

УДК 621.396+ 681.3.06:378.147

DOI: 10.31673/2412-9070.2019.064246

Г. О. ГРИНКЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент;
 А. О. МАКАРЕНКО, доктор техн. наук, доцент;
 В. В. ВАСИЛЕНКО, канд. техн. наук;
 К. О. ДОМРАЧЕВА, канд. техн. наук,
 Державний університет телекомунікацій, Київ

АЛГОРИТМ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ ДЛЯ ІОТ ПРИСТРОЇВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ OFDM-МОДУЛЯЦІЇ

Проаналізовано можливості використання імітаційної моделі OFDM-модема передавання даних для IoT пристроїв. Наведено матеріали досліджень методів математичного моделювання розширеного широкосмугового безпроводового доступу. Запропоновано опис роботи розробленого в програмному середовищі FlowCode алгоритму модуляції, отримання синфазних та квадратурних складових QPSK-модульованого сигналу; алгоритму швидкого перетворення Фур'є для вихідних відліків та їх обернені еквіваленти.

Ключові слова: OFDM-модем; IoT пристрої; передавання даних; модуляція; алгоритм; програмне середовище; імітаційна модель.

Вступ

Постановка проблеми. Для збільшення швидкості передавання даних у безпроводових мережах застосовується метод використання кількох антен як для передавача, так і для приймача, що дістав назву OFDM-систем (множинний вхід-множинний вихід). Використання цієї технології у безпроводових мережах має розв'язати такі кардинальні проблеми, як інтерференція, що постійно збільшується, обмежена смуга пропускання і недостатній радіус дії. Окрім того, передавання інформації паралельно по кількох каналах підвищує надійність і відмовостійкість зв'язку [1].

Застосування OFDM для мережі Інтернет речей (IoT) спричинює значне споживання енергії підсилювачами потужності через вимогу великих значень щодо вимкнення входу для збереження лінійності сигналу. Важливим інструментом для підвищення фізичної швидкості та вірогідності передавання даних у безпроводових мережах є розширення смуги пропускання спектральних каналів. Завдяки використанню ширшої смуги пропускання каналу з ортогональним частотним мультиплексуванням (OFDM) передавання даних здійснюється з максимальною ефективністю [2].

Огляд останніх досліджень і публікацій. Проблемам дослідження оброблення сигналів для IoT пристроїв за допомогою OFDM було присвячено низку праць [3; 4], в яких пропонується альтернативний алгоритм оптимізації та оцінювання максимальної ймовірності каналу та рівня відсікання в багатокульових загасальних OFDM-системах.

Останніми роками завдяки впровадженню нових сучасних алгоритмів та методів успішно здійснюються наукові дослідження щодо оброблення сигналів для IoT пристроїв за допомогою OFDM. Проводяться дослідження ефективності роботи телекомунікаційних систем за допомогою інтерактивного програмного забезпечення [5].

Формулювання завдання дослідження. З огляду на зазначене *метою статті* є аналіз тенденцій розвитку сучасних матеріалів та досліджень методів математичного моделювання розширеного широкосмугового безпроводового доступу оброблення сигналів для IoT пристроїв.

Основна частина

Ґрунтуючись на викладеному раніше матеріалі, у програмному середовищі VisSim [6] розроблено імітаційну модель OFDM-модема передавання

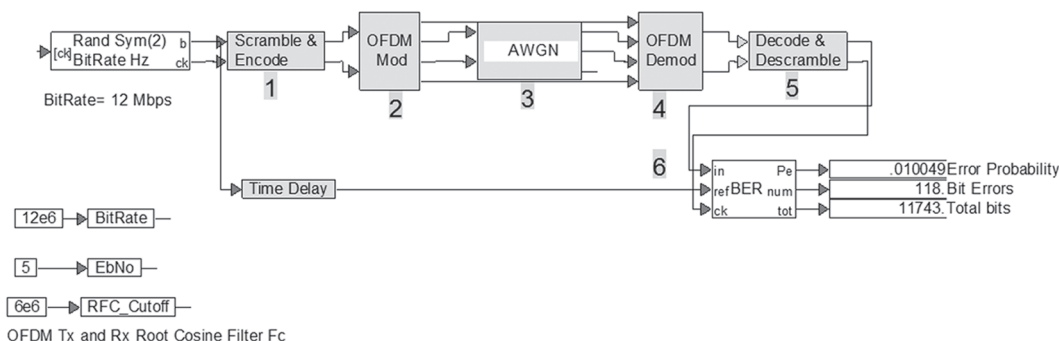


Рис. 1. Імітаційна модель OFDM-модема передавання даних

© Г. О. Гринкевич, А. О. Макаренко, В. В. Василенко, К. О. Домрачева, 2019

даних (рис. 1). Наведемо деякі пояснення, необхідні для розуміння роботи імітаційної моделі.

