Бездротові мікроконтролери

Георгій Воронцов

У статті розглядаються бездротові мікроконтролери компаній Silicon Laboratories і Onsemi. Мікроконтролери підтримують стандарти Bluetooth Low Energy 5.0 і 5.1. Наводяться короткі описи мікроконтролерів і параметри РЧ-трансиверів.

Від бездротових мікроконтролерів (МК) ми не очікуємо високої продуктивності та надзвичайних функціональних можливостей. Вони мають вузьку спеціалізацію. Оскільки їхнє головне призначення — забезпечити бездротову передачу даних, в як процесорне ядро багато виробників використовують досить просте процесорне ядро ARM Cortex-M0+ або навіть ARM Cortex-M0.

Однак з появою процесорного ядра ARM Cortex-M33 з архітектурою ARMv8-M бездротові мікроконтролери отримали друге дихання — їх обчислювальна потужність помітно зросла. Нове процесорне ядро перевершило за продуктивністю добре відоме ядро ARM Cortex-M4. Нагадаємо основні відмінності цих ядер, вони зображені в графічному вигляді на рисунку 1. Відзначимо низьке енергоспоживання Cortex-M33 і співпроцесорний інтерфейс, що дозволяє безпосередньо під'єднувати апаратні прискорювачі.

Технологія TrustZone, що використовується в ARM Cortex-M33, істотно підвищила безпеку завдяки розділенню апаратного та програмного забезпечення на захищені (*secure world*) і незахищені (*non-secure world*) області. Звернення з захищеної області в незахищену не обмежується, а зворотний трафік здійснюється з рядом обмежень. Завантаження програмного забезпечення завжди відбувається в захищеній області.

Ми розглянемо бездротові МК компаній Silicon Laboratories і Onsemi. Описувані пристрої відповідають вимогам стандартів Bluetooth Low Energy 5.0, 5.1 і 5.2.

Наші публікації на тему бездротових МК див. в [1–7].

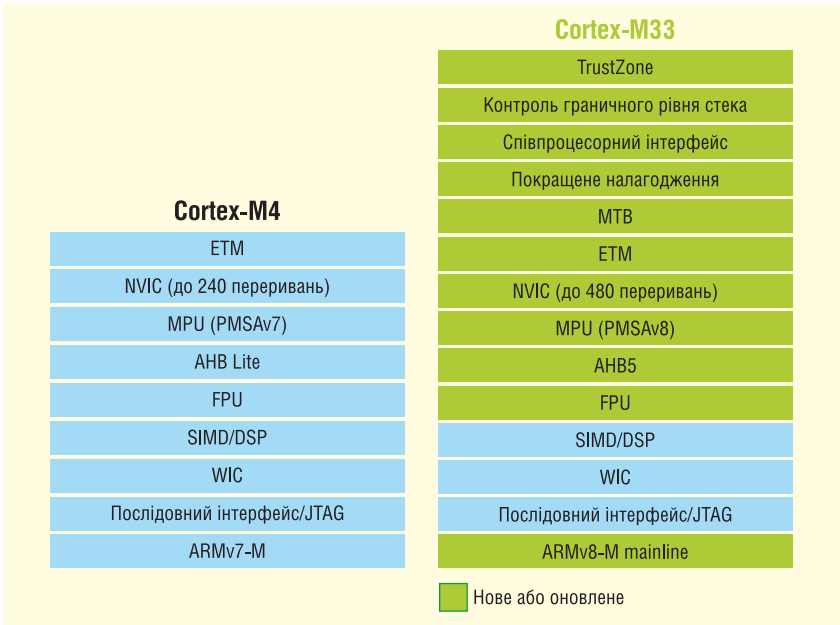

Рис. 1. Основні відмінності процесорних ядер ARM Cortex-M33 і ARM Cortex-M4

МІКРОКОНТРОЛЕРИ СЕРІЇ EFR32BG24 ВІД КОМПАНІЇ SILICON LABORATORIES

До складу серії МК EFR32BG24 компанії Silicon Laboratories входять сім модифікацій. Їх основні параметри представлені в таблиці 1. Структурна схема МК EFR32BG24 наведена на рисунку 2. МК підтримує наступні протоколи:

- Bluetooth 5.3, у тому числі визначення місцезнаходження;
- протокол Zigbee PRO/Green Power;
- пропрієтарні протоколи 2.4 ГГц.

