



THREAD

CoAP

UDP

DTLS

IPv4 & IPv6

6LoWPAN

802.15.4, WiFi, Ethernet, etc



Systemy dla Internetu Rzeczy (26)

Układy scalone z obsługą protokołu Thread

Technologia Internetu Rzeczy wymaga bezpośredniego dołączenia węzłów końcowych do sieci Internet. Takie rozwiązanie oferuje protokół Thread. Obecnie następuje szybki rozwój tego protokołu, a zwłaszcza jego darmowej wersji OpenThread. Zaczyna on stawać się zupełnie realną alternatywą dla protokołu ZigBee. Dzięki temu może on spowodować gwałtowny rozwój sprzętowych rozwiązań komunikacji radiowej dla inteligentnego domu (Smart Home) z obsługą urządzeń domowych, klimatyzacji, systemów bezpieczeństwa i oświetlenia czy zarządzania zużyciem energii.

Wszystkie zaprezentowane układy scalone są w fazie produkcyjnej. Zestawienie układów scalonych SoC z obsługą protokołu Thread umieszczono w tabeli 1. Dla układów produkowanych i dostępnych do zakupu została podana cena pojedynczego układu (jeśli jest dostępna) w witrynie DigiKey. Dla innych układów podano dostępne informacje o planach. Podano też ceny (jeśli są dostępne): układu uruchomieniowego (/ EVAL/), modułu produkcyjnego [MOD] oraz wtyczki USB (oznaczenie (USB)). Niektóre układy oprócz modelu podstawowego mają istotne warianty. Zostały one pokazane w nawiasach klamrowych „{ }”.

Zestawienie wykonano na podstawie informacji uzyskanych z Internetu i nie stanowi pełnego przeglądu układów ani kompletnej prezentacji ich cech. Spośród wielu układów scalonych obsługujących tylko protokół IEEE 802.15.4 bardzo trudno jest wyłowić układy z obsługą protokołu Thread. Pewnym sposobem jest sprawdzenie listy na oficjalnej stronie produktów certyfikowanych *Thread certified products* [3]. Jednak na niej znajdują się także produkty zdecydowanie stare oraz tylko niektóre nowsze. Bo wille nowszych produktów jest jeszcze w trakcie uzyskiwania certyfikatu.

Wynik poszukiwań jest sporym zaskoczeniem. Wydaje się, że układów z obsługą komunikacji ze standardem Thread nie oferują takie firmy jak Cypress, Renesas, Panasonic, Fujitsu czy Toshiba.

Najlepszym sposobem prezentacji złożonej informacji jest rysunek. Dlatego zostały pokazane schematy blokowe wszystkich omawianych układów scalonych. Mają one różny stopień szczegółowości, jednak dostarczają bardzo cennych informacji o budowie wewnętrznej tych układów.

Prezentacja układów jest zorganizowana w dwojaki sposób. Po pierwsze omówiona jest całościowa realizacja różnych istotnych cech i własności pojedynczych układów scalonych. Po drugie przedstawione jest omówienie najbardziej reprezentatywnego układu scalonego (jednego lub kilku) dla danego zagadnienia. W ten sposób można zapoznać się z kompletnym opisem poszczególnych układów scalonych i z ich porównaniem.

Thread

Thread jest protokołem sieci bezprzewodowej opracowanym przez konsorcjum Thread Group (pierwsza specyfikacja w roku 2015) [1]. W prace konsorcjum zaangażowane są czołowe firmy z branży jak: Google, Samsung, ARM, NXP, Silicon Labs, Nordic Semiconductor, Osram, Qualcomm, Schneider, Somfy, Tyco, Zephyr Project czy Texas Instruments [S20]. Właśnie do konsorcjum (IX 2018) dołączyła firma Apple, twórca systemu inteligentnego domu HomeKit. O roku 2017 konsorcjum Thread Group udziela certyfikatu zgodności z protokołem Thread. Najnowsza wersja Thread 1.1 specyfikacji jest dostępna za darmo od 7 maja 2018 [1].

Thread pracuje z wykorzystaniem protokołu komunikacyjnego IEEE 802.15.4. Protokół ten specyfikuje dolne warstwy MAC oraz PHY modelu OSI. Asynchroniczny protokół komunikacyjny umożliwia niski pobór mocy przez węzły. W kolejnej warstwie została zastosowana sieć 6LoWPAN (Low-Power Wireless Personal Area

Tabela 1. Układy SoC z obsługą standardu Thread

Układ	Firma	Produkcja /EVAL/ [MOD] (USB)	2,4-GHz Standardy	Sub 1GHz Standardy	Flash	RAM	GPIO	Rdzenie	Sprzętowe wspomaganie bezpieczeństwa
CC1352R [4] {CC1352P} SimpleLink	Texas Instruments	\$ 4.73 (1ku) / \$ 39.99/	*IEEE 802.15.4g, ZigBee, Thread, M-Bus, prop *Bluetooth 5 LE (PA +20 dBm),	IEEE 802.15.4g, 6LoWPAN, KNX RF, Wi-SUN, prop	352 KB	80 KB	28	*Cortex-M4F (48 MHz), *Cortex-M0 (48 MHz) *Sensor Controller (24 MHz, RAM 4KB), jak wyżej	AES-256, ECC, RSA-20148, SHA2 (up to SHA-256), True Random Number Generator (TRNG)
CC2652R [5] {CC2652RB} SimpleLink	Texas Instruments	\$ 3.05 (1ku) / \$ 39.99/	*IEEE 802.15.4g, ZigBee, Thread (CER), M-Bus, prop *Bluetooth 5 LE	-	352 KB	80 KB	31	jak wyżej	
EM358x/9x [6]	Silicon Laboratories	\$ 11	*IEEE 802.15.4, Thread (CER), ZigBee,		512 KB	64 KB	24/32	*Cortex-M3 (24 MHz)	AES 128
EFR32MG [7] Mighty Gecko	Silicon Laboratories	\$ 8 / \$ 45/ [\$ 14]	*IEEE 802.15.4, Thread (CER), ZigBee, *Bluetooth LE 5 (PA +19 dBm)	IEEE 802.15.4g, Wi-SUN, prop (PA +20 dBm)	1024 KB	256 KB	do 32	*Cortex-M4F (40 MHz)	AES 128/256, SHA-1, SHA-2 (SHA-224 and SHA-256), ECC, CRC, True Random Number Generator
MKW41Zx [15] Kinetics	NXP	\$ 4-7 / \$ 77/	*IEEE 802.15.4, Thread (CER), ZigBee, (2x PAN) *Bluetooth LE 4.2	-	512 MB	128 KB		*Cortex-M0+ (48 MHz)	AES-128, TRNG
KW2xD [16] Kinetics	NXP	\$ 5.29	*IEEE 802.15.4 (2x PAN), Thread (CER), ZigBee,	-	512 MB	64 KB		*Cortex-M4 (50 MHz)	AES, CRC
nRF52840 [9]	Nordic Semiconductor	\$ 7.4 / \$ 49/ [\$ 10] (\$ 10)	*IEEE 802.15.4g, ANT, ZigBee, Thread (CER), prop *Bluetooth 5 LE (PA +8 dBm)),	-	1 MB	256 KB	48	*Cortex-M4F (64 MHz)	ARM CryptoCell 310 cryptographic accelerator, secure boot, secure erase, NFC-A
QCA4024 [10] {QCA4020}	Qualcomm	€ 6.79 / \$ 75/ [€ 10.19]	*IEEE 802.15.4, Thread (CER), ZigBee, *Bluetooth 5 LE, mesh (*dual-band Wi-Fi (802.11a/b/g))	-	3 MB	300 KB		*Cortex-M4 (128 MHz), *Processor for Bluetooth LE and 15.4 MAC {*Processor for 802.11 a/b/g/n)	Secured Boot, Flash encryption, Copy Protection, Hardware crypto engine for advances security, WPA/WPA2 – Personal, WPA/WPA2 – Enterprise, WEP, TLS-1.2, Client and Server
RS110 [12] {NCV-RS110 [13]}	ON Semi	\$ 7.56 / \$ 50/	*IEEE 802.15.4g, Thread, ZigBee, prop *Bluetooth 5 LE (PA +6(3) dBm)) {Automotive Qualification, AEC-Q100, Ready O2/18}	-	384 KB	194 KB	{16}	*Cortex-M3 (48 MHz), *LPDSP32 (72 MHz)	AES-128, CRC polynomial
STM32WB55VG [14]	ST Microelectronics	\$ 9.72 / \$ 43.75/	* IEEE 802.15.4, Thread, ZigBee *Bluetooth 5 LE	-	1 MB	256 KB	72	*Cortex-M4F (64 MHz), *Cortex-M0+ (32 MHz)	AES-256, PCROP, JTAG Fuse, PKA, RSS
QPG6095 [22]	Qorvo		* IEEE 802.15.4 (3x PAN), Thread (CER), ZigBee, * Bluetooth 5 LE,		512 KB	64 KB		*Cortex-M4F (40 MHz)	AES-256

