

Jere Lappalainen

Bluetooth-kommunikaatio fitness-laitteiden kanssa

Tradenomi

Tietojenkäsittelyn koulutus

Syksy 2018



**KAMK • University
of Applied Sciences**

Tiivistelmä

Tekijä(t): Lappalainen Jere

Työn nimi: Bluetooth-kommunikaatio fitness-laitteiden kanssa

Tutkintonimike: Tradenomi (AMK), tietojenkäsittelyn koulutus

Asiasanat: Bluetooth, Bluetooth Low Energy, hajaverkko, pikoverkko, protokolla

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Virtual Frontiers Oy, joka on pelillistämiseen keskittynyt yritys. Pelillistämässä voidaan hyödyntää erilaisia Bluetooth-laitteita, mutta kaikkien laitteiden tukemiseksi ei löydy valmista ratkaisua, joten oma tutkimus- ja kehitystyö on tarpeen. Työn tavoitteena oli kehittää tapa kommunikoida fitness-laitteiden kanssa käyttäen Bluetooth Low Energyä Windows- ja Mac-tietokoneilla. Työssä käydään läpi Bluetoothin historiaa ja toimintaa, erilaisia fitness-laitteita ja lopuksi toteutus.

Bluetooth on langattomaan tiedonsiirtoon kehitetty teknologia, jonka kehitti Ericsson vuonna 1994. Sen kehitystä valvoo vuonna 1998 muodostettu Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth käyttää kommunikaatioon radioaaltoja, joiden taajuusalue on välillä 2402–2480 MHz. Alue kuuluu ISM-taajuusalueeseen. Kyseinen taajuusalue on laajassa käytössä, joten siellä esiintyy häiriöitä. Häiriöiden välttämiseksi Bluetooth käyttää taajuushyppelyä.

Bluetooth-verkossa laitteet ovat joko isäntiä tai renkiä. Yksi laite toimii isäntänä, jolla voi olla seitsemän renkiä. Laitteiden muodostamaa verkkoa kutsutaan pikoverkoksi. Laitteet voivat kuulua useampaan verkkoon, joiden muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan hajaverkoksi. Bluetoothilla on käytettävissä kolme eri verkkotopologiaa, jotka ovat kaksipisteyhteys, yleislähetys ja mesh-topologia.

Tiedonsiirrossa Bluetooth käyttää 79:ää kanavaa, joiden kaistanleveys on 1 Mhz. Tieto pilkotaan lähetystä varten pienemmiksi paketeiksi, jotka vastaanottaja kokoaa luettavaksi tiedoksi. Tiedonsiirto on synkronoitu isäntälaitteen kellon mukaan. Yhteys voi olla joko synkroninen tai asynkroninen.

Bluetooth on joukko protokollia, jotka voidaan jakaa kahteen pinoon. Alemmassa pinossa olevat protokollat vastaavat alemman tason toteutuksesta, kuten fyysisestä kommunikaatiosta. Ylemmällä tasolla määritellään standardit, joiden avulla kommunikoidaan alemman tason ja ohjelmistotason välillä.

Tietoturva on tärkeä osa Bluetoothia. Oletustilanteissa laitteiden täytyy autentikoida itsensä, ennen kuin ne voivat keskustella. Laitteet voivat käyttää erilaisia suojatiloja, salaustiloja ja luottamustiloja, joiden avulla parannetaan tietoturvaa käyttötarkoituksen mukaisesti. Laitteet voivat olla myös suojaamattomia.

Bluetooth Low Energy (BLE) on versio, joka on suunniteltu mahdollisimman vähän virtaa kuluttavaksi. BLE ei ole yhteensopiva aiempien Bluetooth-versioiden kanssa. BLE toimii samalla taajuusalueella kuin perinteinen Bluetooth, mutta se käyttää 40:tä kanavaa, joiden kaistanleveys on 2 Mhz. BLE:tä tukevat laitteet voidaan jakaa Smart-laitteisiin ja Smart Ready -laitteisiin.

Fitness-laitteet eli kuntolaitteet ovat laitteita, joita käytetään kuntoillessa. Pelkkien kuntolaitteiden lisäksi on useita erilaisia antureita ja älylaitteita, joiden avulla harjoituksista saadaan lisää tietoa tai voidaan vaikuttaa niihin eri tavoin. Monet kuntolaitteet kommunikoivat Bluetoothin välityksellä.

Työn toteutuksessa käytettiin C#-ohjelmointikieltä tiedon käsittelyssä. Bluetoothin käyttöönotto tapahtuu alustakohtaisesti. Tiedon käsittely perustuu Bluetoothin ja eri laitevalmistajien dokumentaatioon.

Työssä saavutettiin tuki laitteille, jotka käyttävät Bluetoothin määrittelemiä standardeja. Lisäksi toteutus tukee muutamaa laitetta, jotka ovat määritelleet omia Bluetooth-attribuuttejaan. Toteutusta voidaan tarpeen tullen laajentaa tukemaan yhä useampia laitteita.

Abstract

Author(s): Lappalainen Jere

Title of the Publication: Bluetooth Communication with Fitness Devices

Degree Title: Bachelor of Business Administration (BBA)

Keywords: Bluetooth, Bluetooth Low Energy, scatternet, piconet, protocol

This thesis was commissioned by Virtual Frontiers Oy. Virtual Frontiers is a gamification-focused company. In gamification you can make use of different kinds of Bluetooth devices, but there is no suitable solution to use them, so research and development are needed. The goal of this thesis was to implement a way to communicate with fitness devices using Bluetooth Low Energy on Windows and Mac computers. This thesis will cover Bluetooth and its history in general, a few fitness devices and the practical part.

Bluetooth is a wireless technology developed by Ericsson in 1994. It is managed by the Bluetooth Special Interest Group, which was founded in 1998. Bluetooth transmits data via radio waves, using frequencies between 2402 and 2480 MHz in the ISM band. The ISM band is used by many devices and technologies, so Bluetooth is prone to radio interference. To avoid interference Bluetooth uses Frequency Hopping Spread Spectrum.

Bluetooth makes use of the master/slave architecture, one device being a master with up to seven slaves. A Bluetooth network is called a piconet. Devices can be part of multiple piconets, which together form a scatternet. Bluetooth uses three different topologies, which are point-to-point, broadcast, and mesh topology.

In Bluetooth, data is transmitted over 79 channels with each channel being 1 MHz wide. Before transmitting, Bluetooth divides data into packets, which are reassembled by a receiving device. Data transfer is synchronized using a clock of a master device. A connection between Bluetooth devices can be either synchronous or asynchronous.

Bluetooth consists of several protocols, which can be divided into lower stack and upper stack. The lower stack handles low-level functionality, such as forming a physical connection between two devices. The upper stack defines standards for communicating between the lower stack and an application.

Security is an important part of the Bluetooth. In usual cases, devices must be authenticated before they can start communicating. Bluetooth devices can make use of several different security modes, encryption modes and trust levels to suit different use cases. Devices can also choose to not use any of the security features.

Bluetooth Low Energy (BLE) is a version of the Bluetooth designed for low power consumption. BLE is not compatible with earlier versions of the Bluetooth. BLE uses the same frequency as the Bluetooth, but with 40 channels, each being 2 MHz wide. BLE devices can be divided into Smart and Smart Ready devices.

Fitness devices are devices designed for different sports activities. There are many kinds of fitness machines, sensors, trackers and smart devices. Data from the sensors and smart devices can be used to control exercises in different ways. Many fitness devices communicate using Bluetooth.

Data handling is done using the C# programming language. Bluetooth's implementation varies depending on the device's operating system and used hardware. Implementation is based on Bluetooth's and different manufacturers' documentation.

The result of the work is support for devices that follow the Bluetooth standards. It also supports a few devices that use custom Bluetooth attributes. The implementation can be expanded to support even more devices when needed.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Bluetooth	2
2.1	Historia	2
2.2	Radio.....	3
2.3	Verkko ja topologia	4
2.4	Tiedonsiirto	6
2.5	Protokollat.....	7
2.6	Profiilit.....	8
2.7	Tietoturva.....	10
3	Bluetooth versiot.....	12
3.1	Bluetooth 2.0 + EDR	12
3.2	Bluetooth 2.1.....	13
3.3	Bluetooth 3.0 + HS.....	13
3.4	Bluetooth 4.0 + LE	13
3.5	Bluetooth 4.1.....	13
3.6	Bluetooth 4.2.....	14
3.7	Bluetooth 5.....	14
4	Bluetooth Low Energy	15
4.1	Historia	16
4.2	Erät Bluetoothiin	16
4.3	Smart ja Smart Ready	17
4.4	Protokollat.....	17
4.5	GATT-profiili	19
5	Fitness-laitteet.....	21
5.1	Sykemittari	21
5.2	Urheilukello	21
5.3	Kadenssianturi.....	21
5.4	Harjoitusvastus.....	22
5.5	Juoksumatto	22
6	Toteutus.....	23
6.1	Sykemittarin lukeminen	23

6.2	Kadenssianturin lukeminen.....	24
6.3	Fitness Machine -laitteiden lukeminen.....	26
6.4	Tacx Smart -harjoitusvastusten ohjaaminen.....	28
7	Pohdintaa.....	30
	Lähteet.....	31

Symboliluettelo

ACL	Asynchronous Connection-Less Link
AFH	Adaptive frequency-hopping spread spectrum
ANT+	Langattomaan tiedonsiirtoon kehitetty tiedonsiirtotekniikka
ATT	Attribute Protocol
BLE	Bluetooth Low Energy
Bluetooth	Langattomaan tiedonsiirtoon kehitetty tiedonsiirtotekniikka
Bluetooth Low Energy	Bluetooth-versio, joka kuluttaa vähemmän virtaa
BR	Basic Rate
EDR	Enhanced Data Rate
ERG	Ergometri
FHSS	Frequency-hopping spread spectrum
GAP	Generic Access Profile
GATT	Generic Attribute Profile
GFSK	Gaussian frequency-shift keying
HCI	Host Controller Interface
HID	Human Interface Device
HS	High Speed
ISM	Industrial, Scientific and Medical
L2CAP	Logical Link Control and Adaption Protocol
LC	Link Control
LE	Low Energy

LL	Link Layer
LMP	Link Management Protocol
PAN	Personal Area Network
PHY	Physical Layer
SCO	Synchronous Connection-Oriented Link
SDP	Service Discovery Protocol
SIG	Special Interest Group
SM	Security Manager
SSP	Secure Simple Pairing
UUID	Universally Unique Identifier
WiFi	Langaton lähiverkko

1 Johdanto

Bluetooth on kaikille tuttu termi tavalla tai toisella, koska on vaikea elää nykymaailmassa ilman, että käyttää laitteita, joissa se on tuettu. Vaikka itsekkin olen käyttänyt Bluetoothia tukevia laitteita, minulla ei ollut tarkempaa tietoa sen toiminnasta eikä aikaisempaa kokemusta sen käyttämisestä kehitystyössä. Opinnäytetyössä käydään läpi Bluetoothin historiaa ja yleisesti sen toimintaa. Bluetoothin versioista käydään tarkemmin läpi Bluetooth Low Energy, jota monet fitness-laitteet käyttävät.

