

Ибадов Рагим Рауфевич – Южный федеральный университет; e-mail: ragim_ibadov@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89298184480; ассистент.

Федосов Валентин Петрович – e-mail: vpfed@mail.ru; тел.: 89525601246; д.т.н.; профессор.

Ибадов Самир Рауфевич – e-mail: кyuууууууууууу@yandex.ru; тел.: 89518463738; аспирант.

Ibadov Ragim Raufevich – Southern Federal University; e-mail: ragim_ibadov@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79298184480; assistant.

Fedosov Valentin Petrovich – e-mail: vpfed@mail.ru; phone: +79525601246; dr. of eng. sc.; professor.

Ibadov Samir Raufevich – e-mail: кyuууууууууууу@yandex.ru; phone: +79518463738; graduate student.

УДК 621.391.01

DOI 10.18522/2311-3103-2022-4-231-238

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

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ OFDM ДЛЯ ТРОПОСФЕРНОГО И РАДИОРЕЛЕЙНОГО КАНАЛА

Известно, что при передаче данных в системах радиорелейной и тропосферной связи может возникать межсимвольная интерференция. Наличие многолучевого распространения, частотно-селективных замираний и крайней нестабильности в тропосферном и радиорелейном канале 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) сигналов в системе с использованием адаптивного кодирования и модуляции. В ходе выполнения реализованы модели модулятора и демодулятора OFDM сигнала. При использовании различных сигнально-кодовых конструкций в различных условиях приёма/передачи возможно достигать оптимального использования частотного и энергетического ресурса, создавать системы адаптирующиеся под условия распространения сигнала. Для реализации данного механизма в передаваемые служебные данные было внедрено служебное поле, содержащее в себе информацию об используемой кодовой скорости, типе модуляции и глубине перемежения. Данный подход позволяет оптимизировать использование энергетического и частотного ресурса. В совокупности с использованием алгоритмов оценки качества канала возникает возможность динамически изменять сигнально-кодовую конструкцию при изменении условий приёма. Регулировкой глубины перемежения возможно оптимизировать пороговое отношение С/Ш или величину задержки информации в канале в зависимости от требований к системе. Использование адаптивного выбора кодовой скорости и модуляции позволит более эффективно использовать ресурс канала при постоянном изменении его состояния. Полученные результаты позволят значительно повысить энергетическую эффективность режима OFDM, приведут к устойчивой связи в нестационарных каналах и увеличению пропускной способности.

Адаптивное кодирование и модуляция; тропосферная связь; радиорелейная связь; OFDM; сигнально-кодовые конструкции.

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

DEVELOPMENT OF ADAPTIVE OFDM-BASED COMMUNICATION SYSTEM FOR TROPOSPHERE AND RADIO RELAY CHANNEL

It is known that inter-symbol interference may occur during data transmission in radio relay and tropospheric communication systems. The presence of multipath propagation, frequency-selective fading and extreme instability in the tropospheric and radio relay channel significantly

reduces the energy efficiency of the communication system. 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) signals in the system using adaptive coding and modulation. In the course of execution, the modulator and demodulator models of the OFDM signal are implemented. When using various signal code structures in various reception/transmission conditions, it is possible to achieve optimal use of the frequency and energy resources, to create systems that adapt to the conditions of signal propagation. To implement this mechanism, a service field was introduced into the transmitted service data, which contains information about the code rate used, the modulation type, and the interleaving depth. This approach allows optimizing the use of energy and frequency resources. Together with the use of channel quality estimation algorithms, it becomes possible to dynamically change the signal-code structure when the reception conditions change. By adjusting the interleaving depth, it is possible to optimize the S/N threshold or the amount of information delay in the channel, depending on the system requirements. The use of adaptive choice of code rate and modulation will allow more efficient use of the channel resource with a constant change in its state. The obtained results will significantly increase the energy efficiency of the OFDM system, lead to stable communication in non-stationary channels and increase the throughput.

Adapting coding and modulation; tropospheric communication; radio relay communication; coding; modulation; OFDM.

Введение. Станции тропосферной и радиорелейной связи могут использоваться для передачи информации между удаленными объектами вне зависимости от рельефа местности в условиях, когда применение кабельной связи невозможно или неэффективно. Тропосферная и радиорелейная связь являются экономически более выгодными видами связи по сравнению со спутниковой связью из-за отсутствия расходов на аренду спутникового ресурса. Несмотря на более высокую стоимость самого оборудования, за один-два года эксплуатации станции тропосферной и/или радиорелейной связи, инвестиции в приобретение аппаратуры окупаются, поскольку пользователь не платит за аренду спутникового канала и не несет никаких других дополнительных расходов.

