

УДК 621.391.01

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196

**Для цитирования:** Методы повышения энергетической эффективности OFDM модемов в каналах связи с частотно-селективными замираниями / П. В. Луферчик, А. Н. Конев, Е. В. Богатырев, Р. Г. Галеев // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 189–196. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196.

**For citation:** Luferschik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. [Methods for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading communication channels]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 189–196. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196.

## **Методы повышения энергетической эффективности OFDM модемов в каналах связи с частотно-селективными замираниями**

П. В. Луферчик<sup>\*</sup>, А. Н. Конев, Е. В. Богатырев, Р. Г. Галеев

АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»  
Российская Федерация, 660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, 19  
<sup>\*</sup>E-mail: Luferschikp@gmail.com

*Известно, что при передаче данных может возникать межсимвольная интерференция, вызванная наличием многолучевого распространения и частотно-селективных замираний в радиоканале, которая может существенно понижать энергетическую эффективность систем связи. Одним из методов борьбы с такими эффектами, актуальным на сегодняшний день, является применение модуляции вида ортогонального частотного мультиплексирования сигналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), позволяющего гибко менять скорость передачи данных, уменьшить частотный ресурс за счет улучшения спектральной эффективности, а также бороться с частотно-селективными замираниями и селективными помехами.*

*Однако существуют каналы, особенно сильно подверженные влиянию межсимвольной интерференции, такие как, например, тропосферный канал. Также проблема селективных помех остро стоит в системах ближнепольной магнитной связи. Для таких каналов само применение OFDM модуляции не является панацеей, актуальной является задача повышения энергетической эффективности OFDM сигнала. В данной работе приведены ключевые особенности режима работы OFDM, позволяющие повысить энергетический потенциал радиолинии в каналах, подверженных межсимвольным искажениям. Представлены результаты моделирования методов понижения пик-фактора и цифровых предискажений для линеаризации передающего тракта.*

*Практическая значимость работы состоит в том факте, что применение методов линеаризации передающего тракта позволит увеличить максимальную пропускную способность систем связи, в первую очередь, использующих тропосферный, радиорелейный и ближнепольный магнитный канал связи. В настоящее время этот вопрос стоит особо остро, поскольку высокоскоростные тропосферные станции со скоростью передачи данных 50 Мбит/с в России отсутствуют. Увеличение пропускной способности в тропосферной связи позволит обеспечить связью труднодоступные населенные пункты со сложным рельефом местности. Также применение высокоскоростной тропосферной связи является экономически выгодной альтернативой спутниковой связи, поскольку ее применение не требует аренды спутникового канала.*

*Ключевые слова:* цифровая обработка сигналов, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, тропосферный радиоканал, канал с селективными помехами, межсимвольная интерференция, частотно-селективные замирания, многолучевость.

## Methods for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading communication channels

P. V. Lufenchik\*, A. N. Konev, E. V. Bogatyrev, R. G. Galeev

JSC "Scientific and Production Enterprise "Radiosvyaz"  
19, Dekabristov St., Krasnoyarsk, 660021, Russian Federation  
\*E-mail: Lufenchikp@gmail.com

*It is a fact that during data transmission, inter-symbol interference can occur, caused by the presence of multipath propagation and frequency-selective fading in the radio channel, which can significantly reduce the energy efficiency of communication systems. One of the methods to combat such effects, relevant today, is the use of OFDM modulation (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), which allows to flexibly change the data rate, reduce the frequency resource by improving the spectral efficiency, and also deal with frequency – selective fading and selective interference.*

*However, there are channels that are particularly susceptible to inter-symbol interference, such as, for example, the tropospheric channel. Also, the problem of selective interference is particularly acute in near-field magnetic induction communication systems. For such channels, the use of OFDM modulation itself is not a panacea; the task of increasing the energy efficiency of an OFDM signal is an urgent one. This paper presents the key features of the OFDM mode of operation, which make it possible to increase the energy potential of the radio link in channels subject to intersymbol distortion. The results of modeling methods for PAPR reduction and digital predistortion for the linearization of the transmission path are presented.*

