

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНІРЕНКО, Н. П. КУШНІРЕНКО,
О. В. САДЧЕНКО, О. В. ТРОЯНСЬКИЙ

Україна, Національний університет «Одеська політехніка»

E-mail: koa@opu.edu.ua

РЕАЛІЗАЦІЯ КОДЕКА МАНЧЕСТЕР ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ AVR- ТА ARM-АРХІТЕКТУРИ

Запропоновано алгоритм кодування та декодування кодом Манчестер інформації для інфрачервоних, оптичних та провідних каналів зв'язку на основі популярних мікроконтролерів — 8-розрядних сімейства AVR та 32-розрядних сімейства ARM за допомогою апаратного приймача-передавача UART, що працює в асинхронному режимі. Реалізація методу формування префіксного коду Манчестер дозволила досягти швидкості бітового потоку 1 Мбіт/с на мікроконтролерах ATmega16A та 4,5 Мбіт/с на основі STM32F103C8T6.

Ключові слова: оптична мережа, модем, манчестерське кодування, апаратний кодек, UART, мікроконтролер, архітектура AVR, ARM.

Манчестерське інформаційне кодування в порівнянні з незбалансованими кодами має такі переваги, як самосинхронізація та відсутність постійної складової:

— наявність двох гарантованих переходів в процесі передавання одного біта дає можливість сигналу самосинхронізуватися, що дозволяє приймачу (декодеру) правильно налаштуватися на швидкість передавання синхросигналу, тому не потрібна додаткова лінія передачі [1, 2];

— за будь-якого конкретного потоку бітів сигнал манчестерського кодування не містить постійної складової, якщо значення верхнього та нижнього рівнів однакові за модулем, і це полегшує побудову гальванічної розв'язки за допомогою трансформатора.

Вказані переваги дозволяють актуалізувати застосування кодів Манчестер не тільки в процесі реалізації комп'ютерних мереж, але й у проектах, пов'язаних зі збиранням телеметричних даних з різних датчиків (інтернет-речей), наприклад:

— система дистанційного знімання даних з приладів обліку споживання газу, води, тепла, електроенергії;

— система охоронної та протипожежної безпеки;

— система дистанційного моніторингу параметрів середовища у теплицях.

Одним з основних недоліків проєктів на основі оптоволоконних ліній є висока вартість кінцевого оптичного обладнання, що пов'язано зі складністю формування та обробки сигналів [3—5] на частотах від одиниць до десятків і сотень мегагерц, а при використанні дротових мереж з роздільними трансформаторами — відсутність апаратних кодеків коду Манчестер [6—9], що входять до складу поширених мікроконтролерів.

Реалізація кодера манчестерського коду на основі мікроконтролерів з архітектурами AVR та ARM не становить особливих проблем, а ось реалізувати декодувальну частину вже складніше.

Метою цієї роботи була реалізація кодека (кодера-декодера) Манчестерського коду на основі апаратних інтерфейсів мікроконтролерів невисокої продуктивності.

З метою спрощення програмного алгоритму кодування та декодування кодом Манчестер (МЧ), а також для забезпечення швидкості передавання інформації в діапазоні 1—20 Мбіт/с пропонується використовувати апаратний приймач/передавач UART, що є у складі зазначених вище мікроконтролерів.

Алгоритм формування префіксного коду Манчестер

Принцип формування кодів Манчестер 1 та Манчестер 2 продемонстровано на **рис. 1**.

