



**SAVONIA**

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# BLUETOOTH LOW ENERGY EKG-LÄHETIN

TEKIJÄ: Ville Tikkanen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Elektroniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Ville Tikkanen			
Työn nimi Bluetooth low energy EKG-lähetin			
Päiväys	19.4.2013	Sivumäärä/Liitteet	56
Ohjaaja(t) Vaino Maksimainen, Aki Tiihonen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Mega Elektroniikka Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä markkinaselvitys tarjolla olevista Bluetooth low energy-moduuleista ja mikropiireistä. Tehdyn selvityksen perusteella valittiin yksi tuote, johonka pohjautuvalla kehitysalustalla tutkittiin ohjelmoimalla jatkuvan EKG-signaalin mittausta, analogia-digitaalimuunnosta sekä muunnetun datan lähetystä päätelaitteelle. Keskeisenä osa-alueena oli Bluetooth low energy -teknologian hyödyntäminen työn toteutuksessa. Työn tarkoituksena oli tarkastella Bluetooth low energy langattoman tiedonsiirtoteknologian soveltuvuutta EKG-signaalia mittaavan anturin keräämän datan välittämiseen päätelaitteelle.</p> <p>Työ toteutettiin Kuopiolaiselle Mega Elektroniikka yritykselle, joka suunnittelee, kehittää sekä valmistaa biosignaalin mittaamiseen käytettäviä laitteistoja. Useissa heidän tuotteissa hyödynnetään Bluetooth-teknologiaa moduulien avulla anturin ja päätelaitteen väliseen tiedonsiirtoon. Tämän hetkiset laitteet pohjautuvat tällä hetkellä jo vanhempiin Bluetooth -protokolliin ja näin ollen tarve selvitystyölle alkoi olla paikallaan.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena ohjelmoitiin CC2540-mikropiiriin pohjautuva kehitysalusta mittaamaan ja muuntamaan jatkuvaa EKG-signaalia sekä lähettämään muunnettu data päätelaitteelle, jossa vastaanotetusta datasta piirrettiin graafia reaaliajassa Mega Elektroniikan omalla vastaanotto-ohjelmistolla. Lopputuloksena saatiin Bluetooth low energy Heart Rate Sensor -profiilin mukainen toimiva ohjelmisto, joka on helposti räätälöitävissä tarpeiden mukaan.</p>			
Avainsanat Bluetooth, Bluetooth low energy, Bluetooth Smart, BLE, ECG, EKG			
Julkinen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electronic Engineering			
Author(s) Ville Tikkanen			
Title of Thesis Bluetooth Low Energy ECG-transmitter			
Date	April 19, 2013	Pages/Appendices	56
Supervisor(s) Mr Väinö Maksimainen, Principal Lecturer and Aki Tiihonen, Operations Director			
Client Organisation /Partners Mega Electronics Ltd			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this project was to conduct a market research of available Bluetooth low energy modules and ICs. One of the key aspects of this project was to implement Bluetooth low energy for data transfer.</p> <p>On the basis of the survey the most suitable product was selected which was used to measure a continuous ECG-signal. Analog-to-digital conversion was made to the ECG-signal which was then transmitted to the receiver by using wireless data transfer. The project was commissioned by a local Mega Electronics company which focuses on designing and manufacturing equipment used in the measurement of human based biosignals. Many of their current products uses Bluetooth for data transfer between a sensor and a terminal device. Current devices are based on older versions of Bluetooth, and therefore products using the new version of Bluetooth need to be researched.</p> <p>The work was conducted by using a development platform which is based on CC2540-IC. The platform was programmed to measure and convert a continuous ECG-signal and transmit the converted data by using BLE. As a result of the project, a working program was made which is based on BLE Hear Rate Sensor-profile.</p>			
Keywords Bluetooth, Bluetooth low energy, Bluetooth Smart, BLE, ECG, EKG			
Public			

## ESIPUHE

Tein opinnäytetyöni opintojeni ohella Kuopiossa alkuvuonna 2013. Työtä tehdessä sain laajalti kokemusta biosignaalien mittaamiseen käytettävästä elektroniikasta, sulautettujen laitteiden ohjelmoinnista sekä langattomasta tiedonsiirrosta ja sen toteuttamisesta Bluetooth low energy-tekniologialla.

Haluan kiittää Mega Elektroniikka Oy:n Arto Remestä ja Aki Tiihosta opinnäytetyöni mahdollistamisesta, Sami Hynystä ja Heikki Turusta omasta osuudestaan työni loppuun saattamisessa ja opinnäytetyöni ohjaajaa yliopettaja Väinö Maksimaista sekä kaikkia muita, jotka ovat olleet avustamassa opinnäytetyötäni.

Kuopiossa 19.4.2013

Ville Tikkanen

# SISÄLTÖ

LYHENTEET JA KÄSITTEET .....	7
1 JOHDANTO .....	9
2 MARKKINASELVITYYS BLUETOOTH LOW ENERGY TUOTTEISTA.....	10
2.1 Bluetooth-tekniikan toteutustavat.....	10
2.1.1 Moduulit .....	11
2.1.2 Application Specific Integrated Circuit.....	11
2.1.3 Bluetooth-piirisarjat.....	12
2.2 Tuotevertailu .....	12
2.2.1 Bluegiga BLE112 .....	12
2.2.2 Blueradios BR-LE4.0-S2 .....	13
2.2.3 connectBlue OLP425 .....	14
2.2.4 Panasonic PAN1720.....	14
2.2.5 Texas Instruments CC2540 .....	15
3 VALITTU TUOTE.....	17
4 BLUETOOTH LOW ENERGY .....	19
4.1 Bluetooth low energy protokollapinon rakenne.....	20
4.1.1 Physical Layer (PHY) .....	22
4.1.2 Link Layer.....	23
4.1.3 HCI .....	27
4.1.4 L2CAP .....	27
4.1.5 Security Manager .....	28
4.1.6 Generic Acces Profile .....	28
4.1.7 ATT.....	29
4.1.8 Generic Attribute Profile.....	30
5 TEXAS INSTRUMENTS CC2540 .....	33
5.1 CC2540 Ohjelmointiympäristö .....	33
5.1.1 Operating System Abstraction Layer (OSAI) .....	33
5.1.2 Hardware Abstraction Layer (HAL) .....	36
5.1.3 BLE-protokollapino .....	36
5.1.4 Profilit.....	36

5.1.5	Sovellus.....	37
6	TOTEUTUS.....	38
6.1	Työkalut.....	41
6.2	Mittauskytkentä .....	44
6.3	Analogiasignaalin mittaus ja AD-muunnos .....	45
6.4	Tiedon lähettäminen kehitysalustalla .....	46
6.5	Datan vastaanottaminen Mega Elektronikan ohjelmistolla .....	47
7	POHDINTA.....	49

## LYHENTEET JA KÄSITTEET

8051	Intelin kehittämä suoritinarkkitehtuuri.
ADC	(Analog-to-digital converter) Analogia-digitaalimuunnin. On mikrokontrollerin suorittama operaatio analogiasignaalin muuntaminen digitaaliseen muotoon.
ASIC	Application Specific Integrated Circuit. Sovelluskohtainen mikropiiri, joka on suunniteltu tietyn valmistajan vaatimuksien mukaan.
Bluetooth	Langattomaan 2,4GHz-aallonpituudella tapahtuvaan tiedonsiirtoon kehitetty avoin standardi, jota ylläpitää Bluetooth SIG (Special Interest Group)
BLE	Bluetooth Low Energy, kts.Single mode.
BOM	(Bill of material) Osaluettelo, listaus kaikista materiaaleista lopputuotteen rakennusta varten.
CC2540	Texas Instrumentsin kehittämä Bluetooth low energy-SoC.
Classic Bluetooth	Käytetään usein kuvaamaan Bluetooth-standardeja aina 2.1+EDR asti.
Debug	Menetelmä, jolla pyritään löytämään mahdolliset virheet ohjelmakoodista
Dual-mode	Bluetooth 4.0-standardin mukaisen matalan virrankulutuksen sekä nopean 3.0 HS-yhteyden mahdollistava piirisarja. Yhteensopiva kaikkien Bluetooth-protokollien kanssa.
EKG (ECG)	Elektrokardiogrammi, arkikielessä sydänfilmi.
Flash	Haihtumaton puolijohdemuistityyppi, tänne ohjelmoidaan mikropiirille tuleva ohjelmakoodi.
GPIO	General Purpose Input/Output. Mikropiiriin liityntänasta, joka voidaan ohjelmallisesti ohjelmoida joko sisään- tai ulostuloksi.
HS	Bluetooth 3.0-standardin nopeatoiminen yhteysmuoto, joka tarjoaa Classic Bluetoothiin ominaisuudet sekä mahdollisuuksien mukaan käyttää hyväkseen mahdollisia WLAN-tukiasemia suurien nopeuksien saavuttamiseen.
Kehitysympäristö	Tarkoitetaan ohjelmointityökaluja, joilla ohjelmakoodi tuotetaan mikrokontrollerille.
Mikropiiri	Puolijohdekomponentti, johon on integroitu suuri määrä niin passiivisia kuin aktiivisia elektroniikan komponentteja.
MCU	Microcontroller Unit, sulautetun elektroniikan suoritusyksikkö.
Mega Elektroniikka	Kuopiolainen biosignaalien mittaamiseen käytettäviä laitteistoja suunnitteleva ja tuottava yritys
Moduuli	Tässä tapauksessa useista eri osista esim. mikropiireistä, elektroniikan komponenteista ja piirilevystä koostuva valmis kokonaisuus.
Suoritin	Ohjelmakoodia suorittava sekä laitteistoa ohjaava yksikkö.
Protokolla	Standardi, joka määrittelee tässä tapauksessa langattoman yhteyden toimintaperiaatteen laitteistovaatimuksineen.
Prototyyppi	Ensimmäinen versio tuotekehityksen varsinaisesta tuotteesta.
RAM	Puolijohdemuistityyppi, jonka sisältö tyhjenee virran katkaisun yhteydessä.

ROM	Lukumuisti, jonne tallennettu tieto pysyy siellä ja yleensä sitä ei voi muokata käytön aikana.
RX	Receive, vastaanottotapahtumaa kuvaava lyhenne.
Sigma-Delta	AD-muuntimen käyttämä menetelmä analogia signaalin muuntamiseen digitaaliseksi. Tämä menetelmä sopii hyvin signaaleille, jotka muuttuvat nopeasti niin taajuus- kuin jännitetasossa.
Single mode	Bluetooth 4.0-spesifikaation matalaan virrankulutukseen tähtäävä protokolla, joka toimii murto-osalla classic Bluetoothin vaatimasta virrasta. Ei ole yhteensopiva vanhempien protokollien kanssa.
SoC	(System-on-Chip) Elektroniikassa käytetty termi kuvaamaan mikropiiriä, joka sisältää runsaasti oheiselektronikkaa ja puolijohdekomponentteja varsinaisen kohdepiirin lisäksi.
TI	Texas Instruments, johtava puolijohdekomponentteja suunnitteleva ja valmistava yritys.
TX	Transmit, lähetystapahtumaa kuvaava lyhenne.
WiFi	Langaton tiedonsiirtoteknologia, tunnetaan paremmin nimellä WLAN.



## 1 JOHDANTO

Aiheen Bluetooth low energy -pohjaiselle jatkuvalla EKG-datan mittausjärjestelmän selvitys- sekä prototyypin rakennustyölle sain paikalliselta Mega Elektroniikka yritykseltä. Mega Elektroniikka valmistaa biosignaalien mittaamiseen käytettäviä laitteistoja ja useissa heidän tuotteissa hyödynnetään Bluetooth-moduuleita anturin ja päätelaitteen väliseen tiedonsiirtoon. Tämän hetkiset laitteet pohjautuvat tällä hetkellä jo vanhempiin Bluetooth protokolliin ja näin ollen tarve selvitystyölle alkoi olla paikallaan.

Bluetooth-standardi on päivittynyt melkoisesti viime vuosina ja uusimman 4.0 spesifikaation sekä sen mukana tulleen Bluetooth low energy protokollan myötä se tarjoaa murto-osaan pudonneen virrankulutuksen edeltäviin protokolliin verrattuna. Näin ollen se soveltuu erittäin hyvin Mega Elektroniikan sensorituotteisiin, joiden toimintaa osittain rajoittaa rajallinen akkukapasiteetti ja laitteiston virrankulutus sekä asiakaskunnalta tulleet kyselyt BLE-tekniikkaa hyödyntävistä laitteista.

Selvitystyön tarkoituksena on kartoittaa markkinoilta sellaiset Bluetooth-moduulit ja mikropiirit, jotka on toteutettu SoC-tekniikalla eli ne pitävät sisällään tarpeellisen oheiselektroniikan BLE-osion lisäksi toimivan laitteiston rakentamista varten hyvin pienillä kustannuksilla. Tällaiset Bluetooth-moduulit ja SoC-mikropiirit tarjoavat myös laajan liitettävyyden ja niihin voidaan liittää monenlaisia antureita sekä muuta oheiselektroniikkaa käyttötarkoituksesta riippuen. Selvitystyössä tulee myös käydä ilmi vertailtavien laitteistojen ominaisuudet ohjelmistoympäristöineen, että niistä voidaan tehdä lopullinen valinta viimeisessä vaiheessa tehtävää prototyypin ohjelmointia ja rakennusta varten.

## 2 MARKKINASELVITYS BLUETOOTH LOW ENERGY TUOTTEISTA

Selvitystyössä tutkin niin puolijohdekomponentti- kuin Bluetooth-valmistajien kotisivuja selvittääkseni tämän hetkisen tilanteen markkinoilla olevista Bluetooth-moduuleista sekä mikropiireistä. Tutkin myös huomattavan määrän erilaisia artikkeleita ja uutisotsikoita elektroniikka-alan julkaisuista mahdollisesti lähiaikoina markkinoille tulevien tuotteiden varalta.

Vaatumuksena vertailuun tuleville moduuleille ja mikropiireille on niiden valmistustapa eli niiden täytyy olla toteutettu SoC-tekniikalla (System-on-Chip). SoC-tekniikka tarkoittaa, että ne sisältävät itsessään jo kaiken olennaisen toimivan laitteiston rakentamiseksi huomattavasti vähemmällä oheiselektroniikan määrällä. Tämä mahdollistaa alhaisemmat tuotanto- ja suunnittelukustannukset. Edellisen vaatimuksen lisäksi niiden täytyy olla toteutettu uusimman Bluetooth-spesifikaation low energy-tekniikalla.

Lopulliseen selvitykseen tulee korkeintaan 5 parhaiten soveltuvaa moduulia tai mikropiiriä, joiden olennaisimmista ominaisuuksista tehdään listaus mm. seuraavista asioista.

- Kehitysympäristö
- Ohjelmointikapasiteetti
  - Mikrokontrolleri
  - Muisti
- Tekniset ominaisuudet
- Oheiselektroniikan liitettävyyden ja käytettävyyden.

Näiden perusteella yritys valitsee seuraavan vaiheeseen parhaiten soveltuvan tuotteen, josta tilataan tähän tarkoitukseen parhaiten soveltuva kehitysalusta. Kehitysalusta ohjelmoidaan mittaamaan jatkuvaa EKG-signaalia, tekemään sille AD-muunnos ja lähettämään muunnettu data BLE-yhteyden yli päätelaitteelle.

### 2.1 Bluetooth-tekniikan toteutustavat

Bluetooth tekniikan sisällyttäminen lopputuotteeseen voidaan käytännössä toteuttaa kolmella eri tavalla ja ne ovat moduuli (Module), piirisarja (Chip sets) sekä sovelluskohtainen mikropiiri (ASIC). Tässä vertailussa ASIC-tekniikan tilalla keskitytään System-on-Chip (SoC) vaihtoehtoon, koska ASIC-menetelmällä tuotetut mikropiirit ovat yleensä suunnattu jonkun tietyn valmistajan tarpeisiin ja näin ollen soveltuvat huonosti muiden tuotteisiin mikäli niitä on ylipäättäen saatavilla. SoC-menetelmä on vastaavanlainen tuotantotapa, paitsi sen suunnittelun lähtökohtana on laajan asiakaskunnan tarpeiden täyttäminen. (EE Times-Asia, 2002)

Bluetooth-tekniikan käyttöönoton menetelmiä ja riskejä on vertailtu yrityksen näkökulmasta taulukossa 1, josta käy ilmi erilaisten teknologioiden hintojen, riskien, monimutkaisuuden, kehityssajan ja lopputuotteen koon vertailua keskenään.

TAULUKKO 1. Erilaisten Bluetooth-tekniikoiden käyttöönotto vertailua yrityksen näkökulmasta (EE Times-Asia, 2002)

Bluetooth-tekniikan toteutustapojen vertailu					
	Hinta	Riski	Monimutkaisuus	Kehitysaika	Kokoluokka
<b>Bluetooth Moduuli</b>	Korkea	Matala	Matala	Erittäin nopea	Erittäin suuri
<b>Piirisarja</b>	Keskitaso	Matala	Keskitaso	Nopea	Keskitaso
<b>ASIC</b>	(a)	(b)	Korkea	(c)	Erittäin pieni

(a)=Korkea yrityksen sisäisesti kehitettynä, keskitasoa/matala mikäli käytetään lisensoituja valmiita piirejä. Pitkällä aikavälillä kustannukset voi olla alhaisimmat kaikista kolmesta.  
 (b) Korkea yrityksen sisäisesti kehitettynä, keskitasoa mikäli käytetään lisensoituja valmiita piirejä.  
 (c) Hidas yrityksen sisäisesti kehitettynä, nopea kun käytetään lisensoituja valmiita piirejä.

### 2.1.1 Moduulit

Bluetooth-moduulit ovat yleensä helpoin ratkaisu lisätä omaan tuotteeseen langattomuus tiedonsiirtoa varten, mutta usein myös erittäin kallis vaihtoehto lopputuotteen materiaalikustannuksiin nähden. Tämä seikka on myös osaltaan mukana tämän selvitystyön aloituksessa, koska yrityksen näkökulmasta Mega Elektroniiikan käyttämät valmiit moduulit ovat kalliita ja lopulta heikosti räätälöitävissä asiakkaiden muuttuvien tarpeiden mukaan. Tämä johtuu siitä, että moduulien valmistajat pohjaavat oman tuotteen johonkin tiettyyn mikropiiriin ja he ovat lisänneet siihen tarpeelliseksi näkemiään ominaisuuksia asiakaskunnan ja markkinoiden tarpeen mukaan. Näiden ominaisuuksien ja toimintojen lisääminen rajoittaa yleensä mikropiirin sovellusaluetta (Application layer), joka sijaitsee Flash-muistissa.

