

Układy scalone z obsługą Bluetooth 5

Internet Rzeczy (IoT) jest najszybciej rozwijającym się działem elektroniki. Jednym z najważniejszych zagadnień Internetu Rzeczy jest komunikacja bezprzewodowa. Pośród wielu stosowanych protokołów komunikacyjnych coraz większe znaczenie nabiera protokół Bluetooth. W ostatnich latach następuje szybki rozwój tego protokołu, aż do najnowszej wersji Bluetooth 5. Dzięki temu uwzględnia on, a nawet powoduje, gwałtowny rozwój sprzętowych rozwiązań komunikacji radiowej. Generalnie, nie można tego powiedzieć o innych protokołach.

Zestawienie układów scalonych z obsługą protokołu Bluetooth 5 umieszczono w **tabeli 1**. Zaprezentowane układy scalone są w fazie produkcyjnej, przedprodukcyjnej, planowanej produkcji lub zapowiedzi produkcji. Dla układów produkowanych i dostępnych do zakupu została podana cena pojedynczego układu (w witrynie DigiKey). Dla innych układów podano dostępne informacje o planach. Podano też cenę układu uruchomieniowego (oznaczenie /EVAL/), jeśli jest dostępny. Niektóre układy oprócz modelu podstawowego mają istotne warianty. Zostały one pokazane w nawiasach klamrowych „{}”.

Zestawienie zostało wykonane na podstawie informacji uzyskanych z Internetu i nie stanowi pełnego przeglądu układów ani kompletnej

prezentacji ich cech. W zalewie układów scalonych obsługujących poprzednie wersje protokołu Bluetooth bardzo trudno jest wyłowić układy z obsługą protokołu Bluetooth 5.

Wynik poszukiwań jest sporym zaskoczeniem. Układów z obsługą komunikacji ze standardem Bluetooth 5 nie oferują takie firmy jak Cypress, Renesas, Panasonic, Fujitsu i Toshiba. Dalej używany jest standard Bluetooth v4.2. Również najnowsza wersja najbardziej popularnego komputera jednopłytkowego Raspberry Pi 3 B+ obsługuje „tylko” standard Bluetooth v4.2/ BLE.

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

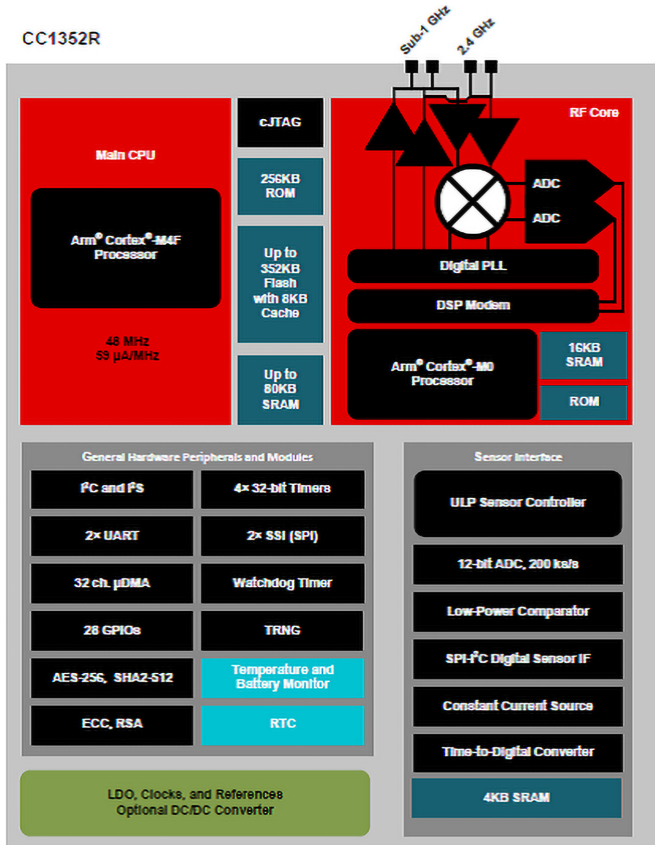
Bluetooth 5

Prace nad nową wersją protokołu Bluetooth były prowadzone bardzo szybko. Opublikowanie wstępnej wersji specyfikacji (2016) spotkało się z pojawieniem się na rynku układów scalonych „Bluetooth 5 ready”. W roku 2017 opublikowanie pełnej specyfikacji protokołu Bluetooth 5 spowodowało poszerzenie oferty. Kilka firm oferuje produkowane obecnie układy scalone z pełną obsługą protokołu Bluetooth 5. Kolejne firmy hucznie zapowiadają ich produkcję, lub prezentują nowe rozwiązania, ostatnio 27.02.2018 na „Embedded

