

УДК 621.396.67

Обнаружение многолучевого распространения хаотических радиоимпульсов в беспроводном канале

¹ Кузьмин Л. В., ² Гриневич А. В.

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН*
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009, Российская Федерация
lvk@cplire.ru

² *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*
2-я Бауманская ул., 5, Москва, 105005, Россия
aleksgrin96@gmail.com

Получено: 13 апреля 2019 г.

Отрецензировано: 20 апреля 2019 г.

Принято к публикации: 30 апреля 2019 г.

Аннотация: *Описывается эксперимент по исследованию многолучевого распространения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов сверхвысокочастотного диапазона через беспроводный канал. В результате проведенных измерений установлены условия приема хаотических радиоимпульсов после прохождения многолучевого канала при различных временах задержки в распространении сигнала.*

Ключевые слова: *хаотические колебания сверхвысокочастотного диапазона, сверхширокополосный хаотический сигнал, многолучевое распространение сверхширокополосных сигналов, беспроводная сверхширокополосная связь.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Кузьмин Л. В., Гриневич А. В. Обнаружение многолучевого распространения хаотических радиоимпульсов в беспроводном канале // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 1. С. 111—121.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Кузьмин, Л. В. Обнаружение многолучевого распространения хаотических радиоимпульсов в беспроводном канале / Л. В. Кузьмин, А. В. Гриневич // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 1. — С. 112—121.

Estimation of multipath propagation of chaotic radio-pulses in a wireless channel

L. V. Kuzmin¹ and A. V. Grinevich²

¹ *Kotel'nikov Institute of RadioEngineering and Electronics of the RAS
11/7, Mokhovaya Str., Moscow, 125009, Russian Federation
lvk@cplire.ru*

² *Bauman Moscow State Technical University
5/1, 2nd Baumann str., Moscow, 105005, Russian Federation
aleksgrin96@gmail.com*

Received: April 13, 2019

Peer-reviewed: April 20, 2019

Accepted: April 30, 2019

Abstract: *Experiments on multipath indoor propagation of ultrawideband (UWB) chaotic radio pulses of microwave band are described. The goal is to experimentally obtain propagation results for UWB chaotic signals of different power. Propagation of different-power chaotic radio pulses gives different multipath patterns detected by the receiver due to its finite sensitivity. A comparison of the chaotic pulse envelope waveforms at the receiver revealed the role of the reflected paths with different delays.*

Keywords: *chaotic oscillations of microwave band, ultra-wideband chaotic signal, multipath propagation of ultra-wideband signals, wireless ultra-wideband communications*

For citation: L. V. Kuzmin et al. "Estimation of multipath propagation of chaotic radio-pulses in a wireless channel," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 112–121, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.1.10

1. Введение

Сверхширокополосные (СШП) сигналы предоставляют потенциальную возможность увеличить помехоустойчивость беспроводной передачи информации по отношению к узкополосным сигналам при прочих равных условиях. Для реализации этой возможности необходимо знать условия распространения СШП сигналов, поэтому исследование беспроводных СШП каналов ведется параллельно с разработкой новых способов СШП беспроводной передачи информации [1]. Начало было положено в ходе разработки моделей СШП каналов^{1, 2, 3} [2] для беспроводных систем связи

¹ Channel Modeling Sub-committee Report Final. November 2002. IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs). http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2002/Nov02/02490r0P802-15_SG3a-Channel-Modeling-Subcommittee-Report-Final.zip

малого радиуса действия. С тех пор весь круг возможных применений СШП сигналов постоянно расширяется, и поэтому возникнет необходимость выйти [3—5] за рамки созданных моделей. В указанных работах основным типом СШП сигнала служили ультракороткие импульсы (УКИ).

Помимо УКИ имеются другие типы СШП информационных носителей, например, СШП хаотические радиоимпульсы [6], входящие в стандарты беспроводной связи^{1,2,3}. Длина такого импульса может быть выбрана равной длительности отклика многолучевого канала, что вместе с шумоподобным характером сигнала предотвращает деградацию импульса из-за мелкомасштабных замираний в точке приема. Поэтому многолучевое распространение в принципе не представляет проблемы для приема хаотических радиоимпульсов [7] в условиях, описываемых моделями^{1,2,3} [2], когда набеги переотраженных лучей не превышают длительности импульсов, и когда не возникает межимпульсной интерференции.