Fitness- tai kuntolaitteilla tarkoitetaan urheiluun ja kuntoiluun käytettäviä laitteita. Niihin lukeutuvat muun muassa juoksumatot, soutulaitteet, kuntopyörät, harjoitusvastukset, sykemittarit ja muut anturit. Useat fitness-laitteet käyttävät Bluetoothia tiedon välityksessä. Monet laitevalmistajat tarjoavat oman älypuhelinsovelluksensa niiden käyttämistä varten.

Työn tavoitteena on kehittää tapa kommunikoida erilaisten fitness-laitteiden kanssa käyttäen Bluetoothia Windows- ja Mac-tietokoneilla. Toteutuksessa on käytetty Bluetooth Low Energy -versiota. Bluetoothin käyttöönottoa ei kuitenkaan käydä läpi, koska käyttöönotto vaihtelee paljon käytetystä alustasta ja kirjastoista riippuen. Toteutuksessa käydään läpi muutamalta eri laitteelta tulevan tiedon käsittelyä käyttäen C#-ohjelmointikieltä. Tiedon käsittely pysyy samana alustasta riippumatta.

Aiheen toimeksiantaja on Virtual Frontiers Oy. Virtual Frontiers on pelillistämiseen keskittynyt yritys. Pelillistämällä tarkoitetaan peleistä tuttujen mekaniikkojen, kuten pisteiden keräämistä tai tehtävien suorittamista, soveltamista asioihin, jotka eivät ole pelejä. Pelillistämisessä voidaan soveltaa Bluetooth-laitteita erilaisissa tilanteissa, mutta kaikkien laitteiden tukemiselle ei löydy valmiita ratkaisuja, joten oma tutkimus- ja kehitystyö on tarpeen.

2 Bluetooth

Bluetooth on laitteiden väliseen langattomaan kommunikointiin kehitetty joukko protokollia. Se on halpa, vähän virtaa kuluttava ratkaisu, joka on suunniteltu käytettäväksi lyhyillä matkoilla. Seuraavassa käydään yleisesti läpi Bluetoothin historiaa ja sen toimintaa.

2.1 Historia

Bluetoothin kehityksen aloitti ruotsalainen Ericsson vuonna 1994, mutta teknologian kehitys alkoi jo vuonna 1989 langattomia kuulokkeita varten. Siihen aikaan ei vielä ollut standardia langattomalle teknologialle. Vuonna 1996 Intel, Ericsson ja Nokia tapasivat langattoman teknologian standardoimisesta. Jokainen kyseisistä yhtiöistä puhui langattomasta teknologiasta omilla termeillään; Intel puhui Business-RF:stä, Ericson MC-Linkistä ja Nokia Low Power-RF:stä. (Kardach 2008.)

Välttääkseen ongelmat teknologioiden hajanaisuudesta yhtiöt päättivät muodostaa SIG:n (Special Interest Group) yhtenäistämään langatonta teknologiaa ja valvomaan sen kehitystä. SIG:n koodinimeksi ehdotettiin Bluetoothia. Nimi tulee viikinkikuningas Harald Sinihampaalta, joka yhdisti Skandinavian yhdeksi kuningaskunnaksi. Ideana oli, että Bluetooth saavuttaisi jotain samankaltaista yhdistämällä eri laitteet yhden teknologian avulla. Myöhemmin nimeksi oli tarkoitus vaihtaa joko PAN (Personal Area Networking) tai RadioWire, mutta PAN oli jo muussa käytössä ja RadioWire-tavaramerkin rekisteröinnissä olisi kestänyt liian pitkään. Ainoaksi vaihtoehdoksi jäi siis Bluetooth. (Kardach 2008.)

Nimen lisäksi myös Bluetoothin logo tulee Harald Sinihampaalta. Se on yhdistelmä Haraldin nimikirjaimista hagall ja bjarkan, jotka kuuluvat nuoremman furtharkin riimumerkistöön. Bluetoothin logo on esitetty kuvassa 1. (Bluetooth SIG 2018a.)

Vuonna 1998 Ericsson, Intel, Nokia, Toshiba ja IBM muodostivat Bluetooth SIG:n ja Bluetooth-nimi otettiin virallisesti käyttöön. Vuoden loppuun mennessä Bluetooth SIG:ssä oli yli 400 yritystä. Seuraavana vuonna julkaistiin Bluetooth 1.0, ja teknologian kehitys jatkuu edelleen. (Bluetooth SIG 2018e.)



Kuva 1. Bluetooth logo (Bluetooth SIG 2018b.)

2.2 Radio

Bluetooth käyttää kommunikaatioon radioaaltoja samaan tapaan kuin langaton lähiverkko. Se käyttää radioaaltoja taajuudella 2400–2483,5 MHz. Käytetyn taajuusalueen alkupäässä on 2 Mhz:n suojakaista ja loppupäässä 3,5 Mhz:n suojakaista, joten käytössä oleva taajuusalue on välillä 2402–2480 MHz. Bluetooth käyttää kommunikaatiossa 79:ää kanavaa, joiden kaistanleveys on 1 MHz. (Poole 2018b.)

Bluetoothin käyttämä taajuusalue kuuluu ISM-taajuusalueeseen (Industrial, Scientific and Medical), joka on maailmanlaajuisesti avoin radiotaajuuskaista, eli sen käyttö ei vaadi erillistä lupaa. ISM-taajuusaluetta käyttävät myös monet muut teknologiat ja laitteet, joten siellä voi esiintyä häiriöitä, koska radioliikennettä on paljon. Joissain maissa ISM-alueen kokoa on rajoitettu, mikä vaikuttaa myös Bluetoothin käytettävissä olevaan taajuusalueeseen. (Poole 2018b.)

Välttääkseen häiriöitä muun radioliikenteen kanssa Bluetooth käyttää taajuushyppelyä (FHSS, frequency hopping spread spectrum), joka tarkoittaa, että kommunikaatiossa käytetty taajuus vaihtelee satunnaisesti, mutta lähettäjä ja vastaanottaja kumpikin tietävät, että mitä taajuutta ollaan käyttämässä. Käytetty taajuus vaihtelee yleensä noin 1600 kertaa sekunnissa. Pelkkä satunnainen hyppely ei ole kovin hyvä ratkaisu, joten Bluetoothia varten kehitettiin mukautuva taajuushyppely (AHF, adaptive frequency-hopping spread spectrum), jonka avulla Bluetooth oppii muiden laitteiden käytössä olevat taajuudet ja välttää niiden käyttöä. (Hodgdon 2003.)

Bluetooth käyttää tiedonsiirrossa taajuusmodulaatiota. Bluetoothin ensimmäiset versiot käyttivät GFSK-taajuussiirtokoodausta (Gaussian frequency-shift keying) modulaatioon. Myöhemmissä versioissa on käytetty myös $\pi/4$ -DQPSK- ja 8DPSK-modulaatioita korkeamman tiedonsiirtonopeuden saavuttamiseksi. (Poole 2018b.)

Bluetooth-laitteet jaetaan kolmeen eri luokkaan lähetystehon perusteella. Mitä suurempi lähetysteho laitteella on, sitä suurempi kantavuus sillä on. Ensimmäisen luokan laitteilla kantavuus on noin 100 metriä, toisella luokalla noin 10 metriä ja kolmannella alle metri. Todellinen kantavuus vaihtelee olosuhteiden ja käytetyn laitteiston mukaan. Bluetooth-luokat on esitetty taulukossa 1. (Poole 2018b.)

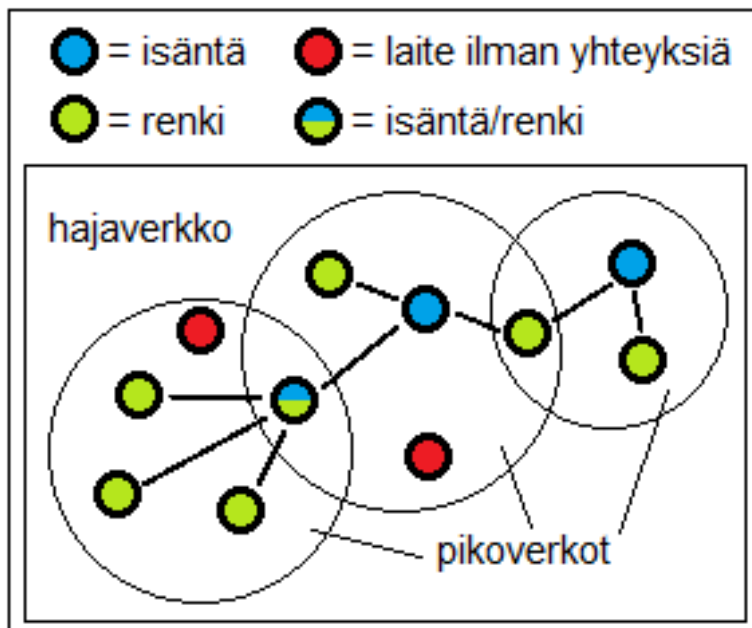
Luokka	Max. lähetysteho	Kantavuus
1	100 mW (20 dBm)	100 m
2	2,5 mW (4 dBm)	10 m
3	1 mW (0 dBm)	1 m

Taulukko 1. Bluetooth-luokkien lähetystehot ja kantavuudet (Absolute Astronomy 2018.)

