



BLUETOOTH 5 -JÄRJESTELMÄPIIRIT JA -KEHITYSALUSTAT

Nousu Jani

Ohjaaja: Hannu Jari

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA**

2019

Nousu J. (2019) Bluetooth 5 -järjestelmäpiirit ja -kehitysalustat. Oulun yliopisto, Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 25 s

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä tutkitaan Bluetooth 5 -järjestelmäpiirien (eng. System-on-Chip, SoC) ominaisuuksia ja tutustutaan erilaisiin kehitysalustavaihtoehtoihin. Työssä käydään läpi Bluetooth-järjestelmäpiirien eri osia mm. prosessorit, muistit, väylät ja oheismoduulit. Lisäksi vertaillaan muutaman eri valmistajan piirien ominaisuuksia, suorituskykyä ja tehonkulutusta. Kehitysalustoissa keskitytään harrastajille soveltuviin malleihin rajaamalla hankintahinta alle sataan euroon.

Avainsanat: Bluetooth 5, Bluetooth Low Energy (BLE), järjestelmäpiiri (SoC), kehitysalusta.

Nousu J. (2019) Bluetooth 5 system on chip and development kits. University of Oulu, Degree Programme in Electronics and Communications Engineering, Bachelor's Thesis, 25 p.

ABSTRACT

In this project, features and implementation of Bluetooth 5 System-on-Chips (SoC) and development kits were studied. The work presents different parts of Bluetooth SoC i.a. processors, memories, busses and peripherals. In addition, features, performance and power consumption of Bluetooth chips from a few different manufacturers are compared. Focus is on development kits that are affordable for hobbyist, therefore budget for development kit was below one hundred euros.

Key words: Bluetooth 5, Bluetooth Low Energy (BLE), system-on-chip (SoC), development kit.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYS.....	4
MERKINNÄT JA LYHENTEET	5
1. JOHDANTO.....	7
2. JÄRJESTELMÄPIIRIEN KOMPONENTIT	8
2.1. Radio	8
2.2. Prosessorit	8
2.3. Muistit	9
2.4. Oheismoduulit	10
2.5. Piirin sisäiset väylät.....	11
2.6. Suojaus	12
2.7. Liitynnät ja tiedonsiirto	13
2.8. Tehonhallinta.....	13
3. BLUETOOTH 5 -JÄRJESTELMÄPIIRIT	14
3.1. Nordic nRF52840	14
3.2. TI CC2652R	14
3.3. Dialog semiconductor Smartbond DA14585 / DA14586	14
3.4. Bluetooth-markkinat ja muut valmistajat	15
3.5. Järjestelmäpiirien vertailu	15
4. KEHITYSALUSTAT JA OHJELMOINTITYÖKALUT.....	19
4.1. Ohjelmointityökalut.....	19
4.2. Nordic nRF52 development kit	20
4.3. TI CC26x2R LaunchPad development kit	20
4.4. Dialog DA14585 development kit	21
5. YHTEENVETO	23
6. LÄHTEET	24

MERKINNÄT JA LYHENTEET

AAR	Accelerated Address Resolver.
ADC	Analog Digital Converter. Analogia - digitaali-muunnin.
AES	Advanced Encryption Standard.
AHB	Advanced High-performance Bus. AMBA-arkkitehtuurin korkean suorituskyvyn väylä.
AMBA	Advanced Microcontroller Bus Architecture.
API	Application Programming Interface. Ohjelmointirajapinta.
APB	Advanced Peripheral Bus. AMBA-arkkitehtuurin matalan suorituskyvyn väylä.
ARM	Advanced RISC Machine. Käytetään joissain lähteissä myös ARM Ltd. yhtiön nimenä.
BLE	Bluetooth Low Energy.
BR/EDR	(Bluetooth) Basic Rate / Enhanced Data Rate.
CBC	Cipher Block Chaining.
CCM	Counter with Cipher Block Chaining - Message Authentication Code. CCM on yksi AES-salauksen moodeista. Bluetooth Low Energy spesifikaation mukaiset laitteet käyttävät tätä salausta.
CoreMark	EEMBC:n kehittämä mittari, joka mittaa sulautetuissa järjestelmissä käytettyjen mikrokontrollerien ja mikroprosessorien suorituskykyä.
DAC	Digital Analog Converter. Digitaali - analogia -muunnin.
DK	Development Kit (Hardware). Kehitysalusta.
DMA	Direct Memory Access.
ECB	Electronic Codebook Mode encryption. ECB on yksi AES-salauksen moodeista.
EEMBC	Embedded Microprocessor Benchmark Consortium on voittoa tavoittelematon organisaatio, joka kehittää suorituskykymittareita (eng. performance benchmark) sulautetuissa järjestelmissä käytetyille prosessoreille ja ohjelmille.
Flash	Haihtumaton puolijohdemuisti, joka säilyttää datan, vaikka virta katkaistaan.
FPU	Floating Point Unit. Liukulukulaskentayksikkö.
GCC	GNU Compiler Collection. Ilmainen kokoelma kääntäjiä mm. C ja C++ -ohjelmointikielille.
GDB	GNU Debugger.
GNU	General Public License.
GPIO	General Purpose Input / Output. Yleiskäyttöinen liityntäportti, jonka suunta voidaan valita.
I2C	Sarjamuotoinen kaksi johtoinen (kello ja data) liityntä.
I2S	Inter IC Sound. Sarjamuotoinen väylä digitaalisten audiolaitteiden kytkentään.
IDE	Integrated Development Environment. Integroitu ohjelmointiympäristö.
IO	Input / Output portti.
IoT	Internet of Things. Esineiden internet.
JTAG	Joint Test Action Group - Elektroniikkayritysten yhteenliittymä, joka kehitti nimeään kantavan liittymän integroitujen piirien testaukseen tuotannon jälkeen. JTAG-liityntää käyttäen voidaan ohjelmoida ja debugata integroituja piirejä, mukaan lukien järjestelmäpiirien prosessoreja.

KEIL	ARM Keil -työkalupaketti. Sulautettujen järjestelmien kehitystyökalut ARM-prosessoreille.
LE	(Bluetooth) Low Energy.
MAC	Message Authentication Code.
MIC	Message Integrity Check.
NFC	Near Field Communication. Lähikenttäviestintä.
OTP	One Time Programmable. Kertaohjelmoitava.
PCM	Pulse Code Modulation. Pulssinkoodausmodulaatio.
PDM	Pulse Density Modulation. Pulssintiheysmodulaatio.
PPI	Programmable Peripheral Interconnect.
PWM	Pulse Width Modulation.. Pulssinleveysmodulaatio.
RAM	Random Access Memory. Hajasaantimuisti, jota voidaan lukea tai kirjoittaa nopeasti riippumatta datan fyysisestä sijainnista muistin sisällä.
RISC	Reduced Instruction Set Computer.
RNG	Random Number Generator. Satunnaislukugeneraattori.
ROM	Read Only Memory. Lukumuisti.
RoT	Root of Trust. Varmennettu luotettavuus.
RSSI	Relative Received Signal Strength. Suhteellinen signaalin voimakkuus.
RTC	Real Time Counter. Reaaliaikalaskuri.
RTL	Register Transfer Level. Laitteiston kuvaamiseen tarkoitettun ohjelmointikoodin taso.
SDK	Software Development Kit. Ohjelmistokehityspaketti.
SoC	System-on-Chip. Järjestelmäpiiri.
SPI	Serial Peripheral Interface. Synkroninen sarjamuotoinen neljä porttinen liityntä.
SWD	Serial Wire Debug - Vaihtoehtoinen sarjamuotoinen kaksi porttinen liityntä JTAG:lle. Käytetään mm. järjestelmäpiirin laiteohjelman lataamiseen ja debuggaukseen.
SWO	Serial Wire Output - Sarjamuotoinen jäljitysportti (eng. trace port) järjestelmäpiirin prosessorin sisäisen toiminnan tutkimiseen ja testaamiseen.
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter.
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter.
USB	Universal Serial Bus. Sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen.