### 2.1.2 Application Specific Integrated Circuit

ASIC-tuotantotekniikan alaisuuteen kuuluvalla SoC-tekniikalla valmistetut mikropiirit ovat toinen vaihtoehto ja näistä selvitystyössä olevista vaihtoehdoista se halvin. Tällä valmistustavalla tuotettu mikropiiri voidaan ostaa suoraan valmistajalta, eikä siinä ole välikäsiä aiheuttamassa lisäkustannuksia. SoC-tekniikkaan pohjautuvan piirin käyttöönotto nostaa tuotteen kehityksen aloituskustannuksia ja käyttöönottoaikaa huomattavasti yrityksen omasta suunnittelu- ja kehitystyöstä johtuen. Tämä tekniikka tosin mahdollistaa sen, että yritys voi mikropiiriä hyväksikäyttäen räätälöidä kaikki ominaisuudet heidän asiakaskunnan tarpeiden mukaan. Mega Elektroniiikalla on jo entuudestaan kokemusta elektroniikkasuunnittelusta vuosikymmenten verran, joten tämä lähestymistapa ei ole ongelma.

### 2.1.3 Bluetooth-piirisarjat

Kolmas tapa ottaa käyttöön Bluetooth-ominaisuus on lisätä tuotteeseen Bluetooth-piirisarja, joka oli ensimmäinen yleensä useisiin mikropiireihin pohjautuva tuotantosovellus tälle teknologialle. Tällä menetelmällä pyrittiinkin vain lisäämään nopeasti omaan tuotteeseen Bluetooth-ominaisuus, joten sitä käyttivät pääasiassa suuret tietokonevalmistajat. Tämä lähestymistapa Bluetooth-ominaisuuden lisäämiselle omaan tuotteeseen alkaa kuitenkin jo nykyään olla vähentymään päin sen joustamattomuuden takia. Näin ollen tähän teknologiaan pohjautuvia tuotteita ei tulla ottamaan lopulliseen vertailuun.

## 2.2 Tuotevertailu

Vertailuun otettiin tuotteita viisi kappaletta viideltä eri valmistajalta. Tuotteista neljä on ns. Bluetooth-moduuleita ja yksi on SoC-tekniikalla toteutettu mikropiiri, johonka pohjautuen kaikki vertailuun otetut moduulit on toteutettu.

Tuotevertailua tehdessä sen alkuvaiheilla kävi ilmi, että hyvin monet valmistajat ovat rakentaneet oman tuotteensa Texas Instrumentsin kehittämän CC2540-mikropiirin ympärille. Monet Bluetooth-moduuli valmistajat eivät tätä välttämättä suoraan ilmoittaneet ja tarkempien tuotetietojen saaminen vaati näissä tapauksissa yleensä rekisteröitymisen heidän sivuilleen, että pääsi käsiksi tarkempiin tuotetietoihin.

### 2.2.1 Bluegiga BLE112

Bluegigan BLE112-moduuli (kuva 1) on rakennettu CC2540-mikropiirin pohjautuen ja he ovat luoneet sen päälle oman tuotteen. Pelkän tuotteistamisen lisäksi Bluegiga on luonut heidän tuotteilleen oman BGScript-ohjelmointikielen, joka mahdollistaa nopean ohjelmistojen tekemisen kielen helppouden vuoksi. BGScript-ohjelmointikielen etuja on myös riippumattomuus kehitysympäristöistä eli ohjelma voidaan kehittää periaatteessa vaikka tekstieditorilla, joka käännetään Bluegigan omalla kääntäjällä. BGScript-ohjelmointikielen lisääminen mikropiirille puolittaa käytössä olevan Flash-muistin puoleen näin ollen pienentäen siinä olevaa sovellusaluetta. (Bluegiga Technologies, 2012)



KUVA 1. Bluegigan BLE112 Bluetooth-moduuli (Bluegiga Technologies, 2012)

### 2.2.2 Blueradios BR-LE4.0-S2

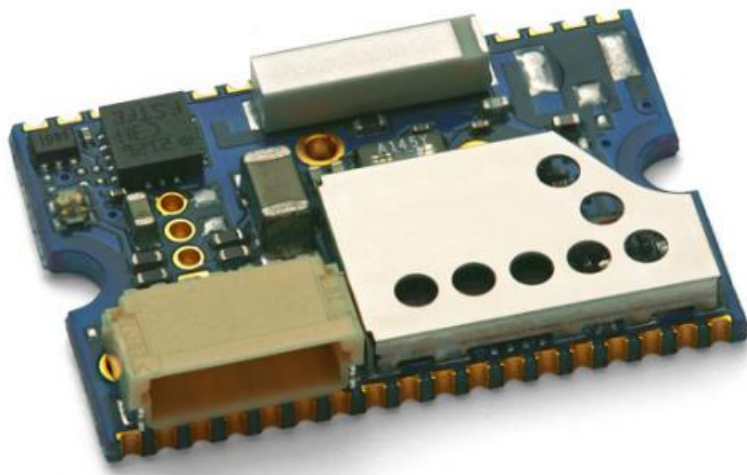
BlueRadios BR-LE4.0-S2-moduuli (kuva 2) pohjautuu CC2540-mikropiiriin ja he ovat luoneet oman ohjelmointikielen pienentäen käyttöön jäävää Flash- ja RAM-muistia merkittävästi. BlueRadios:n ohjelmointikieli mahdollistaa helpon tuotteen käyttöönoton. Sen käyttäminen edellyttää kuitenkin IAR Embedded Workbenchin hankkimista, mikäli tuotteelle aikoo tehdä omia sovelluksia. (BlueRadios Inc, 2012)



KUVA 2. BlueRadios BR-LE4.0-S2-moduuli (BlueRadios Inc, 2012)

### 2.2.3 connectBlue OLP425

connectBluen OLP425-moduuli (kuva 3) pohjautuu CC2540-mikropiiriin, mutta he eivät ole luoneet omaa ohjelmointikieltä moduulia varten, joten sovelluksia ohjelmoitaessa joudutaan käyttämään IAR Embedded Workbench:iä. connectBlue on keskittynyt tarjoamaan maailmanlaajuiset standardit täyttävän lopputuotteen jättäen asiakkaalle vapaat kädet moduulin hyödyntämiseen ohjelmoinnin näkökulmasta. (connectBlue Inc, 2012)



KUVA 3. connectBlue OLP425-moduuli (connectBlue Inc, 2012)

### 2.2.4 Panasonic PAN1720

Panasonicin tarjoama PAN1720-moduuli (kuva 4) pohjautuu CC2540-mikropiiriin ja on enemmänkin suunnattu suuria kappalemääriä vaativille asiakkaille. PAN1720-moduulin mukana tulevan BLE-protokollapinon voi valita ja ne ovat Texas Instrumentsin tai BlueRadios™ kehittälemät. Moduuli tarjoaa hyvin pitkälti samat ominaisuudet kuin muutkin vertailussa olleet moduulit ja sen ohjelmointi tapahtuu IAR Embedded Workbench:llä. (Panasonic Corporation, 2012)



KUVA 4. PAN1720-moduuli (Panasonic Corporation, 2012)

## 2.2.5 Texas Instruments CC2540

Texas Instrumentin kehittämä CC2540-mikropiiri (kuva 5) on vertailun mielenkiintoisin tuote, koska kaikki edeltävät moduulit on rakennettu sen ympärille. CC2540-mikropiiri tarjoaa myös vertailun laajimmat ominaisuudet, kun siinä ei ole laitevalmistajien omia ohjelmistorajapintoja ja laiteliitäntöjä varaamassa mikropiirin tarjoamia ominaisuuksia. (Texas Instruments, 2013)



KUVA 5. CC2540-mikropiiri (Texas Instruments, 2013)

Kaikki tuotteet pohjautuivat samaan mikrokontrolleriin johtuen siitä, että ne ovat rakennettu vertailuun otetun CC2540-mikropiirin ympärille. Tästä johtuen kaikkien tuotteiden lähtöominaisuudet ovat samat, mutta niissä on pieniä eroja johtuen valmistajien omista ratkaisuista. Mm. Bluegigan ja Blueradios yritysten valmistamien Bluetooth-moduulien muita pienempi Flash- ja RAM-muistiosiot johtuvat mikropiirille sisällytyistä heidän omista ohjelmointikielistä.

Edellä mainittujen tuotteiden vertailua olennaisten ominaisuuksien osalta tarkemmin taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Markkinaselvityksen tuotteiden ominaisuuksien vertailu

	Bluegiga	Blueradios	ConnectBlue	Panasonic	TI
<b>Tyyppi</b>	BLE112	BR-LE4.0-S2A	OLP425	PAN1720	CC2540
<b>MCU</b>	8051	8051	8051	8051	8051
<b>Flash</b>	128kB	130kB	128kB	256kB	256kB
<b>RAM</b>	8kB	2,5kB	8kB	8kB	8kB
<b>ADC</b>	7x12bit	8x12bit	4x12Bit	8x12bit	8x12bit
<b>GPIO</b>	21 kpl	21 kpl	18 kpl	19 kpl	21 kpl
<b>I2C</b>	Ohjelmistopohj.	Ohjelmistopohj.	Ohjelmistopohj.	Ohjelmistopohj.	Ohjelmistopohj.
<b>PWM</b>	4 kanavaa	-	-	-	4 kanavaa
<b>SPI</b>	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
<b>UART</b>	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
<b>USB</b>	kyllä	kyllä	ei	kyllä	kyllä
<b>Ohjelmointi</b>	Bluegigan oma	IAR Embebed	IAR Embebed	IAR Embebed	IAR Embebed

Vertailuun otetut Bluetooth-moduulit ovat mitoiltaan keskenään samassa kokoluokassa, joista tarkemmin taulukossa 3. CC2540-mikropiiri erottuu joukosta edukseen koon puolesta, mutta sen mitat ovat pelkän mikropiirin osalta. Tuotteiden tiedot ovat otettu kunkin tuotteen osalta sen valmistajan kotisivuilta saatavilla olevista datalehdystä.

TAULUKKO 3. Vertailuun otettujen tuotteiden fyysiset mitat, jotka ovat ilmoitettu millimetreissä

	<b>Bluegiga</b>	<b>Blueradios</b>	<b>ConnectBlue</b>	<b>Panasonic</b>	<b>TI</b>
<b>Tyyppi</b>	BLE112	BR-LE4.0-S2A	OLP425	PAN1720	CC2540
<b>Mitat</b>					
<b>Pituus (mm)</b>	18	12,6	22	14,5	6,15
<b>Leveys (mm)</b>	12	11,8	15	8,2	6,15
<b>Korkeus (mm)</b>	2,3	1,9	3	3	1

Tuotteiden virrankulutusarvot noudattivat hyvin pitkälti samoja linjoja johtuen tuotteiden ytimenä olleesta CC2540-mikropiiristä, joka toimi tietynlaisena referenssipisteenä moduulien valmistajille. Panasonicin moduulin vastaanotto- ja lähetystehot poikkesivat muista tuotteista huomattavasti ollen miltei kaksinkertaiset. connectBluen valmistaman moduulin osalta ei ollut tarkempia tietoja saatavilla. Taulukossa 4 olevat arvot ovat valmistajien ilmoittamia arvoja. Taulukossa olevat Power Modet ovat erilaisia virransäästötiloja ja niiden selitteet ovat:

- Power Mode 1: Laite on lepotilassa ja herää 3 $\mu$ s kuluessa
- Power Mode 2: Laite on lepotilassa ja herää ajastetusti
- Power Mode 3: Laite on lepotilassa ja herää ulkoisiin keskeytyskäskyihin
- RX: Receive, yksittäisen lähetystapahtuman virrankulutus
- TX: Transmit, vastaanottotapahtuman virrankulutus.

TAULUKKO 4. Vertailutuotteiden virrankulutusarvoja

	<b>Bluegiga</b>	<b>Blueradios</b>	<b>ConnectBlue</b>	<b>Panasonic</b>	<b>TI</b>
<b>Tyyppi</b>	BLE112	BR-LE4.0-S2A	OLP425	PAN1720	CC2540
<b>Power Mode 1</b>	235 $\mu$ A	235 $\mu$ A	-	-	235 $\mu$ A
<b>Power Mode 2</b>	0,9 $\mu$ A	0,9 $\mu$ A	-	-	0,9 $\mu$ A
<b>Power Mode 3</b>	0,4 $\mu$ A	0,4 $\mu$ A	-	0,5 $\mu$ A	0,4 $\mu$ A
<b>RX</b>	19,6mA	19,6mA	-	37mA	19,6mA
<b>TX(-6dBm)</b>	24mA	23,8mA	-	40mA	24mA



### 3 VALITTU TUOTE

Vertailuun otetuista tuotteista päädyttiin valitsemaan Texas Instrumentsin valmistama CC2540, johonka vertailun muut Bluetooth-moduulit pohjautuivat. CC2540-mikropiiriin valitsemiseen johtavia syitä oli useita, jotka olivat seuraavanlaiset:

- CC2540-mikropiiri tarjoaa laajimmat ominaisuudet ja liitännät
- Sen ominaisuuksia ei rajaa muiden valmistajien omat kehitysympäristöt ja oheislaittekytkennät
- Kehitysympäristönä oleva IAR Embedded Workbench on jo Megaelektronikalla ennestään käytössä
- Mikropiirin käyttöönotolla päästään eroon moduulirakenteista, joka mahdollistaa pienemmän lopputuotteen koon
- Yksittäisellä SoC-mikropiirillä päästään alhaisempiin tuotantokustannuksiin moduuleihin verrattuna, tosin aloituskustannukset ovat korkeammat johtuen suunnittelu ja tuotekehityksestä sekä kehitysympäristön lisenssihankinnoista.

Texas Instrumentsin kehittämä CC2540 on kustannustehokas, alhaisen virrankulutuksen omaava SoC-mikropiiri BLE-sovelluksiin. Se mahdollistaa niin isäntä- kuin orjalaitteiden rakentamisen alhaisilla BOM-kustannuksilla. CC2540 tarjoaa lähetinvastaanottimen, parannellun version 8051 mikrokontrollerista, ISP ohjelmoitavan Flash-muistin sekä laajat oheislaittekytkentöjen mahdollisuudet. CC2540 on saatavilla 128kB ja 256kB Flash-muistilla, joista jälkimmäinen mahdollistaa laajempien sovellusten kehittämisen mikropiirille. Näiden ominaisuuksien lisäksi mikropiirillä on Texas Instrumentsin luoma Bluetooth low energy protokollapino. (Texas Instruments, 2013)

TAULUKKO 5. TI 2540-mikropiirin ominaisuudet (Texas Instruments, 2013)

<b>Yleisominaisuudet</b>	
<b>Bluetooth versio</b>	4.0, BLE, single mode
<b>BLE protokollat</b>	
<b>GAP</b>	Central, Peripheral, Observer, Broadcaster, Combination roles
<b>ATT/GATT</b>	Client+Server
<b>SMP</b>	AES-128 bittinen yhteyden salaus
<b>L2CAP</b>	Bluetooth low energy-versio
<b>Standardit</b>	ETSI EN 300 328 (EU) ETSI EN 300 440 Class 2 (EU) FCC CFR47 part 15 (US) ARIB STD-T66 (Japan)
<b>Mikrokontrolleri</b>	8051
<b>Ohjelmamuistia</b>	256kB Flash-muistia
<b>Käyttömuisti</b>	8kB RAM
<b>Kehitysympäristö</b>	IAR Embedded Workbench for 8051
<b>Oheislaitteet</b>	
<b>ADC-muuntimet</b>	8x 12bit
<b>Ajastimet</b>	1x16bit, 2x8bit
<b>Input/Output</b>	21 kpl, 19x4mA, 2x20mA
<b>Battery monitor</b>	Kyllä
<b>Lämpötila-anturi</b>	Kyllä
<b>DMA</b>	5-kanavainen
<b>Radio-ominaisuudet</b>	
<b>Radiotaajuus</b>	2402-2480MHz, 2MHz askelin
<b>Siirtonopeus</b>	1 Mbps, Gaussian FSK
<b>Kanavien lukumäärä</b>	40, 37 datalle, 3 mainostukselle
<b>Virrankulutus</b>	
<b>Lähetys</b>	24mA
<b>Vastaanotto</b>	19,6mA
<b>Power Mode 1</b>	235µA
<b>Power Mode 2</b>	0,9µA
<b>Power Mode 3</b>	0,4µA
<b>Käyttöjännite</b>	2V-3,6V

## 4 BLUETOOTH LOW ENERGY

Teknologian kehittämisen aloitti matkapuhelinvalmistaja Nokia vuonna 2001 nimellä BTLite, koska sen aikaiset langattomat tekniikat eivät olleet kovin hyvin mobiililaitteisiin soveltuvia. Lopullinen teknologia julkaistiin vuonna 2006 nimellä Wibree, jota oli suunnittelemassa useiden yritysten foorumi. Samoihin aikoihin alkoivat neuvottelut Wibree teknologian integroimisesta Bluetooth standardiin. Vuonna 2007 teknologia julkaistiin Bluetooth Special Interest Groupin alaisuudessa Bluetooth low energy-nimellä. (Nokia Developer Portal, 2012)

Bluetooth low energy (BLE) on vuonna 2010 Bluetooth Special Interest Group (SIG) esittelemä uusiin Bluetooth-teknologia standardi. Ensimmäiset tätä teknologiaa hyödyntävistä tuotteista saapui markkinoille vuoden 2011 aikana. Bluetooth low energyn kehittämisen tarkoituksena oli luoda uusi yhteysprotokolla, joka mahdollistaa Bluetooth-yhteyden muodostamisen ja tiedonsiirron murto-osalla aikaisempien Bluetooth-laitteiden virrankulutuksesta. Tästä syystä BLE on suunnattu pääasiassa lyhyenkantaman laitteiden ohjaus- ja valvontasovelluksille, kuten esimerkiksi tämä minun opinnäyttyöni aihe.

On myös tärkeää tietää, että vaikka BLE esiteltiin Bluetooth 4.0-spesifikaation myötä, niin se on sen muista osa-alueista ja edeltävistä Bluetooth-teknologioista selvästi toteutukseltaan erottuva teknologia ja tiedonsiirtoprotokolla ja näin ollen ei ole yhteensopiva vanhempien teknologioiden kanssa. BLE voidaan toteuttaa myös ns. dual-mode tekniikalla, joka sisältää sekä single-moden eli low energy -tekniikan ja vanhemman Classic Bluetooth-tekniikan mahdollistaen täyden yhteensopivuuden. Tällaisen ratkaisun myötä käytännössä menetetään Bluetooth low energyn tarjoama vähäinen virrankulutus, joten dual mode-tekniikkaa käytetäänkin yleensä hyväksi isäntälaitteessa kun orjalaite on toteutettu low energy-teknologialla. (Texas Instruments, 2012)

Bluetooth low energy on myös säilyttänyt Classic Bluetoothin edut, joita ovat mm. (Bluetooth Special Interest Group, 2013):

- Toimintavarmuus
- Yhteentoimivat laitteistot valmistajasta riippumatta
- Maailmanlaajuinen
- Rojaltivapaa
- Eritäin pieni koko
- Tietoturva.