Oznaczenia: PA – Power Amplifier, CER – certyfikat Thread Group, /EVA/L – moduły uruchomieniowe, [MOD] – moduły produkcyjne, (USB) – wtyczki USB, {} – warianty układów

Networks), która umożliwia pracę sieci w konfiguracji mesh oraz adresowanie IPv6 [S20].

OpenThread jest otwartą (darmową) implementacją specyfikacji Thread powstałą z inicjatywy firmy NestLabs obecnie wspieraną przez firmę Google [2]. Zawiera warstwę sieciową, rolę urządzeń oraz wsparcie dla rutera krawędziowego (Border Router).

Jednoczesna praca z dwoma protokołami

Wiele układów scalonych, oprócz obsługi protokołu Thread, może w paśmie 2,4 GHz pracować także z komunikacją w innym standardzie. Umożliwia to dodatkową obsługę różnych protokołów: Bluetooth Low Energy 5, ZigBee, Wireless M-Bus, ANT lub protokołów autorskich (proprietary). Dodatkowo, już kilka układów scalonych, różnych producentów, umożliwia w paśmie 2,4 GHz jednoczesną (concurrent) transmisję w sieci z protokołem Thread oraz z innym protokołem. Dokładniej to zagadnienie zostało omówione w dwóch poprzednich artykułach tej serii [S17, S18].

- Układy rodziny nRF52x (Nordic Semiconductor) [9] umożliwiają w paśmie 2,4 GHz jednoczesną transmisję w sieciach Bluetooth 5 i Thread. Zapewnia to mechanizm Dynamic Multiprotocol z obsługą stosu BLE 5 oraz stosu OpenThread. Mechanizm zapewnia, że praca modułu radiowego jest dzielona pomiędzy protokoły – z zapewnieniem, że transmisja obu jest obsługiwana. Współdzielenie czasowe pracy różnych protokołów jest realizowane automatycznie w tle i jest niewidoczne dla użytkownika [S17].
- Układy scalone rodziny Mighty Gecko EFR32MG firmy Silicon Laboratories [7] udostępniają obsługę jednoczesnej pracy z wieloma protokołami pod nazwą Silicon Labs Dynamic Multiprotocol. Umożliwia to podział czasowy pracy modułu radiowego i szybkie przełączanie jego konfiguracji pracy [S17].
- Układ scalony KW41Z firmy NXP [15] umożliwia jednoczesną pracę z protokołem BLE 4.2 oraz IEEE 802.15.4 (stos ZigBee i Thread). Zastosowany został moduł programowy Mobile Wireless Systems (MWS) pracujący z metodą przełączania modułu radiowego.

Inni producenci też zapowiadają możliwość równoczesnej transmisji z protokołem Bluetooth 5 oraz innym standardem: STM32WB55VG (ST Microelectronics) [14] [S18].

Układ nRF52840 Układ scalony nRF52840 firmy Nordic Semiconductor ma zastosowany rdzeń ARM Cortex-M4F (64 MHz) z dużą pamięcią Flash do 1 MB i RAM do 256 KB [9].

- Układ umożliwia w paśmie 2,4 GHz transmisję w sieciach z protokołem Bluetooth 5, Thread, ZigBee, IEEE 802.15.4 oraz ANT [9].
- Możliwa jest jednoczesna obsługa transmisji z obsługą stosu BLE 5 oraz stosu OpenThread. Zapewnia to mechanizm Dynamic Multiprotocol z obsługą stosów S140 v5 SoftDevice oraz stos OpenThread RF.
- Programowana moc wyjściowa w zakresie od -20 dBm do +8 dBm.
- Układ zapewnia bezpieczne bootowanie oraz aktualizację oprogramowania poprzez radio.
- Układ może pracować z różnymi systemami RTOS łącznie z systemem FreeRTOS.
- Układ pracuje z napięciem zasilania od 1,7 V do 5,5 V.
- Układ ma certyfikację konsorcjum Thread Group [3].

Cechy unikalne:

- Układy rodziny nRF52x mają dedykowany moduł kryptograficzny ARM TrustZone CryptoCell 310.

Firma udostępnia zestaw uruchomieniowy nRF52840-DK [19] oraz wtyczkę nRF52840 Dongle (PCA10059) [18].

Układ SimpleLink CC2652R Układ scalony SimpleLink CC2652R firmy Texas Instruments [5] ma własności i budowę taką samą jak

układ CC1352R [4]. Obsługuje za to jedynie pasmo 2,4 GHz bez obsługi pasma poniżej 1 GHz.

- Układ umożliwia transmisję z obsługą wielu protokołów: Bluetooth 5 Low Energy, IEEE 802.15.4g, 6LoWPAN, Thread, ZigBee, Wi-SUN oraz autorski protokół EasyLink [5].
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do +5 dBm.
- Układ pracuje z napięciem zasilania od 1,8 V do 3,8 V.
- Układ zapewnia bezpieczne bootowanie oraz aktualizację oprogramowania poprzez radio.
- Układ może pracować z różnymi systemami RTOS łącznie z systemem FreeRTOS.
- Jest też wersja CC2652RB, która ma wewnętrzny precyzyjny generator 48 MHz Bulk Acoustic Wave (BAW) Resonator, co pozwala na rezygnację z zewnętrznego kwarcu.
- Układ ma certyfikację konsorcjum Thread Group [3].

