

Стенд полунатурного моделирования асинхронных радиосистем передачи информации

Ю.Р. Буткевич¹, С.С. Логинов¹, Р.Р. Яруллин²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ
420111, Россия, г. Казань,
ул. К. Маркса, 10

² АО «НПО «Радиоэлектроника» имени В.И. Шимко»
420029, Россия, г. Казань,
ул. Журналистов, 50/3

Аннотация – Обоснование. Статья посвящена математическому описанию стенда полунатурного моделирования асинхронных радиосистем передачи информации. В настоящее время разработка новых асинхронных радиосистем передачи информации подразумевает множество проблем перед внедрением в эксплуатацию. Необходимость разработки стенда полунатурного моделирования асинхронных радиосистем передачи информации является актуальной задачей, так как позволит обеспечить снижение затрат на разработку за счет своевременного выявления и устранения недостатков радиосистем на этапе испытаний. Цель работы заключается в разработке математического описания запросного канала стенда полунатурного моделирования, формирующего сигнально-помеховую обстановку, которая учитывает свойства распространения радиоволн, а также воздействия различных видов помех. Методы. В данной работе были использованы аналитические методы для получения результирующих выражений общего вида. Результаты. Показано математическое описание таких процессов, как внутрисистемный поток запросных сигналов и преднамеренная помеха, а также по полученным результатам предложены структурные схемы для формирования указанных типов помех. Заключение. Полученные результаты могут быть использованы для построения стенда полунатурного моделирования асинхронных радиосистем передачи информации.

Ключевые слова – стенд полунатурного моделирования; внутрисистемный поток; преднамеренная помеха.

Введение

При разработке асинхронных радиосистем передачи информации одним из необходимых этапов является проведение натурных испытаний изделий, в ходе которых в зависимости от сложности испытываемых средств, условий и объемов испытаний могут потребовать значимые временные и материальные затраты. Одним из методов, позволяющих сократить указанные затраты, является создание стенда полунатурного моделирования. Такой стенд позволяет учитывать свойства радиоволн и особенности их распространения, а также параметры помех, воздействующих на радиоприемный тракт средств радиосистем. Создание стенда полунатурного моделирования требует формирования перечня моделей, учитывающих сложные условия распространения радиоволн, возникающие для средств радиосистем, находящихся в различных средах. Среди таких моделей следует особенно отметить:

- модели распространения радиоволн над морской поверхностью [14–16; 18];
- модели отражения радиоволн от вращающихся винтов вертолета [7–11];

– модели распространения радиоволн в городской местности [19–23];

– модели отражения радиоволн от турбин самолета [12; 13];

– модели распространения радиоволн над земной поверхностью, включая лесную [17; 24–28].

Разработка стенда полунатурного моделирования асинхронных радиотехнических систем передачи информации с возможностью формирования различных видов помех и моделированием условий распространения (отражение, интерференция, дифракция, рефракция) радиоволн является актуальной задачей, так как обеспечит снижение затрат на этапе «разработки». Такой стенд позволяет своевременно и оперативно выявить и устранить недостатки на этапе «разработки». Асинхронные радиотехнические системы передачи информации взаимодействуют через запросные и ответные каналы, отличающиеся типами передаваемой информации, методами разделения абонентов, видами модуляции и др. В данной работе, ввиду ограничений на объем материалов, будет рассмотрен только вопрос разработки математического описания запросного канала стенда полунатурного моделирования.

Цель работы заключается в разработке математического описания запросного канала стенда полунатурного моделирования, формирующего сигнально-помеховую обстановку, которая учитывает свойства распространения радиоволн, а также воздействия различных видов помех.

Задачами разрабатываемого стенда полунатурного моделирования являются:

- формирование внутрисистемного потока сигналов для запросного и ответного каналов связи с заданными вероятностями распределения амплитудных и временных параметров;
- моделирование условий распространения радиоволн запросного и ответного каналов;
- формирование преднамеренных помех с заданными распределениями амплитуд и фаз для обоих каналов.