Tabela 1. Układy scalone z obsługą standardu Bluetooth 5

Układ	Firma	Produkcja /EVAL/	2,4 GHz Standardy	Sub 1 GHz Standardy	Flash	RAM	GPIO	Rdzenie	Sprzętowe wspomaganie bezpieczeństwa
CC1352R [2] {CC1352P} SimpleLink	Texas Instruments	pre prod. \$4.73 (1 ku) /\$39.99/	*Bluetooth 5 LE (AE, HS, LR, {PA +20 dBm}), *IEEE 802.15.4g, Zigbee, Thread, prop	IEEE 802.15.4g, 6LOWPAN, KNX RF, Wi-SUN, M-bus, prop	352 kB	80 kB	28	*Cortex-M4F (48 MHz), *Cortex-M0 (48 MHz) *Sensor Controller (24 MHz, RAM 4 kB), jak wyżej	AES-256, ECC, RSA-20148, SHA2 (up to SHA-256), True Random Number Generator (TRNG)
CC2642R [4] SimpleLink	Texas Instruments	pre prod. \$2.65 (1 ku) /\$39.99/	*Bluetooth 5 LE (AE, HS, LR)	-	352 kB	80 kB	31	jak wyżej	jak wyżej
CC2652R [5] SimpleLink	Texas Instruments	pre prod. \$3.05 (1 ku) /\$39.99/	*Bluetooth 5 LE (AE, HS, LR), *IEEE 802.15.4g, Zigbee, Thread, prop	-	352 kB	80 kB	31	jak wyżej	jak wyżej
CC2640R2F [3] {CC2640R2F-Q1 [14]} SimpleLink	Texas Instruments	prod. \$5.33 /\$30/	*Bluetooth 5 LE (CER, AE, HS, LR), prop {Automotive Qualified, AEC-Q100}	-	128 kB	28 kB	31	*Cortex-M3 (48 MHz), *Cortex-M0 (48 MHz) *Sensor Controller (24 MHz, RAM 2 kB), AES-128, True Random Number Generator, Elliptic Curve Cryptographic (ECC) algorithm, SHA256	
DA14585 [6] {DA14586} SmartBond	Dialog Semiconductor	prod \$3 /\$4.25/	*Bluetooth 5 LE	-	64 kB OTP {2 MB}	96 kB		*Cortex-M0 (16 MHz) (*Audio Processing Unit)	AES-128
EFR32BG13 [7] Blue Gecko	Silicon Laboratories	prod \$8 /\$49/	*Bluetooth 5 LE (Mesh {PA +19 dBm}) *IEEE 802.15.4, M-Bus	IEEE 802.15.4g, SUN-FSK PHY	512 kB	54 kB	31	*Cortex-M4F (40 MHz)	AES 128/256, SHA-1, SHA-2 (SHA-224 and SHA-256), ECC, True Random Number Generator
QN9080 [11] {QN9083}	NXP	Prod \$6 /3.85/	*Bluetooth 5 LE (NC, HS),	-	512 kB	128 kB	35 {28}	*Cortex-M4F (32MHz)	AES-128, True Random Number Generator (TRNG), CRC engine
K32W042 [8] Kineticis	NXP	prezentacja 27.02.2018	*Bluetooth 5 LE (HS) *IEEE 802.15.4, Thread, Zigbee,	-	1.25 MB	384 kB		*Cortex-M4F (72 MHz), *Cortex-M0+ (72 MHz)	AES, DES, SHA, RSA, ECC, TRNG
nRF52810 nRF52832 {nRF52840 [9]}	Nordic Semiconductor	prod \$7.4 /\$49/	*Bluetooth 5 LE (CER, AE, NC, HS, Mesh {LR},{PA +8 dBm}), ANT {*IEEE 802.15.4g, Zigbee, Thread}, prop	-	192kB 512kB {1MB}	24kB 64kB {256kB}	48	*Cortex-M4F (64 MHz)	ARM CryptoCell 310 cryptographic accelerator, secure boot, secure erase, NFC-A
QCA4024 [10] {QCA4020}	Qualcomm	prod €6.79 /€10.19/	*Bluetooth 5 LE *IEEE 802.15.4, Thread, Zigbee, {*dual-band WiFi (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
RS10 [12] {NCV-RS10 [15]}	ON Semi	prod \$7.56 /\$50/	*Bluetooth 5 LE (CER, NS, HS), {PA +6(3) dBm}) *IEEE 802.15.4g, Thread, Zigbee, prop {Automotive Qualification, AEC-Q100, Ready Q2/18}	-	384 kB	194 kB	{16}	*Cortex-M3 (48 MHz), *LPDSP32 (72 MHz)	AES-128, CRC polynomial
STM32WB55VG [13]	ST Microelectronics	Probki inż. 1 kw. 2018	*Bluetooth 5 LE (HS) *IEEE 802.15.4, Thread, Zigbee	-	1 MB	256 kB	72	*Cortex-M4F (64 MHz), *Cortex-M0+ (32 MHz)	AES-256, PCROP, JTAG Fuse, PKA, RSS

FUNKcjONALNOŚCI STANDARDU BLUETOOTH 5: AE – ADVERTISING EXTENSION, NC – NETWORK COEXISTANCE, HS – HIGH SPEED 2MBPS, LR – LONG RANGE, PA – POWER AMPLIFIER, MESH – BLUETOOTH MESH, CER – SIG CERTIFIED



Rysunek 1. Schemat blokowy procesora SimpleLink CC1352R, Texas Instruments [5].

World 2018” w Norymberdze. Standard Bluetooth 5 jest wstecznie kompatybilny z wcześniejszymi wersjami Bluetooth v4.0/4.1/4.2 LE. Standard Bluetooth 5 wprowadza nowe funkcjonalności:

1. Long Range (LR) – zasięg został zwiększony czterokrotnie.
2. High Speed (HS) – dwukrotnie zwiększono przepustowość (do 2 Mbps).
3. Advertising Extensions (AE) – ośmiokrotnie zwiększono rozmiar wiadomości aktywacyjnej.
4. Power Amplifier (PA) – Podwyższony poziom mocy do +20 dBm.
5. Network Coexistence (NC) – aktualizacje poprawiające współistnienie z innymi standardami komunikacji bezprzewodowej.

Informacja o zgodności układu scalonego ze standardem Bluetooth 5 nie oznacza, że dostępne są wszystkie nowe funkcjonalności. Niektórzy producenci podają informację o pełnej zgodności ze standardem Bluetooth 5 oraz o certyfikacji przez konsorcjum SIG.