Näiden lisäksi teknologian käyttöönottokustannukset ovat alhaisemmat sekä lopullisen laitteiston virrankulutus on huomattavasti alhaisempi. Alhainen virrankulutus on saavutettu lyhyillä lähetyspaketeilla, joka johtaa alhaisempaan TX-tapahtuman virran huippuarvoon. Lyhyet lähetyspaketit taasen mahdollistavat ajallisesti lyhyemmän vastaanottoajan (RX).

Käytössä olevien kanavia on vähennetty, jolla on mahdollistettu nopeammat laitteiden löytäminen sekä yhteydenmuodostamisajat. Mahdollisia yhteystiloja on karsittu huomattavasti ja tästä tarkemmin jäljempänä kohdassa 4.1.2 Link Layer sekä sen yhteydessä kuvassa 7. Yksinkertaistetumman yhteysarkkitehtuurin lisäksi BLE käyttää vain yhtä protokollaa, joka mahdollistaa yksinkertaisemmat ja kevyemmät sovellukset.

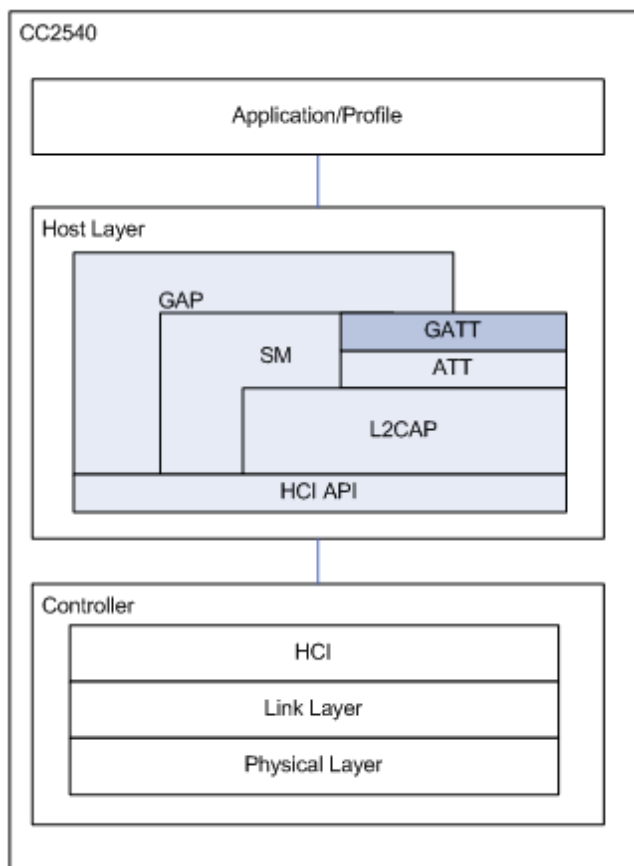
Eräs osatekijä vähävirtaisuudelle on myös muistinkäyttö, joka kasvattaa laitteen vuotovirtoja täten lisäten virrankulutusta. Edellä mainitut pienet tiedonsiirtopaketit ja yksinkertainen protokolla vaativat vähemmän puskurointia. Nämä yhdistettynä yksinkertaistettuun yhteysarkkitehtuuriin johtavat pienempään muistin tarpeeseen, joka vähentää mahdollisia vuotovirtoja.

Näiden muutoksien ansiosta on pystytty luomaan uusi vähävirtainen versio aikaisemmasta Bluetoothista, jolla pystytään luomaan esim. lämpötilanmittaus anturisovelluksia joiden käyttöaika saattaa olla miltei vuoden luokkaa kun käytössä on tavallinen 200-230mAh nappiparisto.

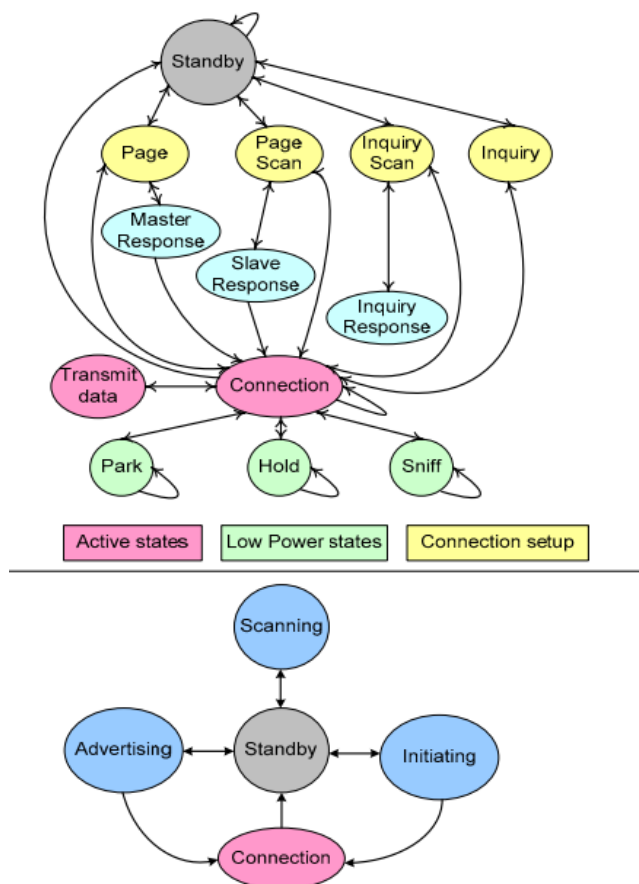
#### 4.1 Bluetooth low energy protokollapinon rakenne

Kuten aikaisemmissakin Bluetooth-teknologioissa niin myös BLE-protokollapino (kuva 6) koostuu kahdesta ydinkomponentista, jotka ovat ohjain- (Controller) sekä isäntämoduuli (Host). Tällainen moduulien erottelu on saanut alkunsa jo aikaisemmissa Bluetooth-protokollissa käytännön syistä. BLE kehityksen myötä protokollapinon monimutkaisuutta ja kokoa karsittiin, jotta saatiin aikaiseksi vähäinen virrankulutus. Tätä on havainnollistettu kuvassa 7, josta huomaa kuinka merkittävästi protokollapinon erilaisia yhteystiloja on jätetty pois. Tämän arkkitehtuurin muutoksen ansiosta saatiin myös BLE-yhteyksien vasteajat huomattavasti pienemmiksi.

Ohjain koostuu käytännössä kahdesta tasosta, jotka ovat Physical Layer ja Link Layer ja nämä olivat aikaisemmin yleensä tarjolla eri mikropiireillä. (Texas Instruments, 2013)



KUVA 6. CC2540-mikropiirin sisältämä BLE-protokollapino (Texas Instruments, 2013)



KUVA 7. BLE-protokollan (alla) ja varhaisemman BR/EDR-protokollan (yllä) erilaisten yhteystilojen vertailu (Elke Mackensen, Matthias Lai, Thomas M. Wendt., 2012)

Isäntämoduuli sisältää kaiken ylemmän tason toiminnot, joihin kuuluu L2CAP, ATT, GATT, SMP sekä GAP. Ylemmän tason isäntämoduulin ja alemman tason ohjainmoduulin välinen kommunikointi tapahtuu standardoidun Host Controller Interface:n (HCI) kautta. Protokollapinon päälimmäisenä on itse Application Layer eli osio koostuu tuotteeseen ohjelmoitavasta ohjelmakoodista, jolla päästään aina ohjelmakoodin tarvittaessa käsiksi alempien kerroksien toimintoihin aina HCI-väylään asti.

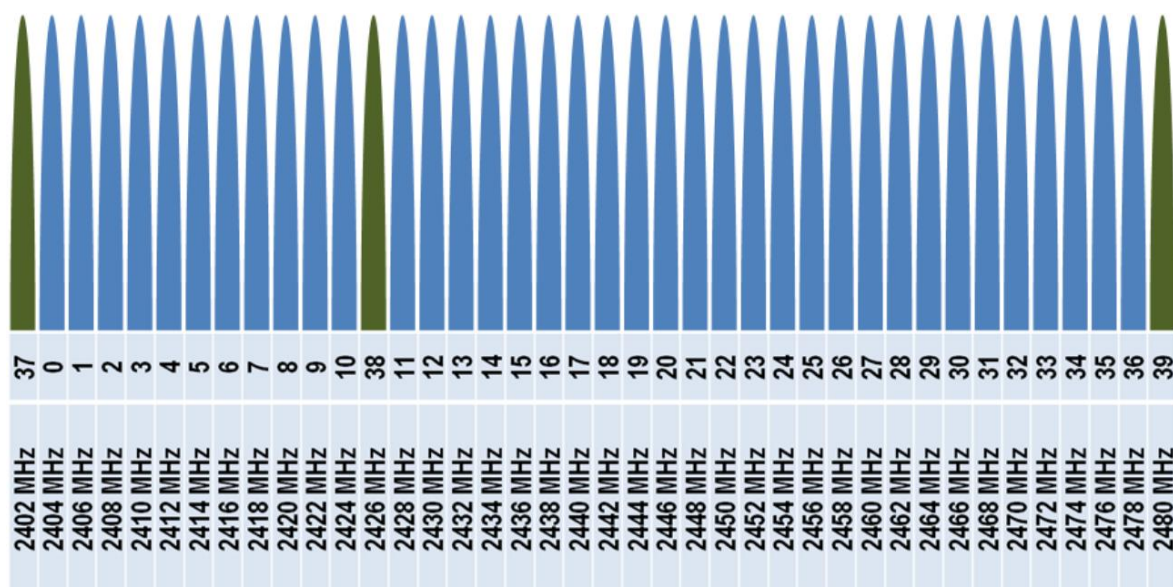
#### 4.1.1 Physical Layer (PHY)

Yksinkertaistettuna Physical Layer on BLE:n radiolähetinvastaanotin, joka käyttää hyväkseen GFSK-modulaatiota. Physical Layer toimii lisensoimattomalla 2,4GHz ISM (Industrial, Scientific, Medical) radiotaajuusalueella käsittäen 40 kanavaa 2MHz välein. BLE-teknologia käyttää kahdenlaisia radio-kanavia ja ne ovat mainoskanavat (Advertising) ja datakanavat (Data) (kuva 8).

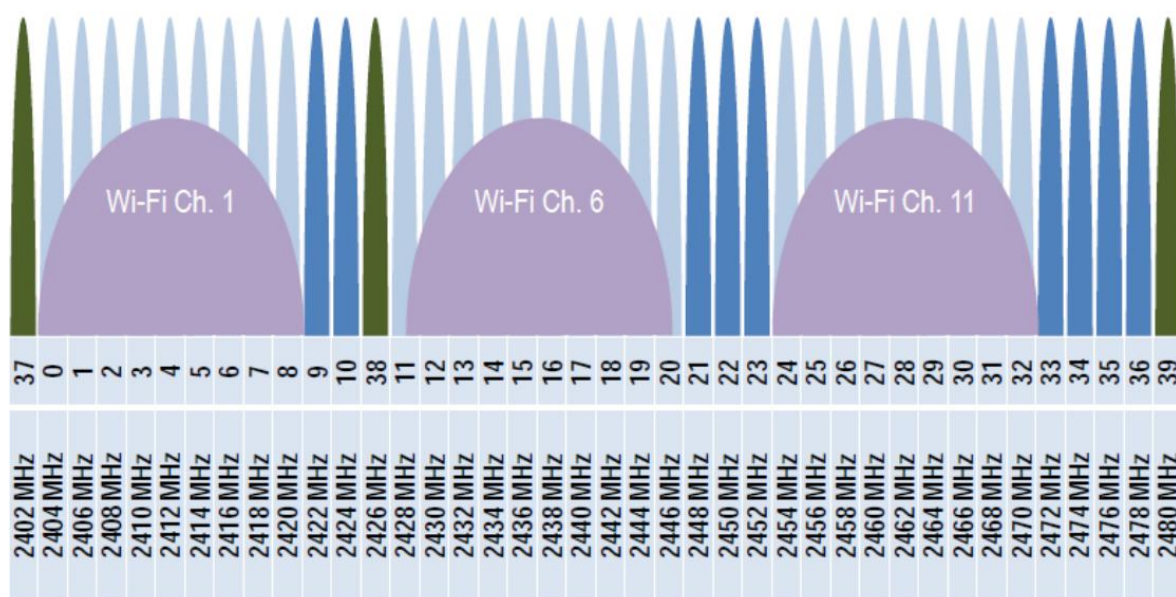
Mainoskanavia käytetään BLE-laitteiden etsimiseen, yhteydenmuodostusparametrien vaihtamiseen sekä Broadcast-tyyppisen datan lähetykseen. Näitä kiinteitä kanavia on yhteensä kolme kappaletta ja ne on sijoitettu taajuusalueelle siten, että ne ovat mahdollisimman vähän päällekkäin samalla taajuusalueella vaikuttavan WiFi:n kanssa (kuva 9).

Datakanavia on yhteensä 37 kappaletta ja niitä käytetään kaksisuuntaiseen sovellusdatan siirtoon yhteydessä olevien laitteiden välillä. Datakanavat hyödyntävät Adaptive Frequency Hopping-menetelmää kanavien vaihdossa välttyäkseen taajuusalueilta, joilla on ruuhkaa tai muuta häiriötä.

Jokaiselle näistä edellä mainituista kanavista on määrätty uniikki kanavaindeksi. Radiokanavien ominaisuuksiltaan BLE eroaa edeltävästä Classic Bluetoothista siten, että se viipyy pitempään aktiiviselle kanavalla ja näin ollen sen toiminta ei ole ajallisesti niin hektistä kuin aikaisempien Bluetooth-protokollien. (Bluetooth Special Interest Group, 2010)



KUVA 8. BLE:n käytössä olevat kanavat. Vihreällä olevat kolme kanavaa ovat mainoskanavia ja loput sinisellä olevat datakanavia. Taajuuden jälkeen oleva numeroarvo on taajuusalueen kanavaindeksi (Digikey, 2011)



KUVA 9. Bluetooth low energy mainoskanavien sijoittelua suhteessa Wi-Fi-kanaviin nähden häiriöiden minimoimiseksi (Digikey, 2011)

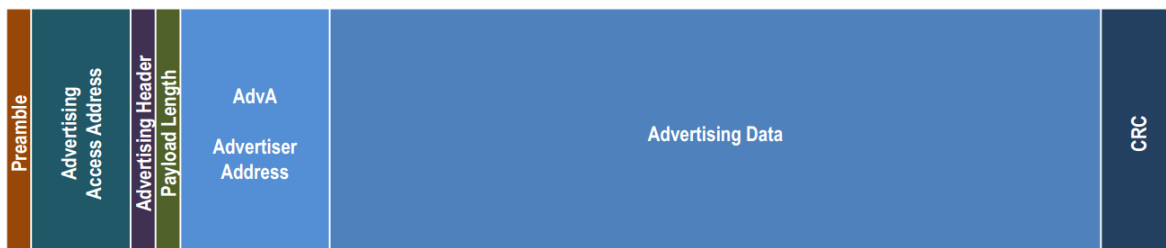
#### 4.1.2 Link Layer

Link Layer on yksinkertainen tilakone, jolla on kuvan 13 mukaiset tilat käytettävissä. Se muistuttaa hyvin paljon aikaisempien Bluetooth-protokollien Link Manager:ia. Tilakone mahdollistaa vain yhden aktiivisen tilan kerrallaan. Link Layerin tehtäviin kuuluu myös pakettien ja radion toiminnan ohjaus. Tilakoneella on käytettävissä kahdenlaisia kanavia ja ovat (Bluetooth Special Interest Group, 2010):

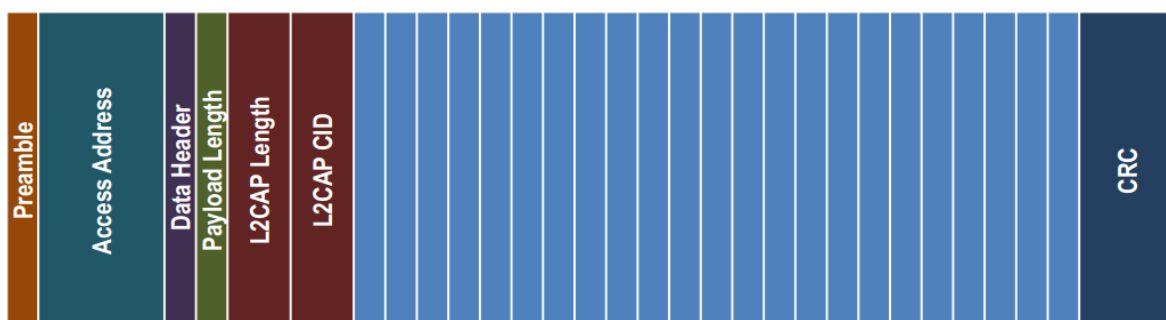
- Mainostuskanavat
- Datakanavat.

Kyseiset kanavat mahdollistavat kaksi eri tiedonsiirron pakettimuotoa (Bluetooth Special Interest Group, 2010):

- Mainostuspaketit
- Datapaketit.



