

18. Hussein M.A., Venard O., Feuvrie B. and Wang Y. Digital predistortion for RF power amplifiers: State of the art and advanced approaches, *2013 IEEE 11th International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, 2013, pp. 1-4. DOI: 10.1109/NEWCAS.2013.6573671.
19. Jaradat A.M., Hamamreh J.M. and Arslan H. Modulation options for OFDM-based waveforms: Classification comparison and future directions, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 17263-17278.
20. Tao Jiang, Guanghi Zhu. Complement Block Coding for Reduction in Peak-to-Average Power Ratio of OFDM Signals, *IEEE Radio Communications*, Sept. 2005, pp. S17-S22.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент Ф.В. Зандер.

**Луферчик Павел Валерьевич** – АО «НПП «Радиосвязь»; e-mail: Lufurchikp@gmail.com; г. Красноярск, Россия; тел.: +79232942552; начальник отдела.

**Комаров Алексей Александрович** – e-mail: komarovalal@gmail.com; тел.: +79831576492; инженер-конструктор.

**Штро Павел Викторович** – e-mail: faust\_256@mail.ru; тел.: +79069712716; главный специалист.

**Конев Александр Николаевич** – e-mail: FBRLC@ya.ru; тел.: +79082181452; инженер-конструктор.

**Lufurchik Pavel Valerievich** – JSC SPE Radiosvyaz; e-mail: Lufurchikp@gmail.com; Krasnoyarsk, Russia; phone: +79232942552; head of the department.

**Komarov Alexey Alexandrovich** – e-mail: komarovalal@gmail.com; phone: +79831576492; design engineer.

**Shtro Pavel Viktorovich** – e-mail: faust\_256@mail.ru; phone: +79069712716; chief specialist.

**Konev Alexandr Nikolaevich** – e-mail: FBRLC@ya.ru; phone: +79082181452; design engineer.

УДК 621.391.01

DOI 10.18522/2311-3103-2022-4-238-244

**П.В. Луферчик, П.В. Штро, А.Н. Конев, А.А. Комаров**

### **РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ В ТРОПОСФЕРНОМ РАДИОКАНАЛЕ НА БАЗЕ OFDM-СИГНАЛОВ**

*Известно, что при передаче данных в системах радиорелейной и тропосферной связи может возникать межсимвольная интерференция. Наличие многолучевого распространения и частотно-селективных замираний в тропосферном, радиорелейном существенно понижает энергетическую эффективность системы связи в целом. Целью работы было добиться увеличения эффективности использования канала для радиорелейной и тропосферной связи путем использования OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) при помощи методов уменьшения пик-фактора OFDM сигнала и увеличения линейности передающего тракта. Для оценки алгоритмов цифровых предскажений в среде Matlab/Simulink была разработана модель для методов LMS, NLMS, RLS, RPEM и модель усилителя мощности с реальными характеристиками. По результатам моделирования алгоритмов был выбран RLS. Кроме того, в данной работе был разработан модифицированный вариант алгоритма адаптации на основе рекурсивного метода наименьших квадратов (RLSm). Основным результатом модификации являются: 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. Были исследованы различные алгоритмы уменьшения пик-фактора OFDM сигнала, наилучший результат удалось достичь при комбинировании Tone reservation (TR) и Active constellation extension (ACE). Моделирование в среде Matlab/Simulink показало, что комбинация алгоритмов TR и ACE уменьша-*

ет пик-фактор OFDM сигналов на  $\sim 5$ дБ для BPSK потока данных и  $\sim 4.5$ дБ для 8-PSK, QAM-16, QAM-64, QAM-128 и QAM-256. Для увеличения линейности передающего тракта был выбран и модернизирован алгоритм ввода цифровых предискажений RLSm, он позволил снизить величину модуля вектора ошибки (EVM) на 13.5дБ, а также увеличить соотношение модуляция/ошибка (MER) на 13.6дБ.

Цифровые предискажения; резервирование тона; расширение активного сигнального созвездия(ACE); пик-фактор; тропосферная связь; радиорелейная связь; OFDM.