Таблиця 1. Основні параметри серії МК EFR32BG24 від компанії Silicon Laboratories

Назва МК	Потужність передавача, дБм	Об'єм флеш-пам'яті, Кбайт	Об'єм ОЗП, Кбайт	Захищеність	АЦП	Матричний векторний процесор	Кількість портів вводу/виводу	Корпус
EFR32BG24B220F1024IM48-B	19.5	1024	128	висока	–	–	32	QFN-48
EFR32BG24B210F1024IM48-B	10	1024	128	висока	–	–	32	
EFR32BG24B110F1536IM48-B	10	1536	256	висока	+	+	28	
EFR32BG24A020F1024IM48-B	19.5	1024	128	середня	–	–	32	
EFR32BG24A020F1024IM40-B	19.5	1024	128	середня	–	–	32	
EFR32BG24A010F1024IM48-B	10	1024	128	середня	–	–	32	
EFR32BG24A010F1024IM40-B	10	1024	128	середня	–	–	32	QFN-40

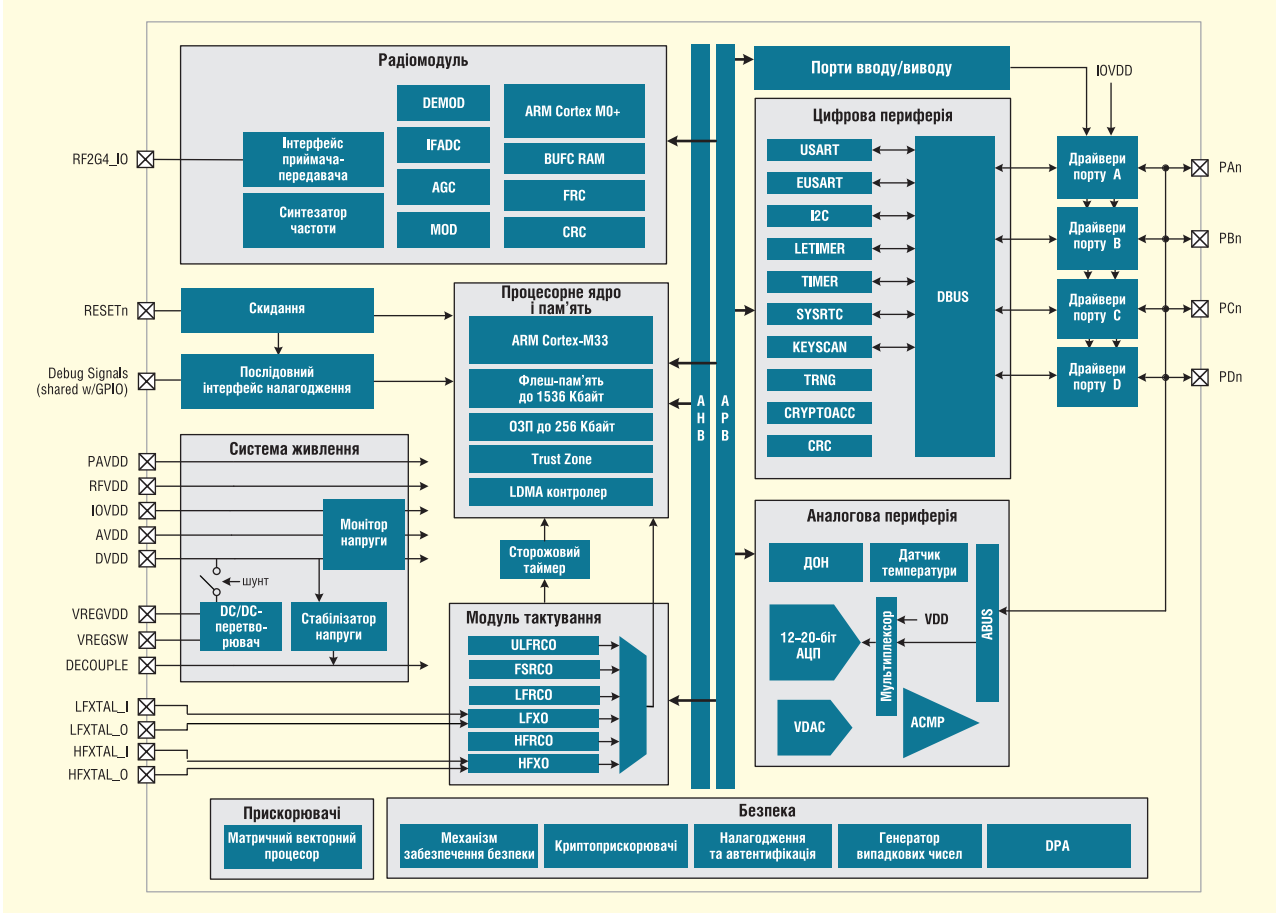

Рис. 2. Структурна схема МК EFR32BG24 від компанії Silicon Laboratories

Коротко опишемо основні параметри модулів мікроконтролера. Максимальна частота тактування процесорного ядра Cortex-M33 становить 78 МГц. Продуктивність процесора при цій частоті досягає 1.5 DMIPS/c. Процесор підтримує DSP-операції та операції з числами з рухомою крапкою. Для збільшення обчислювальної потужності в МК введений матричний векторний співпроцесор (MVP), який призначений для прискорення операцій з числами з рухомою крапкою і для матричних обчислень.

