

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

SILICON LABS
EFR32-TUOTEPERHEEN
SOVELTUVUUS
EKG-MITTALAITTEEN
VAATIMUKSIIN

TEKIJÄ Eemeli Heikkinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä(t) Eemeli Heikkinen			
Työn nimi Silicon Labs EFR32-tuoteperheen soveltuvuus EKG-mittalaitteen vaatimuksiin			
Päiväys	30.5.2023	Sivumäärä/Liitteet	28
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Bitium Biosignals Oy			
Tiivistelmä			
<p>Tässä opinnäytetyössä päällimmäisenä tarkoituksena oli tutkia, kuinka hyvin teknologiayhtiö Silicon Labs:in EFR32-tuoteperheen Bluetooth-moduulit soveltuvat käytettäväksi EKG-mittalaitteessa. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia erityisesti Bluetooth-moduulien virrankulutusta sekä langatonta tiedonsiirtonopeutta Bluetooth-protokollalla, sekä löytää mahdollisia riskitekijöitä, joiden takia moduulit eivät soveltuisi käytettäväksi tulevaisuuden Bittium Biosignalsin medikaalilaitteessa.</p> <p>Tutkimussa käytettiin Silicon Labs:in valmistamaa Bluetooth-moduulia: EFR32xG22:ta sekä EFR32BG22 Thunderboardia. Tiedonsiirtonopeuksia todennettiin niin kahden EFR32-moduulin välillä, kuin EFR32:n ja älypuhelinväylän välillä. Bluetooth-moduulien ohjelmistokoodina käytettiin joissain tapauksissa Silicon Labsin tarjoamia esimerkki- tai testaussovelluksia, ja joissain tapauksissa itsekirjoittamaa ohjelmakoodia. Kehitysympäristönä käytettiin Silicon Labs:in kehittämää Simplicity Studio -kehitysympäristöä. Tulosten todentamiseen käytettiin Silicon Labsin sekä Bittiumin tarjoamia työkaluja.</p> <p>Tulokset olivat lupaavia sekä virrankulutuksen että tiedonsiirtonopeuden osalta, ja olivat linjassa valmistajan antamien lukujen kanssa. Tämän takia tutkitut tuotteet ovat varteenotettavia vaihtoehtoja kannettavan EKG-laitteen langattomana tiedonsiirtoväylänä. Tutkimus ei kuitenkaan voi vastata lopullisesti siihen, pystyvätkö kyseiset moduulit vastaamaan kaikkiin mahdollisiin käyttötapoihin sekä vaatimuksiin, joita tulevaisuuden laitteella voi olla, eikä siihen, voidaanko moduulien prosessorilla ajaa koko mittalaitteen applikaatiokoodia.</p>			
Avainsanat Bluetooth Low Energy, Holter, EKG, medikaalitekniologia, sulautettu järjestelmä			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author(s) Eemeli Heikkinen	
Title of Thesis Suitability of Silicon Labs' EFR32 product family's usage in ambulatory ECG device	
Date 30.5.2023	Pages/Appendices 26
Client Organisation /Partners Bittium Biosignals Oy	
<p>Abstract</p> <p>The main purpose of this thesis was to investigate how well the Bluetooth modules of technology company Silicon Labs' EFR32 product family are suitable for use in an ambulatory ECG measuring device. The aim of the thesis was to study the power consumption and wireless data transfer rate of the Bluetooth modules using the Bluetooth protocol, and to identify possible risk factors that might make the modules unsuitable for use in the future Bittium Biosignals medical device.</p> <p>Two different Bluetooth modules manufactured by Silicon Labs were used in the study: the EFR32xG22 and EFR32BG22 Thunderboard Kit. Data transfer rates were verified between two EFR32 devices as well as between the EFR32 and a smartphone. In some cases, Silicon Labs' example or testing applications were used as the Bluetooth module's software code, written in the C programming language using Silicon Labs' Simplicity Studio development environment. Tool provided by Silicon Labs and Bittium were used to verify the results.</p> <p>The results were promising in terms of both power consumption and data transfer rate and were consistent with the numbers provided by the module manufacturer. Therefore, these products are a viable option as a wireless data transfer channel for an ambulatory ECG device. However, the study cannot definitively answer whether these modules can meet all possible use cases and requirements that a future device may have.</p>	
<p>Keywords Bluetooth Low Energy, Holter, ECG, medical technology, embedded system</p>	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	5
1.1	Bittium	5
1.2	Lyhenteet ja määritelmät.....	6
2	BLUETOOTH LOW ENERGY	7
2.1	Bluetooth Low Energy -arkkitehtuuri	7
2.1.1	Physical Layer	8
2.1.2	Link Layer	8
2.1.3	HCI (Host-Controller Interface).....	8
2.1.4	L2CAP (Logical Link Control Adaptation Protocol).....	8
2.1.5	GAP (Generic Access Profile)	8
2.1.6	ATT (Attribute Protocol)	8
2.1.7	GATT (Generic Attribute Profile)	9
2.2	Bluetooth Low Energy -yhteyden toimintaperiaate.....	10
2.2.1	Mainostaminen	10
2.2.2	Skannaaminen.....	10
2.2.3	Yhdistäminen ja yhteyden ylläpito.....	10
3	KÄYTETYT KEHITYSTYÖKALUT SEKÄ LAITTEET	12
3.1	EFR32	12
3.1.1	EFR32xG22 ja Wireless Starter Kit	12
3.1.2	EFR32BG22 Thunderboard kit.....	13
3.2	Simplicity Studio 5	13
3.2.1	Energy Profiler.....	14
3.3	EFR Connect.....	15
4	TESTISKENAARIOT JA TULOKSET	17
4.1	Lähetys EFR32xG22:sta Thunderboardiin SPP-aplikaatiolla.....	17
4.2	Lähetys EFR32:sta Android-puhelimeen.....	19
4.3	LE Power Control	21
4.4	FreeRTOS-sovellus	22
4.5	Apple iOS ja BLE	23
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	26
6	LÄHDELUETTELO.....	27

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, soveltuuko teknologiayhtiö Silicon Labs:in EFR32 Bluetooth-järjestelmäpiiriperhe soveltuu käytettäväksi kannettavassa (engl. *ambulatory*) EKG-laitteessa. EKG-laitetta suunniteltaessa yksi tärkeimmistä kriteereistä on mahdollisimman matala virrankulutus, sillä laitteen täytyy pystyä mittaamaan loppukäyttäjän sydänkäyrää useita päiviä ilman lataamista. Toinen tärkeä kriteeri on tiedonsiirtonopeus, jotta mittadataa voidaan siirtää mahdollisimman nopeasti laitteesta pois mm. reaaliaikaista etäanalysointia varten. Nämä kaksi tärkeää kriteeriä olivat pääasialliset tutkimuksen aiheet.

Työn tilaajana ja oli Bittium Biosignals Oy, joka myös antoi aiheen minulle. Opinnäytetyö suoritettiin täyspäiväisessä työsuhteessa osana yrityksen sisäistä tutkimusprojektia, jossa kartoitetaan yrityksen tulevista tuotteista mahdollisesti käytettäviä teknologioita, komponentteja sekä ominaisuuksia.

Medikaalitekнологia ja medikaalilaitteet ovat nopeasti kasvava markkina. Vuonna 2021 medikaalilaitteiden markkinoiden kooksi arvioitiin 550 miljardia Yhdysvaltain dollaria, ja sen ennustetaan kasvavan 850 miljardiin vuoteen 2030 mennessä (Precedence Research, 2021). Medikaalitekнологian alalla toimivien yritysten täytyy pystyä tuotteillaan pysyä kehityksessä mukana saadakseen osan nopeasti kasvavilla markkinoilla. Bittium Biosignals Oy:n on myös tulevaisuudessa kyettävä suunnittelemaan ja valmistamaan tuotteita, jotka sisältävä oikein valittuja komponentteja ja teknologioita, jotka oikein hyödynnettyinä kykenevät kilpailemaan muiden yritysten tuotteiden kanssa.

1.1 Bittium

Bittium Oyj on vuonna 1985 perustettu suomalainen teknologiayritys, jonka pääasiallisina toimialoina ovat langaton tiedonsiirto, kyberturvallisuus sekä medikaalitekнологia. Bittiumin pääkonttori sijaitsee Oulussa, ja sillä on Suomessa toimipisteitä lisäksi Kuopiossa, Tampereella, Espoossa sekä Kajaanissa. Suomen ulkopuolella toimipisteitä on myös Saksassa, Yhdysvalloissa, Meksikossa sekä Singaporessa. Bittiumin henkilöstöön kuuluu vuonna 2022 yli 600 työntekijää (Bittium, 2023).

Bittium Biosignals Oy on Kuopiossa sijaitseva Bittiumin tytäryhtiö. Bittium Biosignals on medikaalitekнологian tuotteita sekä palveluita tarjoava yritys, jonka tuotteet keskittyvät ihmisen biosignaalien mittaamiseen ja analysointiin muun muassa kardiologian ja neurologian osa-alueilla. Bittium Biosignalsin tuotteisiin kuuluvat muun muassa EKG-mittauksissa käytettävä Faros sekä kotona tehtäviin uniapneatutkimuksiin käytettävä Respiro.

1.2 Lyhenteet ja määritelmät

BLE	Bluetooth Low Energy, matalaenerginen Bluetooth-protokolla.
EKG	Elektrokardiogrammi. Sydämen toimintaa kuvaava käyrä, joka mitataan sydämen sähköimpulsseja mittaamalla.
Holter-mittaus	Pitkäaikainen EKG-mittaus, esimerkiksi vuorokausi tai viikko.
kB	Kilotavu, engl. kilobyte
Mbps	Megabittiä sekunnissa
RAM	Read-only-memory, keskusmuisti.
RSSI	Received Signal Strength Indicator, vastaanotetun signaalin vahvuutta kuvaava arvo.
SPP	Serial Port Profile
SoC	System-on-Chip, järjestelmäpiiri
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter, sarjaliikennepiiri
WSTK	Wireless Starter Kit

2 BLUETOOTH LOW ENERGY

Bluetooth Low Energy (lyh. BLE tai Bluetooth LE) on osa Bluetooth-standardia, ja sen ensimmäinen versio julkaistiin vuonna 2010 osana Bluetooth 4.0 -standardia. Se kehittäminen aloitettiin Nokian toimesta vuonna 2006 nimellä Wibree, ja se tunnetaan myös nykyään jo vanhentuneella Bluetooth Smart -nimellä. BLE-protokolla on oma teknologiansa, eikä se ole yhteensopiva perinteisen Bluetoothin (Bluetooth Classic) kanssa.

Bluetooth-standardin on määrittänyt ja sitä kehittää etujärjestö Bluetooth Special Interest Group, eli Bluetooth SIG. Sillä on jäsenenä yli 38000 yritystä (Bluetooth SIG, ei pvm).