**P.V. Lufurchik, P.V. Shtro, A.N. Konev, A.A. Komarov**

### **DEVELOPMENT OF ENERGY EFFICIENT COMMUNICATION SYSTEM IN THE TROPOSPHERE RADIO CHANNEL BASED ON OFDM SIGNALS**

*It is known that inter-symbol interference may occur during data transmission in radio relay and tropospheric communication systems. The presence of multipath propagation and frequency-selective fading in the tropospheric, radio relay channel significantly reduces the energy efficiency of the communication system as a whole. The aim of the work was to increase the efficiency of using the channel for radio relay and tropospheric communication by using OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing using the methods of reducing the peak factor of the OFDM signal and increasing the linearity of the transmission path. To evaluate digital predistortion algorithms in the Matlab/Simulink environment, a model was developed for the LMS, NLMS, RLS, RPEM methods and a power amplifier model with real characteristics. Based on the results of modeling algorithms, RLS was chosen. In addition, in this work, a modified version of the adaptation algorithm based on the recursive least squares method (RLSm) was developed. The main result of the modification is: a decrease in the number of arithmetic operations per iteration (more than 5 times), an increase in the stability of adaptation algorithms, due to the introduction of regularization methods, a decrease in the convergence time, due to the introduction of an exponential dependence. Various algorithms for reducing the peak factor of an OFDM signal were investigated, the best result was achieved by combining Tone reservation (TR) and Active constellation extension (ACE). Simulation in the Matlab/Simulink environment showed that the combination of TR and ACE algorithms reduces the peak factor of OFDM signals by  $\sim 5$ дБ for BPSK data stream and  $\sim 4.5$ дБ for 8-PSK, QAM-16, QAM-64, QAM-128 and QAM- 256. To increase the linearity of the transmission path, the RLSm digital pre-distortion algorithm was selected and upgraded, it made it possible to reduce the magnitude of the error vector modulus (EVM) by 13.5дБ, and also increase the modulation/error ratio (MER) by 13.6дБ.*

*Digital predistortion; tone reservation; active signal constellation expansion (ACE); peak factor; tropospheric communication; radio relay communication; OFDM.*

**Введение.** На сегодняшний день использование тропосферной связи широко распространено для задач, в которых применение проводной связи является невозможным, а спутниковые системы связи не обладают требуемыми тактико-техническими характеристиками, либо слишком дороги. В настоящее время тропосферная и радиорелейная связь активно используется в вооруженных силах России. Основными преимуществами тропосферного канала связи является надёжность и защита от преднамеренных помех. Такой вид связи слабо подвержен влияниям средств радиоэлектронной борьбы. Другим весомым преимуществом тропосферной связи является тот факт, что прием сигналов возможен только в непосредственной близости от падения тропосферного луча. Это означает, что несанкционированный перехват информации, передаваемой с помощью такого типа связи, является практически невыполнимой задачей. Большой потенциал у тропосферных и радиорелейных систем связи имеется и на гражданском рынке. Потребителями таких систем являются компании преимущественно из добывающих отраслей, в том числе нефтегазовой отрасли. Также, на сегодняшний день актуальная задача борьбы с так называемым «цифровым неравенством» граждан РФ. Тропосферные и радиорелейные виды связи могут быть использованы для обеспечения

высокоскоростным интернетом малонаселенных и удаленных поселений. Благодаря описанным выше защитным свойствам, допустимо применение таких систем связи в качестве связи двойного назначения в новопринятых субъектах РФ. Однако, на текущий момент, пропускная способность серийных отчетственных станций тропосферной и радиорелейной связи весьма ограничена. Но современные, вычислительно сложные алгоритмы позволяют существенно улучшить эффективность использования канала, тем самым сделав его более привлекательным. Вместе с тем тропосферные системы связи имеют ряд недостатков. В первую очередь стоит помнить, что тропосферный канал связи не стационарен и его состояние может изменяться до ста раз в секунду, а многолучевость приводит к межсимвольной интерференции и частотно-селективным замираниям, что существенно снижает энергетическую эффективность системы связи. Данные недостатки возможно обойти с использованием модуляции OFDM. Данный вид модуляции имеет высокий пик-фактор, что в свою очередь делает очень строгими требования к используемым усилителям. Таким образом разработка и комбинирование алгоритмов уменьшения пик-фактора является актуальной для современной радиотехники задачей.