*The practical significance of the work lies in the fact that the use of transmission path linearization methods will increase the maximum bandwidth of communication systems, primarily those using tropospheric, radio relay and near-field magnetic induction communication channels. At present, this issue is particularly acute, since there are no high-speed tropospheric stations with a data transfer rate of 50 Mbps in Russia. Increasing the throughput in tropospheric communication will provide communication to hard-to-reach settlements with difficult terrain. Also, the use of high-speed tropospheric communication is a cost-effective alternative to satellite communication, since its use does not require the lease of a satellite channel.*

*Keywords: digital signal processing, orthogonal frequency-division multiplexing, tropospheric radio channel, frequency-selective fading channel, intersymbol interference, frequency-selective fading, multipath*

### Введение

В каналах, в которых возможно возникновение отраженных, задержанных по времени прихода сигналов, особенно остро стоит борьба с последствиями межсимвольной интерференции, вызванной частотно-селективными замираниями и селективными помехами [1]. Явление многолучевого распространения приводит к флуктуациям амплитуды, фазы, угла прибытия, что, в свою очередь, вызывает искажение формы корреляционного пика сигнала и смещение оценки истинной задержки [2]. Цель данной работы разработать алгоритмы, повышающие энергетическую эффективность связи в таких каналах, повысить устойчивость к частотно-селективным замираниям и увеличить тем самым пропускную способность. Ниже рассмотрим основные особенности, которые позволяют повысить энергетический потенциал в радиоканале с частотно-селективными замираниями.

### OFDM

На сегодняшний день, применение OFDM модуляции является актуальным для целого ряда задач, таких как цифровое телевидение и цифровое радиовещание [3]. Данный тип цифровой модуляции применяется в сетях WLAN (IEEE 802.11 Wi-Fi), MAN (LTE, IEEE 802.16 WiMax), и

множестве других приложений [4; 5]. Ключевыми факторами, способствовавшими столь широкому распространению, являются устойчивость в многолучевом радиоканале и сравнительно низкая вычислительная трудоемкость, что, в особенности, проявляется при существенной длительности профиля временного рассеяния (большой задержке вторичных лучей) [6].

OFDM является системой со многими несущими частотами, ее наиболее часто применяемая структура упрощенно описывается следующим образом, входной поток модулированных символов с символьной скоростью  $F_s$  преобразуется из последовательного в  $N$  параллельных потоков символов со скоростью  $F_s / N$ . Например, в первом потоке символов будут присутствовать 1-й,  $N+1$ ,  $2N+1$ ,  $3N+1$  и т. д. символы. Таким образом, длительность каждого символа возрастает в  $N$  раз и становится равной  $T_s \cdot N$ . Каждый из  $N$  символьных потоков передается на своей несущей частоте. Расстояние между частотами выбирается таким образом, чтобы колебания на данных частотах были ортогональными, в результате чего каждый из символьных потоков передается независимо, потоки не влияют друг на друга. Спектр системы практически не расширяется, так как каждый из потоков имеет ширину спектра в  $N$  раз меньшую, чем ширина спектра исходного потока. Один из важнейших недостатков OFDM сигнала – это высокий пик-фактор [7].

### Пик-фактор OFDM

Пик-фактор (PAPR – peak to average power ratio) зависит от числа поднесущих у рассматриваемого сигнала, а также от модуляции. Так, OFDM символ с  $N = 2048$  использующихся у нас поднесущих будет иметь максимально возможный PAPR [8] для QPSK (quadrature phase-shift keying) равный  $10 \log(N) = 33,3$  дБ.

Определение PAPR OFDM. Пусть  $P$  – вектор, содержащий мощности всех отсчетов некоторого OFDM символа, [Вт],  $P_{av}$  – средняя мощность данного OFDM символа, [Вт]. Тогда пик-фактор рассматриваемого OFDM символа:

$$PAPR = 10 \log \left( \frac{\max(P)}{F_{av}} \right) [\text{дБ}], \quad (1)$$

где  $\max(P)$  – функция, определяющая наибольшее значение среди вектора значений.

Под эффективностью или производительностью алгоритмов снижения PAPR далее будем подразумевать то, как сильно алгоритм снижает PAPR OFDM символа после обработки. Например, алгоритм, который снижает PAPR на 3 дБ (при прочих равных) более эффективен (производителен), чем тот, что снижает его на 1 дБ.