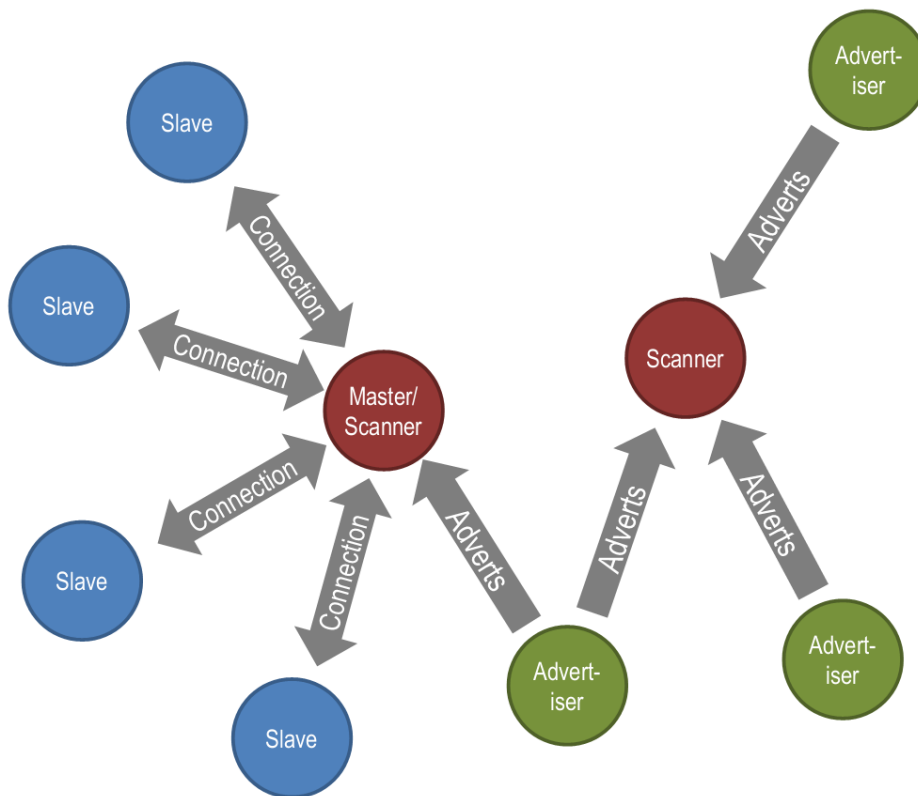
KUVA 10. Mainostuspaketin rakenne (Texas Instruments, 2013)



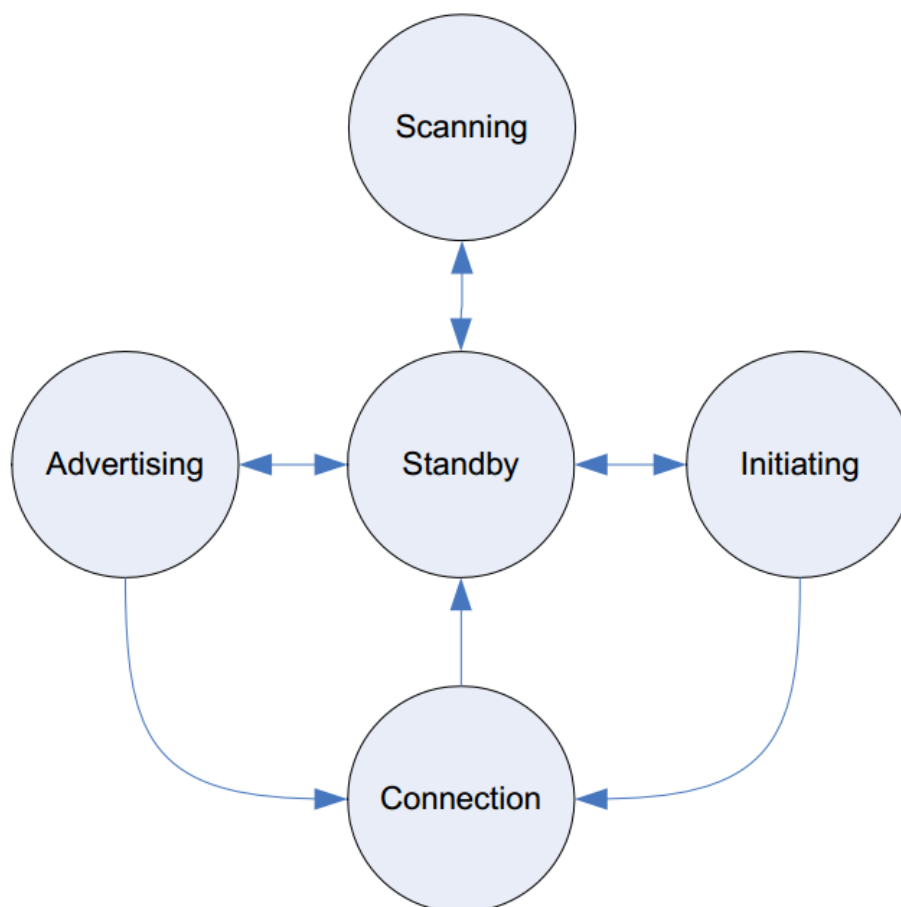
KUVA 11. Datapaketin rakenne (Texas Instruments, 2013)

Yksinkertaistettu tilakone mahdollistaa kaksi eri verkkotopologiaa ja ne ovat point-to-point ja tähti-verkko (kuva 12).





KUVA 12. Esimerkki tilakoneen mahdollistamasta verkkotopologiasta (Texas Instruments, 2013)



KUVA 1. BLE-laitteen erilaiset yhteystilat (Bluetooth Special Interest Group, 2010)

Standby: Käynnistyessään laite aloittaa tästä tilasta ja pysyy siinä niin kauan kuin kunnes host-rapainta määrää toisin. Tästä tilasta on mahdollista siirtyä Advertising, Initiating tai Scanning tilaan. Tähän tilaan voidaan saapua myös kaikista muista tiloista. Tästä voidaankin jo päätellä, että tämä tila on koko BLE-teknologian ydin, vaikkakin passiivinen tila joka mahdollistaa laitteen alhaisen virrankulutuksen. Tässä tilassa laite ei lähetä eikä vastaanota dataa, eikä ole yhteydessä muihin laitteisiin. (Bluetooth Special Interest Group, 2010)

Advertising: Mainostustilassa laite lähettää pääasiassa mainostuspaketteja ennaltamäärätyillä mainostuskanavilla ja se voi vastata saapuneisiin skannauspyyntöihin. Mainostuspaketit voi olla kohdennettu jollekin tietylle skannaavalle laitteelle tai lähettää välittämättä siitä kuka sitä vastaanottaa. Mainostuspaketit voivat olla luonteeltaan myös joko semmoisia, jotka sallivat yhteydenmuodostamisen tai semmoisia jotka eivät salli yhteydenmuodostusta. Tällöin Mainostuspaketti sisältää data-alueen, jonka avulla välitetään dataa kuunteleville laitteille.

Tämä tila vaaditaan mikäli laite haluaa olla löydettävissä ja löytää muita laitteita sekä lähettää dataa niille. Tästä tilasta voidaan siirtyä Standby-tilaan mikäli mainostus lopetetaan tai muodostaa yhteys mikäli Initiating-tilassa oleva laite lähettää pyynnön. (Bluetooth Special Interest Group, 2010)

Scanning: Skannaavassa tilassa oleva laite kuuntelee laitteita, jotka lähettävät dataa mainostuskanavilla. Scanning-tilassa olevalla laitteella on kaksi alitilaa, jotka ovat:

- Passiivinen: Tässä tilassa laite vain vastaanottaa mainostuspaketteja.
- Aktiivinen: Laite lähettää pyyntöjä mainostaville laitteille lisätiedon hankkimiseksi.

Tähän tilaan voidaan tulla ainoastaan Standby-tilasta ja palata takaisin lopettamalla skannaus.

Initiating: Aloitetilassa oleva laite odottaa mainostuskanavalta tulevaa dataa tietyltä laitteelta seuraavaksi tapahtuvaa yhteyden muodostusta varten. Mikäli laitteet hyväksyvät toisensa, niin laite siirtyy Connection tilaan. (Bluetooth Special Interest Group, 2010)

Connection: Tilakoneen viimeinen tila on yhteystila, johonka voidaan tulla joko Aloitetilasta tai Mainostustilasta. Riippuen laitteen roolista yhteydenmuodostuksen aikana sille määräytyy yksi alitila, joi- ta ovat Master ja Slave. Tämä tila on ainut, joka hyödyntää datakanavia laitteiden väliseen tiedon- siirtoon. (Bluetooth Special Interest Group, 2010)

Master eli isäntä alitilassa olevan laitteen täytyy lähettää säännöllisin väliajoin tietoa siihen yhteydessä oleviin orjalaitteisiin. Slave eli orjalaite taasen ei voi lähettää mitään ennen kuin isäntälaitteelta on saatu käsky lähetystä varten. Tästä eteenpäin datan lähetys tapahtuu vuoropohjaisesta aina isäntälaitteen pyytäessä ja orjalaitteen vastatessa. Orjalaite voidaan myös ohjelmoida niin, että mikäli sillä ei ole mitään lähetettävää niin se sivuuttaa lähetyspyynnöt ja näinollen säästää virtaa.

Laitteiden välistä yhteyden muodostusta varten täytyy yhden laitteen olla Mainostustilassa ja sallia saapuvia yhteyksiä sekä yhden laitteen Aloitetilassa. Aloitetila on ominaisuuksiltaan Mainostustilan kaltainen, mutta sen funktio on muodostaa yhteys. Aloitetilassa oleva laite kuuntelee mainostuskanavia ja niiltä saapuvia paketteja ja niiden perusteella aloittaa tarvittaessa yhteyden muodostuksen mainostaneen laitteen kanssa. Yhteyden muodostettua laitteiden välille tulee mainostaneesta laitteesta orjalaite (Slave) ja Aloitetilassa olleesta laitteesta isäntälaitte (Master). Orjalaite voi olla yhteydessä vain yhteen isäntälaitteeseen kerrallaan kun taas isäntälaitte voi olla yhteydessä useisiin orjalaitteisiin.

Tilakoneen tarkoituksena on määrittää se, että mitenkä laitteet löytävät ja kommunikoivat keskenään sekä erottaa lähetys, laitteiden löytäminen ja yhteydenmuodostaminen varsinaisesta lähetettävästä datasta. Tämä yhdessä vähentyneiden mainostuskanavien kanssa mahdollistaa pienemmän virrankulutuksen yhteyden ylläpidossa. Tilakone ratkaisu vaatii myös sen, että mainostustila on erotettu mainostuspaketeista. Tilakoneella on kolme tilaa joissa voidaan lähettää ja vastaanottaa mainostuspaketteja, mutta ainoastaan yksi tila datapakettien lähettämiseksi ja vastaanottamiseksi.

#### 4.1.3 HCI

Host/Controller Interface on kevyt rajapinta, jota BLE-protokollapino käyttää Host ja Controller väliin kommunikointiin. Tämä voidaan toteuttaa joko ohjelmallisen rajapinnan avulla tai käyttäen hyväksi hardware-rajapintoja, kuten UART, SPI tai USB. [10]

#### 4.1.4 L2CAP

Logical Link Control and Adaptation Protocol toimii kehysrakenteisena rajapintana ja sen tehtävä on kanavoida ATT-, SMP-, Link Layer-kerroksilla kulkeva data Link Layerin ohjaussignaaleja mukaillen muodostaen jatkuvan tietovanan kahden eri päätelaitteen välille. (Texas Instruments, 2013)

L2CAP hoitaa näiden kerroksien tiedonvälitystä parhaansa mukaan ilman datavirran kontrollointia ja uudelleenlähetys mahdollisuutta, jotka ovat olemassa aikaisemmissa Bluetooth-protokollissa. Myöskään datan segmentointia tai uudelleenjärjestelyä ei ole käytettävissä. Yhteysparametrien päivitys tapahtuu tämän rajapinnan kautta.

#### 4.1.5 Security Manager

Security Manager protokolla huolehtii laitteiden todentamisesta ja niiden välisen viestinnän salauksesta tarvittaessa sekä niihin liittyvistä salausavaimien hallinnasta. (Texas Instruments, 2013)

Tiedon salaus tapahtuu AES-128 algoritmilla. Security Manager toimii yhteistyössä Generic Access Profilen (GAP) kanssa laitteiden välisen suhteen ylläpidossa seuraavanlaisesti:

- Paritus: Ensisijainen tehtävä laitteiden välisen yhteyden muodostuksen jälkeen. Tässä vaiheessa laitteet muodostavat ja vaihtavat keskenään short-term avaimet (STK), jotta vaihdettavan datan suojaus voidaan aloittaa.
- Todennus: Varmennetaan, että viestitettävä laite on luotettava ja tällä estetään tiettyjä tietoturvariskejä.
- Bonding: Pidempiaikainen todennuskeino; laitteiden väliset tiedot tallennetaan myöhemmin tapahtuvaa yhteyden muodostusta varten. Tämän toimenpiteen aikana laitteet luovat toisilleen long-term avaimet (LTK), jotka myös vaihdetaan ja tallennetaan. Tämä mahdollistaa nopean yhteyden salaamisen uudelleen yhdistettäessä.

#### 4.1.6 Generic Acces Profile

Generic Access Profile määrittelee yleiset toimenpiteet yhteyden muodostamiseen liittyen, kuten (Bluetooth Special Interest Group, 2010):

- Laitteiden etsintä
- Yhteyden luonti
- Yhteyden ylläpito
- Yhteyden katkaisu
- Turvatoimenpiteiden aloitus, johon kuuluu:
  - Paritus
  - Todentaminen
  - Bonding, eli pidempiaikainen paritus.

Monet GAP:n toiminnot vastaavat suoraan ohjainmoduulin Link Layer:n toimintoja. GAP:n toimintaroolit ovat seuraavat (Bluetooth Special Interest Group, 2010):

- Broadcaster: Advertiser-tilassa oleva laite, johonka ei voida muodostaa yhteyttä.
- Observer: Laite skannaa mainostusviestejä, muttei voi muodostaa yhteyttä.
- Peripheral: Advertiser-tilassa oleva laite, johonka voidaan muodostaa yhteys ja näin tapahtuessa se toimii orjalaitteena.
- Central: Skannaa mainostusviestejä ja muodostaa yhteyksiä niiden perusteella. Toimii isäntälaitteena ja voi olla yhteydessä yhteen tai useampaan orjalaitteeseen kerralla.

GAP mahdollistaa myös eri toimintaroolien yhdistelmiä, joita ovat (Bluetooth Special Interest Group, 2010):

- Peripheral + Broadcaster: Laite toimii orjalaitteena, mutta samalla lähettää mainostusviestejä, joihinkaan ei voi vastata.
- Peripheral + Observer: Laite toimii orjalaitteena, mutta samalla skannaa mainostusviestejä ilman yhteydenmuodostusmahdollisuutta.
- Central + Broadcaster: Laite skannaa mainostusviestejä ja muodostaa yhteyksiä toimien isäntälaitteena sekä myös lähettää mainostusviestejä, joihin ei voi vastata.

GAP mahdollistaa laitteelle erilaisia näkyvyystiloja, joita ovat (Bluetooth Special Interest Group, 2010):

- Non-discoverable: Laite ei lähetä mainostusviestejä.
- Limited Discoverable Mode: Laite lähettää mainostusviestejä määritellyn ajan verran, jonka jälkeen se palaa Standby-tilaan.
- General Discoverable Mode: Laite lähettää mainostusviestejä jatkuvasti.

Peripheral roolissa oleva laite voi lähettää joko connectable tai non-connectable tyyppisiä mainostusviestejä ollessaan Discoverable-tilassa. Broadcaster roolissa oleva laite voi lähettää ainoastaan non-connectable tyyppisiä mainostusviestejä ollessaan Discoverable-tilassa. GAP hallinnoi mitä dataa lähetetään mainostusviesteissä sekä skannaukseen vastatessa.

#### 4.1.7 ATT

ATT on uusi protokolla, joka esiteltiin Bluetooth 4.0-spesifikaation myötä ja se on suunniteltu low energy-sovelluksia silmälläpitäen. Sen suunnittelun lähtökohdaksi oli, että tietoa siirrettäessä sitä siirretään vain silloin kun se on tarpeellista ja silloinkin siirretään vain tarpeellinen tieto eli mahdollisimman vähän ja nopeasti. Näiden lähtökohdaksi saatiin luotua kevyt ja vähän virtaa kuluttava tiedonsiirtoprotokolla.

Attribute protokollan ansiosta laite voi paljastaa dataa eli attribuutteja toiselle laitteelle. ATT:n näkökulmasta laite, joka paljastaa tietoja on server (palvelin) ja näitä tietoja lukeva laite on client (asiakas). Attribute protokollan server/client-määrittely ei ole tekemisissä Link Layer:n määrittämien laitteiden orja/isäntä-roolien kanssa. Näin ollen isäntälaitte voi olla joko ATT-client tai ATT-server ja sama pätee orjalaitteeseen. Laite voi myös toimia molemmissa tiloissa yhtä aikaa. (Bluetooth Special Interest Group, 2010)

Käsiteltävä data paljastetaan attribuutteina, jolla on seuraavanlaiset ominaisuudet:

- Arvo, joka voi olla 0-512 tavua suuruudeltaan.
- Arvo voi olla kiinteä tai vaihteleva pituudeltaan.

Attribuuteilla on seuraavanlaiset ominaisuudet:

- Handle eli attribuutin sijainnin osoittava 16-bittinen luku.
- Type/UUID, joka määrittelee attribuutin tyyppin eli mitä luettava/kirjoitettava data on. Nämä arvot on määritelty Bluetooth-spesifikaatiossa. Tyyppin suuruus voi olla joko 16- tai 128-bittiä.
- Käyttöoikeudet eli voidaanko ATT:n arvoa esim. lukea tai kirjoittaa ja minkälaiset käyttöoikeudet sen käyttämiseen vaaditaan.

Handle	Type	Mnemonic	Value	Description
1	0x2800	GATT Primary Service Declaration	00:18	Generic Access
2	0x2803	GATT Characteristic Declaration	02:03:00:00:2A	Device Name
3	0x2A00	Device Name	48:65:61:72:74:20:52:61:74:65:20:53:65:6E:73:6F:72	Heart Rate Sensor

KUVA 14. Esimerkki Heart Rate Sensor-tyyppisen Bluetooth low energy laitteen attribuuteista ja niiden arvoista. Mnemonic sarake kääntää Type-kentän heksadesimaali-arvon ymmärrettävään muotoon

Attribuuttien käyttö tapahtuu seuraavanlaisesti:

- Palvelinlaite tallentaa dataa, jota asiakaslaite käyttää
- Palvelin paljastaa tämän datan attribuuttien avulla, joita asiakas voi joko pyytää tai kirjoittaa lisää.

Attribuuttiprotokollan mahdollistamat menetelmät attribuuttien käytölle ovat seuraavanlaiset:

- Client to server: Luku, kirjoitus
- Server to Client: Ilmoitus (Notification), Merkki (Indication).

Attribuuteilla tapahtuva viestintä toimii vuoropohjaisesti:

- Pyyntö (Request) -> Vastaus (Response)
- Komento (Command)
- Ilmoitus (Notification)
- Merkki (Indication).

Notification eli ilmoitusoperaation avulla lähetetään dataa kun se on muuttunut esim. lämpötila-arvo. Näin ollen ei tarvita jatkuvaa yhteyttä laitteiden välillä. Indicate eli merkinanto-Operaation avulla palvelin lähettää dataa kun se muuttuu ja asiakaslaite vastaa, että on saanut datan vastaan.

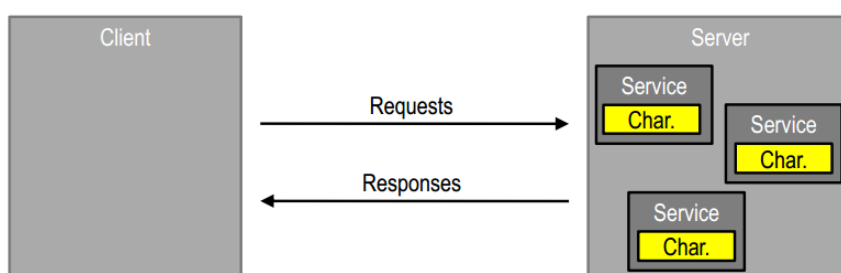
Generic Attribute Profile esiteltiin myös uutena ominaisuutena Bluetooth 4.0-spesifikaation myötä. Sen tehtävä on määrittellä tietuerakenne, jota käytetään ATT-protokollan avulla tiedonsiirtoon yhteydessä olevien laitteiden välillä. GATT-profiilit on pyritty pitämään mahdollisimman yksinkertaisina rakenteiltaan, jotta välttyttäisiin turhalta tietoliikenteeltä laitteiden välillä. Tällä vähennetään niin tehonkulutusta kuin myös pyritään pitämään laitteen rajalliset resurssit käytettävissä.