2.3 Verkko ja topologia

Bluetooth-verkossa laite on joko isäntä (engl. master) tai renki (myös orja, engl. slave). Verkossa on yksi isäntälaitte, joka voi olla yhteydessä seitsemään aktiiviseen renkiin. Verkossa olevat renkit synkronoivat isännän kellon kanssa, jolloin laitteet tietävät, että milloin ja milläkin taajuudella tietoa lähetetään ja vastaanotetaan. (Absolute Astronomy 2018.)

Laitteiden muodostamaa verkkoa kutsutaan pikoverkoksi (engl. piconet). Laite voi toimia renkinä useammassa pikoverkossa, mutta vain yhdessä verkossa isäntänä. Jos jonkin pikoverkon renkit haluavat keskustella keskenään, niiden pitää muodostaa oma verkko. Tarvittaessa isäntä ja renki voivat vaihtaa rooleja keskenään, esimerkiksi jos rengiksi suunniteltu laite on päätynt isännäksi. Kahden tai useamman pikoverkon muodostamaa verkkoa kutsutaan hajaverkoksi (engl. scatternet). Esimerkki hajaverkosta on esitelty kuvassa 2. (Absolute Astronomy 2018.)



Kuva 2. Hajaverkko koostuu kahdesta tai useammasta pikoverkosta

Käyttökohteesta ja käytetystä versiosta riippuen Bluetooth voi tukea useita eri verkkotopologioita. Topologia tarkoittaa tapaa, jolla verkon laitteet on liitetty toisiinsa. Eri topologiat on esitetty kuvassa 3.

Kaksipisteyhteys (engl. point-to-point) on topologia, jota käytetään kahden laitteen väliseen kommunikaatioon. Kaksipisteyhteyttä käytetään paljon Bluetoothissa, koska se soveltuu hyvin monenlaisiin tilanteisiin. Sitä käytetään esimerkiksi erilaisissa antureissa ja tietokoneen oheislaitteissa. (Bluetooth SIG 2018g.)

Yleislähetystä (engl. broadcast) käytetään, kun laite lähettää tietoa ennalta määräämättömille vastaanottajille. Sitä käytetään nimensä mukaisesti yleiseen tiedon lähetykseen. Se soveltuu hyvin esimerkiksi paikkakohtaisen tiedon jakamiseen tai kertomaan muille laitteille lähettäjän sijainnista. (Bluetooth SIG 2018g.)

Mesh-topologia on Bluetoothin uusin verkkotopologia. Siinä kaikki laitteet voivat olla yhteydessä toisiinsa. Sitä käytetään yleensä suuriin, jopa tuhansia laitteita sisältäviin verkkoihin, joissa tarvitaan luotettava tapa kommunikoida eri laitteiden välillä. Yleisiä käyttökohteita ovat automaatio ja valvonta. (Bluetooth SIG 2018g.)



Kuva 3. Bluetoothin tukemat verkkotopologiat vasemmalta oikealle kaksipisteyhteys, yleislähetys ja mesh-topologia (Bluetooth SIG 2018g.)

2.4 Tiedonsiirto

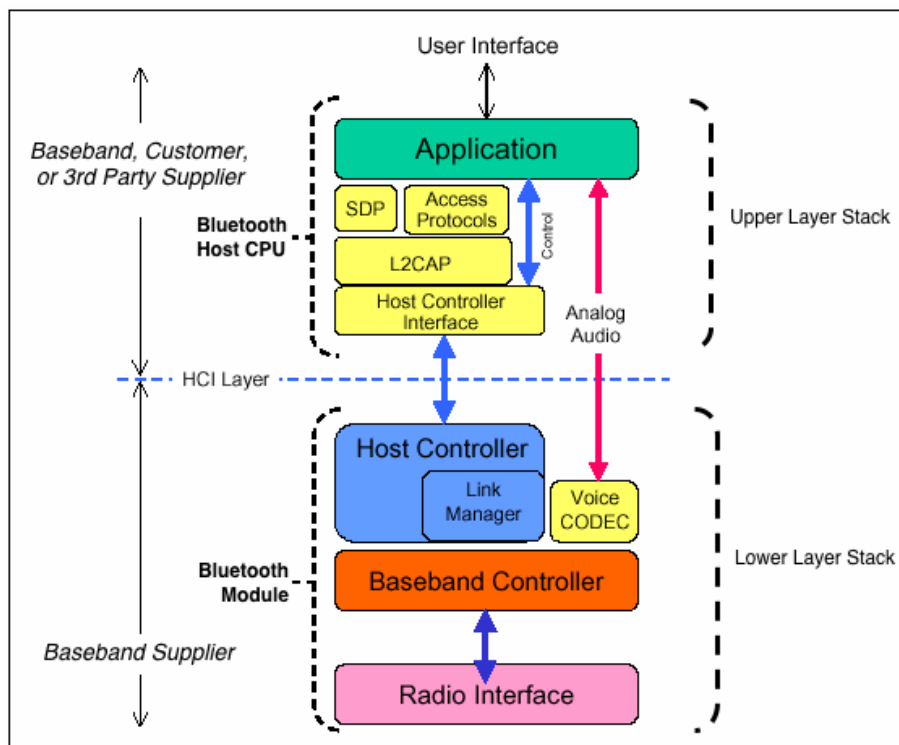
Bluetooth perustuu pakettikytkentään, jossa lähetettävä tieto pilkotaan pienemmiksi paketeiksi tiedonsiirtoa varten. Paketit lähetetään käyttäen 79:ää kanavaa, joiden välillä vaihdellaan satunnaisesti käyttäen taajuushyppelyä. Vastaanottava laite kokoaa paketeista tiedon luettavaan muotoon. (Absolute Astronomy 2018.)

Tiedonsiirto on synkronoitu isännän kellon mukaan. Taajuuden vaihtuessa 1600 kertaa sekunnissa isännän kello päivittyy 312,5 mikrosekunnin välein. Yhden paketin lähetysaika, slot, on kaksi kellon päivitystä eli 625 mikrosekuntia. Pakettien pituus voi olla joko 1, 3 tai 5 slottia. Isäntä lähettää tietoa parillisilla sloteilla ja vastaanottaa tietoa parittomilla sloteilla. (Absolute Astronomy 2018.)

Yhteys voi olla joko synkroninen tai asynkroninen. Synkronisessa yhteydessä käytetään kaksipisteyhteyttä isännän ja yksittäisen rengin välillä. Pikoverkossa voi olla kerrallaan kolme synkronista yhteyttä samanaikaisesti. Asynkronisessa yhteydessä voidaan käyttää kaksipisteyhteyden lisäksi monipisteyhteyttä, eli tietoa voidaan lähettää usealle rengille samaan aikaan, mutta renkit lähettävät tietoa vain isännän sitä pyytäessä. Asynkroninen yhteys voi käyttää vain aikaslotteja, jotka eivät ole synkronisen yhteyden käytössä. (Absolute Astronomy 2018.)

2.5 Protokollat

Bluetooth koostuu useista eri protokollista. Protokolla tarkoittaa käytäntöä tai standardia, joka määrittelee, miten laitteiden tai ohjelmien pitää toimia tietyissä tilanteissa. Perinteisen Bluetoothin protokollapino on esitelty kuvassa 4.



Kuva 4. Bluetoothin protokollapino (Staab & Armstrong 2014.)

Bluetoothin protokollapino voidaan jakaa ylempään ja alempaan pinoon. Alemmassa pinossa (käytetään myös termiä ohjainpino, engl. controller stack) olevat protokollat vastaavat Bluetoothin toiminnasta. Ylempi pino (käytetään myös termiä isäntäpino, engl. host stack) keskustelee alemman pinon kanssa ja määrittelee profiilit, joiden pohjalle voidaan kehittää laitteita. (Staab & Armstrong 2014.)

Alemman pinon pohjalla on fyysinen radio, joka on vastuussa tiedon vastaanottamisesta ja lähettämisestä käyttäen modulaatiota. Radiokerroksen yläpuolella on kantataajuusohjain (Baseband Controller), joka vastaa radiolta tulevan tiedon käsittelystä. Sen vierellä toimii Link Management Protocol (LMP, myös Link Manager Protocol), joka on vastuussa yhteyden muodostamisesta ja ylläpitämisestä. (Staab & Armstrong 2014.)

Bluetoothilla on kaksi protokollaa yhteyden tyyppille, jotka ovat Asynchronous Connection-Less Link (ACL) ja Synchronous Connection-Oriented Link (SCO). ACL on asynkroninen datalinkki, joka sisältää virheenkorjauksen. Se on yleisemmin käytetty yhteystyyppi. SCO on suunniteltu reaaliaikaisen tiedon siirtämistä eli suoratoistoa varten. Sen idea on, että voidaan siirtää esimerkiksi äänitietoa ilman viiveitä. SCO ei sisällä virheenkorjausta. (Poole 2018a.)

Pinojen välisenä rajapintana toimii Host Controller Interface (HCI). HCI:n yläpuolella oleva Logical Link Control and Adaption Protocol (L2CAP) hoitaa pakettien käsittelyä ja pakettiliikenteen ohjaamisen oikeisiin paikkoihin. Sen yläpuolelta löytyy Service Discovery Protocol (SDP), joka antaa rajapinnan L2CAP:lle. SDP:n avulla voidaan myös ottaa yhteys muihin Bluetooth-laitteisiin. (Staab & Armstrong 2014.)