Ряд алгоритмов понижения пик-фактора были отсеяны на этапе анализа и моделирования обзорных статей [7–10]. Методы понижения пик-фактора, которые применимы для нашей задачи снижения PAPR при больших размерах ОБПФ (обратного быстрого преобразования Фурье), перечислены ниже:

- Peak Cancellation Crest-Factor Reduction (PC-CFR);
- Partial Transmit Sequence (PTS);
- Selected Mapping (SLM);
- Discrete Fourier Transform spread OFDM (DFT-s-OFDM);
- Active Constellation Extension (ACE);
- Tone Reservation (TR).

Наилучших результатов удалось добиться последовательно соединив ACE и TR. Active Constellation Extension (ACE) использует возможность расширения сигнального созвездия по бокам без искажения передаваемых символов. Очевидно, что с повышением порядка модуляции число символов, которые можно расширить в бок будет сокращаться относительно общего числа символов, что будет сказываться на производительности алгоритма. Так, для QPSK 100 % символов можно расширить вбок. В нашей работе используется классический алгоритм [11].

Tone Reservation (TR) является очень гибким методом. Его производительность сильно зависит от выбранного числа итераций [12]. В работе подробно описан процесс и подходы проектирования алгоритма TR[13]. Результаты моделирования методов понижения пик-фактора TR и ACE приведены на рис. 1.

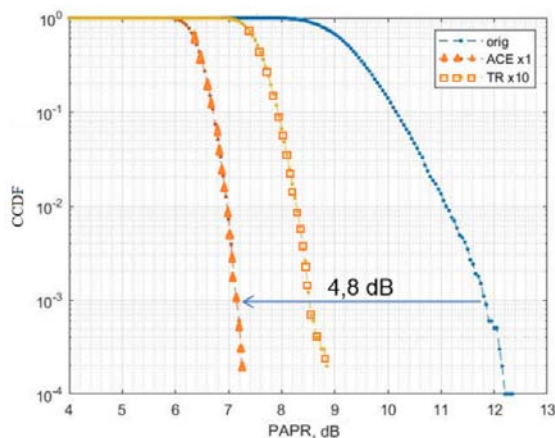


Рис. 1. Результат снижения PAPR в зависимости от CCDF (кумулятивная функция распределения) алгоритмами ACE и TR для OFDM с модуляцией QPSK

Fig. 1. The result of PAPR reduction depending on CFD (cumulative distribution function) by ACE and TR algorithms for OFDM with QPSK modulation

Моделирование OFDM размером БПФ 2048 точек с модуляцией QPSK, снижает пик-фактор до 7,2 дБ относительно исходного сигнала с пик фактором 12 дБ с вероятностью  $10^{-3}$  при совместном использовании алгоритмов TR (Tone Reservation) и ACE (Active Constellation Extension). Таким образом, выигрыш от применения алгоритма уменьшения пик-фактора составил 4,8 дБ.

### Реализация цифровых предсказаний для линейризации радиопередающего тракта

Использование системы ввода цифровых предсказаний предполагает наличие в тракте формирования сигналов функционального блока, позволяющего исказить полезный сигнал в соответствии с инверсной передаточной характеристикой радиочастотного тракта [14]. Структурная схема системы ввода предсказаний с обучением представлена на рис. 2.

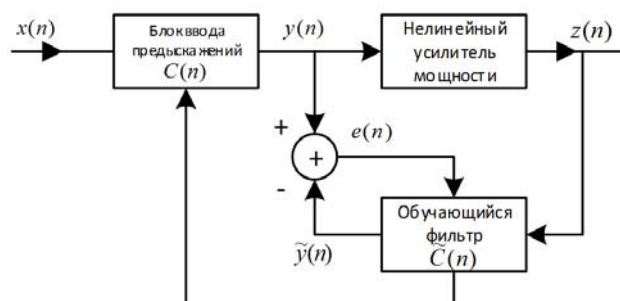


Рис. 2. Структурная схема системы ввода предсказаний с обучением

Fig. 2. Block diagram of the system for entering pre-orders with training

Адаптация параметров системы ввода предсказаний происходит по сигналу ошибки, который является разностью между сигналом на выходе блока ввода предсказаний в прямом