Вместе с тем, для беспроводных систем связи всегда является актуальным повышение энергетического резерва линии связи. Осуществляться это может либо путем накопления сигнала, либо путем повышения отношения сигнал — шум в приемнике за счет увеличения мощности излучаемого сигнала. В данной работе рассматривается последний вариант. Это ставит вопрос об условиях, которые создаются многолучевой средой в точке приема. Например, при увеличении мощности излучаемых импульсов в K раз картину многолучевого распространения в точке приема при той же чувствительности приемника будут, в том числе, формировать лучи, имеющие набег в \sqrt{K} раз больше исходного. Анализ этой проблемы представляет практический интерес, например, для мультимедийных СШП сенсорных сетей [8], где увеличение энергетического резерва линий связи между узлами сети напрямую имеет отношение к стабильности работы сети в целом, а из-за обнаружения приемником лучей с большими набегами и возникновения межимпульсной интерференции, этот резерв может снижаться.

В данной работе экспериментально при помощи СШП хаотических радиоимпульсов мощностью 1 mW и 100 mW, генерируемых источником СШП хаоса [9], исследовалась многолучевая картина в точке приема для различных взаимных расположений излучателя и приемника. Для импульсов мощностью 100 mW по отношению к импульсам мощностью 1 mW,

² Channel Modeling Sub-committee Report Final / IEEE P802.15.4a Working Group for WPANs, Dec. 2004. <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/04/15-04-0662-02-004a-channel-model-final-report-r1.pdf>

³ IEEE P802.15. Wireless Personal Area Networks. Working Group for WPANs. Channel Model for Body Area Network (BAN). <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/08/15-08-0780-12-0006-tg6-channel-model.pdf>

приемник при прочих равных должен обнаруживать лучи с длиной набега в 10 раз большей. Сравнение результатов распространения импульсов мощностью 1 и 100 mW поможет определить влияние многолучевого канала на форму огибающей радиоимпульсов в точке приема, и на основе этого предпринять шаги по предотвращению его негативного влияния на прием СШП сигнала.

2. Схема эксперимента

В эксперименте источник хаотических колебаний генерирует хаотические радиоимпульсы (рис. 1,а), которые проходят через беспроводный канал, и поступают на вход приемника, реализованного на базе СШП логарифмического детектора. В силу малого времени когерентности СШП хаотического сигнала), имеющего шумоподобный вид, на входе приемника лучи суммируются по мощности (рис. 1,б. На выходе приемника формируется сигнал — огибающая хаотических радиоимпульсов. Мгновенное значение амплитуды огибающей пропорционально логарифму входной мощности, так что форма огибающей является функцией от мгновенной мощности, действующей на входе приемника.

