

УДК 656.073

Выбор теста для проверки вида распределения входной реализации в каналах сетей 5G

- Дворников Сергей Викторович¹** — д-р техн. наук, профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств, заслуженный изобретатель Российской Федерации. Научные интересы: теория связи, помехозащищенность инфокоммуникационных каналов радиотехнических систем, методы совместной частотно-временной обработки сигналов. E-mail: practicsv@yandex.ru
- Казакевич Елена Владимировна²** — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрическая связь». Научные интересы: системы электросвязи, системы и средства электропитания устройств электросвязи. E-mail: kev-pgups@yandex.ru
- Маслова Анна Андреевна²** — аспирант по специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций». Научные интересы: разработка, и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций. E-mail: bloodyelis@yandex.ru
- Ролдугина Елена Ивановна³** — научный сотрудник 31-го отдела 3-го научно-исследовательского управления Научно-исследовательского центра телекоммуникационных технологий ВМВ и разведки. Научные интересы: цифровая обработка сигналов и систем широкополосного доступа. E-mail: zlatoustova88@mail.ru
- Арнадская Юлия Евгеньевна²** — студент 5-го курса направления 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов». Научные интересы: радиотехнические системы на железнодорожном транспорте, применение интеллектуальных технологий на железнодорожном транспорте. E-mail: arnadskayaa@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

³Научно-исследовательский институт оперативно-стратегических исследований, Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова», Россия, 197045, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1

Для цитирования: Дворников С. В., Казакевич Е. В., Маслова А. А., Ролдугина Е. И., Арнадская Ю. Е. Выбор теста для проверки вида распределения входной реализации в каналах сетей 5G // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 83–92. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-83-92

Аннотация. Актуальность предлагаемого исследования определяется тем, что в условиях развития цифровых систем дистанционного управления элементами инфраструктуры железнодорожного транспорта, включающих применение технологии 5G, возрастает необходимость в анализе канала приема-передачи и принципа работы энергетического обнаружителя. Представлено исследование о выборе теста для проверки вида распределения входной реализации в каналах 5G. **Цель:** снижение коллизии в каналах связи, возникающих из-за ошибочного анализа входной реализации. **Методы:** теоретический и эмпирико-аналитический анализ эффективности методов обнаружения сигналов в условиях прерывистых передач. **Результаты:** проведен эксперимент по моделированию случайных выборок при отношении сигнал/шум не менее 10 дБ в канале. Полученная в результате моделирования вероятность правильного принятия решения о прерывистости канала не ниже 0,7 подтвердила правомерность выбора теста Харке — Бера для анализа каналов с прерывистой передачей. **Заключение и новизна:**

авторским вкладом в рассматриваемую проблему является разработка идеи, согласно которой необходимо проведение предварительного анализа входной реализации и учета показателей распределения, таких как асимметрия и эксцесс. В дальнейшем это станет основой для построения адаптивного энергетического обнаружителя, работающего исходя из вида распределения обрабатываемой реализации.

Практическая значимость: заключается в том, что результаты могут быть использованы для повышения надежности и точности работы энергетических обнаружителей в беспроводных системах связи, особенно в условиях ограниченного объема статистических данных и изменяющегося состояния канала. Учет априорной информации о распределении сигнала позволяет оптимизировать процесс настройки обнаружителя, сократить время срабатывания.

Ключевые слова: технология NR-U, энергетический обнаружитель, тест Харке — Бера, широкополосный доступ, канал с прерывистой передачей

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

Введение

В настоящее время диапазоны частот 2,4 ГГц и 5,725 ГГц, изначально выделенные для работы промышленного, научного и медицинского оборудования (Industrial, Scientific and Medical, ISM), планируются к активному использованию в контурах дистанционного управления различными устройствами на железнодорожном транспорте [1, 2].

Как правило, работа в диапазоне ISM организуется в соответствии со стандартами IEEE 802.15.4 и IEEE 802.11. Поскольку указанные диапазоны являются нелицензируемыми, их эксплуатация нередко приводит к возникновению коллизий [3].

Одной из особенностей технологий 5G является организация высокоскоростного широкополосного доступа на основе технологии когнитивного радио [4–6], получившего название NR-U (New Radio Unlicensed). Радиодоступ NR-U базируется на реализации дополнительной процедуры мониторинга диапазона перед непосредственным захватом канала путем случайного доступа (Random Access Channel, RACH).

Учитывая, что доступ NR-U разрабатывается с учетом действующих нормативных документов, то для ISM-диапазонов он соответствует требованиям и предыдущего стандарта LTE (Long Term Evolution) [7, 8]. И решение о занятости канала в нем осуществляется по результатам процедур энерге-

тического обнаружения, предписанных для стандарта LTE [9].