На вхід кодера 1 надходить інформаційний сигнал зі швидкістю 12 Мбіт/с. У кодері виконуються наступна послідовність операцій: шифрування; згорткове кодування; проріджувальне (пунктирне) кодування; перемежування та перетворення коду з послідовного в паралельний.

Підготовлений у такий спосіб інформаційний сигнал надходить на вхід OFDM-модулятора 2. У модуляторі здійснюється така послідовність операцій: QPSK-модуляція; нагромадження в буфері 48 QPSK-складових для їх одночасного передавання на OFDM-модулятор. На даному етапі також додається контрольний сигнал (пілот-сигнал) із шести складових. Місця розміщення пілот-сигналу заздалегідь розподілено в карті OFDM-сигналу. Така карта визначає місце кожного як інформаційного, так і службового сигналу, та призначена як для зменшення обчислювальних операцій, так і для визначення місця кожного вхідного сигналу для подальшого оброблення за допомогою IFFT. На виході IFFT наявний OFDM-кадр зі смугою частот, що дорівнює 20 МГц. За допомогою фільтра піднесений косинус спектра вхідного сигналу обмежується частотою 20 МГц. Застосування фільтра даного типу дозволяє мінімізувати міжсимвольні спотворення, що особливо актуально у разі використання OFDM-модуляції.

Сформований OFDM-кадр надходить у канал зв'язку 3. Для імітаційної моделі OFDM-модема передавання даних рекомендовано використовувати модель каналу з адитивним білим гаусовим шумом [7; 8]. Така модель найбільше відповідає каналу зв'язку, що застосовується в OFDM-системах.

У блоці демодулятора 4 та декодера 5 виконуються зворотні описаним раніше операції. Здобутий у такий спосіб інформаційний сигнал надходить у блок визначення коефіцієнта помилок 6. За допомогою цього блока є можливість визначити кількість прийнятих символів, кількість утрачених символів та вірогідність появи помилок під час зміни відношення сигнал/завада.

Використання QPSK-модуляції дозволяє досягти оптимального співвідношення результату за заводостійкістю приймання і апаратними та обчислювальними витратами.

Таким чином, у результаті досліджень та наукових напрацювань було розроблено алгоритми OFDM-модуляторів/демодуляторів, які розглядатимемо далі.

Для створення керуючої програми OFDM-модема використано програмне середовище FlowCode [9]. Цю програму було створено для роботи з широко поширеними МК компаній Atmel (архі-

тектура AVR), Microchip (архітектура PIC) та МК на базі архітектури ARM.

Середовищем розробки програми FlowCode як основні компоненти пропонує найбільш використовувани мовні конструкції, котрі можна знайти чи не в будь-якій із мов високого рівня: розгалуження програми, цикл тощо. На відміну від інших середовищ програмування, як MPLAB для PIC-контролерів і AVRStudio для AVR, для програми FlowCode основною мовою програмування є графічна мова. Отже, і як в об'єктно-орієнтованому програмуванні, об'єкти FlowCode виконують низку операцій і мають набір властивостей. Графічне програмування — характерна риса і головна перевага програми FlowCode.

За реалізацію блока модулятора беремо квадратурну фазову модуляцію QPSK, яка є чотирирівневою фазовою модуляцією ($M = 4$), у разі якої фаза високочастотного коливання може набувати чотирьох різних значень із кроком, кратним $\pi/2$.