2.6 Profiilit

Profiilit määrittelevät, miten Bluetooth-laitteet kommunikoivat keskenään. Voidakseen toimia keskenään molempien laitteiden pitää tukea käytettyjä profileja. Bluetoothissa profiilien toiminnallisuus on pyritty pitämään erillään Bluetoothin versiosta yhteensopivuuden ylläpitämiseksi eri versioiden välillä. Seuraavassa on listattu Bluetoothin käyttämiä profileja. (Bluetooth SIG 2018h.)

- Advanced Audio Distribution Profile (A2DP) määrittelee, miten ääntä siirretään käyttäen Bluetoothia.
- Audio/Video Remote Control Profile (AVRCP) määrittelee standardin audiovisuaalisten laitteiden, kuten television tai hifilaitteiden, ohjaamista varten.
- Basic Imaging Profile (BIP) määrittelee standardin kuvien siirtämiseen.
- Basic Printing Profile (BPP) määrittelee tuen tiedon siirtämisen tulostimille sen tulostamista varten.
- Common ISDN Access Profile (CIP) määrittelee, että miten ISDN-tietoa (Integrated Services Digital Network, piirikytkentäinen puhelinverkkojärjestelmä) siirretään Bluetoothin ylitse.

- Dial-Up Network Profile (DUN) määrittelee standardin, jolla otetaan yhteys Internetiin tai muihin palveluihin käyttäen puhelinverkko-yhteyttä.
- File Transfer Profile (FTP) määrittelee standardin kansioden ja tiedostojen käsittelyyn ja siirtämiseen Bluetoothin ylitse.
- Generic Audio/Video Distribution Profile (GAVDP) toimii pohjana A2DP- ja VDP-profiileille.
- Generic Object Exchange Profile (GOEP) toimii pohjana useimmille profiileille.
- Hands-Free Profile (HFP) määrittelee, että miten handsfree-laitteet kommunikoivat puhelinten kanssa.
- Hard Copy Cable Replacement Profile (HCRP) määrittelee langattoman yhteyden ottamisen laitteen ja tulostimen välille.
- Headset Profile (HSP) määrittelee tuen langattomille kuulokkeille.
- Human Interface Device Profile (HID) määrittelee tuen oheislaitteille, kuten hiirille, näppäimistöille ja ohjaimille.
- Object Push Profile (OPP) toimii antaa pohjan objektien, kuten kuvien tai käyntikorttien, lähettämiseksi.
- Personal Area Networking Profile (PAN) määrittelee, että miten Bluetooth-laitteet voivat muodostaa ad-hoc -verkon käyttäen BNEP-protokollaa.
- Service Port Profile (SPP) määrittelee tavan kommunikoida käyttäen virtuaalisia sarjaportteja.
- Video Distribution Profile (VDP) määrittelee tavan siirtää videotietoa Bluetoothin ylitse.

(Bluetooth SIG 2018h.)

2.7 Tietoturva

Bluetooth-teknologiaa kehittäessä on käytetty paljon aikaa löytämään sopiva tasapaino helpon käytettävyyden ja mahdollisimman hyvän tietoturvan välillä. Suojaustekniikka vaihtelee eri Bluetooth-versioiden välillä, mutta pääperiaate on pysynyt samana. Laitteiden ollessa monipuolisessa käytössä osa tietoturvan tason valitsemisesta on siirretty laitevalmistajille ja sovellusten kehittäjille.

Tavallisissa tilanteissa yhteyden ottamisen aikana laitteet autentikoivat itsensä ja päättävät, että onko toisella laitteella oikeus kommunikoida toisen kanssa. Laitteet sopivat käytetystä suojauksesta ja kertovat toisilleen avaimet, millä salatun tiedon voi tulkita. Viimeisimmissä Bluetoothin versioissa on ollut lisäksi mahdollista salata laitteen osoite, jonka avulla laitetta ei voi jäljittää. (Kroeter 2015.)

Bluetoothilla on tietoturvaan kolme peruspalvelua, jotka ovat autentikointi (engl. authentication), luottamuksellisuus (engl. confidentiality) ja valtuutus (engl. authorization). Autentikoinnissa identifioidaan toiset laitteet niiden laiteosoitteen perusteella. Luottamuksellisuudessa estetään tiedon salakuuntelu varmistamalla, että vain valtuutetut laitteet saavat ja voivat lukea lähetettyä tietoa. Valtuutuksessa varmistetaan, että toisella laitteella on oikeus lukea palveluita ennen kuin sille annetaan pääsy niihin. (Padgette, Bahr, Batra, Holtmann, Smithbey, Chen & Scarfone 2012.)

Perinteinen Bluetooth tukee neljää eri suojatilaa, jotka on nimetty Bluetooth Security Mode 1 – Bluetooth Security Mode 4. Ensimmäisessä suojaustilassa laitetta ei ole ollenkaan suojattu. Toisessa suojaustilassa laite voi hallita, mitkä laitteet voivat ottaa yhteyden ja mitkä voivat käyttää tiettyjä palveluita. Kolmannessa tilassa kaikki tietoliikenne on salattu jo ennen kuin yhteyttä on muodostettu laitteiden välille. Neljännessä suojaustilassa käytetään Secure Simple Pairing (SSP) -menetelmää suojatun yhteyden muodostamiseen. (Padgette, Bahr, Batra, Holtmann, Smithbey, Chen & Scarfone 2012.)

Salaustiloja (Bluetooth Encryption Mode), jotka määrittelevät tiedon salauksen tason, on kolme. Ensimmäisessä salaustilassa tietoa ei salata. Toisessa tilassa ainoastaan tietyille laitteille tarkoitettu tieto on salattu, yleislähetetty tieto on edelleen avointa. Kolmannessa tilassa kaikki tietoliikenne on salattu. (Padgette, Bahr, Batra, Holtmann, Smithbey, Chen & Scarfone 2012.)

Luottamustasolla (Trust Level) laitteet määrittelevät, miten hyvin ne voivat luottaa toisiinsa. Luottamustaso on joko luotettu (engl. trusted) tai epäluotettu (engl. untrusted). Luotettu laite pääsee käsiksi toisen laitteen tarjoamiin palveluihin ilman esteitä. Epäluotetulla laitteella on rajoitettu pääsy palveluihin. (Padgette, Bahr, Batra, Holtmann, Smithbey, Chen & Scarfone 2012.)

Suojatiloissa voidaan käyttää palvelun turvatasoja (Service Security Level), joita on neljä. Palvelutasojen tasot ovat välillä 0–3. Käytettävissä olevat palvelutasot riippuvat käytetystä suojatilasta. Suojatiloilla 1 ja 3 ei ole palvelun turvatasoja. Suojatilassa 2 voidaan vaatia autentikaatio, tiedon suojaaminen ja valtuutus. Suojatilassa 4 voidaan käyttää palvelutasoja SSP:n aikana. Palvelutasolla 3 vaaditaan suojaus MITM-hyökkäyksiä (man-in-the-middle attack, mies välissä -hyökkäys) vastaan ja tiedon salaaminen, käyttäjän syöte ei ole pakollinen. Tasolla 2 vaaditaan vain tiedon salaus. Palvelutasolla 1 MITM-suojaus ja tiedon salaus eivät ole pakollisia, mutta käyttäjän syöte vaaditaan. Palvelutasolla 0 ei käytetä suojauksia. (Padgette, Bahr, Batra, Holtmann, Smithbey, Chen & Scarfone 2012.)

Secure Simple Pairing -menetelmä julkaistiin osana Bluetooth 2.1:stä. SSP tekee nimensä mukaisesti turvallisen yhteyden muodostamisesta helpompaa. Siinä on neljä yhdistämismallia, joita hyödynnetään eri tilanteissa. Numeric Comparison -mallissa käyttäjille näytetään numero, jonka pitää olla sama kaikilla laitteilla. Käyttäjät vastaavat yhteydenottoon kyllä tai ei. Passkey Entry -mallissa toinen laite näyttää numeron, jonka toisen laitteen käyttäjä syöttää toiselle laitteelle. Just Works -mallissa suoritetaan autentikointi, jonka jälkeen käyttäjä joko hyväksyy tai hylkää yhteyden. Out of Band -mallia käytetään laitteissa, jotka tukevat Bluetoothin lisäksi jotain muuta langatonta tai langallista teknologiaa. (Padgette, Bahr, Batra, Holtmann, Smithbey, Chen & Scarfone 2012.)

3 Bluetooth-versiot

Vuosien saatossa Bluetooth on saanut useita päivityksiä standardiin sekä laitetasolla että ohjelmistotasolla. Päivitykset ovat tuoneet uusia ominaisuuksia ja parannuksia muun muassa nopeuteen, tietoturvaan ja virrankulutukseen. Versioiden tärkeimmät ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.

Versio	Ominaisuudet
2.0	Enhanced Data Rate (EDR)
2.1	Secure Simple Pairing (SSP), Extended Inquiry Response (EIR), parempi akunkesto laitteille, jotka eivät ole käytössä
3.0	High Speed (HS) 24 Mb/s tiedonsiirtonopeus, Unicast Connectionless data (UCD), Near-field communication (NFC)
4.0	Classic Bluetooth, Bluetooth Low Energy
4.1	Ohjelmistopäivitys, häiriönsieto LTE-laitteiden kanssa, alustava tuki esineiden internetille
4.2	Parempi tuki esineiden internetille, Internet yhteys käyttäen IPv6:sta
5	Laajempi tuki esineiden internetille, parempi kantavuus, nopeampi tiedonsiirto

Taulukko 2. Bluetooth-versioiden ominaisuudet (Jaycon Systems 2017.)

3.1 Bluetooth 2.0 + EDR

Vuonna 2004 julkaistiin Bluetooth Core Specification Version 2.0 + EDR (Enhanced Data Rate). Uuden version myötä virrankulutus putosi puoleen. EDR-tekniikalla saavutettiin teoriassa 3 Mb/s:n tiedonsiirtonopeus, mutta käytännössä nopeus oli noin 2,1 Mb/s. EDR:n pystyi tarvittaessa ottamaan pois päältä, jos sitä ei halunnut käyttää. (Jaycon Systems 2017.)

