

Анализ эффективности использования реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей в сценариях V2X¹

С. С. Тронин*, А. О. Горбунова*, Е. О. Ендовицкий*, К. А. Глинский*, А. С. Тярин*

Email: {tronin, gorbunova, endovitskiy, glinsky, tyarin}@wnlab.ru

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук

Поступила в редколлегию 07.09.2025 г. Принята 03.12.2025

Аннотация—В сценарии использования технологии V2X (англ.: Vehicle-to-Everything) накладываются жесткие требования на задержку передачи пакета, а также на вероятность его успешной передачи. Одним из способов удовлетворить данные требования является использование реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (англ.: Reconfigurable Intelligent Surface, RIS). В данной работе исследуется влияние RIS различных размеров на медианное значение спектральной эффективности канала, а также на форму ее распределения. Результаты показали, что использование RIS увеличивает медианное значение спектральной эффективности канала, 10%-й квантиль и 1%-й квантиль на 11 бит/с/Гц, 13 бит/с/Гц и 16 бит/с/Гц соответственно, а также уменьшает ширину хвоста ее распределения в 19 раз при использовании RIS из 900 элементов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: 5G New Radio, V2X, RIS, URLLC.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_4_747

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология V2X (англ.: Vehicle-to-Everything) является одним из ключевых элементов будущих интеллектуальных транспортных систем, обеспечивающим критически важные для безопасности приложения [1,2]. В отличие от традиционных мобильных приложений, ориентированных на высокую среднюю пропускную способность, V2X накладывает жесткие требования на надежность и задержку передачи. Спецификации 3GPP 5G NR предписывают вероятность потери пакета не выше 10^{-5} и задержку передачи пакета 10 – 100 мс для сверхнадежной связи с малой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low Latency Communication, URLLC) [3]. При этом автомобильные сценарии характеризуются высокой мобильностью и отсутствием канала прямой видимости (англ.: Non-Line of Sight, NLoS), где возможны глубокие замирания. В данном сценарии становятся важными не только медианные и средние значения характеристик канала передачи, таких как, например, пропускная способность, но и формы их распределений.

В литературе встречаются разные способы удовлетворения данных требований, такие как методы помехоустойчивого кодирования [4], методы чувствительного ко времени обмена данных (англ.: Time-Sensitive Networking, TSN) [5], а также использование реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (англ.: Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) [6]. RIS представляют собой перспективную технологию для улучшения покрытия и пропускной способности беспроводных систем за счет введения управляемых электромагнитных отражений [7]. RIS

¹ Исследование осуществлено в рамках Госзадания № FFNU-2025-0030 ИППИ РАН.

является периодической структурой состоящей из элементарных ячеек (англ.: Unit Cell, UC), каждая из которых способна вносить фазовый сдвиг в отраженный сигнал [8]. Оптимизируя эти сдвиги, RIS может потенциально устранить блокировку сигнала и повысить отношение сигнал/шум (ОСШ) на приемнике [9, 10]. Большинство работ по RIS сфокусировано на увеличении усредненных или медианных значений таких характеристик, как ОСШ или пропускная способность сети [11–17]. При этом влияние RIS на форму распределения данных характеристик остается малоисследованным. Для V2X и других приложений, критичных к надежности, этот эффект изменения формы распределения может быть решающим. При низких значениях 1%-ого или 0,1%-ого квантиля ОСШ или больших промежутках времени, в течение которых значение ОСШ остается низким, требуемые ограничения URLLC могут оказаться неудовлетворенными. Использование RIS приводит к уменьшению длительности замираний, а также их глубины, что может помочь удовлетворить ограничения требуемые URLLC.

В данной работе исследуется влияние RIS на медианные значения спектральной эффективности канала I , а также на форму ее распределения. С помощью имитационного моделирования показано, что наличие RIS с большим количеством UC в сценарии V2X увеличивает как медианные значения, так и значения 10%-го и 1%-го квантилей I (p_{10} и p_1). Для описания поведения хвоста распределения I применяются инструменты теории экстремальных значений (англ.: Extreme Value Theory, EVT). Одним из них является метод превышения порога (англ.: Peaks Over Threshold, POT) [18] с аппроксимацией обобщенным распределением Парето для характеристики тяжести хвоста через параметр масштаба σ . Также применяются уровни превышения EVT для оценки крутизны хвоста и индекс кластеризации θ для измерения временной кластеризации замираний канала.