Эффективность энергетических обнаружителей оправдана только в случае априорного знания закона распределения сигнала [10]. А поскольку настройка обнаружителя требует достаточной статистики, то такая процедура предполагает затрату значительного временного ресурса. В таких условиях состояние канала может измениться. Следовательно, знание закона распределения входной реализации является одним из необходимых условий, обеспечивающих эффективность работы энергетического обнаружителя.

Рассмотрению этих вопросов как раз и посвящена настоящая статья.

Особенности работы энергетических обнаружителей в соответствии со стандартом LTE

Поскольку процедура энергетического обнаружителя реализуется посредством быстрого преобразования Фурье в частотной области, то необходима предварительная настройка порога принятия решения о наличии или отсутствии сигналов в анализируемом рабочем канале [11, 12].

Такая настройка приемлема только для стационарных сигналов, и в условиях мощных импульс-

ных излучений достоверность получаемых результатов будет низкой, так как накопление полезной энергии сигнала на длительном интервале с последующим ее усреднением может привести к ошибочным решениям. Однако именно такой характер работы радиолинии характерен для пакетных передач данных [13, 14].

Алгоритм обнаружения сигналов в режиме прерывистых передач получен в [15], где сделан вывод о том, что для обеспечения необходимой эффективной работы обнаружителя необходим большой объем априорной информации, в частности об интенсивности работы передатчика, данных по расчету средней и текущей длительностей сигнала, периодичности занятости канала, а также значения отношения сигнал/шум (Signal-to-noise ratio, SNR) в различные моменты работы радиолинии. Поскольку только в этом случае возможно обеспечить необходимую эффективность работы обнаружителя. На практике в большинстве случаев используют методы обнаружения, основанные на статистическом анализе распределения плотности сигнальной энергии, получившего название теста добротности (Goodness-of-Fit, GoF) [16–18]. Реализация теста GoF предполагает эмпирический анализ распределений обрабатываемых выборок с последующим соотнесением их к ожидаемому типу распределения.

При этом в большинстве случаев полагают, что сумму двух распределений, описываемых функцией Гаусса, также можно считать гауссовой [19]. Но такое утверждение верно только при полной занятости канала на всей длительности интервала наблюдения, что не соответствует действительности.

Вместе с тем суммарный поток амплитудных компонентов сигнала и шума, распределенных по нормальному закону, сохранит гауссову форму только для непрерывного потока выборок зашумленного сигнала, что не соответствует условиям прерывистых передач, характерных для NR-U.

Предварительный анализ, проведенный в [20, 21], показал, что такие условия изначально исключают эффективное использование тестов GoF, поскольку результирующее распределение не будет гауссовым.

Альтернативным подходом в таких условиях видится применение методов анализа, основанных на учете статистических моментов более высокого порядка (Higher-order statistics, HoS), предложенных в [22].

Модель обнаружителя для NR-U

Работу энергетического обнаружителя представим в виде бинарной модели принятия решений, характеризуемой двумя устойчивыми состояниями [23]:

$$z(t) = \begin{cases} x(t), & \text{при } H_0; \\ s(t) + x(t), & \text{при } H_1, \end{cases} \quad (1)$$

где $z(t)$ — обрабатываемая входная реализация;

$s(t)$ — полезный сигнал с неизвестными параметрами;

$x(t)$ — аддитивный белый гауссов шум (Additive White Gaussian Noise, AWGN).

В соответствии с бинарной моделью, правило принятия решения $\Lambda(x)$, характеризующее текущее состояние радиоканала, в соответствии с условием (1), будет определяться двумя гипотезами:

- H_0 — обрабатываемая реализация $z(t)$ содержит только шум $x(t)$;
- H_1 — обрабатываемая реализация содержит аддитивную смесь полезного сигнала $s(t)$ и AWGN $x(t)$.

Тогда, определив в качестве энергетического порога величину G_0 , результирующее правило принятия решения $\Lambda(x)$ представим как

$$\begin{cases} H_0 & \text{— } \Lambda(t) < G_0, \\ H_1 & \text{— } \Lambda(t) \geq G_0. \end{cases} \quad (2)$$

Далее будем полагать, что приемник обрабатывает входную реализацию $z(t)$, состоящую из $t = 1 \dots N$ отчетов, взятых с частотой дискретизации $f_s = N/T$ на длительности интервала обнаружения, равного T .

Тогда сигнал пакетной передачи как объект обнаружения представим в виде динамического процесса, принимающего случайным образом моменты своего состояния, определяемые в соответствии со сформулированными гипотезами H_1 и H_0 .