BLE:ä käytetään laajalti sovelluksissa, älykelloissa, lääketieteellisissä laitteissa ja kodin automaatiojärjestelmissä, joissa alhainen virtakulutus on tärkeää. BLE kuluttaa huomattavasti vähemmän virtaa verrattuna perinteiseen Bluetoothiin (Bluetooth Classic), mikä mahdollistaa laitteiden toiminnan pidempään ilman tarvetta lataukselle tai paristojen vaihtamiselle.

Taajuusalueena BLE käyttää samaa 2,4 gigahertzin ISM-taajuusaluetta (Industrial, Scientific, Medical) kuin Bluetooth Classic. Tällä taajuusalueella BLE käyttää 40 eri kanavaa, jotka ovat 2 MHz:n välein. Näistä kanavista 37 on datakanavia, ja kolme kanavaa on käytössä mainostuskanavina (Bluetooth SIG, ei pvm).

Uusin pääversio Bluetooth 5 julkaistiin vuonna 2016. Isoimpana uudistuksena oli 2 M PHY, joka käytännössä kaksinkertaistaa tiedonsiirtonopeuden verrattuna aikaisempiin BLE:n versioihin. Tämä tarkoittaa sitä, että BLE:n Physical Layer kykenee lähettämään tai vastaanottamaan 2 miljoonaa merkkiä sekunnissa, kun aikaisemmissa versioissa oli käytössä 1 M PHY, jolloin merkkejä voitiin lähettää sekunnissa miljoona. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että käytännössä 2 megabitin tiedonsiirtonopeus käyttödatalle on mahdollista, vaan BLE 5:n teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus on noin 1,4 Mbps (Ren, Bluetooth.com, 2017).

Bluetooth 5:n mahdollistama tiedonsiirtonopeus kuitenkin mahdollistaa BLE:n käyttämisen Bluetooth Classicin sijaan myös suuria datamääriä käsittelevissä applikaatioissa, joissa aikaisemmin alhaisempi tiedonsiirtonopeus oli rajoittava tekijä.

2.1 Bluetooth Low Energy -arkkitehtuuri

BLE:n arkkitehtuuri (kutsutaan myös protokollapinoksi) kuvaa BLE-protokollan eri komponentteja tai tasoja. Se koostuu kahdesta päätasosta, jotka ovat Controller sekä Host.

Controllerin muodostavat protokollapinon alimpiin tasoihin kuuluvat radiotoiminnan sisältävä Physical Layer, sekä sen toimintaa hallitseva Link Layer. Hostin muodostavat protokollapinon tasot HCI, L2CAP, SMP, GAP, ATT ja GATT.

2.1.1 Physical Layer

Physical Layer (PHY) sisältää analogiset piirit, jotka ovat vastuussa digitaalisten symbolien eli datan lähettämisestä langattomasti radion avulla. Se on matalin kerros protokollapinossa, ja sen yläpuolella on PHY:ä käyttävä Link Layer.

2.1.2 Link Layer

Vastaa mainostamisesta, skannaamisesta ja yhteyksien luomisesta sekä ylläpitämisestä alemmalla tasolla. Link Layer formatoi ylemmiltä tasoilta saapuneen datan Link Layer -protokollan mukaisesti, joka on lopullinen datan muoto, jolla se lähetetään radion yli.

2.1.3 HCI (Host-Controller Interface)

Vastaa Controllerin ja Hostin välisestä kommunikaatiosta. Käytännössä tämä voi olla toteutettu esimerkiksi fyysisellä sarjaväylällä kuten UART:lla, USB:llä tai SPI:llä. Myös softwarella toteutettu API on mahdollinen.

2.1.4 L2CAP (Logical Link Control Adaptation Protocol)

Hostin alimman tason muodostaa Logical Link Control Adaptation Protocol, eli L2CAP. Se vastaa datan käsittelystä - kuten paketoinnista - Hostin ylempien tasojen (GAP, GATT, applikaatio) sekä Controllerin välillä.

2.1.5 GAP (Generic Access Profile)

Generic Access Profile määrittää, minkälaisena laite näyttäytyy muille laitteille, voiko siihen yhdistää ja voiko laitteen parittaa. Laitteen rooli määritetään myös GAP:ssa. Eri rooleja on seuraavanlaisesti (Silicon Labs, ei pvm, s. 11):

- **Broadcaster:** Mainostaa ja ainoastaan lähettää dataa.
- **Observer:** Kuuntelee muiden laitteiden mainostuksia ja vastaanottaa dataa.
- **Peripheral:** Laite mainostaa ja siihen voidaan yhdistää. Yleensä laite, joka yhdistää yhteen laitteeseen, joka on central-roolissa (esim. älykello).
- **Central:** Laite ei mainosta, vaan yhdistää yhteen tai useampaan laitteeseen, tehden itse aloituksen yhteyden muodostamiseen (esim. älypuhelin).

2.1.6 ATT (Attribute Protocol)

Bluetooth Low Energy -laitteet käyttävät profileja, jotka sisältävät tietoja laitteen tilasta. Yhtä tämmöistä tilatietoa kutsutaan attribuutiksi, ja näitä attribuutteihin päästään käsiksi ATT-protokollalla. ATT määrittää millä tavalla laitteet kommunikoivat keskenään, siinä on määritetty laitteille kaksi roolia: toinen laitteista on serveri (server) ja toinen on client. Serveri on laite, joka säilyttää tietoja yhdessä tai useammassa attribuutissa. Client taas voi pyytää serveriltä näitä tietoja tekemällä pyyntöjä (ATT-request), joihin serveri vastaa. Client voi myös lähettää kirjoituspyyntöjä, joilla voi kirjoittaa serverin attribuutteihin arvoja.

Nopeampi ja tehokkaampi tapa pyyntöjen sijaan on se, että serveri lähettää attribuuttitietoja clientille ilman erillistä pyyntöä. Tämän mahdollistaa kaksi viestityyppiä: notifikaatiot ja indikaatiot. Näiden ero on se, että indikaatiot vaativat clientilta vahvistuksen viestin vastaanotosta, kun taas notifi-kaatio ei vaadi vahvistusta.

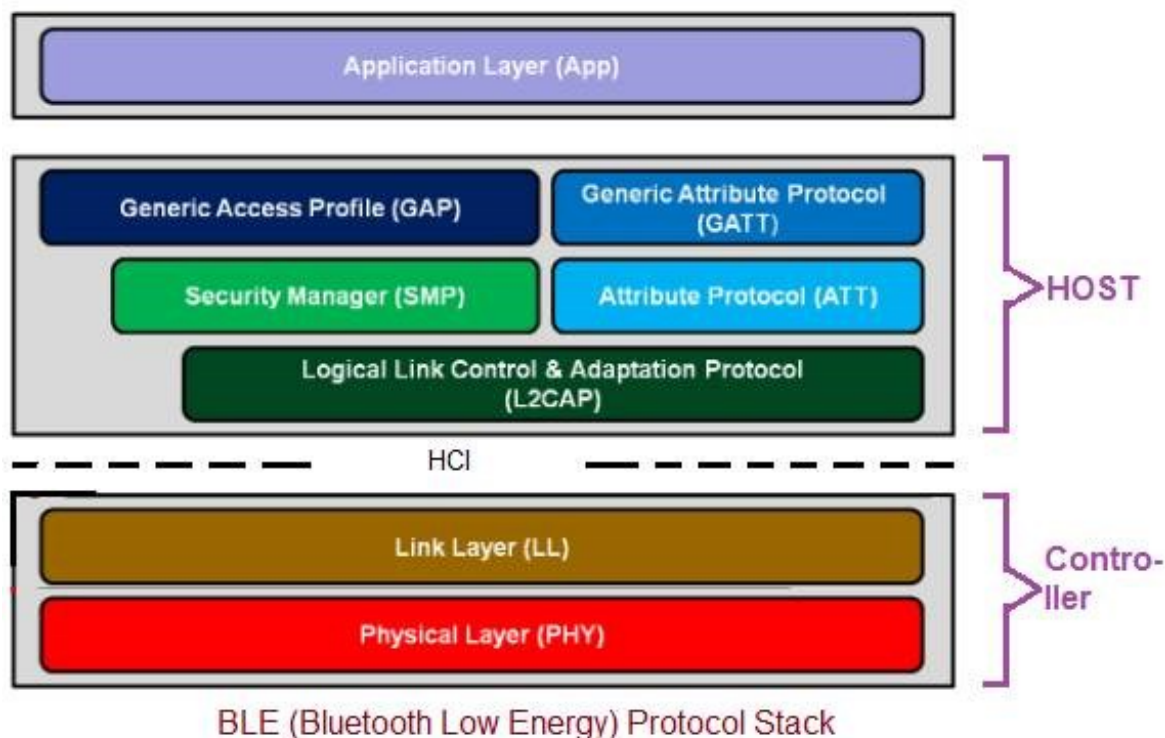
2.1.7 GATT (Generic Attribute Profile)

ATT:n päälle rakennetaan GATT, joka määrittää kehyksen (framework) datalle, jota ATT:n avulla siirretään ja tallennetaan. Myös GATT:ssa on määritetty serverin ja clientin rooli. GATT-serveri tallettaa datan, jota ATT-protokollalla siirretään, ja se vastaa GATT-clientin lähettämiin ATT-pyyntöihin. Se myös määrittää sen sisältämän datan formaatin. Attribuutti voi olla määritetty GATT:ssa kahdella eri tavalla: se voi olla service tai characteristic.

Characteristicit ovat data-arvoja, joista servicet koostuvat. Yksi characteristic voi esimerkiksi sisältää arvon, joka kuvaa laitteen akun varausta. Se sisältää myös tiedon siitä, mitä kyseistä characteristicia koskevia ATT-pyyntöjä hyväksytään clientilta, sekä voiko sitä lähettää indikaatioina tai notifi-kaatioina clientille.

Service on kokoelma dataa, ja se koostuu yhdestä tai useammasta characteristicista. Servicen avulla voidaan kuvata laitteen eri toiminnallisuuksia, kuten lämpötilatietoja, akun varausta tai muuta laitteen tilaa. Esimerkiksi standardisoitu "Heart Rate"-service sisältää characteristicit "Heart Rate Measurement", jonka arvo kertoo pulssin, sekä "Body Sensor Location", joka kertoo laitteen tarkoitetun sijainnin kehossa.

Bluetooth SIG on määrittänyt lukuisia standardisoituja servicejä ja characteristicia, jotka mahdollis-tavat eri laitevalmistajien ja ohjelmistokehittäjien tuotteiden toimimisen keskenään.



KUVA 1. BLE-arkkitehtuuri / BLE-protokollapino (Rfwirelessworld.com, 2012)

2.2 Bluetooth Low Energy -yhteyden toimintaperiaate

2.2.1 Mainostaminen

Mainostaminen (engl. advertising) on yksi Bluetooth Low Energy -tekniikan keskeisimmistä operaatioista. Se mahdollistaa laitteen "mainostaa" sen olemassaoloa, yhteyden muodostamisen toiseen laitteeseen, sekä haluttaessa datan lähettämisen, joka voi kertoa esimerkiksi laitteen nimen ja mitä servicejä se sisältää (Silicon Labs, ei pvm, s. 5). Mainostuspaketteja lähetetään kolmella eri taajuuskanavalla, ja niistä on vastuussa Link Layer.

