

УДК 621.39

## ВЫРАВНИВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО КАНАЛА ПОДВОДНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ OFDM

АНФУ ЖУ

*Северо-Китайский университет водных ресурсов и электроэнергетики  
Китай, 450011, Чжэньжоу*

**Аннотация.** В статье исследованы три схемы выравнивания нестационарных каналов акустических подводных систем связи UWA (underwater acoustic) с ортогональным частотным разделением каналов OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Рассмотрены следующие алгоритмы выравнивания: алгоритм обнуления незначительных коэффициентов ZF (zero-forcing), выравнивание по минимальной среднеквадратичной ошибке MMSE (minimum mean square error equalization), и алгоритм последовательного подавления помех SIC (serial interference cancellation). Среди предложенных схем существует проблема необходимости выполнения большого количества операций для получения обратной матрицы канала. Для уменьшения вычислительной сложности получения обратной матрицы канала исследованы такие методы, как полосовая аппроксимация матрицы канала, последовательное выравнивание и декомпозиция  $LDL^H$ . Для оценки эффективности исследуемых алгоритмов, проведены численное моделирование и эксперимент в реальных условиях. Результаты моделирования подтвердили, что алгоритмы выравнивания могут эффективно работать в условиях различной нестационарности, и подтверждают надежность каждого из упрощенных алгоритмов при одинаковом значении коэффициента Доплера. Результаты двух видов экспериментов в реальных условиях также подтверждают, что упрощенные алгоритмы устраняют влияние остаточного узкополосного эффекта Доплера на конкретный диапазон, и дают лучший результат при их объединении с высокоточным алгоритмом оценивания параметров канала.

**Ключевые слова:** подводная акустическая связь; OFDM; выравнивание нестационарного канала; декомпозиция  $LDL^H$

### 1. ВВЕДЕНИЕ

С развитием технологий связи все больше возрастают требования к связи с использованием нестационарного подводного акустического канала UWA (underwater acoustic). В условиях нестационарного UWA канала эффект Доплера, порождаемый рассеивателями в воде или высокоскоростным движением передатчика и приемника, оказывает серьезное влияние на характеристики системы связи UWA. В этом случае необходима оценка матрицы канала нестационарного канала UWA и применение методов выравнивания для подавления ин-

терференции между несущими ICI (inter carrier interference), особенно характерной для системы связи OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), которая более чувствительна к ICI по сравнению с системами связи с одной несущей.

Оценка параметров канала и алгоритмы выравнивания для стационарных каналов UWA неприменимы в случае нестационарных каналов. Поэтому необходимо определить модель соответствующей системы для нестационарного канала, для которого исследуются алгоритмы оценки параметров канала и алгоритмы выравнивания. Естественно, методы вы-