Блок захисту пам'яті дозволяє розділити пам'ять на 16 областей, на відміну від процесора Cortex-M4, в якому можна було виділити тільки вісім областей пам'яті. У процесорному ядрі Cortex-M3 передбачені режими роботи зі зниженим енергоспоживанням:

- швидкий перехід в режим сну (*Sleep Now mode*);
- перехід в режим зниженого енергоспоживання після обслуговування переривань (*Sleep on Exit mode*);
- переведення в режим зниженого енергоспоживання зовнішніх модулів МК.

Крім того, в МК реалізовано п'ять режимів енергоспоживання Energy Mode (EM). У режимі EM0 всі модулі МК можуть бути активними. Решта чотири режими EM1–EM4 є режимами зниженого енергоспоживання. Процесор Cortex-M33 активний тільки в режимах EM0 і EM1.

Для зв'язку між модулями МК використовується давно відома шинна матриця AHB. Організація шини представлена на рисунку 3. У цій схемі для арбітражу застосовується циклічний алгоритм, іноді званий «каруселлю» (*round-robin*). Він не призначає пріоритети й забезпечує високу пропускну здатність.

При зверненні до шини можуть виникати помилки. Наприклад, процесор звертається за адресою, що не існує, або

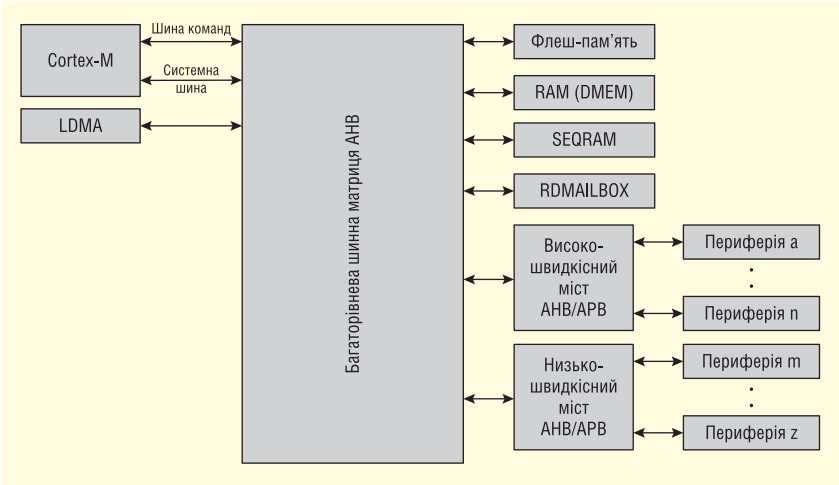

Рис. 3. Структурна схема організації шин МК EFR32BG24 від компанії Silicon Laboratories

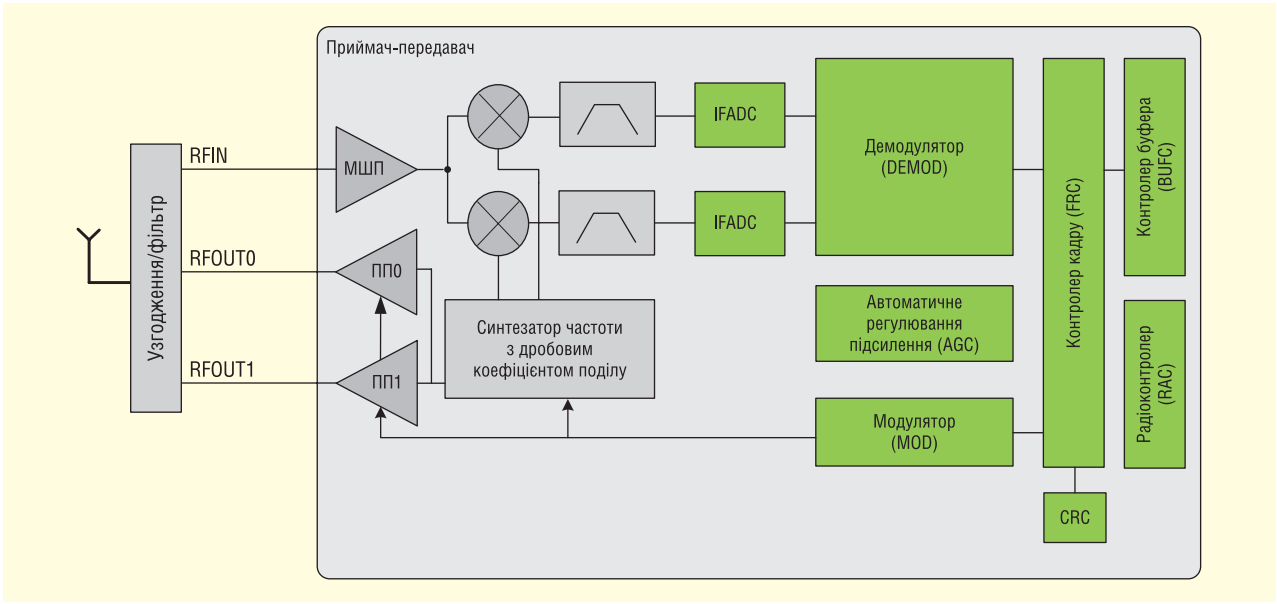

Рис. 4. Структурна схема РЧ-модуля МК EFR32BG24 від компанії Silicon Laboratories

до периферійного пристрою, що знаходиться в режимі зниженого енергоспоживання з відключеним тактуванням. У цьому випадку формуються переривання.