2.2.2 Skannaaminen

Skannaaminen on operaatio, jossa skannaava laite "kuuntelee" tai "lukee" saapuvia mainostuspaketteja. Tämä mahdollistaa skannaavan laitteen löytää mainostava laite, mahdollisesti yhdistää siihen, tai pelkästään lukea mainostuspakettien sisältämää dataa (Silicon Labs, ei pvm, s. 6).

2.2.3 Yhdistäminen ja yhteyden ylläpito

Bluetooth Low Energy -laitteiden välinen yhdistäminen alkaa aina siitä, kun skannaava laite vastaanottaa mainostuspaketin, joka sisältää tiedon, että kyseinen laite sallii yhdistämisen. Seuraavaksi mainostuspaketin vastaanottanut laite lähettää yhdistämisspyynnön, jonka mainostaja – sen sisältämästä applikaatiokoodista riippuen – joko hylkää tai hyväksyy. Laitteille on määritetty seuraavat roolit: skannaava laite on *central device*, mainostava laite taas *peripheral device*.

Kun laitteiden välille on muodostettu yhteys, sitä ylläpidetään niiden keskenään sopimien yhteysparametrien perusteella. Keskeisimmät yhteysparametrit ovat yhteysintervalli (*connection interval*), *supervision timeout*, sekä *connection latency*. Yhteysparametrien mahdolliset arvot ovat seuraavat:

- Minimi yhteysintervalli 7,5 ms
- Maksimi yhteysintervalli 4000 ms
- Connection latency 0–500 yhteysintervallia
- Supervision Timeout 100–32000 ms

Yhteysintervalli (connection interval) määrittää tarkan aikavälin, jolloin central device lähettää peripheral devicelle paketin, johon peripheral voi vastata lähettämällä datapaketteja 150 mikrosekunnin kuluessa vastaanotosta (Silicon Labs, ei pvm, s. 8). Datapaketteja voi lähettää yhden intervallin aikana niin monta kuin intervalliin mahtuu. Jos paketti ei mahdu intervalliin, se lähetetään seuraavan intervallin alussa. Datan lähetys alkaa aina intervallin alusta; jos dataa yritetään lähettää vasta intervallin puolivälissä, joudutaan odottamaan seuraavan intervallin alkuun.

Connection latency määrittää, kuinka moneen pakettiin peripheral voi jättää vastaamatta, jos sillä ei ole mitään dataa lähetettävänä (Silicon Labs, ei pvm, s. 8). Yhteys katkaistaan, jos peripheral ei vastaa yhteenkään pakettiin ajan sisällä, jonka määrittää supervision timeout (Silicon Labs, ei pvm, s. 8).

Laitteet voivat lähettää dataa kahdella eri tavalla: indikaatioilla ja notifikaatioilla. Indikaatiot toimivat siten, että dataa vastaanottavan laitteen täytyy vastata ACK-paketilla (acknowledgement, kuittaus), eli se vahvistaa vastaanottaneensa paketin. Tämä vahvistus tapahtuu seuraavan intervallin alussa, ja tästä seuraa se, että indikaatiolla voidaan lähettää vain yksi paketti per intervalli. Tämä tarkoittaa alhaista tiedonsiirtonopeutta: teoriassa indikaatioita käyttäen suurin mahdollinen tiedonsiirtonopeus on 16,6 kB/s (Silicon Labs, ei pvm).

Notifikaatiot eivät vaadi vahvistusta pakettien vastaanottamisesta. Tämä tarkoittaa sitä, että dataa lähettävä laite voi yhden intervallin aikana lähettää niin paljon paketteja, kuin yhteen intervalliin mahtuu. Tämän takia notifikaatioiden käyttö on välttämätöntä käyttötapauksissa, joissa indikaatioiden tiedonsiirtonopeus on riittämätön. Vaikka yksittäisten pakettien vastaanottamista vastaanottajan applikaatiossa ei vahvisteta, BLE:n Link Layerin käyttämä protokolla varmistaa, että paketit vastaanotetaan radion yli häviöttä (Coleman, 2019). Notifikaatioita käyttäen teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus on n. 1,4 Mbps (Ren, Bluetooth.com, 2017).

3 KÄYTETYT KEHITYSTYÖKALUT SEKÄ LAITTEET

3.1 EFR32

EFR32 on yhdysvaltalaisen teknologiayhtiö Silicon Labs:in valmistama järjestelmäpiirien tuoteperhe. EFR32-järjestelmäpiirit ovat suunniteltu vastaamaan IoT-järjestelmien kuten valaistuksen, kotiautomaation, ja kannettavien terveys- sekä medikaalituotteiden vaatimuksiin matalan energiankulutuksen, hyvän suorituskyvyn sekä tietoturvallisuuden voimin (Silicon Labs, 2023).

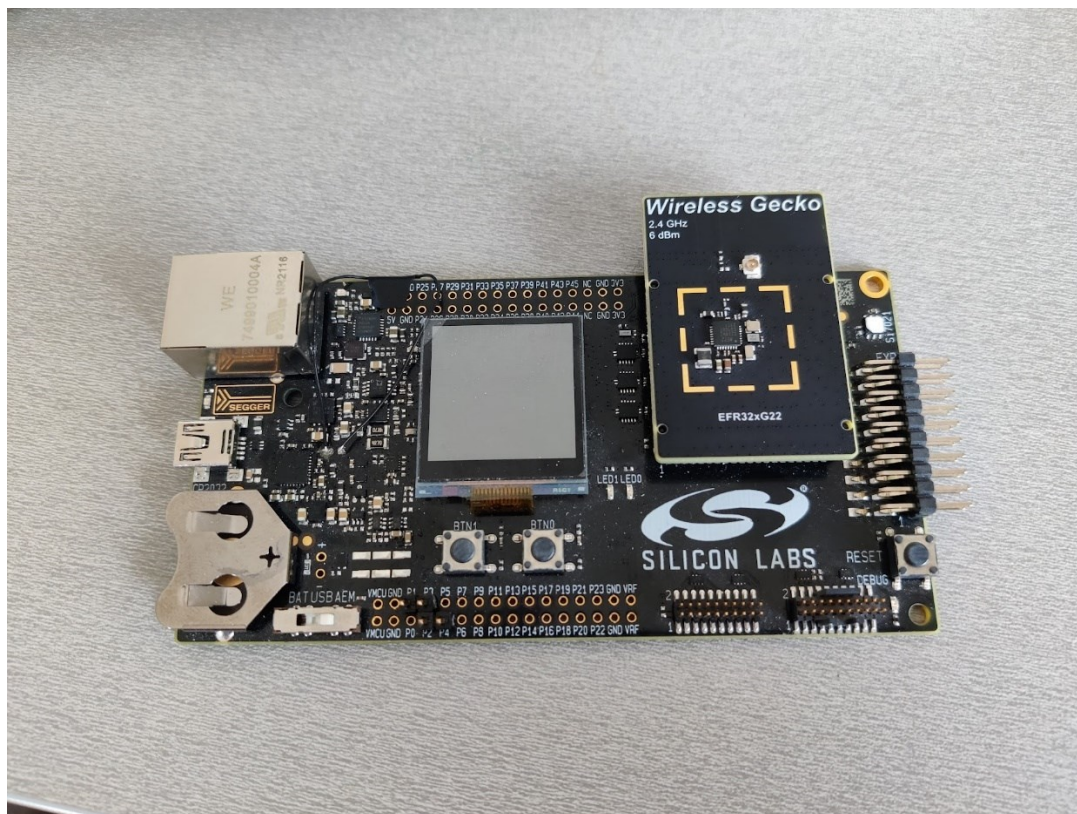
Tuoteperheen laitteet tukevat useita eri tiedonsiirtoprotokollia. Bluetooth Low Energyn lisäksi näitä ovat muun muassa Zigbee, Bluetooth Mesh, Matter, Thread ja Wi-Fi. EFR32-järjestelmäpiirejä on saatavilla myös useilla eri muistimäärillä, joten tuoteperhe pystyy vastaamaan moniin erilaisiin käyttötapauksiin.

3.1.1 EFR32xG22 ja Wireless Starter Kit

EFR32xG22 on radiomoduuli, jota käytetään yhdessä Wireless Starter Kitin (WSTK) kanssa. Se sisältää EFR32MG22-järjestelmäpiirin, jonka tähän työhön perustuen valikoituja ominaisuuksia on listattu datalehdessä (Silicon Labs, 2021) seuraavasti:

- 32-bittinen 76,8 MHz ARM Cortex®-M33 -prosessori
- Max. 512 kB flash-muistia
- Max. 32 kB RAM-muistia
- 4,1 mA:n Tx-virrankulutus 0 dBm:n lähetysteholla
- 7,5 mA:n Tx-virrankulutus 6 dBm:n lähetysteholla
- 1,4 μ A EM2 DeepSleep -virrankulutus

EFR32xG22-moduulia käyttääkseen, se täytyy kiinnittää Wireless Starter Kitissä oleviin liitäntäpinneihin. WSTK tarjoaa useita eri liitäntöjä, kuten USB:n, Ethernetin, sekä useita moduuliin kytköksissä olevia breakout-pinnejä. Se sisältää myös LCDTFT-näytön, ohjelmoitavissa olevia painikkeita ja LED:jä. WSTK:ssa on myös integroituna SEGGER J-link debuggeri, jonka avulla ohjelmakoodi voidaan ajaa moduuliin sisään, sekä Advanced Energy Monitor (AEM), jota voidaan käyttää moduulin virrankulutuksen seurantaan reaaliaikaisesti. (Silicon Labs, ei pvm).



KUVA 2. Wireless Starter Kit, sekä siinä kiinni oleva EFR32xG22-moduuli oikealla ylhäällä.

3.1.2 EFR32BG22 Thunderboard kit

EFR32BG22 Thunderboard Kit on pienikokoinen, optimoitu kehitysalusta Bluetooth-konnektiviteetin lisäämiseen paristo- tai akkukäyttöisiin IoT-tuotteisiin (Silicon Labs, ei pvm). Thunderboard sisältää saman järjestelmäpiirin sekä se tarjoaa samoja ominaisuuksia kuin EFR32xG22, mutta sen pienemmän koon takia sen ulkoiset liitännät ovat karsittuja. Se sisältää reset-painikkeen lisäksi myös vain yhden käyttäjän ohjelmoitavissa olevan painikkeen.

