

Д. т. н. І. В. ГОРБАТИЙ, Ю. С. КАРП, І. Р. ЦИМБАЛЮК

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: giv@polynet.lviv.ua, uskarp@gmail.com, zymbaliuk@gmail.com

МОДУЛЯТОР ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ АМПЛІТУДНОЇ МОДУЛЯЦІЇ БАГАТЬОХ СКЛАДОВИХ

Проведено огляд принципів побудови сучасних цифрових систем безпроводового зв'язку, зокрема систем з амплітудною модуляцією багатьох складових (АМБС). Обґрунтовано доцільність створення приймально-передавальних систем з АМБС. Проведено розрахунок частотної, енергетичної та інформаційної ефективності АМБС-сигналів, проведено порівняння результатів з іншими видами цифрової модуляції. Запропоновано та розглянуто принципову схему і конструктивну реалізацію модулятора для здійснення АМБС.

Ключові слова: амплітудна модуляція багатьох складових (АМБС), модулятор для здійснення АМБС, частотна ефективність, енергетична ефективність, інформаційна ефективність.

Беручи до уваги особливості роботи телекомунікаційних систем, що знаходяться зараз у широкому вжитку, можна впевнено стверджувати, що домінуючими у сучасному світі є цифрові види модуляції — як у стандарті 5G, так і Wi-Fi 6, — що використовують квадратурну амплітудну модуляцію (КАМ) високих порядків (1024+) і ортогональне частотне мультиплексування [1–4]. Утім, підвищення порядку цифрової модуляції робить задачу забезпечення задовільних значень відношення сигнал/шум все складнішою у зв'язку зі збільшенням впливу амплітудних та фазових шумів [5]. Для боротьби з такими явищами були запропоновані різні методи — використання концентричних сузір'їв КАМ високих порядків для каналів з фазовими шумами [6], унікальні комплементарні послідовності КАМ [7], використання матриць Батлера для формування КАМ [8] і запровадження диференціальних КАМ та АФМн [9]. Тому для вирішення проблем, які виникають внаслідок цього, запропоновано використовувати амплітудну модуляцію багатьох складових (АМБС) [10] — новий різновид амплітудно-фазової модуляції, що характеризується наявністю кількох гармонічних складових, які у свою чергу додають нові осі координат до сигнальних сузір'їв сигналів на приймальній стороні (наприклад, 37-АМБС з трьома складовими буде зображатися у тривимірному просторі) [11]. Можливість зсунути точку сузір'я по новій координаті полегшує задачу збільшення евклідових відстаней між точками і боротьби з адитивними та фазовими шумами.

Метою цієї роботи є розробка модулятора для здійснення амплітудної модуляції багатьох складових, який додатково дасть змогу формувати сигнали

з широкоживаними різновидами амплітудної, фазової та амплітудно-фазової маніпуляції.

Особливості амплітудної модуляції багатьох складових

АМБС передбачає формування сигналу у вигляді суми його N гармонічних складових, що відрізняються фазами φ_n , утворюючи в результаті сигнал такого вигляду:

$$U_{\text{АМБС}}(t) = \sum_{n=1}^N U_0 a_n U_{Mn}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_n), \quad (1)$$

де U_0 , ω_0 , φ_0 — амплітуда, кутова частота й початкова фаза носійного коливання;

U_{Mn} — модульовальні сигнали на входах перемножувачів у n -х підканалах модулятора [12, с. 96–100];

a_n — коефіцієнти пропорційності для n -х каналів модулятора, що є параметрами модулятора.

Запропонована модуляція у більшості випадків (крім тих, коли $N = 2$ та $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi/2$) належить до класу неортогональних амплітудно-фазових модуляцій, і багато її різновидів підлягають оптимізації, в результаті якої будується оптимальне з точки зору завадостійкості й ефективності сигнальне сузір'я. Таке сузір'я, як правило, містить лише частину сигнальних точок, отриманих при використанні всіх можливих комбінацій модульовальних сигналів [13]. Результат застосування раніше запропонованої методики оптимізації — можливість утворювати сигнальні решітки неортогональних різновидів модуляції сигналу з однаковими відстанями між сусідніми точками або усувати деякі точки сузір'я для покращення енергетичних характеристик модуляції.