Оскільки регістри периферійних пристроїв в МК EFR32BG24 влаштовані досить оригінально, необхідно дотримуватися певних правил при зверненні до них. Регістри загального призначення (*Generic Registers*) доступні для читання і запису в будь-який час. На відміну від них, до регістрів конфігурації (*CONFIG Registers*) слід звертатися для запису тільки при вимкненому периферійному пристрої, а спроба запису в регістри конфігурації при модулі, що працює, може призвести до збою. Читання регістрів конфігурації допускається в будь-який час і до збою не призводить.

Регістри синхронізації призначені для зв'язку з іншими пристроями, частота тактування яких або вища, або нижча за частоту тактування модуля. Запис у ці регістри може здійснюватися тільки при вимкненому периферійному пристрої. Запис у ці регістри здійснюється протягом двох-трьох тактів. У процесі запису периферійний модуль знаходиться у вимкненому стані. Читання цих регістрів не забороняється в будь-який час. Однак якщо периферійний модуль при спробі зчитування вимкнений, час зчитування займе два-три такти.

Регістри LFSYNC дозволяють процесору записувати дані без очікування на час синхронізації. Запис і читання цих регістрів може здійснюватися в будь-який час і займає три-чотири такти. І, нарешті, регістри ENABLE містять біт дозволу периферійного пристрою. При першому включенні периферійний пристрій знаходиться протягом двох-трьох циклів в стані очікування. Читання регістрів ENABLE допускається в будь-який час. Регістри INTFLAG призначені для виставлення прапорців переривання.

Дещо докладніше розглянемо радіочастотний модуль. Його структурна схема наведена на рисунку 4. Приймач-передавач має ряд налаштувань і опцій для адаптації до вимог різних застосувань. При передачі даних активуються блоки синтезатора частоти (SYNTH), модулятор (MOD) і підсилювач потужності (PA). Модулятор запитує дані у контролера кадрів (FRC). Після передачі всього кадру і даних радіомодуль може автоматично перейти в режим приймання даних (RX).

У режимі RX активується малошумний підсилювач (МШП), синтезатор частоти, АЦП проміжної частоти (IFADC) і демодулятор (DEMOD). Модуль DEMOD переглядає прийняті кадри, що відповідають заданому формату модуляції. Коли такий кадр виявляється, демодульовані дані передаються контролеру кадрів FRC. Після того як повний кадр отримано і записано, радіомодуль залишається в режимі приймання або переходить в режим передавання даних. Програмування радіомодуля може здійснюватися за допомогою програмних драйверів, що надаються компанією Silicon Laboratories.

Наявність в радіомодулі контролера буфера (BUFC) дозволяє використовувати буферизовані режими приймання та передавання даних. До складу контролера BUFC входять чотири буфери, що конфігуруються незалежно. Кожен буфер можна налаштувати за порогами переривання, розміром і розташуванням в ОЗП. Контролер використовує системний ОЗП. Можливі також режими передавання та приймання даних без буферизації. Перелічимо деякі основні параметри радіомодуля:

- використовується модуляція 2-FSK, 2-GFSK, 4-FSK, MSK, GMSK, O-QPSK з формуванням напівсинусоїдальної хвилі, ASK/OOK, DBPSK TX;
- підтримується манчестерський код і NRZ;
- швидкість передавання даних варіюється в діапазоні від 100 бод/с до 2 Мбод/с, що дозволяє передавати дані зі швидкістю до 4 Мбіт/с;
- автоматичне регулювання потужності під час передавання даних;
- опціональне вставлення преамбули та слів синхронізації;
- вбудований режим тестування передавання;
- смуга приймача задається в межах 100 Гц...2.5 МГц;
- автоматична компенсація зміщення частоти.

Комутація між периферійними модулями МК здійснюється за допомогою мережі маршрутизації сигналів PRS. Мережа дозволяє встановлювати зв'язок між периферійними модулями без залучення ресурсів процесора. До складу PRS-мережі входять 12 асинхронних каналів. Кожен з них може підключатися до будь-якого модуля, що генерує повідомлення. Будь-який модуль, що приймає повідомлення, може також підключатися до будь-якого з цих каналів.