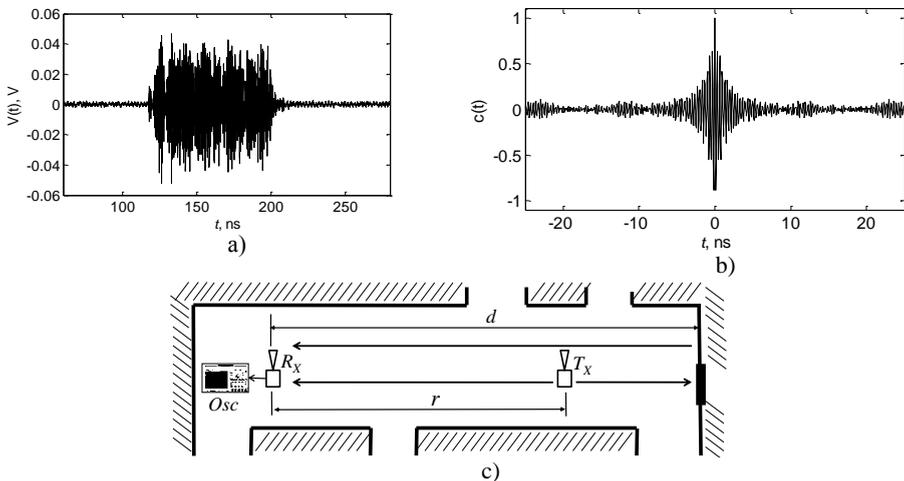


Рис. 1. Реализация $V(t)$ хаотического радиоимпульса (а); автокорреляционная функция $c(t)$ хаотического сигнала (б); схема проведения измерений и расположения аппаратуры (с): RX – приемник, TX – излучатель, Osc – осциллограф, $d = 38$ м, r меняется в диапазоне от 0.5 до 32 м.

Fig. 1. a – chaotic radiopulse waveform $V(t)$; b – autocorrelation function $c(t)$ of chaotic signal; c – scheme of measurement and equipment layout: R_X – receiver, T_X – transmitter, Osc – oscilloscope, $d = 38$ m, r is varied in the range from 0.5 to 32 m

Для измерений применялся источник хаотических колебаний, входящий в приемопередатчик ППС-57 [9], который формировал последовательность хаотических радиоимпульсов длительностью $T_p = 83$ ns (рис. 1,а). Приемник состоит из малошумящего усилителя с коэффициентом усиления 100 и логарифмического детектора⁴. Приемник обеспечивает чувствительность на уровне $3 \cdot 10^{-9}$ mW и в линейной зоне работы преобразует входную мощность в выходное напряжение по закону

$$V(r, t) = 10\alpha \lg(P(r, t)/P_0), \quad (1)$$

где $P_0 = 1$ mW; $\alpha = 0.021$ V/dB — крутизна характеристики логарифмического детектора; $P(r, t)$ — мощность сигнала, поступающая в приемник от излучателя, находящегося на расстоянии r от него. При изменении мощности входного сигнала в диапазоне от $3 \cdot 10^{-9}$ mW до ~ 1 mW амплитуда выходного сигнала меняется в пределах от 0.5 до 2 V⁴.

Для искусственного создания условий, при которых набег лучей между излучателем и приемником изменяется, излучатель перемещался, а приемник был неподвижен. Эксперименты проводились в лабораторном помещении и в коридоре института радиотехники и электроники им В. А. Котельникова РАН. Излучатель и приемник находились в условиях прямой видимости на высоте один метр от поверхности пола. Схема размещения аппаратуры в коридоре приведена на рис.1,с. Аналогичный способ размещения применялся в лаборатории. Размеры лаборатории: длина ~ 5 м, ширина ~ 6 м, высота ~ 4 м. Лаборатория наполнена большим количеством металлоконструкций и разделена на два этажа металлическим перекрытием. Размеры коридора: высота ~ 4.5 м, длина ~ 46 м, ширина ~ 3 м. Вдоль коридора на высоте около 3 м вдоль одной из стен протянуты металлоконструкции с поперечными размерами приблизительно один на один метр. В коридоре расположены несколько металлических дверей, одна из которых находится в торце коридора, на стороне, противоположной месту расположения приемника (рис. 1,с).

Для каждого значения расстояния r_i между излучателем и приемником при помощи запоминающего осциллографа с частотой выборки 2.5 GHz (осциллограф Tektronix DPO 4054) осуществлялась запись N_i реализаций огибающей одиночных импульсов $V_j(r_i, t)$, $j = 1 \dots N_i$. Для даль-

⁴ Analog Devices. Data Sheet 1 MHz to 4 GHz, 80 dB, Logarithmic Detector/Controller.
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5513.pdf>

нейшего анализа вычислялась форма импульсов $\langle V(r_i, t) \rangle$, усредненная по N_i реализациям (рис. 2) для каждого значения r_i .

3. Результаты эксперимента

На рис. 2 изображены усредненные формы $\langle V(r_i, t) \rangle$ и отмечены амплитуды $A_V(r_i)$ импульсов с излучаемой мощностью 1 mW (рис. 2, a, c) и 100 mW (рис. 2, b, d).