Cechy unikalne:

- Obsługa układów peryferyjnych przez trzeci rdzeń bez konieczności budzenia rdzenia głównego.

Praca dwuzakresowa

Trzech producentów oferuje układy scalone pozwalające na pracę dwuzakresową. Oprócz pracy w paśmie 2,4 GHz mogą one pracować w paśmie poniżej 1 GHz (Sub-1GHz). Praktycznie w Europie oznacza to pasma ISM 868 MHz oraz 440 MHz. Typowo stosowana jest komunikacja w standardzie IEEE 802.15.4. Umożliwia to obsługę różnych protokołów: 6LoWPAN, KNX RF, Wi-SUN, SUN-FSK oraz rozwiązań autorskich producentów.

- Układy scalone rodziny Mighty Gecko EFR32MG firmy Silicon Laboratories [7] umożliwiają pracę w dwóch zakresach z protokołem komunikacyjnym IEEE 802.15.4. Układ radiowy oferuje unikalną własność wybudzania Wake-on-Radio.
- Układ scalony SimpleLink CC1352R firmy Texas Instruments (oraz jego wersja z dodatkowym wzmacniaczem CC1352P) może pracować w dwóch pasmach: 2,4 GHz i w paśmie poniżej 1 GHz (Sub-1GHz) [S17, S18].
- Układ scalony (QCA4020, Qualcomm) [10] umożliwia, oprócz komunikacji w standardzie Bluetooth, komunikację w standardzie Wi-Fi (802.11a/b/g) w dwóch zakresach 2,4 GHz oraz 5 GHz. Realizowane jest to poprzez zastosowanie osobnego rdzenia sprzętowego.

Rodzina Mighty Gecko EFR32MGx Układy scalone Mighty Gecko EFR32MG firmy Silicon Laboratories mają zastosowany rdzeń ARM Cortex-M4F (40 MHz) z dużą pamięcią Flash do 1024 KB i RAM do 256 KB [7].

- Układy obsługują transmisję w paśmie 2,4 GHz z protokołem ZigBee 3.0, Thread, Bluetooth 5 oraz protokół autorski. Możliwe jest tworzenie sieci mesh.
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do 19 dBm.
- Układy mają sprzętowy moduł kryptograficzny obsługujący algorytmy AES 128/256, SHA-1, SHA-2 (SHA-224, SHA-256), moduł obliczeń CRC oraz True Random Number Generator.
- Układy pracują z napięciem zasilania od 1,8 V do 3,6 V.
- Zwraca uwagę bardzo długa lista układów peryferyjnych.
- Niektóre modele układów obsługują również transmisję w paśmie poniżej 1 GHz (915 MHz, 868 MHz, 433 MHz, 169 MHz). W tym paśmie układ obsługuje protokoły M-BUS, SUN-FSK oraz protokół autorski. Programowana moc wyjściowa w zakresie do 20 dBm.
- Układy mają certyfikację konsorcjum Thread Group [3].

Cechy unikalne:

- Układy oferują własność Wake-on-Radio.

Jest bardzo wiele wariantów układów w rodzinie Mighty Gecko EFR32MG. Są cztery serie EFR32MG1/12/13/14 oraz duża liczba

konfiguracji. Firma Silicon Laboratories oferuje również certyfikowane moduły MGM12P [8] z układem scalonym rodziny EFR32MG [7]. Każdy układ z serii EFR32 może pracować z protokołem Thread.

Dwuzakresowe procesory rodziny Mighty Gecko EFR32MG są już w produkcji dostępne za rozsądną cenę.

Transceiver

Układy scalone do obsługi komunikacji standardu IEEE 802.15.4 produkowane w poprzednich latach zawierały tylko układ radiowy do komunikacji dwukierunkowej – transceiver. Typowo nie miały one procesora sieciowego i komunikowały się z procesorem użytkownika poprzez łącze cyfrowe. Obecnie produkowane układy SoC też umożliwiają taką konfigurację pracy, typowo nazywaną „coprocessor”. Umożliwia to dodanie do modułu wbudowanego, np. Raspberry Pi, możliwości komunikacji radiowej z protokołem Thread.

- Układ scalony SMARTRange CA-8211 firmy Cascoda jest modemem z transceiverem [20]. Układ obsługuje transmisję w pasmie 2,4 GHz z protokołem IEEE 802.15.4-2006 and IEEE 802.15.4-2003. Układ zawiera koprocesor MAC z pełną automatyczną obsługą ramek transmisji. Umożliwia obsługę certyfikowanego stosu Thread na dołączonym procesorze zewnętrznym. Dostępne są sterowniki dla rdzeni ARM Cortex-A, ARM Cortex-M, MIPS interAptiv, MIPS microAptiv oraz systemów operacyjnych Linux, ARM mbed i Contiki. Układ ma certyfikację konsorcjum Thread Group [3].
- Kontroler komunikacyjny GP712 firmy Qorvo jest układem scalonym przeznaczonym do obsługi standardów ZigBee, ZigBee Pro i Thread [21]. Układ ma akcelerator AES-256 oraz interfejs SPI i UART. Może pracować jak odbiornik jednocześnie w trzech różnych kanałach z obsługą dwóch anten. Stos komunikacyjny pozwala na jednoczesną pracę w trzech sieciach PAN. Układ ma certyfikację konsorcjum Thread Group [3].
- Układ scalony MCR20A firmy NXP jest transceiverem [11]. Układ został dostosowany do obsługi protokołu Thread oraz innych protokołów jak SMAC, ZigBeePRO, RF4CE. Zawiera łącze komunikacyjne SPI pozwalające na łatwe dołączenie procesora użytkownika. Nietypową cechą układu MCR20A jest możliwość obsługi dwóch sieci PAN oraz możliwość automatycznego przełączania pomiędzy dwiema antenami.

Układy SoC (System on Chip)

Najbardziej istotną cechą układów scalonych dla Internetu Rzezy jest bezpieczeństwo, niski pobór mocy oraz maksymalne zintegrowanie funkcjonalności. To jest nie tylko komunikacja, zajmuje ona niewielką część powierzchni układu scalonego. Większość powierzchni zajmują układy peryferyjne przeznaczone do kompletnej obsługi systemu wbudowanego z wieloma czujnikami.

Wszystkie nowe układy scalone z obsługą protokołu Thread są typu SoC (System on Chip). We wszystkich układach zostały zastosowane rdzenie procesorowe rodziny ARM Cortex-M.

Rozwiązania organizacji układów scalonych oferowanych przez producentów są różne. Wydaje się, że wynika to z różnego przeznaczenia tych układów. Tak więc najbardziej rozbudowane układy scalone są: wielordzeniowe (multi core), z obsługą wielu protokołów komunikacyjnych (multi protocol) oraz dwuzakresowe (dual band). Przykładem jest układ SimpleLink CC1352R firmy Texas Instruments [4].