1. JOHDANTO

Bluetooth on jo yli 20 vuotta vanha avoin langaton tiedonsiirtostandardi, joka perustuu lyhyen kantaman radiotekniikkaan. Uusia Bluetooth-standardia käyttäviä laitteita esitellään ja valmistetaan yhä kasvavia määriä. Vuonna 2018 Bluetooth-laitteiden valmistusmäärä lähestyi jo neljää miljardia kappaletta ja laitteiden internetin myötä (eng. Internet of Things, IoT) viiden miljardin rajan uskotaan rikkoutuvan vuonna 2022. [2]

Bluetooth 5 on tällä hetkellä usuin versio Bluetooth langattoman tiedonsiirron standardista. Bluetooth 5 -standardi on toteutettu vähän virtaa kuluttavan BLE-spesifikaation (Bluetooth Low Energy) mukaan, kuten edellinen Bluetooth 4 -standardikin. BLE mahdollistaa Bluetooth-piirien radio-osan toimimisen vähän virtaa kuluttavassa moodissa silloin, kun lähetettävä datamäärä on pieni tai dataa tarvitsee lähettää harvoin. Vähävirtatilassa Bluetooth-laitteet ovat yhteensopivia vanhempien Bluetooth versioiden kanssa, mukaan lukien sekä BLE että Bluetooth BR/EDR -standardit. Bluetooth-laitteiden ei kuitenkaan tarvitse tukea kaikkia standardin versioita. Bluetooth 5 -standardin merkittävimmät erot edelliseen Bluetooth 4.2 -standardiin ovat [1]:

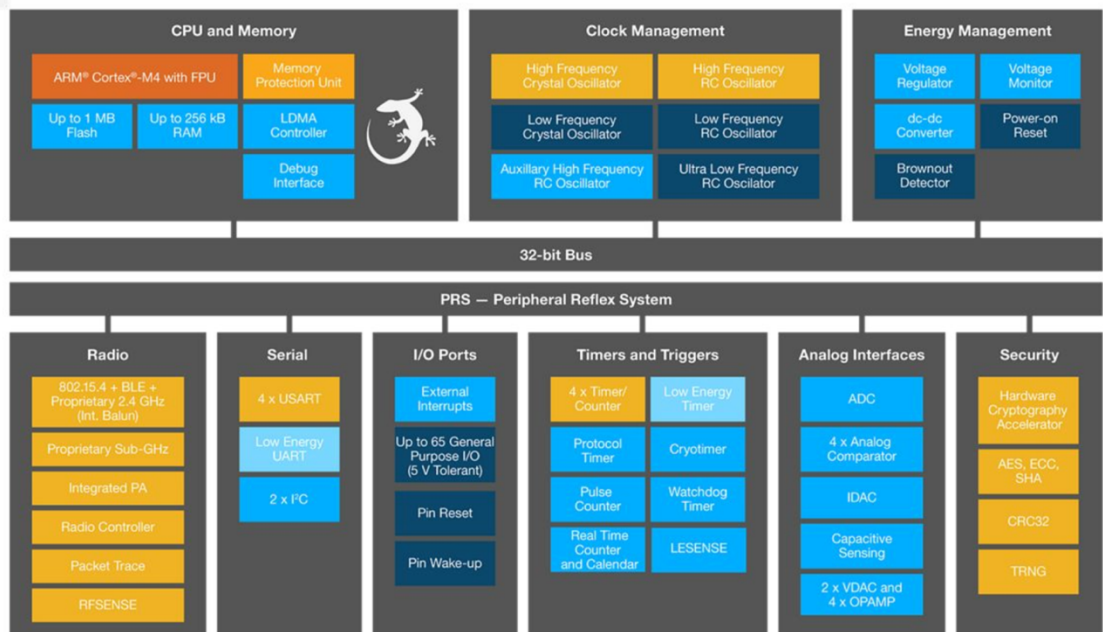
- 2x suurempi datan lähetysopeus, 2 Mbps. (1 Mbps @ Bluetooth 4.2)
- 4x parempi kantavuus, 240m (60m @ Bluetooth 4.2)
- 8x suurempi siirretty datamäärä (eng. throughput)
- Äänen (musiikin) lähettäminen langattomasti vähävirtatilassa.

Bluetooth-järjestelmäpiirit (SoC) sisältävät Bluetooth yhteensopivan radio-osan ja sen kontrollin lisäksi yleiskäyttöisen prosessorin ja useita erilaisia oheismoduuleita. Tämä mahdollistaa järjestelmäpiirien käyttämisen lukuisissa erilaisissa sovelluksissa. Bluetooth-tiedonsiirron lisäksi järjestelmäpiirit voivat tukea myös muita protokollia, kuten uusia IoT-protokollia nimeltään Zigbee ja Thread.

Tässä työssä käydään läpi Bluetooth-järjestelmäpiirien pääkomponentit ja vertaillaan muutaman eri valmistajan Bluetooth 5 -standardin mukaan tehtyjä SoC toteutuksia ja niiden kehitysalustoja. Piirien valmistajat on valittu suurimman markkinaosuuden mukaan [3] ja lisäksi kehitysalustan pitää olla harrastajan budjetille sopiva sekä hankintahinnaltaan että tarvittavilta ohjelmistoiltaan.

2. JÄRJESTELMÄPIIRIEN KOMPONENTIT

Bluetooth-järjestelmäpiiri sisältää samalle integroidulle piirille toteutetun prosessorin, käyttö- ja tallennusmuistin, lähetin – vastaanotin radion, erilaisia oheismoduuleja, analogiset ja digitaaliset IO-kontrollerit sekä yleiskäyttöiset ohjelmoitavat IO-liitynnät. Lisäksi piiriltä löytyy kello- ja energianhallintaan liittyvät logiikkayksiköt. Eri yksiköt on liitetty toisiinsa väylämatriisin avulla. Kuva 1 on esimerkki tyypillisestä Bluetooth SoC -piirin lohkokaaviosta.



Kuva 1. Bluetooth SoC -lohkokaavio. SiliconLabs [17]

2.1. Radio

Bluetooth-järjestelmäpiirien radio toimii 2,4 GHz taajuudella. Tuettuja protokollia on useita mm. Bluetooth 5, Bluetooth Mesh, Thread ja Zigbee.

2,4 GHz radion ohella järjestelmäpiireistä löytyy yleensä lähikenttäviestintään (NFC) tarkoitettu radio. Osa piireistä tukee myös alle gigaherzin (Sub-1GHz) taajuuksia, joita käytetään pitkän matkan IoT-sovelluksissa.

2.2. Prosessorit

Yleisin käytetty prosessori Bluetooth-järjestelmäpiireissä on ARM Cortex M -sarjan sulautettu prosessori. Muita kaupallisia sulautettuihin järjestelmiin suunnattuja prosessoreita ovat mm. Tensilica XTensor (nyk. omistaja Cadence) ja ARC (nyk. omistaja Synopsys). Ei-kaupallisista vaihtoehdoista merkittävimmäksi saattaa olla muodostumassa avoimen RISC-V -arkkitehtuurin prosessorit, mutta tällä hetkellä niiden käyttö on vielä vähäistä. Jotkut Bluetooth SoC -valmistajat käyttävät piirillään