Учитывая поставленные перед стендом задачи, на первом этапе его создания необходимо разработать математическую модель условий, воспроизводимых стендом.

Математическая модель запросного канала стенда полунатурного моделирования асинхронных радиосистем передачи информации

Сигнально-помеховая обстановка запросного канала характеризуется внутрисистемным потоком и преднамеренными помехами.

Внутрисистемный поток (ВСП) представляет собой имитацию работы комплекса разрабатываемых асинхронных радиосистем передачи информации. Это выявит возможность работы одной радиосистемы при функционировании их множества в одном радиоканале.

Преднамеренные помехи представляют собой разнообразие возможных помех, воздействующих на разрабатываемую систему в радиоканале, таких как ХИП – хаотическая импульсная помеха, шумовая помеха и др.

1. Для решения задачи формирования внутрисистемного потока запросных сигналов распишем комплексную огибающую запросного сигнала для непрерывного времени (1):

$$\dot{U}(t) = A(t)S(t)e^{j\varphi(t)}, \quad (1)$$

где $A(t)$ – информационная часть запросного сигнала с фиксированной амплитудой; $S(t)$ – изменяющаяся амплитуда запросного сигнала; $\varphi(t)$ – фаза запросного сигнала.

Представим информационную часть запросного сигнала в дискретном времени:

$$a[nT] = \sum_{n=0}^{N_{zc}} A[nT], \quad (2)$$

где T – период дискретизации; N_{zc} – количество отсчетов в одном запросном сигнале; n – номер отсчета. Тогда комплексная огибающая запросного сигнала в дискретном времени записывается в виде

$$\begin{aligned} \dot{U}_i[nT] &= S_{Ai}[nT]e^{j\varphi_i[nT]}A_i[nT] = \\ &= (S_i[nT]\cos(\varphi_i[nT]) + jS_i\sin(\varphi_i[nT]))A_i[nT], \end{aligned} \quad (3)$$

где i – номер запросного сигнала в потоке; $S_{Ai}[nT]$ – случайная амплитуда запросного сигнала; $\varphi_i[nT]$ – случайная фаза запросного сигнала.

Распишем комплексную амплитуду суммы запросных сигналов для каждого временного отсчета n (4):

$$\begin{aligned} \dot{U}[nT] &= \sum_{i=1}^M \dot{U}_i[(n+k_i)T] = \\ &= \sum_{i=0}^M S_i[(n+k_i)T]\cos(\varphi_i[(n+k_i)T])A_i[(n+k_i)T] + \\ &+ j \sum_{i=0}^M S_i[(n+k_i)T]\sin(\varphi_i[(n+k_i)T])A_i[(n+k_i)T], \end{aligned} \quad (4)$$

где M – количество складываемых потоков запросных сигналов; k_i – временная задержка i -го запросного сигнала.

В результате внутрисистемный поток запросных сигналов описывается следующим выражением (5):

$$\dot{U}_y[nT] = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{i=1}^M \dot{U}_i[(n+k_i)T], \quad (5)$$

Для формирования внутрисистемного потока запросных сигналов согласно выражению (5) разработана схема, представленная на рис. 1. Данная схема позволяет синтезировать внутрисистемный поток с требуемыми характеристиками распределений амплитуд и времен формирования запросных сигналов.