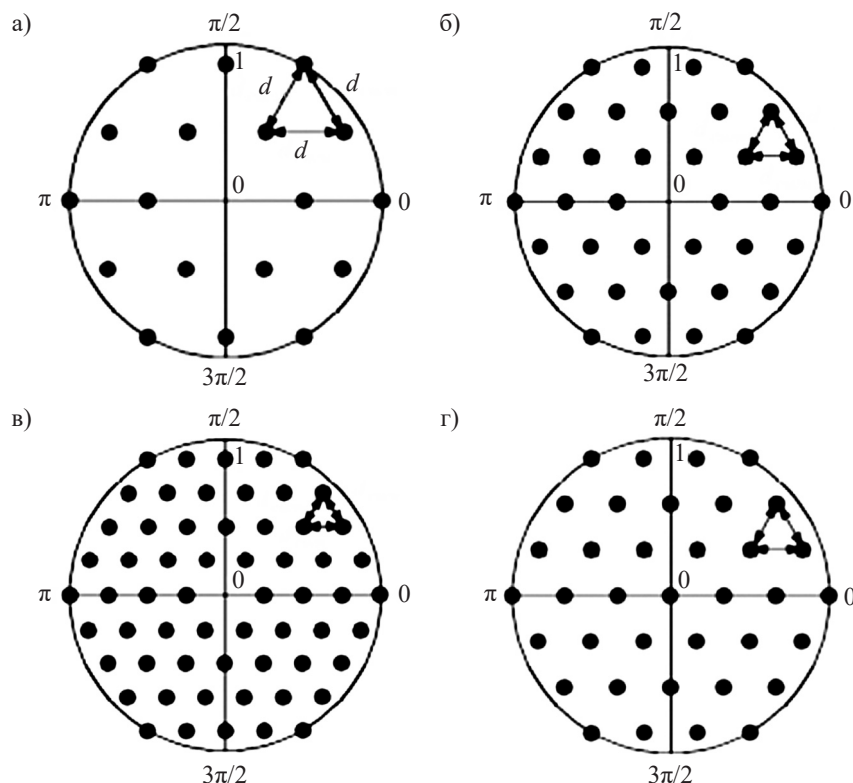


Рис. 1. Сигнальні сузір'я АМБС-сигналів з трьома складовими різних порядків:
а — 16; б — 36; в — 60; г — 37

Відстань (у В) між сусідніми точками сигнального сузір'я АМБС (з трьома складовими) визначається виразом

$$d = U / (M_U - 1), \quad (2)$$

де U — максимально можлива амплітуда модульованого сигналу;

M_U — кількість рівномірно віддалених рівнів.

Водночас ефективна кількість символів становить $M_{\text{еф}} = 3M_U / (M_U - 1)$. (3)

Відповідно, протягом передавання одного інформаційного символу може бути передано $\log_2 M_{\text{еф}}$ бітів інформації.

На рис. 1 зображено кілька сузір'їв АМБС різного порядку, кожне з яких ілюструє головні принципи АМБС — однакову відстань d між сусідніми точками (див. рівнобедрені трикутники) та фіксовану кількість рівнів амплітуди для кожного виду. У 36-АМБС, для прикладу, $U = 1$ В, $M_U = 4$, з чого випливає, що $d = 0,33$ В. Слід зауважити, що сигнальну точку сузір'я 37-АМБС-сигналу з нульовими координатами можна використати лише в системах зв'язку з активною паузою.