Данная работа имеет следующую структуру. В разделе 2 описывается используемая модель беспроводной сети, а также используемые методы ее исследования. В разделе 3 приводятся численные результаты. Наконец, в разделе 4 подводятся итоги работы.

2. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим беспроводную сеть, состоящую из базовой станции 5G (Tx), подвижного приемника (Rx) и RIS. Канал прямой видимости отсутствует (NLoS). Передачи происходят от Tx к Rx в канале с рабочей частотой f и рабочей полосой B . RIS состоит из $n \times n$ UC, каждая из которых способна вносить фазовый сдвиг ϕ_m из дискретного набора, где m — номер UC.

Эквивалентная матрица канала в рабочей полосе в интервал передачи (англ.: Transmission Time Interval, TTI) t (длительность 1 мс) вычисляется по следующей формуле:

$$h_{\text{eff}}(t) = h_d(t) + \sum_{m=1}^M h_{\text{TR},m}(t) \Gamma_m h_{\text{RR},m}(t), \quad (1)$$

где $h_d(t)$ — матрица прямого канала Tx–Rx в TTI t , $h_{\text{TR},m}(t)$ и $h_{\text{RR},m}(t)$ — матрицы каналов Tx–RIS и RIS–Rx в TTI t для m -й UC соответственно, $\Gamma_m = e^{j\phi_m}$ — состояние фазы UC, $M = n^2$ — число UC.

Матрицы каналов $h_d(t)$, $h_{\text{TR},m}(t)$, $h_{\text{RR},m}(t)$ получены с помощью стохастической геометрической модели канала QuaDRiGa в сценарии городской микросоты. Набор данных охватывает $T = 160\,000$ TTI.

ОСШ на приемнике в TTI t вычисляется по следующей формуле:

$$\text{SNR}(t) = \frac{P_{\text{Tx}} |h_{\text{eff}}(t)|^2}{N_0 B}, \quad (2)$$

где P_{Tx} — мощность передачи, $N_0 = -165$ дБм/Гц — спектральная плотность мощности шума на приемнике. Спектральная эффективность канала в TTI t определяется как

$$I(t) = \log_2(1 + \text{SNR}(t)). \quad (3)$$

Для описания формы хвоста распределения I используется метод POT. Метод POT моделирует распределение значений I , находящихся ниже порога u , с помощью обобщенного распределения Парето (англ.: Generalized Pareto Distribution, GPD) с параметром масштаба $\sigma > 0$.

При большом значении u количество превышений данного порога будет небольшим, что приведет к высокой дисперсии оценки GPD. При небольшом значении u ухудшается сходимость хвоста распределения к GPD. Порог u устанавливается на эмпирическом 1%-ном квантиле I , что позволяет сохранить небольшую дисперсию при хорошем уровне точности аппроксимации GPD.

Из полученного GPD вычисляются уровни превышения R_ε , определяемые как пороговые значения I , которые превышаются с вероятностью ε . Для оценки крутизны хвоста распределения I используется следующая формула:

$$\Delta R = R_{1\%} - R_{10\%}. \quad (4)$$

Для оценки длительности замирания канала используется индекс кластеризации экстремумов $\hat{\theta}_r$. Кластер замираний определяется как идущие подряд замирания, разделенные не менее r TTI. $\hat{\theta}_r$ рассчитывается методом серий по следующей формуле:

$$\hat{\theta}_r = \frac{N_{cl}}{N_{all}}, \quad (5)$$

где N_{cl} — количество кластеров, N_{all} — количество всех замираний канала. При этом средняя длительность замирания равна $\frac{1}{\hat{\theta}_r}$, в расчетах эмпирически принято $r = 5$ TTI.

3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим беспроводную сеть со следующими параметрами: $P_{Tx} = 20$ дБм, $f = 3,6$ ГГц, $B = 10$ МГц. RIS имеет однобитное квантование по фазе, то есть $\phi_m \in \{0, \pi\}$, что соответствует $\Gamma_m \in \{1, -1\}$. Фазовый сдвиг Γ_m вычисляется таким образом, чтобы лучи Tx-RIS-Rx приходили на приемник синфазно с прямым каналом:

$$\Gamma_m = \text{sign}(\text{Re}[h_d^*(t) h_{TR,m}(t) h_{RR,m}(t)]). \quad (6)$$

Размер RIS n варьируется от 0, что соответствует случаю без RIS, до 30.