Наименование и назначение представленных на схеме (рис. 1) устройств и блоков:

1) ГПСЧ – генераторы псевдослучайных чисел. В основе предлагаемого стенда полунатурного моделирования и математических моделей используются генераторы псевдослучайных чисел

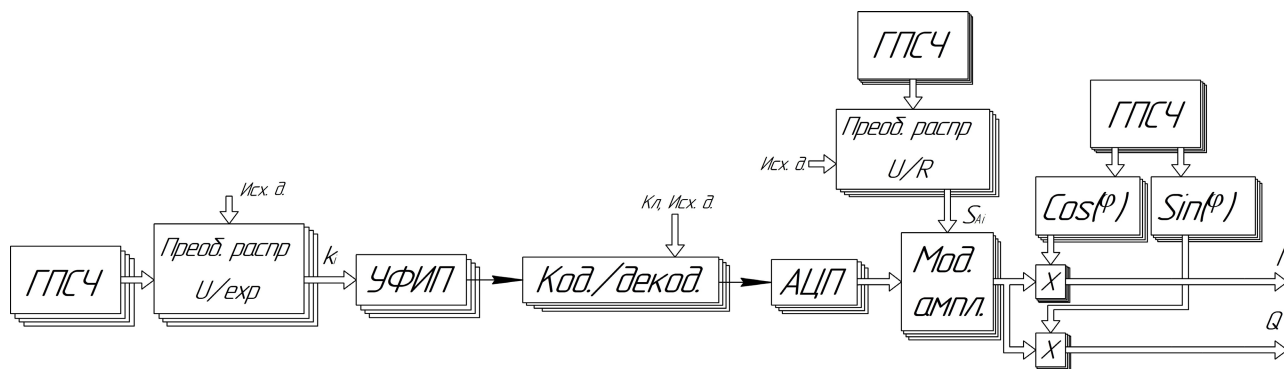


Рис. 1. Схема формирования внутрисистемного потока запросных сигналов
 Fig. 1. The scheme of formation of the in-system flow of request signals

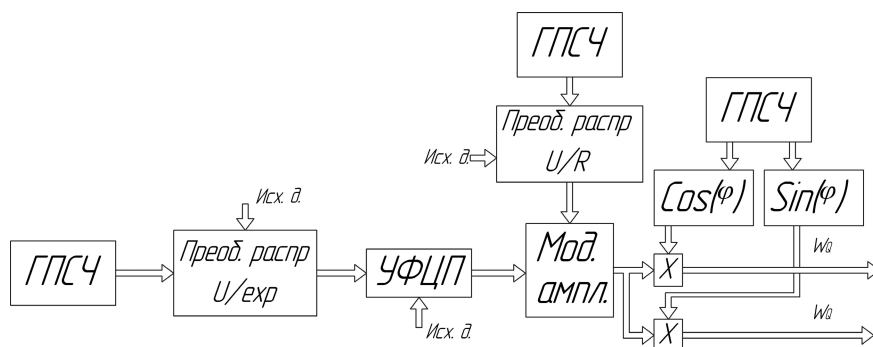


Рис. 2. Формирователь преднамеренных помех, где УФЦП – устройство формирования цифровых последовательностей
 Fig. 2. Intentional interference generator where УФЦП is a digital sequence generation device

(ГПСЧ) на основе дискретно-нелинейных систем с хаотической динамикой, а также традиционные генераторы на основе ГОСТ Р ИСО 28640 – 2012. Подробный анализ и формирование указанных псевдослучайных последовательностей представлены в работах [1–6];

2) Блоки преобразования распределения U/exp формируют распределение из ГПСЧ в экспоненциальное временное распределение интервалов между сигналами, вместо данного преобразования при проектировании реальных стендов возможно использование и других типов преобразований;

3) УФИП – устройство формирования импульсных последовательностей. Предназначено для определения режима работы «кодера/декодера информации» с триггером запуска от предыдущего блока;

4) Кодер/декодер информации – шифрующее/дешифрующее устройство, формирующее запросный сигнал;

5) АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

6) Преобразователь распределения U/R формирует распределение из ГПСЧ в заданное амплитудное распределение сигналов, например в распределение Рэлея и Райса [1];

7) Блок модуляции амплитуды предназначен для формирования амплитудного распределения и формирования I/Q-составляющей [29; 30];

8) Блоки $\sin(\varphi)$, $\cos(\varphi)$ и умножители совместно блоками ГПСЧ формируют случайную фазу внутрисистемного потока.