Основными ограничениями пропускной способности тропосферных и радиорелейных систем связи являются межсимвольная интерференция и частотно-селективные замирания, вызванные многолучевым распространением сигнала [1]. Одним из способов улучшения вышеназванных систем связи является применение цифровой схемы модуляции OFDM [2]. Гибкость систем на основе OFDM позволяет выбирать оптимальные параметры сигнала и динамически их изменять исходя из текущих параметров среды распространения. Данный подход может дать выигрыш в пропускной способности канала. Современные системы связи обладают огромной вычислительной мощностью, что позволяет, используя ресурсоёмкие алгоритмы, достигнуть высоких информационных скоростей и обеспечить максимально эффективное использование канала связи. Кроме того, возможно использование одних и тех же систем связи, как для тропосферной, так и для радиорелейной связи, что увеличивает возможности применения, как в гражданской, так и в военной технике, уменьшает номенклатуру выпускаемых изделий, без потери в функциональности.

Постановка задачи. Выбор оптимальной сигнально-кодовой конструкции является важнейшей задачей при проектировании современных средств связи. Использование OFDM является перспективным направлением развития тропосферной и радиорелейной связи. Гибкость системы на основе OFDM позволяет динамически подстраиваться под условия передачи, требования к задержкам в канале. В связи с этим была поставлена задача разработать приёмник и передатчик для использования в тропосферном и радиорелейном канале связи адаптирующийся под состояние радиоканала. В качестве критериев адаптации использовать вид модуляции, кодовую скорость и глубину перемежения. Предусмотреть передачу

служебных данных содержащих информацию о сигнально-кодовой конструкции. Изучить возможный выигрыш от использования адаптивной системы по сравнению с системой, обеспечивающей гарантированную скорость исходя из наихудшего состояния канала в течении суток.

Решение поставленной задачи. Модель рассмотренная в данной работе, разработана в среде MatLab/simulink, исследованы различные сигнально-кодовые конструкции, проведено сравнение, сделаны выводы о возможности использования тех или иных сигнально-кодовой конструкции (СКК).

Ниже приведено описание приёмной и передающей части рассмотренной системы.



Рис. 1. Схема передающей части

Структура OFDM-модулятора представлена на рис. 1. Турбо-кодер кодирует данные со скоростью $1/3$ с последующим выкалыванием данных, до скоростей $1/3$, $1/2$, $2/3$, $3/4$ или $5/6$. Далее кодированные данные поступают на сверточный перемежитель от 0 до 400 мс с шагом 10 мс. Далее происходит формирование блоков, вставляются синхропоследовательности и маркирование блоков. Далее происходит маппинг кодированных данных на созвездия QPSK, 8PSK, 16QAM, 64QAM, 128QAM или 256QAM. Вместе с данными формируется заголовок, который модулируется QPSK модуляцией и кодируется с кодовой скоростью $1/3$, содержащий информацию о текущей СКК, а также информацию об оценке канала с приемника. Далее по длине кадра выполняется матричное перемежение и накладывается ПСП для выполнения скремблирования. Далее происходит вставка пилот тонов для оценки характеристики канала в приёмнике. Перемеженные данные поступают на OFDM модулятор, где поднесущие с данными и пилотами преобразуются во временную область [3].

Далее рассмотрим приёмную часть, на рис. 2 приведена её структурная схема.

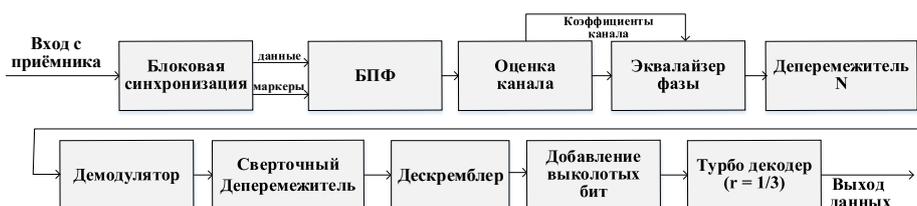


Рис. 2. Схема приёмной части

Блоковый синхронизатор реализован по схеме скользящего коррелятора Система имеет многоуровневую синхронизацию. На начальном этапе осуществляется поиск основных синхронизирующих последовательностей, маркирующих начало блоков. Поиск осуществляется сравнением пиков корреляционной функции с пороговым значением. С выхода блокового синхронизатора сигнал поступает на OFDM-демодулятор, реализованный посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ). Далее сигнал поступает на блок оценки канала. Данный блок выполняет

скользящее усреднение сигналов пилот-тонов по времени, меньшему интервала когерентности канала. Затем проводится оценка сдвига фазы и изменения амплитуды каждого пилот-тона. Полученные значения интерполируются по частоте между пилот-тонами для получения оценочных сдвигов фазы и изменений амплитуды по информационным поднесущим, расположенным между пилот-тонами.