Як видно з рис. 1, значення бітів «0» і «1» передаються не як логічні рівні, а у вигляді переходу зі стану «0» у стан «1», і навпаки. Основною проблемою, що виникає при декодуванні цих кодів, є пра-

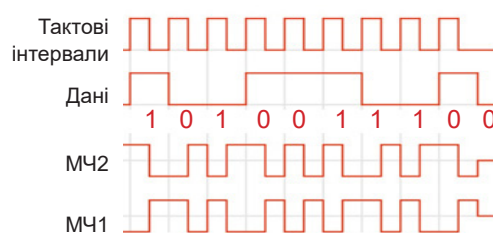


Рис. 1. Принцип формування кодів Манчестер [10]:

МЧ1 — за стандартом IEEE 802.3;

МЧ2 — за Г. С. Томасом

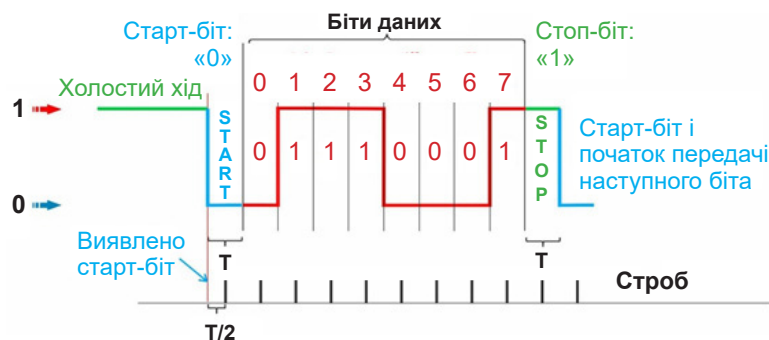


Рис. 2. Вигляд апаратного протоколу UART у форматі 8-N-1

Таблиця 1

Ансамбль з шістнадцяти кодових слів*

N_{dec}	Інформаційні біти $Data_IN_bin$								$Data_Mh2_hex$	$Data_Mh2_dec$
	$IN1$		$IN2$		$IN3$		$IN4$			
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0×55	85
	0	1	0	1	0	1	0	1		
1	0	0	0	0	0	1	1	0	0×56	86
	0	1	0	1	0	1	1	0		
2	0	0	0	1	0	0	0	1	0×59	89
	0	1	0	1	1	0	0	1		
3	0	0	1	1	0	1	0	0	0×5A	90
	0	1	0	1	1	0	1	0		
4	0	1	0	0	0	0	0	1	0×65	101
	0	1	1	0	0	1	0	1		
5	0	1	0	1	0	1	1	0	0×66	102
	0	1	1	0	0	1	1	0		
6	0	1	1	1	0	0	0	1	0×69	105
	0	1	1	0	1	0	0	1		
7	0	1	1	1	1	0	1	0	0×6A	106
	0	1	1	0	1	0	1	0		
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0×95	149
	1	0	0	1	0	1	0	1		
9	1	0	0	0	1	1	1	0	0×96	150
	1	0	0	1	0	1	1	0		
10	1	0	0	1	1	0	0	1	0×99	153
	1	0	0	1	1	0	0	1		
11	1	0	0	1	1	0	1	0	0×9A	154
	1	0	0	1	1	0	1	0		
12	1	1	0	0	0	0	0	1	0×A5	165
	1	0	1	0	0	1	0	1		
13	1	1	0	1	0	1	1	0	0×A6	166
	1	0	1	0	0	1	1	0		
14	1	1	1	1	1	0	0	1	0×A9	169
	1	0	1	0	1	0	0	1		
15	1	1	1	1	1	1	1	1	0×AA	170
	1	0	1	0	1	0	1	0		

* Кодування кодом МЧ2: «1» кодується перепадом сигналу з високого рівня до низького у середині бітового інтервалу, «0» кодується перепадом сигналу з низького рівня до високого;

N_{dec} — номер кодового слова у десятковому форматі;

$Data_IN_bin$ — чотири інформаційних біта, що завантажуються одночасно;

$Data_Mh2_hex, Data_Mh2_dec$ — інформація, закодована МЧ2 у шістнадцятковому та десятковому форматах відповідно.

Декодер:

- приймання за допомогою апаратного UART префіксного кодового слова $IN_UART_Mh2_hex$;
- декодування коду $IN_UART_Mh2_hex$ в десяткове число N_dec ;
- перетворення N_dec у бінарний вигляд та видача повідомлення отримувачу $Data_IN_bin$.