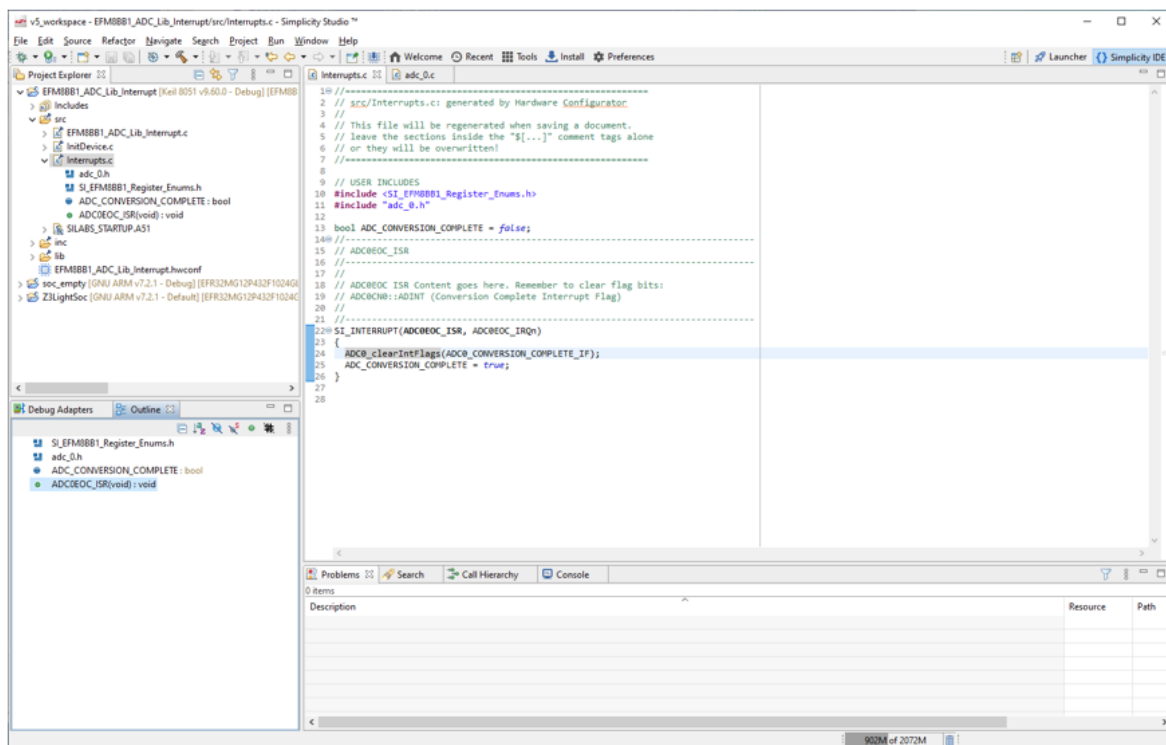
Tähän työhön Thunderboard kuitenkin sisälsi kaikki tarvittavat ominaisuudet, ja sen käyttäminen ja sille ohjelmakoodin tekeminen oli tässä tapauksessa käytännössä samanlaista kuin EFR32xG22:n käyttäminen. Sitä ei kuitenkaan käytetty kuin testeissä, joissa tarvittiin kahden EFR32-laitteen välistä BLE-yhteyttä.

3.2 Simplicity Studio 5

Simplicity Studio on yhteinen kehitysympäristö kaikille Silicon Labs:in kehittämille teknologioille, järjestelmäpiireille sekä moduuleille. Se tarjoaa käyttäjälle pääsyn web- ja SDK-resursseihin sekä software- ja hardware-konfiguraatiotyökaluihin, sekä integroituun kehitysympäristöön (IDE) joka sisältää tarvittavat koodieditorit (Simplicity IDE), koodikäntäjät (compiler) sekä debuggerit riippuen kehityskohteesta (target device).

Simplicity studio sisältää useita hyödyllisiä ja monipuolisia työkaluja kehitystyöhön, joista tässä opinäytetyössä tärkein oli laitteen virranmittauksen kulutuksen visualisointiin käytettävä Energy Profiler

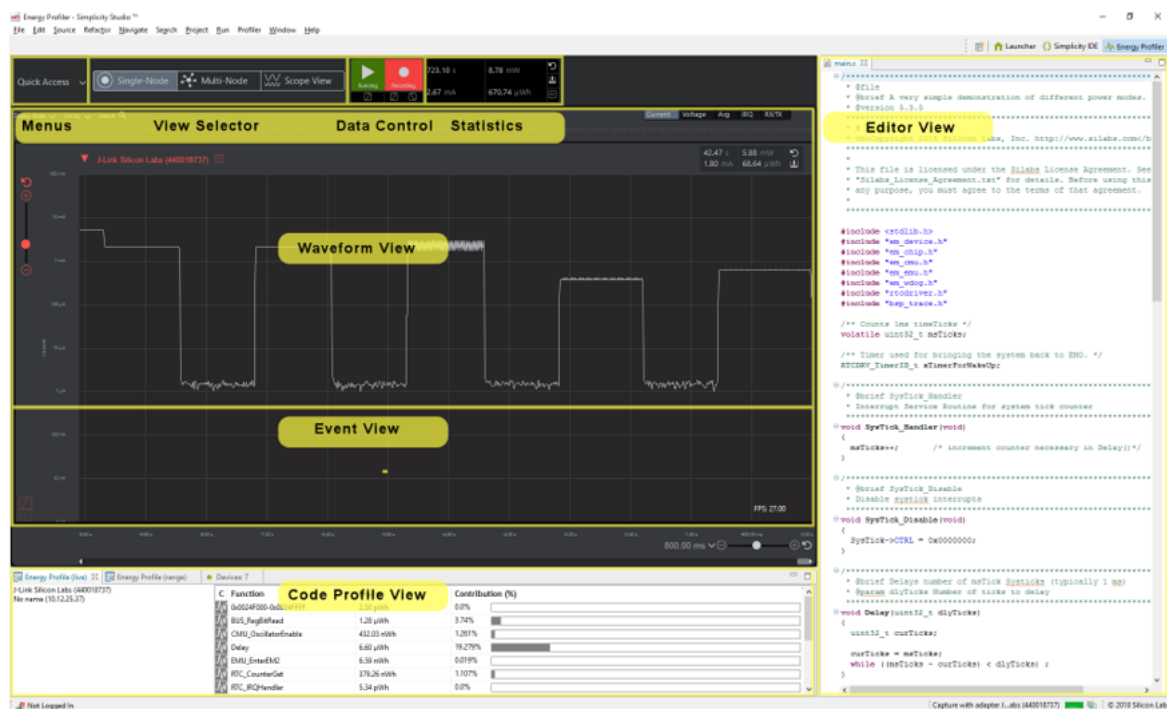
(kuvasa 4). Lisäksi se sisältää mm. graafiset työkalut GATT-profiilien luomiseen ja muokkaamiseen, sekä moduulin I/O-pinnien konfigurointiin.



KUVA 3. Simplicity Studio editorinäköymä (Silicon Labs, ei pvm)

3.2.1 Energy Profiler

Energy Profiler on Silicon Labs:in kehittämä ja Simplicity Studion sisältämä työkalu, jolla voidaan visualisoida yhden tai useamman laitteen virrankulutusta (Silicon Labs, 2022). Energy Profiler -ikkunassa näkyy laitteen tämänhetkinen virrankulutus sekä teho, ja keskiarvot mittauksen ajalta. Virrankulutus visualisoidaan reaaliaikaisesti ajan funktiona kuvaajaan, jossa x-akselilla on virrankulutus, ja y-akselilla aika. Kuvaajasta voidaan myös valita ajanjakso, jonka aikaista keskiarvoista tehoa ja virtaa halutaan tarkastella.



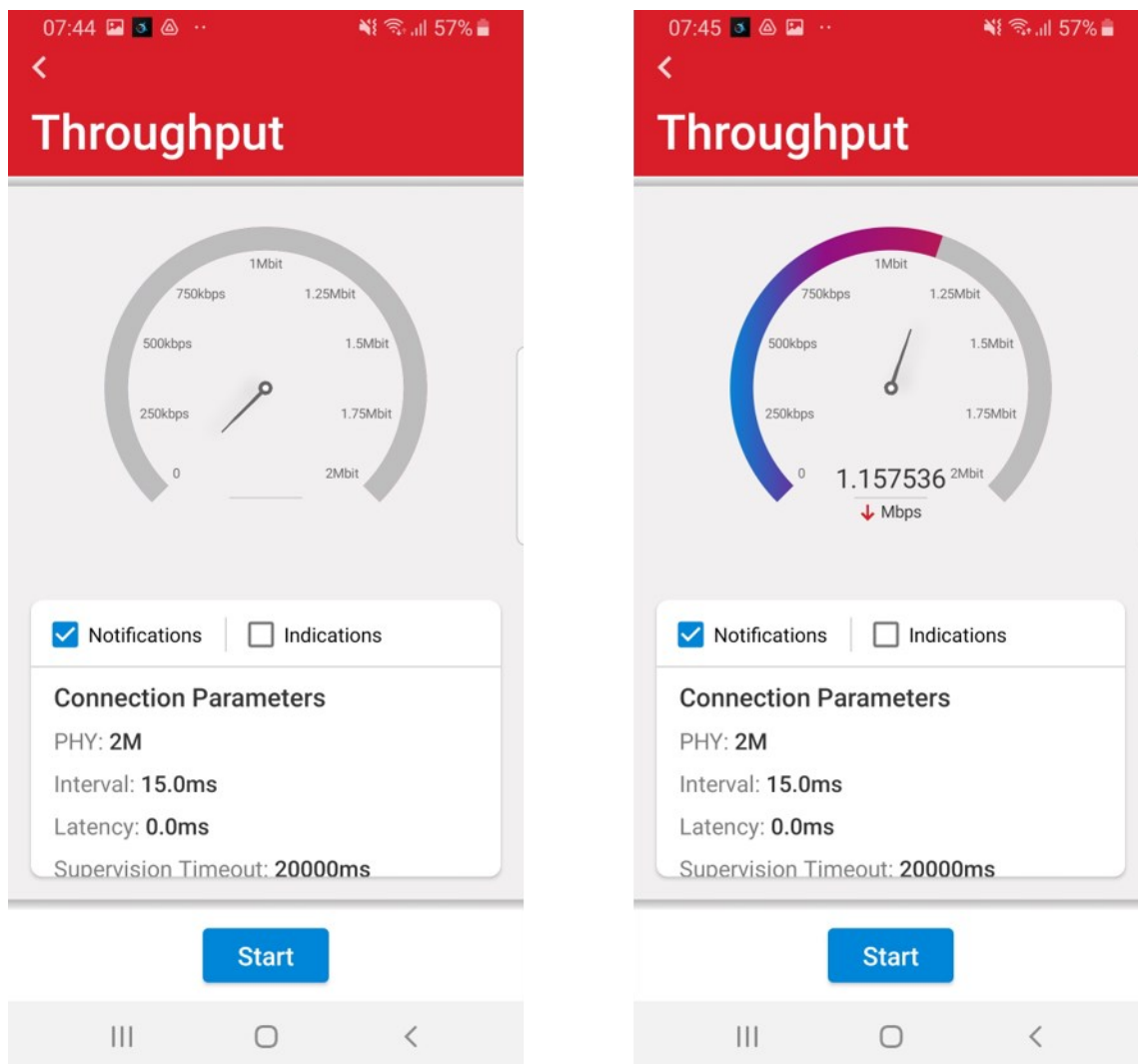
KUVA 4. Energy Profiler -näkymä (Silicon Labs, 2020).