Generic Attribute Profile tarjoaa 11 erilaista toimintoa erilaisten menetelmien ja niiden alimenetelmien avulla, joita ovat

- Server Configuration
  - Exchange MTU
- Primary Service Discovery
  - Discover All Primary Services
  - Discover Primary Services by Service UUID
- Relationship Discovery
  - Find Included Services
- Characteristic Discovery
  - Discover All Characteristics of a Service
  - Discover Characteristics by Service UUID
- Characteristic Descriptor Discovery
  - Discover All Characteristic Descriptors
- Reading a Characteristic Value
  - Read Characteristic Value
  - Read Using Characteristic UUID
  - Read Long Characteristic Values
  - Read Multiple Characteristic Values
- Writing a Characteristic Value
  - Write Without Response
  - Signed Write Without Response
  - Write Characteristic Value
  - Write Long Characteristic Values
  - Reliable Writes
- Notification of a Characteristic Value
  - Notification
- Indication of a Characteristic Value
  - Indication
- Reading a Characteristic Descriptor
  - Read Characteristic Descriptors
  - Read Long Characteristic Descriptors
- Writing a Characteristic Descriptor
  - Write Characteristic Descriptors
  - Write Long Characteristic Descriptors.

Nämä toiminnot ja niiden alitoiminnot kertovat laitteille sen, että kuinka ATT-protokollaa käytetään suorittamaan esim. kirjoitus tai luku toimenpide laitteiden välillä.

GATT-profiilin client/server-arkkitehtuuri (kuva 15) on sama kuin ATT-protokollassa, paitsi data kapseloidaan palveluiksi (Services) ja luettava data paljastetaan ominaisuuksina (Characteristic). Profili koostuu yhdestä tai useammasta palvelusta, riippuen käyttötarkoituksesta. Palvelu koostuu attribuuteista, joita kutsutaan "characteristic values" eli ominaisarvoiksi jotka ovat palvelun käyttämiä tietoja. Esimerkiksi sykemittarissa, attribuutti joka sisältää sykearvon on sen palvelun ominaisarvo. Ominaisarvon yhteydessä täytyy olla myös määriteltynä, että mitä se on ja sykemittarin tapauksessa yksikkö on bpm eli beats per minute.



KUVA 15. GATT-profiilin client- ja server-laitteen välinen toimintaperiaate (Texas Instruments, 2013)

Kuvassa 16 on näkymä Heart Rate Sensor tyyppisen laitteen tarjoamista palveluista (Services) ja palveluiden sisältämistä ominaisuuksista (Characteristic). Heart Rate Sensor laite tarjoaa myös pariston tarkkailuun tarkoitetun palvelun **Battery Service** (handle 43), joka on ilmoitettu kymmenjärjestelmän mukaisesti. Palvelun **Characteristic Declaration**-kohdassa (handle 44) määritellään sen käyttö- ja lukuoikeudet sekä mitä se ilmaisee, tässä tapauksessa kyseessä on Battery Level. Tämän jälkeen on palvelun Characteristic Value (handle 45), joka ilmaisee Battery Level arvon. Kuvan tapauksessa Battery Level arvo on heksadesimaalijärjestelmän mukaisesti ilmoitettu eli 64, joka vastaa kymmenjärjestelmän arvoa 100. Koska **Battery Service**-palvelun ilmoittamat arvot ovat prosenttilukuja, niin paristonjännitetasoksi voidaan tulkita 100 %.

Handle	Type	Mnemonic	Value	Description
1	0x2800	GATT Primary Service Declaration	00:18	Generic Access
12	0x2800	GATT Primary Service Declaration	01:18	Generic Attribute
16	0x2800	GATT Primary Service Declaration	0D:18	Heart Rate
17	0x2803	GATT Characteristic Declaration	10:12:00:37:2A	Heart Rate Measurement
18	0x2A37	Heart Rate Measurement		
19	0x2902	Client Characteristic Configuration		Write "01:00" to enable notifications, "00:00" to disable
20	0x2803	GATT Characteristic Declaration	02:15:00:38:2A	Body Sensor Location
22	0x2803	GATT Characteristic Declaration	08:17:00:39:2A	Heart Rate Control Point
24	0x2800	GATT Primary Service Declaration	0A:18	Device Information
43	0x2800	GATT Primary Service Declaration	0F:18	Battery Service
44	0x2803	GATT Characteristic Declaration	12:2D:00:19:2A	Battery Level
45	0x2A19	Battery Level	64	
46	0x2902	Client Characteristic Configuration		Write "01:00" to enable notifications, "00:00" to disable

KUVA 16. Esimerkki Heart Rate Sensor-laitteen palveluista



## 5 TEXAS INSTRUMENTS CC2540

Selvitystyössä tehdyn vertailun perusteella tässä työssä päädyttiin käyttämään EKG-signaalin mittaamiseen, AD-muuntamiseen sekä lähettämiseen päätelaitteelle BLE-tekniikalla Texas Instrumentsin valmistamalla CC2540-mikropiirillä. Mega Elektroniikalla oli jo entuudestaan tähän mikropiiriin pohjautuva mini development kit, jonka lisäksi tilattiin vielä hieman kattavampi kehitysalusta. Molempien kehitysalustojen mikropiirit pohjautuivat CC2540F256 versioon eli ne sisälsivät 256kB Flash-muistia.

Kehitysalustojen ohjelmointi tapahtuu käytännössä joko Texas Instrumentsin omalla SmartRF Flash Programmer-ohjelmalla tai IAR Embedded Workbench:illä. Texas Instruments ei tarjoa mikropiiriin ohjelmien kehitykseen omaa työkalua, joten oman ohjelman kehitys tapahtuu käytännössä IAR Embedded Workbench:illä, jolloin myös sen käyttö mikropiiriin ohjelmointiin on suositeltavaa. Tähän tarkoitukseen IAR tarjoaa kehitysympäristöstä käyttöön kaksi eri versiota. 30 päivän kokeiluversio ilman mitään rajoituksia ja aikarajoitukseton kokeiluversio, mutta siinä ohjelmakoodin koko on rajoitettu neljään kilotavuun mikä sulkee pois sen käytön tämän työn yhteydessä. (IAR Systems, 2012)

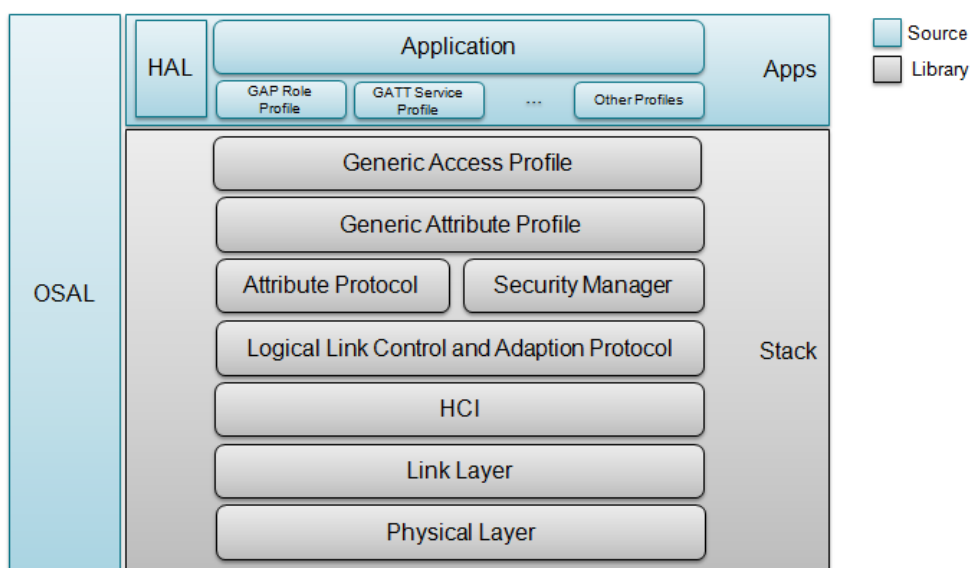
### 5.1 CC2540 Ohjelmointiympäristö

CC2540-mikropiirille ohjelmitava kokonaisuus koostuu viidestä pääkomponentista, jotka ovat OSAL, HAL, BLE-protokollapino, profiilit ja itse sovellus (kuva 17). BLE-protokollapino toimitetaan ohjelmiston mukana kohdekoodina, koska se on Texas Instrumentsin kehittelemä ja näin ollen suljetun lähdekoodin kokonaisuus. OSAL- ja HAL-rajapinnat ovat saatavilla lähdekoodeina. Ohjelmiston mukana toimitetaan myös kolme GAP-profiilia (peripheral, central ja peripheral bond manager) ja useita GATT-profiileja muutaman esimerkkisovelluksen kanssa. (Texas Instruments, 2013)

#### 5.1.1 Operating System Abstraction Layer (OSAL)

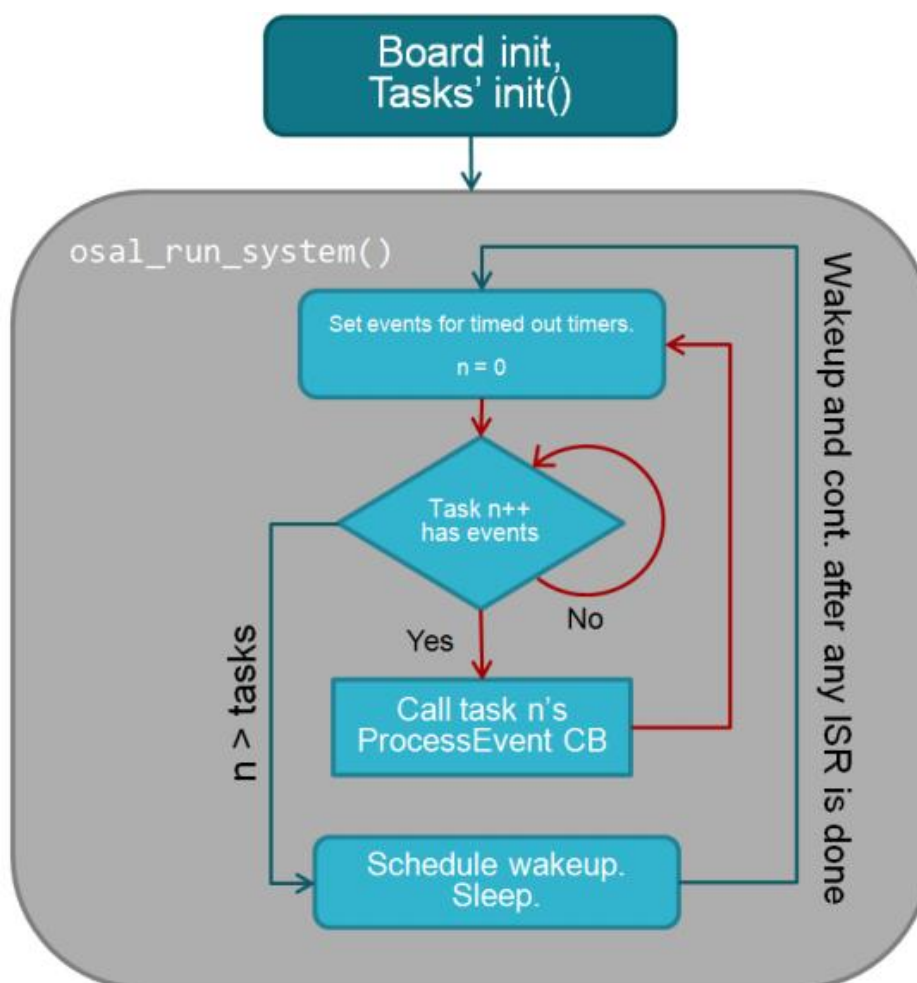
Koska CC2540-mikropiiri koostuu useista eri rauta- ja ohjelmistorajapinnoista sekä BLE-protokollapinosta niin täytyy sen hallinnoimiseen olla jonkinlainen järjestelmä. Tätä varten Texas Instruments on sisällyttänyt mikropiirille alkeellisen ohjelmistoarkkitehtuurin nimeltään OSAL. Sanan varsinaisessa merkityksessä OSAL ei ole käyttäjärjestelmä vaan ohjaussilmukka, joka mahdollistaa ohjelmiston asettamat tehtävät eli taskit ja suorittaa niitä kontrolloidusti. Ohjaussilmukan vuokaavio kuvassa 18. (Texas Instruments, 2013)

## TI *Bluetooth* low energy Software Solution



OSAL = Operating System Abstraction Layer (Prioritized task handling loop)  
 HAL = Hardware Abstraction Layer (Drivers and API for LEDs, Buttons etc)  
 Full API to access all stack functionality in the stack (Library) from the Application and Profiles

KUVA 17. CC2540-mikropiiri ohjelmoinnin näkökulmasta (Texas Instruments, 2013)



KUVA 18. OSAL-ympäristön ohjaussilmukan vuokaavio (Texas Instruments, 2013)

Jokainen ohjelman alijärjestelmä ajaa yhtä OSAL taskia eli tehtävää ja sille on määrätty uniikki task identifier (ID). Task identifierillä on tärkeä rooli OSAL-järjestelmässä, koska mitä pienempi arvo ID:llä on niin sitä suurempi prioriteetti sillä on järjestelmää ajettaessa. Tyypillisessä BLE ohjelmistossa on vähintään 11–12 eri tehtävää, joista esimerkki taulukossa 6. Taulukon tehtävät väliä 0-10 ovat CC2540-mikropiirin ja BLE toimintaan liittyviä tehtäviä ja näin ollen niiden prioriteetti on korkea. Tehtävät tästä eteenpäin ovat yleensä itse suoritettava ohjelmakoodi ja sen aliohjelmat, joidenka prioriteetti on alhaisempi ja näin ollen niiden taskID on suurempi.

TAULUKKO 6. Esimerkki OSAL-järjestelmän tehtävätaulukosta

task	taskID
Link Layer	0
HAL	1
HCI	2
OSAL Callback timer	3
L2CAP	4
GAP	5
GATT	6
SM	7
GAP Role Profile	8
GAP Bond Manager	9
GATT Server	10
Ohjelmakoodi	11

Tehtävien hallinnoimisen lisäksi OSAL tarjoaa useita muitakin palveluja, kuten viestien välitys, muistinhallinta, keskeytykset sekä ajastimet. Näiden ominaisuuksien vuoksi OSAL-järjestelmä muistuttaa hyvin paljon reaaliaikakäyttöjärjestelmää.

#### Alustus

OSAL-järjestelmän käyttämiseksi täytyy ohjelman main-funktion lopussa olla kutsu `osal_start_system()`, joka aloittaa OSAL-järjestelmän alustusrutiinit. Alustuksen tehtyään `osal_start_system` kutsuu `osalInitTasks()`-funktiota, joka alustaa taulukossa 6 mainitut tehtävät. Jokainen ohjelmiston osa-alue, jonka halutaan käyttävän OSAL-palveluita, täytyy määritellä `osalInitTasks()`-funktiioon ja yleensä se lisätään listan viimeiseksi. Järjestelmän alustusrutiinit suoritettua siirrytään tehtävien alustukseen, jolloin jokaiselle tehtävälle annetaan uniikki 8-bittinen task ID. Nämä vaiheet suoritettuaan OSAL-järjestelmä alkaa suorittaa ohjauksilmukkaa suorittaen tehtäviä ja niiden palvelupyyntöjä.

### 5.1.2 Hardware Abstraction Layer (HAL)

CC2540-mikropiirin HAL toimii rajapintana itse ohjelmakoodin, fyysisen laitteiston sekä BLE-pinon välillä. Erillisen laitteistorajapinnan etuina on suunnittelun ja ohjelmoinnin näkökulmasta se, että mikäli joudutaan tekemään laitteisto- tai piirilevymuutoksia niin ne eivät vaikuta itse ohjelmakoodiin. Texas Instrumentsin toimittava HAL-rajapinta pitää sisällään kirjastot SPI ja UART kommunikointiväylille, AD-muuntimelle, painonapeille sekä LED:lle. Tämä rajapinta on yhteensopiva kaikkien Texas Instrumentsin tarjoamien kehitysalustojen kanssa CC2540-mikropiirille. Uutta tuotetta suunnitellessa näitä kirjastoja voi käyttää esimerkkinä ja tehdä niihin tarvittavia muutoksia oman laitteiston vaatimuksien mukaan.

### 5.1.3 BLE-protokollapino

Bluetooth low energy protokollapino toimitetaan ohjelmiston mukana suljettuna lähdekoodina ja näin ollen siihen ei pääse käsiksi. Protokollapinon käyttämistä varten omassa ohjelmassa käyttäjän täytyy ymmärtää GAP- ja GATT-profiilien toiminta kun kommunikointi pinon kanssa tapahtuu näiden avulla.

### 5.1.4 Profiilit

Profiilit toimivat standardoituna rajapintana ohjelmiston ja BLE-protokollapinon välillä mahdollistaen datan lähettämisen ja vastaanottamisen. Profiilien ansiosta ohjelmiston kehittäjällä ei välttämättä tarvitse olla syvempää tietämystä itse protokollapinon toiminnasta vain riittää, että ymmärtää kuinka sen kanssa kommunikoidaan GAP- ja GATT-profiileilla. Näiden ennalta määrättyjen profiilien ansiosta laitevalmistajat voivat luoda omia sovelluksia, jotka ovat kuitenkin yhteensopivia muiden valmistajien Bluetooth-laitteiden kanssa. Bluetooth low energy profiilit kuvassa 19.

ANP	Alert Notification Profile
ANS	Alert Notification Service
BAS	Battery Service
BLP	Blood Pressure Profile
BLS	Blood Pressure Service
CSCP	Cycling Speed and Cadence Profile
CSCS	Cycling Speed and Cadence Service
CTS	Current Time Service
DIS	Device Information Service
FMP	Find Me Profile
GLP	Glucose Profile
GLS	Glucose Service
HIDS	HID Service
HOGP	HID over GATT Profile
HTP	Health Thermometer Profile
HTS	Health Thermometer Service
HRP	Heart Rate Profile
HRS	Heart Rate Service
IAS	Immediate Alert Service
LLS	Link Loss Service
NDCS	Next DST Change Service
PASP	Phone Alert Status Profile
PASS	Phone Alert Status Service
PXP	Proximity Profile
RSCP	Running Speed and Cadence Profile
RSCS	Running Speed and Cadence Service
RTUS	Reference Time Update Service
ScPP	Scan Parameters Profile
ScPS	Scan Parameters Service
TIP	Time Profile
TPS	Tx Power Service

KUVA 19. Bluetooth low energyn GATT-profiilit

### 5.1.5 Sovellus

Järjestelmän viimeisenä osiona on ohjelmitava sovellus, joka käyttää hyväkseen edellä mainittuja rajapintoja sekä profileja. Kaikkia edellä mainittuja osa-alueita ei välttämättä tarvitse sisällyttää vaan käyttää niitä osioita, joita oman ohjelman toiminta edellyttää. Esimerkkinä oma opinnäytetyöni, joka pohjautuu Heart Rate Service (HRS) GATT-profiiliin ja BLE peripheral GAP-rooliin.