3.2 Bluetooth 2.1

Bluetooth 2.1 ilmestyi vuonna 2007. Sen tärkeimmät ominaisuudet olivat SSP (Secure Simple Pairing), EIR (Extended Inquiry Response) ja parannettu akunkesto laitteille, jotka eivät ole aktiivisessa käytössä. SSP nimensä mukaisesti teki laitteiden yhdistämisen helpommaksi ja samalla paransi tietoturvaa. EIR puolestaan paransi laitteiden etsimistä ja niiden suodattamista ennen varsinaista yhteydenottoa. (Jaycon Systems 2017.)

3.3 Bluetooth 3.0 + HS

Bluetooth Core Specification Version 3.0 + HS (High Speed) julkaistiin vuonna 2009. Käyttäen WiFi-radiota Bluetooth 3.0 kykenee jopa 24 Mb/s:n nopeuteen, mutta kuluttaa enemmän virtaa. Bluetoothin omaa radiota käytettiin kuitenkin edelleen laitteiden etsimiseen ja niihin yhdistämiseen. High Speed -ominaisuutta ei ole pakko käyttää tiedonsiirrossa ja se on pois päältä, kun sitä ei tarvita. Muita ominaisuuksia ovat UCD (Unicast Connectionless Data) ja NFC (Near-Field Communication). (Jaycon Systems 2017.)

3.4 Bluetooth 4.0 + LE

Vuonna 2010 julkaistiin Bluetooth Core Specification Version 4.0. Se sisältää kaksi implementaatiota Bluetoothista, jotka ovat Bluetooth Low Energy (BLE) ja Classic Bluetooth. Classic Bluetooth on suunniteltu taaksepäin yhteensopivaksi aiempia Bluetooth-versioita käyttävien laitteiden kanssa. Bluetooth Low Energy, aiemmin tunnettu nimellä Wibree, on nimensä mukaisesti suunniteltu vähän virtaa kuluttavaksi teknologiaksi. BLE käydään tarkemmin läpi luvussa 4. (Jaycon Systems 2017.)

3.5 Bluetooth 4.1

Bluetooth 4.1 julkaistiin vuoden 2013 lopulla enemmänkin ohjelmistopäivityksenä Bluetooth 4.0:lle kuin laitteistopäivityksenä. Se toi alustavaa tukea esineiden internetille (engl. Internet of Things, IoT), huomattavasti paremman yhteensopivuuden LTE-laitteiden (Long-Term Evolution)

kanssa ja antoi enemmän vapauksia laitevalmistajille hallita laitteita käyttökohteelle sopivammiksi. (Jaycon Systems 2017.)

Aiemmissä versioissa LTE-laitteet aiheuttivat häiriöitä Bluetooth-laitteille, mikä lisäsi virrankulutusta ja heikensi suorituskykyä. Lisäksi laitteet pystyivät nyt samanaikaisesti toimimaan useammassa roolissa, mikä mahdollisti suoran kommunikoinnin laitteiden välillä ilman erillisiä välikäsiä. (Jaycon Systems 2017.)

3.6 Bluetooth 4.2

Vuonna 2014 julkaistiin Bluetooth 4.2, joka toi päivityksiä esineiden internetille. Bluetooth 4.2 paransi tietoturvaa ja tiedonsiirtonopeutta entisestään kymmenkertaistamalla lähetettyjen pakettien pituuden. Siinä on myös tuki Internet Protocol version 6:lle (IPv6), jonka avulla laitteet voivat kommunikoida Internetin ylitse. (Jaycon Systems 2017.)

3.7 Bluetooth 5

Viimeisin versio, Bluetooth 5, julkaistiin vuonna 2016. Samalla Bluetoothin versionumerointia yksinkertaistettiin, eli versio on 5 eikä 5.0. Bluetooth 5 paransi tukea esineiden internetille ja toi parannuksia aiempiin versioihin nähden. Sen nopeus kaksinkertaistui, kantavuus nelinkertaistui, pakettien pituus kahdeksankertaistui ja sen häiriönsieto muuhun langattomaan tietoliikenteeseen parani. (Jaycon Systems 2017.)

4 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE tai Bluetooth LE) on Classic Bluetoothin ohella osa Bluetooth Core Specification Version 4.0:sta. Bluetooth Low Energy tunnetaan myös Bluetooth Smart -nimellä. Bluetoothin ja BLE:n eroavaisuuksia on esitetty taulukossa 3. Seuraavassa käydään tarkemmin läpi Bluetooth LE:n historiaa ja sen toimintaa.

	Bluetooth Low Energy (LE)	Bluetooth Basic Rate/ Enhanced Data Rate (BR/EDR)
Optimized For...	Short burst data transmission	Continuous data streaming
Frequency Band	2.4GHz ISM Band (2.402 – 2.480 GHz Utilized)	2.4GHz ISM Band (2.402 – 2.480 GHz Utilized)
Channels	40 channels with 2 MHz spacing (3 advertising channels/37 data channels)	79 channels with 1 MHz spacing
Channel Usage	Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS)	Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS)
Modulation	GFSK	GFSK, $\pi/4$ DQPSK, 8DPSK
Power Consumption	~0.01x to 0.5x of reference (depending on use case)	1 (reference value)
Data Rate	LE 2M PHY: 2 Mb/s LE 1M PHY: 1 Mb/s LE Coded PHY (S=2): 500 Kb/s LE Coded PHY (S=8): 125 Kb/s	EDR PHY (8DPSK): 3 Mb/s EDR PHY ($\pi/4$ DQPSK): 2 Mb/s BR PHY (GFSK): 1 Mb/s
Max Tx Power*	Class 1: 100 mW (+20 dBm) Class 1.5: 10 mW (+10 dBm) Class 2: 2.5 mW (+4 dBm) Class 3: 1 mW (0 dBm)	Class 1: 100 mW (+20 dBm) Class 2: 2.5 mW (+4 dBm) Class 3: 1 mW (0 dBm)
Network Topologies	Point-to-Point (including piconet) Broadcast Mesh	Point-to-Point (including piconet)

* Devices shall not exceed the maximum allowed transmit power levels set by the regulatory bodies that have jurisdiction over the locales in which the device is to be sold or intended to operate. Implementers should be aware that the maximum transmit power level permitted under a given set of regulations might not be the same for all modulation modes.

Taulukko 3. Bluetooth Low Energy verrattuna Bluetooth BR/EDR:ään (Bluetooth SIG 2018f.)

4.1 Historia

Bluetooth Low Energy julkaistiin osana Bluetooth 4.0:aa vuonna 2010, mutta teknologiaa on kehitetty jo pidempään. Ennen kuin BLE liitettiin osaksi Bluetooth-standardia, se tunnettiin nimellä Wibree. Wibree on pääasiassa Nokian kehittämä langaton teknologia, jonka tavoitteena oli olla halpa, vähän virtaa kuluttava ja pieneen kokoon mahtuva. Nokian ohella teknologiaa ovat olleet kehittämässä muiden muassa Texas Instruments, Logitech ja Nordic Semiconductor. (Nokia 2007.)

Wibreen kehitys aloitettiin jo vuonna 2001, ja se julkaistiin vuonna 2006. Wibreen ja Bluetoothin ollessa samankaltaisia teknologioita ja Wibreen korjaten puutteita Bluetoothissa päättivät Nokia ja Bluetooth SIG yhdistää sen osaksi Bluetooth-standardia vuonna 2007. (Nokia 2007.)

4.2 Erot Bluetoothiin

Bluetooth ja Bluetooth Low Energy ovat molemmat tekniikoita langattomaan tiedonsiirtoon. BLE ei kuitenkaan ole yhteensopiva Bluetoothin kanssa, koska ne on suunniteltu eri käyttötarkoituksia varten ja niiden toiminnassa on huomattavia eroja.

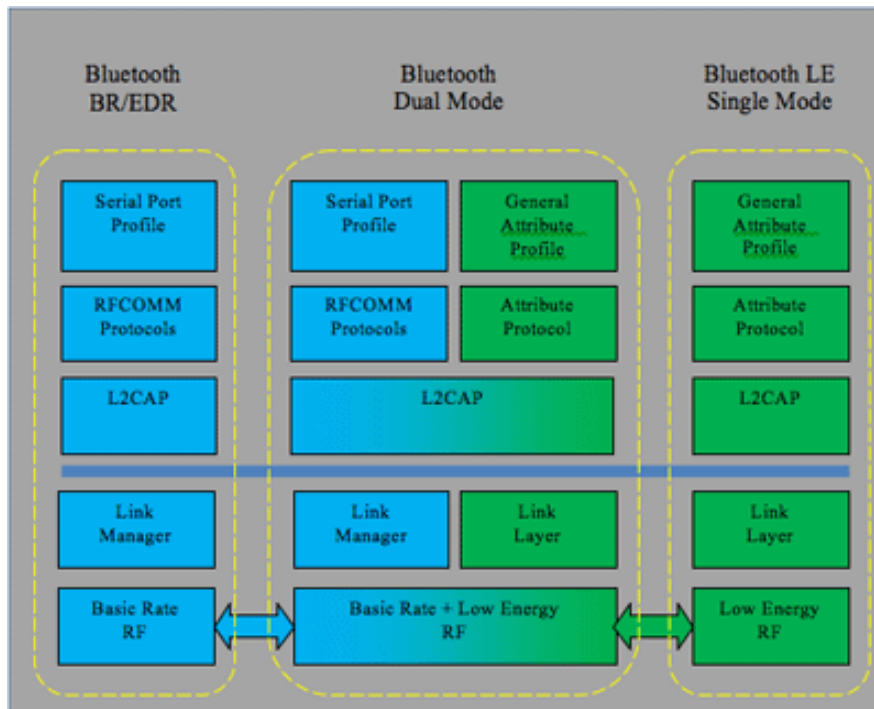
Bluetooth Low Energy on suunniteltu laitteille, jotka eivät lähetä tietoa jatkuvasti. Bluetooth puolestaan soveltuu jatkuvaan tiedonsiirtoon. Perinteinen Bluetooth käyttää 79:ää kanavaa, kun taas BLE käyttää 40:tä kanavaa, joiden leveys on 2 MHz. Näistä kanavista 3 on varattu mainostamista (engl. advertising) varten ja loput tiedonsiirtoa varten. (Bluetooth SIG 2018f.)