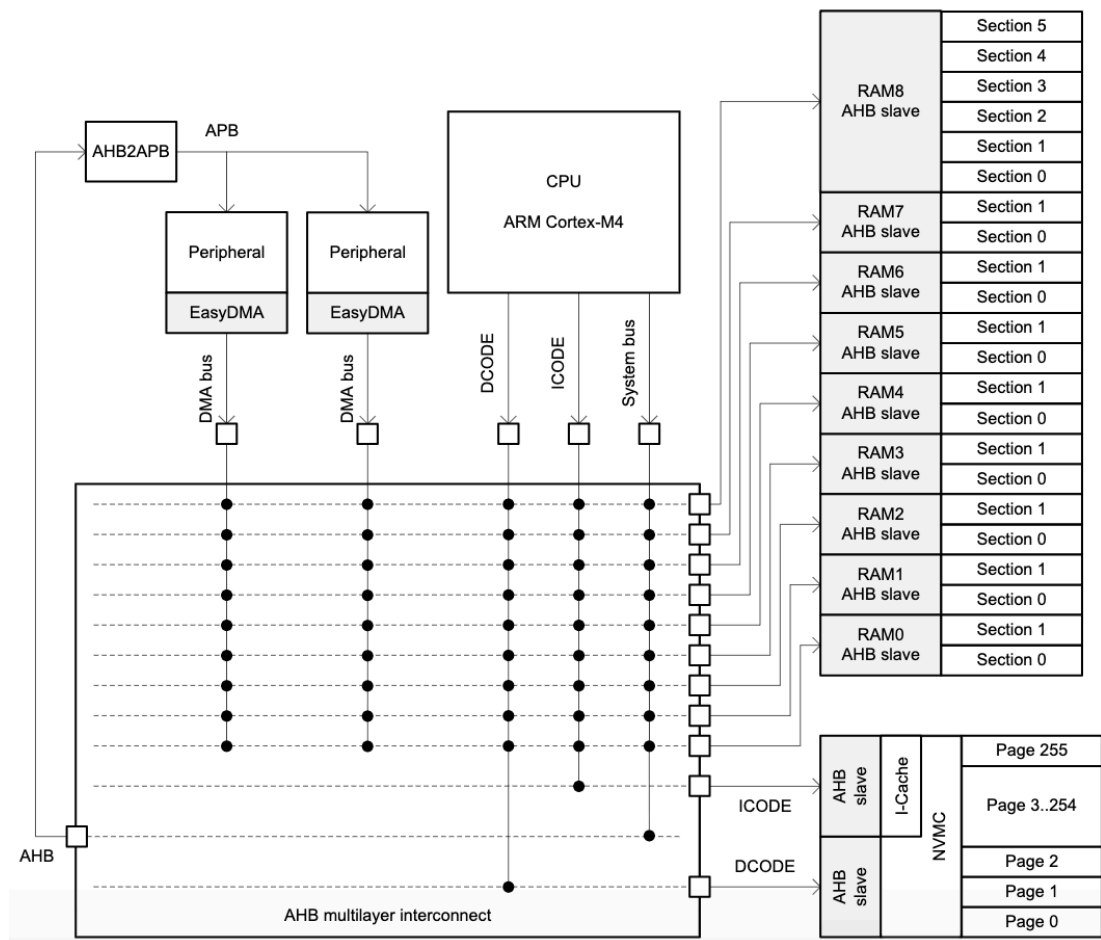
kahta prosessoria, joista toinen hoitaa radioprotokollan ja toinen suorittaa käyttäjän sovellusta.

ARM Cortex-M -prosessorit ovat 32-bittisiä RISC-arkkitehtuurin prosessoreita, joita ARM Ltd yhtiö lisensoi. Prosessorin rinnalle on mahdollista hankkia liukulukulaskentaan erikoistunut yksikkö Floating Point Unit (FPU). Lisäksi tarjolla on erilaisia lisäosia mm. turvallisuuteen ja suojaukseen. SoC-piirin valmistaja saa ARM:lta lisenssimaksua vastaan syntesoituvan Verilog RTL -koodin haluamastaan prosessorimallista ja lisäosista. Piirivalmistaja suorittaa prosessorin integroinnin omalle piirilleen yhdessä omien moduulien, virranhallinnan, kellotuksen yms. kanssa.

RISC-V on ilmainen prosessoriarkkitehtuuri, jossa on avoin käskykanta. RISC-V -spesifikaatio sisältää kokonaislukutyypiset peruskäskyt ja laajennusosat, kuten kerto- ja jako- sekä liukulukulaskuun tarvittavat käskyt. Käskykanta on jäädytetty, jolla pyritään varmistamaan, että ohjelmat toimivat kaikilla saman tyyppisillä RISC-V -prosessorityimillä myös tulevaisuudessa. RISC-V:stä on tarjolla sekä 32- että 64-bittinen käskykanta-arkkitehtuuri, joista 32-bittinen on sopivampi sulautettuihin järjestelmiin kuten Bluetooth-järjestelmäpiireihin. Piirivalmistaja voi suunnitella omia tarpeitaan vastaavan prosessorin ja integroida sen omalle SoC-piirilleen, myös valmiita RISC-V -spesifikaation täyttäviä prosessorityimiä ja SoC-toteutuksia on saatavilla GitHub:ssa. [14], [15]

2.3. Muistit

Bluetooth SoC -piirille on integroitu erityyppisiä muisteja, joista suurin muistityyppi on Flash-muisti. Muita muistityyppejä on esim. ROM-, RAM- ja OTP-muistit. Muistit kytketään piirin muihin komponentteihin sisäisillä väylillä, kuten AHB-väylällä. Kuva 2 on havainnollistettu prosessorin, RAM- ja Flash-muistien kytkentä ja esimerkki muistien jakamisesta osioihin ja sivuihin. Prosessorin suorituskykyä parantamaan on tarjolla nopea välimuisti (eng. cache). Bluetooth-piireiltä löytyy myös usein liityntä piirin ulkopuolisille muisteille.



Kuva 2. Muistit ja väyläkytkentä. NordicSemi Infocenter [18].

Flash-muistin koko on tyypillisesti 64 – 512 MB, mutta voi olla jopa 2 MB. Haihtumaton Flash-muisti sisältää mm. käyttäjän ohjelman ja talletustilan. Piirin valmistajan oma ohjelma- ja radioprotokollakoodi (eng. Firmware) on ladattu joko Flash-muistiin tai ROM-lukumuistille.

Käytönaikaista RAM-luku- / kirjoitusmuistia on tyypillisesti 32 – 256 KB. RAM-muisti on tyypillisesti jaettu useaan erilliseen osioon (eng. section) ja jokainen osio voi sisältää oman väyläkytkennän. Erilliset väyläkytkennät mahdollistavat prosessorin ja DMA:n sisältämien oheismoduulien yhtäaikaisen luku- tai kirjoitusoperaation eri RAM-muistiosioille.

Erillistä pientä kertaohjelmoitavaa OTP-muistia käytetään esimerkiksi analogiaosien kalibrointitietojen, salausavaimien yms. tietojen talletukseen, jotka pitää pystyä lukemaan luotettavasti piirin käynnistyksen yhteydessä.

2.4. Oheismoduulit

Bluetooth SoC -piireillä suoritettava laiteohjelma ja usein myös käyttöohjelma ovat luonteeltaan reaaliaikaisia, jolloin ohjelman riittävän nopeaan suorittamiseen tarvitaan

prosessorin rinnalle erilaisia oheismoduuleja (eng. peripheral). Myös eri tiedonsiirtostandardeja tukevien ulkoisten liityntöjen ohjaus hoidetaan yleensä oheismoduulien avulla. Lisäksi oheismoduulien käytöllä on mahdollista säästää virtaa, koska prosessori voidaan pitää virransäästötilassa sillä aikaa, kun oheismoduulit suorittavat tiettyä tehtävää.

Lähes kaikista markkinoilla olevista Bluetooth-piireistä löytyy useita kappaleita yleiskäyttöisiä ajastimia ja laskureita (eng. Timer / Counter / Watchdog). Myös reaaliaikalaskuri (RTC), satunnaislukugeneraattori (RNG) ja erilaiset vertailijat (eng. Comparator) kuuluvat jo perus Bluetooth SoC -piirien oheismoduulivalikoimaan.

Pulssimuotoisten signaalien muodostamiseen on käytössä erilaisia modulointimoduuleja, joilla pulssin leveyttä (PWM) ja pulssin tiheyttä (PDM) voidaan muokata. Tarvittavien parametrien asettamisen jälkeen moduulit toimivat itsenäisesti ilman prosessorin ohjausta, näin signaalin muodosta saadaan tarkempi ja signaalin taajuus voi olla suurempi kuin pelkästään prosessorilla generoiduilla pulsseilla.