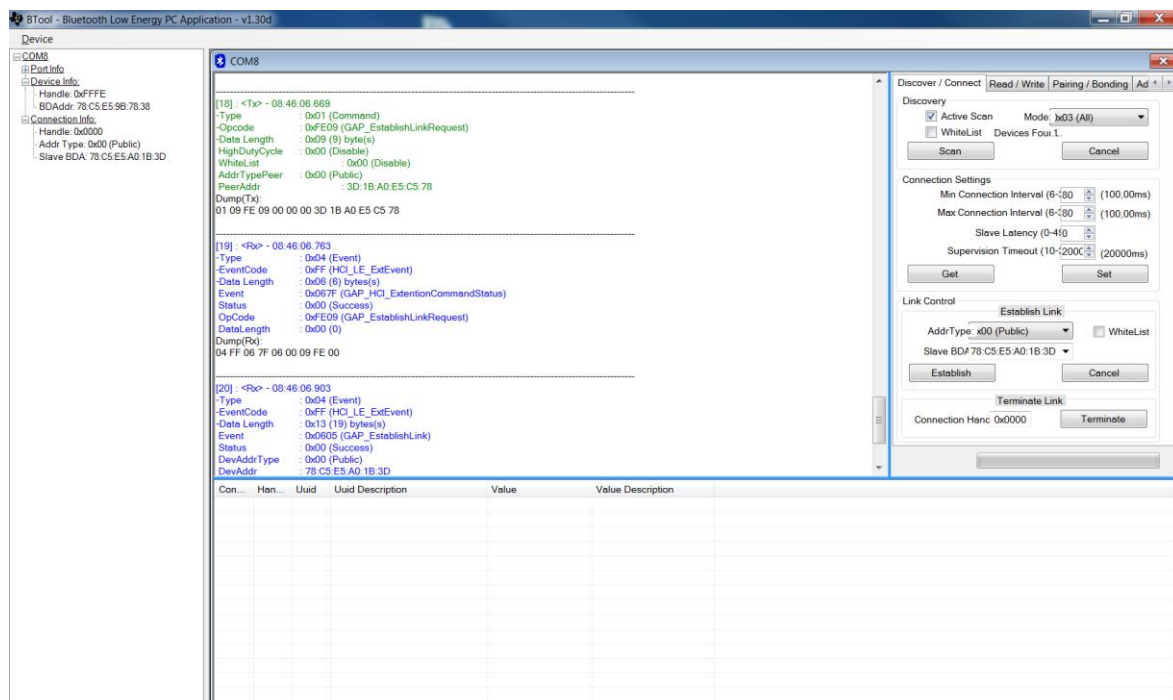
## 6 TOTEUTUS

Tässä opinnäytetyössä toteutettiin sovellus analogiasignaalin muuntamiseen digitaaliseen muotoon ja sen lähettämiseen langattomasti Bluetooth low energy -teknologiaan perustuvilla kehitysalustoilla. Kehitysalustojen mukana tuli viisi eri ohjelmaa, jotka ovat:

- BTool
- SmartRF Flash Programmer
- SmartRF Packet Sniffer
- SmartRF Studio 7
- IAR Embedded Workbench.

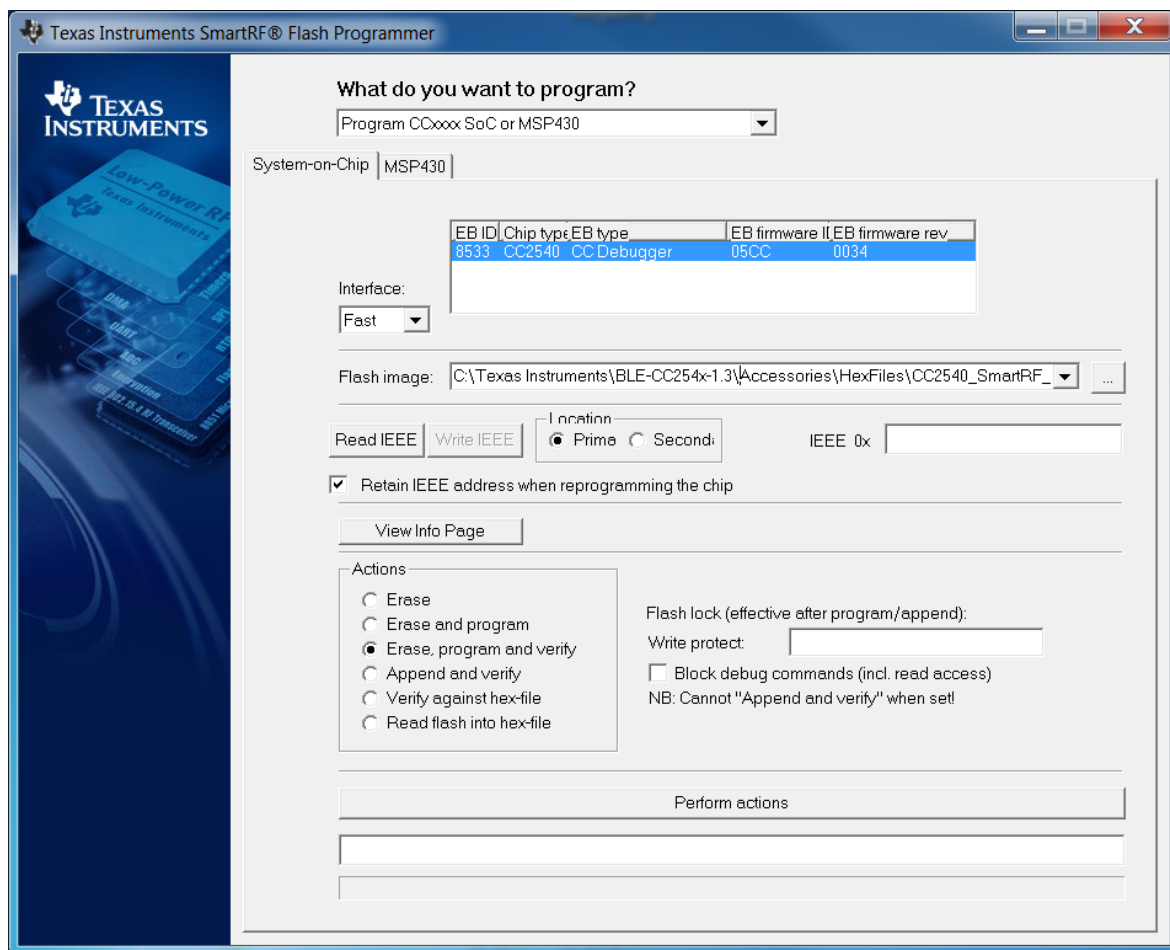
Neljä ensimmäistä on suunnattu kehitysalustojen toiminnan tutkimiseen, Bluetooth liikenteen tarkkailuun sekä asetusten muuttamiseen. Viides ohjelma on omien ohjelmien kehittämiseen tarkoitettu sulautettujen järjestelmien ohjelmointiympäristö.

BTool (kuva 20) on ohjelma, jolla voi muodostaa yhteyden kehitysalustoihin USB Donglen avulla. Yhteyden muodostamisen jälkeen ohjelmalla pystyy muuttamaan päätelaitteen asetuksia sekä seuraamaan niiden välillä tapahtuvaa liikennettä.



KUVA 20. BTool ohjelman yleisnäkymä. Vasemmalla käytössä olevat Bluetooth laitteet, keskellä loikinäkymä sekä oikealla asetusten määrittämiseen käytettävä valintaikkuna

SmartRF Flash Programmer (kuva 21) mahdollistaa kehitysalustojen uudelleen ohjelmoinnin halutulla .hex-tiedostolla.



KUVA 21. SmartRF Flash Programmer, jota käytettiin CC2540-mikropiirien flashaukseen

SmartRF Packet Sniffer (kuva 22) ohjelmalla pystyy tarkkailemaan lähialueella tapahtuvaa Bluetooth-liikennettä ja tallentamaan lokia siepatuista paketeista. Ohjelmalla pystyy suodattamaan halutut paketit sekä havainnollistamaan ne graafisessa muodossa tulkitsemisen helpottamiseksi.

Texas Instruments SmartRF Packet Sniffer Bluetooth Low Energy

Pnbr	Time (ms)	Channel	Access Address	Adv PDU Type	Adv PDU Header	AdvA	AdvData	CRC	RSSI (dBm)	FCS
1	+0	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK
2	+106	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK
3	+100	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK
4	+109	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK
5	+119	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK
6	+104	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK
7	+109	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK
8	+99	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK
9	+109	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK
10	+109	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK
11	+108	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK
12	+103	0x26	0x8E89BEDE	ADV_IND	Type TxAdd RxAdd PDU-Length 0 0 0 15	0x78C5E5A01B3D	02 01 06 05 02	0xA7212F	-36	OK

Packet count: 46 Error count: 0 Filter off RF device: CC254 Channel: 38 [0x2]

KUVA 22. SmartRF Packet Sniffer ohjelman sieppaamia mainostuspaketteja

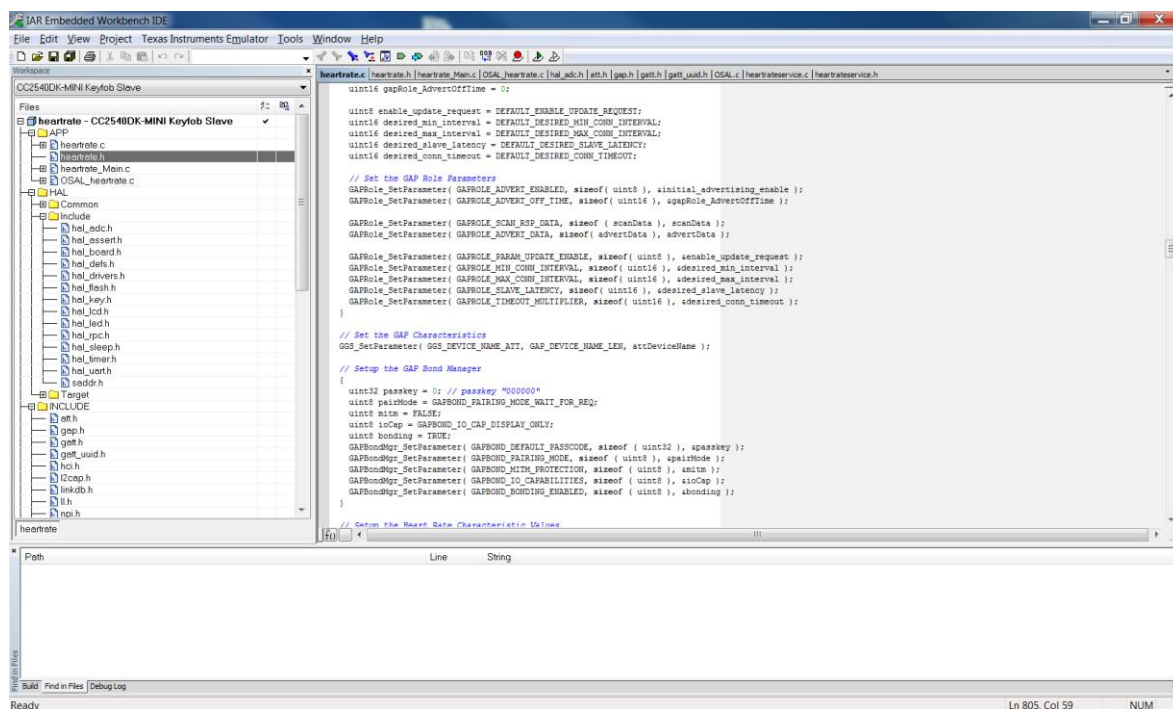
SmartRF Studio 7 (kuva 23) on monipuolinen ohjelma, joka tarjoaa huomattavasti kattavammat ominaisuudet langattoman tuotteen radio- ja rekisteriominaisuuksien tutkimiseen sekä asetusten muuttamiseen.



KUVA 23. SmartRF Studio ohjelmalla tehty signaalinvoimakkuus mittaus



IAR Embedded Workbench (kuva 24) on ainut Texas Instrumentsin tukema kehitysympäristö heidän omille tuotteilleen, joten vaihtoehtoisia ohjelmia tähän tarkoitukseen ei ole tarjolla.

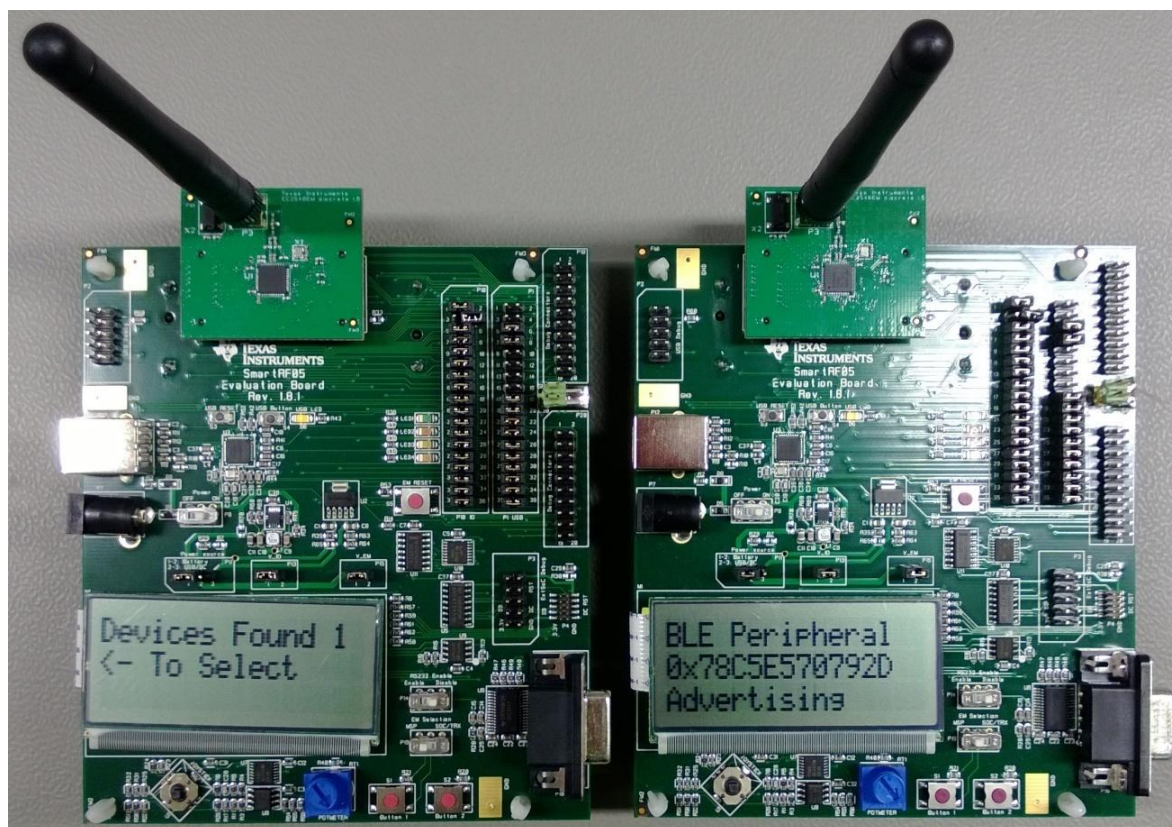


KUVA 24. IAR Embedded Workbench kehitysympäristön projektinäkymä

## 6.1 Työkalut

Työssä käytetyt kehitysalustat olivat CC2540DK (kuva 25) ja CC2540DK-MINI (kuva 26), joista jälkimmäistä käytettiin lopullisessa toteutuksessa lähinnä käytännön syistä.

Laajempi CC2540DK mahdollistaa nopean ja helpon tutustumisen CC2540-mikropiiriin tarjoamaan BLE-ympäristöön. Kytkeäalustoilla olevat ledit ja LCD-näytöt mahdollistivat niiden käyttämisen mm. debuggaukseen alustojen ohjelmointiin tutustuessa. Laajemman kehitysalustan huonona puolelta ilmeni sen työläämpi muokkaaminen omille kytkennöille, koska itse CC2540-mikropiiriin liittäminen ei päässyt käsiksi suoraan. Tästä johtuen joutui aina muutoksia tehdessä selvittämään, että mikä mikropiiriin nasta kytkeytyy minnekkin ja aiheuttaako siihen kytkeytyminen jotain ristiriitoja johtuen kytkentäalustojen omista oheislaitteista.



