

УДК 621.396.2.019.4 : 621.391.254

## СТРУКТУРНАЯ АДАПТАЦИЯ КОДЕРА И ДЕКОДЕРА ТУРБО-КОДА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАПРОСА ПОВТОРНОЙ ПЕРЕДАЧИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

С. В. ЗАЙЦЕВ, В. В. КАЗИМИР

*Черниговский национальный технологический университет,  
Украина, Чернигов, 14027, ул. Шевченко, 95*

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу повышения эффективности функционирования радиосетей, построенных по схеме с автоматическим запросом на повторную передачу. Предложенный метод основан на адаптивном изменении полиномов рекурсивных систематических сверточных кодов, входящих в состав турбо-кодов, с целью повышения их корректирующих свойств за счет увеличения кодового ограничения при каждой повторной передаче блока данных для заданной скорости кодирования. При этом модифицируется алгоритм декодирования турбо-кодов в части использования введенной дополнительной априорной информации при расчете логарифмических отношений функций правдоподобия LLR (Log-likelihood ratio) каждого компонентного декодера, полученных на предыдущих запросах на повторную передачу. Результаты имитационного моделирования показали, что применение метода позволяет получить энергетический выигрыш кодирования и повысить достоверность передачи информации в сравнении с системой мобильной связи четвертого поколения 4G LTE-Advanced.

**Ключевые слова:** турбо-код; неопределенность; моделирование

### ВВЕДЕНИЕ

Корректирующие коды с переменной избыточностью применяются во многих беспроводных телекоммуникационных системах с обратной связью [1–3]. Изначально данные коды назывались, как совместимые по скорости сверточные коды с повторением RCRC (rate-compatible repetition convolutional) [4] и совместимые по скорости сверточные коды с выкалыванием RCPC (rate-compatible punctured convolutional) [5, 6]. Как альтернатива кодам RCRC предложены коды, которые используют в структуре кодового слова заранее известные вставленные биты [7].

Скорость кодирования, которая влияет на корректирующие возможности кодов с переменной избыточностью, адаптируется в зави-

симости от состояния канала передачи данных для обеспечения заданных характеристик достоверности передачи информации. Для этого в стандарте IEEE 802.16e (WiMAX) [1] и стандарте IEEE 802.11n (WLAN) [2] применяются ансамбли LDPC (low-density parity-check) кодов [8–11], в системе UMTS LTE [3] используется турбо-код [12, 13].

### АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В стандартной схеме ARQ (Automatic Repeat reQuest) биты циклического избыточного кода CRC (cyclic redundancy check) добавляются в передающий фрейм и обнаружение ошибок на приемной стороне происходит при помощи CRC. Если CRC-код обнаруживает ошибку в принятом фрейме, то происходит по-