Rdzeń główny

Występuje bardzo duża rozpiętość maksymalnej częstotliwości zegarowej pracy rdzenia głównego: od 24 MHz do 128 MHz. Występuje też bardzo duża rozpiętość wielkości zastosowanej pamięci RAM i Flash. Typowo większość kodu oprogramowania firmowego jest umieszczana w pamięci ROM.

Rdzeń ARM Cortex-M4F

Jako rdzeń główny (aplikacyjny) układu SoC stosowany jest typowo rdzeń ARM Cortex-M4F. Umożliwia on wykonywanie obliczeń zmienoprzecinkowych oraz obliczeń sygnałowych. Wręcz jest on nazywany przez firmę ARM procesorem DSP (procesor sygnałowy). Zastosowano go w układach scalonych rodziny:

- Kinetis KW2xD (NXP) [16],
- Mighty Gecko EFR32MG (Silicon Laboratories) [7],
- SimpleLink CC2652R (Texas Instruments) [5],
- nRF52840 (Nordic Semiconductor) [9],
- QCA4020/24 (Qualcomm) [10],
- STM32WB55VG (ST Microelectronics) [14].

Rodzina Kinetis KW2xD Układy scalone rodziny Kinetis KW2xD firmy NXP ma zastosowany rdzeń ARM CortexM4F (50 MHz) z dużą pamięcią Flash 512 KB i RAM 64 KB [16].

- Układy obsługują protokół transmisji IEEE 802.15.4 w pasmie 2,4 GHz z protokołem Thread i ZigBee 3.0.
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do 8 dBm.
- Obsługa zewnętrznego wzmacniacza mocy (PA) lub wzmacniacza sygnału (LNA).
- Układy mają sprzętowy moduł kryptograficzny obsługujący algorytm DES, 3DES, AES, MD5, SHA-1 oraz SHA-256 oraz moduł obliczeń CRC.
- Każdy układ ma unikalny 128-bitowy numer identyfikacyjny.
- Układy pracują z napięciem zasilania od 1,8 V do 3,6 V.
- Układy mają certyfikację konsorcjum Thread Group [3].

Cechy unikalne:

- Możliwość automatycznego przełączania pomiędzy dwiema antenami do obsługi protokołu IEEE 802.15.4.
- Sprzętowe wspomaganie dwóch sieci (dual PAN) z protokołem IEEE 802.15.4 ze sprzętową obsługą adresów.

Firma udostępnia moduł uruchomieniowy Freedom Development Platform (FRDM-KW24DS512) oraz wtyczkę USB (USB-KW24D512) do uruchamiania sniffiera.

Układ QPG6095 Układ scalony QPG6095 firmy Qorvo ma zastosowany rdzeń ARM Cortex-M4F (40 MHz) z dużą pamięcią Flash do 512 KB i RAM do 64 KB [22].

- Układ obsługuje transmisję w pasmie 2,4 GHz z protokołem ZigBee 3.0, Thread oraz Bluetooth 5.
- Sprzętowy moduł obsługi komunikacji standardu IEEE 802.15.4 oraz osobny moduł obsługi BLE 5.
- Sprzętowy moduł kryptograficzny AES 128/256.
- Układ ma certyfikację konsorcjum Thread Group [3].

Cechy unikalne:

- Sprzętowe wspomaganie umożliwia jednoczesną pracę z komunikacją standardu BLE5 i Thread w trzech sieciach PAN z różnymi kanałami.

Rdzeń ARM Cortex-M3

Jako rdzeń główny użyto rdzenia ARM Cortex-M3 w układach dłuższej oferowanych na rynku jak RSL10 (ON Semi) [12], oraz EM358x i EM359x firmy Silicon Labs [6].

Rodziny EM358x i EM359x Układy scalone rodziny EM358x i EM359x firmy Silicon Labs mają zastosowany rdzeń ARM CortexM3 (24 MHz) z dużą pamięcią Flash 512 KB i RAM 64 KB [6].

- Układy obsługują protokół transmisji IEEE 802.15.4 w pasmie 2,4 GHz z protokołem Thread i ZigBee 3.0.
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do 8 dBm.
- Układy zawierają sprzętowy akcelerator AES-128 oraz moduł obliczeń CRC.
- Umożliwia pracę układu z napięciem zasilania od 2,1 V do 3,6 V.
- Układy mają certyfikację konsorcjum Thread Group [3].
- Układy scalone rodziny EM358x i EM359x różnią się rozmiarem obudowy z różną liczbą wyprowadzeń.

Rdzeń Arm Cortex-M0+

Jako rdzeń główny został zastosowany rdzeń ARM Cortex-M0+ tylko w jednym układzie scalonym Kinetis KW41Z firmy NXP [15].

Układ Kinetis KW41Z Układ scalony Kinetis KW41Z firmy NXP ma zastosowany rdzeń ARM Cortex-M0+ (48 MHz) z dużą pamięcią Flash 512 KB i RAM 128 KB [15].

- Układ obsługuje dwa protokoły transmisji Bluetooth Low Energy v. 4.2 oraz IEEE 802.15.4 z protokołem Thread oraz ZigBee 3.0 z możliwością ich jednoczesnej obsługi (z podziałem czasowym).
- Programowana moc wyjściowa w zakresie od -30 dBm do 3,5 dBm.
- Obsługa zewnętrznego wzmacniacza mocy (PA) lub wzmacniacza sygnału (LNA).
- Wystawia sygnał wyłączenia modułu radiowego co umożliwia sterowanie współpracą z modułem Wi-Fi.
- Układ ma sprzętowy akcelerator AES-128 oraz generator TRNG (True random number generator).
- Każdy układ ma unikalny 80-bitowy numer identyfikacyjny oraz unikalny 40-bitowy MAC adres.
- Układ zawiera wbudowaną przetwornicę DC-DC pracującą w trzech trybach: Buck, Boost i Bypass. Umożliwia to pracę układu z napięciem zasilania od 0,9 V do 4,2 V. Przy pracy w trybie Boost układ pracuje w zakresie napięć od 0,9 V do 1,795 V, co umożliwia zasilanie z jednej standardowej baterii.
- Układ może pracować z różnymi systemami RTOS z systemem FreeRTOS włącznie.
- Układ ma certyfikację konsorcjum Thread Group [3].

Cechy unikalne:

- Możliwość automatycznego przełączania pomiędzy dwiema antenami do obsługi protokołu IEEE 802.15.4
- Sprzętowe wspomaganie dwóch sieci (dual PAN) z protokołem IEEE 802.15.4 ze sprzętową obsługą adresów

Firma udostępniła moduł uruchomieniowy Freedom development board FRDM-KW41Z oraz wtyczkę USB do uruchamiania sniffiera.

Wersja układu MKW21Z obsługuje tylko protokół IEEE 802.15.4.

Drugi rdzeń

Wiele układów scalonych ma budowę dwurdzeniową. Drugi rdzeń pracuje niezależnie i typowo obsługuje komunikację bezprzewodową (procesor sieciowy). Najczęściej, jako drugi jest stosowany rdzeń ARM Cortex-M0 lub Cortex-M0+. Obsługa komunikacji jest realizowana programowo z kodem umieszczonym w pamięci ROM, z możliwością zastosowania kodu z pamięci Flash i rekonfigurowania radia, włącznie z własnym protokołem.