Bluetooth SoC -piirit tukevat yleensä useita eri sarjamuotoisia datansiirtostandardeja kuten U(S)ART, I2C, SPI. Digitaaliseen äänen siirtoon on käytössä mm. PCM, I2S. Jotkut Bluetooth SoC -piirit tukevat myös analogisia liityntöjä, jolloin piirillä on toteutettu digitaalinen - analogia -muuntimet DAC ja ADC.

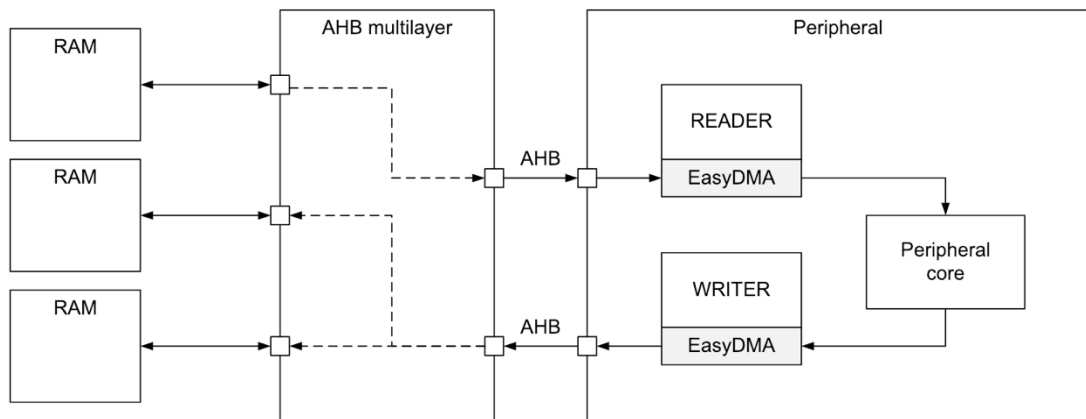
2.5. Piirin sisäiset väylät

Prossessori, muistit ja oheismoduulit kytketään yhteen piirin sisäisillä dataväylillä. Kytkeäntöjen toteutukseen on olemassa valmiita ratkaisuja, kuten yleisesti käytetty avoin ARM AMBA -protokolla. AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture) sisältää erityyppisiä väyläprotokollia, joista Bluetooth SoC -piireillä on käytössä yleensä AHB (Advanced High-performance Bus) ja APB (Advanced Peripheral Bus).

AHB-väylää käytetään prosessorin ja muistien välisenä liityntänä, jossa tarvitaan suuri läpäisy ja leveä väylänleveys. AHB-standardi tukee 32, 64, 128, 256, 512 ja 1024 -bittisiä dataväylänleveyksiä, osoiteväylä on 32-bittinen. Kommunikointi ja datansiirto hoidetaan master - slave -liityntöjen kautta. Datansiirto on mahdollista tehdä liukuhihnatyypistä purskeina (eng. burst), jolloin dataa saadaan siirrettyä mahdollisimman nopeasti jokaisella kellojaksolla.

APB-väylää käytetään moduulien kytkentään silloin kun ei tarvita suurta tiedonsiirtokapasiteettia. APB ei tue liukuhihnatyypistä datansiirtoa vaan datansiirto tehdään yksi osoite kerrallaan ja siirtoon menee vähintään kaksi kellojaksoa. APB-väylä voidaan liittää AHB-väylään siltakomponentin avulla (eng. bridge).

Oheismoduulit, jotka tarvitsevat suoran pääsyn piirin sisäiseen datamuistiin, käyttävät usein DMA-liityntää (Direct Memory Access), Kuva 3. DMA-liityntään avulla muistin luku ja kirjoitus hoidetaan erillisellä kontrollerilla ilman prosessoria. Oheismoduulin DMA-kontrolleri voidaan kytkeä piirin sisäiseen väylään, esim. AHB-väylään, joka on edelleen kytketty datamuistiin. Oheismoduulit voivat sisältää useita DMA-kontrollereita, jolloin voidaan saavuttaa yhtäaikainen luku tai kirjoitus eri muisteihin.



Kuva 3 Direct Memory Access (DMA) kytkentä. NordicSemi Infocenter [18].

Monet valmistajat käyttävät myös omia piirin sisäisiä kontrolliväyliä eri moduulien kytkentään. Esimerkiksi NordicSemi käyttää erillistä ohjelmoitavaa PPI-liityntää (Programmable Peripheral Interconnect) AHB- ja APB-väylien rinnalla oheismoduulien välisenä kytkentänä. Sen kautta oheismoduulit voivat kommunikoida toistensa kanssa suoraan ilman prosessoria. Monet reaaliaikaohjelmistot tarvitsevat tarkan synkronoinnin ja ajoituksen eri tehtävien välillä, jolloin prosessorikeskeytyksillä ei päästä riittävään tarkkuuteen. PPI-liityntän kautta voidaan lähettää ja vastaanottaa tehtäviä ja tapahtumia (eng. tasks and events) oheismoduulien välillä tarkalla ajoituksella. Esimerkiksi laskuri tai IO-pinni voi käynnistää ja pysäyttää pulssigeneraattorin tarkalla ajanhetkellä PPI:n kautta.

2.6. Suojaus

Bluetooth-datayhteys on suojattu. Bluetooth-spesifikaatio määrittelee salausalgoritmit, jotka SoC-piireillä yleensä toteutetaan omilla sisäisillä oheismoduuleilla. Suojaus perustuu AES-algoritmiin (Advanced Encryption Standard) ja käyttää 128-bittistä lohkokokoa ja avainta. AES CCM-moodi (Counter with Cipher Block Chaining – Message Authentication Code, CBC-MAC) yhdistää tietosuojan eli luottamuksellisuuden (eng. confidentiality) ja oikeuksien tarkistamisen (eng. authentication). Suojaus siis koostuu kahdesta osasta: salauksesta vastaa laskurimoodi (enc. counter mode) ja oikeuksista vastaa CBC-MAC. Bluetooth-terminologiassa ei tosin puhuta MAC- vaan MIC-ehydyntarkistuksesta (Message Integrity Check). AES ECB-moodin (Electronic codebook mode encryption) salausta voidaan puolestaan käyttää useisiin eri kryptografian funktioihin kuten digitaaliseen allekirjoitukseen ja tarkisteisiin (eng. hash).

ARM Trustzone CryptoCell on tietoturvaan suunniteltu oheismoduuli, jota ARM Ltd yhtiö lisensoi laitevalmistajien käyttöön. Se tuottaa luotettavuuden varmentamia (eng. Root of Trust, RoT) ja salausteknisiä palveluja SoC-piirille. CryptoCell tukee useita eri salaustekniikan standardeja mukaan lukien AES CCM- ja ECB-moodeja. CryptoCell-300 tuotepihe on optimoitu käytettäväksi sulautetuissa piireissä. [16]

2.7. Liitynnät ja tiedonsiirto

SoC-piirille voidaan kytkeä ulkoisia laitteita yleiskäyttöisten input/output -pinnien avulla (GPIO). Pinnien suunta ja muut parametrit sekä sisäinen kytkentä voidaan valita ohjelmallisesti. GPIO-pinneihin voidaan esimerkiksi kytkeä SoC-piirin sisäisiä oheismoduuleja, jotka toteuttavat jonkin tiedonsiirtostandardin. Näin saadaan helposti toteutettua standardin mukainen liityntä ulkoisen laitteen kanssa. Bluetooth-piiri voidaan herättää virransäästötilasta IO-pinnien kautta ulkoisella herätteellä.

2.8. Tehonhallinta

Bluetooth SoC -piirien tehonkulutusta ja kellosignaaleja hallitaan erillisen tehonhallintayksikön avulla (eng. power and clock management). Tehonkulutuksen minimoimiseksi piirillä on useita erilaisia käyttötiloja, esimerkiksi: aktiivinen, joutokäynti, valmius ja sammutettu (eng. Active, Idle, Standby and Shutdown). Piirin eri osille on myös omat sisäiset virtakytkimet, joilla käyttämättömiä moduuleja voidaan sammuttaa yksittäin tai tietyn kokoisina ryhminä. Lisäksi kellosignaalit voidaan katkaista sellaisilta rekistereiltä ja kiikuilta (eng. flip-flop), jotka eivät ole juuri sillä hetkellä aktiivisesti käytössä. Muita keinoja tehonkulutuksen minimoimiseksi on mm. (dynaaminen) jännitteen ja kellotaajuuden skaalaus tarvittavan suorituskykyvaatimuksen mukaan.