Моделирование условий распространения радиоволн осуществляется в цифровом виде после аналого-цифрового преобразователя запросного сигнала от базового средства радиосистемы. Это позволяет использовать готовые модели распространения радиоволн, описанных во введении.

2. Для решения задачи формирования импульсных помех, представим комплексную огибающую суммарной помехи для каждого временного отсчета (6):

$$\begin{aligned} \dot{W}[nT] &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=1}^{M_n} \dot{W}_l[(n+k_l)T] = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=1}^{M_n} B_l[(n+k_l)T] V_l[nT] e^{j\varphi_l[(n+k_l)T]}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $V_l[nT]$ – множитель, учитывающий амплитуды помехи; $B_l[nT]$ – закон изменения информационной составляющей помехи; T – период дискретности;

зации; n – номер отсчета; M_n – количество помех; k_l – временная задержка l -й помехи.

Согласно выражению (6) разработана схема формирователя преднамеренных помех, представленная на рис. 2.

На рис. 2 отличие блока УФЦП от УФИП, реализованного в формирователе внутрисистемного потока (см. рис. 1), в том, что данный блок формирует заданную структуру помехи в цифровом виде.

Общее выражение для математической модели запросного канала стелса полунатурного моделирования асинхронных радиосистем передачи информации представляется в виде

$$y(t) = \int_0^{\tau} h(t) x(t - \tau) d\tau + U_{\Sigma}(t) + W(t), \quad (7)$$

где $h(t)$ – импульсная характеристика радиоканала; $x(t)$ – основной запросный сигнал системы от базового моделируемого средства; $U_{\Sigma}(t)$ – суммарный внутрисистемный поток в запросном канале; $W(t)$ – преднамеренные помехи.

Представим выражение 7 в дискретном виде:

$$\begin{aligned} \dot{y}[nT] = & \sum_{n=0}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{N_c} h[nT] x[(n-k)T] + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^M \dot{U}_i[(n+k_i)T] + \sum_{l=1}^{M_n} \dot{W}_l[(n+k_l)T] \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где T – период дискретизации; $h[kT]$ – дискретизированная импульсная характеристика радиоканала; $x[nT]$ – дискретизированный запросный сигнал; $U[nT]$ – дискретизированная последовательность ВСП ЗС; $B[nT]$, $V[nT]$ – дискретизированная последовательность преднамеренной помехи.

Заключение

Таким образом, в результате анализа задач, стоящих перед стендом полунатурного моделирования условий функционирования запросного канала асинхронных радиотехнических систем передачи информации разработана математическая модель составной части стелса. Представленная модель позволяет воспроизводить условия функционирования асинхронных радиотехнических систем, включая внутрисистемные, преднамеренные помехи и условия распространения радиоволн в запросном канале. На основе приведенных выражений может быть сформировано описание ответного канала стелса полунатурного моделирования, что позволяет приступить к синтезу его структуры на основе современных программно-определяемых средств вычислительной техники и измерений.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 28640–2012. Статистические методы. Генерация случайных чисел: введен с 29.11.2012. М.: Стандартинформ, 2014. 40 с.
2. Анализ псевдослучайных последовательностей Лоренца на основе статистических тестов NIST / Ю.Р. Буткевич [и др.] // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы: мат. X Межд. молодежн. науч.-техн. конф. молодых уч. аспирантов и студ. Казань: ИП Сагеев А.Р., 2023. С. 78–79.
3. A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications / A. Rukhin [et al.] // NIST Special Publication 800-22 Revision 1a. 2010. 131 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-22r1a.pdf>
4. Генераторы псевдослучайных последовательностей не максимальной длины на регистрах сдвига / В.А. Песочин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 1 (49). С. 3–17. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/at/y2016/i9/p136>
5. Гавришев А.А. К вопросу об использовании гиперхаотических сигналов для передачи данных в системах радиосвязи // Научное приборостроение. 2023. Т. 33, № 2. С. 62–74. URL: <https://iairas.ru/mag/2023/full2/Art6.pdf>
6. Перов А.А. Применение статистических тестов NIST для анализа выходных последовательностей блочных шифров // Научный вестник НГТУ. 2019. № 3 (76). С. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-3-87-96>
7. Плотницкая Е.С., Веремьев В.И., Воробьев Е.Н. Теоретическая модель сигнала, отраженного от вращающихся винтов вертолета // 22-я Межд. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение»: сб. тр. 2020. С. 327–331.
8. Гейстер С.Р., Нгуен Т.Т. Математические модели радиолокационного сигнала, отраженного от несущего винта вертолета, в приложении к обращенному синтезу апертуры // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 74–87. DOI: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-3-74-87>
9. Нгуен Тьен Тхай, Нгуен Чунт Тхань, Нгуен Тьен Тай. Устранение влияния сигнала, отраженного от корпуса летательного аппарата, на каналы построения изображений его винтов // Евразийский союз ученых (ЕСУ). 2020. Т. 4, № 71. С. 32–37.
10. Signal separation of helicopter radar returns using wavelet-based sparse signal optimisation / Si Tran Nguyen Nguyen [et al.] // National Security and ISR Division Defence Science and Technology Group. Edinburgh, 2016. 70 p. URL: <https://www.dst.defence.gov.au/sites/default/files/publications/documents/DST-Group-RR-0436.pdf>