**Постановка задачи.** На сегодняшний день серийно выпускаются станции тропосферной связи Р-423-ПМ и Р-423-АМК со скоростью передачи данных не превышающей 2048кбит/с. Увеличение скорости передачи информации является актуальной задачей для тропосферной связи. Препградой для увеличения пропускной способности тропосферного радиоканала выступает многолучевое распространение и частотно-селективные замирания сигнала. Для получения максимальной пропускной способности тропосферного радиоканала необходимо плавное изменение скоростей передачи данных, чтобы приблизиться к истинной пропускной способности радиоканала. Для того чтобы максимально эффективно обойти имеющиеся ограничения было принято решение использовать OFDM сигналов в тропосферном канале связи.

**Решение поставленной задачи.** Мультиплексирование множества потоков передачи данных различных типов модуляторов (BPSK, QPSK, QAM) позволяет реализовать плавное изменение скоростей передачи данных, а также эффективно бороться с частотно-селективными замираниями.

Станции тропосферной связи зачастую используют нелинейные усилители в передающем тракте, для уменьшения габаритов и энергопотребления станции связи. Для применения OFDM сигналов в существующих станциях тропосферной связи необходимо использовать различные алгоритмы линеаризации передающего тракта, а также использовать алгоритмы уменьшения пик-фактора OFDM сигнала.

В ходе обзора отечественной и зарубежной литературы было обнаружено множество методов уменьшения пик-фактора OFDM-сигналов. Наилучшие результаты уменьшения пик-фактора дала комбинация алгоритмов Tone reservation(TR) [1] и Active constillation extension(ACE) [2]. Моделирование в среде matlab/simulink показало, что комбинация алгоритмов TR и ACE уменьшает пик-фактор OFDM сигналов на ~5.5дБ для BPSK потока данных и ~4.5дБ для 8-PSK, QAM-16, QAM-64, QAM-128 и QAM-256.

Для дальнейшего увеличения энергетической эффективности системы тропосферной связи с OFDM сигналами было рассмотрено несколько способов реализации функционального блока ввода предсказаний:

Аналитический способ, на основе нелинейной функциональной зависимости (полиномиальная модель, полиномиальная модель с памятью, модель на основе рядов Вольтера и др.) [3–5].

Комбинированный способ, на основе табличной аппроксимации известных нелинейных функций.

К преимуществам табличного способа относится невысокая трудоёмкость вычисления значений таблиц аппроксимации. Для табличного способа применяется линейная, кубическая, кусочно-линейная или сплайновая аппроксимация. Однако, табличный способ малоприменим для описания инерционных свойств усилителей мощности, так как для их описания требуется увеличение количества таблиц и существенно усложняется процедура вычисления значений этих таблиц. То же самое относится и к процедуре адаптации таблиц с течением времени, так как адаптировать необходимо каждый элемент таблиц.

Аналитический способ предполагает использование нелинейных функциональных зависимостей, как правило, степенных функций (полиномов), для расчёта коэффициентов полиномов решается линейная задача наименьших квадратов через процедуру псевдо-обращения Мура-Пенроуза, сингулярное разложение, QR-разложение и др. [6, 7]. Преимуществом аналитического способа является возможность использования рядов Вольтера для полноценного описания нелинейных свойств усилителя мощности с учётом влияния инерционных свойств в различные моменты времени, а также упрощённых вариантов рядов Вольтера: модель Вольтера со снижением девиации динамики, полиномиальная модель с памятью, обобщённая полиномиальная модель с памятью и др. [8, 9].