3. BLUETOOTH 5 -JÄRJESTELMÄPIIRIT

3.1. Nordic nRF52840

Nordic nRF52840 on Nordic Semiconductor yhtiön valmistama nRF52-sarjan edistyksellisin jäsen. Sen prosessori on 32-bittinen ARM Cortex-M4F, jonka apuna on liukulukulaskentayksikkö (FPU). Prosessorin kellotaajuus on 64 MHz. Piirillä on 1 MB haihtumatonta Flash-muistia ja 256 kB RAM-käyttömuistia. Piirillä ei ole ROM-muistia, sen sijaan firmware- ja protokollakoodit ladataan Flash-muistiin. Langaton kommunikointi järjestelmäpiiriin ulkopuolelle hoituu 2,4 GHz radion avulla. Bluetooth 5 ja Bluetooth Mesh -protokollan lisäksi piiri tukee IEEE 802.15.4 -standardia, mahdollistaen mm. Thread- ja Zigbee-protokollat. Bluetooth-radion lisäksi langattomaan kommunikointiin on käytössä lyhytkenttäviestintä (NFC).

Nordic nRF52840 Bluetooth SoC -piirin EEMBC CoreMark® suorituskykytestin tulos on 212.

3.2. TI CC2652R

Texas Instruments (TI) yhtiön Bluetooth 5 -protokollan järjestelmäpiiri sisältää vastaavat osat kuin edellä mainittu Nordic nRF52-sarja. Nordicin SoC-piiristä poiketen Texas Instruments käyttää piirillään erillistä ROM-muistia firmware- ja protokollakoodien talletukseen. Prosessorina TI käyttää samanlaista liukulukuyksiköllä varustettua 32-bittistä ARM Cortex-M4F -prosessoria kuin Nordic, mutta pienemmällä 48 MHz kellotaajuudella. Cortex-M4 -pääprosessorin lisäksi radioprotokollan suoritukseen on piirille integroitu Cortex-M0 -prosessori. Radio-osa tukee Bluetooth 5 -protokollan lisäksi Thread- ja Zigbee-protokollia ja ym. IEEE 802.15.4 -standardin johdannaisia.

TI CC2652R Bluetooth SoC -sisältää 352 kB sisäistä ohjelmoitavaa Flash-muistia ja 80 kB RAM-käyttömuistia. Firmware- ja protokollakoodille on varattu 256 kB ROM-muistia, niiden lisäksi ROM-muistiin voidaan ladata TI-RTOS -käyttöjärjestelmä ja tarvittavat ajurit, jolloin Flash-muisti jää kokonaisuudessaan käyttäjän ohjelmakoodille.

TI CC2652R Bluetooth SoC -piirin EEMBC CoreMark® suorituskykytestin tulos on 148.

3.3. Dialog semiconductor Smartbond DA14585 / DA14586

DA14585 & 6 ovat Dialog Semiconductor yhtiön Smartbond-piirisarjan Bluetooth 5 -standardia tukevat SoC-piirit. Pääprosessorina piireissä on 32-bittinen ARM Cortex-M0, jonka kellotaajuus on 16 MHz. BLE-radiolinkin ohjaukseen on lisäksi käytössä erillinen prosessori. Dialog Bluetooth-piirit eivät ainakaan toistaiseksi tue muita kuin Bluetooth 5 ja Bluetooth Mesh -protokollia.

DA14585 Bluetooth -piirissä ei ole sisäistä Flash-muistia, mutta ominaisuuksiltaan vastaava DA14586-piiri sisältää 1 MB sisäistä ohjelmoitavaa Flash-muistia. Molemmissa piireissä on 96 kB RAM-käyttömuistia. Käyttömuistien lisäksi on tarjolla

128 kB ROM-muistia ja 64 kB integroitua OTP-muistia (One Time Programmable memory).

Dialog Bluetooth SoC -piirille ei löytynyt EEMBC CoreMark® suorituskykytestin tulosta, joten suora vertailu Nordicin ja TI:n Bluetooth-piireihin ei onnistu. Otettaessa huomioon Dialogin käyttämä heikompi prosessori sekä selvästi alhaisempi kellotaajuus ei EEMBC tulos voisiakaan olla samaa luokkaa muiden tässä työssä esiteltyjen piirien kanssa. DA14585 Bluetooth-piiri onkin tarkoitettu sovelluksiin, jotka eivät tarvitse niin korkeaa suorituskykyä. Heikomman suorituskyvyn vastapainona DA14585 & 6 SoC -piirien kappalehinta on selvästi halvempi kuin verrokkien.

3.4. Bluetooth-markkinat ja muut valmistajat

Bluetooth-standardia tukevia SoC-piirivalmistajia on useita ja yhä kasvavia markkinoita jakamaan on tulossa jatkuvasti uusia yrittäjiä. Markkina on kuitenkin vahvasti jakautunut muutaman suurimman pelurin kesken ja Nordic Semiconductor hallitsee noin 40% markkinaosuudella Bluetooth-markkinoita (Q1/2019) [3]. Siksi muiden valmistajien on vaikea päästä sellaisiin piirien myyntimääriin, jolla bisneksen tekeminen olisi kannattavaa ja monet valmistajat jättävät kilpailun kesken. Seuraavassa on lueteltu tämän työn ulkopuolelle rajattuja pienempiä Bluetooth 5 SoC -piirivalmistajia ja -malleja:

- Silicon Labs EFR32
- Cypress PSoC 6
- Microchip RN4871
- Qualcomm CSR8670
- ST Microelectronics BlueNRG-1
- ON Semiconductor RSL10
- Realtek RTL8762A
- Toshiba TC35680FSG
- NXP QN908x

3.5. Järjestelmäpiirien vertailu

Kaikkien vertailtavien piirien radio tukee luonnollisesti Bluetooth 5 ja Bluetooth Mesh -protokollaa. Nordic ja TI tukevat lisäksi IEEE 802.15.4 -standardia, mahdollistaen mm. Thread- ja Zigbee-protokollat. Nordic SoC on ainoa, jolla on NFC-lyhytkenttäviestintä tuki (NFC-A).

Kaikki vertailtavat SoC-piirit käyttävät 32-bittisiä ARM Cortex-M -prosessoreita sekä ARM AMBA AHB/APB -väyliä. Dialog on integroinut piirilleen Cortex-M0 -perusmallin, Nordic ja TI käyttävät tehokkaampaa Cortex-M4 -prosessoria lisätynä liukulukulaskentayksiköllä. Nordic on ainoa, jolla ei ole erillistä prosessoria BLE-radio-osalle, sen sijaan radioliikenne hoidetaan pääprosessorilla sekä erillisellä radiomoduulilla.

Bluetooth-järjestelmäpiirin pinta-alasta suurin osa on tyypillisesti muisteja, jopa 50%. Radio- ja muut analogiaosat vievät piirin pinta-alasta noin 15-25%. Loput pinta-alasta on digitaalilogiikkaa, sisältäen prosessorin ja muut digitaaliset moduulit, joita

esiteltiin kappaleessa 2. Erityyppisiä muisteja vertailtavista piireistä löytyy vaihteleva määrä, lisäksi samasta piiriperheestä on monesti tarjolla useita erilaisia piirimalleja, joiden ainoat erot saattavat olla muistin määrässä. Käyttäjällä on siis mahdollisuus valita omalle sovellukselleen kustannustehokkain vaihtoehto.

Vertailtavien Bluetooth SoC -piirien radio, prosessorit ja eri muistityypit on listattu tarkemmin Taulukko 1.