В таблиці наведено результати розрахунку енергетичної $\beta_{\text{мод}}$, частотної $\gamma_{\text{мод}}$ та інформаційної $\eta_{\text{мод}}$ ефективності, які обчислювалися з використанням таких співвідношень:

$$\beta_{\text{мод}} = N_0 / E_6; \quad (4)$$

$$\gamma_{\text{мод}} = v_6 / \Delta F_c; \quad (5)$$

$$\eta_{\text{мод}} = \gamma_{\text{мод}} / \log_2[(\gamma_{\text{мод}} / \beta_{\text{мод}}) + 1], \quad (6)$$

де N_0 — спектральна густина потужності білого шуму;

E_6 — енергія сигналу протягом часу передавання одного біта інформації;

v_6 — швидкість передавання інформації;

ΔF_c — ширина спектра сигналу.

Енергетична, частотна та інформаційна ефективність систем зв'язку при використанні різних методів модуляції сигналу

Вид модуляції	$\beta_{\text{мод}}$, дБ	$\gamma_{\text{мод}}$, дБ	$\eta_{\text{мод}}$
БАМн (антиподні сигнали)	-9,6	0	0,30
БФМн	-9,6	0	0,30
КФМн	-9,9	3,0	0,46
8-ФМн	-13,47	4,78	0,493
8-КАМ	-12,90	4,78	0,509
8-АМБС із трьома складовими*	-11,86	4,78	0,540
16-АМБС із шістьма складовими	-14,83	6,02	0,577
16-КАМ	-14,04	6,02	0,599
16-АМБС із трьома складовими*	-13,59	6,02	0,613
32-КАМ	-16,12	6,99	0,651
32-АМБС із трьома складовими*	-15,71	6,99	0,662
36-АМБС із трьома складовими	-16,26	7,14	0,665
37-АМБС із трьома складовими	-16,12	7,17	0,673

*Зі зсувом рівнів амплітуди модульовальних сигналів

Наведені результати демонструють переваги АМБС над іншими поширеними видами модуляції за однакових потужності сигналу та ймовірності символної помилки ($P_{\text{сим}} = 10^{-5}$) [11].

Принципова схема модулятора для здійснення АМБС

Розглянемо спочатку загальну структурну схему модулятора, на основі якої будемо створювати найвідповіднішу до поставленої задачі конструктивну реалізацію.

Кількість фазоповертачів та перемножувачів такого модулятора (рис. 2) дорівнює кількості N гармонічних складових. На перемножувачі подаються модульовальні сигнали, утворені із вхідних двійкових даних (кожній точці сигнального сузір'я АМБС відповідає певна обрана для неї двійкова послідовність, аналогічно КАМ), та сигнали з генератора носійного коливання з фазовими зсувами, здійсненими відповідними фазоповертачами. Сигнали з виходів перемножувачів надходять до входів суматора, на виході якого формується сигнал АМБС.

Модулятор для здійснення АМБС містить N підканалів на відміну від квадратурного модулятора, що містить два підканали (синфазний і квадратурний). Модульовальні сигнали формуються у вигляді послідовності прямокутних імпульсів для кожного підканалу модулятора з тактовою частотою, що дорівнює швидкості передавання символів, та амплітудами, що відповідають вхідним бітовим словам та символам, які необхідно передати.

Такий модулятор характеризується меншою кількістю рівнів амплітуди сигналів у порівнянні з квадратурним модулятором такого ж порядку, що у свою

чергу зменшує вплив внутрішніх завод на вихідний модульований сигнал та послаблює вимоги до розрядності цифро-аналогових перетворювачів, що застосовуються для формування модульовальних сигналів.

Конструктивна реалізація модулятора для здійснення АМБС

Аналіз принципової схеми модулятора для здійснення АМБС дозволяє зробити висновок про те, що ланки такого пристрою можна реалізувати в модульному вигляді та поєднувати їх задля збільшення порядків досліджуваних видів модуляції. Тому головні принципи, яким має відповідати сконструйований модулятор для здійснення АМБС, є такими:

- можливість переналаштування (з пріоритетом програмних способів над апаратними);
- модульність конструкції та можливість розширення.