Далее сигнал выравнивается по фазе, что необходимо для корректной работы блока умножения на ПСП и поступает на депережежитель длиной N (число несущих OFDM). В многолучевом канале при достаточно большом количестве несущих замирания на соседних несущих являются коррелированными. Это приводит к тому, что символы, несмотря на расширение спектра, могут попасть в замирание целиком, что приведет к усилению шума. Корреляция между несущими приводит к увеличению вероятности ошибки на бит. Чтобы избежать корреляции, в передатчике перемежитель N переставляет местами расширенные символы по поднесущим таким образом, чтобы различные куски одного символа оказались в некоррелированных группах. Депережежитель N выполняет обратную функцию, вновь объединяя части одного символа. Данные с депережежителя поступают на демодулятор, а затем на сверточный депережежитель. После чего к данным добавляются выколотые при увеличении кодовой скорости биты и происходит декодирование сигнала.

В модель были добавлены источник сигнала (генератор ПСП) и контрольная схема счета ошибок позволяющая определить достоверность принимаемой информации. Сигнал был пропущен через канал с аддитивным белым гауссовским шумом. При моделировании были получены кривые достоверности для различных сигнально-кодовых конструкций.

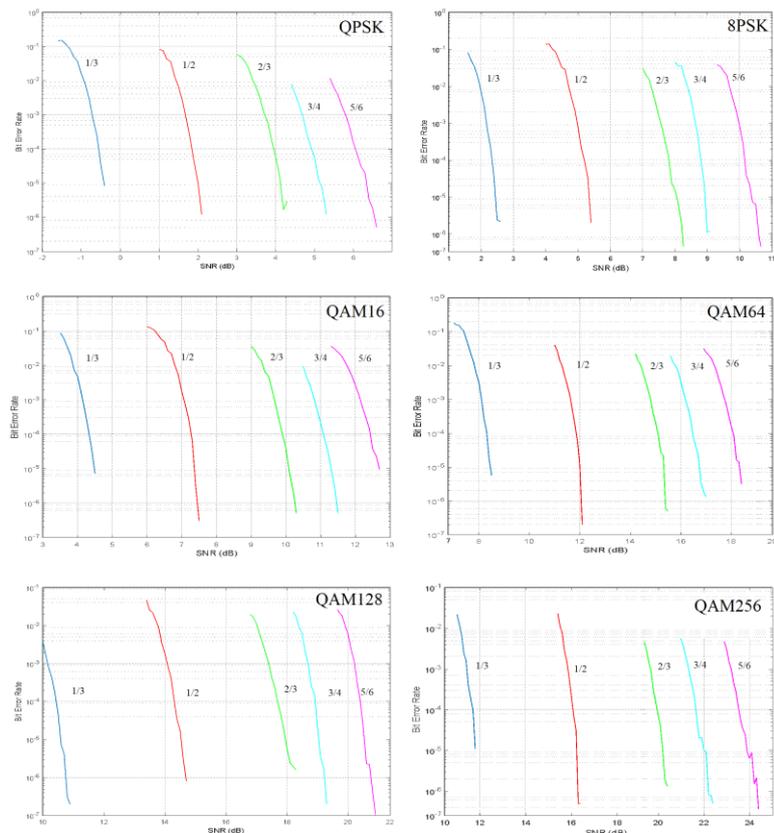


Рис. 3. Зависимость BER от C/Ш для различных сигнально-кодовых конструкций

При использовании различных сигнально кодовых конструкций в различных условиях приёма/передачи возможно достигать оптимального использования частотного ресурса и энергетике, создавать системы адаптирующиеся под условия распространения сигнала. Для реализации данного механизма в передаваемые служебные данные было внедрено служебное поле, содержащее в себе информацию об используемой кодовой скорости и типе модуляции закодированное в соответствии с табл. 1.