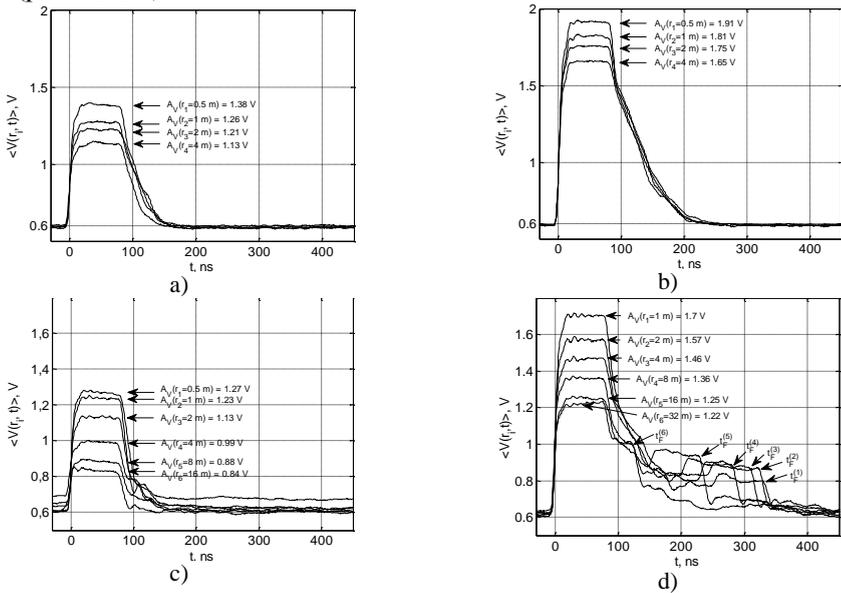


Рис. 2. Усредненные формы огибающей импульсов $\langle V(r_i, t) \rangle$ на выходе приемника в лаборатории (a), (b), и в коридоре (c), (d), на которых отмечены их амплитуды $A_V(r_i)$ в приемнике на расстоянии r_i (m) от излучателя для импульсов мощностью 1 mW (a), (c) и

100 mW (b), (d), вместе с моментами времени $t_F^{(i)}$ прихода задних фронтов переотраженных импульсов (d): $t_F^{(1)} = 333$ ns, $t_F^{(2)} = 325$ ns, $t_F^{(3)} = 312$ ns,
 $t_F^{(4)} = 283$ ns, $t_F^{(5)} = 231$ ns, $t_F^{(6)} = 126$ ns.

Fig. 2. Averaged waveforms of chaotic radiopulse envelopes $\langle V(r_i, t) \rangle$ at the receiver's output in the lab (a), (b), and in the corridor (c), (d) with their amplitudes $A_V(r_i)$ and pulse trailing edges time moments $t_F^{(i)}$ of reflected rays (d) for the distance r_i (m) between transmitter and receiver

for the pulse power 1 mW (a), (c) and 100 mW (b), (d): $t_F^{(1)} = 333$ ns, $t_F^{(2)} = 325$ ns,
 $t_F^{(3)} = 312$ ns, $t_F^{(4)} = 283$ ns, $t_F^{(5)} = 231$ ns, $t_F^{(6)} = 126$ ns.

Верхняя кривая на каждом рисунке соответствует минимальному расстоянию между излучателем и приемником, нижняя – максимальному. Символами $t_F^{(i)}$, $i = 1 \dots 6$ обозначены моменты приходы задних фронтов отраженных импульсов при измерениях в коридоре (рис. 2,d).

Передний фронт всех огибающих нарастает за ~ 5 ns. Сигнал — огибающая, предшествующая фронту, соответствует отсутствию сигнала на входе приемника.