Топології мереж з використанням префіксних кодів Манчестер

На рис. 4 наведено приклади типових мереж передавання даних з різною топологією та способом зв'язку (по оптоволокну або дротовими мережами) з промисловою змінною напругою 220 В (або 380 В) з використанням роздільного трансформатора чи без нього.

На рис. 4, а показано варіант дуплексного обміну даними між двома точками інформаційної мережі, коли потрібно мати дві незалежні лінії зв'язку. На рис. 4, б також показана мережа із дуплексним обміном даними з використанням оптоволоконна, що вимагає використання оптоелектричних перетворювачів. На рис. 4, в дуплексний зв'язок здійснюється по електричній мережі зі змінною напругою 220 В із використанням розділового трансформатора, при цьому, якщо використовується коду-

вання кодом Манчестер, то нема потреби в додатковій високочастотній модуляції. На рис. 4, г приведено приклад з'єднання чотирьох абонентів оптичної мережі за топологією «Кільце», коли можливий контроль помилок в каналі зв'язку, оскільки кожний абонент має можливість приймання свого сигналу після його ретрансляції послідовно всіма абонентами мережі.

Структурну схему оптичної симплексної системи зв'язку (модема) з програмно реалізованим на мікроконтролері кодеком манчестерського коду наведено на рис. 5.

Джерело повідомлень виробляє потік даних з бітовою швидкістю $V_{дп}$, кодер UART перетворює кожний байт від джерела повідомлень за стандартом 8-N-1, після цього швидкість складає $V_{uart} = V_{дп} \cdot (5/4)$. Далі потік даних потрапляє до кодера Манчестер, який формує два байта, що передаються без захисного інтервалу зі швидкістю $V_M = 2,5V_{дп}$, тобто у 2,5 рази вище, ніж продуктивність джерела повідомлень. Після кодера коду Манчестер сигнал потрапляє на оптоелектричний перетворювач та передається до оптичної лінії зв'язку.

За необхідності збільшення числа абонентів або нарощення ємності каналів системи зв'язку краще використовувати кільцеву топологію, при цьому для