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. IEEE 802.16e: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. IEEE Standard 802.16e, 2004.
2. IEEE 802.11n, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. IEEE Standard 802.11n-2009, 2009.
3. 3GPP TS 36.212. «Evolved Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and Channel Coding». 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, April 2011.
4. Lin Z. New rate-compatible repetition convolutional codes / Zihuai Lin, A. Svensson // IEEE Trans. Inf. Theory. — Nov. 2000. — Vol. 46, No. 7. — P. 2651–2659. — DOI : [10.1109/18.887877](https://doi.org/10.1109/18.887877).
5. Cain J. Punctured convolutional codes of rate  $(n-1)/n$  and simplified maximum likelihood decoding / J. Cain, G. Clark, J. Geist // IEEE Trans. Inf. Theory. — Jan. 1979. — Vol. 25, No. 1. — P. 97–100. — DOI : [10.1109/TIT.1979.1055999](https://doi.org/10.1109/TIT.1979.1055999).
6. Hagenauer J. Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications / J. Hagenauer // IEEE Trans. Commun. — Apr. 1988. — Vol. 36, No. 4. — P. 389–400. — DOI : [10.1109/26.2763](https://doi.org/10.1109/26.2763).
7. Xu W. A class of multirate convolutional codes by dummy bit insertion / W. Xu, J. Romme // Global Telecommunications : IEEE Conf. GLOBECOM, 27 Nov.–1 Dec. 2000, San Francisco, CA, USA. — IEEE, 2000. — DOI : [10.1109/GLOCOM.2000.891255](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2000.891255).
8. Gallager R. Low-density parity-check codes / R. Gallager // IEEE Trans. Inf. Theory. — 1962. — Vol. 8, No. 1. — P. 21–28.
9. Gallager R. Low-Density Parity-Check Codes / R. Gallager. — Cambridge, MA : M.I.T. Press, 1963. — 90 p.
10. MacKay D. J. C. Comparison of constructions of irregular Gallager codes / D. J. C. MacKay, S. T. Wilson, M. C. Davey // IEEE Trans. Commun. — Oct. 1999. — Vol. 47, No. 10. — P. 1449–1454. — DOI : [10.1109/26.795809](https://doi.org/10.1109/26.795809).
11. MacKay D. J. C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices / D. J. C. MacKay // IEEE Trans. Inf. Theory. — Mar. 1999. — Vol. 45, No. 2. — P. 399–431. — DOI : [10.1109/18.748992](https://doi.org/10.1109/18.748992).
12. Berrou C. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. 1 / C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima // Communications : IEEE Int. Conf. ICC-93, 23–26 May 1993, Geneva, Switzerland : proc. — IEEE, 1993. — P. 1064–1070. — DOI : [10.1109/ICC.1993.397441](https://doi.org/10.1109/ICC.1993.397441).
13. Berrou C. Near optimum error correcting coding and decoding: turbo-codes / C. Berrou, A. Glavieux // IEEE Trans. Commun. — Oct. 1996. — Vol. 44, No. 10. — P. 1261–1271. — DOI : [10.1109/26.539767](https://doi.org/10.1109/26.539767).
14. Mandelbaum D. An adaptive-feedback coding scheme using incremental redundancy / D. Mandelbaum // IEEE Trans. Inf. Theory. — May 1974. — Vol. 20, No. 3. — P. 388–389. — DOI : [10.1109/TIT.1974.1055215](https://doi.org/10.1109/TIT.1974.1055215).
15. Lin S. Automatic-repeat-request error-control schemes / Shu Lin, Daniel J. Costello, Michael J. Miller // IEEE Commun. Magazine. — Dec. 1984. — Vol. 22, No. 12. — P. 5–17. — DOI : [10.1109/MCOM.1984.1091865](https://doi.org/10.1109/MCOM.1984.1091865).
16. Chase D. Code combining—a maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets / D. Chase // IEEE

Trans. Commun. — May 1985. — Vol. 33, No. 5. — P. 385–393. — DOI : [10.1109/TCOM.1985.1096314](https://doi.org/10.1109/TCOM.1985.1096314).

17. *Ergen M.* Mobile Broadband. Including WiMax and LTE / Mustafa Ergen. — Springer, 2009. — 513 p. — DOI : [10.1007/978-0-387-68192-4](https://doi.org/10.1007/978-0-387-68192-4).

18. *Breddermann T.* Hybrid ARQ Scheme for UMTS LTE Based on Insertion Convolutional Turbo Codes / Breddermann T., Eschbach B., Vary P. // 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. — Sydney, Australia, 2012. — P. 1919–1924.

19. *Chen H.* A Survey and Tutorial on Low-Complexity Turbo Coding Techniques and a Holistic

Hybrid ARQ Design Example / Chen H., Maunder R., Hanzo L. // . — 2013. — Vol. 15. — P. 1546–1566.

20. *Dahlman E.* 4GLTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband / Dahlman E., Parkvall S., Skold J. — Oxford: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2011. — 431 p.

21. *Zaitsev S. V.* Method of Adaptive Decoding in Case of Information Transmission in Condition of Influence of Deliberate Noise / S. V. Zaitsev, V. V. Kazymyr // Radioelectronics and Communications Systems. — Allerton Press, Inc. — New York, 2015. — Vol. 58. — P. 30–40.

Поступила в редакцию ? По-сле переработки ?