Taulukko 1. Radio, prosessori ja muistit

Ominaisuus	Bluetooth SOC piirit		
Radio	Nordic	TI	Dialog
Moodit	BLE IEEE 802.15.4 ANT Proprietary	BLE IEEE 802.15.4	BLE
Taajuus	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Vastaanottimen herkkyys @ 125 kbps	103 dBm	105 dBm	93 dBm
NFC	Yes	No	No
Prosessori	Nordic	TI	Dialog
Tyyppi	Cortex M4F	Cortex M4F	Cortex M0
Kellotaajuus	64 MHz	48 MHz	16 MHz
Erillinen baseband prosessori	No	Yes	Yes
Muistit	Nordic	TI	Dialog
Flash	1024 kB	352 kB	No / 1024 kB
OTP	No	No	64 kB
ROM	No	256 kB	128 kB
RAM	256 kB	80 + 8 kB	96 kB
Cache	Yes	Yes	No
OTA upgrade	Nordic	TI	Dialog
Firmware päivitys	Yes	Yes	No

Taulukko 2 listaa vertailtavien Bluetooth SoC -piirien liitynnät ja eri oheismoduulien määrän. GPIO-piennien määrä on ilmoitettu kyseisen piirin suurimman pakkauskoon mukaan.

Taulukko 2. Liitynnät ja oheismoduulit

Ominaisuus	Bluetooth SOC piirit		
	Nordic	TI	Dialog
Liitynnät			
GPIO	48	31	32
USB	1	No	No
UART	2	2	2
QSPI	1	No	No
SPI	3	2	1
I2C	2	1	1
PDM	1	Using I2S	1
I2S	1	1	1
Oheismoduulit	Nordic	TI	Dialog
Timer	5 (32 bit)	4 (32 bit)	2 (16 bit)
RTC	3	1	No
Watch dog	1	1	1
RNG	1	1	No
PWM	4	Using timers	Using timers
Comparator	2	2	1
ADC	1	1	1
DAC	No	1	No
EAS	Yes	Yes	No
RSA	Yes	Yes	No
SHA	Yes	Yes	Yes
Temp sensor	Yes	Yes	No
Battery monitor	Yes	Yes	Yes (Using ADC)

Piirien tehonkulutus vaihtelee suuresti eri käyttötilojen mukaan, virrankulutuslukemia on vertailtu Taulukko 3. SoC-piirien datalehtien perusteella vertailukelpoiset kulutuslukemat löytyivät BLE-lähetys ja -vastaanotto sekä ”Pin wakeup” tiloille. Valmiustilan virrankulutus on ilmoitettu datan säilyttäminen päällä (eng. retention), jolloin SoC-piirin suurempi RAM-muistin määrä lisää virrankulutusta. Nordic ja TI ovat myös vertailukelpoisia ”(CPU) Active” tilassa, jossa molemmat suorittavat CoreMark-testiä ilman BLE-radiota. Dialog ilmoittaa ”Active”-tilan virrankulutuksen tyypilliselle sovellukselle BLE-radiolähetys päällä, jolloin virrankulutuksesta pitäisi poistaa ainakin BLE-lähetysten osuus, jotta saataisiin muihin vertailukelpoinen lukema.

Suurin puolijohdepiirien hintaan vaikuttava tekijä on piirin pinta-ala. Koska suuri osa pinta-alasta on tyypillisesti muisteja, on piirin sisäisen muistin määrä ratkaiseva tekijä piirin hinnoittelussa. Esimerkiksi Dialog 14586 -piirin sisältämä 1 MB Flash-muistia nostaa piirin myyntihintaa noin 30% verrattuna vastaavaan Dialog 14585 -malliin ilman sisäistä Flash-muistia. Vertailtavien Bluetooth SoC -piirien ja kehitysalustojen myyntihinnat on esitetty Taulukko 3.

Taulukko 3. Virrankulutus, pakkaus ja hinta

Ominaisuus	Bluetooth SOC piirit		
Virrankulutus	Nordic	TI	Dialog
RX (Bluetooth vastaanotto)	6,26 mA	6,90 mA	3,70 mA
TX @ 0 dBm (Bluetooth lähetys)	6,40 mA	7,30 mA	3,40 mA
Active (CPU running CoreMark)	2,80 mA	3,39 mA	4,90 mA (with Tx)
Sleep / Standby (full RAM retention)	2,35 uA (256KB RAM)	0,94 uA (80KB RAM)	4,00 uA (96KB RAM)
Deep sleep (Pin wakeup, no retention)	0,40 uA	0,15 uA	0,52 uA
Käyttöjännite	Nordic	TI	Dialog
Jännitealue	1,7 - 5,5 V	1,8 - 3,8 V	1,5 - 3.3 V
Pakkausvaihtoehdot	Nordic	TI	Dialog
Tyyppi 1, koko	AQFN73, 7 x 7 mm	VQFN48, 7 x 7 mm	QFN48, 6 x 6 mm
Tyyppi 2, koko	WLCSP93, 3,54 x 3,61 mm	DSBGA54 3,09 x 3,50 mm	QFN40, 5 x 5 mm
Tyyppi 3, koko			WLCSP34, 2,40 x 2,66 mm
Hinta SoC (kpl)	3,65 €	2,70 €	1,45 € 1,85 € with Flash
Hinta kehitysalusta	42 €	36 €	35 €

4. KEHITYSALUSTAT JA OHJELMOINTITYÖKALUT

4.1. Ohjelmointityökalut

Bluetooth SoC -piirien ohjelmointiin käytetään usein ilmaisia kääntäjiä kuten GCC, GNU Compiler Collection [9] ja LLVM Compiler Infrastructure [10]. Ohjelmointiympäristönä voidaan käyttää ei-kaupallisia integroitua kehitysympäristöjä (IDE) kuten Eclipse [11], mutta niiden käyttö SoC-piirien ohjelmistokehitykseen vaatii usein syvempää tuntemusta sopivista kääntäjistä, ajureista ja tarvittavista asetuksista. Siksi kannattaa tutustua valmistajien omiin sekä kaupallisiin kehitysympäristöihin, joilla pääsee yleensä helpommin ohjelmistokehityksen alkuun, myös ohjelman testaus ja virheenkorjaus on niillä usein helpompaa.

SEGGER Embedded Studio (SES) on integroitu kehitysympäristö sulautettujen järjestelmien C/C++ -ohjelmistokehitykseen. SES sisältää projektin hallinnan, lähdekoodieditorin, C/C++ -kääntäjät, debuggerin ja suoran J-Link -liittymän ohjauksen kehitysalustalle. Embedded Studio tarjoaa tuen ARM ja RISC-V -sarjan mikrokontrollereille. Ohjelmistosta on nykyään saatavilla myös Linux ja Mac OSX-versiot Windows-version lisäksi. Kehitysympäristön käyttö on lisenssivapaata ei-kaupallisissa projekteissa tai piirivalmistajien lisenssiyhteistyösopimuksen kautta. [8]