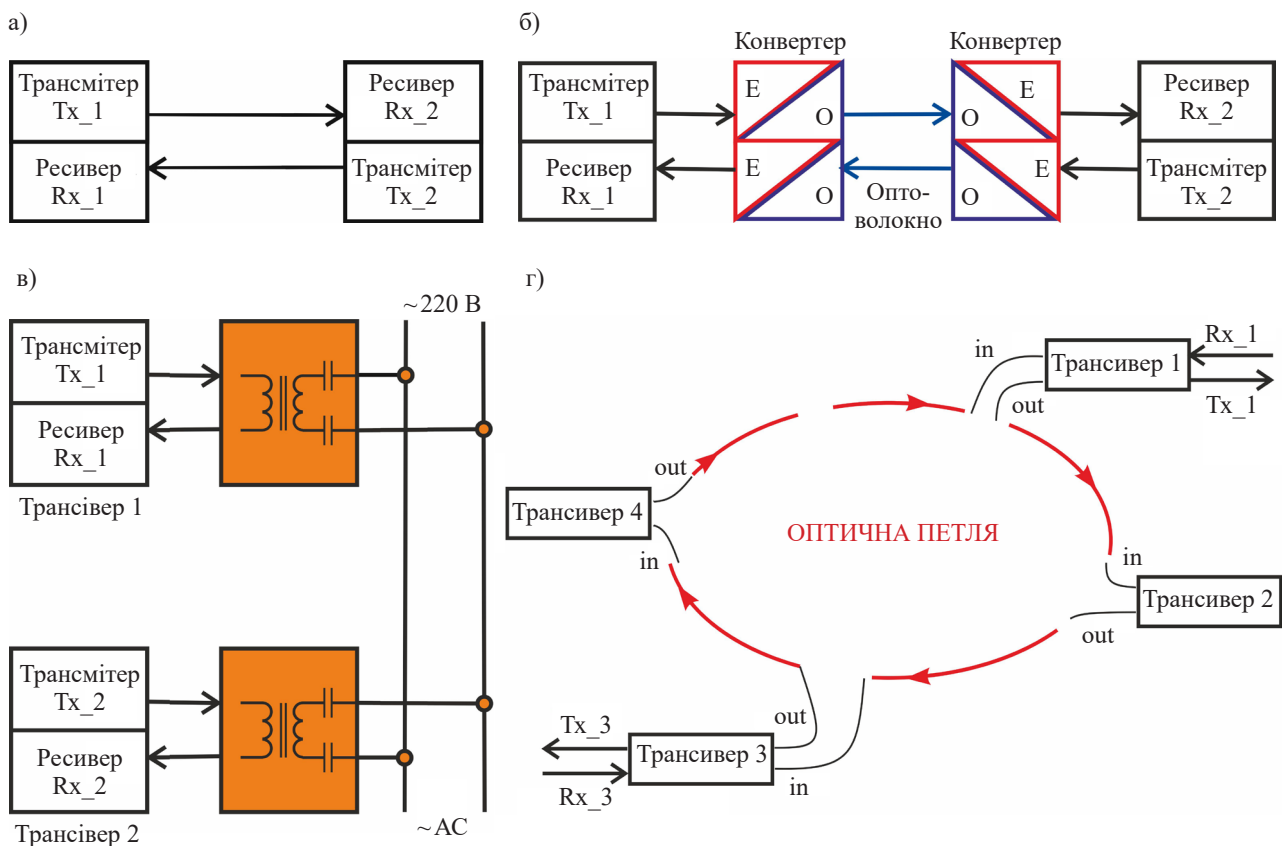


Рис. 4. Структурні схеми типових мереж передавання даних з різною топологією та способами зв'язку:

- а — «точка – точка», дуплексний режим на базі дроту; б — «точка – точка», дуплексний режим на базі оптичних конверторів; в — «точка – точка», дуплексний режим поверх дротової мережі 220 В; г — «Кільце», дуплексний режим в оптичній мережі