3.1. Увеличение медианного значения, p_{10} и p_1

В данном подразделе рассматривается зависимость медианного значения I , а также p_{10} и p_1 от линейного размера RIS n , представленная на рис. 1. Как видно на графиках, медиана I монотонно возрастает от значения 6,62 бит/с/Гц (без RIS) до 17,64 бит/с/Гц при $n = 30$, что соответствует чистому усилению до 11,02 бит/с/Гц. При этом скорость роста I уменьшается при увеличении n , что согласуется с каскадными потерями на трассе, частичной когерентностью и 1-битным квантованием фазы.

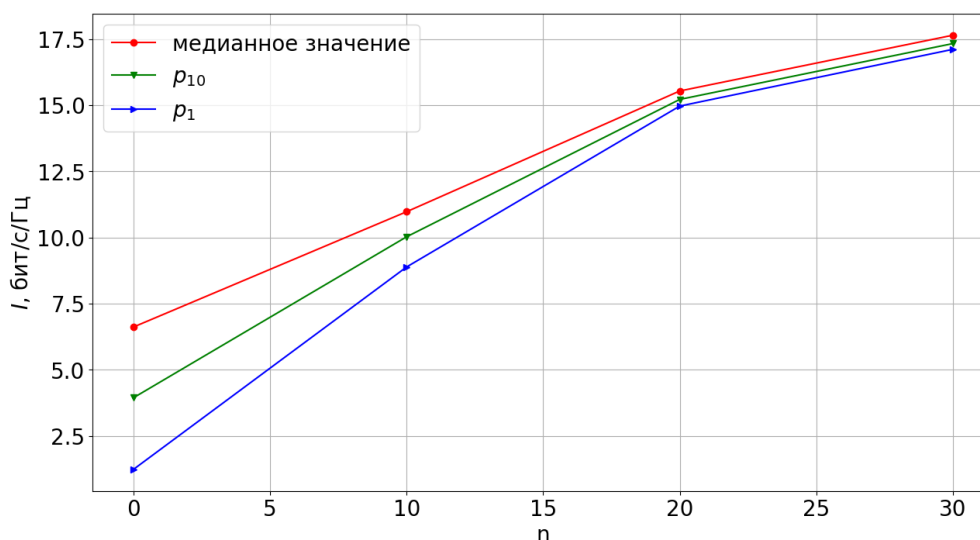


Рис. 1. Зависимость спектральной эффективности I от количества элементов RIS n .

Зависимости p_{10} и p_1 от n имеют аналогичный характер, однако скорость роста p_{10} больше скорости роста медианного значения, а скорость роста p_1 , в свою очередь, больше скорости роста p_{10} . Такое различие говорит о непропорциональном росте различных квантилей распределения I , что является признаком изменении формы хвоста распределения I .

Также по графикам видно, что при увеличении n уменьшается разность между p_{10} и p_1 с 2,7 бит/с/Гц (без RIS) до 0,22 бит/с/Гц (30×30). Данное уменьшение говорит о сужении хвоста распределения I при увеличении n , что, в свою очередь, является признаком изменения формы распределения I . Сужение хвоста распределения I говорит об уменьшении вероятности глубоких замираний канала, что соответствует увеличению вероятности успешной передачи пакета. Также уменьшение вероятности глубоких замираний приводит к уменьшению вероятности длительных глубоких замираний, что соответствует уменьшению задержки передачи.

3.2. Изменение формы хвоста распределения I : GPD-модели

На рис. 2 представлены зависимости I от времени. На графике видно, что глубина замираний при увеличении n уменьшается, при этом глубокие замирания становятся более редкими. Также по графикам видно, что наличие RIS даже с небольшим n приводит к значительному уменьшению глубины замираний.

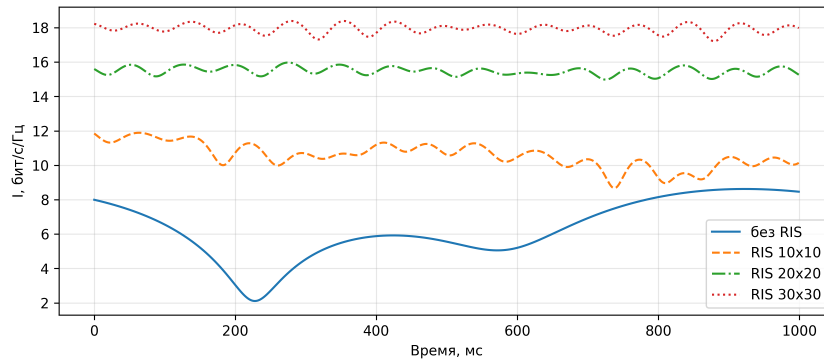


Рис. 2. Зависимость спектральной эффективности I от времени при различных n .