Форма заднего фронта огибающей зависит от конкретных условий распространения. В лаборатории и в коридоре для импульсов с излучаемой мощностью 1 mW задний фронт формируется лучами с задержками до ~ 70 ns. Для импульсов с излучаемой мощностью 100 mW в лаборатории многолучевой отклик длится до 120 ns, а в коридоре до 350 ns. Это эквивалентно приему лучей с набегами до ~ 105 m. При этом в лаборатории в обоих случаях задний фронт спадает равномерно, т.к. нет явно выделенных отражателей, которые могли бы сформировать второй луч, проходящий с большой задержкой. В то же время в коридоре вслед за огибающей импульсов прямого луча, которая располагается на начальном участке в диапазоне от 0 до 100 ns (рис. 2,d) явно можно отметить появление второго, переотраженного луча, приходящего с некоторой задержкой. Задержка меняется в зависимости от расстояния между излучателем и приемником. Отражателем является металлическая дверь, расположенная в торце коридора (см. рис. 1,с). Сравнение величины набега задержанного луча, сделанное на основе геометрии распространения лучей в коридоре (рис. 1,с), и набега на основе измерения задержки по огибающей, подтверждают это. Разность между моментами времени $t_F^{(i)}$, обозначающими задний фронт отраженных импульсов, и длиной импульса $T_P = 83$ ns равна времени, которое требуется для прохождения удвоенной разности расстояний r_i и d : от приемника до излучателя и от приемника до конца коридора, т.е. $2(d - r_i)/c$, где c – скорость света. Эта измеренная разность составляет $\Delta t^{(i)} = t_F^{(i)} - 83 = \{250, 242, 229, 200, 148, 43\}$ ns. Разность между геометрическим набегом $2(d - r_i)$ и измеренным $\Delta t^{(i)}c$, составляет $|\Delta t^{(i)}c - 2(d - r_i)| = \{0.75, 0.35, 0.47, 0.1, 0.25, 0.85\}$ m.

По результатам эксперимента также был определен показатель затухания мощности сигнала с расстоянием, который был рассчитан в соответствии с (1) через разность между амплитудой импульса A_V для расстояния r_1 и для расстояний r_i

$$A_V(r_1) - A_V(r_i) = 10\alpha \lg(P(r_1)/P(r_i)) \quad (2)$$

Для среды с многолучевым распространением можно ожидать [2–5], что мощность $P(r)$ в точке приема пропорциональна $\sim P_T/r^n$, где P_T – мощность излучаемого сигнала. Тогда отношение мощности $P(r_1)$ на расстоянии r_1 от излучателя, к мощности $P(r_i)$ на расстоянии r_i , составит $P(r_1)/P(r_i) = (r_i/r_1)^n$ или с учетом (2)

$$(A_V(r_1) - A_V(r_i))/\alpha = 10n \lg(r_1/r_i) \quad (3)$$

Здесь $(A_V(r_1) - A_V(r_i))/\alpha$ есть измеряемое в эксперименте отношение $P(r_1)/P(r_i)$. В координатах $((A_V(r_1) - A_V(r_i)), 10 \lg(r_1/r_i))$ зависимость (3) является линейной и методом наименьших квадратов было вычислено значение коэффициента n по измеренным значениям амплитуд $A_V(r_i)$ и расстояний r_i . Показатель затухания n в лаборатории оказался равен $n = 1.1$, в коридоре $n = 1.5$. В обоих случаях его значение меньше двух, что демонстрирует эффект накопления мощности полезного сигнала в приемнике [6] по отношению к каналу с одним лучом и тем самым эффективно увеличивает энергетический резерв линии связи.

Сравнение формы огибающей импульсов мощностью 1 и 100 мВт выявляет две качественно различные картины многолучевого распространения. Огибающая импульсов мощностью 1 мВт претерпевает незначительное расширение по отношению к номинальной длительности импульсов, так как задержки в приходе лучей, обнаруживаемых приемником, незначительно превосходят длительность импульса. Практически это означает, что для предотвращения межсимвольной интерференции, достаточно применять защитный интервал, равный длительности импульса. Благодаря некогерентному сложению СШП сигналов отношение сигнал — шум в точке приема для таких импульсов в многолучевом канале выше, чем в канале с одним лучом при прочих равных условиях [6]. Энергетический резерв в этом случае снизу ограничивается чувствительностью приемника, сверху — фактической мощностью принимаемого сигнала. Например, для расстояния 1 м в условиях лаборатории он составляет 31.5 дБ, в условиях коридора — 30 дБ.