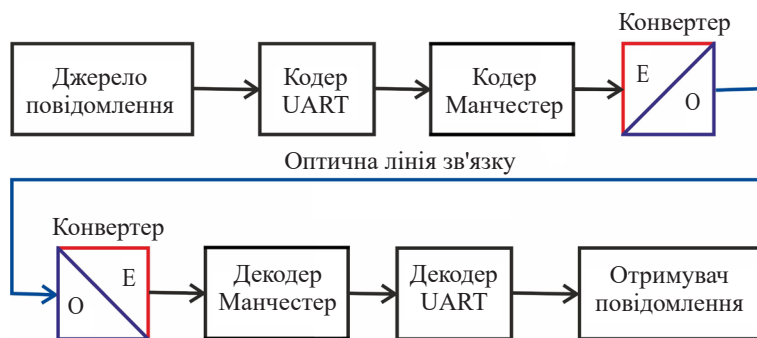


Рис. 5. Структурна схема оптичного модема з манчестерським кодуванням

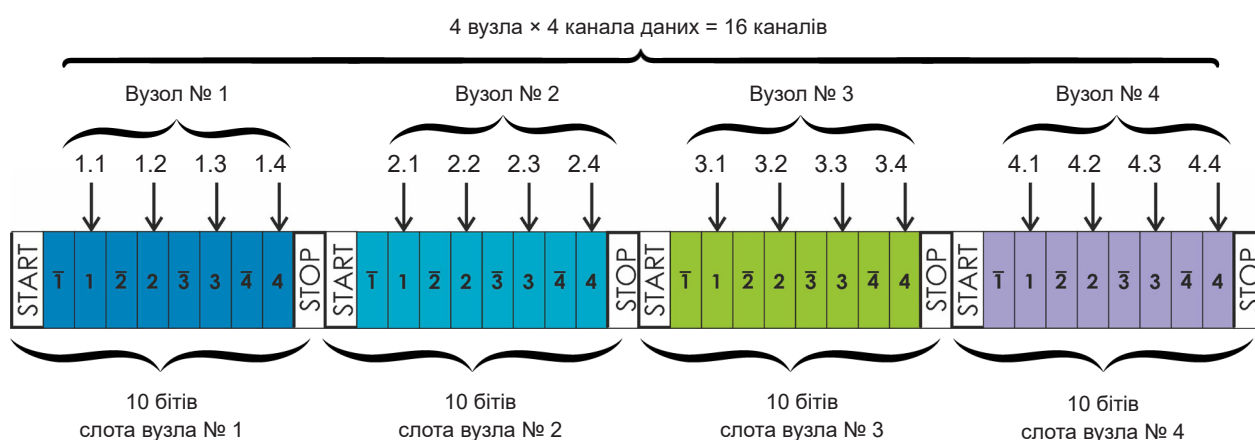


Рис. 6. Формат кадру в режимі «Кільце»

Таблиця 2

Порівняння характеристик мікроконтролерів фірми Microchip та STMicroelectronics

Параметри	МК	
	ATmega16A [7]	STM32F103C8T6 [9]
Розрядність, біт	8	32
Пам'ять програми (FLASH), Кб	16	64
SRAM, Кб	1	20
EEPROM, байт	512	—
АЦП	ADC 8-канальний 10-біт	2×ADC 10-канальний 12-біт
Максимальна частота роботи ядра, МГц	16	72
Максимальна швидкість передавання даних по UART	2 000 000 біт/с [8] (при тактовій частоті ядра та кварцового резонатора 16 МГц)	4 500 000 біт/с по UART 1 [13]; 2 250 000 біт/с по UART 2, 3 [13] (при тактовій частоті ядра 72 МГц та кварцового резонатора 16 МГц)
Заводське калібрування / точність RC-генератора	так / ±10%	так / ±2%
Інтерфейси	1×I ² C, 1×SPI, 1×UART	1×CAN, 2×I ² C, 1×IrDA, 1×LIN, 2×SPI, 3×USART, USB
Корпус	TQFP-44	LQFP-48

масштабування потрібно лише модифікувати програмну частину та структуру кадру.

Структуру пакета даних (формат кадру), що передаються по оптоволокну в режимі «Кільце» для числа вузлів, що дорівнює 4, наведено на **рис. 6**. Основна відмінність цього режиму від режиму «точка – точка» полягає у формуванні чотирьох інформаційних слотів, розділених стартоповими умовами, які необхідні для забезпечення синхронізації потоку даних.

Практична реалізація кодека Манчестер на промислових мікроконтролерах

Порівняння мікроконтролерів різних виробників та архітектури наведено в **табл. 2**.

Щоб забезпечити передавання великого об'єму вхідних даних, необхідна висока швидкість передавання по UART, тому треба вибирати МК з більшою максимальною частотою роботи ядра. Як видно з **табл. 2**, для цього з двох розглянутих краще використовувати мікроконтролер STM32F103C8T6 фірми STMicroelectronics.

Виконати базове налаштування периферії мікроконтролера STM32F103C8T6 можна за допомогою редактора конфігурації STM32CubeMX [13]. Графічний редактор конфігурації та генератор коду STM32CubeMX, пропонує STMicroelectronics, дозволяє здійснювати тонке автоматизоване налаштування ініціалізації.

На **рис. 7** зображено екран з вікном налаштування конфігурації (Pinout & Configuration). У вкладці

Categories проводиться вибір необхідної периферії («на борту» мікроконтролера є великий набір периферії: 1×CAN, 2×I²C, 2×SPI, 3×USART, USB), у нашому випадку це USART1. У вкладці USART1 Mode and Configuration активується USART1 в асинхронному режимі, а у вкладці Parameter Settings / Basic Parameters обираються необхідні параметри — в Baud Rate вибирається максимальна швидкість передавання даних UART 4 500 000 біт/с.