KUVA 25. CC2540DK-kehitysalusta pakkauksen sisältö. Kuvassa kaksi kytkentäalustaa, joihin on kytketty CC2540-moduulit lisäantenneineen. Vasemman puoleinen toimii isäntälaitteena ja oikeanpuoleinen orjalaitteena

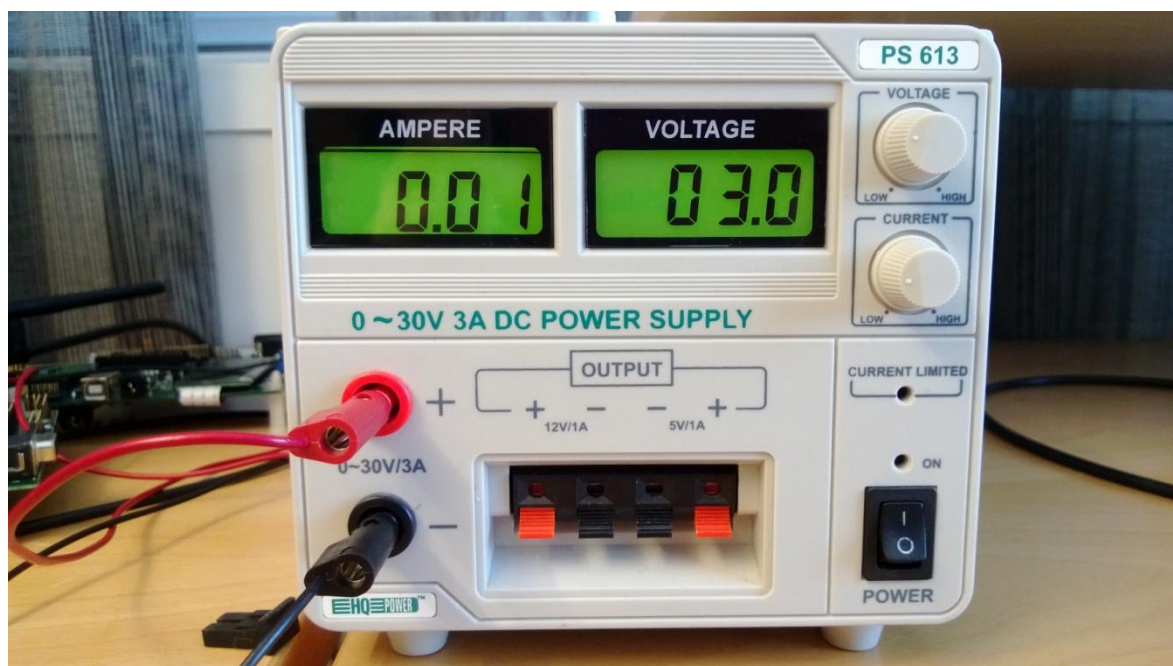
CC2540DK-MINI kehitysalusta päätyi käyttöön työn loppupuolella lähinnä siihen tehtävien kytkentöjen nopean toteuttamisen vuoksi. Kehitysalustalle pystyi antamaan käyttöjännitteen joko nappipariston tai CC Debugger-ohjelmointityökalun kautta USB-väylästä. Kehitysalustaa ohjelmoitaessa ja sen toimintaa debugatessa ilmeni kuitenkin, että nappiparistojen varaus kului todella nopeasti. Tästä johtuen kehitysalustaan tehtiin pieni kytkentämuutos, jonka ansiosta virransyöttö saatiin debugväylää pitkin. Kasvanut virrankulutus nappiparistoja käyttäessä johtui siitä, että laite oli samaan aikaan kytkettynä vaihtoehtoiseen virransyöttöön. Tätä ei kuitenkaan voinut jättää käyttämättä, koska alustan debugaus IAR Embedded Workbenchillä toiminnan aikana ei olisi enää onnistunut.



KUVA 26. CC2540DK-MINI kehitysalusta pakkauksen sisältö. Kuvassa vasemmalla kehitysalustan ohjelmointiin käytettävä CC Debugger, keskellä BLE-moduuli sekä oikealla USB-dongle

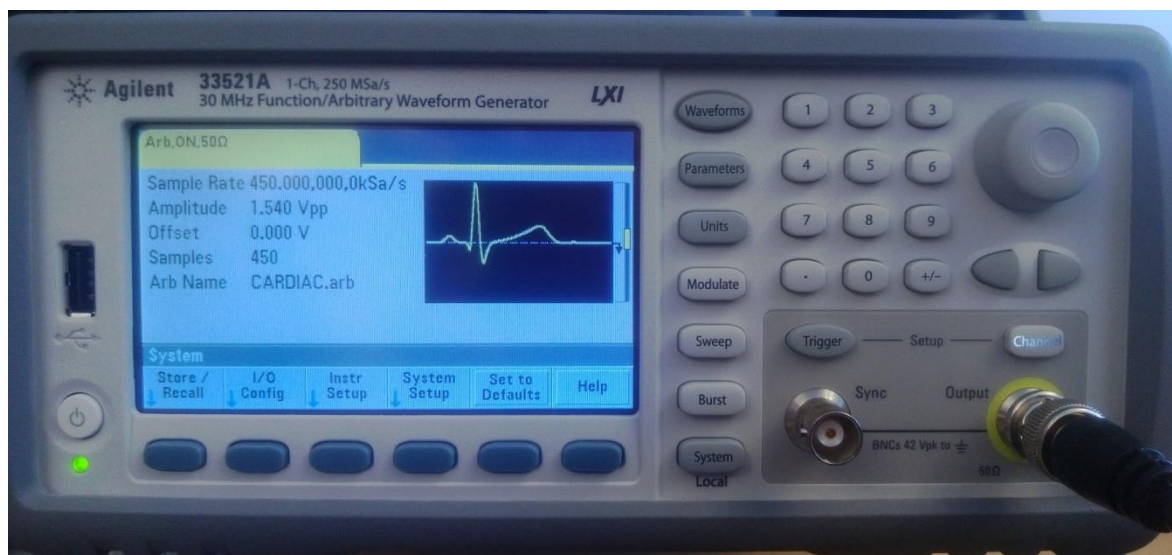
Kehitysalustojen lisäksi työssä käytettiin seuraavia laitteita:

- VEPS613 Laboratorio säädettävä tasavirtalähde
- AGILENT 33521A Funktio- ja vapaa-aaltomuotogeneraattori
- Fluke 123 Scopemeter.



KUVA 27. VEPS613 säädettävä tasavirtalähde

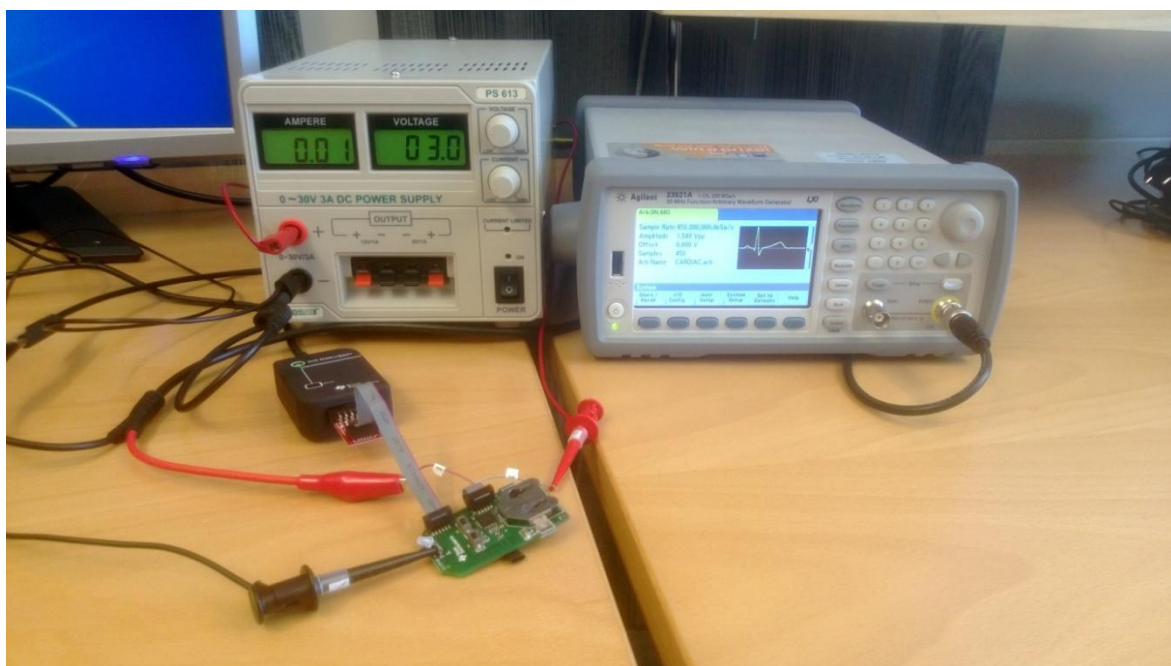




KUVA 28. AGILENT funktiogeneraattori, jolla voitiin luoda haluamansia signaalimuotoja

## 6.2 Mittauskytkentä

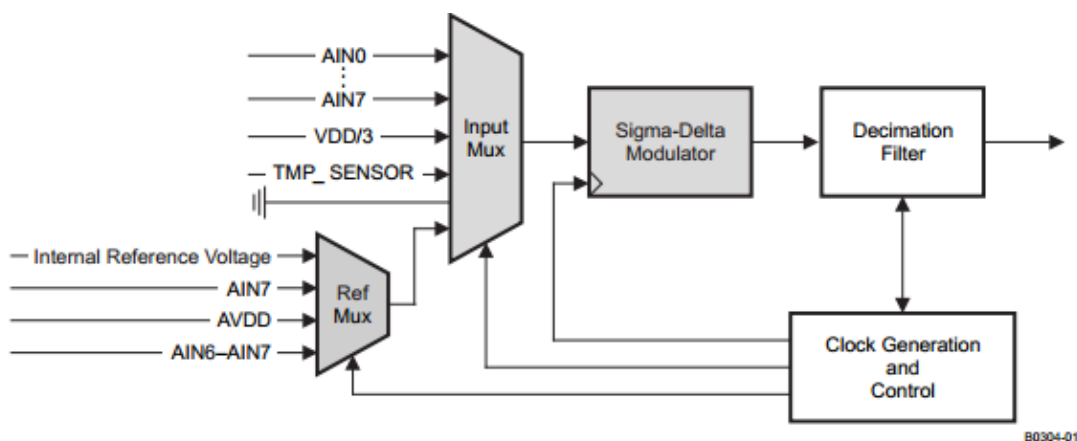
Kehitysalusta (kuva 26) kytkettiin tasavirtalähteeseen ja funktiogeneraattoriin liitteen 2 mukaisesti nastoihin P0\_6 ja P0\_7. Tasavirtalähteen antama 3VDC jännitetaso varmistettiin Fluke 123-mittarilla, jolloin voitiin olla varmoja tasaisesta referenssijännitteestä. AGILENT-funktiogeneraattori mahdollisti vapaiden aaltomuotojen luomisen ja sen avulla luotiin ihmisen sykettä vastaava EKG-signaali (kuva 28). Kehitysalusta ja siihen kytkettyjen laitteiden maatasot kytkettiin yhteen, jotta kytkettyihin laitteisiin saatiin sama maataso ja näin ollen välttyttiin signaalin vääristymiseltä. Kehitysalustan käyttöjännite tuotiin ohjelmointityökalun kautta USB-väylästä, joka on harmaa kaapeli kuvassa 29.



KUVA 29. Mittauskytkentä. Takana vasemmalla tasajännitelähde, oikealla funktiogeneraattori ja edessä keskellä CC2540DK-MINI kehitysalusta

## 6.3 Analogiasignaalin mittaus ja AD-muunnos

CC2540-mikropiiniin sisältää 8-kanavaisen Sigma-Delta AD-muuntimen (kuva 30), jonka resoluutio on valittavissa väliltä 8-14-bittiä. Kanavia voidaan käyttää joko yksittäin tai vertaillen kahta kanavaa keskenään. Muuntimen tulokset voidaan joko kirjoittaa suoraan muistiin jolloin AD-muunnin ei kuluta 8051-mikrokontrollerin suoritinaikaa tai antaa oman ohjelman käsiteltäväksi. Tarvittaessa AD-muuntimella voidaan myös luoda keskeytyskutsuja sekä käyttää AD-muunninta lämpötilan sekä pariston jännitetason mittaamiseen. (Texas Instruments, 2012)



KUVA 30. AD-muuntimen lohkokkaavio (Texas Instruments, 2012)

AD-muuntimen referenssijännitteen käytölle oli seuraavat vaihtoehdot:

- HAL\_ADC\_REF\_125V, sisäinen 1,25V referenssijännite
- HAL\_ADC\_REF\_AIN7, P0\_7 nastassa oleva ulkoinen jännite
- HAL\_ADC\_REF\_AVDD, mikropiiriin käyttöjännite
- HAL\_ADC\_REF\_DIFF, nastojen P0\_6 ja P0\_7 jännite-ero
- HAL\_ADC\_REF\_BITS, ADCCON2(0xB5) rekisterin kahdella eniten merkitsevällä bitillä määriteltävä referenssi:
  - 00: Sisäinen 1,25V referenssijännite
  - 01: Ulkoinen P0\_7(AIN7) tuotu jännite
  - 10: AVDD5-nastassa oleva mikropiiriin käyttöjännite
  - 11: Nastojen P0\_6 ja P0\_7 jännite-ero.

Sisäinen 1,25V referenssijännite oli tälle sovellukselle liian pieni, koska vahvistetun EKG-signaalin huipusta huippuun arvo oli 3VDC. Mikropiiriin käyttöjännite oli taasen liian epävarma referenssijännite, koska esim. nappiparistoa käyttäessä sen jännitetaso tippuu ajan myötä pariston varauksen pienentyessä. Differentiaalista kahden nastan välistä vertailua ei tämän sovelluksen yhteydessä nähty tarpeelliseksi käyttää. Referenssijännitteeksi päädyttiin käyttämään ulkoista P0\_7-nastaa tuotua 3V tasajännitettä, joka takasi sen, että referenssipiste pysyy vakiona ja AD-muuntimen antamat arvot täten myös.

Liitteen 2 mukaisesti kehitysalustan nasaan P0\_6 syötettiin analogista EKG-signaalia simuloivaa jännitettä (kuva 28), jonka huipusta huippuun arvo oli n. 3V. Kehitysalustan nasaan P0\_7 syötettiin AD-muuntimen tarvitseva referenssijännite VEPS613-tasavirtalähteellä, jonka suuruus oli 3VDC. Ohjelmistotasolla AD-muuntimen käyttöönotto alkoi sen alustuksella ja referenssipisteen asetuksella CC2540-mikropiirin käynnistysrutiinien yhteydessä funktiolla:

```
static void initADC(void)
{
    HalAdcSetReference( HAL_ADC_REF_AIN7 );
}
```

#### 6.4 Tiedon lähettäminen kehitysalustalla

AD-muuntimen alustuksen ja CC2540-mikropiirin käynnistysrutiinien jälkeen kehitysalusta alkaa mainostaa itseään mainostuskanavilla. Mainostuksen aikana laitteeseen voidaan muodostaa yhteys isäntälaitteella, joka tässä tapauksessa oli tietokoneeseen kytketty Bluetooth low energy USB-Dongle. Tietokoneessa olevaan USB-Dongleen oli ladattu ohjelmisto, joka mahdollisti sen toiminnan isäntälaitteena sekä ohjauksen yllä mainituilla ohjelmilla. Yhteys kehitysalustaan muodostettiin käyttäen BTool-ohjelmaa, jonka jälkeen kehitysalustaan lähetettiin komento 01:00 handleen 19 (kuva 16). Komento herättää kehitysalustan mainostus<->lepotila-silmukasta ja aktivoi mittausdatan lähetyksfunktion. Ohjelmiston kulkua havainnollistava lohko-kaavio liitteessä 3.

Tämän jälkeen AD-muuntimen tekemää EKG-signaalin muunnosfunktiota kutsutaan aina lähetyksapahtuman yhteydessä, jonka lähetyksenopeus oli säädettävissä 1 millisekunnin tarkkuudella aina 8 ms asti. Tämä mahdollisti parhaimmillaan 125Hz näytteistysnopeuden, mutta työssä käytettiin 10ms lähetyksenopeutta jolla saavutettiin 100Hz näytteistys. 100Hz näytteistyksellä saavutettiin riittävä tarkkuus EKG-signaalin piirtämistä varten.

EKG-signaalin mittausresoluutioksi valittiin 14-bittiä. Mittausherkkyys saadaan muuntamalla 14-bittinen arvo desimaalijärjestelmän arvoksi, josta saadaan arvoksi 16383. Kehitysalustaa debugatesa kuitenkin selvisi, että 14-bittisellä mittausresoluutiolla readADC-muuttujan suurimmaksi arvoksi rekisterissä saatiin 3V jännitteellä 8191. Mikä viittasi siihen, että vaikka rautatasolla mittaus tehdään 14-bittisenä, niin ohjelmistotasolla eniten merkitsevä bitti varataan etumerkkiä varten. Käytännössä tämä johtaa siihen, että 14-bittinen mittausresoluutio toteutuu 13-bittisenä. Tällöin mittausherkkyys desimaalijärjestelmän mukaan arvoksi saadaan 8191. Lopullinen mittausherkkyys saadaan seuraavalla kaavalla:

$$\frac{3V}{8191} = 3,66 * 10^{-4} \approx 0,37mV$$

Mikäli käytössä olevan etuasteen vahvistus on esimerkiksi 1000, niin varsinainen biosignaalin mittausherkkyys on:

$$\frac{0,37mV}{1000} \approx 3,7nV$$

Koska tiedon lähetyksessä dataa lähetetään tavuittain ja käytössä oli 14-bittinen mittausrésoluutio, niin muunnettu arvo jouduttiin puolittamaan ja lähettämään kahdessa tavun kokoisessa paketissa. EKG-signaalin näytteenotto lähetykspakettiin tapahtuu seuraavalla funktiolla:

```
static uint16 readADC(void)
{
    return HalAdcRead( HAL_ADC_CHN_AIN6, HAL_ADC_RESOLUTION_14 );
}
```

Lähetykspaketin muodostus tapahtui if-lauseella, joka tarkistaa onko 16-bittinen pakettimuoto käytössä. Mikäli näin on, niin silloin AD-muunnettu muuttuja jaetaan kahteen osaan ja nämä sijoitetaan lähetyksdataan.

## 6.5 Datan vastaanottaminen Mega Elektroniiikan ohjelmistolla

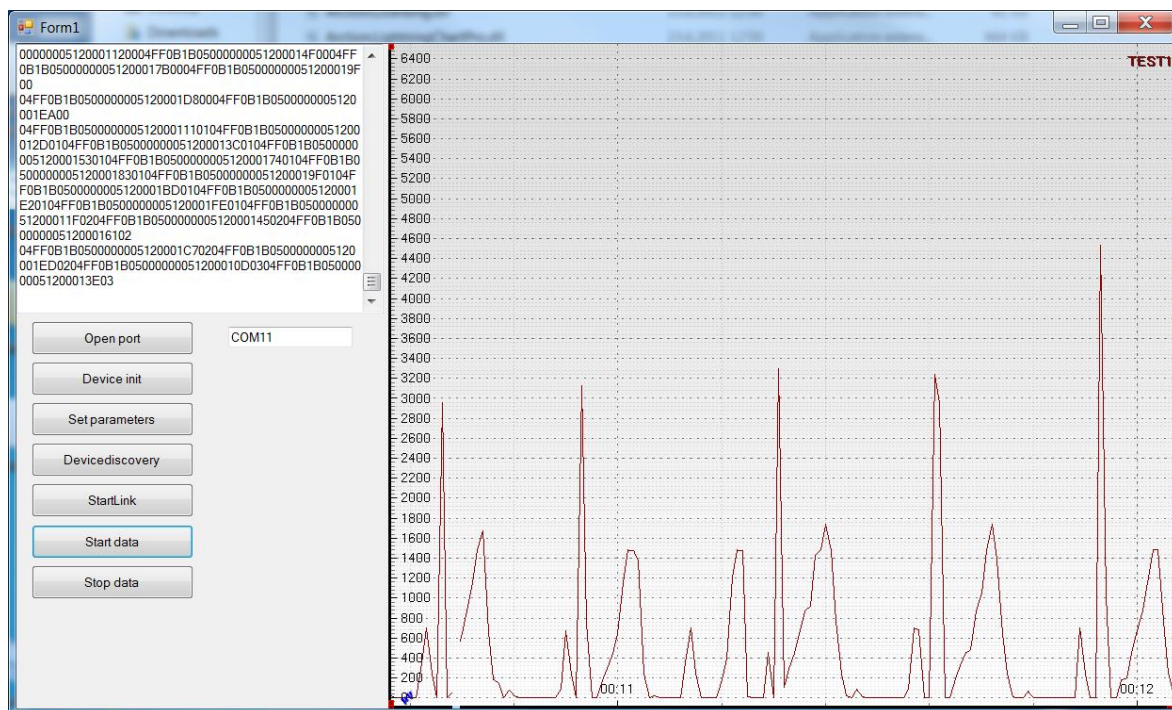
Datan vastaanottaminen tapahtui Mega Elektroniiikan omalla ohjelmistolla (kuva 31), joka on toteutettu C# eli C sharp-ohjelmointikielellä. Ohjelmaan toteutettiin yksinkertainen käyttöliittymä BLE-moduulin ohjaamiseen painonapein ja vastaanotetun datan piirtäminen graafina reaaliajassa.