канале и сигнала на выходе обучающегося фильтра в обратном канале [15]. Коэффициенты системы ввода предсказаний постоянно подстраиваются (рекурсивный алгоритм) при сравнении двух сигналов с выхода блока ввода предсказаний и выхода обучающегося фильтра [16]. Основными алгоритмами адаптации для систем с обучением являются:

- метод наименьших квадратов (LMS);
- нормализованный метод наименьших квадратов (NLMS);
- рекурсивный метод наименьших квадратов (RLS);
- рекурсивный метод прогноза ошибки (RPEM).

Для оценки алгоритмов цифровых предсказаний в среде matlab/simulink была разработана модель для методов LMS, NLMS, RLS, RPEM и модель усилителя мощности с реальными характеристиками. Параметры модели усилителя мощности:

- диапазон частот – 4,4–5 ГГц;
- максимальная излучаемая мощность – 100 Вт;
- интермодуляционные искажения третьего порядка – минус 27 дБ.

По результатам моделирования алгоритмов был выбран RLS. Кроме того, в рамках данной работы был разработан модифицированный вариант алгоритма адаптации на основе рекурсивного метода наименьших квадратов (RLSm). Основным результатом модификации стало:

- уменьшение количества арифметических операций, необходимых для выполнения одной итерации (более чем в 5 раз);
- повышение стабильности алгоритмов адаптации за счёт введения методов регуляризации;
- уменьшение времени сходимости за счёт введения экспоненциальной зависимости фактора «забывания».

Разработанная модель позволила оценить спектральные характеристики сигналов (ACPR), скорость сходимости алгоритмов и модуль вектора ошибки (EVM) относительно входного сигнала.

Данная модель в matlab/simulink позволила получить результаты в автоматическом режиме для всех разработанных алгоритмов, частот излучения усилителя мощности и излучаемой мощности. На рис. 3 представлен спектр сигнала на выходе модели для полосы 28 МГц и частоты несущего сигнала 5 ГГц.

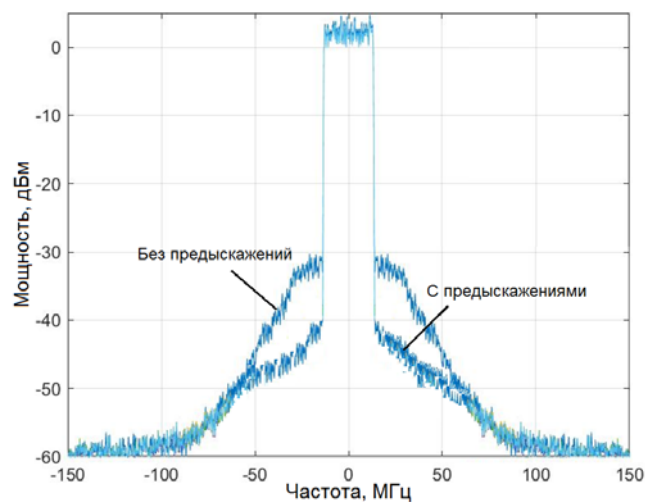


Рис. 3. Спектр сигнала на выходе модели до и после алгоритмов предсказаний

Fig. 3. The signal spectrum at the model output before and after the pre-detection algorithms

Как видно из рис. 3, использование предскажений позволяет существенно снизить уровень нелинейных искажений (уровень помехи в соседнем канале снизился на 10 дБ). Использование предскажений позволяет снизить величину модуля вектора ошибки (EVM) на 13,5 дБ, а также существенно увеличить соотношение модуляция/ошибка (MER) на 13,6 дБ.

### Заключение

В результате анализа и моделирования были выработаны методы, позволившие увеличить энергетическую эффективность режима OFDM. Проведено моделирование различных алгоритмов понижения пик-фактора. Реализованы два наилучших алгоритма снижения PAPR наиболее подходящих для применения в канале с замираниями из-за использования большого количества поднесущих OFDM, а именно Active Constellation Extension (ACE) и Tone Reservation (TR), которые используются каскадно и позволяют уменьшить пик-фактор на 4,8 дБ. Для увеличения линейности передающего тракта был выбран и модернизирован алгоритм ввода цифровых предскажений RLSm, он позволил снизить величину модуля вектора ошибки (EVM) на 13,5 дБ, а также увеличить соотношение модуляция/ошибка (MER) на 13,6 дБ. Полученные результаты позволят значительно повысить энергетическую эффективность режима OFDM, приведут к устойчивой связи в нестационарном канале, подверженном межсимвольной интерференции, и увеличению пропускной способности.