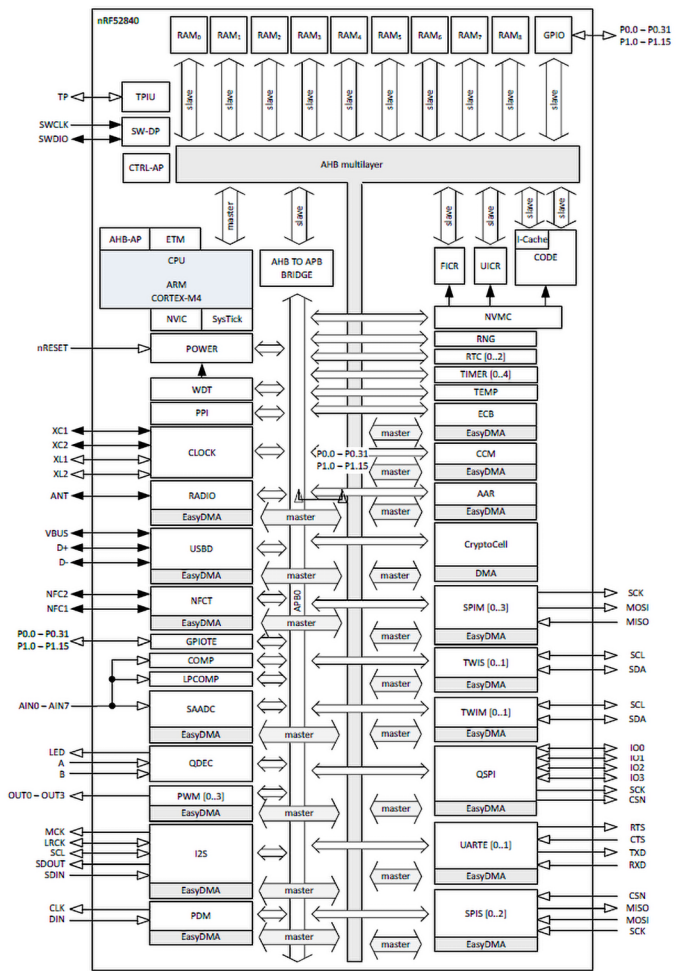
Bluetooth Mesh

W czerwcu 2017 konsorcjum SIG opublikowało pierwszą specyfikację standardu sieci Bluetooth Mesh dla układów BLE. Ten standard jest zgodny ze standardem Bluetooth 5 oraz Bluetooth 4.x. Trzeba jednak zauważyć, że specyfikacja sieci Bluetooth Mesh jest zdefiniowana osobno od specyfikacji rdzenia BLE i nie jest częścią standardu Bluetooth 5.

Ocenia się, że zastosowanie sieci Bluetooth w konfiguracji Mesh może mieć bardzo istotne znaczenie dla rozwoju Przemysłowego Internetu Rzeczy (IIoT).

Firma Nordic Semiconductor dostarcza środowisko programistyczne nRF5 SDK for Mesh, które pozwala na realizację systemów typu Bluetooth Mesh z użyciem układów serii nRF52 [9]. Przykład sieci Bluetooth Mesh zbudowanej z modułów BT832 (Fanstel) [16] z układami scalonymi tej serii został pokazany na rysunku tytułowym.

Również firma Silicon Laboratories dostarcza oprogramowanie do pracy sieci Bluetooth Mesh dla układów dwuzakresowych Blue Gecko EFR32BG13 [7].



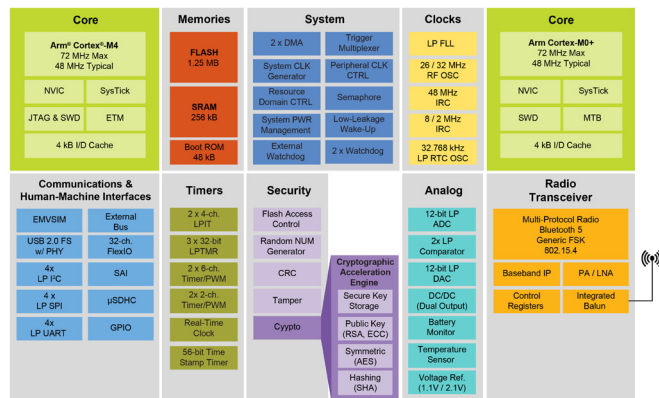
Rysunek 2. Schemat blokowy procesora nRF52840, Nordic Semiconductor [9]

Firma ST Microelectronics zapowiada obsługę sieci Bluetooth Mesh dla układów STM32WB55VG (ST Microelectronics) [13]. Podobnie Texas Instruments dla układów serii SimpleLink CC13x2R/CC26x2R [2-5].

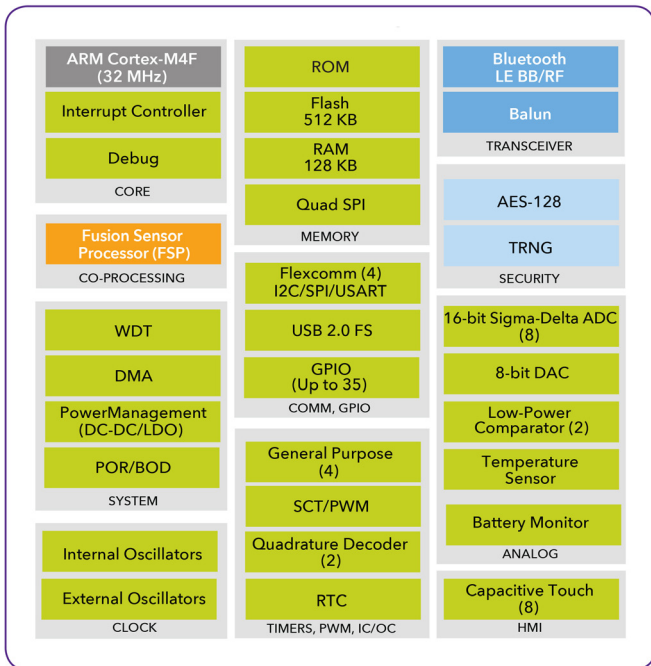
IEEE 802.15.4

Wiele układów scalonych oprócz obsługi protokołu Bluetooth 5 może w paśmie 2,4 GHz pracować także z komunikacją w standardzie IEEE 802.15.4. Umożliwia to dodatkową obsługę różnych protokołów: Zigbee, Thread, Wireless M-Bus, ANT oraz protokołów autorskich (proprietary). Przykładem może być układ CC2652R2 (Texas Instruments) [5] obsługujący te protokoły.

Układy serii nRF52x (Nordic Semiconductor) [9] umożliwiają dodatkowo jednoczesną transmisję w sieciach Bluetooth 5 i Thread. Zapewnia to mechanizm Dynamic Multiprotocol z obsługą stosów



Rysunek 3. Schemat blokowy procesorów platformy K32W0X, NXP [8]



Rysunek 4. Schemat blokowy procesorów platformy QN908x, NXP [11]

S140 v5 SoftDevice oraz OpenThread RF. Inni producenci też zapowiadają możliwość równoczesnej transmisji z protokołem Bluetooth 5 oraz innym standardem: STM32WB55VG (ST Microelectronics) [13], K32W042 (NXP) [8] (rys. 3).