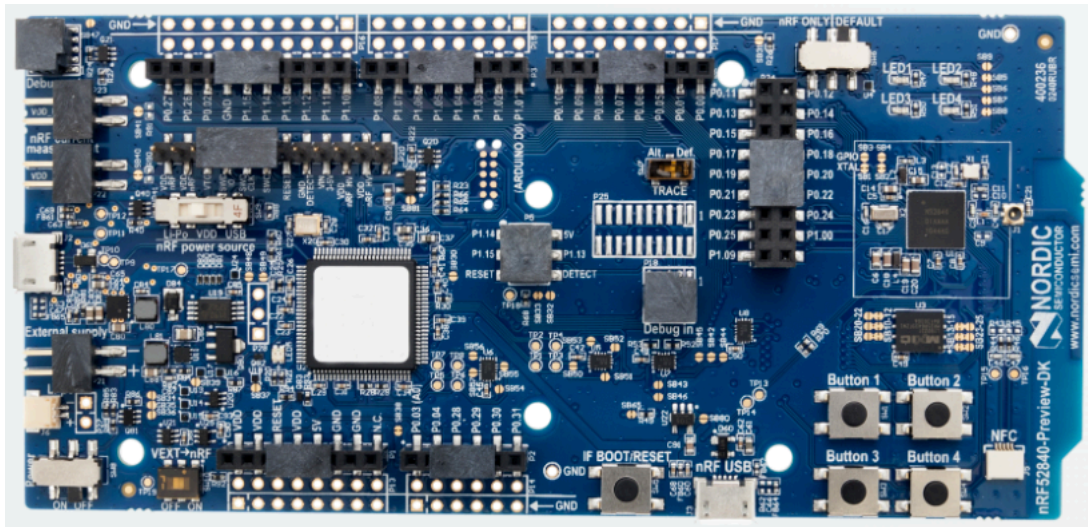
Nordic Semiconductor tarjoaa nRF52-sarjan SoC-piirien Bluetooth-ohjelmistokehitykseen valmiit ajurit ja protokollapinon sekä useita esimerkkiohjelmiä. Nordicin nimi esikäännetylle langattomalle protokollapinolle on SoftDevice ja sitä käytetään kaikissa nRF5-sarjan kehitysalustoille tehdyissä esimerkkiohjelmissä. Kaikki nämä toimitetaan nRF5 SDK (Software Development Kit) mukana, joten myös aloittelija pääsee nopeasti ohjelmistokehityksessä alkuun. Nordic ja Segger ovat tehneet lisenssisopimuksen, jolla nRF piirien ohjelmointiin voidaan käyttää ilmaiseksi kaupallista Embedded Studio -ohjelmistoa. [19]

Texas Instruments tarjoaa vastaavat ohjelmistokehitystyökalut kuin Nordic ja ne toimitetaan SimpleLink 26x2 SDK mukana [20]. Bluetooth-ohjelmistojen kehitykseen tarkoitettujen protokollapinon lisäksi TI:llä on tarjolla oma reaaliaikakäyttöjärjestelmä TI-RTOS [12] sekä integroitu kehitysympäristö Code Composer Studio (CCS), josta on saatavilla versiot Windows, MacOS ja Linux käyttöjärjestelmille [21].

Dialog Semiconductor tarjoaa myös omia työkaluja ohjelmistokehitykseen, mutta työkalupaletti on rajoittuneempi kuin mitä Nordic ja TI tarjoaa. Dialog SmartSnippets Studio sisältää tarvittavat SDK-työkalut, mutta ohjelmistokehitysympäristönä pitää käyttää jotain ei-kaupallista ympäristöä tai KEIL μ Vision IDE ympäristöä, jonka ilmaisessa Lite-versiossa ohjelmakoodin koko on rajoitettu 32 kilotavuun. SmartSnippets käyttöopas sisältää esimerkit Eclipse/GCC projektin luomiseen sekä KEIL ympäristön asentamiseen. SmartSnippets Studio on saatavilla vain Windows- ja Linux-käyttöjärjestelmille ja KEIL μ Vision ympäristöstä on ainoastaan Windows-versio. [13]

4.2. Nordic nRF52 development kit

Nordic nRF52 -järjestelmäpiiriin perustuva kehitysalusta (nRF52 DK) sisältää kaikki tarvittavat analogiaosat järjestelmäpiiriin toimintaan sekä liitännät järjestelmäpiiriin ohjelmointiin ja testaukseen. Kaikki nRF52-piiriin GPIO-portit ja liitännät ovat saatavilla kehitysalustan reunalla olevista liittimistä. Lisäksi alustalta löytyy neljä painonappia ja neljä lediä. Nordic nRF52 -kehitysalusta on yhteensopiva Arduino Uno -liityntästandardin kanssa, jolloin siinä voidaan käyttää hyväksi Arduino:lle suunniteltuja lisäkortteja (eng. shield) laajentamaan kehitysalustan ominaisuuksia.



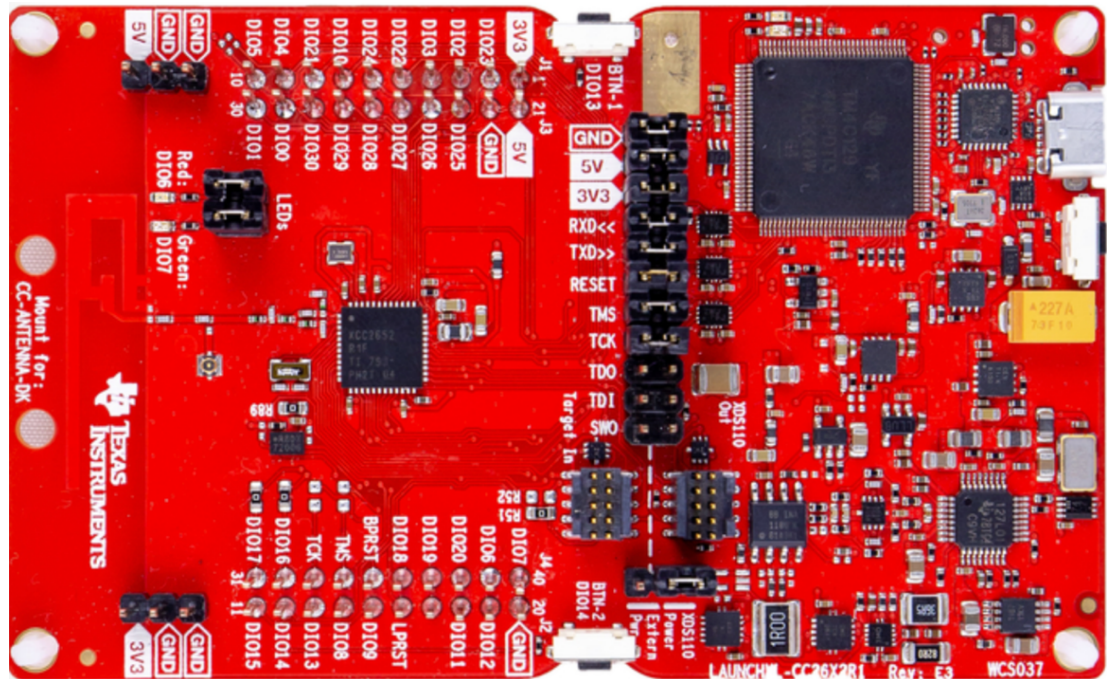
Kuva 4. Nordic nRF52840 Development Kit. [23]

Kehitysalusta tukee Nordicin ohjelmistokehitysokaluja käyttäen apunaan KEIL-, IAR- ja GCC-ohjelmia. Kehitysympäristönä voidaan käyttää ilmaiseksi myös kaupallista Segger Embedded Studio (SES) -ohjelmistoa, ja NordicSemi suosittelee sen käyttöä. Järjestelmäpiiriin ohjelmointi ja testaus tapahtuu Segger J-Link on-board -debuggerin avulla. Segger J-link OB on kehitysalustalle integroitu mikrokontrolleri, jossa on ohjaus ulkopuoliselle USB-liitynnälle ja JTAG/SWD + SWO -liityntä järjestelmäpiiriin ARM-prosessorin ohjelmointiin sekä ohjelman jäljitykseen ja virhenkorjaukseen (eng. trace & debug). [23], [24]

4.3. TI CC26x2R LaunchPad development kit

Texas Instruments LaunchPad -kehitysalusta sisältää CC2652 SoC -piiriin sekä tarvittavat analogiaosat järjestelmäpiiriin toimintaan. Järjestelmäpiiriin ohjelmointi ja testaus hoidetaan erillisen mikrokontrollerin avulla. Kaikki CC2652-piiriin GPIO-portit ja muut liitännät ovat saatavilla kehitysalustan reunan kahdesta 20-pinnisistä liittimestä. Reunan liittimet ovat TI BoosterPack yhteensopivat, joten niihin voidaan kytkeä erillisiä lisäkortteja laajentamaan kehitysalustan ominaisuuksia. Lisäksi alustalta löytyy kaksi painonappia ja kaksi lediä. Myös TI:n kehitysalusta liitetään tietokoneeseen USB-liitynnän kautta ohjelmointia ja testausta varten.