BLE:n tärkeimpiin ominaisuuksiin lukeutuu alhainen virrankulutus, jonka huippu on vain 15 mA. Tämä on saavutettu siirtämällä enemmän vastuuta verkossa isännälle. Renkinä toimiva laite lähettää tietoa vain tarvittaessa, muuten se on valmiustilassa, jossa sen virrankulutus on lähes olematon. BLE:ssä yhteyden muodostaminen tapahtuu millisekunneissa, jonka jälkeen laite voi lähettää tiedon, sulkea yhteyden ja palata valmiustilaan virran säästämiseksi. Näin laite voi toimia pelkällä nappiparistolla jopa vuosia. (Poole 2018c.)

Bluetooth Low Energy häviää pakettien nopeudessa ja pituudessa Bluetoothille, mutta käyttötarkoituksen huomioiden se ei ole ongelma. Perinteisen Bluetoothin ollessa rajoitettu seitsemään renkiin BLE:llä ei ole vastaavia rajoitteita. (Poole 2018c.)

4.3 Smart ja Smart Ready

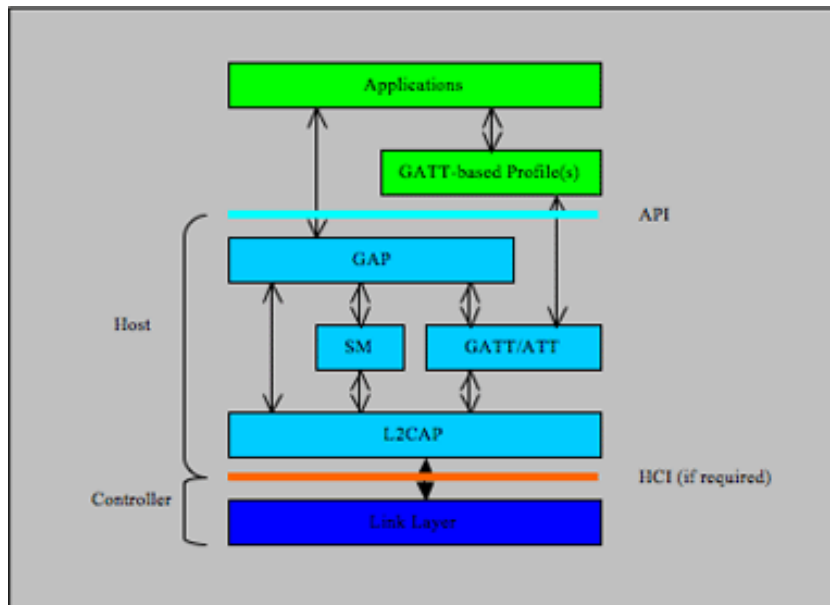
Bluetooth Low Energyä tukevat laitteet jaetaan kahteen osaan, joista toiset ovat Bluetooth Smart -laitteita ja toiset Bluetooth Smart Ready -laitteita. Bluetooth Smart Ready -laitteet ovat dual mode -laitteita, jotka tukevat vanhempien Bluetooth-laitteiden lisäksi Bluetooth Smart -laitteita. Smart Ready -laitteet voivat olla esimerkiksi puhelimia tai tietokoneita. Bluetooth Smart -laitteet puolestaan ovat yhtä tehtävää varten kehitettyjä single mode -laitteita, kuten antureita tai ohjaimia, jotka pystyvät yhdistymään vain uudempiin Smart- tai Smart Ready -laitteisiin. Smart-laitteiden ja vanhempien Bluetooth-laitteiden välinen toiminta on esitetty kuvassa 5. (Bluetooth SIG 2011.)



Kuva 5. Yksinkertaistettu kaavio Bluetooth Smart -laitteiden ja Classic Bluetooth -laitteiden yhteensopivuudesta (Galeev 2011.)

4.4 Protokollat

Bluetooth Low Energy ei ole taaksepäin yhteensopiva vanhempien Bluetooth-versioiden kanssa, koska sen protokollat on suunniteltu vähäinen virrankulutus mielessä. Samoin kuin perinteisessä Bluetoothissa, BLE:ssä protokollapino voidaan jakaa kahteen osaan, jotka ovat isäntäpino (engl. host stack) ja ohjainpino (engl. controller stack). BLE:n protokollapino on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Bluetooth Low Energy -protokollapino single mode -laitteille (Galeev 2011.)

Ohjainpinon alimmainen taso on Link Layer (LL, myös Low Energy Link Layer), joka vastaa kommunikoinnista fyysisen tason eli Physical Layerin (PHY) kanssa. LL-protokolla on Bluetooth Low Energy:n vastine perinteisen Bluetoothin LMP:stä. Se vastaa yhteydenottamisesta, laitteiden etsimisestä ja tietosuojasta. Host Controller Interface (HCI) toimii rajapintana ohjainpinon ja isäntäpinon välillä. (Galeev 2011.)

Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP), kuten perinteisessä Bluetoothissa, vastaa tiedon käsittelystä ja sen ohjaamisesta oikeisiin paikkoihin käyttäen multipleksausta ja demultipleksausta. L2CAP myös pilkkoo lähetettävät paketit lähetystä varten ja kasaa tulevat paketit. Security Manager (SM) vastaa suojatun yhteyden luomisesta, suojatusta tiedonsiirrosta ja käytettyjen suojausavaimien sopimisesta laitteiden kesken. BLE käyttää tiedon salauksessa AES-128 -salausmenetelmää (Advanced Encryption Standard). (Galeev 2011.)

Yhteyksien hallinnasta vastaa Generic Access Profile (GAP). GAP:lla on viisi tilaa, jotka ovat valmiustila (engl. standby), mainostustila (engl. advertiser), skannaustila (engl. scanner), aloittajtila (engl. initiator) ja yhdistynyt (engl. connected). Standby-tilassa laite on valmiustilassa, eikä se lähetä eikä vastaanota tietoa. Advertiser-tilassa laite mainostaa itseään eli kertoo olemassaolostaan muille Bluetooth-laitteille ja kertoo olevansa valmiina yhteydenottoa varten. Scanner-tilassa laite vastaanottaa mainostavilta laitteilta tietoa ja voi ottaa yhteyden niihin. Initiator-tilassa laite on valmiina ottamaan yhteyden mainostavaan laitteeseen. Connected-tilassa laite on yhdistynyt, ja sen rooli on joko isäntä tai renki riippuen siitä, onko laite yhteyden pyytäjä vai yhteyden hyväksyjä. (Texas Instruments 2016.)

Attribute Protocol (ATT) on BLE:n vastine SDP-protokollalle. ATT käsittelee attribuutteja, joiden avulla laitteet saavat tietoa toisistaan. ATT antaa attribuuttiasiakkaalle pääsyn attribuuttipalvelimen attribuutteihin. Attribuutteja voidaan löytää, lukea tai niihin voidaan kirjoittaa. Generic Attribute Profile (GATT) toimii sovelluksille rajapintana laitteiden väliseen kommunikointiin. (Bluetooth SIG 2018c.)

4.5 GATT-profiili

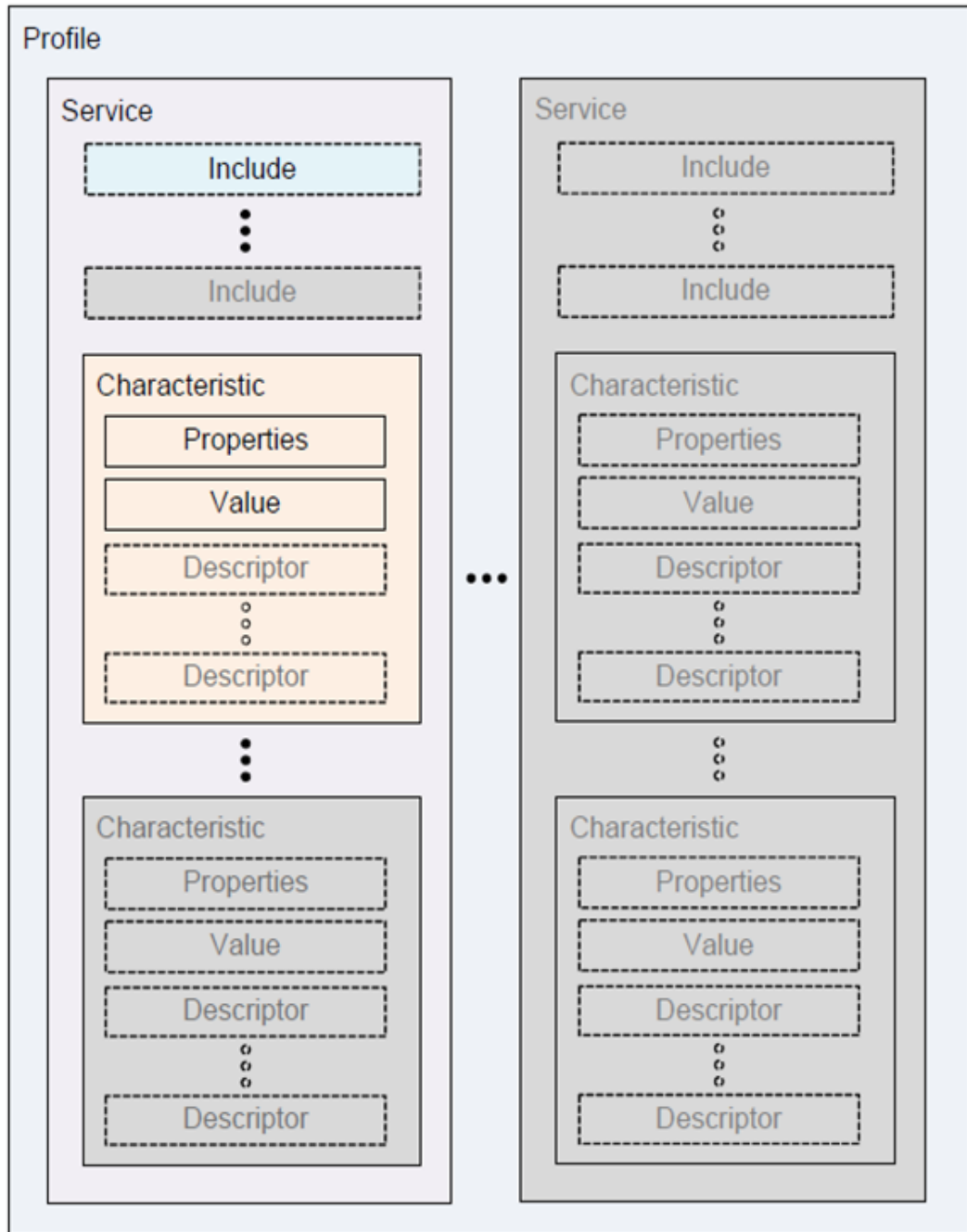
Bluetooth Low Energyn GATT-profiilit vastaavat perinteisen Bluetoothin profiileja. GATT-profiili määrittää käyttötapaukset, roolit ja yleiset pelisäännöt laitteiden käyttöön. Bluetooth Low Energylle on määritelty profiileja muun muassa automaatiolaitteille, terveydenhuollon laitteille, erilaisille fitness-laitteille ja HID-laitteille. GATT-profiilin rakenne on esitetty kuvassa 7. (Bluetooth SIG 2018d.)