11. Micro-Doppler signatures of helicopters in multistatic passive radars / M.K. Bączyk [et al.] // IET Radar, Sonar & Navigation. 2015. Vol. 9, no. 9. P. 1276–1283. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0125>
12. Надточий В.Н. Математическая модель отраженного сигнала от воздушной цели с турбореактивным двигателем // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. Т. 5, № 4 (19). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=393>
13. Слюсарь Н.М. Частотные спектры сигналов, отраженных от самолетов с турбореактивными двигателями // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: мат. респ. науч.-практ. конф. Минск: БГУИР, 2020. С. 257–261.
14. Малиновский В.В., Кориненко А.Е., Кудрявцев В.Н. Эмпирическая модель радиолокационного рассеяния в диапазоне длин волн 3 см на морской поверхности при больших углах падения // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 2. С. 110–121. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/2018/2/110>
15. Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью / В.Д. Еремка [и др.]. Севастополь: Вебер, 2013. 217 с.
16. Милащенко Е.А., Валеев В.Г. Прогнозирование характеристик обнаружения мелких морских целей с учетом негауссовых морских отражений применительно к когерентно-импульсной РЛС // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar14/1/text.html>
17. Пирогов А.А., Жураковский В.Н. Моделирование сигналов, отраженных от взволнованной морской поверхности // Инженерный вестник. 2017. № 5. С. 26–41.
18. Шебалкова Л.В. Моделирование сигнала, отраженного от морской поверхности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. С. 81–84.
19. Прогнозирование параметров распространения радиоволн в условиях городской застройки при использовании низко расположенных антенн / А.В. Тихомиров [и др.] // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=87308>
20. Моделирование процессов распространения радиоволн в условиях городской застройки / Д.В. Асотов [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9, № 4. С. 4–7. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20200944>
21. Затучный Д.А., Сладь Ж.В. О влиянии на распространение радиоволн в городе профиля его застройки // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. № 222 (12). С. 37–43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25417195>
22. Коврегин В.Н., Коврегина Г.М. Метод активного радиолокационного наблюдения дронов при мешающих отражениях в условиях городской застройки // Системный анализ и логистика. 2023. № 2 (36). С. 11–19. URL: http://www.salogistics.ru/magazine/36/2_Kovregina_Kovregina_11-19.pdf
23. Corre Y., Lostanlen Y. Three-dimensional urban EM wave propagation model for radio network planning and optimization over large areas // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2009. Vol. 58, no. 7. P. 3112–3123. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2016973>
24. Дятко А.А., Костромицкий С.М., Шумский П.Н. Математическая модель сигнала, отраженного от земной поверхности, при сопровождении РЛС низколетящей цели // Доклады БГУИР. 2015. № 8. С. 17–23. URL: <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/588>
25. Смирнов Н.В. Исследование работы радиовысотомера с линейной частотной модуляцией над лесной поверхностью. Пояснительная записка магистр. Екатеринбург: УрФУ, 2015. 143 с.
26. Якута К.И. Математическая модель радиовысотомера. Минск: Белорусская государственная академия авиации, 2021. 18 с.
27. Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга / А.Н. Фомин [и др.]; под общ. ред. И.Н. Ишука. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. 292 с.
28. Universal mathematical model of SAR signals for natural surfaces / A. Bokov [et al.] // ITM Web Conf. 2019. Vol. 30. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20193015026>
29. Тяжев А.И. Цифровые модемы сигналов минимальной частотной манипуляции и их характеристики // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 3. С. 106–115. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.106-115>
30. Аверина Л.И., Лафицкий А.Ю. Повышение помехоустойчивости OFDM-систем в каналах с замираниями // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 4. С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.39-45>