Типова діаграма фазових станів носійної частоти для QPSK-сигналу відповідає безлічі можливих абсолютних значень фази $\{\pm\pi/4, \pm 3\pi/4\}$. Кожному значенню фази модульованого сигналу відповідає два біта інформації, і тому зміна модулюючого сигналу під час QPSK-модуляції відбувається в два рази рідше, ніж у разі BPSK-модуляції за однакової швидкості передавання інформації. Спектральна ефективність квадратурної модуляції QPSK удвічі перевищує бінарну модуляцію BPSK [2; 10].

Функціональну схему цифрового квадратурного QPSK-модулятора зображено на рис. 2.

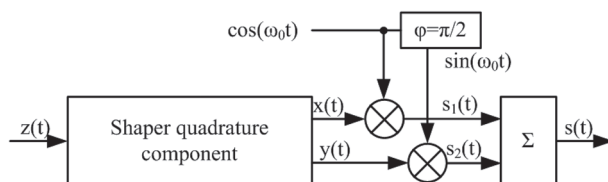


Рис. 2. Квадратурний модулятор

На вхід формувача квадратурних компонент комплексної обвідної $g(t) = x(t) + jy(t)$ надходить модулюючий сигнал $z(t)$. У формувачі обчислюються синфазні та квадратурні компоненти $x(t) = \cos[\varphi_i z(t)]$, $y(t) = \sin[\varphi_i z(t)]$, які потім надходять на низькочастотні входи помножувачів. Високочастотне коливання з частотою ω_0 надходить на фазозсувну схему, вихідні сигнали якої у вигляді синфазних та квадратурних компонент $\sin[\omega_0 t]$ і $\cos[\omega_0 t]$ надходять на високочастотні входи помножувачів. У результаті на виході суматора утворюється модульований високочастотний сигнал $s(t) = x(t)\cos[\omega_0 t] - y(t)\sin[\omega_0 t] = A\cos[\omega_0 t + \varphi_i z(t)]$, (1) де φ_i — фазовий помножувач, який визначає величину зміни фази символу та обчислюється за формулою

$$\varphi_i = \frac{2\pi i}{M}; \quad i = 1, 2 \dots 4. \quad (2)$$

Функціональну схему цифрового QPSK-демодулятора наведено на рис. 3. Сигнал QPSK не містить у своєму спектрі частоти носійної і може бути прийнятий тільки за допомогою когерентного детектора.

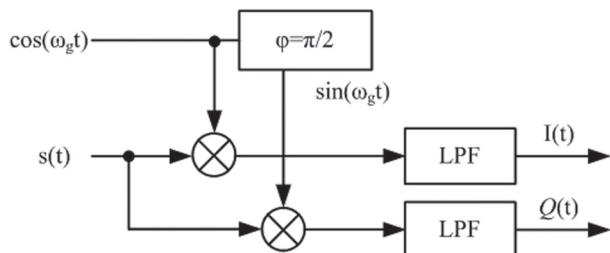


Рис. 3. Квадратурний демодулятор

На одні входи помножувачів надходить прийнятий модульований високочастотний сигнал $s(t)$, визначений за (1). Від внутрішнього генератора приймача надходить опорний високочастотний сигнал $\pi/2$, синхронізований за фазою і частотою з початковим високочастотним коливанням $\pi/2$, яке використовується в передавачі для модуляції. Фазообертач формує квадратурні компоненти високочастотного опорного сигналу генератора, а потім ці сигнали надходять на інші входи помножувачів. Сигнал на виході кожного помножувача дорівнює виразу модульованого сигналу (1), що приймається, на відповідну квадратурну компоненту опорного сигналу.

Фільтри нижніх частот видаляють із спектра сигналу на виході помножувачів усі побічні продукти нелінійного перетворення. У результаті на виході фільтрів буде отримано сигнали

$$I(t) = \frac{1}{2} x(t) \cos[\varphi + (\omega_0 - \omega_g)t], \quad (3)$$

$$Q(t) = \frac{1}{2} y(t) \sin[\varphi + (\omega_0 - \omega_g)t]. \quad (4)$$

Початковий модулюючий сигнал $z(t)$ легко відновлюється з синфазних та квадратурних компонент комплексної обвідної за формулами $x(t) = \cos[\varphi_i z(t)]$ та $y(t) = \sin[\varphi_i z(t)]$ [2].

Далі розглянемо опис алгоритму IFFT (обернене перетворення Фур'є).