Відповідність між бітовими швидкостями вхідних даних та даних фізичного рівня (Physical layer, PHY) продемонстровано у **табл. 3**.

Таблиця 3

Залежність між бітовими швидкостями передавання вхідних даних та даних фізичного рівня

Бітова швидкість передавання даних, біт/с	
вхідних	фізичного рівня
46 080	115 200
92 160	230 400
184 320	460 800
368 640	921 600
737 280	1 843 200
1 474 560	3 686 400
1 800 000	4 500 000

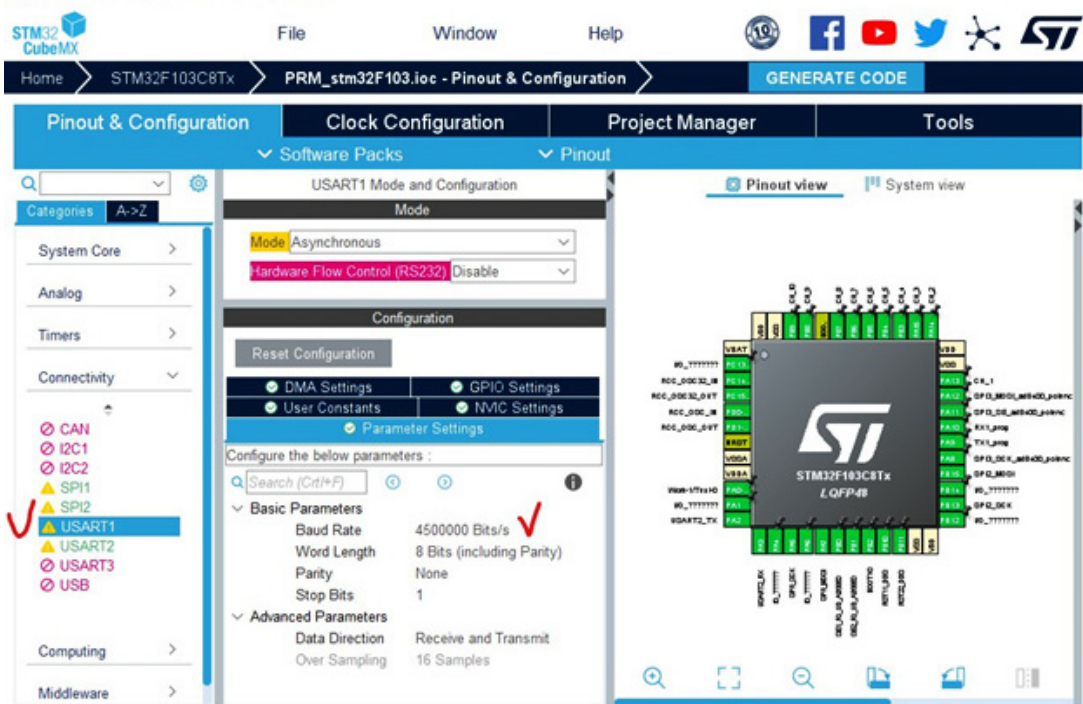


Рис. 7. Налаштування UART1 за допомогою графічного редактора конфігурації STM32CubeMX на швидкість передавання даних 4 500 000 біт/с

Висновок

Таким чином, реалізація запропонованого методу формування префіксного коду Манчестер за допомогою апаратного UART, вбудованого в мікроконтролер, дозволило досягти швидкості бітового потоку 1 Мбіт/с на МК ATmega16A та 4,5 Мбіт/с на основі STM32F103C8T6. При цьому відносна швидкість коду чи відношення числа інформаційних символів до загальної довжини кодового слова становить 2/5, що дозволяє передавати дані на швидкості до 1,8 Мбіт/с у разі використання мікроконтролера STM32F103C8T6.