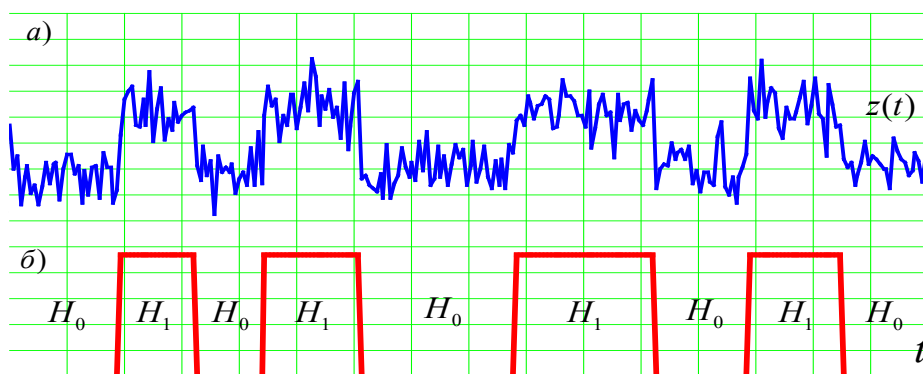


Рис. 1. Обрабатываемая реализация и временные интервалы, соответствующие характеризующим ее гипотезам

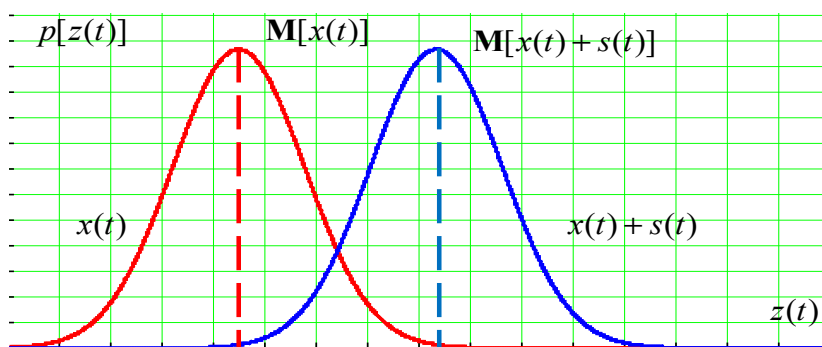


Рис. 2. Распределение входной реализации: шума $x(t)$ и аддитивной смеси полезного сигнала и шума $x(t) + s(t)$ для непрерывной передачи

Если допустить, что характер детерминированного сигнала $s(t)$ пакетной передачи не зависит от интервала обнаружения, то такой процесс может быть описан экспоненциальным распределением со средними значениями параметров τ и η [13].

В качестве примера на рис. 1, а представлена входная реализация $z(t)$, а на рис. 1, б — временные интервалы, характеризующие ее гипотезы.

Согласно выражению (2) и иллюстрациям (рис. 1), эффективность энергетического обнаружителя следует рассматривать с позиций соответствия обрабатываемой реализации на интервале обработки выдвинутой гипотезе.

Обоснование выбора теста для проверки вида распределения входной реализации

В статистическом анализе решение подобной задачи формально может быть сведено к проверке соответствия распределения функции Гаусса.

Для этого разработано достаточно большое количество различных тестов, таких как тесты Шапиро — Уилка, Андерсона — Дарлинга, Колмогорова — Смирнова и др. [24].

В общем случае для непрерывного канала наличие полезного сигнала приведет лишь к смещению распределения по оси абсцисс (рис. 2).

На рис. 2 введены следующие обозначения:

$M[x(t)]$ — математическое ожидание выборки, содержащей только шум;

$M[s(t) + x(t)]$ — математическое ожидание выборки, содержащей полезный сигнал и шум;

$p[z(t)]$ — показатель частоты проявления амплитудных значений входной выборки [25].

В то же время распределение входной реализации прерывистой передачи будет иметь распределение с ярко выраженной седловой точкой (рис. 3).

В подтверждение сделанной гипотезы на рис. 4 показано распределение выборки, изображенной на рис. 1.

Очевидно, что наличие характерного выброса формируемого распределения справа может служить одним из факторов, характеризующих работу канала с прерывистой передачей.

Для рассмотренной ситуации в [26] рекомендован тест Харке — Бера (JB), основанный на учете эксцесса и асимметрии обрабатываемого распределения.