За допомогою логіки, що конфігурується, кілька каналів об'єднуються

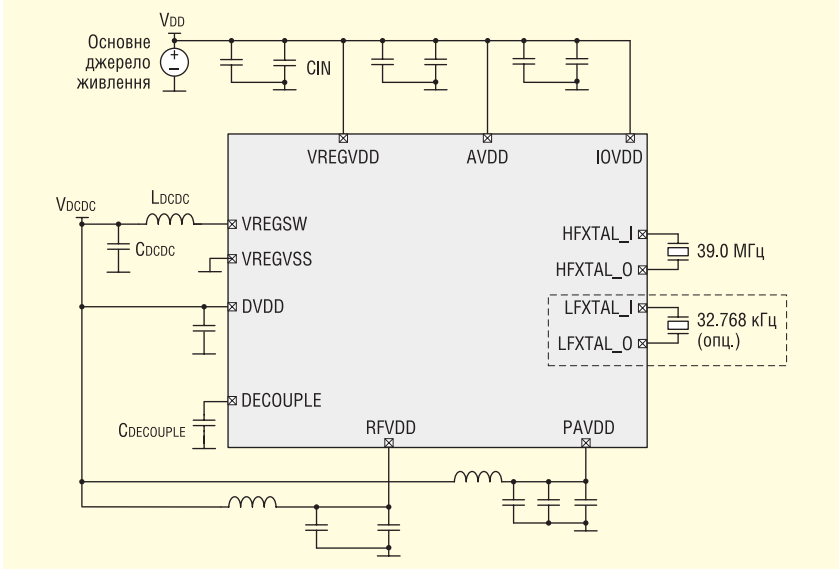

Рис. 5. Типова схема підключення МК EFR32BG24 від компанії Silicon Laboratories

в каскад і для реалізації складнішого функціоналу. Крім того, до складу мережі PRS входять чотири конфігурованих синхронних канали, які дозволяють встановити зв'язок між аналоговими модулями і таймерами.

На закінчення коротко опишемо аналогові модулі МК. До їх складу входять АЦП, ЦАП та аналоговий компаратор. Модуль АЦП IADC є комбінацією АЦП послідовного наближення та дельта-сигма АЦП. Подібний підхід дозволив реалізувати гнучке керування АЦП для вибору рівня продуктивності і коефіцієнта передискретизації. Як відомо, передискретизація дозволяє знизити рівень шумів. Таким чином, вдається реалізувати розрядність АЦП в межах 12–16 біт. При продуктивності АЦП 1 Мвиб/с і коефіцієнті передискретизації 2 число ефективних бітів ENOB = 11.7. Поступово зменшивши продуктивність до 3.8 Квиб/с і довівши коефіцієнт передискретизації до 256, вдається отримати ENOB = 16.

Продуктивність 12-біт ЦАП (VDAC) з диференціальним виходом становить 500 Квиб/с. Диференціальний вихід реалізується завдяки двом операційним