Цим вимогам відповідає модулятор, функційну схему якого зображено на рис. 3.

Формувачами модульовальних сигналів тут виступають PSoC — програмовані системи на чипі. Такий вибір можна обґрунтувати наявністю в них вбудованих інтерфейсів передавання даних, таких як I2C, UART і SPI, та головною особливістю PSoC — наявністю матриці цифрових та аналогових блоків, серед яких є цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП). У нашому випадку через один з інтерфейсів надходять дані з персонального комп'ютера у двійковому вигляді, перетворюючись в модульовальні сигнали на виході ЦАП (рис. 4). Формувач модульовальних сигналів містить таблиці відповідності амплітуд модульовальних сигналів для кожного підканалу модулятора вхідним бітовим словам та символам, які не-

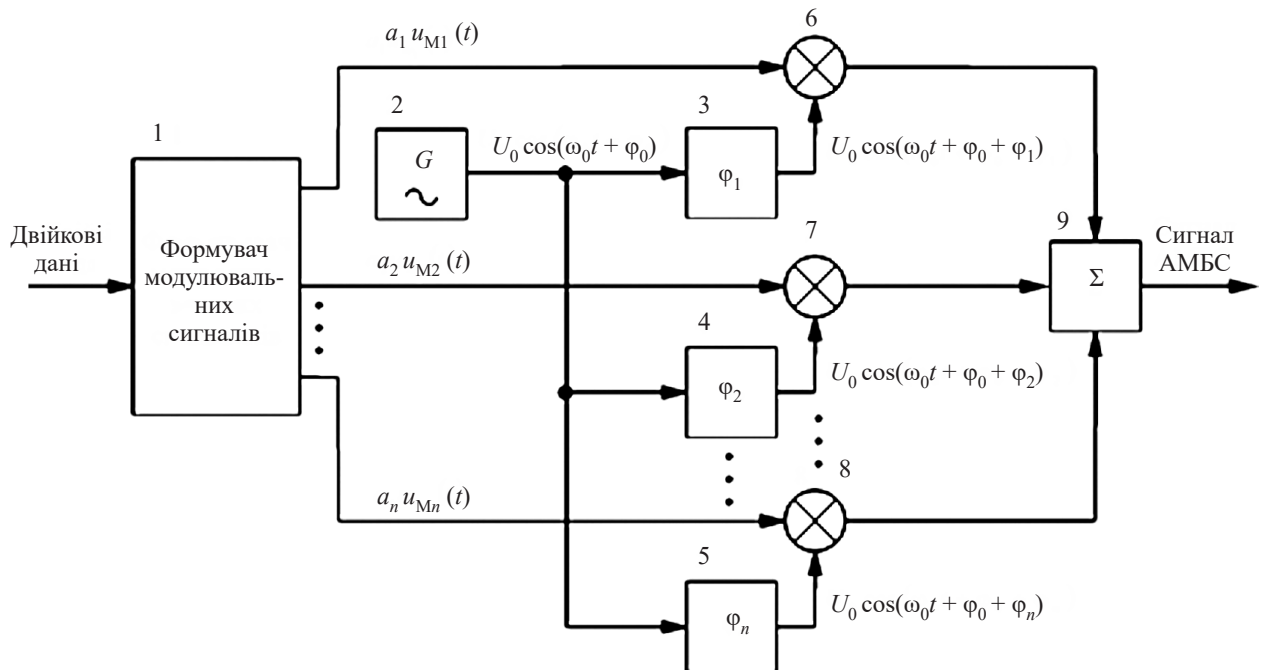


Рис. 2. Загальна структурна схема модулятора для здійснення АМБС

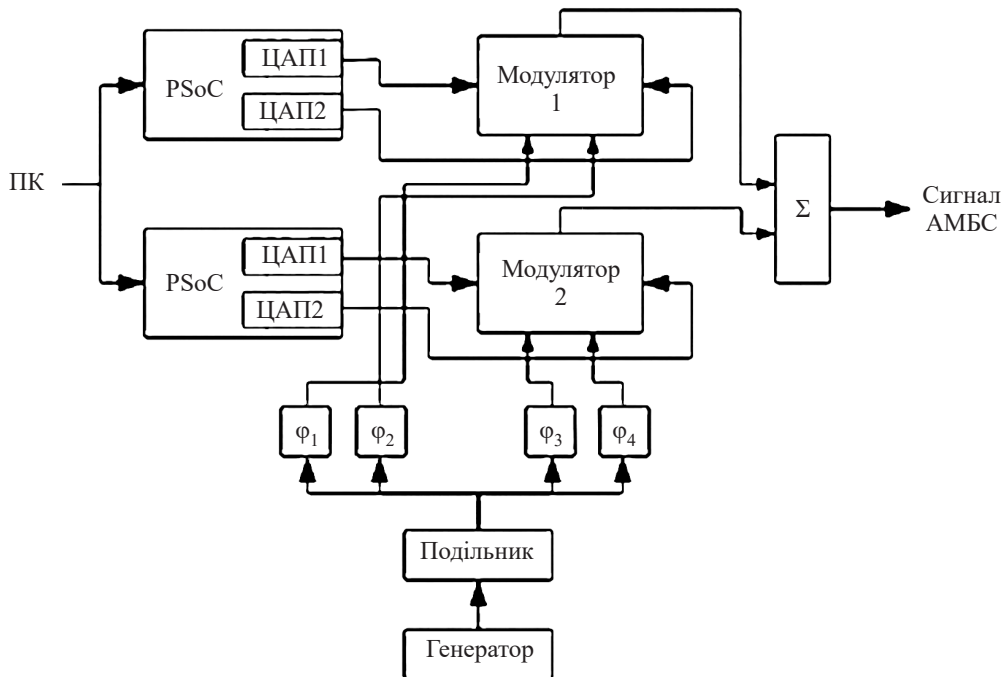


Рис. 3. Функційна схема модулятора для здійснення АМБС

обхідно передати, для усіх досліджуваних різновидів модуляції. Значення цих амплітуд для кожного каналу на кожному інформаційному такті, що дорівнює часу передавання окремого символу, передають на ЦАП свого каналу.