Układ RSL10 Układ scalony RSL10 firmy ON Semi ma zastosowany rdzeń ARM Cortex-M3 (48 MHz) z dużą pamięcią Flash 384 KB i RAM 194 KB [12].

- Układ obsługuje protokół transmisji IEEE 802.15.4 w paśmie 2,4 GHz z protokołem Thread i ZigBee 3.0. Programowana moc wyjściowa w zakresie do 6 dBm.
- Układ ma sprzętowy moduł kryptograficzny obsługujący algorytmy AES oraz moduł obliczeń CRC.
- Jako drugi rdzeń układ zawiera nietypowo rdzeń LPDSP32. Jest to rdzeń DSP przeznaczony do wykonywania złożonych obliczeń w czasie rzeczywistym. Umożliwia on realizowanie aplikacji o dużych wymaganiach obliczeniowych jak kodek audio.
- Wersja układu NCV-RSL10 (ON Semi) spełnia kwalifikację samochodową AEC-Q100 [13].

Układ QCA4020/24 Układ scalony QCA4020/24 firmy Qualcomm ma zastosowany rdzeń ARM Cortex-M4F (128 MHz) z dużą pamięcią Flash i RAM 300 KB [10].

- Układ zawiera osobny, drugi rdzeń dedykowany do obsługi standardów Bluetooth 5 oraz IEEE 802.15.4

- Trzeci osobny rdzeń jest przeznaczony do obsługi komunikacji w standardzie Wi-Fi (802.11a/b/g).
- Układ zapewnia bezpieczne bootowanie oraz sprzętowe wspomaganie algorytmów (np. ECC) i generator TRNG.
- Układ ma certyfikację konsorcjum Thread Group [3].

Układ jest przeznaczony raczej dla producentów urządzeń niż na rynek.

Trzeci rdzeń

Układy scalone rodziny SimpleLink CC13x2R/CC26x2R (Texas Instruments) [4-5] zawierają trzeci rdzeń Sensor Controller o bardzo małym poborze mocy. To wyjątkowe rozwiązanie służy do inteligentnej obsługi układów peryferyjnych, bez konieczności budzenia rdzenia głównego.

Układ SimpleLink CC1352R Układ scalony SimpleLink CC1352R firmy Texas Instruments jest układem trójrdzeniowym [4].

- Jako główny został zastosowany rdzeń ARM Cortex-M4F (48 MHz) z dużą pamięcią Flash do 352 kB i RAM do 256 kB.
- Jako drugi został zastosowany rdzeń ARM Cortex-M0 (48 MHz) dedykowany do obsługi modułu radiowego.
- Trzeci rdzeń Sensor Controller (24 MHz, 4 kB RAM) jest przeznaczony do autonomicznej obsługi układów peryferyjnych.
- Układ może pracować w dwóch pasmach: 2,4 GHz i w paśmie poniżej 1 GHz (Sub-1GHz) [S17, 18].
- Układ umożliwia transmisję z obsługą wielu protokołów: Bluetooth 5 Low Energy, IEEE 802.15.4g, 6LoWPAN, Thread, ZigBee, KNX RF, Wi-SUN oraz autorski protokół EasyLink [4].
- Układ zapewnia bezpieczne bootowanie oraz aktualizację oprogramowania poprzez radio.
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do +5 dBm (2,4 GHz) oraz +14 dBm (Sub-1GHz).
- Układ zawiera sprzętowy moduł kryptograficzny obsługujący algorytmy AES 128/256, SHA-2 (SHA-224/256/384/512), moduł obliczeń CRC, True Random Number Generator, sprzętowy akcelerator ECC oraz RSA Public Key.
- Układ może pracować z różnymi systemami RTOS z systemem FreeRTOS włącznie.
- Układu pracuje z napięciem zasilania od 1,8 V do 3,8 V.
- Jest także wersja układu CC1352P z dodatkowym wzmacniaczem mocy wyjściowej do +20 dBm.
- Obie wersje układu mają certyfikację konsorcjum Thread Group [3].

Cechy unikalne:

- Obsługa układów peryferyjnych przez trzeci rdzeń bez konieczności budzenia rdzenia głównego
- Układ scalony CC1352R ma osobne wyprowadzenia do obsługi transmisji w paśmie 2,4 GHz oraz w paśmie 868 MHz /915 MHz, co sugeruje możliwość jednoczesnej pracy w obu pasmach.

Migracja sprzętu

Bardzo ważnym zagadnieniem dla użytkownika jest migracja z dotychczas używanych układów do nowej wersji. Dotyczy to migracji rozwiązań sprzętowych oraz oprogramowania.

Dobrym rozwiązaniem jest kompatybilność układów scalonych nowej wersji z poprzednimi „nóżka w nóżkę”. Takie rozwiązanie oferuje (z małymi wyjątkami) nowa rodzina SimpleLink CC13x2R/CC26x2R wobec układów poprzedniej rodziny CC13x0/CC26x0 (Texas Instruments) [4-5] oraz rodzina nRF52 wobec nRF51 (Nordic Semiconductor) [9].

Zasilanie

Wszystkie układy scalone z obsługą protokołu Thread mają bardzo rozbudowane zarządzanie poborem mocy oraz rozbudowany

układ zasilania z przetwornicą DC/DC (np. rodzina nRF52 [9]). Wewnętrznie zasilanie jest podzielone na osobne strefy kluczowane programowo.

Bezpieczeństwo

Wszystkie układy scalone z obsługą protokołu Thread mają bardzo rozbudowane sprzętowe wspomaganie pracy dla wymagań bezpieczeństwa. Wszystkie układy zawierają moduł sprzętowego wspomagania szyfrowania AES-128 lub AES-256 oraz generator TRNG.

Na przykład układ scalony QCA4020 (Qualcomm) [10] udostępnia funkcje zabezpieczeń, do których należą: bezpieczny rozruch, szyfrowanie pamięci Flash, ochrona przed kopiowaniem, a także obsługa protokołu HTTPS oraz WPA/WPA2 w trybach z zabezpieczeniami Personal i Enterprise.

Zupełnie rewolucyjne rozwiązanie zastosowała firma Nordic Semiconductor w układach rodziny nRF52x [9].

- Układy rodziny nRF52x mają dedykowany moduł ARM TrustZone CryptoCell 310 cryptographic accelerator (coprocessor). Jest to kompletne rozwiązanie sprzętowo-programowe problemów bezpieczeństwa i kryptologii. Wydaje się to najbardziej rozwojowym podejściem do tych zagadnień.

Układy rodziny nRF52x (Nordic Semiconductor) [9] udostępniają również komunikację w standardzie NFC-A. Stos obsługi NFC pozwala na realizację parowania aplikacji Bluetooth z zastosowaniem techniki Out-of-Band (OOB). Ułatwia to proces uwierzytelniania dwóch urządzeń z komunikacją Bluetooth poprzez wymianę informacji uwierzytelniającej poprzez połączenie NFC.