Отримана надмірність інформації дозволяє виявляти помилки у каналі зв'язку. Наявність помилок також зручно контролювати в топології мережі «Кільце» при реалізації алгоритму прозорого передавання даних від кожного абонента мережі.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Wijanto E., Huang C.-M. Design of bipolar optical code-division multiple-access techniques using phase modulator for polarization coding in wireless optical communication. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, iss. 13, 5955. <https://doi.org/10.3390/app11135955>
2. Гольдштейн Б. С. *Протоколи сети доступа*. Петербург, БХВ, 2005.
3. Tseng S.P., Wijanto E., Lai P.H., Cheng H.C. Bipolar optical code division multiple access techniques using a dual electrooptical modulator implemented in free-space optics communications. *Sensors*, 2020, vol. 20, 3583. <https://doi.org/10.3390/s20123583>
4. Singh M., Malhotra J. A high-speed long-haul wavelength division multiplexing-based inter-satellite optical wireless communication link using spectral-efficient 2-D orthogonal modulation scheme. *Int. J. Commun. Syst.* 2019, vol. 33, e4293. <https://doi.org/10.1002/dac.4293>

5. Cheng H.-C., Wijanto E., Lien T.-C. et al. Multiple access techniques for bipolar optical code division in wireless optical communications. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 83511–83523. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991071>

6. Садченко А. В., Кушніренко О. А., Яцьк А. Д., Лисица Д. Н. Реализация кодера и декодера кодов Манчестер 1 и Манчестер 2 для оптических модемов на основе микроконтроллеров AVR- и ARM-архитектуры. *Труды XXII Междунар. науч.-практ. конф. «СИЭТ»*, 2021, с. 16–17. <http://www.tkea.com.ua/siet/archive/2021/16-17.pdf>

7. Сухман С. М., Бернов А. В., Шевкопляс Б. В. *Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений*. Москва, Эко-Трендз, 2003.

8. Садченко А. В., Кушніренко О. А., Ефимов О. И. и др. Корреляционная схема кадровой синхронизации в системах связи с QPSK-модуляцией. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2017, № 6, с. 22–8. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.6.22>

9. Брени С. *Синхронизация цифровых сетей связи*. Москва, Мир, 2003.

10. *Product Features Microchip ATmega16A*. <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega16A>

11. *Documentation: Datasheet ATmega16A, 8-bit microcontroller with 16K bytes in-system*. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8154-8-bit-AVR-ATmega16A_Datasheet.pdf

12. *Documentation: Datasheet, STM32F103T6, Arm Cortex-M3 MCU with 32 Kbytes of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN*. <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103t6.html>

13. *STM32Cube initialization code generator*. <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>

Дата надходження рукопису
до редакції 21.02 2022 г.

Опис статті для цитування:

Садченко А. В., Кушніренко О. А., Кушніренко Н. П., Садченко О. В., Троянський О. В. Реалізація кодера Манчестер для систем передавання інформації на основі мікроконтролерів AVR- та ARM-архитектури. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2022, № 4–6, с. 17–24. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.17>

Cite the article as:

Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Kushnirenko N. P., Sadchenko O. V., Troyanskiy O. V. Implementation of manchester codec for information transmission systems based on AVR and ARM architecture microcontrollers. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 17–24. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.17>

IMPLEMENTATION OF MANCHESTER CODEC FOR INFORMATION
TRANSMISSION SYSTEMS BASED ON AVR AND ARM ARCHITECTURE
MICROCONTROLLERS

ATmega series AVR microcontrollers (e.g., ATmega8A or ATmega16A) and ARM microcontrollers with a Cortex M3 core (e.g., STM32F103C8T6) are among the most popular controllers used in solving engineering problems related to servicing various fire and security alarm sensors and devices for metering household and industrial power consumption. At the same time, to transfer the data via a twisted pair or AC voltage network, it needs to be encoded using Manchester 1 or Manchester 2 code, and said AVR and ARM microcontroller units (MCU) contain no hardware encoder and decoder for the Manchester code.

The study aimed at solving the engineering problem of implementing the codec (encoder-decoder) of the Manchester code based on the hardware interfaces of low-performance microcontrollers.