В процесі практичної реалізації модулятора для здійснення АМБС для формування модульованих сигналів було обрано генератори із серії CVCO55CW, призначені для застосування в системах із широкосмуговими сигналами, з можливістю зміни робочої частоти до однієї октави. Конкретно обраний CVCO55CW-0500-1000 генерує сигнали з частотами від 500 до 1000 МГц (рис. 5). Потім сигнал із генератора передається на подільник, і далі — на фазоповертачі. Фазоповертачі у пристрої виконані на базі квадратурних модуляторів. На їхні модульовальні входи протягом тривалості кожного інформаційного символу подають прямокутний імпульс певної амплітуди, величину якої задають за допомогою змінного ре-

зистора. Змінними резисторами виступають цифрові потенціометри, керовані з двох PSoC 4 через інтерфейс I2C, що дає змогу переналаштувати пристрій під різні види АМБС та КАМ, а також АМн, ФМн, АМФн тощо.

Із виходів фазоповертачів сигнали подаються на входи перемножувачів, які є частиною однокристальних векторних модуляторів. Сигнали поступають із фазовими зсувами, необхідними для формування певного різновиду АМБС. Надалі сигнали надходять на суматор, який є завершальним елементом модулятора, оскільки вже на його виході отримують сигнал АМБС, придатний до подальшого передавання в системі зв'язку. Далі такий сигнал передають на вихідні кола передавального пристрою — підсилювач з антеною (рис. 6).