Praca dwuzakresowa

Dwóch 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.

Dwuzakresowy procesor Blue Gecko EFR32BG13 (Silicon Laboratories) [7] jest już w produkcji i dostępny za rozsądną cenę. Drugi układ

scalony SimpleLink CC1352R (Texas Instruments) [2] jest w fazie przedprodukcyjnej. Ale dostępne są próbki układów z serii przedprodukcyjnej o oznaczeniu XCC1352R1F3. Jest to zaawansowana wersja PG1.1. Jednak wersja z pełną kwalifikacją produkcyjną jest zapowiedziana na początek roku 2019. Układ scalony CC1352R ma osobne wyprowadzenia dla obsługi transmisji w paśmie 2,4 GHz oraz w paśmie 868 MHz/915 MHz. Co sugeruje możliwość jednoczesnej pracy w obu pasmach. Schemat blokowy tego układu pokazano na rysunku 1.

Układ scalony (QCA4020, Qualcomm) [10] umożliwia, oprócz komunikacji w standardzie Bluetooth, komunikację w standardzie WiFi (802.11a/b/g) w dwóch zakresach 2,4 GHz oraz 5 GHz. Realizowane jest to poprzez zastosowanie osobnego rdzenia sprzętowego.

Układy SoC (System on Chip)

Najbardziej istotną cechą układów scalonych dla Internetu Rzeczy 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. Dla kompletnej obsługi systemu wbudowanego z wieloma czujnikami.

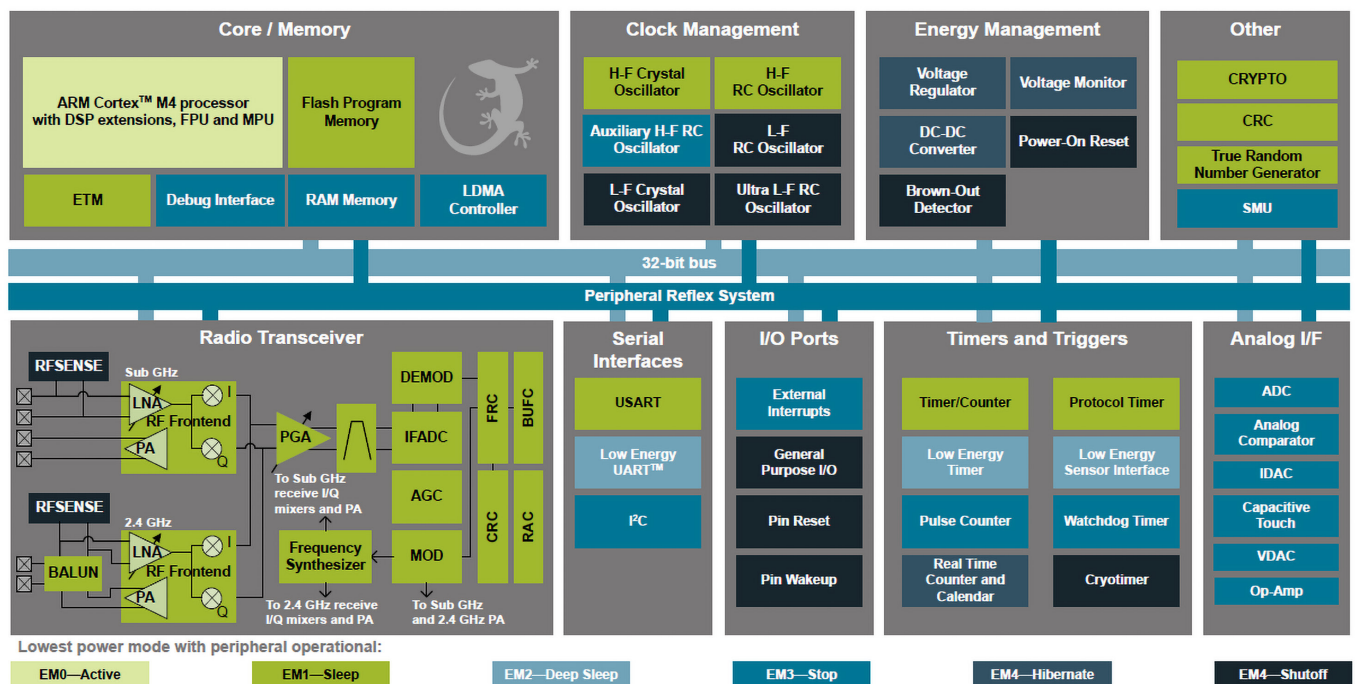
Wszystkie układy scalone z obsługą protokołu Bluetooth 5 są typu SoC (System on Chip). We wszystkich układach zostały zastosowane rdzenie procesorowe rodziny ARM Cortex-M.

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 najnowszy układ SimpleLink CC1352R firmy Texas Instruments [2] (rys. 1).

Rdzeń główny

Jako rdzeń główny (aplikacyjny) stosowany jest typowo rdzeń ARM Cortex-M4F. Umożliwia on wykonywanie obliczeń zmiennoprzecinkowych oraz obliczeń sygnałowych. Wręcz, jest on nazywany przez firmę ARM jako procesor DSP (procesor sygnałowy).

Jako rdzeń główny użyto rdzenia ARM Cortex-M3 tylko w układach: RSL10 (ON Semi) [12] (rys. 7) oraz SimpleLink CC2640R2 (Texas Instruments) [3]. Są to układy obecne dłużej na rynku. W nowszej wersji układu SimpleLink CC2642R (Texas Instruments) [4] został



Rysunek 5. Schemat blokowy procesora Blue Gecko EFR32BG13, Silicon Laboratories [7]

zastosowany już rdzeń ARM Cortex-M4F. W jednym układzie użyto rdzenia ARM Cortex-M0 (DA14585/14586, Dialog Semiconductor) [6] (rys. 6). Ale jest on bardzo nietypowy, przeznaczony do elektroniki ubraniowej.

Występuje bardzo duża rozpiętość maksymalnej częstotliwości zegarowej pracy rdzenia głównego: od 16 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. Jeden układ (DA14585, Dialog Semiconductor) [6] nie posiada pamięci Flash a jedynie pamięć OTP (One Time Programming) jednokrotnego programowania. W ogóle, jest to nietypowy układ dedykowany do rozwiązań elektroniki ubraniowej o bardzo małym poborze mocy. A mimo to ma wbudowany moduł sprzętowy obsługi audio.