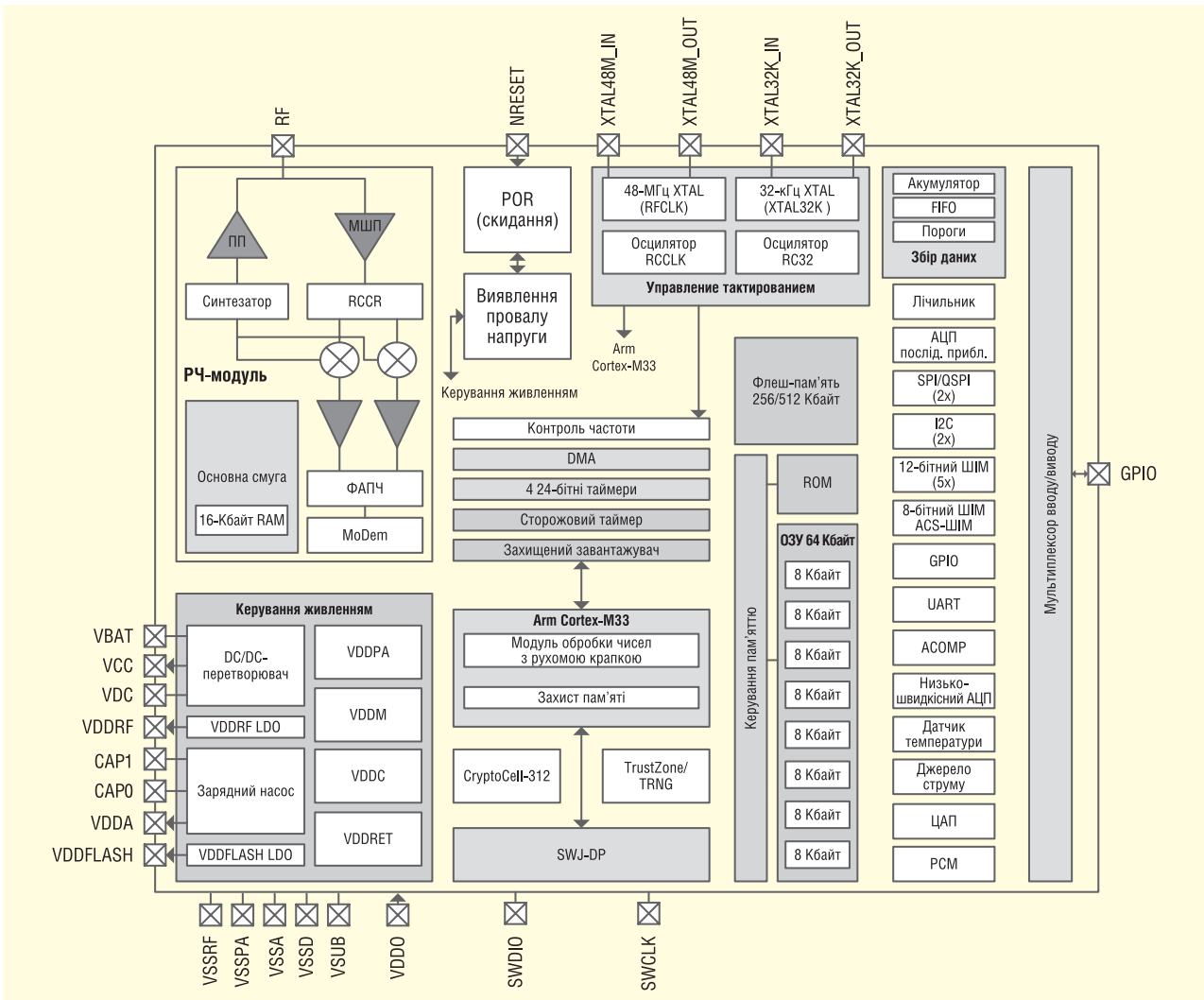

Рис. 6. Структурна схема МК RSL 15 від компанії Onsemi

підсилювачам. Аналоговий компаратор (ACMP) реалізує порівняння двох вхідних аналогових сигналів. Час відгуку й, отже, енергоспоживання задається програмним способом.

Типова схема підключення МК показана на рисунку 5. Їй необхідний вбудований DC/DC-перетворювач.

МІКРОКОНТРОЛЕР RSL 15 КОМПАНІЇ ONSEMI

Мікроконтролер RSL 15 компанії Onsemi реалізує протокол Bluetooth 5.2, що означає і підтримку версій протоколу 5.1; 5.0; 4.2; 4.1; 4.0. МК RSL 15, як і розглянуті вище мікроконтролери, базується на процесорному ядрі Cortex-M33. Структурна схема МК наведена на рисунку 6, а оцінити його функціональні можливості допоможе рисунок 7.

МК RSL 15 здатний одночасно підтримувати 10 з'єднань; при цьому максимальна швидкість передавання даних становить 2 Мбіт/с. Особливістю МК RSL 15 є дуже низьке енергоспоживання, чому не малою мірою сприяють відповідні режими енергоспоживання. У режимі сну (*Sleep Mode*) з пробудженням за таймером реального часу споживаний струм становить всього лише 81 нА, а при пробудженні від зовнішнього сигналу споживання знизиться до 36 нА.

Піковий струм споживання в режимі приймання даних 1 Мбіт/с становить 3 мА, а при передаванні даних при потужності передавача 0 дБм споживаний струм не перевищує 4.3 мА. Відзначимо ще одну цікаву особливість МК — режим розумного збору даних (*Smart Sense Mode*). У ньому активними залишаються лише аналогові та цифрові периферійні модулі, необхідні для збору даних від зовнішніх пристроїв. Решта модулів, у т. ч. процесорне ядро, вимкнені. У цьому режимі навіть при активному АЦП струм споживання не перевищує 186 нА.

Крім двох перерахованих режимів енергоспоживання сну і розумного збору даних в МК є ще режими зупинки (*Standby Mode*) і очікування (*Idle Mode*). У режимі зупинки час пробудження менше, ніж в режимі сну. Тактування процесора і РЧ-модуля зупинено, а їх напруга живлення зменшена. Обсяг пам'яті, що зберігається, задається користувачем. Деякі периферійні модулі знаходяться в режимі очікування і доступні за запитом.

Режим очікування використовується протягом короткого часу, коли необхідне швидке пробудження МК. У цьому режимі напруга живлення процесора і РЧ-модуля не знижується, але їх тактова частота призупиняється. Гнучка система режимів зниженого енергоспоживання і малий споживаний струм в активному режимі дозволяє істотно збільшити термін служби батарей, особливо у випадках, коли МК значну частину часу знаходиться в стані очікування. Оскільки основною особливістю розглянутого МК є низьке енергоспоживання, наведемо в таблиці 2 стан основних модулів МК у відповідних режимах.