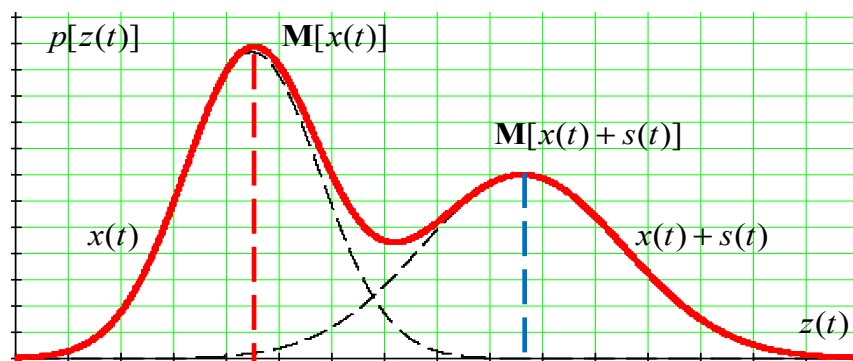


Рис. 3. Распределение входной реализации: шума $x(t)$ и аддитивной смеси полезного сигнала и шума $x(t) + s(t)$ для прерывистой передачи

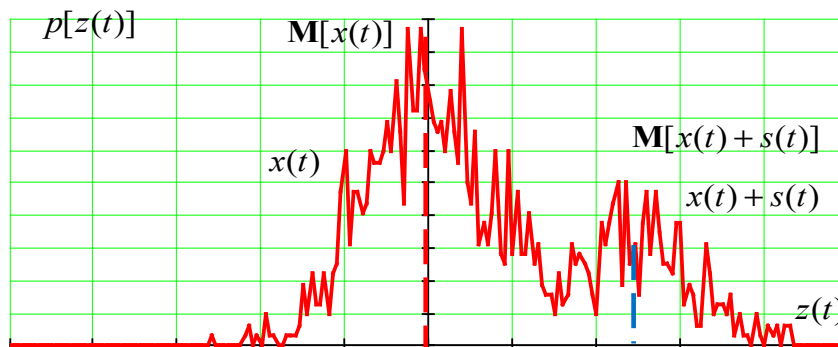


Рис. 4. Распределение входной реализации $z(t)$

Статистика теста JB определяется как

$$JB = \frac{N}{6} \left[S^2 + \frac{(K-3)^2}{4} \right],$$

где N — количество дискретных отчетов выборки;

S — коэффициент асимметрии выборки;

K — коэффициент эксцесса.

Проведенный эксперимент по моделированию ситуации при различных соотношениях интервалов выборки, соответствующих гипотезам $\gamma = H_0 / H_1$, позволил получить вероятность правильного принятия решения о прерывистости канала P_0 по критерию теста JB (табл. 1).

Результаты, представленные в табл. 1, получены по данным обработки случайных выборок (по 200 выборок для каждой градации γ). Обработка проводилась при отношении сигнал/шум не менее 10 дБ в канале.

Таблица 1

Оценка эффективности теста Харке — Бера

γ	<0,100	0,125	0,250	0,500	1,000	2,000	4,000	8,000	>10,000
P_0	0,75	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующее заключение. Наличие прерывистого канала, характерного для сетей широкополосного доступа технологий NR-U, требует адаптивного выбора вида энергетического обнаружителя в зависимости от вида распределения обрабатываемой реализации.

Поэтому важным моментом видится проведение предварительного анализа, позволяющего оценить степень гауссовости распределения. Для этого предлагается использовать тест Харке — Бера, основанный на учете таких показателей распределения, как асимметрии и эксцесс.

Моделирование подтвердило правомерность такого выбора. Полученная вероятность правильного выбора была не ниже 0,7, при условии, что $\gamma > 10$ и $\gamma < 0,1$.