Wzmacniacz mocy

Niektóre układy mają dodatkowo wzmacniacz mocy radiowej. Udostępniają one różny poziom mocy: +20 dBm (SimpleLink CC1352P, Texas Instruments [4]), +19 dBm (Mighty Gecko EFR32MG, Silicon Laboratories [7]) oraz +8 dBm (nRF52840, Nordic Semiconductor [9]).

Obsługa układów zewnętrznych

Niektóre układy scalone zawierają układy sprzętowe obsługi łącza USB (np. rodzina nRF52, Nordic Semiconductor [9]). Obsługa łącza USB bardzo ułatwia debugowanie oprogramowania oraz komunikację z nim. Jednak może wiązać się ze zwiększoną ceną jednostkową układu scalonego oraz zwiększonymi wymaganiami konstrukcyjnymi.

Czasami problemy z działaniem takiego układu scalonego są tak duże, że prowadzą do jego wycofania, jak to się stało z układem EM3598 (z obsługą USB, [6]), który nie jest zalecany do nowych konstrukcji.

Dużym ułatwieniem może być obsługa wyświetlacza LCD przez układ scalony (np. STM32WB55xx, ST [14]).

Układ STM32WB55VG Układ scalony STM32WB55VG firmy ST Microelectronics ma zastosowany rdzeń ARM Cortex-M4F (64 MHz) z dużą pamięcią Flash do 1 MB i RAM do 256 KB [14].

- Układ obsługuje dwa protokoły transmisji Bluetooth Low Energy 5 oraz IEEE 802.15.4 z protokołem Thread oraz ZigBee 3.0 z możliwością ich jednoczesnej obsługi (z podziałem czasowym).
- Jako drugi rdzeń układ ma rdzeń ARM Cortex-M0+ (32 MHz) dedykowany do obsługi modułu radiowego.
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do 6 dBm.
- Obsługa zewnętrznej wzmacniacza mocy (PA).
- Dwa akceleratory AES (AES hardware accelerator). Obsługują pracę z kluczami o długości 128 i 256 bitów z wieloma trybami pracy (ECB, CBC, CTR, GCM, GMAC, CCM) przy przetwarzaniu bloków danych 128 b i obsłudze algorytmów takich jak: RSA, Diffie-Helman, ECC over GF(p).

- Moduł obliczeń CRC oraz generator TRNG.
- Każdy układ ma unikalny 96-bitowy numer identyfikacyjny.
- Układ zapewnia bezpieczne bootowanie oraz aktualizację oprogramowania poprzez radio.
- Umożliwia pracę układu z napięciem zasilania od 1,71 V do 3,6 V.
- Długa lista układów peryferyjnych.
- Układ ma certyfikację konsorcjum Thread Group [3].

Cechy unikalne:

- Zawiera sterownik monochromatycznego pasywnego wyświetlacza LCD mającego do 4 wejść wspólnych oraz do 44 segmentów.
- Zawiera sterownik Touch sensing controller (TSC) do obsługi panelu dotykowego w technologii pojemnościowej.
- Niektóre wyprowadzenia układu tolerują wejściowe poziomy napięcia do 5 V przy typowym niskim napięciu zasilaniu układu scalonego.

Układ jest w fazie przedprodukcyjnej i zapowiadany jest niedaleki termin uruchomienia produkcji.

Aktualizacja poprzez radio

Wraz z powiększaniem się rozmiaru budowanych sieci Internetu Rzeczy oraz przy szybkim rozwoju oprogramowania bardzo istotnym zagadnieniem staje się aktualizacja oprogramowania. I to zarówno oprogramowania firmowego producenta układów scalonych (np. stosu komunikacyjnego), jak i oprogramowania użytkownika. Bardzo dobrym rozwiązaniem jest aktualizacja oprogramowania poprzez radio (Over The Air – OTA). Taką aktualizację oferują np. układy rodziny nRF52 (Nordic Semiconductor) [9], rodziny SimpleLink CC13x2R/CC26x2R (Texas Instruments) [4-5] oraz rodzina STM32WB55xx (ST) [14]).

Dodatkowe rozszerzenia

Istotnym czynnikiem decydującym o przydatności układu scalonego do konkretnego zastosowania może być obsługa dodatkowych rozszerzeń. Dwa takie udoskonalenia wydają się najbardziej istotne.

- Układy MCR20A [11], Kinetis KW41Z [15] oraz rodziny Kinetis KW2xD [16] firmy NXP oferują nietypową własność jednoczesnej obsługi dwóch sieci PAN. Mają one sprzętowe wspomaganie do samodzielnej obsługi dwóch adresów sieciowych z różnymi kanałami, pracą w sieci mesh oraz pracą jako koordynator w dwóch sieciach. Układ GP712 (Qorvo, [21]) obsługuje nawet pracę w trzech sieciach.
- Bardzo ciekawym rozszerzeniem możliwości pracy układu scalonego z obniżoną mocą jest funkcja Wake-on-Radio. Pozwala ona na przetwarzanie ramek radiowych przez sam moduł radiowy z detekcją ramek i rozpoznawaniem wzorców. Umożliwia to wybudzenie procesora tylko wtedy, gdy odebrana transmisja jest skierowana do niego. Taką własność oferują układy EFR32MG (Silicon Labs) [7].

Moduły uruchomieniowe

Projektowanie płytek drukowanych do pracy ze scalonymi układami radiowymi jest trudne i drogie. Dlatego bardzo ważna dla użytkownika jest dostępność modułów z tymi układami. Są ich trzy kategorie: zestawy uruchomieniowe, wtyczki USB oraz moduły produkcyjne. Jest jeszcze jedna kategoria – moduły IoT, ale nie udało się znaleźć żadnego z obsługą protokołu Thread.

Praktycznie każdy producent układów scalonych z obsługą standardu Thread oferuje zestaw uruchomieniowy dla produkowanych układów scalonych. Zestawy uruchomieniowe umożliwiają szybkie rozpoczęcie pracy z wybranym układem scalonym. Typowo są one dostarczane z zaprogramowaną aplikacją demonstracyjną pozwalającą na natychmiastową pracę „prosto z pudełka”. Razem z projektami

przykładowymi dostarczanymi przez producenta daje to możliwość łatwego rozpoczęcia praktycznej pracy z układem scalonym. Istotną własnością zestawu uruchomieniowego jest możliwość debugowania kodu w czasie rzeczywistym ze wspomaganiami sprzętowymi. Pożądaną cechą zestawu uruchomieniowego jest też dosyć niska cena, typowo w granicach \$ 30...\$ 50.