Діапазон робочої частоти становить 2.4–2.4835 ГГц. До складу МК входить 50-Ом узгоджувальне коло. Швидкість передачі даних варіюється в діапазоні

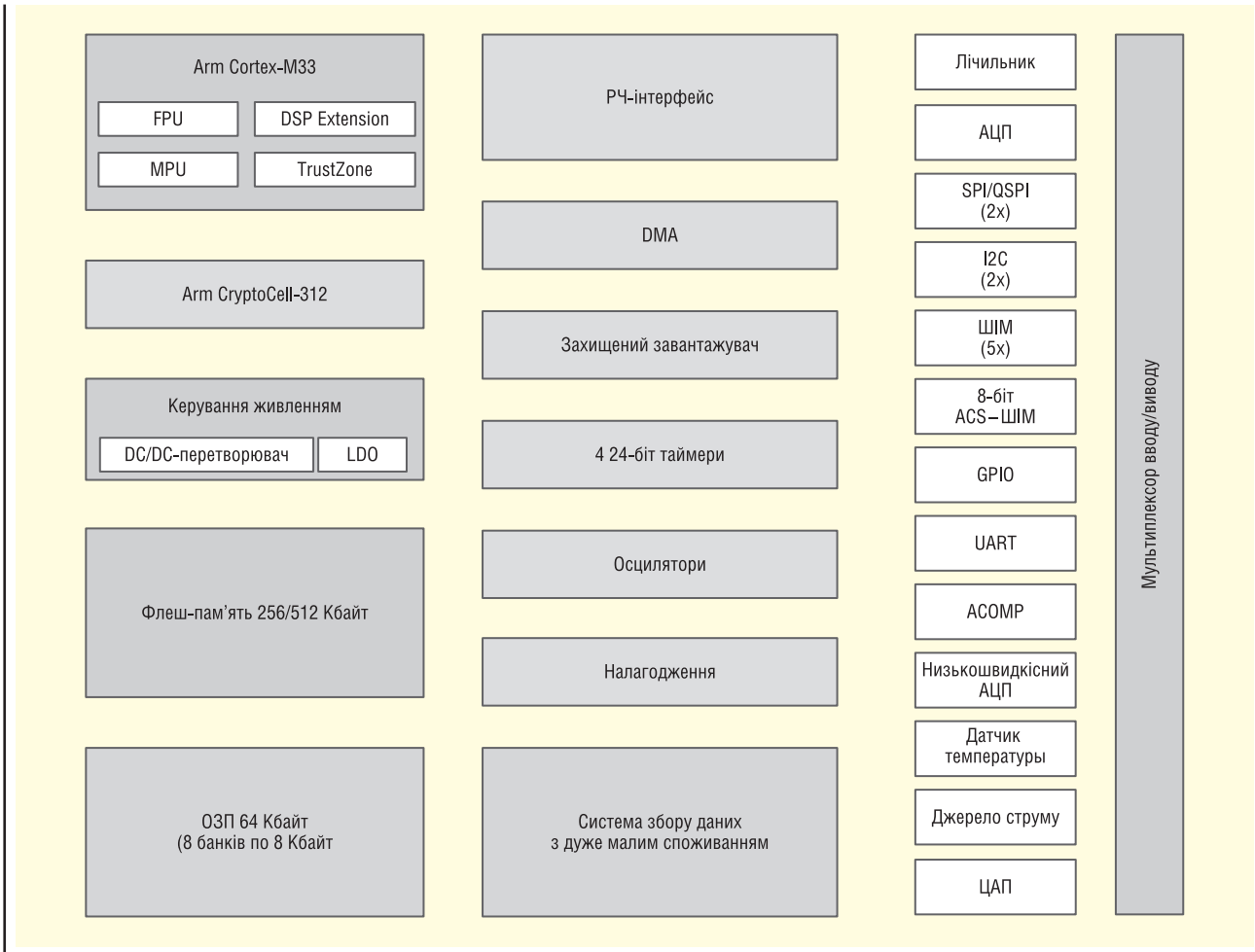

Рис. 7. Функціональні можливості МК RSL 15 від компанії Onsemi

Таблиця 2. Стан основних модулів МК RSL 15 від компанії Onsemi в режимах зниженого енергоспоживання

Назва модуля	Режим очікування (Idle Mode)	Режим зупинки (Standby Mode)	Режим розумного збору даних (Smart Sense Mode)	Режим сну (Sleep Mode)
Процесор Cortex-M33	увімк.	вимк.	выкл.	вимк.
РЧ-модуль	выкл.	вимк.	выкл.	вимк.
ОЗП зі збереженням даних	увімк.	доступно	доступно	доступно
Годинник реального часу	увімк.	увімк. або вимк.	увімк. або вимк.	увімк. або вимк.
Система збору даних	увімк.	увімк. або вимк.	увімк. або вимк.	увімк. або вимк.
Інтерфейси	увімк.	вимк.	вимк.	вимк.