3.3 EFR Connect

EFR Connect on Silicon Labs:in kehittämä mobiilisovellus, joka on saatavilla Android- ja iOS-laitteille. Se Silicon Labsin mukaan ”Geneerinen BLE mobiilisovellus nopeaa ja helppoa Bluetooth Low Energy kehitystä varten”. EFR Connectia voi käyttää kehitettävän BLE-laitteen koodin testaamiseen ja debuggaamiseen, ja se sisältää kaksi pääosiota: ”Demo View”:in sekä ”Develop View”:in.

Develop Viewissä on mahdollista skannata lähellä olevat Bluetooth Low energy -laitteet, näyttää niiden perustietoja, kuten laitteen nimen ja RSSI-arvon (signaalin vahvuus), sekä yhdistää niihin. Yhdistettyjen laitteiden GATT-profiileja voi tutkia ja muokata; characteristicista voi lukea dataa sekä niihin voi lähettää dataa, sekä GATT-profiiliin voi lisätä uusia servicejä ja charactericeja. Mahdollisuudet ovat tietenkin rajattu jokaisen BLE-laitteen ohjelmakoodin mukaan.

Demo View sisältää valmiita demoapplikaatioita, joilla voi nopeasti ja helposti testata Silicon Labsin BLE-laitteiden ominaisuuksia ja suorituskykyä. Jokaiselle applikaatiolle löytyy Simplicity Studiosta samanniminen ohjelmakoodi, joka täytyy olla ajettuna Bluetooth-laitteeseen sisään. Näitä applikaatioita ovat muun muassa ”Health Thermometer Demo”, jossa laite lähettää puhelimeen lämpötila-ensordataa ja lämpötila visualisoidaan puhelimenapplikaatiossa, sekä ”Throughput Demo” (kuva 5), jolla voidaan mitata datansiirtonopeutta BLE-laitteesta puhelimeen sekä toiseen suuntaan.



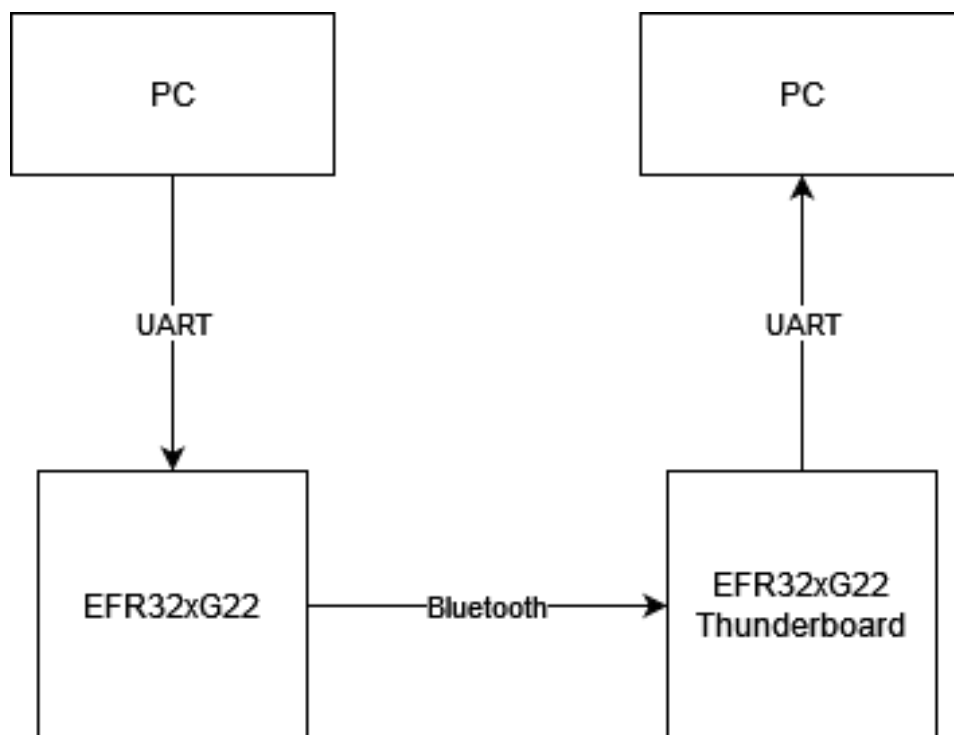
Kuva 5. EFR Connect -applikaatio ja sen sisältämä Throughput Demo

4 TESTISKENAARIOT JA TULOKSET

4.1 Lähetys EFR32xG22:sta Thunderboardiin SPP-aplikaatiolla

Ensimmäisessä testiskenaariossa lähetettiin dataa EFR32xG22:n ja EFR32xG22 Thunderboardin välillä. Ohjelmistokoodin pohjana käytettiin Silicon Labsin tarjoamaa ”SPP over BLE”-aplikaatiota. SPP on lyhenne sanoista Serial Port Profile, ja se tarkoittaa kahden laitteen välisen sarjaväylän – kuten RS-232:n tai UART:in – korvaamista Bluetoothilla (Sparkfun Electronics, ei pvm). Applikaation toimintaan vaaditaan kaksi EFR32-laitetta, ja sitä käytetään molempien laitteiden ohjelmistokoodina. Järjestelmä kuvataan vuokaaviona kuvassa 6.

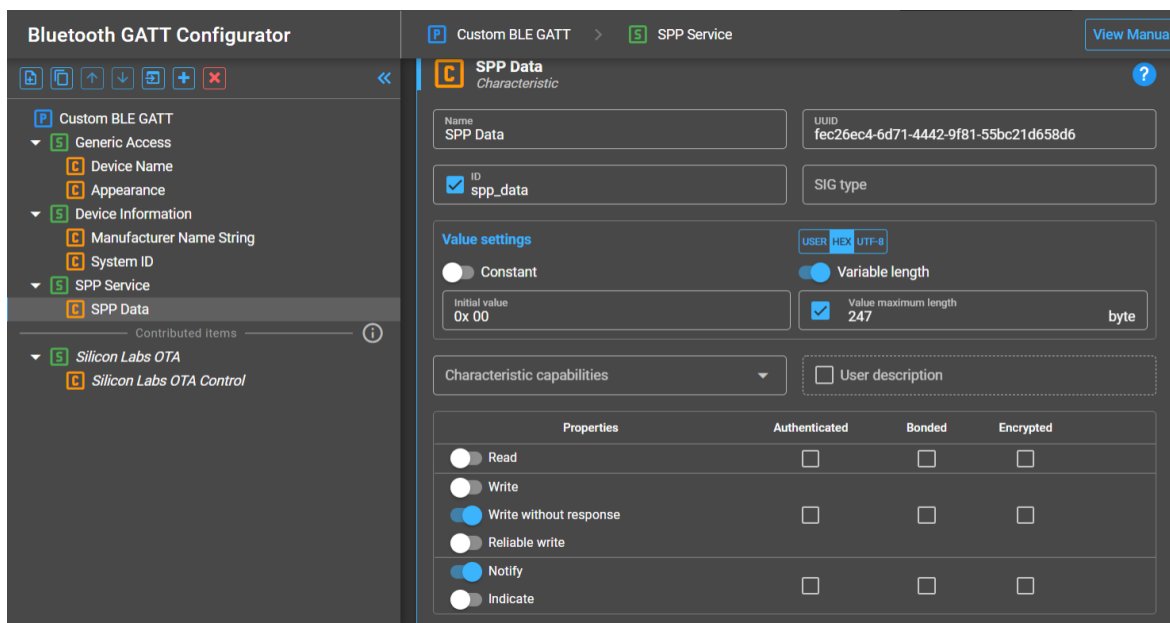
Molemmat laitteet ovat yhdistettynä tietokoneeseen USB:llä, joka toimii virtuaalisena UART-väylänä. Kun serveri vastaanottaa UART-väylästä dataa, se lähettää sen notifiointina yhdistetylle clientille, ja client taas kirjoittaa sen uudestaan UART-väylään, ja jota pitkin data kulkee takaisin tietokoneelle.



KUVA 6. SPP-aplikaation järjestelmäkuvaus

Toinen laite asetetaan koodin sisäisellä muuttujalla serveriksi. Serverin roolissa oleva laite sisältää GATT-profiilin, joka sisältää SPP-nimellä olevan servicen sekä data-characteristicin. Applikaation GATT-profiili näkyy kuvassa 7. Tällöin serverin roolissa oleva laite aloittaa käynnistyksen jälkeen mainostamisen. Mainostuspaketteihin sisällytetään ennalta määritelty SPP-servicen UUID.

Client-roolissa oleva laite aloittaa käynnistyksen jälkeen skannaamaan ympäristössä olevia BLE-laitteita, ja löydettyään mainostuspaketteja, jotka sisältävät SPP-servicen UUID:n, se luo yhteyden laitteiden välille.

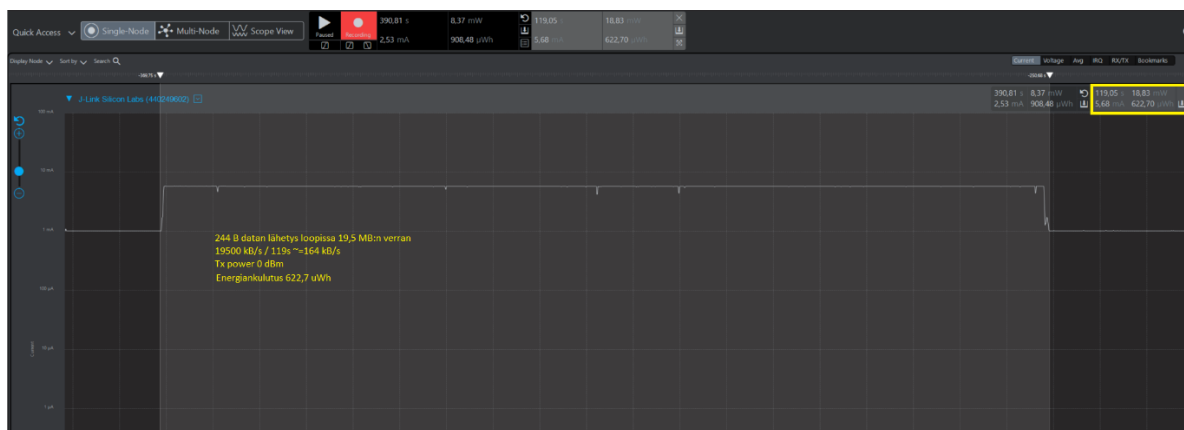


KUVA 7. GATT-profiili SPP-aplikaatiossa. Vasemmalla näkyy profiilin rakenne, ja oikealla SPP Data -characteristicin konfiguraatio.