Адаптацию коэффициентов блока ввода предсказаний, выполненного на основе аналитической модели целесообразно выполнять с помощью алгоритма косвенного обучения. Основным преимуществом алгоритма косвенного обучения является то, что он способен начать работу с «нуля», не имея начальных (заранее рассчитанных) параметров для блока ввода предсказаний. Структурная схема системы ввода предсказаний с косвенным обучением представлена на рис. 1.

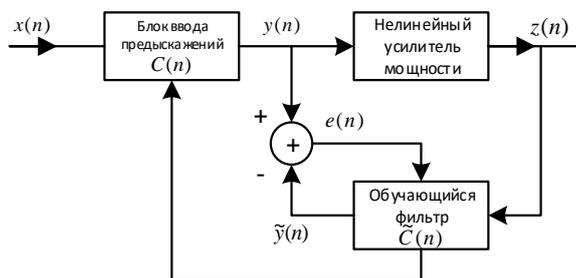


Рис. 1. Структурная схема системы ввода предсказаний с косвенным обучением

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 [9]. Коэффициенты системы ввода предсказаний постоянно подстраиваются (рекурсивный алгоритм) при сравнении двух сигналов с выхода блока ввода предсказаний и с выхода обучающегося фильтра. Основными алгоритмами адаптации для систем с косвенным 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 являются: 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».

Для оценки эффективности алгоритмов адаптации была разработана модель усилителя мощности. Данная модель разработана на основе сигналов входа и выхода, полученных от реального усилителя мощности. Основой модели является аналитическое описание на базе обобщённой полиномиальной модели с памятью [7]:

$$y_{gmp} = \sum_{k \in K_a} \sum_{l \in L_a} a_{kl} x(n-l) |x(n-l)|^k + \sum_{k \in K_b} \sum_{l \in L_b} \sum_{m \in M_b} b_{klm} x(n-l) |x(n-l-m)|^k + \sum_{k \in K_c} \sum_{l \in L_c} \sum_{m \in M_c} c_{klm} x(n-l) |x(n-l+m)|^k \quad (1)$$

В данной модели  $K_a L_a$  – число коэффициентов для сигнала и огибающей записанных без временной задержки,  $K_b L_b M_b$  – число коэффициентов для сигнала и огибающей записанных с задержкой,  $K_c L_c M_c$  – число коэффициентов для сигнала и огибающей записанных с опережением. Таким образом, в данной модели учитывается влияние перекрёстных членов, ограниченных величиной задержки  $M_b$ .

Разработанная модель позволила оценить спектральные характеристики сигналов (ACPR), скорость сходимости алгоритмов и модуль вектора ошибки (EVM) относительно входного сигнала. На рис. 2 представлены сигнальные созвездия без использования предсказаний и с использованием предсказаний с алгоритмом адаптации RLS на выходе модели для полосы 28 МГц, частоты несущего сигнала 5 ГГц и мощности 100 Вт.

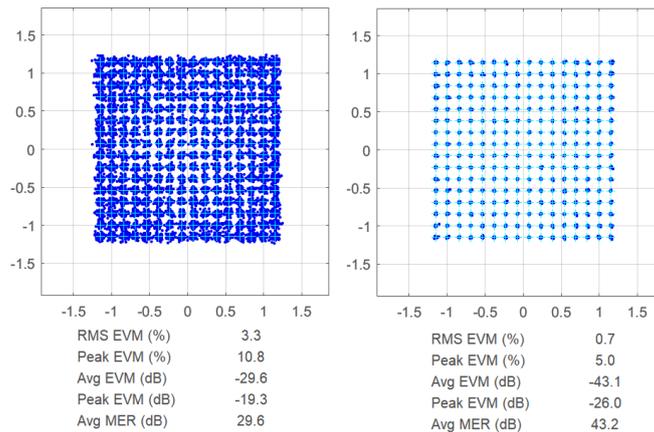


Рис. 2. Сигнальные созвездия с использованием предсказаний и без использования предсказаний с алгоритмом адаптации RLS на выходе модели для полосы 28 МГц, частоты несущего сигнала 5 ГГц и мощности 100 Вт

Как видно из данных, представленных на рис. 2, использование предсказаний позволяет снизить величину модуля вектора ошибки (EVM), а также существенно увеличить соотношение модуляция/ошибка (MER). На рис. 3 представлен спектр сигнала на выходе модели для полосы 28 МГц и частоты несущего сигнала 5 ГГц.