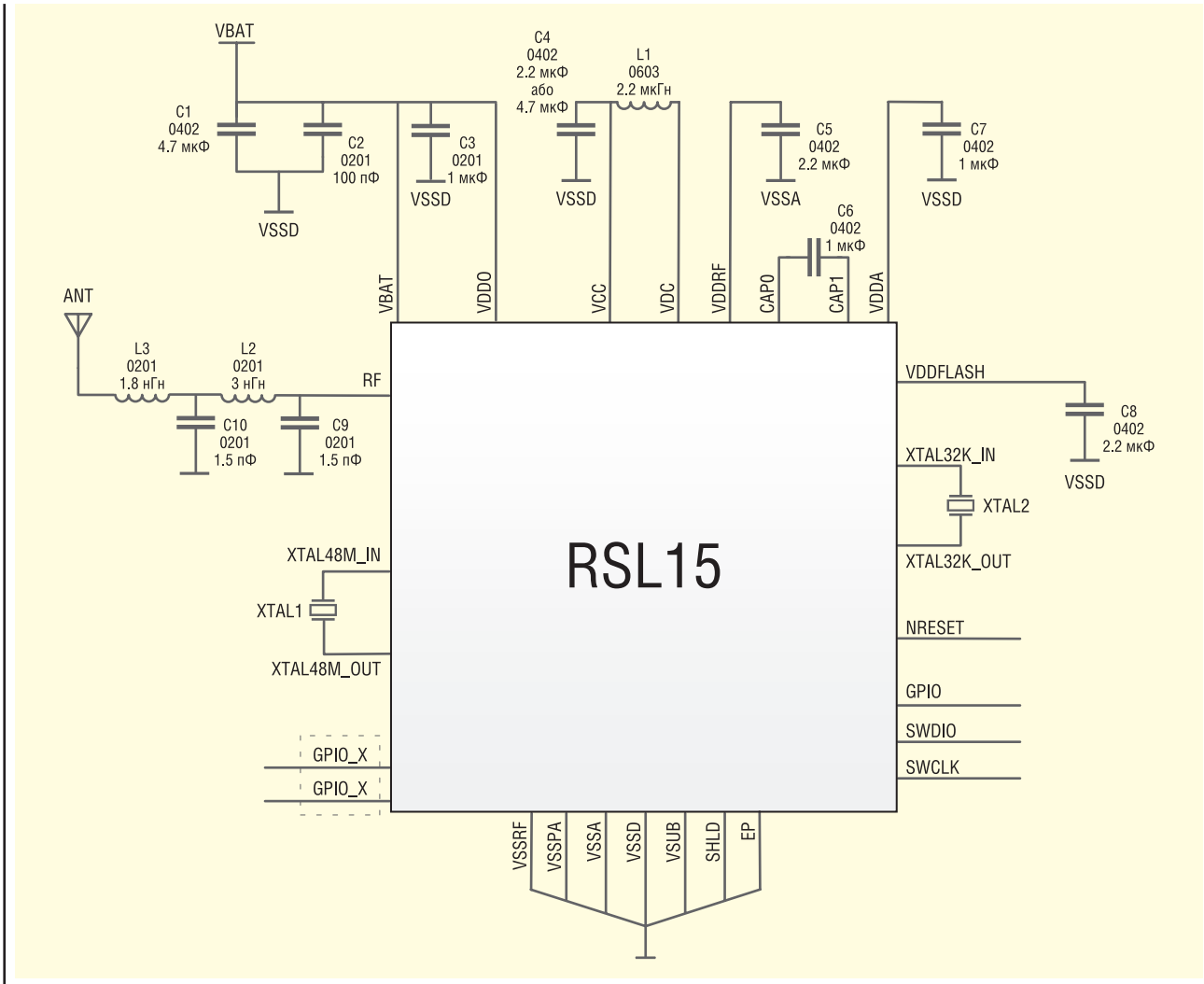

Рис. 8. Типова схема підключення МК RSL 15 від компанії Onsemi

62.5 Кбіт/с...2 Мбіт/с. До складу РЧ-модуля входять два буфери FIFO об'ємом по 128 байт — по одному FIFO-буферу в канали передавача і приймача. Максимальний рівень прийнятого сигналу становить 0 дБм. Потужність випромінюваного сигналу знаходиться в межах −17...6 дБм.

Як видно з рисунків 6–7, МК RSL 15 складається з простих функціональних вузлів, які всім відомі і безліч разів описані. На закінчення наведемо типову схему включення МК при використанні вбудованого понижувального DC/DC-перетворювача. У схемі підключення, представленій на рисунку 8, вказані номінальні значення зовнішніх компонентів. Напруга живлення МК варіюється в широких межах 1.2–3.6 В, а виробляється МК в корпусі QFN-40.

Література:

1. Г. Воронцов. Беспроводные микроконтроллеры семейства STM32WB55xx от STMicroelectronics// CHIP NEWS Украина. № 8. 2019.
2. А. Чистохвалов. Беспроводные микроконтроллеры с процессорным ядром Cortex-M33// CHIP NEWS Украина. № 8. 2019.
3. А. Чистохвалов. «Беспроводной» микроконтроллер AXM0F243 от ON Semiconductor// CHIP NEWS Украина. № 1. 2020.
4. Г. Воронцов. Беспроводные микроконтроллеры// CHIP NEWS Украина. № 8. 2020.
5. Г. Воронцов. Беспроводные микроконтроллеры// CHIP NEWS Украина. № 9. 2020.
6. Г. Воронцов. Беспроводные микроконтроллеры и модули// CHIP NEWS Украина. № 4. 2021.
7. Г. Воронцов. Бездротові мікроконтролери//CHIP NEWS. № 2. 2022.