### Библиографические ссылки

1. R. Gustafsson. Combating Intersymbol Interference and Cochannel Interference in Wireless Communication Systems. Blekinge Institute of Technology, 2003.
2. ITU-R P.1407-8. Multipath propagation and parameterization of its characteristics. International Telecommunication Union, 2021.
3. G. B. Umesha, M. N. Shanmukha Swamy, "Performance of OFDM System for Wireless Communication through Channel Estimation", International Journal of Electronics // Electrical and Computational System. 2017. Vol. 6, No. 1. P. 21–26.
4. Rahman M., Das S., Fitzek F. Ofdm based wlan systems. Center for TeleInfrastruktur (CTiF), Technical report R-04- 1002, 2005.
5. Songchar Jiang, White Lin and Shao-kuang Tsou. Performance evaluation and improvement of the OFDM-based Wireless Metropolitan Area Networks // 2007 Asia-Pacific Conference on Communications. 2007. P. 137–140. Doi: 10.1109/APCC.2007.4433522.
6. Wang F. The application of MIMO-OFDM system in troposcatter communication // 2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 2008. P. 1957–1959. Doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540872.
7. Mehdi Hosseinzadeh Aghdam, Abbas Ali Sharif. PAPR reduction in OFDM systems: An efficient PTS approach based on particle swarm optimization. Department of Computer Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.
8. Krongold B. S., Jones, D. L. Par reduction in ofdm via active constellation extension // IEEE Transactions on Broadcasting. 2003. No. 49(3). P. 258–268. Doi: 10.1109/TBC.2003.817088 (<https://doi.org/10.1109/TBC.2003.817088>).
9. Singh M., Patra S. K. Partial transmit sequence optimization using improved harmony search algorithm for PAPR reduction // OFDM, ETRI J. 2017. No. 39 (6). P. 782–793.
10. Lee B. M., Kim Y., R.P.F. Performance analysis of the clipping scheme with SLM technique for PAPR reduction of OFDM signals in fading channels // Wirel. Pers. Commun. 2012. No. 63 (2). P. 331–344.
11. Tellado J. Multicarrier Modulation with Low PAR. The International Series in Engineering and Computer Science. 2002. Doi:10.1007/b117134 (<https://doi.org/10.1007/b117134>).

12. Seung Hee Han, Jae Hong Lee. Modulation, coding and signal processing for wireless communications – An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission // *IEEE Wireless Communications*. 2005. No. 12(2). P. 56–65. Doi: 10.1109/MWC.2005.1421929 (<https://doi.org/10.1109/MWC.2005.1421929>).
13. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers / D. Morgan, Ma, Kim, Zierdt, Pastalan // *IEEE Trans. Sig. Proc.* 2006. Vol. 54. P. 3852–3860.
14. Кащенко И. Е. Метод линеаризации декаметрового радиопередающего тракта на основе таблиц компенсации нелинейных искажений // *Техника радиосвязи*. 2015. № 1 (24). С. 78–85.
15. Gan L. Adaptive digital predistortion of nonlinear systems // Ph.D. Thesis, Faculty of Electrical and Information Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria. 2009.
16. Ding L. A least square/Newton method for digital predistortion of wideband signals / L. Ding, Z. Ma, D. R. Morgan et al. // *IEEE Trans. on Communications*. 2006. Vol. 54, No. 5. P. 833–840.