Następne rdzenie

Większość układów scalonych jest wielordzeniowa. Drugi rdzeń pracuje niezależnie i typowo obsługuje komunikację bezprzewodową. 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.

W jednym układzie scalonym (RSL10, ON Semi) [12] (rys. 7) oprócz głównego rdzenia ARM Cortex-M3 został zastosowany 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.

W jednym układzie (QCA4020/24, Qualcomm) [10] (rys. 8) został zastosowany osobny rdzeń dedykowany dla obsługi standardów Bluetooth 5 oraz IEEE 802.15.4. Oraz dodatkowy, osobny rdzeń, do obsługi komunikacji w standardzie WiFi (802.11a/b/g).

Układy scalone rodziny SimpleLink CC13x2R/CC26x2R (Texas Instruments) [2-5] posiadają trzeci rdzeń Sensor Controller (rys. 1) o bardzo małym poborze mocy. To wyjątkowe rozwiązanie służy do inteligentnej obsługi układów peryferyjnych. Bez konieczności budzenia rdzenia głównego.

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 seria SimpleLink CC13x2R/CC26x2R wobec układów poprzedniej serii CC13x0/CC26x0 (Texas Instruments) [2-5] oraz seria nRF52x wobec nRF51 (Nordic Semiconductor) [9].

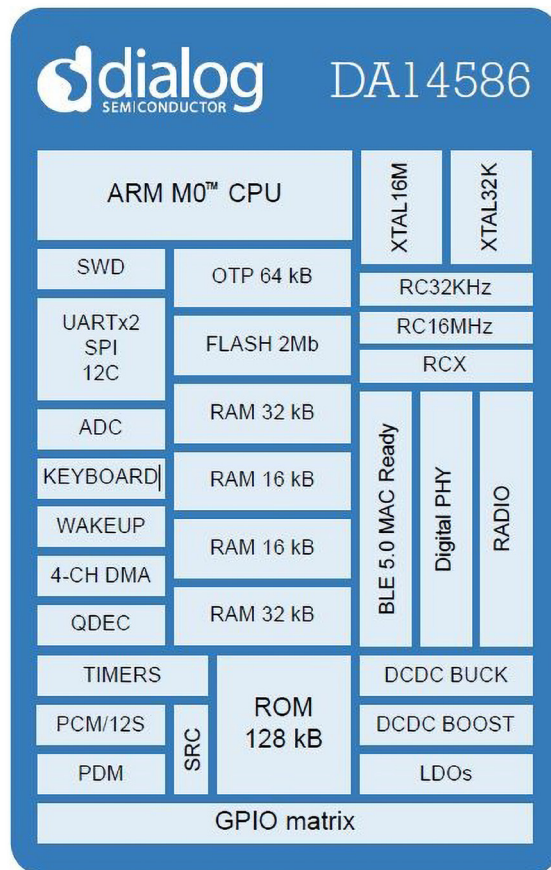
Zasilanie

Wszystkie układy scalone z obsługą protokołu Bluetooth 5 mają bardzo rozbudowane zarządzanie poborem mocy oraz posiadają rozbudowany układ zasilania z przetwornicą DC/DC (np. seria nRF52) [9]. Wewnętrznie są podzielone na osobne strefy zasilania kluczowane programowo.

Bezpieczeństwo

Wszystkie układy scalone z obsługą protokołu Bluetooth 5 mają bardzo rozbudowane sprzętowe wspomaganie pracy dla wymagań bezpieczeństwa. Wszystkie układy posiadają moduł sprzętowego wspomaganie 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.



Rysunek 6. Schemat blokowy procesora SmartBond DA14586, Dialog Semiconductor [6]

Zupełnie rewolucyjne rozwiązanie zastosowała firma Nordic Semiconductor w układach serii nRF52x [9] (rysunek 2).

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

Układy serii 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) [2], +19 dBm (Blue Gecko EFR32BG13, Silicon Laboratories) [7] (rysunek 5) oraz +8 dBm (nRF52840, Nordic Semiconductor) [9].

Kwalifikacja samochodowa

Niektóre układy spełniają kwalifikację samochodową AEC-Q100, jak CC2640R2F-Q1 (Texas Instruments) [14] oraz NCV-RSL10 (ON Semi) [15].

Obsługa układów zewnętrznych

Niektóre układy scalone posiadają układy sprzętowe obsługi łącza USB – seria nRF52 [9] i QN9080 (NXP) [11] (rys. 4) lub wyświetlacza LCD – STM32WB55VG (ST Microelectronics) [13] (rys. 9) .

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 serii nRF52 (Nordic Semiconductor) [9] oraz serii SimpleLink CC13x2R/CC26x2R (Texas Instruments) [2-5].

Moduły uruchomieniowe

Projektowanie płytek drukowanych do pracy ze scalonymi układami radiowymi jest trudne i drogie. Dlatego bardzo ważną dla użytkownika jest dostępność modułów z tymi układami.

Są ich dwie kategorie: zestawy uruchomieniowe oraz moduły produkcyjne.

Praktycznie każdy producent układów scalonych z obsługą standardu Bluetooth 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 dostarczonymi przez producenta daje to możliwość łatwego rozpoczęcia praktycznej pracy z układem scalonym. Istotną własnością zestawu uruchomieniowego jest możliwość debugowania kodu w czasie rzeczywistym ze wspomaganie sprzętowym. Pożądaną cechą zestawu uruchomieniowego jest też dosyć niska cena, typowo w granicach \$30 – \$50.

Dobrym przykładem modułu uruchomieniowego jest moduł startowy CC1352R1 Launch Pad (Texas Instruments) [19] (rys. 11). W module został zastosowany najnowszy, trzyrdzeniowy układ scalony CC1352R1F3 [2]. Zestaw jest przeznaczony do pracy w pasmach 868 MHz/915 MHz oraz 2,4 GHz z anteną wykonaną na płycie drukowanej. Na płycie modułu jest emulator sprzętowy standardu XDS110 umożliwiający debugowanie w czasie rzeczywistym. Na złączach jest udostępnionych 26 wyprowadzeń wejścia-wyjścia (GPIO) układu scalonego CC1352R.