- Dobrym przykładem zestawu uruchomieniowego jest moduł startowy CC1352R Launch Pad (Texas Instruments) [17]. W module został zastosowany trzyrdzeniowy układ scalony CC1352R1F3 [4]. Zestaw jest przeznaczony do pracy w pasmach 868 MHz/915 MHz oraz 2,4 GHz z anteną wykonaną na płytce drukowanej. Na płytce zestawu jest emulator sprzętowy standardu XDS110 umożliwiający debugowanie w czasie rzeczywistym. Na złączach jest udostępnionych 26 wyprowadzeń wejścia-wyjścia (GPIO) układu scalonego CC1352R.
- Kolejnym przykładem jest zestaw uruchomieniowy nRF52840-DK [19] firmy Nordic Semiconductor z układem scalonym nRF52840 [9]. Zestaw jest kompatybilny ze standardem Arduino Uno Rev. 3. Umożliwia to zastosowanie wielu standardowych płytek rozszerzeń. Dodatkowe złącza dają dostęp do wszystkich 48 wyprowadzeń I/O układu scalonego. Płytkę zawiera antenę PCB oraz gniazdko antenowe. Na płytce jest także umieszczony sprzętowy debugger standardu Segger J-Link.

Wtyczki USB

Wtyczki USB składają się typowo z minimum elementów oprócz układu SoC. Mają za to niską cenę, za którą udostępniają prawie pełną funkcjonalność zainstalowanego układu SoC. Największą zaletą wtyczki jest możliwość pracy jako sniffer, do podglądania na bieżąco ruchu radiowego z różnymi protokołami, w tym Thread. Typowo wtyczki pracują z programem Wireshark. Wtyczki USB oferują producenci układów SoC, ale też niezależni wytwórcy.

- *nRF52840 Dongle* (PCA10059) [19] jest tanią (\$ 10) wtyczką USB produkcji firmy Nordic Semiconductor z układem scalonym nRF52840 [9]. Wtyczka pracuje bezpośrednio z aplikacją *nRF Connect for Desktop* [S23]. Pracuje ona na komputerze i komunikuje się z wtyczką poprzez USB. Tym łączem też można programować procesor płytki. Sama płytka nie zawiera układu sprzętowego debugera. W celu debugowania należy dołączyć zewnętrzny debugger (Segger) do złącza debugowego na płytce. Wersja oprogramowania snifera dla tej (nowej) wtyczki jest jeszcze w trakcie przygotowywania (luty 2019).
- Kolejne wtyczki są oferowane przez firmę NXP: wtyczka USB (USB-KW24D512) z układem scalonym z rodziny Kinetis KW2xD [16] oraz wtyczka z układem scalonym Kinetis KW41Z firmy NXP [15].
- Wtyczka *USB dongle* z układem scalonym STM32WB55CG [14] jest oferowana w zestawie uruchomieniowym P-NUCLEO-WB55 firmy ST Microelectronics.

Moduły produkcyjne

Moduły produkcyjne umożliwiają zastosowanie wybranego układu scalonego w projekcie produkcyjnym. Ma to bardzo duże znaczenie wobec wymagania certyfikatu zgodności układu radiowego z wymaganiami, np. Unii Europejskiej. Moduł produkcyjny jest gotowy do dołączenia bezpośrednio do własnego projektu, bez konieczności znajomości zagadnień projektowania układów radiowych.

Moduły produkcyjne mogą być oferowane przez producenta układu scalonego, ale typowo są one też produkowane przez innych dostawców (3rd Party). Jest to bardzo istotna dziedzina, która może decydować o popularności układu scalonego na rynku. Listy modułów należy szukać na portalach producentów układów scalonych.

- Dobrym przykładem jest mały 12,9×15×2.0 (mm) i tani (\$ 7,98) firmowy moduł MGM12P [8] z dwuzakresowym procesorem rodziny Mighty Gecko EFR32MG (Silicon Laboratories) [7]. Moduł MGM12P ma certyfikację konsorcjum Thread Group [3].
- Moduł KTWM102 firmy Kirale Technologies ma postać płytki drukowanej do montażu SMD [23]. Płytkę zawiera układ scalony SAM R21 firmy Microchip z rdzeniem ARM Cortex-M0+ (48 MHz) oraz pamięcią Flash 256 KB i RAM 32 KB [xx]. Firma oferuje oprogramowanie Real-Time Network Operating System (KiNOS) ze stosem Thread. Zarówno moduł KTWM102, jak i system KiNOS ma certyfikację konsorcjum Thread Group [3].
- Moduł PAN4620 firmy Panasonic Industry Europe z układem scalonym KW41Z (NXP, [15]) jest kolejnym modułem przemysłowym z możliwością jednoczesnej obsługi komunikacji z protokołami Thread i BLE.
- Jest wielu producentów modułów produkcyjnych z układem scalonym nRF82540 (Nordic Semiconductor). Na przykład małe (10,5×15,5×2,2 mm) i tanie (\$ 10) moduły produkcyjne firmy Raytec (Chiny) są dostępne w trzech wariantach: z anteną chipową, anteną PCB lub z gniazdkiem.

Oprogramowanie

Tworzenie oprogramowania jest obecnie największą częścią wydatków projektowych. Dlatego istotna jest możliwość wyboru komponentów środowiska programowego przez projektanta oprogramowania, np. wybór kompilatora (np. GCC) lub całego środowiska programowego.

- Układy scalone rodziny SimpleLink CC13x2R/CC26x2R (Texas Instruments) [4-5] są obsługiwane w ramach platformy SimpleLink. Dostarcza ona moduły sprzętowe, środowisko programowe Code Composer Studio (CCS), dedykowane pakiety programowe Software Development Kit z systemem operacyjnym czasu rzeczywistego TI-RTOS i bibliotekami oraz wtyczki (Plugin) do CCS z oprogramowaniem aplikacyjnym (np. rozpoznawanie głosu). Do programowania rdzenia Sensor Controller układu SoC służy środowisko programowe Sensor Controller Studio. Do programowania parametrów pracy układu radiowego z rdzeniem ARM Cortex-M0 służy środowisko programowe SmartRF Studio. Możliwa jest praca ze środowiskiem CCS lub IAR Embedded Workbench.
- Układy rodziny nRF52 (Nordic Semiconductor) [9] są obsługiwane przez środowisko programistyczne nRF52 SDK w parze ze stosami protokołów komunikacyjnych. Środowisko programistyczne nRF52 SDK jest zbudowane z zastosowaniem standardu ARM CMSIS. Umożliwia to zastosowanie przez użytkownika różnych ścieżek tworzenia kodu wynikowego: SEGGER Embedded Studio, Keil MDK-ARM, GCC, IAR Embedded Workbench. Firmowy pakiet zawierający certyfikowany stos protokołu Thread 1.1 ma nazwę „nRF5 SDK for Thread”. Cennym uzupełnieniem jest aplikacja „Thread Topology Monitor”.

Bardzo ważną cechą środowiska programowego jest pełna (lub prawie) kompatybilność nowych wersji oprogramowania firmowego z poprzednimi. Dla rodziny SimpleLink CC13x2R/CC26x2R (Texas Instruments) [4-5] oraz rodziny nRF52 (Nordic Semiconductor) [9] firmy oferują takie rozwiązanie. Co więcej, jest też deklaracja pełnej 100% zgodności programowej kodu w ramach układów rodziny.