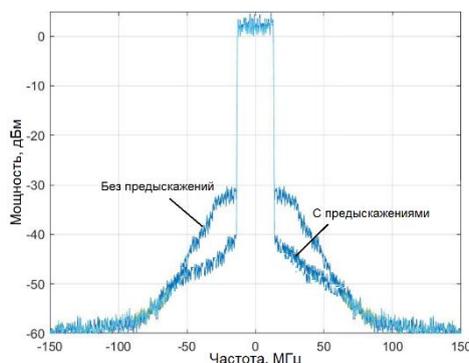


Рис. 3. Спектр сигнала на выходе модели до и после алгоритмов предсказаний

**Заключение.** Использование предсказаний позволяет существенно снизить уровень нелинейных искажений (уровень помехи в соседнем канале снизился на 10 дБ). Также уменьшается величина модуля вектора ошибки (EVM) на 13.5дБ и существенно увеличивается соотношение модуляция/ошибка (MER) на 13.6дБ.

В результате анализа и моделирования были выработаны методы, позволившие увеличить энергетическую эффективность режима OFDM в тропосферных станциях связи. Проведено моделирование различных алгоритмов понижения пик-фактора. Реализованы два наилучших алгоритма снижения PAPR наиболее подходящих для применения в тропосферном канале. Комбинация алгоритмов Active Constellation Extension (ACE) и Tone Reservation (TR) позволяет существенно уменьшить пик-фактор OFDM сигналов. Для увеличения линейности передающего тракта был выбран и модернизирован алгоритм ввода цифровых предсказаний RLSm, он позволил снизить величину модуля вектора ошибки (EVM) на 13.5дБ, а также увеличить соотношение модуляция/ошибка (MER) на 13.6дБ. Полученные результаты позволят значительно повысить энергетическую эффективность режима OFDM, приведут к устойчивой связи в нестационарном тропосферном канале и увеличению пропускной способности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Filippo Tosato, Magnus Sandell, Makoto Tanahashi.* Tone Reservation for PAPR Reduction: an Optimal Approach through Sphere Encoding, *IEEE ICC 2016 - Signal Processing for Communications Symposium*.
2. *Sandeepkumar Vangalaa, Anuradha Sundrub.* Adaptive Clipping Active Constellation Extension for PAPR Reduction of OFDM/OQAM System, *6th International Conference on Advances In Computing & Communications, ICACC 2016, 6-8 September 2016, Cochin, India*.
3. *Ir. Johan Paduart,* Identification of Nonlinear systems using Polynomial Nonlinear State Space Model. Vrije Universiteit Brussel, 2008, pp. 102-104.
4. *Zhu A., Brazil T.J.* An overview of Volterra series based behavioral modeling of RF/microwave power amplifiers, *Wireless Microwave Technol. Conf.*, 2006, pp.101-107.
5. *Jeon W.G., Chang K.H., and Cho Y.S.* An Adaptive Data Predistorter for Compensation of Nonlinear Distortion in OFDM systems, *IEEE Transactions on Communications*, 1997, 45:11671171.
6. *Ding L., Ma Z., Morgan D.R., Zierdt M., and Pastalan J.* A least square/Newton method for digital predistortion of wideband signals, *IEEE Trans. on Communications*, May 2006, Vol. 54, No. 5, pp. 833-840.

