данный контроллер представляет собой кроссплатформенное программное обеспечение с открытым исходным кодом на основе виртуальной машины Java (JVM). В соответствии с рекомендациями Инженерного совета Интернета определены ключевые метрики производительности контроллера, а именно задержка и пропускная способность. Показано, что требования к производительности контроллера определяются масштабом сети, а именно числом коммутаторов и оконечных узлов. Разработаны сценарии тестирования задержки и пропускной способности контроллера OpenDaylight с помощью утилиты Cbench. На основании экспериментальных данных установлены зависимости указанных метрик производительности от числа управляемых контроллером коммутаторов и оконечных узлов в сети. Особое внимание уделено влиянию технологии логической многопоточности центрального процессора Intel Hyper-Threading на задержку и пропускную способность ПКС-контроллера. Предложен способ расчёта метрики производительности ПКС-контроллера как суммы метрик задержки и пропускной способности, нормированных на диапазон [0;1] с помощью линейной функции. В результате показано, что использование технологии Hyper-Threading позволяет увеличить производительность ПКС-контроллера. Данный способ может быть использован операторами при расчёте технических норм функционирования сетей связи, закреплённых в договоре об уровне обслуживания (SLA).

Программно-конфигурируемые сети; ПКС-контроллер; OpenDaylight; производительность; задержка; пропускная способность; виртуальная машина Java; логическая многопоточность; центральный процессор; договор об уровне обслуживания.