Дальнейшие исследования авторы связывают с применением методов кратномасштабной обработки входных реализаций [27, 28].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Роенков Д. Н., Плеханов П. А. Мобильные сети поколения 5G: перспективы применения // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 10. С. 2–7. DOI: 10.34649/AT.2020.10.10.001.
2. Метод четырехчастотной инициализации каналов связи транспортного домена сетей 5G / А. Ал. Василец, А. Ан. Василец, А. Аль-Муфти [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 11. С. 339–342.
3. Карпов И. В. Беспроводная экскурсионная система с активными метками на основе стандарта IEEE 802.15.4 // Инновационные информационные технологии: материалы Второй научно-практической конференции (Прага, Чехия, 22–26 апреля 2013 г.). Т. 4. Инновационные информационные технологии в экономической и социальной сферах. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 86–90.
4. Hu F., Chen B., Zhu K. Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 15754–15776. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2802450.
5. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Русин А. А. Обобщенная функциональная модель радиолинии с управлением ее частотным ресурсом // Вопросы радиоэлектроники, серия Техника телевидения. 2016. Вып. 3. С. 49–56.
6. Akhtar A. N., Arif F., Siddique A. M. Spectrum Decision Framework to Support Cognitive Radio Based IoT in 5G // Cognitive Radio in 4G/5G Wireless Communication Systems / S. S. Moghaddam (ed.). Rijeka: IntechOpen, 2018. Pp. 73–92. DOI: 10.5772/intechopen.80991.
7. Дворников С. В., Крячко А. Ф., Пшеничников А. В. Моделирование радиотехнических систем в конфликтных ситуациях когнитивного характера // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы (WECONF–2019): сборник статей XXII Международной научной конференции (Санкт-Петербург, Россия, 03–07 июня 2019 г.): в 2 ч. Ч. 2. СПб.: ГУАП, 2019. С. 84–89.
8. Фролов А. А. Анализ современных стандартов: McWILL, TD-SCDMA, WCDMA, IEEE 802.15.3a для применения в СШП-системах // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. 2012. № 9. С. 144–148.
9. Atapattu S., Tellambura C., Jiang H. Conventional Energy Detector // Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio. New York: Springer, 2014. Pp. 11–26. DOI: 10.1007/978-1-4939-0494-5_2.
10. Дворников С. В., Алексеева Т. Е. Распределение Алексеева и его применение в задачах частотно-временной обработки сигналов // Информация и космос. 2006. № 3. С. 9–20.
11. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформированными созвездиями / С. В. Дворников, А. В. Пшеничников, А. А. Русин, А. С. Дворников // Вопросы радиоэлектроники, серия Техника телевидения. 2014. Вып. 2. С. 51–56.
12. Бокова Е. А., Поветко В. Н., Полев В. Ю. Моделирование многоканального энергетического обнаружителя для DMR радиосистем // Теория и техника радиосвязи. 2023. № 2. С. 15–20.
13. Barela M. C., Marciano J. S. An Empirical Study on the Performance of a Spectrum Sensing Scheme for Cognitive Radio // Proceedings of the 17th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), (Sydney, Australia, 07–10 September 2014). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. Pp. 474–479. DOI: 10.1109/WPMC.2014.7014865.
14. Efficient Energy Detection Methods for Spectrum Sensing Under Non-Flat Spectral Characteristics / S. Dikmese, P. C. Sofotasios, T. Ihalainen [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2015. Vol. 33, Iss. 5. Pp. 755–770. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2361074.
15. Düzenli T., Akay O. A New Method of Spectrum Sensing in Cognitive Radio for Dynamic and Randomly Modelled Primary Users // IETE Journal of Research. 2022. Vol. 68, Iss. 2. Pp. 967–965. DOI: 10.1080/03772063.2019.1628668.
16. Arjoune Y., Kaabouch N. A Comprehensive Survey on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Recent Advances, New Challenges, and Future Research Directions // Sensors. 2019. Vol. 19, Iss. 1. Art. No. 126. 32 p. DOI: 10.3390/s19010126.
17. Демодуляция сигналов на основе обработки их модифицированных распределений / С. В. Дворников, А. И. Осадчий, С. С. Дворников, Д. В. Родин // Контроль. Диагностика. 2010. № 10. С. 46–54.

18. Aneja B., Sharma K., Rana A. Spectrum Sensing Techniques for a Cognitive Radio Network // *Advances in System Optimization and Control: Select Proceedings of ICAEDC 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 509 / S. N. Singh [et al.] (eds.). Singapore: Springer Singapore, 2019. Pp. 133–144. DOI: 10.1007/978-981-13-0665-5_11.
19. Lemons D. S. *An Introduction to Stochastic Processes in Physics*. Baltimore (MD): The Johns Hopkins University Press, 2002. 128 p.
20. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой / С. В. Дворников, С. С. Дворников, С. С. Мананенко, А. В. Пшеничников // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2016. Т. 12, № 2. С. 87–93.
21. Ameijeiras-Alonso J., Crujeiras R. M., Rodríguez-Casal A. Mode Testing, Critical Bandwidth and Excess Mass // *Test*. 2019. Vol. 28, Iss. 3. Pp. 900–919. DOI: 10.1007/s11749-018-0611-5.
22. A HOS-Based Blind Spectrum Sensing in Noise Uncertainty / A. Subekti, Sugihartono, N. R. Syambas, A. B. Suksmono // *Journal of ICT Research and Applications*. 2015. Vol. 9, No. 1. Pp. 20–38. DOI: 10.5614/itbj.ict.res.appl.2015.9.1.2.
23. Защита от структурных помех радиоканалов с частотной манипуляцией / С. В. Дворников, С. С. Дворников, Р. В. Иванов [и др.] // *Информационные технологии*. 2017. Т. 23, № 3. С. 193–198.
24. Леньшин А. В., Тихомиров Н. М., Шаталов Е. В. Определение спектра шумов помех дробности в непрерывной нелинейной модели системы фазовой автоподстройки // *Телекоммуникации*. 2017. № 12. С. 2–6.
25. Дворников С. В., Дворников С. С., Пшеничников А. В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты // *Информационно-управляющие системы*. 2019. № 4 (101). С. 62–68. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-4-62-68.
26. A Spectrum Sensing Algorithm Based on Statistic Tests for Cognitive Networks Subject to Fading / F. B. S. de Carvalho, J. S. Rocha, W. T. A. Lopes, M. S. Alencar // *Proceedings of the 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, (Lisbon, Portugal, 01–05 September 2014). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. Pp. 850–854.
27. Дворников С. В., Дворников С. С., Жеглов К. Д. Проактивный контроль пригодности радиоканалов в режиме ППРЧ // *T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт*. 2022. Т. 16, № 11. С. 15–20. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20.
28. Формирование векторов признаков для систем видеонаблюдения / Д. В. Васильева, С. С. Дворников, Ю. Е. Толстуха [и др.] // *Вопросы радиоэлектроники, серия Техника телевидения*. 2023. Вып. 4. С. 62–68.