4. Заключение

Для импульсов мощностью 100 мВт доля лучей, обнаруживаемых приемником, увеличивается, причем эти лучи приходят с существенно большими задержками. После импульсов по прямому лучу возможно по-

явление отраженных импульсов, которые будут помехой для информационных импульсов, поступающих по прямому лучу. На практике это может дать непредсказуемую зависимость отношения сигнал — многолучевая помеха от конкретных условий распространения СШП сигнала, которая не укладывается в модели³ [2, 3], и для которой заранее сложно выбрать величину защитного интервала, которая бы гарантировала отсутствие межимпульсной интерференции. Складывается ситуация, в которой попытка повышения отношения сигнал — помеха в точке приема за счет увеличения мощности излучаемого сигнала приводит не к повышению, как это было бы для канала с одним лучом (канала с шумом), а к снижению этого отношения. Возвращаясь к описанным экспериментам, для ситуации распространения сигнала в коридоре, где имеется эффективный отражатель, энергетический резерв ограничивается снизу отраженным лучом, так что доступный диапазон по энергетике канала составит $(1.7—0.8 V)/0.021 \sim 43$ дБ вместо 53 дБ, если бы он ограничивался чувствительностью приемника. В силу линейности канала улучшение чувствительности приемника также приведет к аналогичным следствиям: количество лучей, обнаруживаемых приемником, будет расти, а многолучевая картина усложняться. Полученный в работе результат позволяет корректно ставить задачу по компенсации многолучевого распространения при практической разработке СШП беспроводных приемопередающих систем.

Список литературы

- 1 Molisch A. F. Ultra-Wide-Band Propagation Channels // Proc. of the IEEE. 2009. Т. 97. № 2. С. 353—371.
- 2 Kunisch J., Pamp J. UWB Channel Soundings and Models – Literature Overview // <http://www.ieee802.org/15/pub/04/15-04-0196-00-004a-802-15-4a-channel-sounding-overview.pdf>
- 3 Renzo M., Graziosi F., Minutolo R., Montanari M., Santucci F. The ultra-wide bandwidth outdoor channel : From measurement campaign to statistical modelling // Mobile Networks and Applications. 2006. Т. 11. № 4. С. 451—467.
- 4 Santos T., Karedal J., Almers P., Tufvesson F., Molisch A.F. Modeling the Ultra-Wideband Outdoor Channel : Measurements and Parameter Extraction Method // IEEE Trans. on wireless communications. 2010. Т. 9. № 1. С. 282—290.
- 5 Khawaja W., Guvenc I., Matolak D. UWB Channel Sounding and Modeling for UAV Air-to-Ground Propagation Channels // 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Washington. DC. 2016. С. 1—7.
- 6 Andreyev Yu. V., Dmitriev A. S., Efremova E. V., Khilinsky A. D., Kuzmin L. V. Qualitative theory of dynamical systems, chaos and contemporary communications // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2005. Т. 15. № 11. С. 3639—3651.
- 7 Kuzmin L. V. Noise immunity of the wireless communications scheme based on ultrawideband chaotic radio pulses in multipath channels // J. Communications Technology and Electronics. 2011. Т. 56. № 4. С. 367—383.

- 8 Dmitriev A. S., Efremova E. V., Gerasimov M. Yu. Multimedia Sensor Networks Based on Ultrawideband Chaotic Radio Pulses // J. Communications Technology and Electronics. 2015. Т. 60. № 4. С. 393—401.
- 9 Кузьмин Л. В., Рьжов А. И., Андреев Ю. В., Попов М. Г. Сверхширокополосная беспроводная сенсорная сеть для передачи непрерывных потоков данных // Физические основы приборостроения. 2018. Т. 7. № 1 (27). С. 91—102.

Информация об авторах

Кузьмин Лев Викторович, ведущий научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Гриневич Александр Валерьевич, студент московского государственного университета им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

Information about the authors

Lev V. Kuzmin, leading scientific researcher of the Kotel'nikov Institute of RadioEngineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Alexander V. Grinevich, student of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.