The direct implementation of the encoding algorithm with the Manchester code using a purely software-driven approach significantly decreases the information transfer rate. At the same time, among the hardware interfaces of the MCU, there is always a serial universal asynchronous data transceiver (UART). However, the UART data transfer protocol is not generally suitable for Manchester encoding and, therefore, needs to be software adapted.

In order to adapt the UART protocol to the conditions of Manchester encoding, the 8N1 mode is selected at the hardware level, which means 8 data bits, 1 stop and 1 start bit. The software implementation of the encoder consists in the fact that out of the total possible volume of 256 code combinations, 16 are selected that satisfy the Manchester 2 code, while the start and stop conditions for data bytes transmitted in a row also satisfy the structure of the Manchester code.

To maximize the efficiency of the program code, all code words are stored in the memory of the MCU in such a way that their serial number corresponds to the decimal interpretation of 4 bits of the input data. The decoding of the received data is also performed as efficiently as possible using the decoding table.

The implementation of the software and hardware codec of the Manchester code significantly expands the scope of popular AVR and ARM microcontrollers and reduces the cost of the finished product by excluding any additional units that perform the function of encoding and decoding the Manchester code.

Keywords: optical network, modem, Manchester encoding, hardware codec, UART, microcontroller.

REFERENCES

1. Wijanto E., Huang C.-M. Design of bipolar optical code-division multiple-access techniques using phase modulator for polarization coding in wireless optical communication. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, iss. 13, 5955. <https://doi.org/10.3390/app11135955>
2. Goldstein B.S. *Protokoly seti dostupa* [Access network protocols]. Saint Petersburg, BHV, 2005. (Rus)
3. Tseng S.P., Wijanto E., Lai P.H., Cheng H.C. Bipolar optical code division multiple access techniques using a dual electrooptical modulator implemented in free-space optics communications. *Sensors*, 2020, vol. 20, 3583. <https://doi.org/10.3390/s20123583>
4. Singh M., Malhotra J. A high-speed long-haul wavelength division multiplexing-based inter-satellite optical wireless communication link using spectral-efficient 2-D orthogonal modulation scheme. *Int. J. Commun. Syst.* 2019, vol. 33, e4293. <https://doi.org/10.1002/dac.4293>
5. Cheng H.-C., Wijanto E., Lien T.-C. et al. Multiple access techniques for bipolar optical code division in wireless optical communications. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 83511–83523. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991071>
6. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Yatsyk O. D., Lysytsia D. M. [Implementation of encoder and decoder of Manchester 1 and Manchester 2 codes for optical modems based on AVR and ARM architecture]. *Proceeding of the XXII Intern. scientific-practical. conf. MIET*, 2021, pp. 16–17. <http://www.tkea.com.ua/siet/archiv/2021/16-17.pdf>
7. Sukhman S. M., Bernov A. V., Shevkoplyas B. V. *Sinkhronizatsiya v telekommunikatsionnykh sistemakh. Analiz inzhenernykh resheniy* [Synchronization in telecommunication systems. Analysis of engineering solutions]. Moscow, Eco-Trends, 2003. (Rus)
8. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Yefimov O. I. et al. Correlation scheme of frame synchronization in communication systems with QPSK-modulation. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2017, no 6, pp. 22–28. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.6.22> (Rus)
9. Breni S. *Sinkhronizatsiya tsifrovyykh setey svyazi*. [Synchronization of digital communication networks]. Moscow, Mir, 2003. (Rus)
10. *Product Features Microchip ATmega16A*. <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega16A>
11. *Documentation: Datasheet ATmega16A, 8-bit microcontroller with 16K bytes in-system*. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8154-8-bit-AVR-ATmega16A_Datasheet.pdf
12. *Documentation: Datasheet, STM32F103T6, Arm Cortex-M3 MCU with 32 Kbytes of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN*. <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103t6.html>
13. *STM32Cube initialization code generator*. <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>