System RTOS

Kolejnym istotnym zagadnieniem tworzenia oprogramowania dla Internetu Rzeczy jest użycie systemu operacyjnego czasu rzeczywistego (RTOS – Real Time Operating System). Przy zastosowaniu

skomplikowanego układu scalonego użycie systemu RTOS wydaje się koniecznością. Przy odpowiednim zaprojektowaniu oprogramowania użycie systemu RTOS daje prawie wyłącznie korzyści. Jeśli producent układu scalonego dostarcza własny system RTOS, to staje się on systemem pierwszego wyboru. Typowo zapewnia on tworzenie optymalnego kodu użytkowego z pełnym wykorzystaniem możliwości dostarczanych przez układ scalony. Powstaje jednak problem tworzenia kodu przenośnego. Rozwiązaniem dostarczanym przez firmę Texas Instruments dla rodziny SimpleLink CC13x2R/CC26x2R (Texas Instruments) [4-5] jest zastosowanie API standardu POSIX i wybór pomiędzy darmowym, firmowym (dedykowanym) systemem TI-RTOS lub darmowym, standardowym systemem FreeRTOS.

Podobnie firma Nordic Semiconductor dla rodziny nRF52 [9] wspiera zastosowanie systemu operacyjnego Zephyr oraz FreeRTOS. Wsparcie dla systemu FreeRTOS jest też dostarczane dla układów Kinetis KW41Z (NXP [15]).

Podsumowanie

Dla rozwoju Internetu Rzeczy bardzo ważna jest dostępność kompletnych modułów IoT z komunikacją radiową i zestawem czujników. Jest

kilka modułów IoT pracujących z protokołem Bluetooth Low Energy. Ale na razie nie ma modułów IoT pracujących z protokołem Thread.

Obecnie nie ma oferowanych układów scalonych SoC z nowym rdzeniem ARM Cortex-M3x z technologią Arm TrustZone oraz Arm CryptoCell. Pojawienie się ich wydaje się tylko kwestią czasu.

W ostatnim czasie nastąpił olbrzymi rozwój darmowego systemu operacyjnego czasu rzeczywistego Zephyr, przeznaczonego dla układów IoT. System w naturalny sposób pracuje z darmowym stosem OpenThread. Zapowiada to spore zmiany na rynku i skokowe powiększenie oferty.

Dodatkowo, deklarowane na pierwszą połowę roku 2019 rozszerzenie specyfikacji protokołu Thread na pasmo Sub-1GHz może okazać się początkiem sukcesów tego protokołu na dużą skalę. Większość układów scalonych do pracy w pasmie Sub-1GHz obsługuje standard IEEE 802.15.4, będący podstawą protokołu Thread [S20]. Adaptacja tych układów do pracy z protokołem Thread może być łatwa i szybka.

Czy czeka nas nowa rewolucja na miarę sukcesu standardu Bluetooth Low Energy?

Henryk A. Kowalski
Instytut Informatyki
Politechnika Warszawska

Wybrane pozostałe artykuły kursu „Systemy dla Internetu Rzeczy”

- [S12] Oprogramowanie narzędziowe dla układów CC26xx i CC13xx platformy SimpleLink, 11/2017
- [S13] Zestaw CC26x2R1 LaunchPad, 1/2018
- [S14] Podglądanie ruchu w sieci radiowej z protokołem IEEE 802.15.4, 2/2018
- [S15] Zestaw CC1352R1 LaunchPad, 5/2018
- [S17] Jednoczesna komunikacja radiowa z użyciem dwóch protokołów i w dwóch pasmach, 8/2018
- [S18] Praca z jednoczesną komunikacją radiową z użyciem dwóch protokołów i w dwóch pasmach, 9/2018
- [S20] Sieć z protokołem Thread, 11/2018
- [S23] Wtyczka nRF52840 Dongle, 2/2019

Literatura

- [1] Thread Group, <http://bit.ly/2CXYHGp>
- [2] An open foundation for the connected home, <http://bit.ly/2ySPWwG>
- [3] Thread certified products, Thread Group, <http://bit.ly/2UDCFtk>
- [4] CC1352R SimpleLink Multi-Band CC1352R Wireless MCU, Product Page, Texas Instruments, <http://bit.ly/2vJkmqm>
- [5] CC2652R SimpleLink(TM) CC2652R Multi-Standard Wireless MCU, Product Page, Texas Instruments, <http://bit.ly/2yVwDGz>
- [6] EM358x and EM359x System-on-Chips (SoCs) and Networking Co-Processors for Zigbee and Thread, Silicon Labs, <http://bit.ly/2VQFB2k>
- [7] EFR32 Mighty Gecko Mesh Networking Wireless SoCs for Zigbee and Thread, Silicon Labs, <http://bit.ly/2JYgB39>
- [8] Mighty Gecko MGM12P Module for Zigbee and Thread, <http://bit.ly/2ZeOULi>
- [9] nRF52840 High-end Bluetooth 5/Thread/802.15.4/ANT/2.4GHz multiprotocol SoC, Nordic Semiconductor, <http://bit.ly/2r29E8H>
- [10] QCA4024 SoC, Qualcomm, <http://bit.ly/2HvtRep>
- [11] MCR20A: 2.4 GHz 802.15.4 Wireless Transceiver, NXP, <http://bit.ly/2KDgpuV>
- [12] RSL10: Radio SoC, Bluetooth 5 Certified, ON Semi, <http://bit.ly/2FjuVzU>
- [13] NCV-RSL10: Radio SoC, Ultra-Low-Power Multi-protocol Bluetooth 5 Certified for Automotive, ON Semi, <http://bit.ly/2HUXSrl>
- [14] STM32WB55VG (Preview) Ultra-low-power dual core Arm Cortex-M4 MCU 64 MHz, Cortex-M0 32MHz with 1 Mbyte Flash, BLE, 802.15.4, USB, LCD, AES-256, ST Microelectronics, <http://bit.ly/2r0xZvK>
- [15] KW41Z: Kinetis KW41Z-2.4 GHz Dual Mode: Bluetooth® Low Energy and 802.15.4 Wireless Radio Microcontroller (MCU) based on Arm Cortex-M0+ Core, NXP, <http://bit.ly/2Z5Zfsw>
- [16] KW2xD: Kinetis KW2xD-2.4 GHz 802.15.4 Wireless Radio Microcontroller (MCU) based on Arm Cortex-M4 Core, NXP, <http://bit.ly/2ZdHPLe>
- [17] SimpleLink Multi-Band CC1352R Wireless MCU LaunchPad Development Kit, LAUNCHXL-CC1352R1, Texas Instruments, <http://bit.ly/210oP99>
- [18] nRF52840 Dongle (PCA10059), Nordic Semiconductor, <http://bit.ly/2TO1E83>
- [19] nRF52840-DK, Nordic Semiconductor, <http://bit.ly/2PdZzRZ>
- [20] CA-8211 SMARTRange, Cascoda, <http://bit.ly/2v4uGWZ>
- [21] GP712, Qorvo, <http://bit.ly/2ImRieO>
- [22] QPG6095, Qorvo, <http://bit.ly/2GfMaon>
- [23] KTWM102 RF Modules, Kirale, <http://bit.ly/2GjvAc>

REKLAMA

www.ep.com.pl