

УДК 621.396.93

МЕТОД СИНТЕЗА ПРОЦЕДУРЫ I/Q-ДЕМОДУЛЯЦИИ НЕЧЕТНОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ ЗАМЕНЫ МНОГОКАСКАДНЫХ СХЕМ ДЕМОДУЛЯЦИИ ОДНОКАСКАДНЫМИ ЭКВИВАЛЕНТАМИ

В. И. СЛЮСАР¹, П. Е. СЕРДЮК²

¹Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники
Вооруженных Сил Украины, Украина, Киев
Военный институт телекоммуникаций и информатизации,
Украина, Киев

Аннотация: В статье предложен метод синтеза I/Q-демодуляторов нечетного порядка на основе замены многокаскадных схем демодуляции однокаскадными эквивалентами. В основу расчета коэффициентов однокаскадного I/Q-демодулятора нечетного порядка, эквивалентного по форме амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) многокаскадной схеме, положен поотсчетный анализ процесса формирования отклика выходного каскада демодулятора на основе выборки отсчетов напряжений гармонического сигнала на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Для иллюстрации особенностей применения предложенного метода синтеза I/Q-демодуляторов нечетного порядка рассмотрен пример синтеза 11-отсчетного формирователя квадратурных составляющих. Представлены сравнительные результаты расчетов его АЧХ. Получено аналитическое описание его отклика через коэффициенты I/Q-демодуляторов четного порядка, образующих многокаскадную схему. Установлен ряд закономерностей коэффициентов I/Q-демодуляторов нечетного порядка, в том числе характеризующих зависимость их динамического диапазона от значений весовых коэффициентов исходной многокаскадной схемы.

Ключевые слова: I/Q-демодулятор; амплитудно-частотная характеристика; АЧХ; АЦП; квадратурные составляющие

Одним из важных этапов обработки OFDM сигналов в приемной системе является формирование напряжений квадратурных составляющих сигнальной смеси. Для упрощения аппаратной реализации аналогового сегмента приемника эта операция может выполняться в цифровом виде, в так называемых квадратурных (I/Q) демодуляторах, получивших название I/Q-демодуляторы [1–4].

В [5] рассмотрена возможность замены многокаскадных схем квадратурных демодуляторов (рис. 1) однокаскадными эквивалентами, которая основана на достижении приближенного совпадения амплитудно-частотных характе-

ристических (АЧХ) однокаскадных схем I/Q-демодуляторов большого порядка и их многокаскадных альтернатив. Например, форма АЧХ однокаскадного 16-отсчетного I/Q-демодулятора с коэффициентами $a = 1, b = 79, c = 793, d = 2431, e = 3003, f = 1573, g = 299, h = 13$ и двухкаскадной схемы с 8-отсчетными I/Q-демодуляторами, имеющими весовые коэффициенты $a = 1, b = 11, c = 15, d = 5$ [4], практически совпадает [6]. При этом двухкаскадная схема имеет выигрыш при подавлении внеполосных сигналов на 2–3 дБ на краях основной полосы пропускания.

В общем случае указанное сходство форм АЧХ справедливо при сравнении двухкаскад-

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V. P. O'Neil, C. Ryan, and C. Weitzel, "Monolithic Gallium Arsenide I-Q Demodulator," in *Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits*, vol. 84, pp. 14-18, doi: [10.1109/MCS.1984.1113618](https://doi.org/10.1109/MCS.1984.1113618).
2. C. Ziomek and P. Corredoura, "Digital I/Q demodulator," in *Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference*, 1995, vol. 4, pp. 2663-2665, doi: [10.1109/pac.1995.505652](https://doi.org/10.1109/pac.1995.505652).
3. D. Bernal, P. Closas, and J. A. Fernández-Rubio, "Digital I&Q demodulation in array processing: Theory and implementation," in *2008 16th European Signal Processing Conference*, 2008. URI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7080413>.
4. J. E. Eklund and R. Arvidsson, "A multiple sampling, single A/D conversion technique for I/Q demodulation in CMOS," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 31, no. 12, pp. 1987-1994, Dec. 1996, doi: [10.1109/4.545822](https://doi.org/10.1109/4.545822).
5. В. І. Слюсар, П. Є. Сердюк, "Багатокаскадна I/Q-демодуляція OFDM сигналів при їх одноканальному аналого-цифровому перетворенні," *Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ КІП*, Вип. 1, С. 85-89, 2013. URI: http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2013/11_1_2013.pdf.

6. V. Slyusar and E. Zhivilo, "The synthesis of equivalence digital filters for tandem decimation on base I/Q-demodulation," in *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017 - Proceedings*, 2017, vol. 2018-January, pp. 449-451, doi: [10.1109/INFOCOMMST.2017.8246436](https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246436).
7. M. Mfana and A. N. Hasan, "Soft-Core Architecture for Odd/Even Order Sampling I/Q Demodulator with Dual-Port Block Memory Considerations," no. September, pp. 1-11, Sep. 2019, doi: [10.20944/preprints201909.0014.v1](https://doi.org/10.20944/preprints201909.0014.v1).
8. J. Mitra and T. K. Nayak, "An FPGA-based phase measurement system," *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 133-142, Jan. 2018, doi: [10.1109/TVLSI.2017.2758807](https://doi.org/10.1109/TVLSI.2017.2758807).
9. I. L. Syllaos, "Hybrid and $\Delta\Sigma$ Programmable Phase/Frequency Detector for IoT Chipsets," in *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2018, vol. 2018-May, doi: [10.1109/ISCAS.2018.8351733](https://doi.org/10.1109/ISCAS.2018.8351733).
10. P. I. Puzyrev, K. V. Semenov, and S. A. Zavyalov, "Spurious-free dynamic range of cordic based digital quadrature demodulator," in *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM*, 2018, vol. 2018-July, pp. 167-171, doi: [10.1109/EDM.2018.8434980](https://doi.org/10.1109/EDM.2018.8434980).
11. J. Kang *et al.*, "A System-on-Chip Solution for Point-of-Care Ultrasound Imaging Systems: Architecture and ASIC Implementation," *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 412-423, Apr. 2016, doi: [10.1109/TBCAS.2015.2431272](https://doi.org/10.1109/TBCAS.2015.2431272).
12. А. Мандал, Р. Мишра, and М.Р. Нагар, "Реализация комплексной цифровой системы ФАПЧ для фазового детектирования в программно определяемом радаре," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, vol. 59, no. 4, p. 3, Apr. 2016, doi: [10.20535/s0021347016040014](https://doi.org/10.20535/s0021347016040014).

Поступила в редакцию 31.08.2019

После доработки 09.02.2020

Принята к публикации 12.04.2020