Дата поступления: 23.05.2025

Решение о публикации: 27.05.2025

Selection of a Test for the Type of Input Distribution in 5G Network Channels

- Sergey V. Dvornikov**¹ — Dr. Sci. in Engineering, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Devices, Honored Inventor of the Russian Federation. Research interests: communication theory, noise immunity of info-communication channels of radio engineering systems, methods of joint time-frequency signal processing. E-mail: practicsv@yandex.ru
- Elena V. Kazakevich**² — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Electrical Communication Department. Research interests: telecommunication systems, systems and means of power supply of telecommunication devices. E-mail: kev-pgups@yandex.ru
- Anna A. Maslova**² — Postgraduate Student, Department of Electrical Communications, specialty 2.2.15 “Systems, networks and telecommunication devices”. Research interests: development and improvement of research methods, modelling and design of networks, systems and devices of telecommunications. E-mail: bloodyelis@yandex.ru
- Elena I. Roldugina**³ — Scientific Researcher of 31st Department, 3rd the Scientific Research Department of the Scientific Research Center for Telecommunication Technologies of WWII and Intelligence. Research interests: digital signal processing and broadband access systems. E-mail: zla-toustova88@mail.ru
- Yuliya E. Arnadskaya**² — 5th-year student of the 23.05.05 programme “Train Traffic Control Systems”. Research interests: radio engineering systems in railway transport, application of intelligent technologies in railway transport. E-mail: arnadskayaa@yandex.ru

¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, 190000, Russia

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

³Scientific Research Institute for Operational and Strategic Studies, Military Educational and Scientific Centre of the Navy “The Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G.Kuznetsov”, 17/1 Ushakovskaya emb., Saint Petersburg, 197045, Russia

For citation: Dvornikov S. V., Kazakevich E. V., Maslova A. A., Roldugina E. I., Arnadskaya Yu. E. Selection of a Test for the Type of Input Distribution in 5G Network Channels. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 83–92. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-83-92. (In Russian)

Abstract. *The relevance of the proposed study is determined by the fact that, in the context of the development of digital remote control systems for elements of the railway transport infrastructure based on 5G technology, the need for analyzing the transmission-reception channel and the operating principle of the energy detector has increased. The present paper proposes the test selection analysis for the type of input distribution in 5G channels. **Purpose:** to minimize the occurrence of collisions in communication channels that are the result of erroneous analysis of the input implementation. **Methods:** theoretical and empirical-analytical analysis of the efficiency of signal detection methods in case of intermittent transmissions. **Results:** the experiment was conducted with the objective of simulating random samples with a signal-to-noise ratio of no less than 10 dB in the channel. The probability of the correct decision on channel intermittency of no less than 0.7 obtained as a result of modelling confirmed the validity of choosing the Jarque–Bera test for analyzing channels with intermittent transmission. **Conclusion and novelty:** the author’s contribution to the issue under consideration is the development of a concept for conducting a preliminary analysis of the input implementation, with distribution indicators such as asymmetry and excess being taken into account. In the future, this will form the basis for constructing an adaptive energy detector that will operate according to the type of distribution of the processed implementation. **Practical significance:** the findings can be utilized to enhance the reliability and precision of energy detectors in wireless communication systems, particularly in scenarios where statistical data is limited*

and channel conditions are subject to change. It is evident that, given a priori information on signal distribution, the optimization of the detector setup process and the reduction of response time can be achieved.