Данные зависимости подтверждаются параметрами GPD для нижнего хвоста I , представленными в таблице 1.

Таблица 1. Параметры GPD для нижнего хвоста I .

Конфигурация	u (бит/с/Гц)	σ
Без RIS	1,24	1,15
10×10	8,89	0,42
20×20	14,97	0,089
30×30	17,11	0,059

Параметр масштаба σ , равный среднему значению $u - I$, демонстрирует резкое уменьшение: от 1,14 (без RIS) до 0,42 (10×10), далее до 0,059 (30×30). Таким образом, глубина замираний из худшего 1% уменьшается практически на два порядка при росте n , что является характерным для GPD признаком облегчения хвоста.

Уровни превышения R_ε для $\varepsilon \in \{1\%, 5\%, 10\%\}$ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Уровни превышения R_ε (бит/с/Гц).

Конфигурация	$R_{1\%}$	$R_{5\%}$	$R_{10\%}$
Без RIS	1,242	1,196	1,137
10×10	8,888	8,871	8,848
20×20	14,966	14,962	14,957
30×30	17,110	17,107	17,104

Без RIS $\Delta R = 0,10$ бит/с/Гц, для 10×10 $\Delta R = 0,40$ (сокращение в $\sim 2,6$ раза), для 20×20 $\Delta R = 0,009$ (в ~ 12 раз), для 30×30 $\Delta R = 0,006$ (в ~ 19 раз). Для RIS 30×30 уклон хвоста составляет менее 6 миллибит/с/Гц на промежутке от $R_{1\%}$ до $R_{10\%}$. Это означает, что при обеспечении 1%-го I можно быть уверенным, что 99% TTI превысят эту скорость с большой вероятностью.

3.3. Индекс кластеризации $\hat{\theta}_r$

Индекс кластеризации $\hat{\theta}_r$ возрастает от 0,02 (без RIS) до 0,11 (30×30), что соответствует уменьшению средней длительности замираний от $\approx 48,5$ до $\approx 9,1$ TTI. Для сценариев V2X с

жесткими ограничениями на задержку уменьшение длительности замираний приводит к увеличению надежности передачи при фиксированных требованиях на задержку. Короткие кластеры замираний позволяют простой схеме HARQ (англ.: Hybrid Automatic Repeat Request) с несколькими повторными передачами перекрывать большинство отказов без нарушения типичных пределов задержки V2X ($\sim 10\text{--}100$ мс).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты демонстрируют, что наличие RIS с большим количеством УС, обеспечивает не только существенное увеличение медианного значения спектральной эффективности канала на 11 бит/с/Гц при 900 УС, но и увеличение 10%-го и 1%-го квантилей на 13 бит/с/Гц и 16 бит/с/Гц, соответственно, что говорит о влиянии RIS на форму распределения спектральной эффективности. Параметр масштаба EVT уменьшается примерно в 7 раз, разрыв между уровнями возврата на 1% и 10% сокращается с 0,105 до $\sim 0,006$ бит/с/Гц, индекс кластеризации возрастает от 0,021 до 0,109, сокращая длину пакета событий отказа примерно в 5 раз.

Для практических приложений V2X это означает качественное изменение характеристик надежности. Например, для целевой вероятности отказа $\varepsilon = 1\%$ достижимая скорость в полосе шириной 10 МГц возрастает с $\approx 12,4$ Мбит/с (без RIS) до ≈ 171 Мбит/с (30×30 RIS), что соответствует увеличению в ~ 14 раз пропускной способности при вероятности успешной передачи пакета 99%. Более того, ввиду небольшой ширины хвоста распределения спектральной эффективности канала, система может уверенно использовать уровень превышения даже для более строгих целевых показателей (например, $\varepsilon = 0,1\%$) с минимальными жертвами в скорости.