Ohjelmakoodia muokattiin siten, että serveri tallettaa 244 tavua (maksimi datamäärä per notifikatio) vastaanottamaansa dataa muistiin, jota se lähettää useita kertoja, kunnes yhteensä on lähetetty 19,5 megatavua.

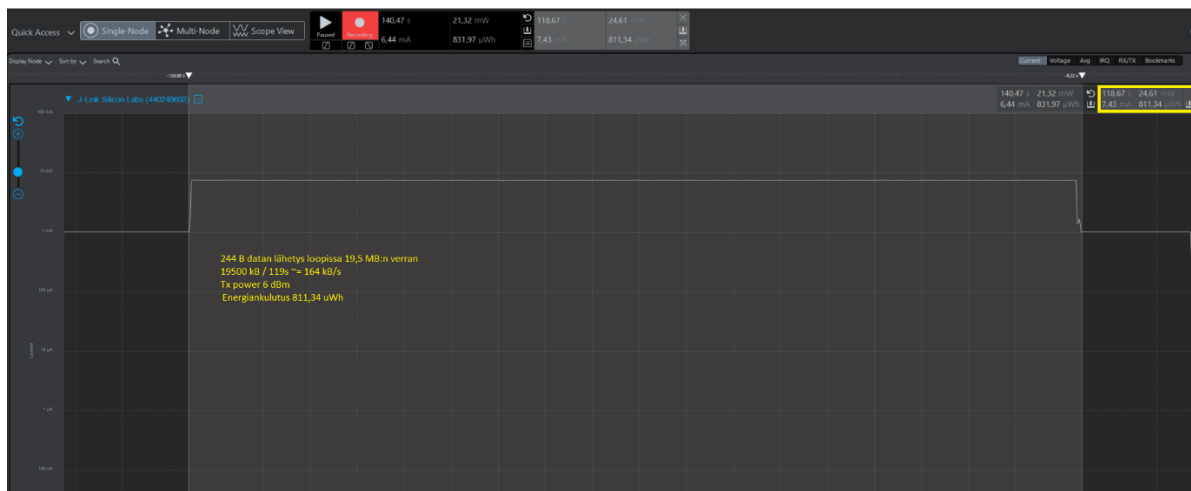
Lähetysten kuluttama energia ja aika mitattiin Energy Profilerilla (kuva 8 ja 9). Koska lähetykseen kestänyt aika näkyy selvästi energiankulutuksen perusteella, Energy Profilerin kuvaajasta voitiin laskea myös lähetysten keskimääräinen tiedonsiirtonopeus. Lähetys tehtiin kahdella eri lähetysteholla, 0 dBm:llä ja +6 dBm:llä.

Energy Profilerin mukaan 0 dBm:n teholla tehdyssä testissä (kuva x) 19,5 MB:n lähettämässä kesti 119 sekuntia. Tämä tarkoittaa, että lähetysnopeus oli n. 164 kB/s, joka on lähellä Bluetooth Low Energyn teoreettista maksimia 175 kB/s tai 1,4 Mbps. Lähetysten aikana virrankulutuksen keskiarvo oli 5,68 mA, tehon keskiarvo 18,83 μ A, ja kokonaisenergiankulutus 622,7 μ Wh.



KUVA 8. 19,5 MB:n lähetys 0 dBm:n lähetysteholla

Testissä, jossa lähetystehona oli +6 dBm (kuva 9) saman 19,5 mB:n datamäärän siirtäminen Bluetoothilla kesti myös 119 sekuntia, eli lähetysnopeus oli sama n. 164 kB/s. Keskiarvoinen virrankulutus taas oli 7,43 μ A, keskiarvoinen teho 24,61 mW, ja kokonaisenergiankulutus n. 811 μ Wh.



Kuva 9. 19,5 MB:n lähetyksellä +6 dBm:n lähetysteholla

4.2 Lähetyksellä EFR32:sta Android-puhelimeen

Toisessa testiskenaariossa ideana oli simuloida EKG-mittalaitteen tuottaman mittadatan lähettämistä Android-puhelimeen Bluetoothin avulla, joka on yksi Bittiumin nykyisten ja mahdollisesti myös tulevien laitteiden käyttökäyttöskenaario. Tarkoituksena oli tutkia, kuinka vakionopeutta generoidun datan lähettäminen eri aikaväleillä Android-puhelimeen vaikuttaa BLE-moduulin kokonaisenergiankulutukseen. Toisin sanoen, jos dataa generoidaan tahdilla x per sekunti, ja kaikki generoitu data lähetetään aikavälillä y , kuinka suuri merkitys tällä aikavälillä on. Testissä käytettiin oletusta, että oikea laite tuottaa mittadatan näyttönopeudesta ja muista mitta-asetuksista riippuen n. 0,5–2,0 kB/s.

Ohjelmistokoodin pohjana käytettiin Simplicity Studion sisältämää valmispohjaa nimeltä SoC-Empty, joka sisältää minimaalisen BLE-toiminnallisuuden, kuten mainostamisen aloittamisen käynnistyksen jälkeen. Tämän pohjan tarkoitus on tarjota kehittäjille helppo tapa lähteä tekemään omien käyttövaatimuksiensa mukaista BLE-sovellusta. Android-applikaationa käytettiin Silicon Labsin kehittämää EFR Connectia, jossa oli mahdollista yhdistää EFR32xG22:en ja vastaanottaa dataa.

Sovelluksessa oli ajastin, jonka lauetessa lähetettiin dataa valitun generointitahdin. Kerralla lähetetyn datan määrän voi laskea kaavalla

$$\text{datamäärä} = i * g$$

missä i on lähetysintervalli ja g on datamäärä per sekunti.

Testit ajettiin eri intervalleilla välillä 0,5–600 s, sekä datangeneroimistahdilla 0,5 kB/s (taulukko 1) ja 2,0 kB/s (taulukko 2).

TAULUKKO 1. Virrankulutus ja teho 0,5 kB/s datageneroimistahdilla

Intervalli (s)	Virran keskiarvo (μA)	Tehon keskiarvo (μW)
0,5	104	353
1	98	325
2	97	323
5	112	371
10	110	365
30	100	331
60	102	337
300	96	320
600	99	328

Virrankulutus pysyi suhteellisen tasaisena eri lähetysintervalleilla 0,5 kilotavun generoimistahdilla.

TAULUKKO 2. Tulokset generoimistahdilla 2,0 kB/s

Intervalli (s)	Virran keskiarvo (μA)	Tehon keskiarvo (μW)
0,5	162	536
1	183	607
2	206	684
5	224	744
10	199	660
30	176	585
60	170	566
300	171	566
600	174	578

Kahden kilotavun generoimistahdilla virrankulutus oli matalimmillaan lyhyimmillä ja pisimmillä lähetysintervalleilla. Havaittavissa on kuitenkin selkeä nousu 2–10 sekunnin lähetysintervalleilla, 5 s intervallin virrankulutuksen ollessa 38 prosenttia suurempi 0,5 sekuntiin verrattuna. Korkeampien virrankulutuserojen syytä on kuitenkin hankala todeta, koska se ei ole havaittavissa 0,5 kB/s generoimistahdilla tehdyissä testeissä.

Tuloksista voidaan päätellä, että energiankulutuksen kannalta saattaa olla oleellista, kuinka usein dataa lähetetään. Molemmissa testeissä virrankulutus vaikutti olevan matalimmillaan lyhyillä ja pitkällä intervalleilla.

Hetkellinen lähetysnopeus ei tässä testissä ollut kiinnostava asia eikä sitä seurattu, koska kyseessä olleet datamäärät olivat erittäin pieniä.

4.3 LE Power Control

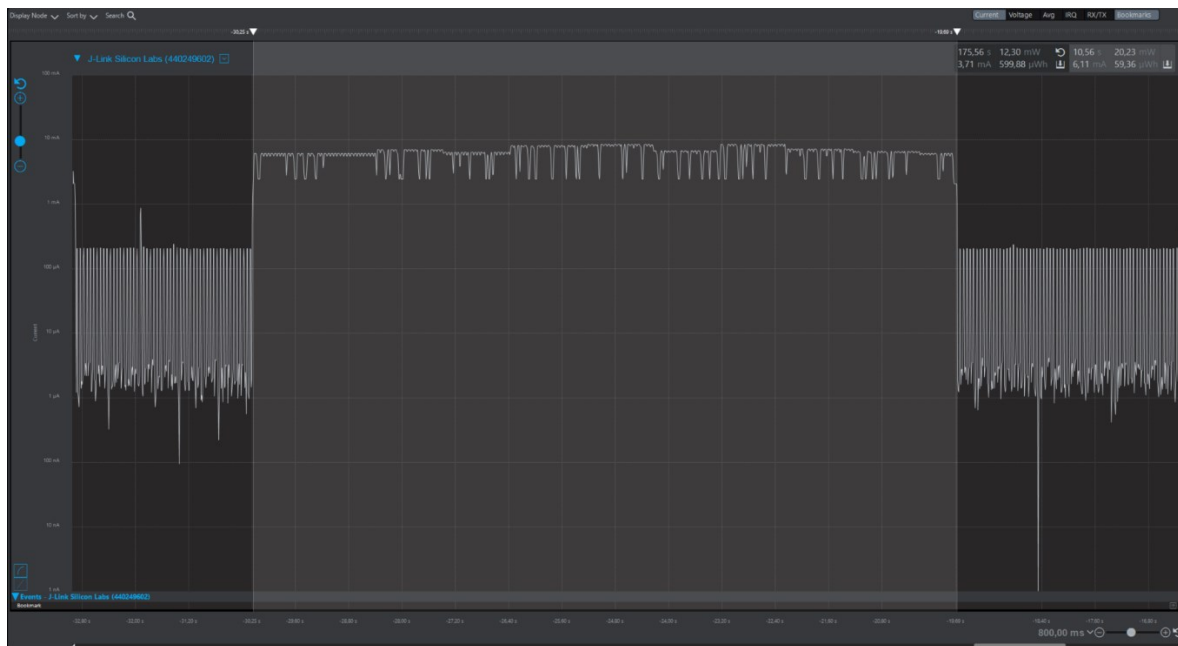
Bluetooth Low Energy Power Control – lyhyemmin LE Power Control tai LEPC – on yksi Bluetooth protokollan version 5.2:n tuomista uusista ominaisuuksista. Aikaisemmin se oli käytössä ainoastaan Bluetooth Classicissa (Ren, Bluetooth.com, 2020). Sen avulla BLE-yhteydessä olevat laitteet voivat säätää dynaamisesti lähetystehoa signaalin vahvuuden perusteella, ja sitä myötä ehkäistä pakettihäviötä, sekä pienentää energiankulutusta.

