

УДК 621.375.026

АДАПТИВНЫЙ ЦИФРОВОЙ КОРРЕКТОР ДЛЯ СИСТЕМЫ ДВУХПОЛОСНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ПРИСУТСТВИИ КВАДРАТУРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

Л. И. АВЕРИНА, О. В. БУГРОВ

*Воронежский государственный университет,
Россия, Воронеж, 394006, Университетская пл., д. 1*

Аннотация. Рассмотрен процесс цифровой коррекции нелинейно-инерционной характеристики передающего тракта двухполосной системы связи с параллельной передачей данных при наличии дисбаланса квадратур модуляторов. Выведены аналитические соотношения, позволяющие адаптивно идентифицировать или изменять параметры двухполосной полиномиальной модели корректора с учетом квадратурных искажений модулятора алгоритмами LMS, RLS и сопряженного градиента. Для системы построена модель корректора на основе нейронной сети — многослойного персептрона. Проведен экспериментальный сравнительный анализ эффективности линеаризации тракта с 25-Вт усилителем мощности корректорами с полиномиальной и нейросетевой архитектурой. Проведен сравнительный анализ скорости сходимости, вычислительной сложности и эффективности линеаризации адаптивных алгоритмов LMS, RLS и сопряженных градиентов на основе полиномиальной архитектуры. В качестве тестовых использованы сигналы модуляции 16QAM с полосой 4 МГц и отстройкой по частоте на 16 МГц. Результаты экспериментального анализа показали наибольшую вычислительную эффективность без потери качества линеаризации полиномиального корректора, идентифицируемого алгоритмом сопряженного градиента.

Ключевые слова: усилитель мощности; параллельная двухполосная передача данных; метод цифровых предсказаний; квадратурный дисбаланс; нейронные сети

ВВЕДЕНИЕ

Более высокие скорости передачи данных в условиях ограниченных частотных ресурсов достигаются в настоящее время за счет использования перспективного и экономически выгодного решения — мульти-стандартные и многополосные системы беспроводной связи. При параллельной передаче эффективно используются аппаратные средства системы связи, т.к. задействован один передатчик сразу для нескольких независимых приемников, а также обеспечивается совместимость систем, работающих с разными стандартами. В передающих трактах таких систем сигналы на разных близко расположенных несущих частотах

объединяются и усиливаются одним широкополосным усилителем мощности.

Как известно, любой радиотракт при работе в энергоэффективном режиме вносит различные нелинейно-динамические искажения в передаваемый сигнал. В настоящее время для линеаризации передатчика широко используется метод цифровых предсказаний [1]. Для рассматриваемой двухполосной системы он имеет свои особенности. Для компенсации искажений, возникающих в передающем тракте, логично рассматривать близко расположенные сигналы на разных несущих как один широкополосный сигнал. Однако в таком случае для корректной линеаризации потребуется такая частота дискретизации АЦП и ЦАП, позво-

Lett., vol. 29, no. 4, pp. 294-296, Apr. 2019, doi: [10.1109/LMWC.2019.2902725](https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2902725).

2. Аверина Л. И. “Бесструктурное моделирование усилителей мощности с учётом инерционных свойств”, *Известия вузов. Радиоэлектроника*. – Т.56, 2013, - №1. - С. 50 - 57, doi: [10.20535/S0021347013010056](https://doi.org/10.20535/S0021347013010056).

3. L. I. Averina and S. S. Lavlinskii, “Two-block model of a digital corrector for linearization of an analog radio channel,” *J. Commun. Technol. Electron.*, vol. 62, no. 7, pp. 794-799, Jul. 2017, doi: [10.1134/S1064226917070014](https://doi.org/10.1134/S1064226917070014).

4. C. Yu et al., “A square-root-based memory polynomial model for concurrent dual-band digital predistortion,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 29, no. 2, pp. 152-154, Feb. 2019, doi: [10.1109/LMWC.2018.2886634](https://doi.org/10.1109/LMWC.2018.2886634).

5. S. A. Bassam, M. H. Helaoui, and F. M. Ghannouchi, “2-D digital predistortion (2-D-DPD) architecture for concurrent dual-band transmitters,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 59, no. 10 PART 1, pp. 2547-2553, 2011, doi: [10.1109/TMTT.2011.2163802](https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2163802).

6. S. Lajnef, N. Boulejfen, A. Abdelhafiz, and F. M. Ghannouchi, “Two-dimensional cartesian memory polynomial model for nonlinearity and I/Q imperfection compensation in concurrent dual-band transmitters,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 63, no. 1, pp. 14-18, Jan. 2016, doi: [10.1109/TCSII.2015.2482678](https://doi.org/10.1109/TCSII.2015.2482678).

7. L. Li, F. Liu, G. Yang, and H. Wang, “A pruning method of joint 2D digital predistortion model for nonlinearity and I/Q imperfections in concurrent dual-band transmitters,” in *2014 IEEE/ACIS 13th International Conference on Computer and Information Science, ICIS 2014 - Proceedings*, 2014, pp. 71-74, doi: [10.1109/ICIS.2014.6912110](https://doi.org/10.1109/ICIS.2014.6912110).

8. В.И.Джиган, *Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы*. Техносфера, 2012.

9. D. G. Luenberger, *Linear and Nonlinear Programming*. Springer, 2008.

10. Л.И.Аверина and О.В.Бугров, “Цифровые корректоры на основе нейронных сетей для линеаризации усилителей мощности,” *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика*, no. 1, pp. 5-14, 2017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Q. Lu and C. Yu, “In-Band Digital Predistortion for Concurrent Dual-Broadband Phased Array Transmitters,” *IEEE Microw. Wirel. Components*

Поступила в редакцию 09.10.2019

После доработки 04.12.2019

Принята к публикации 14.03.2020