Moduły Internetu Rzeczy

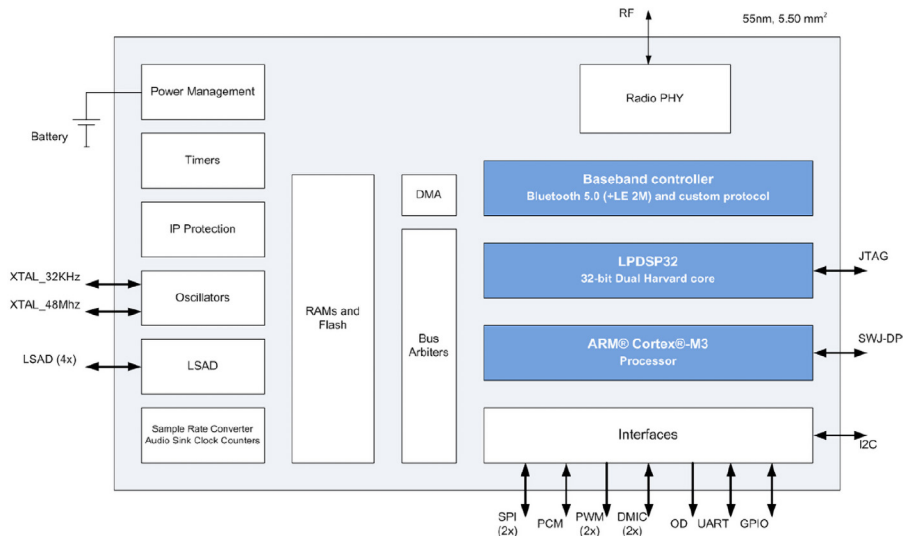
Dla rozwoju Internetu Rzeczy bardzo ważną jest dostępność kompletnych modułów komunikacji radiowej z zestawem czujników. Jest wiele zestawów pracujących z protokołem Bluetooth 4.2. Ale na razie prawie nie ma modułów pracujących z nowym standardem.

Dobrym wyjątkiem jest moduł Nordic Thingy:52 IoT Sensor Kit (Nordic Semiconductor) [18] (rys. 10). W module został zastosowany układ scalony nRF5232 z najnowszej serii nRF52 [9]. Moduł zawiera szereg czujników: temperatury, wilgotności, ciśnienia, jakości powietrza, koloru i poziomu oświetlenia oraz 9 osiowy czujnik ruchu.

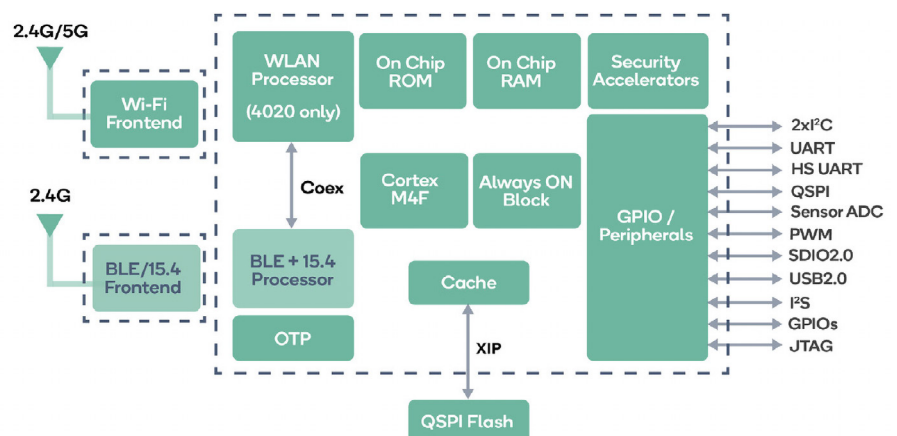
Moduł Thingy:52 IoT Sensor Kit otrzymał główną nagrodę ACE 2017 (Annual Creativity in Electronics) w kategorii zestawu projektowe. Nagrody ACE Awards są cenionym wyróżnieniem, którym nagradza się najlepsze na rynku elektronicznym produkty innowacyjne.

Moduły produkcyjne

Moduły produkcyjne umożliwiają zastosowanie wybranego układu scalonego w projekcie produkcyjnym. Ma to bardzo duże znaczenie