Переваги системи OFDM виявляються за великої кількості носійних. Без такого кроку неможлива реалізація OFDM, адже в іншому разі пряме апаратне формування OFDM-сигналу вимагало б величезних схемотехнічних витрат у вигляді тисяч генераторів і модуляторів у передавачі і такої самої кількості детекторів у приймачі. Маловірогідно, що така схема була б реалізована.

Як ствержується у [9; 10], IFFT базується на вразі

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{j2\pi nm/N}, \quad (5)$$

а FFT — на формулі

$$X(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nm/N}, \quad (6)$$

де m — індекс DFT у частотному діапазоні; n — індекс DFT у часовому діапазоні; N — кількість вхідних/вихідних відліків DFT.

Однак оскільки вираз $e^{j2\pi/N}$ з (5) та $e^{-j2\pi/N}$ з (6) є постійними для заданого числа N , то його можна обчислити, а готові значення використовувати під час створення програмного забезпечення конкретного OFDM-модема передавання даних. Така можливість та розбиття N вхідних/вихідних відліків DFT на дві частини та більше, дає змогу зменшити кількість обчислювальних операцій до $(N/2) \log_2 N$ [11]. Так, наприклад, якщо кількість відліків 64, то для DFT необхідно виконати $64^2 = 4096$ операцій обчислення, а для FFT — 193. Таким чином, ефективність становить 21 раз, а для кількості відліків 1024 — 205. Тому обчислювальна ефективність FFT стає більш істотною зі зростанням кількості відліків. З огляду на це декларується необхідність застосування алгоритму DFT чи FFT.

Вірний вибір цифрової системи передавання (за невеликої кількості N) має вирішальне значення під час створення OFDM-модема передавання даних. Для забезпечення функціонування пристрою в реальному масштабі часу повний розрахунок IFFT має виконуватися в проміжку, відповідному до часу нагромадження одного пакета даних. Необхідно, щоб поки виконується обчислення IFFT поточного пакета даних, процесор нагромаджував дані для наступного пакета.

Нагромадження даних є одним із завдань, де важливу роль відіграють спеціальні архітектурні особливості процесорів. Безперервне отримання даних полегшується завдяки можливостям гнучкої адресації даних у процесор у поєднанні з використанням різних каналів прямого доступу до пам'яті [12].

Проведемо обчислення можливості застосування МК ATmega128 як пристрій реалізації IFFT. Щоб розрахувати IFFT, як було показано вище, необхідно виконати 193 операції. Час, який витрачає даний МК на ці операції, становить $t = 57$ мкс.

Необхідна обчислювальна потужність для МК ATmega128 має бути такою [11]:

$$f_s = \frac{N}{t} = \frac{64}{57} = 1,15 \text{ MIPS}. \quad (7)$$

Порівнявши здобуте значення з технічними характеристиками МК, можна дійти висновку, що за такої кількості N застосування МК ATmega128 для обчислення IFFT можливе.

Хоча в МК залишається великий запас обчислювальних операцій, однак при реалізації OFDM-модема передавання даних необхідно виконати низку як стандартних операцій, так і специфіч-

них, пов'язаних із підготовкою пакетів даних до оброблення за допомогою IFFT та FFT.

Алгоритм побудови програми IFFT подано на рис. 4.