Keywords: NR-U technology, energy detector, Jarque–Bera test, broadband access, intermittent transmission channel

REFERENCES

1. Roenkov D. N., Plekhanov P. A. Mobilnye seti pokoleniya 5G: perspektivy primeneniya [Mobile Networks of the 5G Generation: Application Prospects], *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2020, No. 10, Pp. 2–7. DOI: 10.34649/AT.2020.10.10.001. (In Russian)
2. Vasilets A. Al., Vasilets A. An., Al-Mufti A., et al. Metod chetyrekhchastotnoy initsializatsii kanalov svyazi transportnogo domena setey 5G [The Four-Frequency Initialization Method for 5G Transport Domain Communication Channels], *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya [Scientific and Technical Volga Region Bulletin]*, 2023, No. 11, Pp. 339–342. (In Russian)
3. Karpov I. V. Besprovodnaya ekskursionnaya sistema s aktivnymi metkami na osnove standarta IEEE 802.15.4 [A Wireless Excursion System with Active Tags Based on IEEE 802.15.4 Standard], *Innovatsionnye informatsionnye tekhnologii: materialy Vtoroy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovative Information Technologies: Materials of the Second International Scientific and Practical Conference]*, Prague, Czech Republic, April 22–26, 2013. Vol. 4. Moscow, HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, 2013, Pp. 86–90. (In Russian)
4. Hu F., Chen B., Zhu K. Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, Pp. 15754–15776. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2802450.
5. Dvornikov S. V., Pshenichnicov A. V., Rusin A. A. Obobshchennaya funktsionalnaya model radiolinii s upravleniem ee chastotnym resursom [Generalized Functional Model of a Radio Link Control Its Frequency Resource], *Voprosy Radioelektroniki, Seriya Tekhnika Televideniya*, 2016, Iss. 3, Pp. 49–56. (In Russian)
6. Akhtar A. N., Arif F., Siddique A. M. Spectrum Decision Framework to Support Cognitive Radio Based IoT in 5G. In: *Moghaddam S. S. (ed.) Cognitive Radio in 4G/5G Wireless Communication Systems*. Rijeka, IntechOpen, 2018, Pp. 73–92. DOI: 10.5772/intechopen.80991.
7. Dvornikov S. V., Kryachko A. F., Pshenichnikov A. V. Modelirovanie radiotekhnicheskikh sistem v konfliktnykh situatsiyakh kognitivnogo kharaktera [Research of Radio Engineering Systems in Conflict Situations of Cognitive Character], *Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy (WECONF–2019): sbornik statey XXII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Wave Electronics and Infocommunication Systems (WECONF–2019): Proceedings of the XXII International Scientific Conference]*, Saint Petersburg, Russia, June 03–07, 2019. Part 2. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2019, Pp. 84–89. (In Russian)
8. Frolov A. A. Analiz sovremennykh standartov: McWILL, TD-SCDMA, WCDMA, IEEE 802.15.3a dlya primeneniya v SSHP-sistemakh [Analysis of the Current Standards: McWILL, TD-SCDMA, WCDMA, IEEE 802.15.3a], *T-Comm — Telekommunikatsii i Transport [T-Comm — Telecommunications and Transport]*, 2012, No. 9, Pp. 144–148. (In Russian)
9. Atapattu S., Tellambura C., Jiang H. Conventional Energy Detector. In: *Atapattu S., Tellambura C., Jiang H. Energy Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio*. New York, Springer, 2014, Pp. 11–26. DOI: 10.1007/978-1-4939-0494-5_2.
10. Dvornikov S. V., Alekseeva T. E. Raspredelenie Alekseeva i ego primenenie v zadachakh chastotno-vremennoy obrabotki signalov [Alekseev Distribution and Its Application in Time-Frequency Signal Processing Problems], *Informatiya i kosmos [Information and Space]*, 2006, No. 3, Pp. 9–20. (In Russian)
11. Dvornikov S. V., Pshenichnicov A. V., Rusin A. A., Dvornikov A. S. Povyshenie pomekhoustoychivosti signalov KAM-16 s transformirovannymi sozvezdizhami [Increased Noise Immunity Signal 16-QAM Constellation with Transformed], *Voprosy Radioelektroniki, Seriya Tekhnika Televideniya*, 2014, Iss. 2, Pp. 51–56. (In Russian)
12. Bokova Ye. A., Povetko V. N., Polev V. Yu. Modelirovanie mnogokanalnogo energeticheskogo obnaruzhitelya dlya DMR radiosistem [Simulation of a Multichannel Energy Detector for DMR Radio Systems], *Teoriya i tekhnika radiosvyazi [Theory and Technology of Radio Communication]*, 2023, No. 2, Pp. 15–20. (In Russian)
13. Barela M. C., Marciano J. S. An Empirical Study on the Performance of a Spectrum Sensing Scheme for Cognitive Radio, *Proceedings of the 17th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*,

Sydney, Australia, September 07–10, 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, Pp. 474–479. DOI: 10.1109/WPMC.2014.7014865.