Информация об авторах

Буткевич Юрий Рудольфович, аспирант кафедры электронных и квантовых средств передачи информации Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия.

Область научных интересов: полунатурное моделирование, динамических хаос.

E-mail: bytkevich@mail.ru

Логинов Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры электронных и квантовых средств передачи информации Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия.

Область научных интересов: динамический хаос.

E-mail: sslogin@mail.ru

Яруллин Раушан Разапович, главный конструктор по системным вопросам АО «НПО «Радиоэлектроника» имени В.И. Шимко», г. Казань, Россия.

Область научных интересов: полунатурное моделирование, система вторичной радиолокации.

E-mail: shimko@rosprom.org

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2025, vol. 28, no. 2, pp. 58–64

DOI 10.18469/1810-3189.2025.28.2.58-64
UDC 519.6
Original Research

Received 12 September 2024
Accepted 14 October 2024
Published 30 June 2025

Stand for semi-natural modeling of asynchronous radio information transmission systems

Yuri R. Butkevich¹, Sergey S. Loginov¹, Raushan R. Yarullin²

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
10, Karl Marx Street,
Kazan, 420111, Russia

² JSC «NPO “Radioelectronics” named after V.I. Shimko»
50/3, Zhurnalistsov Street,
Kazan, 420029, Russia

Abstract – Background. The article is devoted to the mathematical description of the stand for semi-natural modeling of asynchronous radio information transmission systems. Currently, the development of new asynchronous radio information transmission systems involves many problems before commissioning. The need to develop a stand for semi-natural modeling of asynchronous radio information transmission systems is an urgent task, as it will ensure a reduction in development costs due to the timely identification and elimination of shortcomings of radio systems at the test stage. **Aim.** The purpose of the work is to develop a mathematical description of the query channel of the semi-natural modeling stand, which forms a signal-interference environment that takes into account the properties of radio wave propagation, as well as the effects of various types of interference. **Methods.** In this work, analytical methods were used to obtain the resulting general expressions. **Results.** A mathematical description of such processes as the in-system flow of request signals and intentional interference is shown, as well as structural schemes for the formation of these types of interference are proposed based on the results obtained. **Conclusions.** The obtained results can be used to build a stand for semi-natural modeling of asynchronous radio information transmission systems.

Keywords – semi-natural simulation stand; in-system flow; intentional interference.