## References

1. Gustafsson R. Combating Intersymbol Interference and Cochannel Interference in Wireless Communication Systems. Blekinge Institute of Technology, 2003.
2. ITU-R P.1407-8. Multipath propagation and parameterization of its characteristics. International Telecommunication Union, 2021.
3. Umsha G. B., Shanmukha Swamy M. N. “Performance of OFDM System for Wireless Communication through Channel Estimation” // *International Journal of Electronics, Electrical and Computational System*. 2017. Vol. 6, No. 1. P. 21–26.
4. Rahman M., Das S., Fitzek F. Ofdm based wlan systems, Center for TeleInfrastruktur (CTiF), Technical report R-04- 1002, 2005.
5. Songchar Jiang, White Lin and Shao-kuang Tsou. Performance evaluation and improvement of the OFDM-based Wireless Metropolitan Area Networks. *2007 Asia-Pacific Conference on Communications*. 2007, P. 137–140. Doi: 10.1109/APCC.2007.4433522.
6. Wang F. The application of MIMO-OFDM system in troposcatter communication. *2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*. 2008, P. 1957–1959. Doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540872.
7. Mehdi Hosseinzadeh Aghdam, Abbas Ali Sharif. PAPR reduction in OFDM systems: An efficient PTS approach based on particle swarm optimization. Department of Computer Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.
8. Krongold B. S., Jones, D. L. Par reduction in ofdm via active constellation extension. *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2003, No. 49(3), P. 258–268. Doi:10.1109/TBC.2003.817088 (<https://doi.org/10.1109/TBC.2003.817088>).
9. Singh M., Patra S. K. Partial transmit sequence optimization using improved harmony search algorithm for PAPR reduction. *OFDM, ETRI J.* 2017, No. 39 (6), P. 782–793.
10. Lee B. M., Kim Y., R. P. F, Performance analysis of the clipping scheme with SLM technique for PAPR reduction of OFDM signals in fading channels. *Wirel. Pers. Commun.* 2012, No. 63 (2), P. 331–344.
11. Tellado J. Multicarrier Modulation with Low PAR. The International Series in Engineering and Computer Science. 2002. Doi:10.1007/b117134 (<https://doi.org/10.1007/b117134>).
12. Seung Hee Han, Jae Hong Lee. Modulation, coding and signal processing for wireless communications – An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission. *IEEE Wireless Communications*. 2005, No. 12(2), P. 56–65. Doi: 10.1109/MWC.2005.1421929 (<https://doi.org/10.1109/MWC.2005.1421929>).
13. Morgan D. Ma, Kim, Zierdt, Pastalan. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers. *IEEE Trans. Sig. Proc.* 2006, Vol. 54, P. 3852–3860.

14. Kashchenko I. E. [Linearization method for a decameter radio transmission path based on non-linear distortion compensation tables]. *Tekhnika radiosvyazi*. 2015, No. 1 (24), P. 78–85 (In Russ.).

15. Gan L. Adaptive digital predistortion of nonlinear systems. Ph.D. Thesis, Faculty of Electrical and Information Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria. 2009.

16. Ding L., Ma Z., Morgan D. R., Zierdt M., Pastalan J. A least square/Newton method for digital predistortion of wideband signals. *IEEE Trans. on Communications*. 2006, Vol. 54, No. 5, P. 833–840.

© Луферчик П. В., Конев А. Н., Богатырев Е. В., Галеев Р. Г., 2022

---

**Луферчик Павел Валерьевич** – начальник отдела; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: Luferchikp@gmail.com.

**Конев Александр Николаевич** – инженер-конструктор 3 категории; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: FBRLC@ya.ru.

**Богатырев Евгений Владимирович** – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научно-техническому развитию; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: info@krtz.su.

**Галеев Ринат Гайсеевич** – доктор технических наук, генеральный директор; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: info@krtz.su.

**Luferchik Pavel Valerievich** – Head of the Department; JSC SPE “Radiosvyaz”. E-mail: Luferchikp@gmail.com.

**Konev Aleksandr Nikolayevich** – Design Engineer 3rd category; JSC SPE “Radiosvyaz”. E-mail: FBRLC@gmail.com.

**Bogatyrev Evgeny Vladimirovich** – Cand. Sc., Deputy General Director for Scientific and Technical Development; JSC SPE “Radiosvyaz”. E-mail: info@krtz.su.

**Galeev Rinat Gaiseevich** – Dr. Sc., General Director; JSC SPE “Radiosvyaz”. E-mail: info@krtz.su.

---