BLE-yhteydessä olevat laitteet voivat seurata vastaanotetun signaalin vahvuutta, jota kuvataan usein RSSI-arvolla (Received Signal Strength Indicator). Jos jonkin laitteen vastaanottaman signaalin RSSI-arvo on huono, laite voi lähettää pyynnön korottaa lähetystehoa laitteelle, josta signaalia otetaan vastaan. LE Power Control voi toimia myös päinvastaisella tavalla; Jos signaalin vahvuus on riittävän vahva, toiselta laitteelta voidaan pyytää lähetystehon laskemista energian säästämiseksi.

LE Power Controlia testattiin EFR32:n ja Thunderboardin välillä. Työssä aiemmin käytettyä Android-laitetta ei voinut käyttää, koska siinä ei ollut LE Power Controlin vaatimaa Bluetooth 5.2-versiota. Ohjelmistokoodina käytettiin testissä 1 käytettyä SPP-over-BLE-sovellusta, mutta siinä olleet UART-väylät poistettiin, ja koodia muokattiin generoimaan satunnaista dataa, jota Bluetoothin yli lähetettiin. Itse LE Power Controlin sai helposti käyttöön Simplicity Studiosta asentamalla ”paketin” graafisella työkalulla.

Testissä lähetettiin 6000 kappaletta 244 tavun paketteja satunnaisesti generoitua dataa, ja lähetyksen aikana laitteiden välistä signaalin vahvuutta säädeltiin asettamalla fyysisiä esteitä niiden väliin, tai siirtämällä ne eri huoneisiin. Energy Profilerin näyttämää kuvaajaa katsomalla voidaan todeta, että lähettävän laitteen virrankulutus laski ja nousi useaan otteeseen vastaanotetun signaalin vahvuuden perusteella (kuva 10). Alhaisin lähetysteho oli -3 dBm, ja suurin taas +8 dBm. Lähetetyn datan määrä oli n. 1,46 megatavua, ja keskiarvoinen tiedonsiirtonopeus noin 138 kB/s.

Testin perusteella voidaan todeta, että LE Power Control on hyvin toimiva ominaisuus. Tilanteissa, jossa signaalin vahvuus vaihtelee paljon ja lähetystehoa joudutaan säätämään usein, se alentaa tiedonsiirtonopeutta, mutta ei hyvin merkittäviä määriä.



KUVA 10. Energy Profiler -näkömä LE Power Control -testissä.

4.4 FreeRTOS-sovellus

Tässä testissä EFR32:n ohjelmistokoodissa käytettiin käyttöjärjestelmänä FreeRTOS-reaaliaikakäyttöjärjestelmää. Lyhyesti selitettynä FreeRTOS mahdollistaa eri ohjelmiston osien suorittamista eri taskeissa (*task*), jotka saavat prosessoriajoaikaa vuorotellen. Sääntöjä, joiden perusteella määritetään milloin kutakin taskia ajetaan, määritellään muun muassa niille asetetuilla prioriteeteilla.

Testin tarkoituksena oli todentaa EFR32:n kyvykyys käyttää FreeRTOS-käyttöjärjestelmää ilman ongelmia, sekä varmistaa BLE-operaatioiden onnistuminen, kun käytetty ohjelmistokoodi ei voi keskittyä pelkästään niihin, vaan joutuu suorittamaan myös muita reilusti prosessointiaikaa vaativia tehtäviä. Taustalla oli myös idea simuloida tällä tavalla EKG-mittalaitteen applikaatiokoodin ajamista EFR32:ssa.

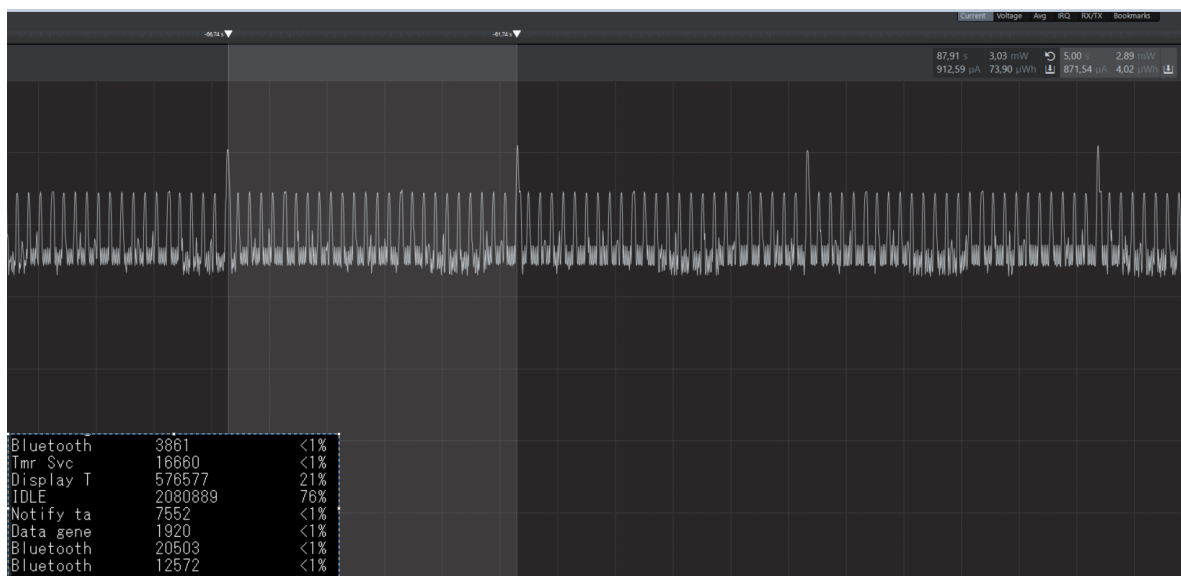
Ohjelmistokoodiin tehtiin kolme FreeRTOS-taskia:

- *vTaskDisplay*: Piirtää pikseleitä Wireless Starter Kitissä olevaan näyttöön. Simuloi kuormittavaa applikaatiokoodia.
- *vTaskGenerateData*: Generoi dataa ja lähettää sen *vTaskNotify*lle
- *vTaskNotify*: Vastaanottaa datan *vTaskGenerateData*lta, ja lähettää sen notifiikaatioina yhdistettyyn BLE-laitteeseen.

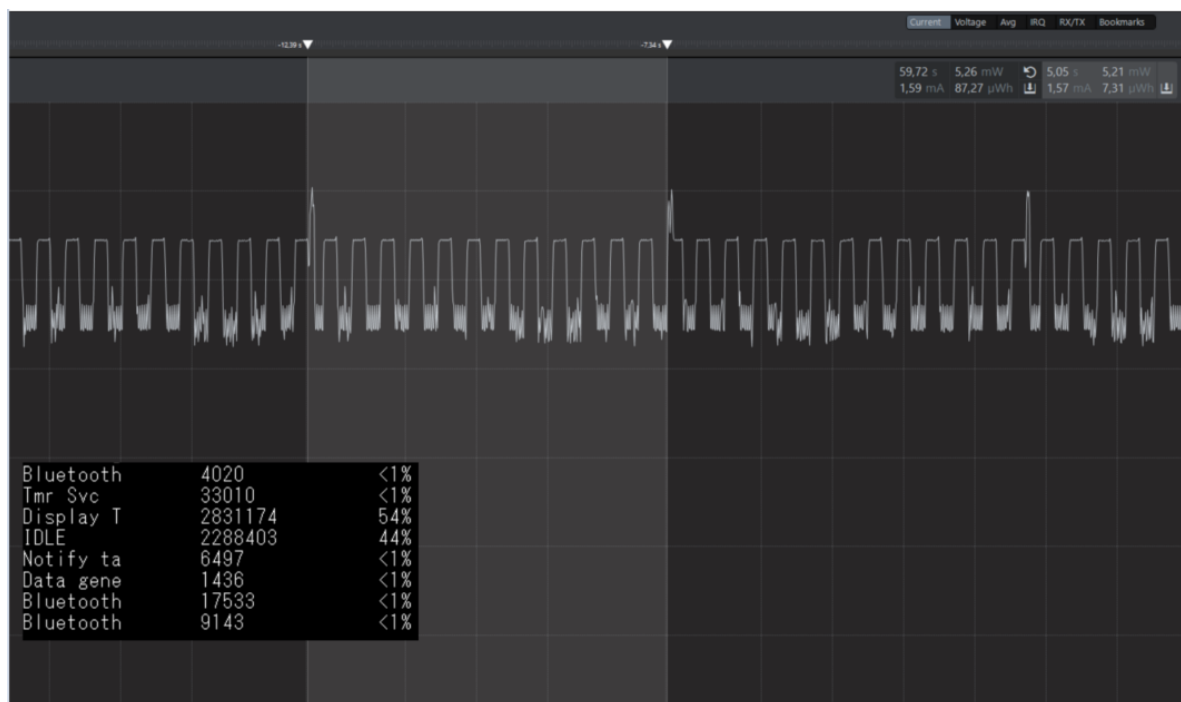
Dataa generoitiin *vTaskGenerateData*ssa 244 tavua 250 ms välein. Tämä data lähetettiin *vTaskNotify*ssä viiden sekunnin välein, eli kerrallaan lähetettävää dataa oli aina 5 kilotavua. *vTaskDisplay*lle annettua ajoaikaa säädettiin kahdelle eri tasolle. Toisessa sitä ajettiin 20 % ajasta (kuva x), toisessa 55 % ajasta (kuva x).

Testin perusteella voitiin todeta, että EFR32:en voidaan implementoida FreeRTOS-käyttöjärjestelmä ilman ongelmia itse applikaatiokoodin käyttöönotossa ja ajamisessa, tai häiriöitä BLE-yhteydessä ja operaatioissa. Vaikka tämä antaa hieman rohkaisua siihen, että EKG-mittalaitteen applikaatiokoodia

voitaisiin ajaa EFR32:ssa, tätä on mahdotonta todeta näin yksinkertaisella menetelmällä, vaan se todennäköisesti vaatisi moninkertaisen työ- sekä tietomäärän.