✉ bytkevic@mai.ru (Yuri R. Butkevich)



© Yuri R. Butkevich, Sergey S. Loginov, Raushan R. Yarullin, 2025

References

1. GOST R ISO 28640–2012. Statistical methods. Random-generation: introduced from 29 November, 2012. Moscow: Standartinform, 2014. (In Russ.)
2. Yu. R. Butkevich et al., “Analysis of the pseudoic sequences of Lorentz based on statistical tests NIST,” *Prikladnaya elektrodinamika, fotonika i zhivye sistemy: mat. X Mezhd. molodezhn. nauch.-tekhn. konf. molodykh uch. aspir. i stud.* Kazan’: IP Sagiev A.R., pp. 78–79, 2023. (In Russ.)
3. A. Rukhin et al., “A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications,” NIST Special Publication 800-22 Revision 1a, 2010, url: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-22r1a.pdf>.
4. V. A. Pesoshin et al., “Generators of pseudo -random sequences of non-dimensional length on the shear registers,” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki*, no. 1 (49), pp. 3–17, 2019, url: <https://www.mathnet.ru/rus/at/y2016/i9/p136>. (In Russ.)
5. A. A. Gavrishchev, “On the use of hyperchaotic signals for data transmission in radio communications systems,” *Nauchnoe priborostroenie*, vol. 33, no. 2, pp. 62–74, 2023, url: <https://iairas.ru/mag/2023/full2/Art6.pdf>. (In Russ.)
6. A. A. Perov, “The use of NIST statistical tests to analyze the output sequences of block ciphers,” *Nauchnyy vestnik NGTU*, no. 3 (76), pp. 87–96, 2019, doi: <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-3-87-96>. (In Russ.)
7. E. S. Plotnitskaya, V. I. Verem’ev, and E. N. Vorob’ev, “Theoretical model of the signal reflected from the rotating screws of the helicopter,” *22-ya Mezhd. konf. «Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye»*: sb. trud, pp. 327–331, 2020. (In Russ.)
8. S. R. Geyster and T. T. Nguen, “Mathematical models of the radar signal, reflected from the helicopter loading screw, in the application to the faceted synthesis of the aperture,” *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika*, vol. 22, no. 3, pp. 74–87, 2019, doi: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-3-74-87>. (In Russ.)
9. Nguyen Ten Thai, Nguyen Chunt Than, and Nguyen Tyong Tai, “Eliminating the influence of the signal reflected from the body of the aircraft on the channels for constructing images of its screws,” *Evrasiyskiy soyuz uchenykh (ESU)*, vol. 4, no. 71, pp. 32–37, 2020. (In Russ.)
10. Si Tran Nguyen Nguyen et al., “Signal separation of helicopter radar returns using wavelet-based sparse signal optimisation,” National Security and ISR Division Defence Science and Technology Group. Edinburgh, 2016, url: <https://www.dst.defence.gov.au/sites/default/files/publications/documents/DST-Group-RR-0436.pdf>.
11. M. K. Bączyk et al., “Micro-Doppler signatures of helicopters in multistatic passive radars,” *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 9, no. 9, pp. 1276–1283, 2015, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0125>.