Отриманий модулятор відповідає раніше сформульованим принципам — його можна налаштувати виключно програмним способом, а констук-

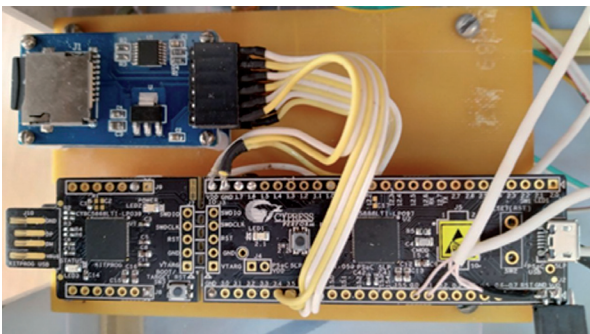


Рис. 4. Формувач модульованих сигналів PSoC 5 LP

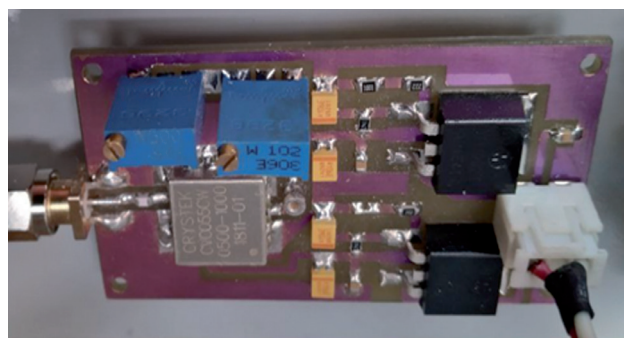


Рис. 5. Генератор носійного коливання

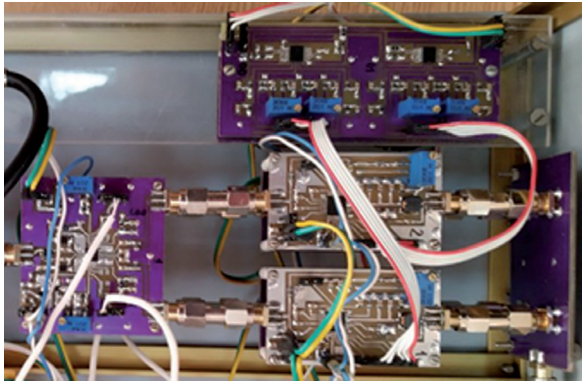


Рис. 6. Модулятор у зборі

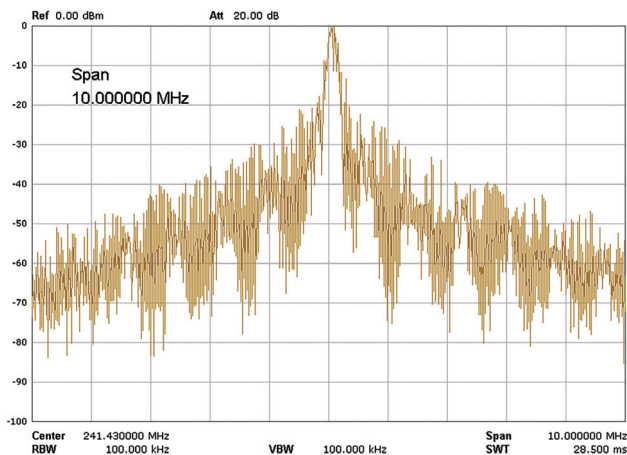


Рис. 7. Спектр одного із різновидів сигналів АМБС на виході макета передавального пристрою

ція є модульною, тобто можна паралельно до існуючих фазоповертачів та перемножувачів підключити нові й отримати модулятор АМБС вищого порядку.

Про дієздатність запропонованого пристрою свідчить спектр одного із різновидів сигналу АМБС, знятого на виході макету передавального пристрою (рис. 7), яка показує високе співвідношення сигнал/шум.