## REFERENCES

- [1] M. K. Tsatsanis, G. B. Giannakis, "Adaptive methods for equalization of rapidly fading channels," in *Proceedings of MILCOM '93 - IEEE Military Communications Conference*, 2002, vol. 2, pp. 639–643, doi: [10.1109/MILCOM.1993.408590](https://doi.org/10.1109/MILCOM.1993.408590).
- [2] I. Barhumi, G. Leus, M. Moonen, "Estimation and direct equalization of doubly selective channels," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2006, no. 1, p. 062831, 2006, doi: [10.1155/ASP/2006/62831](https://doi.org/10.1155/ASP/2006/62831).
- [3] S. Tomasin, A. Gorokhov, Haibing Yang, J.-P. Linnartz, "Iterative interference cancellation and channel estimation for mobile OFDM," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 4, no. 1, pp. 238–245, 2005, doi: [10.1109/TWC.2004.840194](https://doi.org/10.1109/TWC.2004.840194).
- [4] K. A. D. Teo, S. Ohno, "Optimal MMSE finite parameter model for doubly-selective channels," in *GLOBECOM '05. IEEE Global Telecommunications Conference, 2005.*, 2005, vol. 6, pp. 5 pp. – 3507, doi: [10.1109/GLOCOM.2005.1578424](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2005.1578424).
- [5] T. Zemen, C. F. Mecklenbrauker, "Time-variant channel estimation using discrete prolate spheroidal sequences," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 53, no. 9, pp. 3597–3607, 2005, doi: [10.1109/TSP.2005.853104](https://doi.org/10.1109/TSP.2005.853104).
- [6] G. Taubock, F. Hlawatsch, "A compressed sensing technique for OFDM channel estimation in mobile environments: Exploiting channel sparsity for reducing pilots," in *2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2008, pp. 2885–2888, doi: [10.1109/ICASSP.2008.4518252](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2008.4518252).
- [7] J. Jin, Y. Gu, S. Mei, "An introduction to compressive sampling and its applications," *J. Electron. Inf. Technol.*, vol. 32, no. 2, pp. 470–475, 2010, doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00497](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00497).
- [8] Y. Zhou, Y. Wu, D. Chen, F. Tong, "Compressed sensing estimation of underwater acoustic MIMO channels based on temporal joint sparse recovery," *Dianzi Yu Xinxu Xuebao/Journal Electron. Inf. Technol.*, vol. 38, no. 8, pp. 1920–1927, 2016, doi: [10.11999/JEIT151158](https://doi.org/10.11999/JEIT151158).
- [9] H. Huang, W. Su, X. Jiang, "An improved compressed sensing reconstruction algorithm used in sparse channel estimation," in *2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, 2016, pp. 1–4, doi: [10.1109/ICSPCC.2016.7753737](https://doi.org/10.1109/ICSPCC.2016.7753737).
- [10] L. Jing, C. He, L. Zhang, Q. Meng, J. Huang, Q. Zhang, "Iterative block decision feedback equalizer with soft detection for underwater acoustic channels," *Dianzi Yu Xinxu Xuebao/Journal Electron. Inf. Technol.*, vol. 38, no. 4, pp. 885–891, 2016, doi: [10.11999/JEIT150669](https://doi.org/10.11999/JEIT150669).
- [11] Y. Xie, L. Zhou, J. Liu, "Linearly time-varying channel estimation method with ICI mitigation for OFDM systems," *Inf. Technol.*, no. 1, pp. 67–70, 2018, doi: [10.13274/j.cnki.hdzt.2018.01.016](https://doi.org/10.13274/j.cnki.hdzt.2018.01.016).
- [12] J. Zhao, K. Huo, Y. Liu, X. Yang, "Cyclic prefix based phase-coded OFDM radar Doppler offset estimation and compensation," *Dianzi Yu Xinxu Xuebao/Journal Electron. Inf. Technol.*, vol. 39, no. 4, pp. 938–944, 2017, doi: [10.11999/JEIT160549](https://doi.org/10.11999/JEIT160549).
- [13] S. Sarowa, H. Singh, S. Agrawal, B. S. Sohi, "A novel energy-efficient ICI cancellation technique for bandwidth improvements through cyclic prefix reuse in an OFDM system," *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.*, vol. 18, no. 11, pp. 1892–1899, 2017, doi: [10.1631/FITEE.1601333](https://doi.org/10.1631/FITEE.1601333).
- [14] T. Hrycak, G. Matz, "Low-complexity time-domain ICI equalization for OFDM communications over rapidly varying channels," in *2006 Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2006, pp. 1767–1771, doi: [10.1109/ACSSC.2006.355065](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2006.355065).
- [15] J. Huang, J. Huang, C. R. Berger, S. Zhou, P. Willett, "Iterative sparse channel estimation and decoding for underwater MIMO-OFDM," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2010, no. 1, p. 460379, 2010, doi: [10.1155/2010/460379](https://doi.org/10.1155/2010/460379).
- [16] L. Rugini, P. Banelli, G. Leus, "Simple equalization of time-varying channels for OFDM," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 7, pp. 619–621, 2005, doi: [10.1109/LCOMM.2005.1461683](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2005.1461683).

Received October 17, 2018

Revised June 5, 2020

Accepted June 15, 2020