GATT-profiili koostuu attribuuteista. Attribuutit ovat joko palveluita (engl. Services), ominaisuuksia (engl. Characteristics) tai kuvaajia (engl. Descriptors). Attribuutit identifioidaan käyttäen Universally Unique Identifier (UUID) -tunnistetta. (Woolley 2016.)

Service-attribuutti pitää sisällään Characteristic-attribuutit, jotka kuuluvat kyseiseen palveluun. Characteristics-attribuutteja käytetään tiedon välittämiseen. Jokaisella niistä on oma arvonsa (engl. Value) joka voi sisältää tietoa esimerkiksi laitteen tilasta, käytetyistä asetuksista tai anturin arvoista. (Woolley 2016.)

Characteristics-attribuuteilla voi olla omat asetuksensa (engl. Properties) lukua, kirjoitusta ja ilmoittamista varten, jotka määrittelevät että miten toiset laitteet voivat käyttää niitä. Luettaessa ominaisuutta laite lähettää sen hetkisen tiedon siitä toiselle laitteelle. Kirjoittaessa, jos se on sallittu, toinen laite voi muuttaa sen arvoa. Ilmoittaessa, riippuen toteutuksesta, laite lähettää ominaisuuden tilan joko säännöllisin väliajoin tai aina sen muuttuessa. (Woolley 2016.)

Descriptor-attribuutit nimensä mukaisesti kuvaavat Characteristic-attribuutteja. Joissain tapauksissa kuvaajat voivat myös ohjata Characteristicsien toimintaa, esimerkiksi sitä, voivatko ne lähettää ilmoituksia niiden tilasta. (Woolley 2016.)



Kuva 7. GATT-profiilin rakenne (Bluetooth SIG 2018c.)

5 Fitness-laitteet

Fitness-laitteet eli kuntolaitteet ovat laitteita, joita käytetään kuntoilussa. Erilaisia fitness-laitteita on monenlaisiin tarkoituksiin. Laitteiden tueksi on kehitetty erilaisia älylaitteita ja antureita. Näillä laitteilla saadaan harjoitteista ja kuntoilijasta tietoja, joita voidaan hyödyntää monin tavoin, esimerkiksi ohjaamalla harjoituksen vaikeustasoa sykkeen perusteella, tai tekemällä erilaisia kaavioita aiemmista harjoituksista. Monet näistä laitteista ja antureista käyttävät Bluetoothia tiedon siirtämiseen ja niiden ohjaamiseen. Seuraavassa käydään läpi muutama Bluetoothia hyödyntävää fitness-laitetta.

5.1 Sykemittari

Sykemittari on laite, joka mittaa sydämen sykettä. Sykemittarit kiinnitetään yleensä joko rinnan ympärille tai käteen. Syke ilmoitetaan lyönteinä minuutissa (bpm, beats per minute). Urheillessa monet käyttävät sykevöitä, jotka voivat lähettää syketietoa esimerkiksi älypuhelimeen tai urheilukelloon. Älykkäämmät sykemittarit voivat kerätä harjoituksista tietoa myöhempää käyttöä varten.

5.2 Urheilukello

Urheilukello on ranteeseen laitettava laite, joka kellon näyttämisen lisäksi mittaa käyttäjän suoritusta urheillessa. Laite voi kerätä tietoa käytetystä ajasta, sijainnista, kuljetusta matkasta, vauhdista, sykkeestä ja poltetuista kaloreista. Useimmat urheilukellot sisältävät erilaisia ohjelmia eri urheilulajeja varten, mutta vaativat valmistajan oman älypuhelinsovelluksen voidakseen hyödyntää kaikkia niiden ominaisuuksia.

5.3 Kadenssianturi

Kadenssianturi eli poljinanturi on anturi, jolla mitataan kadenssia. Kadenssilla tarkoitetaan polkupyörän polkimien kierroksia minuutissa. Älykkäissä pyöräilylaitteissa kadenssianturi on yleensä sisäänrakennettuna, mutta saatavilla on myös erillisiä pyörään kiinnitettäviä antureita.

Anturilta tulevaa tietoa voidaan käyttää esimerkiksi laskemaan pyöräilyharjoituksen tehoa tai näyttämään kadenssi kuntopyörän näytöllä.

5.4 Harjoitusvastus

Harjoitusvastus eli traineri on laite, johon kiinnitetään oikea polkupyörä, jolloin sitä voidaan käyttää sisätiloissa kuntopyörän tapaan. Harjoitusvastuksilla on yleensä useita eri tiloja ja vaikeustasoja, joita voidaan ohjata esimerkiksi älypuhelimella. Useat älykkäät trainerit tukevat simulaatiotilaa ja ERG-tilaa (ergometri, engl. ergometer). Simulaatiotilassa harjoituksista tehdään mielekkäämpiä simuloimalla oikean maailman teitä ja sääolosuhteita. ERG-tilassa laite pyrkii säätämään vastusta saavuttaakseen käyttäjän asettaman pyöräilytehon, polkipa käyttäjä miten nopeasti tai hitaasti tahansa.

5.5 Juoksumatto

Juoksumatto on kuntolaite, jonka päällä voi juosta tai kävellä sisätiloissa. Juoksumatot voivat mitata kuljettua matkaa ja kalorinkulutusta. Älykkäämmissä juoksumatoissa voidaan simuloida mäkiä ja säätää vaikeustasoa esimerkiksi sykemittarilta tulevaa tietoa hyödyntäen.

6 Toteutus

Toteutuksessa on käytetty Bluetooth Low Energyä. Toteutuksessa ei käydä tarkemmin läpi BLE:n käyttöönottoa eikä laitteisiin yhdistämistä, koska käyttöönotto vaihtelee paljon eri alustojen ja kirjastojen välillä. Bluetooth-tiedon käsittely toimii samalla tavalla kaikilla yleisimmillä alustoilla.

Kehitystyö tehtiin pääasiassa pöytätietokoneella, jossa on Windows 10 -käyttöjärjestelmä. Windows-laitteilla Bluetoothin käyttöönotossa käytetään maksullista C++-kielistä kirjastoa. Windowsin Bluetooth-ajureissa on puutteita, joten kaikkia BLE:n ominaisuuksia ei voitu käyttää. Mac-tietokoneilla BLE:n käyttöönotto on toteutettu Objective C -ohjelmointikielellä natiivia CoreBluetooth-rajapintaa hyödyntäen. Tiedon käsittely toteutettiin C#-ohjelmointikielellä.

Seuraavassa käydään läpi tapa käsitellä muutamalta eri fitness-laitteelta tulevaa tietoa. Esimerkkikoodit on siistitty ja hieman muokattu tilan säästämisen ja selkeyden vuoksi, joten ne eivät välttämättä toimi suoraan muissa sovelluksissa.

6.1 Sykemittarin lukeminen

Sykemittareita varten Bluetoothilla on standardipalvelu Heart Rate, jonka UUID on 0x180D. Palvelu sisältää kolme ominaisuutta, jotka ovat Heart Rate Measurement, Body Sensor Location ja Heart Rate Control Point.

Heart Rate Measurement, jonka UUID on 0x2A37, on palvelun ainoa pakollinen ominaisuus eli Characteristic. Sykemittarilta tulevan tavutaulukon pituus vaihtelee sen mukaan, mitä sen lähettämä paketti pitää sisällään. Paketin sisältö kerrotaan vastaanotetun tavutaulukon ensimmäinen tavussa. Lukemalla tavun ensimmäisen bitin saadaan tieto siitä, onko sykkeen koko 8 bittiä vai 16 bittiä. Seuraavat kaksi bittiä kertovat anturin kontaktitilasta. Neljäs bitti kertoo, sisältääkö paketti tietoa energian kulutuksesta. Viides bitti kertoo, sisältääkö paketti tietoa RR-intervallista. Loput bitit eivät ole käytössä.