Painonapeilla toteutetut komennot ovat seuraavat:

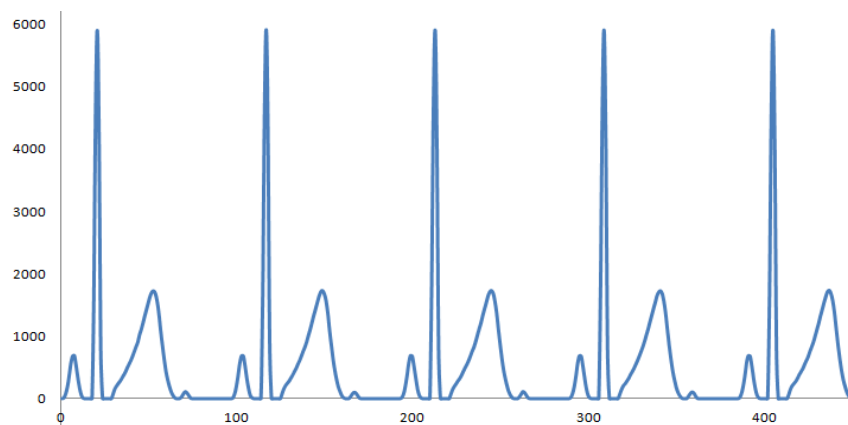
- Open port: Avaa kenttään syötetyn portin
- Device init: Porttiin kytketyn BLE-moduulin alustus ja asettaminen isäntä-rooliin
- Set parameters: Yhteysasetuksien määrittäminen
- Devicediscovery: BLE-laitteiden etsintä
- Startlink: Yhteyden muodostus mikäli BLE-laite löydettiin Devicediscoveryllä
- Start data: Lähettää BLE-laitteelle komennon analogia signaalin mittaamisen, muuntamisen ja lähettämisen aloitukselle
- Stop data: Pysäyttää datan lähetyksen.

Reaaliaikaisessa ohjelmiston toteutuksessa oli pieniä ongelmia vastaanotettujen datapakettien parseroinnissa ja toisistaan erottelussa, joka aiheutti vääristymiä piirrettyyn graafiin. Kuvassa 32 on vertailupisteinä toimiva graafi siitä, että minkälaista piirretyn datan pitäisi olla. Erona tällä graafilla on se, että data, jonka pohjalta se piirrettiin kerättiin erilliseen tekstitiedostoon. Tämä mahdollisti sen, että yhtään datapakettia ei jäänyt välistä ja sieltä voitiin poimia kaikki data-alueet, jotka sisälsivät EKG-signaalia sekä piirtää kuvaaja niiden perusteella.

Reaaliaikaiseen ohjelmistoon tehtävät muutokset vääristymien poistamiseksi ja oikeanlaisen signaalin piirtämiseksi ovat lähinnä pientä hienosäätöä, joka tullaan toteuttamaan aikanaan lopullisessa ohjelmistoversiossa.



KUVA 31. Vastaanotetun datan piirtämistä reaaliajassa Mega Elektronikan ohjelmistolla.



Kuva 32. Vertailupisteenä toiminut graafi vastaanotetusta datasta.



## 7 POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä toteutettiin toimiva Bluetooth low energy Heart Rate Service (HRS) spesifikaation mukainen CC2540-mikropiiriin pohjautuva sulautettujen järjestelmien ohjelmisto Mega Elektroonikalle käytettäväksi. Bluetooth -spesifikaation mukaisesti toteutettu ohjelmisto varmistaa, että se on helposti liitettävissä tulevaisuudessa muihin laitteisiin, jotka ovat toteutettu Bluetooth Smart tai Bluetooth Smart Ready teknologioilla.

Työtä tehdessä suurimmaksi ongelmaksi osoittautui alkuvaiheessa sulautettujen järjestelmien debugaus eli järjestelmän testaus ajon aikana. Tämä osoittautui hankalaksi sen takia, että päätelaitteiden täytyi olla yhteydessä toisiinsa ja muutoksien tekeminen ja rekisterien tarkkailu vaati aina ajettavan kehitysalustan pysäyttämisen, joka johti aina yhteyden katkeamiseen. Työn edetessä ohjelmiston ymmärtämisen parantumisen myötä tämä ongelma ei enää vaivannut niin paljoa kun pystyi tekemään muutoksia, joidenka vaikutukset osasi odottaa ilman ohjelmiston jatkuvaa pysäyttämistä. Työn tuloksena toteutettu ohjelmisto havainnollisti hyvin, että Bluetooth low energy – teknologia soveltuu varsin hyvin biosignaaleja mittaavien sensorien keräämän datan siirtämiseen päätelaitteelle langattomasti. Teknologian mahdollistama niukka virrankulutus langattoman yhteyden ylläpidossa mahdollistaa aikaisempaa pidemmät laitteiden toiminta-ajat, kuitenkin minkään osa-alueen varsinaisesti kärsimättä toteutuksessa.

## LÄHTEET

Bluetooth-enabled ASICs versus standard Bluetooth chipsets. *EE Times-Asia yrityksen internet-sivut*. [Verkkodokumentti] 2002. [viitattu 18.3.2013]. Saatavissa:

[http://www.eetasia.com/ARTICLES/2002APR/2002APR08\\_ICD\\_NTEK\\_RFD\\_ID\\_PD\\_TAC.PDF](http://www.eetasia.com/ARTICLES/2002APR/2002APR08_ICD_NTEK_RFD_ID_PD_TAC.PDF)

Bluegiga Technologies. BLE112 Bluetooth® Smart Module. *Bluegiga Technologies yrityksen internet-sivut*. [PDF-dokumentti] 2012. [viitattu 18.3.2013]. Saatavissa:

[https://techforum.bluegiga.com/protectedstore/44874/17653/127/bluegiga\\_1761/508938d62eaf72630f12fbb906ba59fe/BLE112\\_presentation\\_v2.pdf](https://techforum.bluegiga.com/protectedstore/44874/17653/127/bluegiga_1761/508938d62eaf72630f12fbb906ba59fe/BLE112_presentation_v2.pdf)

BlueRadios Inc. BR-LE4.0-S2. *BlueRadios yrityksen internet-sivut*. [PDF-dokumentti] 2012. [viitattu 18.3.2013]. Saatavissa: <http://www.blueradios.com/BR-LE4.0-S2.pdf>

connectBlue Inc. BR-LE4.0-S2. *connectBlue yrityksen internet-sivut*. [PDF-dokumentti] 2012. [viitattu 18.3.2013]. Saatavissa: <http://www.connectblue.com/nc/products/bluetooth-low-energy-products/bluetooth-low-energy-modules/bluetooth-low-energy-platform-module-olp425/?pdf=1&format=A4&pageId=1305>

Panasonic Corporation. PAN1720 Series Bluetooth®. *Panasonic yrityksen internet-sivut*. [PDF-dokumentti] 2012. [viitattu 18.3.2013]. Saatavissa:

[http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/Panasonic\\_PAN1720\\_New\\_Product\\_Introduction.pdf](http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/Panasonic_PAN1720_New_Product_Introduction.pdf)

Texas Instruments. CC2540. *Texas Instruments yrityksen internet-sivut*. [Verkkodokumentti] 2013. [viitattu 18.3.2013]. Saatavissa:

<http://www.ti.com/product/cc2540&DCMP=LowPowerRFICs+Other&HQS=Other+OT+cc2540>

Nokia Developer Portal. Wibree.[Verkkoartikkeli] 2012. [viitattu 2.4.2013]. Saatavissa:

<http://www.developer.nokia.com/Community/Wiki/Wibree>

Texas Instruments. 2.4-GHz Bluetooth® low energy System-on-Chip. *Texas Instruments yrityksen internet-sivut*. [PDF-dokumentti] 2012. [viitattu 18.3.2013]. Saatavissa:

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2540.pdf>

Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth 4.0 with low energy technology paves the way for Bluetooth Smart devices. *Bluetooth Special Interest Group internet-sivut*. [Verkkodokumentti] 2013. [viitattu 18.3.2013]. Saatavissa: <http://www.bluetooth.com/Pages/low-energy.aspx>

Texas Instruments. Texas Instruments CC2540/41 Bluetooth® Low Energy Software Developer's Guide. *Texas Instruments yrityksen internet-sivut*. [PDF-dokumentti] 2013. [viitattu 18.3.2013].

Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/pdf/swru271>

Elke Mackensen, Matthias Lai, Thomas M. Wendt. Performance Analysis of an Bluetooth Low Energy Sensor System. *IEEE Xplore verkkokirjasto*. [Verkkodokumentti] 2012. [viitattu 21.3.2013]. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6377634>

Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth Specification Version 4.0. *Bluetooth Special Interest Group internet-sivut*. [PDF-dokumentti] 2010. [viitattu 21.3.2013]. Saatavissa:

[https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc\\_id=229737](https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=229737)

Digikey. Bluetooth Low Energy Technology Makes New Applications Possible. *Digikey yrityksen internet-sivut*. [Verkkodokumentti] 2011. [viitattu 4.4.2013]. Saatavissa:

<http://www.digikey.com/us/en/techzone/wireless/resources/articles/bluetooth-low-energy-technology.html>

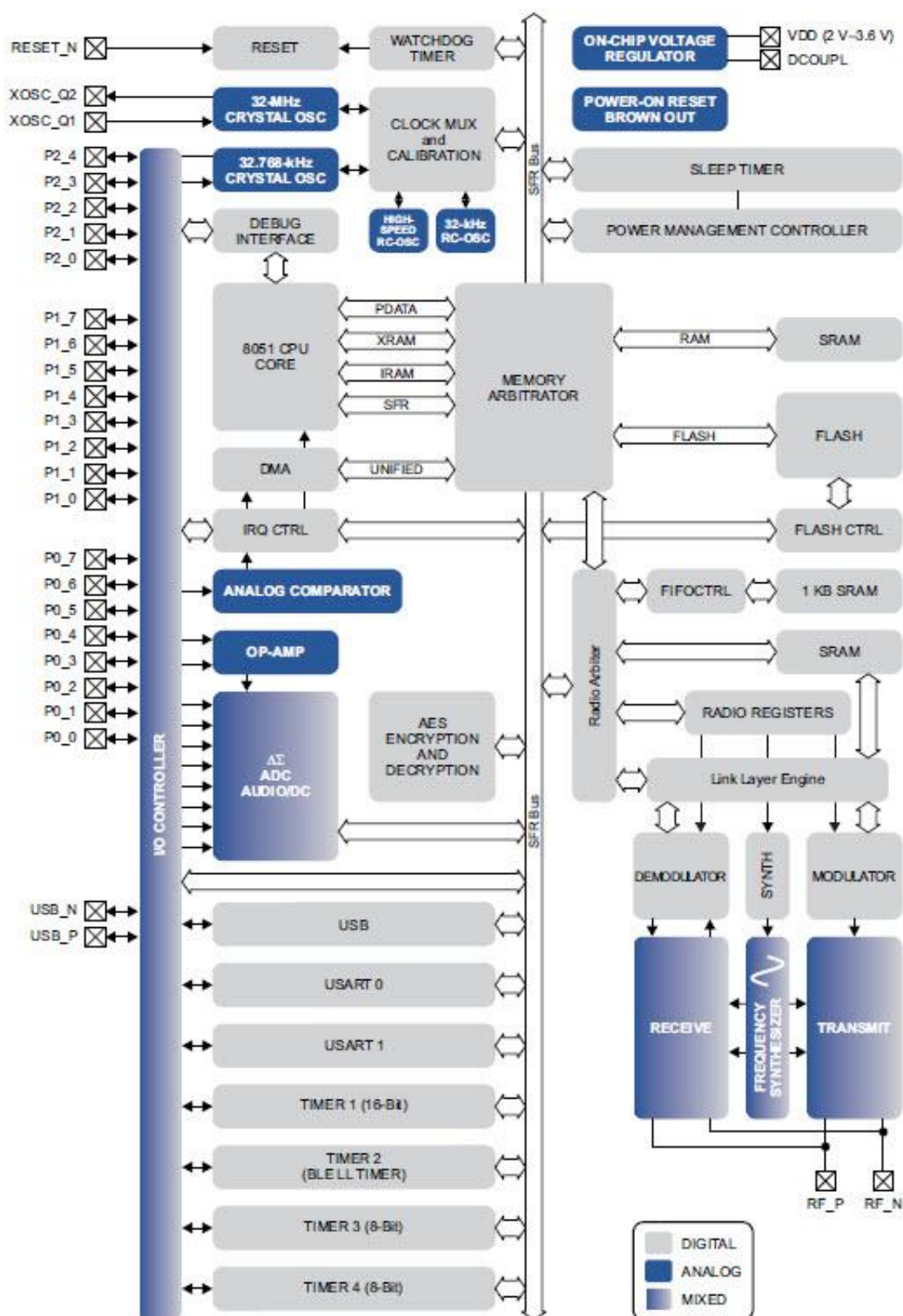
IAR Systems. IAR Embedded Workbench for 8051. *IAR Systems yrityksen internet-sivut*. [PDF-dokumentti] 2012. [viitattu 4.4.2013]. Saatavissa:

[http://www.iar.com/Global/Products/IAR\\_Embedded\\_Workbench/EW8051/ew\\_8051\\_datasheet.pdf](http://www.iar.com/Global/Products/IAR_Embedded_Workbench/EW8051/ew_8051_datasheet.pdf)

Texas Instruments. CC2540/41 System-on-Chip Solution for 2.4-GHz Bluetooth® low energy Applications. *Texas Instruments yrityksen internet-sivut*. [PDF-dokumentti] 2012. [viitattu 7.4.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/litv/pdf/swru191d>

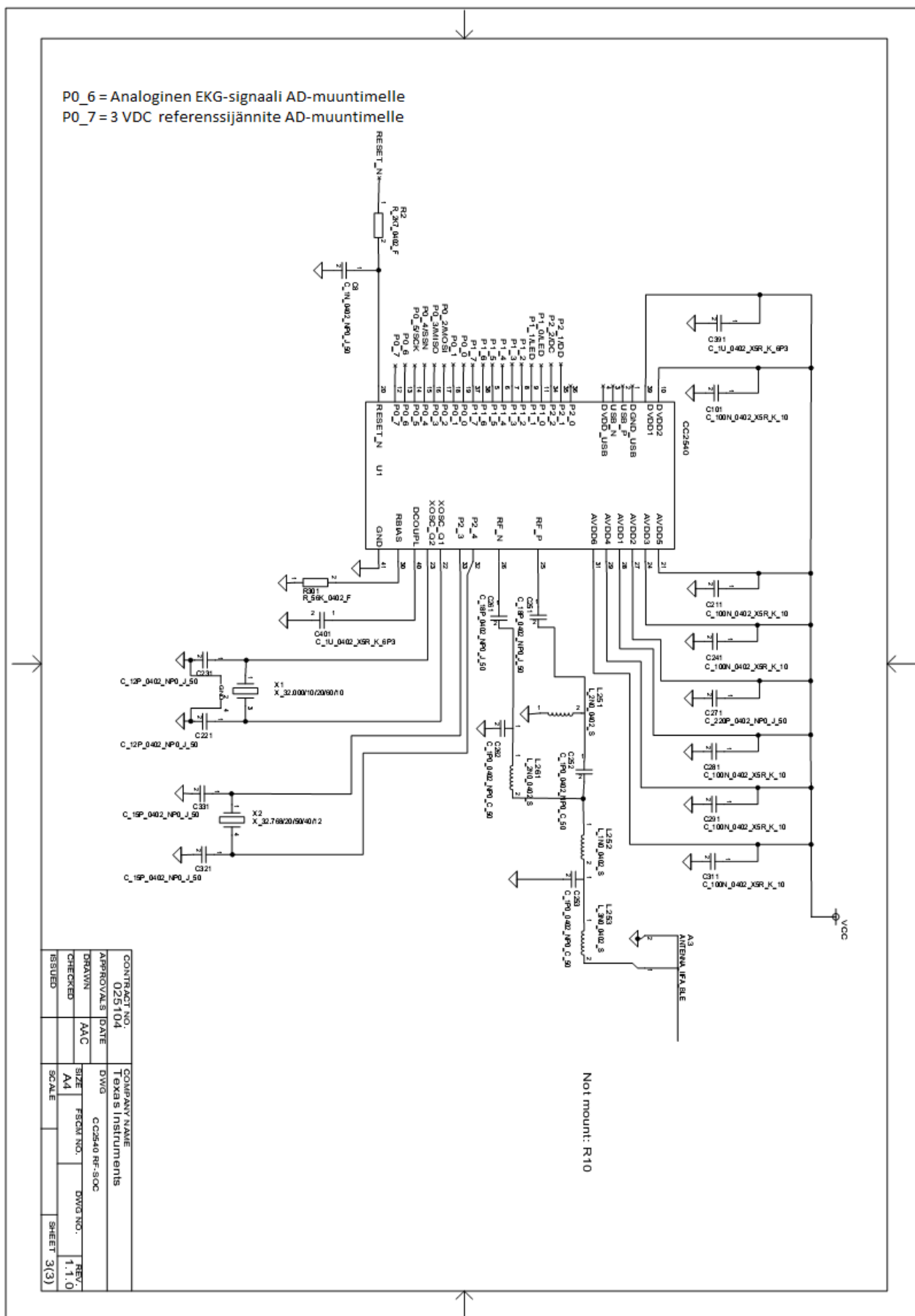
## LIITE 1

## CC2540-MIKROPIIRIN TOIMINNALLINEN KAAVIO



LIITE 2

CC2540DK-MINI KEHITYSALUSTAN KYTKENTÄKAAVIO



LIITE 3

HEART RATE SENSOR-OHJELMISTON LOHKOKAAVIO