KUVA 11. Energy Profiler -näkyvä vTaskDisplay viidessä 20 % ajoajasta



KUVA 12. Energy Profiler-näkyvä vTaskDisplay:n viidessä 55 % ajoajasta

4.5 Apple iOS ja BLE

EFR32:n ja BLE:n suorituskykyä testattiin myös Applen valmistaman iPhone 11 -älypuhelimien kanssa. Testi tehtiin Silicon Labsin EFR Connect iOS-applikaatiolla, käyttäen nopeaan ja helppoon tiedonsiirtonopeuden testaamiseen tarkoitettua Throughput Test -demoa. EFR32:en asennettiin

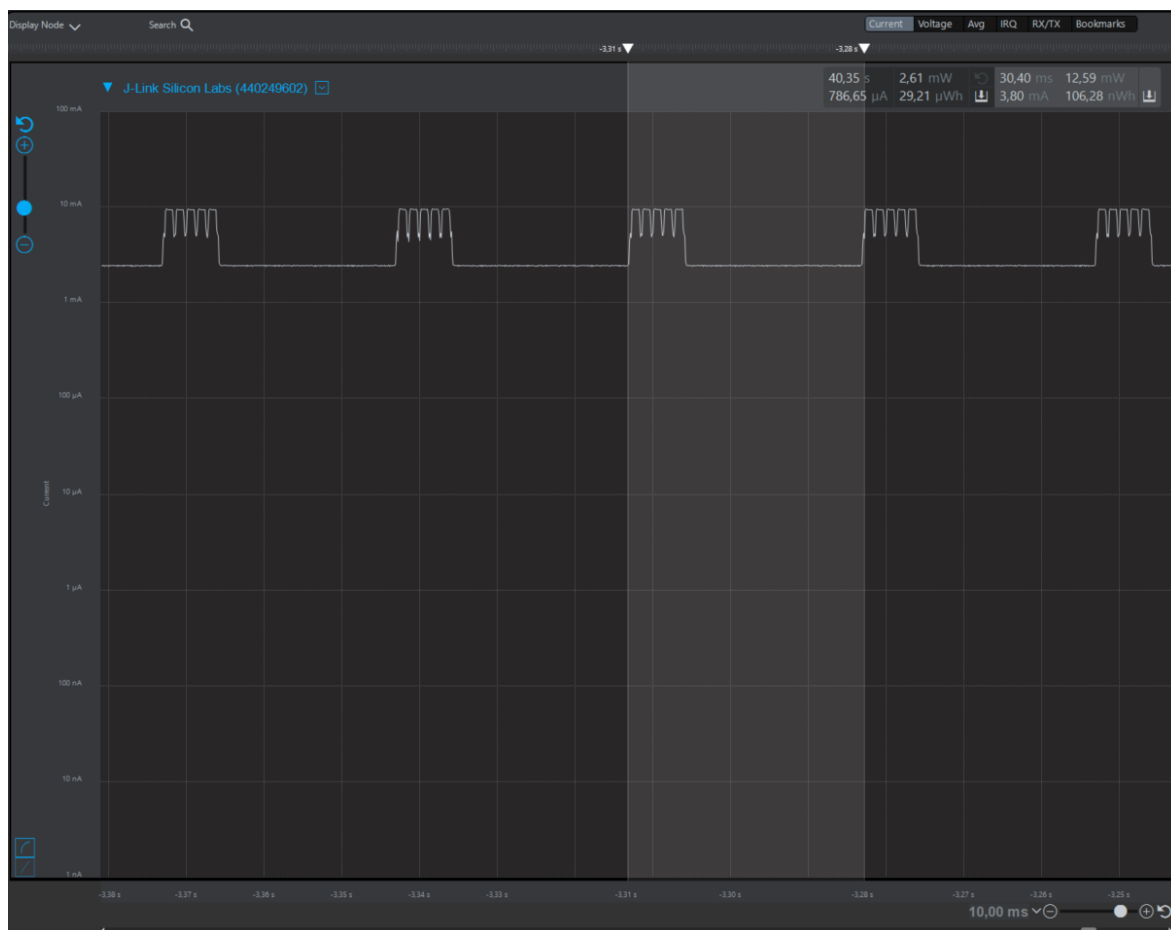
myös samalla nimellä kulkeva Throughput Test -ohjelmisto, joka on yksi Simplicity Studion sisältämistä demosovelluksista. Ohjelmisto toimii siten, että kun laitteiden välillä on BLE-yhteys, Wireless Starter Kitin kahta painiketta painamalla puhelimeen voidaan lähettää joko notifikaatioita tai indikaatioita. Puhelinapplikaatio laskee tiedonsiirtonopeuden, jolla se vastaanottaa dataa, ja näyttää sen käyttäjälle reaaliajassa.

Notifikaatioita iPhoneen lähettäessä tiedonsiirtonopeudet olivat parhaimmillaan vain 30–40 kB/s, joka on alle kolmasosa siitä mihin Android-puhelimen kanssa päästiin. Asiaa tutkittaessa selvisi, että alhainen tiedonsiirtonopeus johtuu Applen tiukoista rajoituksista yhteysparametrien suhteen.

BLE-yhteysparametrien rajoitukset yhteysintervallin osalta on listattu Applen "Accessory Device Guidelines" -dokumentissa. Siinä määritetään muun muassa, minkälaisia iPhoneen yhdistettävien oheislaitteiden täytyy olla. BLE:n osalta yhteyden intervallin täytyy olla seuraavanlainen (Apple, 2022, s. 193):

- Yhteysintervalli minimi 15 ms
- Yhteysintervalli luvun 15 kerronnainen

Käytännön testissä pienin saavutettu intervalli oli kuitenkin 30 ms (kuva 13), vaikka EFR32:n ohjelmistokoodiin laitettiin pyyntö käyttää 15 millisekunnin intervallia. Myös yhden intervallin aikana lähetettävien pakettien määrä ei koskaan ylittänyt testien aikana viittä pakettia. Tästä pakettimäärän rajoittamisesta ei kuitenkaan löytynyt mainintaa Applen dokumentaatiosta. Nämä kaksi tekijää yhdistettynä ovat merkittävin tekijä huonolle tiedonsiirtonopeudelle, eikä niihin todennäköisesti voi BLE-laitteen kehittäjänä vaikuttaa.



KUVA 13. Energy Profiler -näkyvä lähetyksestä iPhoneen. Yksi 30 ms intervalli näkyy harmaana, ja viisi lähetettyä pakettia per intervalli on selvästi havaittavissa intervallin alussa.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Silicon Labsin valmistaman EFR32-tuoteperheen Bluetooth-järjestelmäpiirien lähetysnopeutta sekä energiankulutusta, ja niiden perusteella pohtia, kuinka hyvin ne sopivat medikaalilaitteen, tarkemmin EKG-mittalaitteen, vaatimuksiin niistä. Toissijaisena tutkimisaiheena oli EFR32-järjestelmäpiirin käyttämistä siten, että siinä ajetaan mittalaitteen applikaatiokoodia ilman erillistä pääprosessoria. Tämä jäi kuitenkin tässä työssä taka-alalle niin aikataulun kuin sen todentamisen vaikeuden vuoksi.

Testien perusteella voidaan todeta, että laitteiden energiankulutus on lähellä valmistajan datalehtien antamia arvoja, sekä tiedonsiirtonopeus on hyvälaatuisessa yhteydessä lähes BLE-protokollan teoreettisen maksimin tasolla. Myös Bluetooth Low Energy ja etenkin sen uusin versio 5 on teknologiana todella suorituskykyinen ja se sisältää hyödyllisiä ominaisuuksia energiatehokkuuden parantamiseksi. Voidaan myös olettaa, että yhä useampi valmistaja siirtyy käyttämään sitä Bluetooth Classicin sijaan laitteissaan tulevaisuudessa, koska sen ero tiedonsiirtonopeudessa Bluetooth Classicin verrattuna on kaventunut merkittävästi 2 M PHY:n myötä, sen tarjotessa myös huomattavasti paremman energiatehokkuuden.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tutkittu EFR32xG22-moduuli ja sen sisältämä EFR32MG22-järjestelmäpiiri ovat erittäin energiatehokkaita sekä suorituskykyisiä. Tämän takia en itse näe syytä, miksi Bittium Biosignals Oy ei pitäisi sitä potentiaalisena ehdokkaana tulevien medikaalilaitteidensa Bluetooth Low Energy -piiriksi.

6 LÄHDELUETTELO

- Apple. (26. Lokakuu 2022). *Accessory Design Guidelines*. Noudettu osoitteesta <https://developer.apple.com/accessories/Accessory-Design-Guidelines.pdf>
- Bittium. (2023). *Bittium.com*. Noudettu osoitteesta <https://www.bittium.com/bittium-lyhyesti/tietoa-ja-taloudellisia-lukuja/henkilosto>
- Bittium. (2023). *Bittium.com*. Noudettu osoitteesta <https://www.bittium.com/medical/holter-monitoring>
- Bluetooth SIG. (ei pvm). *Bluetooth.com*. Noudettu osoitteesta <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>
- Bluetooth SIG. (ei pvm). *Bluetooth.com*. Noudettu osoitteesta About us: <https://www.bluetooth.com/about-us/>
- Coleman, C. (24. Syyskuu 2019). *Interrupt.memfault.com*. Noudettu osoitteesta <https://interrupt.memfault.com/blog/ble-throughput-primer#ble-radio>
- Precedence Research. (2021). *Precedenceresearch.com*. Noudettu osoitteesta <https://www.precedenceresearch.com/medical-devices-market>
- Ren, K. (20. Helmikuu 2017). *Bluetooth.com*. Noudettu osoitteesta <https://www.bluetooth.com/blog/exploring-bluetooth-5-how-fast-can-it-be/>
- Ren, K. (11. Helmikuu 2020). *Bluetooth.com*. Noudettu osoitteesta <https://www.bluetooth.com/blog/6-important-things-to-know-about-le-power-control/>
- Rfwirelessworld.com*. (2012). Noudettu osoitteesta <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/BLE-Protocol-Stack-Architecture.html>
- Silicon Labs. (2020). Noudettu osoitteesta <https://docs.silabs.com/simplicity-studio-5-users-guide/5.6.0/ss-5-users-guide-tools-energy-profiler/energy-profiler-user-interface>
- Silicon Labs. (Kesäkuu 2021). *EFR32MG22 Datasheet*. Noudettu osoitteesta <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/efr32mg22-datasheet.pdf>
- Silicon Labs. (2022). Noudettu osoitteesta <https://docs.silabs.com/simplicity-studio-5-users-guide/5.6.0/ss-5-users-guide-tools-energy-profiler/>
- Silicon Labs. (2023). *silabs.com*. Noudettu osoitteesta <https://www.silabs.com/wireless/technology>
- Silicon Labs. (ei pvm). *Bluetooth LE Fundamentals*. Noudettu osoitteesta <https://www.silabs.com/documents/public/user-guides/ug103-14-fundamentals-ble.pdf>
- Silicon Labs. (ei pvm). *EFR32xG22 wireless starter kit*. Noudettu osoitteesta <https://www.silabs.com/development-tools/wireless/efr32xg22-wireless-starter-kit?tab=overview>
- Silicon Labs. (ei pvm). *Silabs.com*. Noudettu osoitteesta <https://docs.silabs.com/simplicity-studio-5-users-guide/latest/ss-5-users-guide-about-the-simplicity-ide/code-editing>

Silicon Labs. (ei pvm). *Silabs.com*. Noudettu osoitteesta <https://www.silabs.com/development-tools/thunderboard/thunderboard-bg22-kit?tab=overview>

Silicon Labs. (ei pvm). *Throughput with Bluetooth Low Energy Technology*. Noudettu osoitteesta <https://docs.silabs.com/bluetooth/5.0/general/system-and-performance/throughput-with-bluetooth-low-energy-technology>

Sparkfun Electronics. (ei pvm). *Learn.sparkfun.com*. Noudettu osoitteesta <https://learn.sparkfun.com/tutorials/bluetooth-basics/bluetooth-profiles>