Кроме того в сигнал подмешаны пилот сигналы, которые позволяют оценивать качество канала. В связи с тем, что изменения состояния тропосферного канала происходят до ста раз в секунду, и носят случайный характер, возникает необходимость постоянного слежения за каналом и оперативной подстройки. Для увеличения устойчивости алгоритмов к случайным выбросам шумов эквалайзер подстраивается итерационно с постоянной времени подобранной таким образом, чтобы система могла подстроиться под изменения в канале и при этом отфильтровать максимально возможное количество шумов в измерениях уровня сигнала. Эквалайзер спроектирован по критерию минимальное среднеквадратичное отклонение ошибки (MMSE) позволяет взвешенно усиливать шум и полезный сигнал на ослабленных из-за селективности канала поднесущих, что улучшает итоговый BER системы. Математически данный метод можно описать как

$$X(k) = Y(k)H(k)'D[H(k)] + D[w] \times D[x],$$

где $D[w]$ – дисперсия шума, $D[x]$ – дисперсия полезного сигнала. $X(k)$ – переданный сигнал, $Y(k)$ – принятый сигнал, $H(k)$ – передаточная функция канала $D[H(k)]$ – дисперсия передаточной функции. На практике мощность полезного сигнала нормируется к единице и поэтому требуется только оценка мощности шума. Коррекция фазы и амплитуды в промежутках между пилот тонами выполняется путем линейной интерполяции.

Для оценки неравномерности канала происходит вычисление среднеквадратичного отклонения мощности пилот сигналов.

Кроме того, для борьбы с частотно селективными замираниями предусмотрен режим с дублированием информации сразу на несколько поднесущих, что позволяет при приёме просуммировать их и, тем самым увеличить отношение сигнал/шум за счет уменьшения информационной скорости в канале либо увеличения полосы сигнала.

Совокупность предложенных методов позволяет оптимизировать использование энергетического и частотного ресурса, добиться максимально возможной пропускной способности при текущем состоянии канала связи. В совокупности с использованием алгоритмов оценки качества канала возникает возможность динамически изменять сигнально-кодую конструкцию при изменении условий распространения. Регулировкой глубины перемежения возможно оптимизировать пороговое отношение С/Ш или величину задержки информации в канале в зависимости от требований к системе.

Таблица 1

Кодирование видов модуляции и кодовых скоростей

Модуляция	Индекс модуляции	Кодовая скорость	Индекс кодовой скорости	Глубина перемежения, мс	Индекс перемежения
QPSK	1	1/3	1	0	1
8-PSK	2	1/2	2	20	2
16-QAM	3	2/3	3	40	3
64-QAM	4	3/4	4	80	4
128-QAM	5	5/6	5	160	5
256-QAM	6			400	6

Заключение. Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод что рассмотренные подходы возможно использовать в системах тропосферной и радиорелейной связи, но следует учитывать высокий пик-фактор OFDM сигнала [4], что делает требования к линейности используемых усилителей более строгими и вызывает необходимость включать в систему алгоритмы уменьшения пик-фактора [5], OFDM сигнала и цифровых предискажений. Моделирование пропускной способности тропосферной линии связи в зависимости от времени суток позволяет сделать вывод, что использование адаптивной системы даст выигрыш в суточной пропускной способности канала не менее 30%, по сравнению с неадаптивной системой, разработанной с учетом наихудшего состояния канала в течении суток. Дальнейшее уточнение полученного выигрыша требует натурных испытаний, запланированных на ближайшее время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Давыденко Ю.И.* Дальняя тропосферная связь. – М.: Военное издательство министерства обороны СССР, 1968.
2. *Maokai, Chen Xihong 'Shu Tao 'Dong Shaoqiang.* New generation Troposcatter Communication Based on OFDM Modulation // Hu The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments ICEMI'2009.
3. *Скляр Б.* Цифровая связь. – М.: Изд. дом Вильямс, 2003.
4. *Baxley R.J., Chunming Zhao, and G. Tong Zhou.* Constrained Clipping for Crest Factor Reduction in OFDM // IEEE Transactions on Broadcasting. – Dec. 2006. – Vol. 52, No. 4. – P. 570-575.
5. *Armstrong J.* Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering // Electronics Letters 28th February 2002. – Vol. 38, No. 5. – P. 246-247.
6. *Arash Soltani, Mehdi Airamlozadeh & Jaber Parchami.* MIMO-OFDM channel estimation based on minimum error entropy criterion under non-Gaussian environment // International Journal of Electronics Letters. – 2022. – DOI: 10.1080/21681724.2022.2087909.
7. *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. – P. 1252-1277.
8. *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. – P. 1583-1597.
9. *Li Y., Wang X. and Zhu A.* "Reducing Power Consumption of Digital Predistortion for RF Power Amplifiers Using Real-Time Model Switching // in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – March 2022. – Vol. 70, No. 3. – P. 1500-1508. – DOI: 10.1109/TMTT.2021.3132347.
10. *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. – P. 1583-1597. – DOI: 10.1080/00207217.2018.1477192.
11. *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. – P. 833-840.
12. *Gan L.* Adaptive digital predistortion of nonlinear systems: Ph.D. Thesis, Faculty of Electrical and Information Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria. – 2009.
13. *Pawar D.S. and Badodekar H.S.* Review of PAPR Reduction Techniques in Wireless Communication // 2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN). – 2018. – P. 204-207. – DOI: 10.1109/GCWCN.2018.8668631.
14. *S. D V, T. P, S. B and S. M,* Improved Energy Efficiency of Massive MIMO-OFDM // 2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). – 2021. – P. 38-42. DOI: 10.1109/ICICCS51141.2021.9432385.
15. *Jui-Chi Chang, Fang-Biau Ueng and Jiun-Cheng Ning.* Channel shortening and equalization of OFDM/CDMA systems over doubly selective fading channels // International Symposium on Wireless and Pervasive Computing. – 2011. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/ISWPC.2011.5751329.
16. *Gross J., Bohge M.* Dynamic Mechanisms in OFDM Wireless Systems: A Survey on Mathematical and System Engineering Contributions // TKN Technical Report TKN-06-001, Berlin, May 2006.