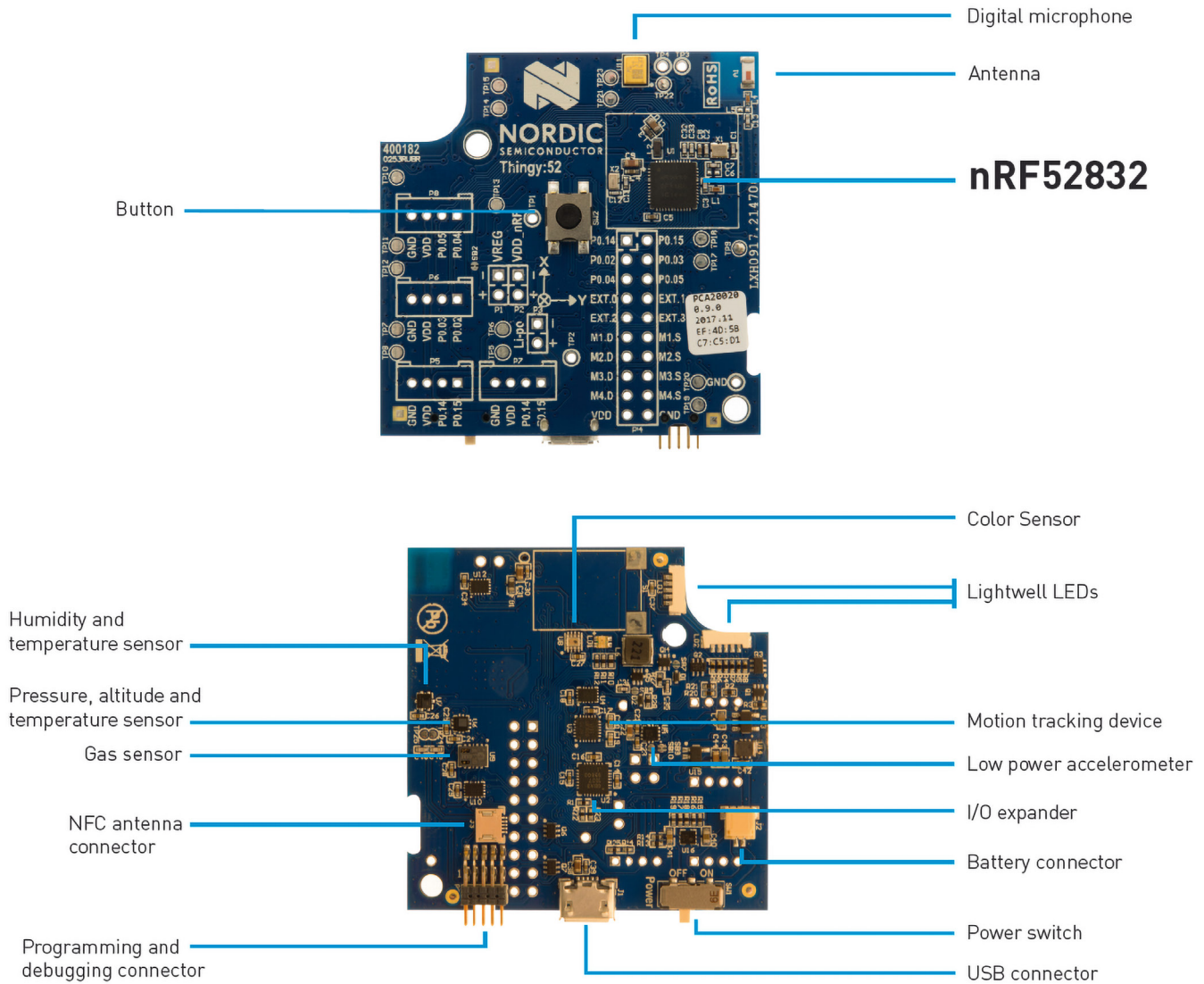
Rysunek 7. Schemat blokowy procesora RSL10, ON Semi [12]



Rysunek 8. Schemat blokowy procesora QCA4020/4, Qualcomm [10]

Control	Core	Memory
Power supply 1.71 to 3.6 V w/ DC/DC + LDO PDR/PDR/PVD/BOR	Arm® Cortex®-M4 FPU/DPS 64 MHz	Up to 1-Mbyte Flash memory
Xtal oscillators 32 MHz (RF) 32.769 kHz (LSE)	Nested vector interrupt controller (NVIC)	Up to 256-Kbyte SRAM
Internal RC oscillators 32 kHz + 4 ~ 48 MHz + 16 MHz (HSI) + 48 MHz ± 1% acc. over V and T(°C)	Memory protected unit (MPU)	Boot ROM
RTC/AWU/CSS	JTAG/SW debug	Secure boot loader
PLL/FLL	ART Accelerator™	
SysTick timer	AHB Bus matrix	Connectivity
2 watchdogs (WWDG/IWDG)	2 x DMA 7 channels	2 x SPI, 2 x I²C
Up to 72 GPIOs	Multi-protocol RF stack	1 x USART, LIN, Smartcard, IrDA Modem control
Cyclic redundancy check	BLE 5.0	1 x ULP UART
Voltage scaling (2 modes)	IEEE 802.15.4	USB 2.0 FS - Xtal less
	AES	Quad-SPI (XIP)
		SAI (full duplex)
Analog	Arm® Cortex®-M0+ MPU 32 MHz	Timers
2 x ULP comparators	Nested vector interrupt controller (NVIC)	4 x 16-bit 32-bit timers
1 x 12-bit ADC SAR 4.25 Msps	Memory Protection Unit (MPU)	2 x ULP 16-bit timers
Temperature sensor		Sensing
		16-key capacitive touch
		Encryption
		256-bit AES/PKA
		TRNG/PCROP
		Display
		8 x 40 LCD driver

Rysunek 9. Schemat blokowy procesora STM32WB55, ST Microelectronics [13]



Rysunek 10. Zestaw rozwojowy Nordic Thingy:52, , Nordic Semiconductor [17]

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 dla 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 modułu produkcyjnego jest moduł ANNA-B112 (U-blox) [1]. Jest to moduł typu System In Package (SIP) o rozmiarach 6.5×6.5×1.2 (mm). W module został zastosowany układ scalony nRF52832 z najnowszej serii nRF52 (Nordic Semiconductor) [9]. Podobnie w serii modułów BT832 (Fanstel) [16] dla układów tej samej serii.

Kolejnym przykładem jest mały 12.9×15×2.0 (mm) i tani (\$7,98) firmowy moduł BGM13P z dwuzakresowym procesorem Blue Gecko EFR32BG13 (Silicon Laboratories) [7].

Kilku producentów oferuje moduły z układem SimpleLink CC12640R2 (Texas Instruments) [3]. Jednak praktycznie nie można ich nigdzie kupić.

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) [2-5] są obsługiwane w ramach platformy SimpleLink (rys. 12). 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 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 serii 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. Stos protokołu Bluetooth 5 o nazwie S140 SoftDevice obsługuje 20 współbieżnych połączeń i jest kompatybilny ze stosami innych protokołów komunikacyjnych np. ANT.

Bardzo ważną cechą środowiska programowego jest pełna (lub prawie) kompatybilność nowych wersji oprogramowania firmowego z poprzednimi. Dla serii SimpleLink CC13x2R/CC26x2R (Texas Instruments) [2-5] oraz serii nRF52 (Nordic Semiconductor) [9] firmy oferują takie rozwiązanie. Co więcej jest też deklaracja pełnej 100% zgodności programowej kodu w ramach układów serii.



Rysunek 11. Zestaw startowy CC1352R1 LaunchPad, Texas Instruments [18]

SimpleLink CC13x2R/CC26x2R (Texas Instruments) [2-5] jest zastosowanie API standardu POSIX i wybór pomiędzy darmowym, firmowym (dedykowanym) systemem TI-RTOS lub darmowym (jeszcze), standardowym systemem FreeRTOS (rys. 12).