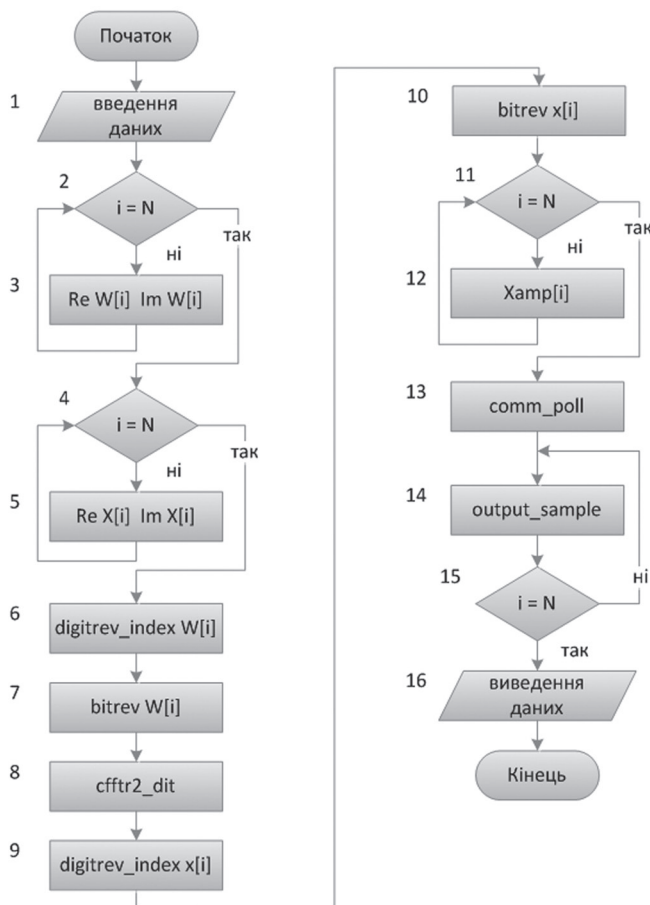


Рис. 4. Алгоритм IFFT для 64 вихідних відліків

Блок 1 в алгоритмі відповідає за введення вхідних даних та визначення характеристик операндів, які використовуватимуться в подальших розрахунках.

У **блоках 2 та 3** виконуються операції обчислення реальної та уявної складової комплексних обертальних помножувачів W , які є постійними при заданому N [8], у нашому разі $N = 64$. Комплексна та уявна складові вхідного сигналу $X(i)$ виокремлюються за допомогою **блоків 4 та 5**. Варто зазначити, що операції розрахунку виконуються до моменту отримання рівності $i = N$. В **алгоблочі 6** виконується цифрова обробка обертальних помножувачів W за основою 2 для їх подальшої біт-реверсивного переставлення (**блок 7**). Суть операції біт-реверсивного переставлення полягає в розбитті вхідної послідовності відліків на парні та непарні відліки. **Блок 8** призначено для виконання операції IFFT над комплексними числами за основою 2.

У **блоках 9 та 10** здійснюються аналогічні операції, що й в алгоблоках 6 та 7, але тільки для вихідних відліків $x(i)$. Операція обчислення амплі-

туди всіх 64 вихідних відліків $x(i)$ відбувається в **блоках 11 та 12**. **Блок 13** виконує функцію попередньої підготовки до формування вихідного сигналу та підмкнення периферії на можливість виведення даних. **Блоки 14 та 15** відповідають за формування вибірки вихідного сигналу з 64 субканалів та додаткову перевірку вибірки на наявність усіх 64 субканалів. Алгоритм завершується виведенням даних [13].

Висновки

З огляду на викладене можна дійти таких висновків:

- ◆ Розроблення імітаційної моделі OFDM-модема передавання даних є першим етапом апаратної реалізації OFDM-системи для IoT пристроїв. Програмне середовище VisSim найбільш адаптовано для виконання такого завдання в галузі телекомунікацій. Тому розроблення імітаційної моделі проведено із застосуванням саме цього програмного продукту.

- ◆ Розроблення імітаційної моделі OFDM-модема передавання даних дає можливість моделювати роботу моделі за умов, наближених до реальних, та проводити налагоджування її роботи без апаратного відтворення.

- ◆ Для створення керуючої програми використано програмне середовище FlowCode. Дану програму створено для роботи з широко поширеними МК компаній Atmel (архітектура AVR), Microchip (архітектура PIC) та МК на базі архітектури ARM.

- ◆ У програмному середовищі FlowCode розроблено алгоритм модуляції, отримано синфазні та квадратурні складові QPSK-моделюючого сигналу, а також алгоритм швидкого перетворення Фур'є для вихідних відліків та їх обернені еквіваленти.

- ◆ Як апаратна реалізація програмної частини OFDM-модема передавання даних вибрано МК ATmega128, який задовольняє вимоги за обчислювальною потужністю.

Список використаної літератури

1. Дубик А. Н., Слюсар В. И., Зинченко А. А. Применение OFDM-систем для повышения надежности телекоммуникационных систем критического применения // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. 2006. № 6 (18). С. 206–209.

2. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь: учеб. пособие для вузов. Москва: Горячая линия-Телеком, 2007. 432 с.

3. Olfat E., Bengtsson M. Joint channel and clipping level estimation for OFDM in IoT-based networks // IEEE Trans. Signal Process. Sep. 2017. Vol. 65, no. 18. P. 4902–4911.

4. *Green IoT: An investigation on energy saving practices for 2020 and Beyond* / Arshad R. [et al.] // *IEEE Access*. Jul. 2017. Vol. 5. P. 15667–15681,

5. *Дослідження ефективності роботи телекомунікаційних систем за допомогою інтерактивного програмного забезпечення* / Г. О. Гринкевич, А. О. Макаренко, М. О. Гусак, Д. Б. Лесявський // *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2014. Вип. 4 (32). С. 84–87.

6. *Розробник програмного забезпечення VisSim* [Електронний ресурс]. URL:

<http://www.vissim.com/>

7. *Jeffrey G. A., Arunabha G., Rias M. Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*. W.: Pearson Education, Inc., 2007. 478 p.

8. *Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.* / пер. с англ. Москва: Изд. дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

9. *Розробник програмного забезпечення FlowCode* [Електронний ресурс]. URL:

<http://www.matrixmultimedia.com>

10. *Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. Изд. 2-е / пер. с англ.* Москва: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.

11. *Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов: под ред. Уолта Кестера / пер. с англ.* Москва: Техносфера, 2010. 328 с.

12. *Algorithm design for digital processing of signals using telecommunications technology OFDM* / A. Makarenko, N. Dovzhenko, G. Grynkevych, V. Zhebka // *2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)* DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409213

13. *Гринкевич Г. О. Моделювання та розробка алгоритмів функціонування багатоантенних безпроводних систем передавання* // *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2013. Вип. 4 (28). С. 89–93.

А. А. Гринкевич, А. О. Макаренко, В. В. Василенко, К. А. Домрачева

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ІОТ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ OFDM-МОДУЛЯЦИИ

Проанализированы возможности использования имитационной модели OFDM-модема передачи данных для IoT устройств. Приведены материалы исследований методов математического моделирования расширенного широкополосного беспроводного доступа. Предложено описание работы разработанного в программной среде FlowCode алгоритма модуляции, получения синфазных и квадратурных составляющих QPSK-моделируемого сигнала; алгоритма быстрого преобразования Фурье для выходных отсчетов и их обратные эквиваленты.

Ключевые слова: OFDM-модем; IoT устройства; передача данных; модуляция; алгоритм; программная среда; имитационная модель.

G. A. Grynkevych, A. A. Makarenko, V. V. Vasilenko, K. A. Domracheva

SIGNAL PROCESSING ALGORITHM FOR IoT DEVICES USING OFDM-MODULATION

The possibilities of using the simulation model of the OFDM data transmission modem for IoT devices were analyzed. An analysis was made of the development trends of modern materials and research methods for mathematical modeling of advanced broadband wireless access signal processing for IoT devices. Development of the OFDM modem for data transfer is the first stage of hardware implementation of the OFDM system. Using QPSK modulation allows you to achieve the optimal balance of the result in noise immunity of the reception and hardware and computing costs. The VisSim software environment is the most adapted for executing such task for the telecommunications industry. Moreover, the development of the model was carried out with the recognition of the very same software product. Development of an OFDM-modem transmitting data allowing you to model a robot model in minds that are close to real and that allows you to perform robotics without hardware verification. Creating Keruyucho programs, the program is a middle-ware FlowCode. This program is designed for robots with widely distributed MK companies Atmel (AVR architecture), Microchip (PIC architecture) and MK based on ARM architecture. A description is given of the operation of a modulation algorithm developed in the FlowCode software environment for obtaining in-phase and quadrature components of a QPSK-modeled signal; fast Fourier transform algorithm for output samples and their inverse equivalents. The possibility of using the ATmega128 MK as an IFFT implementation device was calculated. It is determined that there is a large stock of computing operations in the MC, however, when implementing an OFDM modem, it is necessary to perform both a number of standard operations and specific operations related to the preparation of data packets for processing by IFFT and FFT.

Keywords: OFDM modem; IoT devices; data transmission; modulation; algorithm; software environment; simulation model.