17. 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. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/WCNCW49093.2021.9419982.
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. – P. 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. – P. 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. – P. S17-S22.

REFERENCES

1. Davydenko Yu.I. Dal'naya troposfernaya svyaz' [Long-range tropospheric communication]. Moscow: Voennoe izdatel'stvo ministerstva oborony SSSR, 1968.
2. Maokai, Chen Xihong 'Shu Tao 'Dong Shaoqiang. New generation Troposcatter Communication Based on OFDM Modulation, *Hu The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments ICEMI'2009*.
3. Sklyar B. Tsifrovaya svyaz' [Digital communication]. Moscow: Izd. dom Vil'yams, 2003.
4. Baxley R.J., Chunming Zhao, and G. Tong Zhou, Constrained Clipping for Crest Factor Reduction in OFDM, *IEEE Transactions on Broadcasting*, Dec. 2006, Vol. 52, No. 4, pp. 570-575.
5. Armstrong J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering, *Electronics Letters 28th February 2002*, Vol. 38, No. 5, pp. 246-247.
6. Arash Soltani, Mehdi Airamlozadeh & Jaber Parchami. MIMO-OFDM channel estimation based on minimum error entropy criterion under non-Gaussian environment, *International Journal of Electronics Letters*, 2022. DOI: 10.1080/21681724.2022.2087909.
7. 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.
8. 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.
9. Li Y., Wang X. and Zhu A. Reducing Power Consumption of Digital Predistortion for RF Power Amplifiers Using Real-Time Model Switching, in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, March 2022, Vol. 70, No. 3, pp. 1500-1508. DOI: 10.1109/TMTT.2021.3132347.
10. 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. DOI: 10.1080/00207217.2018.1477192.
11. 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.
12. Gan L. Adaptive digital predistortion of nonlinear systems: Ph.D. Thesis, Faculty of Electrical and Information Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria. – 2009.
13. Pawar D.S. and Badodekar H.S. Review of PAPR Reduction Techniques in Wireless Communication, *2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN)*, 2018, pp. 204-207. DOI: 10.1109/GCWCN.2018.8668631.
14. S. D V, T. P, S. B and S. M. Improved Energy Efficiency of Massive MIMO-OFDM, *2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, 2021, pp. 38-42. DOI: 10.1109/ICICCS51141.2021.9432385.
15. Jui-Chi Chang, Fang-Biau Ueng and Jiun-Cheng Ning. Channel shortening and equalization of OFDM/CDMA systems over doubly selective fading channels, *International Symposium on Wireless and Pervasive Computing*, 2011, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ISWPC.2011.5751329.
16. Gross J., Bohge M. Dynamic Mechanisms in OFDM Wireless Systems: A Survey on Mathematical and System Engineering Contributions, *TKN Technical Report TKN-06-001, Berlin, May 2006*.
17. 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.

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-