Podobnie firma Nordic Semiconductor dla serii nRF52 [9] wspiera zastosowanie systemu operacyjnego Keil RTX oraz FreeRTOS.

Co dalej?

Dla obsługi sieci IoT są dostępne jeszcze specjalizowane sposoby komunikacji jak LoRa i SigFox. Jednak są one przeznaczone do specyficznych zastosowań z bardzo małą szybkością transmisji.

Czarnym koniem Internetu Rzeczy może być komunikacja komórkowa LTE. Dostępne są moduły z obsługą standardu 3GPP Release 13 (LTE UE Category M1/NB1): Machine-Type Communication (eMTC), Narrow Band IoT (NB-IoT) oraz EC-GSM-IoT. Zaletą tego rozwiązania jest gwarancja zasięgu, wadą – opłata abonamentowa.

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 serii SimpleLink

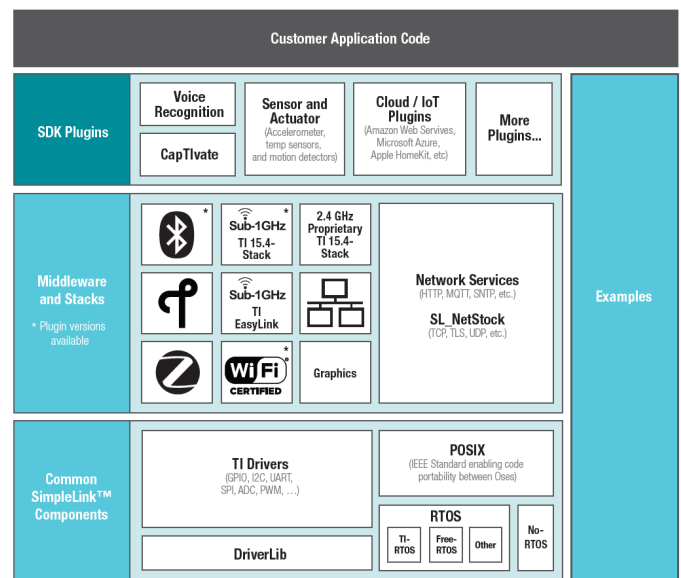
Moduły te pozwalają rozszerzyć obszar zastosowań technologii LTE o systemy wymagające niedużej maksymalnej przepustowości, bardzo niskiego poboru mocy, a także niskiej złożoności. Deklarowany jest dziesięcioletni czas pracy z jednej baterii. Czyli bardzo porównywalnie z wynikami dla komunikacji ze standardem Bluetooth 5 i IEEE 802.15.4.

Co jest najważniejsze?

W ankiecie przeprowadzonej z pytaniem o najważniejszą cechę Przemysłowego Internetu Rzeczy (IIoT) pierwsze miejsce zajęła – stopa zwrotu (return on investment). Dopiero na drugim miejscu znalazło się bezpieczeństwo.

Dobłą odpowiedzią na takie zapotrzebowanie jest nota aplikacyjna „Simplifying software development to maximize return on investment” [17]. A jakie w niej rady – trzeba użyć zintegrowanego środowiska sprzętowo – programowego.

Henryk A. Kowalski
kowalski@ii.pw.edu.pl



Rysunek 12. SimpleLink MCU SDK, Texas Instruments [5]

Literatura

- ANNA-B112 module, Stand-alone Bluetooth 5 low energy module, U-blox, <http://bit.ly/2FiRLYS>
- CC1352R (PREVIEW) SimpleLink Multi-Band CC1352R Wireless MCU, Product Page, Texas Instruments, <http://www.ti.com/product/cc1352r>
- CC2640R2F SimpleLink Bluetooth low energy Wireless MCU, Product Page, Texas Instruments, <http://www.ti.com/product/CC2640R2F>
- CC2642R (PREVIEW) SimpleLink CC2642R Bluetooth Low energy Wireless MCU, Product Page, Texas Instruments <http://www.ti.com/product/cc2642r>
- CC2652R (PREVIEW) SimpleLink(TM) CC2652R Multi-Standard Wireless MCU, Product Page, Texas Instruments, <http://www.ti.com/product/CC2652R>
- SmartBond DA14586, <http://bit.ly/2FhXIKR>
- EFR32BG13P733F512GM48 Bluetooth Low Energy (LE) and Bluetooth 5 Blue Gecko SoC, Silicon Laboratories, <http://bit.ly/2r0oAVN>
- K32W0x: Dual-core, large memory, high security, Bluetooth 5 + 802.15.4 MCU, NXP, <http://bit.ly/2JqUnGi>
- nRF52840 High-end Bluetooth 5/Thread/802.15.4/ANT/2.4GHz multiprotocol SoC, Nordic Semiconductor, <http://bit.ly/2r29E8H>
- QCA4024 SoC, Qualcomm, <http://bit.ly/2HvtRep>
- QN908x: Ultra-Low-Power BLE System on Chip Solution, NXP, <http://bit.ly/2r6xiCb>
- RSL10: Radio SoC, Bluetooth 5 Certified, ON Semi, <http://bit.ly/2FjuVzU>
- 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>
- CC2640R2F-Q1 Automotive Qualified SimpleLink Bluetooth low energy Wireless MCU, Texas Instruments, <http://www.ti.com/product/cc2640r2f-q1>
- NCV-RSL10: Radio SoC, Ultra-Low-Power Multi-protocol Bluetooth 5 Certified for Automotive, ON Semi, <http://bit.ly/2HUXSrl>
- BT832 Series BLE, Bluetooth 5 Module, Fanstel, <http://bit.ly/2vTJ2Nc>
- Simplifying software development to maximize return on investment (SWSY004 C), 11 Jan 2018, Texas Instruments, <http://www.ti.com/lit/pdf/swsy004>
- Nordic Thingy:52 IoT Sensor Kit, Nordic Semiconductor, <http://bit.ly/2FgcX1b>
- SimpleLink Multi-Band CC1352R Wireless MCU LaunchPad Development Kit, LAUNCHXL-CC1352R1, Texas Instruments, <http://www.ti.com/tool/launchxl-cc1352r1>