14. Dikmese S., Sofotasios P. C., Ihalainen T., et al. Efficient Energy Detection Methods for Spectrum Sensing Under Non-Flat Spectral Characteristics, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, Vol. 33, Iss. 5, Pp. 755–770. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2361074.

15. Düzenli T., Akay O. A New Method of Spectrum Sensing in Cognitive Radio for Dynamic and Randomly Modelled Primary Users, *IETE Journal of Research*, 2022, Vol. 68, Iss. 2, Pp. 967–965. DOI: 10.1080/03772063.2019.1628668.

16. Arjoune Y., Kaabouch N. A Comprehensive Survey on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Recent Advances, New Challenges, and Future Research Directions, *Sensors*, 2019, Vol. 19, Iss. 1, Art. No. 126, 32 p. DOI: 10.3390/s19010126.

17. Dvornikov S. V., Osadchy A. I., Dvornikov S. S., Rodin D. V. Demodulyatsiya signalov na osnove obrabotki ikh modifitsirovannykh raspredeleniy [Demodulation Based on Processing the Modified Distributions], *Kontrol. Diagnostika [Testing. Diagnostics]*, 2010, No. 10, Pp. 46–54. (In Russian)

18. Aneja B., Sharma K., Rana A. Spectrum Sensing Techniques for a Cognitive Radio Network. In: Singh S. N., et al. (eds.) *Advances in System Optimization and Control: Select Proceedings of ICAEDC 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 509*. Singapore, Springer Singapore, 2019, Pp. 133–144. DOI: 10.1007/978-981-13-0665-5_11.

19. Lemons D. S. An Introduction to Stochastic Processes in Physics. Baltimore (MD), The Johns Hopkins University Press, 2002, 128 p.

20. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Manaenko S. S., Pshenichnicov A. V. Spektralno-effektivnye signaly s nepreryvnoy fazoy [Spectral-Efficient Signal with the Continuous Phase], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Voronezh State Technical University]*, 2016, Vol. 12, No. 2, Pp. 87–93. (In Russian)

21. Ameijeiras-Alonso J., Crujeiras R. M., Rodríguez-Casal A. Mode Testing, Critical Bandwidth and Excess Mass, *Test*, 2019, Vol. 28, Iss. 3, Pp. 900–919. DOI: 10.1007/s11749-018-0611-5.

22. Subekti A., Sugihartono, Syambas N. R., Suksmono A. B. A HOS-Based Blind Spectrum Sensing in Noise Uncertainty, *Journal of ICT Research and Applications*, 2015, Vol. 9, No. 1, Pp. 20–38. DOI: 10.5614/itbj.ict.res.appl.2015.9.1.2.

23. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Ivanov R. V., et al. Zashchita ot strukturnykh pomekh radiokanalov s chastotnoy manipulyatsiyey [Protection of Structural Noise Radio Channel Frequency Shift Keying], *Informatsionnye tekhnologii [Information Technologies]*, 2017, Vol. 23, No. 3, Pp. 193–198. (In Russian)

24. Lenshin A. V., Tikhomirov N. M., Shatalov E. V. Opredelenie spektra shumov pomekh drobnosti v nepreryvnoy nelineynoy modeli sistemy fazovoy avtopodstroyki [Determination of Fractional Interference Noise Spectrum in Continuous Nonlinear Model of Phase-Locking System], *Telekommunikatsii [Telecommunications]*, 2017, No. 12, Pp. 2–6. (In Russian)

25. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Pshenichnikov A. V. Apparat analiza chastotnogo resursa dlya rezhima psevdosluchaynoy perestroyki rabochey chastoty [Analysis of Frequency Resource for FHSS Mode], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2019, No. 4 (101), Pp. 62–68. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-4-62-68 (In Russian).

26. de Carvalho F. B. S., Rocha J. S., Lopes W. T. A., Alencar M. S. A Spectrum Sensing Algorithm Based on Statistic Tests for Cognitive Networks Subject to Fading, *Proceedings of the 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lisbon, Portugal, September 01–05, 2014*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. Pp. 850–854.

27. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Zheglov K. D. Proaktivnyy kontrol prigodnosti radiokanalov v rezhime PPRCh [Proactive Suitability Control of Radio Channels in IFB Mode], *T-Comm: Telekommunikatsii i Transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]*, 2022, Vol. 16, No. 11, Pp. 15–20. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20. (In Russian)

28. Vasilyeva D. V., Dvornikov S. S., Tolstukha Yu. E., et al. Formirovanie vektorov priznakov dlya sistem videonablyudeniya [Formation of Feature Vectors for Video Surveillance Systems], *Voprosy Radioelektroniki, Seriya Tekhnika Televideniya*, 2023, No. 4, Pp. 62–68. (In Russian)

Received: 23.05.2025

Accepted: 27.05.2025