7. *Gan L.* Adaptive digital predistortion of nonlinear systems: Ph.D. Thesis, Faculty of Electrical and Information Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria. – 2009.
8. *Morgan D., Ma Zh., Kim Ja., Zierdt M.G., and Pastalan J.* A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers, *IEEE Trans. Sig. Proc.*, 2006, Vol. 54, pp. 3852-3860.
9. *Zhu A., Pedro J.C., Brazil T.J.* Dynamic deviation reduction-based Volterra behavioral modeling of RF power amplifiers, *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, 2006, Vol. 54, No. 12, pp. 4323-4332.
10. *Iqbal H. and Khan S.A.* Selective Mapping: Implementation of PAPR Reduction Technique in OFDM on SDR Platform, *2018 24th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 2018, pp. 1-6. DOI: 10.23919/ICAC.2018.8749039.
11. *Helaly T.K., Dansereau R.M. and El-Tanany M.* "A Low Complexity PAR Reduction Technique Using Cyclic Shifted Data Sequences in DS-CDMA Signals," *2010 Sixth Advanced International Conference on Telecommunications*, 2010, pp. 196-200. DOI: 10.1109/AICT.2010.54.
12. *Xiao Y., Zhang L. and Imran M.* Active Constellation Extension for Peak Power Reduction Based on Positive and Negative Iterations in OFDM Systems, *2019 UK/ China Emerging Technologies (UCET)*, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/UCET.2019.8881859.
13. *Lin W.-L. and Tseng F.-S.* Theory and Applications of Active Constellation Extension, in *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 93111-93118. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3093103.
14. *Fang L. and De Figueiredo R.J.P.* Performance of OFDM-CDMA System with Papr Reduction in Nonlinear Rayleigh Fading Channel, *MILCOM 2006 - 2006 IEEE Military Communications conference*, 2006, pp. 1-6. DOI: 10.1109/MILCOM.2006.302544.
15. *Prabal Gupta, H. Pal Thethi, Ajay Tomer.* An efficient and improved PTS algorithm for PAPR reduction in OFDM system, *International Journal of Electronics*, 2022, 109:7, pp. 1252-1277.
16. *Yang W., Li H., Li M., Liu Y. and Liu Q.* Channel Estimation for Practical IRS-Assisted OFDM Systems, *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 2021, pp. 1-6. DOI: 10.1109/WCNCW49093.2021.9419982.
17. *Lu X., Shi Y., Li W., Lei J. and Pan Z.* A Joint Physical Layer Encryption and PAPR Reduction Scheme Based on Polar Codes and Chaotic Sequences in OFDM System, in *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 73036-73045. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919598.
18. *Mohammad Reza Motazedi, Reza Dianat.* An erasure-based scheme for reduction of PAPR in spatial multiplexing MIMO-OFDM using Reed-Solomon codes over GF(216 + 1), *International Journal of Electronics*, 2018, 105:9, pp. 1583-1597.
19. *Zhang H., Wu H.-C., Jiang H. and Huang S.C.-H.* Robust pilot detection techniques for channel estimation and symbol detection in OFDM systems, *2014 IEEE Global Communications Conference*, 2014, pp. 3025-3031. DOI: 10.1109/GLOCOM.2014.7037269.
20. *Jaradat A.M., Hamamreh J.M. and Arslan H.* Modulation options for OFDM-based waveforms: Classification comparison and future directions, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 17263-17278.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент Ф.В. Зандер.

**Луферчик Павел Валерьевич** – АО «НПП «Радиосвязь»; e-mail: Lufurchikp@gmail.com; г. Красноярск, Россия; тел.: +79232942552; начальник отдела.

**Штро Павел Викторович** – e-mail: faust\_256@mail.ru; тел.: +79069712716; главный специалист.

**Конев Александр Николаевич** – e-mail: FBRLC@ya.ru; тел.: +79082181452; инженер-конструктор.

**Комаров Алексей Александрович** – e-mail: komarovalal@gmail.com; тел.: +79831576492; инженер-конструктор.

**Lufurchik Pavel Valerievich** – JSC SPE Radiosvyaz; e-mail: Lufurchikp@gmail.com; Krasnoyarsk, Russia; phone: +79232942552; head of the department.

**Shtro Pavel Viktorovich** – e-mail: faust\_256@mail.ru; phone: +79069712716; chief specialist.

**Konev Alexandr Nikolaevich** – e-mail: FBRLC@ya.ru; phone: +79082181452; design engineer.

**Komarov Alexey Alexandrovich** – e-mail: komarovalal@gmail.com; phone: +79831576492; design engineer.