Висновки

Таким чином, пропонується конструктивна реалізація модулятора для здійснення амплітудної модуляції багатьох складових повністю відповідає всім необхідним вимогам. Основою побудови модулятора є однокристальні елементи, що дозволяє реалізувати його в компактних форматах і використовувати в сучасних системах цифрового зв'язку, зокрема мобільного. Продемонстрована ефективність системи при передаванні сигналів АМБС менших порядків вказує на перспективність подальших досліджень

використання такого типу модуляції та застосування розширених варіантів запропонованого пристрою в сучасних системах радіозв'язку, проводових системах передавання та радіорелейних системах передавання прямої видимості.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Kamurthi R. T., Chopra Sh. R., Gupta A. Higher order QAM schemes in 5G UPMC system. *2020 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*. Pune, India, 2020. <https://doi.org/10.1109/ESCI48226.2020.9167619>
2. Ortega-Ortega A. L., Bravo-Torres J. F. Combining LDPC codes, M-QAM modulations, and IFDMA multiple-access to achieve 5G requirements. *2017 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*. Cholula, Mexico, 2017. <https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2017.7891828>
3. Neelam S. G., Sahu P. R. Error performance of QAM GFDM waveform with CFO under AWGN and TWDP fading channel. *2019 National Conference on Communications (NCC)*. Bangalore, India, 2019. <https://doi.org/10.1109/NCC.2019.8732207>
4. Солодовник В. І. Алгоритм адаптивної модуляції та просторового мультиплексування у багатоантенних системах безпроводового зв'язку. *Збірник наукових праць ВІПІ*, 2018, № 3, с. 103–111.
5. Sharma S. *Digital Communications*. India, S.K. Kataria & Sons, 2013.
6. Zheng B., Deng L., Sawahashi M., Kamiya N. High-order circular QAM constellation with LDPC coding rate for phase noise channels. *20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2017)*. Bali, Indonesia, 2017. <https://doi.org/10.1109/WPMC.2017.8301807>
7. Spasojevic P., Budisin S-Z. Uniquely generated paraunitary-based complementary QAM sequences. *51st Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. Pacific Grove, CA, USA, 2017. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2017.8335659>
8. Staszek K., Gruszczynski S., Wincza K. Direct N-QAM multipoint modulators utilizing bulter matrices. *21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Poland, Krakow, 2016. <https://doi.org/10.1109/MIKON.2016.7492123>
9. Wei R-Y., Wang X-J. Differential 16-QAM and 16-APSK for uplink massive MIMO systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, vol. 7, iss. 2, pp. 170–173. <https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2763143>
10. Горбатий І. В. Амплітудна модуляція багатьох складових. *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*, 2009, вип. 50, с. 186–190.
11. Gorbaty I. V. Investigation of the technical efficiency of state-of-the-art telecommunication systems and networks with limited bandwidth and signal power. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, № 1, pp. 63-75. <https://doi.org/10.3103/s0146411614010039>
12. Горбатий І. В., Бондарев А.П. *Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи*. Україна, Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2016.
13. Горбатий І. В., Чорній М.Б. Високоєфективна телекомунікаційна система на основі амплітудної модуляції багатьох складових. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації*. 2018, с. 23 — 28.

Дата надходження рукопису
до редакції 06.05 2021 р.

MODULATOR FOR IMPLEMENTATION OF AMPLITUDE MODULATION
OF MANY COMPONENTS

The authors consider various anti-noise techniques in systems using digital signals, in particular QAM (quadrature amplitude modulation) signals. To increase the noise immunity of a system, it is proposed to use amplitude modulation of many components (AMMC). The advantages of this approach are demonstrated. The principles of AMMC signal formation are explained. The frequency efficiency, energy efficiency, and information efficiency of such signals are theoretically calculated. Different types of digital modulation are compared, the data being presented as a table, and a conclusion is made about a possible practical implementation of the modulator for AMMC signal formation.

Structural and functional diagrams of the modulator for AMMC implementation are proposed. The study formulates basic operating principles of such a device, which are used to propose a design option of the modulator. The paper describes particular aspects of creating the main units of the modulator. The authors investigate the characteristics of such a device, particularly the spectrum of the output signal.