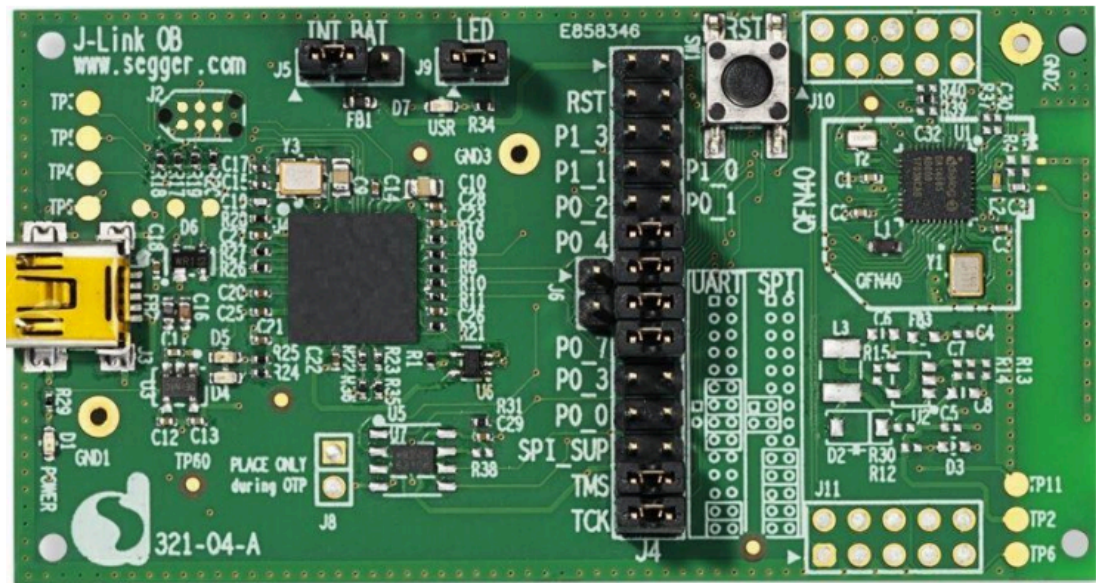
Kehitysympäristönä kannattaa käyttää TI:n omaa Code Composer Studio IDE -ohjelmistoa.



Kuva 5. TI CC2562 LaunchPad Development Kit. [25]

4.4. Dialog DA14585 development kit

Dialog DA14585 Basic Kit -kehitysalusta sisältää myös kaiken tarvittavan ulkoisen logiikan järjestelmäpiiriin käyttämiseen. Kaikki DA14585-piiriin GPIO-portit ovat saatavilla kehitysalustan keskellä ja reunalla olevista liittimistä, niiden lisäksi alustalta löytyy pinnit UART-, SPI- ja I2C-liittymöille. Dialogin kehitysalustalla on samanlainen Segger J-Link OB mikrokontrolleri järjestelmäpiiriin ohjelmointiin ja testaukseen kuin Nordicin DK:lla. Ohjelmointiin käytetään USB-liityntää, kuten muissakin kehitysalustoissa. Koska DA14585 ei sisällä sisäistä Flash-muistia, on kehitysalustalla ulkoinen 2 MB data-Flash-muisti, joka kommunikoi SoC kanssa SPI-väylän kautta. [22]



Kuva 6. Dialog DA14585 Basic Kit. [22]

5. YHTEENVETO

Bluetooth 5 -järjestelmäpiirit tukevat useita tiedonsiirtoprotokollia, joista suosituimmat ovat Bluetooth 5 -protokollan lisäksi IEEE 802.15.4 -standardiin perustuvat protokollat Thread, Zigbee, ym. Prosessorina suurin osa järjestelmäpiirin valmistajista käyttää ARM Cortex-M -sarjan prosessoreja ja sisäisinä väylinä ARM AMBA AHB ja APB -väyliä. Käyttömuistina suosituin vaihtoehto on sisäinen haihtumaton Flash-muisti yhdessä sisäisen RAM-muistin kanssa. Myös oheismoduulivalikoima on melko lailla yhtenevä valmistajasta riippumatta, eroavaisuuksia löytyy lähinnä moduulien määrässä.

Harrastajan budjetille sopivia kehitysalustoja löytyy usealta valmistajalta. Hankintahinta jää helposti alle viidenkymmenen euron ja monelta valmistajalta löytyy joko oma tai lisensoitu kaupallinen kehitysympäristö (IDE) sekä oma ohjelmistonkehityspaketti (SDK). Bluetooth-ohjelmistonkehitys on helppoa aloittaa hankkimalla esimerkiksi tässä työssä esitelty Nordic Semiconductor nRF52 DK tai Texas Instruments CC2652 LaunchPad DK -kehitysalusta.

6. LÄHTEET

- [1] Bluetooth SIG (Special Interest Group), Bluetooth Specifications. URL: <https://www.bluetooth.com/specifications>
- [2] Bluetooth SIG, Bluetooth market update 2018 URL: <https://www.bluetooth.com/markets>
- [3] ABI Research, Market analysis. URL: <https://www.abiresearch.com/market-research/service/wi-fi-bluetooth-wireless-connectivity/>
- [4] Nordic Semiconductor, Low power short range wireless products. URL: <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless>
- [5] Nordic Semiconductor Documentation library, nRF52840 Product Specification. URL: https://www.nordicsemi.com/-/media/DocLib/Other/Product_Spec/nRF52840PSv10.pdf
- [6] Texas Instruments, CC2652R Datasheet. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2652r.pdf>
- [7] Dialog Semiconductor, DA14585 Datasheet. URL: https://www.dialog-semiconductor.com/sites/default/files/da14585_datasheet_3v3.pdf
- [8] SEGGER Microcontroller GmbH, Embedded Studio. URL: <https://www.segger.com/products/development-tools/embedded-studio/>
- [9] GNU Compiler Collection (GCC). URL: <https://gcc.gnu.org/>
- [10] LLVM Compiler Infrastructure. URL: <https://llvm.org/>
- [11] Eclipse Foundation, IDE. URL: <https://www.eclipse.org/ide/>
- [12] Texas Instruments, TI-RTOS: Real-Time Operating System for Microcontrollers. URL: <http://www.ti.com/tool/TI-RTOS-MCU>
- [13] Dialog Semiconductor, SmartSnippets Studio User Manual. URL: https://www.dialog-semiconductor.com/sites/default/files/user_manual_um-b-057.pdf
- [14] RISC-V Specification. URL: <https://riscv.org/specifications/>
- [15] RISC-V Cores and SoC overview, GitHub. URL: <https://github.com/riscv/riscv-wiki/wiki/wiki/RISC-V-Cores-and-SoCs>
- [16] ARM TrustZone CryptoCell-300. URL: <https://developer.arm.com/ip-products/security-ip/cryptocell-300-family>

- [17] Silicon Labs, Blue Gecko Bluetooth SoC. URL: <https://www.silabs.com/products/wireless/bluetooth/blue-gecko-bluetooth-low-energy-socs>
- [18] Nordic Semiconductor, Infocenter. URL: <https://infocenter.nordicsemi.com>
- [19] Nordic Semiconductor, nRF5 SDK. URL: <https://www.nordicsemi.com/Software-and-Tools/Software/nRF5-SDK>
- [20] Texas Instruments, CC26x2 SDK. URL: <http://www.ti.com/tool/SIMPLELINK-CC13X2-26X2-SDK>
- [21] Texas Instruments, Code Composer Studio IDE. URL: <http://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>
- [22] Dialog Semiconductor, DK User Guide. URL: https://www.dialog-semiconductor.com/sites/default/files/um-b-048_da14585da14586_getting_started_guide_v2.0_0.pdf
- [23] Nordic Semiconductor, nRF52840 DK. URL: <https://www.nordicsemi.com/Software-and-Tools/Development-Kits/nRF52840-DK>
- [24] SEGGER Microcontroller GmbH, J-Link OB. URL: <https://www.segger.com/products/debug-probes/j-link/models/j-link-ob/>
- [25] Texas Instruments, CC26x2 LaunchPad DK. URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-CC26X2R1>