12. V. N. Nadochiy, "The mathematical model of the reflected signal from the air target with a turbojet engine," *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii*, vol. 5, no. 4 (19), 2017, url: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=393>. (In Russ.)
13. N. M. Slyusar', "Frequency spectra of signals reflected from aircraft with turbojet engines," *Informatsionnye radiosistemy i radiotekhnologii 2020: mat. resp. nauch.-prakt. konf. Minsk: BGUIR*, pp. 257–261, 2020. (In Russ.)
14. V. V. Malinovskiy, A. E. Korinenko, and V. N. Kudryavtsev, "The empirical model of radar scattering in the range of 3 cm long waves on the sea surface with large angles of the fall," *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, vol. 61, no. 2, pp. 110–121, 2018, url: <https://radiophysics.unn.ru/issues/2018/2/110>. (In Russ.)
15. V. D. Eremka et al., *Features of the Spread of Radio Waves above the Sea Surface*. Sevastopol': Veber, 2013. (In Russ.)
16. E. A. Milashchenko and V. G. Valeev, "Prediction of the characteristics of the detection of small marine targets taking into account the nonsense of naval reflections in relation to coherent-emi-pulse radar," *Zhurnal radioelektroniki*, no. 3, 2014, url: <http://jre.cplire.ru/jre/mar14/1/text.html>. (In Russ.)
17. A. A. Pirogov and V. N. Zhurakovskiy, "Modeling signals reflected from an excited sea surface," *Inzhenernyy vestnik*, no. 5, pp. 26–41, 2017. (In Russ.)
18. L. V. Shebalkova, "Modeling the signal reflected from the sea surface," *Interekspo Geo-Sibir'*, pp. 81–84, 2017. (In Russ.)
19. A. V. Tikhomirov et al., "Forecasting the distribution parameters of radio waves in urban development conditions when using low antennas," *Trudy MAI*, no. 97, 2017, url: <https://trudymai.ru/published.php?ID=87308>. (In Russ.)
20. D. V. Asotov et al., "Modeling the processes of the spread of radio waves in the conditions of urban development," *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, vol. 9, no. 4, pp. 4–7, 2013, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20200944>. (In Russ.)
21. D. A. Zatchyny and Zh. V. Slad', "On the impact on the spread of radio waves in the city of its development profile," *Nauchnyy vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, no. 222 (12), pp. 37–43, 2015, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25417195>. (In Russ.)
22. V. N. Kovregina and G. M. Kovregina, "The method of active radar observation of drones with interfering reflections in urban development conditions," *Sistemnyy analiz i logistika*, no. 2 (36), pp. 11–19, 2023, url: http://www.salogistics.ru/magazine/36/2_Kovregina_Kovregina_11-19.pdf. (In Russ.)
23. Y. Corre and Y. Lostanlen, "Three-dimensional urban EM wave propagation model for radio network planning and optimization over large areas," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 7, pp. 3112–3123, 2009, doi: <https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2016973>.
24. A. A. Dyatko, S. M. Kostromitskiy, and P. N. Shumskiy, "The mathematical model of a signal reflected from the earth's surface, when accompanied by a radar of a low-flying target," *Doklady BGUIR*, no. 8, pp. 17–23, 2015, url: <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/588>. (In Russ.)
25. N. V. Smirnov, The study of the operation of a radio-highlighter with linear frequency modulation above the forest surface. Explanatory note of the master. Ekaterinburg: UrFU, 2015. (In Russ.)
26. K. I. Yakuta, *Mathematical Model of Radio-Highlighter*. Minsk: Belorusskaya gosudarstvennaya akademiya aviatsii, 2021. (In Russ.)
27. A. N. Fomin et al., *Theoretical and Physical Foundations of Radar and Special Monitoring*, ed. by I. N. Ishchuk. Krasnoyarsk: Sibirskiy federal'nyy universitet, 2016. (In Russ.)
28. A. Bokov et al., "Universal mathematical model of SAR signals for natural surfaces," *ITM Web Conf.*, vol. 30, pp. 1–7, 2019, doi: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20193015026>.
29. A. I. Tyazhev, "Digital modems of minimum frequency shift keying signals and their characteristics," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 106–115, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.106-115>. (In Russ.)
30. L. I. Averina and A. Yu. Lafitskiy, "Increasing of bit error rate performance for OFDM systems over fading channels," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 39–45, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.39-45>. (In Russ.)

Information about the Authors

Yuri R. Butkevich, postgraduate student of the Department of Electronic and Quantum Information Transmission, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

Research interests: semi-natural modeling, dynamic chaos.

E-mail: bytkevic@mail.ru

Sergey S. Loginov, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Electronic and Quantum Information Transmission, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

Research interests: dynamic chaos.

E-mail: sslogin@mail.ru

Raushan R. Yarullin, chief designer for system issues, JSC «NPO "Radioelectronics" named after V.I. Shimko», Kazan, Russia.

Research interests: semi-natural modeling, secondary radar system.

E-mail: shimko@rosprom.org