The obtained research results allow drawing a conclusion that the device complies with the formulated implementation principles of the declared modulation type. A general conclusion is made that the manufactured modulator is suitable for the AMMC. The device is proposed to be used in modern digital communication systems, such as mobile communication systems.

Keywords: amplitude modulation of many components (AMMC), AMMC modulator, frequency efficiency, energy efficiency, information efficiency.

REFERENCES

1. Kamurthi R. T., Chopra Sh. R., Gupta A. Higher order QAM schemes in 5G UFMC system. *2020 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*. Pune, India, 2020. <https://doi.org/10.1109/ESCI48226.2020.9167619>
2. Ortega-Ortega A. L., Bravo-Torres J. F. Combining LDPC codes, M-QAM modulations, and IFDMA multiple-access to achieve 5G requirements. *2017 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*. Cholula, Mexico, 2017. <https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2017.7891828>
3. Neelam S. G., Sahu P. R. Error performance of QAM GFDM waveform with CFO under AWGN and TWDP fading channel. *2019 National Conference on Communications (NCC)*. Bangalore, India, 2019. <https://doi.org/10.1109/NCC.2019.8732207>
4. Solodovnick V. The algorithm of adaptive modulation and spatial multiplexing in multi-antenna wireless communication systems. *Collection of scientific papers of the Military Institute of Telecommunications and Informatization*, 2018, no. 3, pp. 103–111. (Ukr)
5. Sharma S. *Digital Communications*. India, S.K. Kataria & Sons, 2013.
6. Zheng B., Deng L., Sawahashi M., Kamiya N. High-order circular QAM constellation with LDPC coding rate for phase noise channels. *20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2017)*. Bali, Indonesia, 2017. <https://doi.org/10.1109/WPMC.2017.8301807>
7. Spasojevic P., Budisin S-Z. Uniquely generated paraunitary-based complementary QAM sequences. *51st Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. Pacific Grove, CA, USA, 2017. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2017.8335659>
8. Staszek K., Gruszczynski S., Wincza K. Direct N-QAM multiport modulators utilizing bulter matrices. *21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Poland, Krakow, 2016. <https://doi.org/10.1109/MIKON.2016.7492123>
9. Wei R-Y., Wang X-J. Differential 16-QAM and 16-APSK for uplink massive MIMO systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, vol. 7, iss. 2, pp. 170–173. <https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2763143>
10. Gorbatyy I. V. Amplitude modulation of many components. *Collection of scientific papers of the G.E. Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering*, 2009, iss. 50, pp. 186–190. (Ukr)
11. Gorbatyy I. V. Investigation of the technical efficiency of state-of-the-art telecommunication systems and networks with limited bandwidth and signal power. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, № 1, pp. 63-75. <https://doi.org/10.3103/s0146411614010039>
12. Gorbatyy I. V., Bondarev A. P. *Telecommunication systems and networks. Principles of operation, technologies and protocols*. Ukraine, Lviv, Publisher House of Lviv Polytechnic National University, 2016. (Ukr)
13. Gorbatyy I. V., Chornii M. B. High efficiency telecommunication system based on amplitude modulation of many components. *Visnyk (Official Gazette) of Lviv Polytechnic National University. Radioelectronics and Telecommunications*, 2018, pp. 23–28. (Ukr)

Опис статті для цитування:

Горбатий І. В., Карп Ю. С., Цимбалюк І. Р. Модулятор для здійснення амплітудної модуляції багатьох складових. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2021, № 3–4, с. 30–35. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.30>

Cite the article as:

Horbatiy I. V., Carp U. S., Tsymbaliuk I. R. Modulator for implementation of amplitude modulation of many components. *Tekhnologiya i Konstruivovanie v Elektronnoi Apparaturі*, 2021, no. 3–4, pp. 30–35. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.30>