Предложенная методология количественной оценки формы хвоста на основе EVT применима к произвольным конфигурациям RIS и может быть использована для оптимизации параметров системы с учетом требований надежности V2X.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garcia M. H. C. et al. A tutorial on 5G NR V2X communications //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Т. 23. – №. 3. – С. 1972-2026.
2. Karamyshev, A., Levitsky, I., Bankov, D. et al. A Tutorial on Wi-Fi 8: The Journey to Ultra High Reliability. Probl Inf Transm 61, 164–210 (2025).
3. Yoshizawa T., Baskaran S. B. M., Kunz A. Overview of 5G URLLC system and security aspects in 3GPP //2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). – IEEE, 2019. – С. 1-5.
4. Melnikov I. A. et al. Reducing the Complexity of the Layer Scheduled LDPC Decoder Based on the Information Bottleneck Method //Problems of Information Transmission. – 2024. – Т. 60. – №. 3. – С. 199-208.
5. Nasrallah A. et al. Ultra-low latency (ULL) networks: The IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2018. – Т. 21. – №. 1. – С. 88-145.
6. Hashemi R. et al. Average rate and error probability analysis in short packet communications over RIS-aided URLLC systems //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Т. 70. – №. 10. – С. 10320-10334.
7. Liu Y. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities. IEEE communications surveys & tutorials, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577.

8. Tyarin A. S., Kureev A. A., Khorov E. M. Fundamentals of design and operation of reconfigurable intelligent surfaces. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2024, pp. 1–7.
9. Poyda A. I., Burtakov I. A. Fast Wide Beam Adjustment of Reconfigurable Intelligent Surfaces in Practical Deployments. *IEEE Access*, 2024, p. 1.
10. Пойда А. И. и др. Формирование широких отраженных лучей реконфигурируемыми интеллектуальными поверхностями //Проблемы передачи информации. – 2024. – Т. 60. – №. 3. – С. 35-45.
11. Yang L. et al. Coverage, probability of SNR gain, and DOR analysis of RIS-aided communication systems //IEEE Wireless Communications Letters. – 2020. – Т. 9. – №. 8. – С. 1268-1272.
12. Cui Z. et al. SNR coverage probability analysis of RIS-aided communication systems //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Т. 70. – №. 4. – С. 3914-3919.
13. Singh I., Smith P. J., Dmochowski P. A. Optimal SNR analysis for single-user RIS systems in Ricean and Rayleigh environments //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2022. – Т. 21. – №. 11. – С. 9834-9849.
14. Burtakov I. et al. Simultaneous RIS Adjustment and Transmission Based on Markov Chain Monte Carlo and Simulated Annealing //IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2025.
15. Liaquat S. et al. Improving SNR for NLoS Target Detection using Multi-RIS-Assisted Monostatic Radar //IEEE Open Journal of Vehicular Technology. – 2025.
16. Santamaria I. et al. SNR maximization in beyond diagonal RIS-assisted single and multiple antenna links //IEEE Signal Processing Letters. – 2023. – Т. 30. – С. 923-926.
17. Тярин А. С. и др. Компенсация влияния капель дождя на производительность беспроводной системы с реконфигурируемой интеллектуальной поверхностью //Проблемы передачи информации. – 2025. – Т. 61. – №. 2. – С. 83-95.
18. Saeed Far S., Abd. Wahab A. K. Evaluation of peaks-over-threshold method //Ocean Science Discussions. – 2016. – Т. 2016. – С. 1-25.

Performance analysis of reconfigurable intelligent surfaces in V2X scenarios

S. S. Tronin, A. O. Gorbunova, E. O. Endovitskiy, K. A. Glinsky, A. C. Tyarin

In the scenario of using V2X technology (Vehicle-to-Everything), strict requirements are imposed on the delay in transmitting a packet, as well as on the probability of its successful transmission. One of the ways to meet these requirements is to use Reconfigurable intelligent surfaces (RIS). In this paper, the influence of RIS of various sizes on the median value of the spectral efficiency of the channel, as well as on the shape of its distribution, is investigated. The results showed that the use of RIS of 900 elements leads to an increase in the median spectral efficiency of the channel, the 10th percentile and the 1st percentile by 11 bits/s/Hz, 13 bits/s/Hz and 16 bits/s/Hz, respectively, and reduces the width of distribution tail 19 times.

KEYWORDS: 5G New Radio, V2X, RIS, URLLC.