Yksinkertaista sovellusta varten paketista tarvitsee lukea ainoastaan sydämen syke, muulla tiedolla ei ole väliä. Jos syke on 8 bittinen luku, sen arvo saadaan suoraan tavutaulukon toisesta tavusta. 16 bittistä sykettä varten tieto luetaan toisesta ja kolmannesta tavusta. Jos halutaan lukea enemmän tietoa paketista, pitää ottaa huomioon, että syke voi olla joko yhden tai kahden

tavun kokoinen. Ongelma ratkaistaan yksinkertaisesti tarkistamalla, montako tavua luetaan ja siirtämällä seuraavan tiedon lukemisen aloittamisen kohtaa luettujen tavujen määrällä. Esimerkki sykkeen lukemisesta on esitetty kuvassa 8.

```
int ReadBpmFromHeartRateMeasurement(byte[] data)
{
    if (data == null || data.Length <= 1) { return 0; }

    byte flags = data[0];
    bool heartRateValueIsUInt8 = ((flags & (1 << 0)) == 0);

    if (heartRateValueIsUInt8) { return data[1]; }
    else { return BitConverter.ToUInt16(data, 1); }
}
```

Kuva 8. Esimerkki funktiosta, joka lukee sykkeen Heart Rate Measurement -paketista

6.2 Kadenssianturin lukeminen

Kadenssi- ja nopeusantureiden tukemista varten Bluetoothilta löytyy standardipalvelu Cycling Speed and Cadence (CSC), jonka UUID on 0x1816. Palvelu tarjoaa tavan lukea sekä kadenssia että nopeutta, mutta laite voi tukea vain toista niistä. Palvelulla on neljä Characteristic-attribuuttia, jotka ovat CSC Measurement, CSC Feature, Sensor Location ja SC Control Point.

Kadenssi- ja nopeustieto voidaan lukea laitteelta tulevalta CSC Measurement -ominaisuudelta, jonka UUID on 0x2A5B. Vastaanotetun tavutaulukon sisältämä tieto kerrotaan ensimmäisessä tavussa. Jos tavun ensimmäinen bitti on asetettu, paketti sisältää tietoa renkaan kierroksista. Jos toinen bitti on asetettu, paketti sisältää tietoa kammen kierroksista. Muut bitit eivät ole käytössä.

Jos paketti sisältää tietoa renkaan kierroksista, seuraavat 32 bittiä eli 4 tavua sisältää kumulatiivisen kierrosmäärän. Seuraavat 16 bittiä eli 2 tavua kertoo viimeisimmän renkaaseen liittyvän tapahtuman ajasta, jonka resoluutio on 1/1024. Jos paketti sisältää tietoa kammen kierroksista, seuraavat 2 tavua sisältää kammen kumulatiiviset kierrokset. Sitä seuraavat 2 tavua kertoo viimeisimmän kampeen liittyvän tapahtuman ajasta resoluutiolla 1/1024.

Paketti ei suoraan sisällä kadenssia, vaan se lasketaan käyttämällä kahden viimeisimmän paketin kumulatiivisia kammen kierroksia ja kampeen liittyvän tapahtuman ajanhetkeä. Jos ajanhetki on molemmissa paketeissa sama, kadenssia ei voida laskea. Esimerkki kadenssin laskemisesta on esitetty kuvassa 9.

```

class CadenceSensorExample
{
    private uint m_wheelRevolutions;
    private int m_crankRevolutions;
    private int m_wheelEventTime;
    private int m_crankEventTime;
    private int m_cadence;

    public int Cadence { get { return m_cadence; } }

    public void CalculateCadenceFromCSCMeasurementData(byte[] data)
    {
        uint lastWheelRevolutions = m_wheelRevolutions;
        int lastCrankRevolutions = m_crankRevolutions;
        int lastWheelEventTime = m_wheelEventTime;
        int lastCrankEventTime = m_crankEventTime;

        byte flags = data[0];
        int index = 1;

        if (((flags & (1 << 0)) != 0))
        {
            m_wheelRevolutions = BitConverter.ToUInt32(data, index);
            index += 4;
            m_wheelEventTime = BitConverter.ToUInt16(data, index);
            index += 2;
        }

        if (((flags & (1 << 1)) != 0))
        {
            m_crankRevolutions = BitConverter.ToUInt16(data, index);
            index += 2;
            m_crankEventTime = BitConverter.ToUInt16(data, index);
            index += 2;
        }

        if (lastCrankEventTime > m_crankEventTime)
        { m_crankEventTime += 65536; }

        if (lastCrankRevolutions > m_crankRevolutions)
        { m_crankRevolutions += 65536; }

        float eventDelta = (float)(m_crankEventTime - last-
CrankEventTime);
        float crankDelta = (float)(m_crankRevolutions - lastCrankRev-
olutions);

        if (eventDelta != 0)
        { m_cadence = (int)((60f * crankDelta * 1024f) / eventDelta); }
        else { m_cadence = 0; }
    }
}

```

Kuva 9. Esimerkki kadenssin laskemisesta käyttäen CSC Measurement -pakettien tietoa

6.3 Fitness Machine -laitteiden lukeminen

Bluetoothilta löytyy standardipalvelu Fitness Machine, jonka UUID on 0x1826. Se kokoaa useat kuntolaitteet yhden palvelun alle. Se sisältää standardiattribuutit juoksumatoilta, crosstrainereilta, steppereiltä, porraslaitteilta, soutilaitteilta ja kuntopyörilta tulevalle tiedolle. Palvelun käyttämät ominaisuudet vaihtelevat laitteen tyyppin mukaan.

Fitness Machine -palvelu on Bluetoothissa melko uusi standardi, joten kovin moni laite ei vielä tue sitä. Tästä syystä toteutusta ei voitu testata kyseistä palvelua käyttävien laitteiden kanssa, joten niille tehty toteutus pohjautuu pelkästään Bluetoothin manuaaliin. Otetaan esimerkkinä porraslaitteelta tulevan tiedon lukeminen.

Porraslaitteelta tulevaa tietoa lähettää Stair Climber Data -attribuutti, jonka UUID on 0x2AD0. Laitteelta tulevan tavutaulukon ensimmäiset 16 bittiä eli 2 tavua kertovat paketin sisällöstä. Bittien kertoma tieto paketin sisällöstä on esitetty taulukossa 4. Bitit 10–15 eivät ole käytössä. Paketin sisältämä tieto luetaan tavutaulukosta asetettujen bittien perusteella. Esimerkki Stair Climber Data -paketin lukemisesta on esitetty kuvassa 10.

Bitti	Tieto paketin sisällöstä	Koko paketissa (bittinä)
0	Noustat kerrokset	16
1	Askeleet minuutissa	16
2	Askelten vauhti	16
3	Noustu korkeus	16
4	Harppausten määrä	16
5	Poltetut kalorit, kaloria tunnissa, kaloria minuutissa	16, 16, 8
6	Syke	8
7	MET-tieto (metabolinen ekvivalentti)	8
8	Kulunut aika	16
9	Jäljellä oleva aika	16
10-15	Ei käytössä	-

Taulukko 4. Stair Climber Data -paketin ensimmäiset kaksi tavua kertovat paketin sisällöstä

```

void ReadStairClimberData(byte[] data)
{
    if (data == null || data.Length <= 2) { return; }

    int index = 0;
    ushort flags = BitConverter.ToUInt16(data, index);
    index += 2;

    if ((flags & (1 << 0)) == 0) {
        int floors = BitConverter.ToUInt16(data, index);
        index += 2;
    }
    if ((flags & (1 << 1)) != 0) {
        int stepsPerMinute = BitConverter.ToUInt16(data, index);
        index += 2;
    }
    if ((flags & (1 << 2)) != 0) {
        int averageStepRate = BitConverter.ToUInt16(data, index);
        index += 2;
    }
    if ((flags & (1 << 3)) != 0) {
        int meters = BitConverter.ToUInt16(data, index);
        index += 2;
    }
    if ((flags & (1 << 4)) != 0) {
        int strideCount = BitConverter.ToUInt16(data, index);
        index += 2;
    }
    if ((flags & (1 << 5)) != 0) {
        int totalEnergy = BitConverter.ToUInt16(data, index);
        index += 2;
        int energyPerHour = BitConverter.ToUInt16(data, index);
        index += 2;
        int energyPerMinute = data[index];
        index += 1;
    }
    if ((flags & (1 << 6)) != 0) {
        int heartRate = data[index];
        index += 1;
    }
    if ((flags & (1 << 7)) != 0) {
        int metabolicEquivalent = data[index];
        index += 1;
    }
    if ((flags & (1 << 8)) != 0) {
        int elapsedTime = BitConverter.ToUInt16(data, index);
        index += 2;
    }
    if ((flags & (1 << 9)) != 0) {
        int remainingTime = BitConverter.ToUInt16(data, index);
        index += 2;
    }
}

```

Kuva 10. Esimerkki Stair Climber Data -paketin lukemisesta asetettujen bittien perusteella

6.4 Tacx Smart -harjoitusvastusten ohjaaminen

Tacx Smart -harjoitusvastukset eivät käytä Bluetoothin standardiattribuutteja tiedonvälitykseen. Tacx on määritellyt käyttöönsä omat attribuuttinsa, joiden ylitse lähetetään ANT+-standardin mukaista tietoa. ANT+ on Bluetoothin tapaan langaton tiedonsiirtotekniikka, joka on suunnattu lähinnä fitness-laitteiden käyttöön.

ANT+-paketeissa ensimmäinen tavu sisältää synkronointimerkin (engl. sync character), jonka arvo on aina 0xA4. Seuraavassa tavussa kerrotaan, montako tietoa sisältävää tavua paketti sisältää. Kolmas tavu sisältää viestin tyyppin. Neljäs tavu kertoo käytetyn kanavan, mutta se ei ole käytössä. Viides tavu on ANT+-standardissa määritelty sivunumero, jonka perusteella tiedetään luettavan tiedon sisältö. Sivunumeroa seuraavat tavut sisältävät varsinaisen tiedon. Paketin viimeinen tavu sisältää tarkistussumman, joka saadaan käyttämällä XOR-operaatiota tarkistussummaa edeltäviin tavuihin.

Koska harjoitusvastuksissa on paljon erilaisia ominaisuuksia, toteutuksessa ei käydä läpi kaikkien niiden lukemista tai käyttämistä. Otetaan esimerkkinä ERG-paketin kokoaminen, jolla Tacx-laite asetetaan ERG-tilaan, jos laite tukee sitä. Tacx-laitteiden käyttämän palvelun UUID on 6E40FEC1-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E. Tiedot kirjoitetaan ominaisuuteen, jonka UUID on 6E40FEC2-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E.

Komentopaketti, jolla Tacx asetetaan ERG-tilaan, on pituudeltaan 13 tavua. Ensimmäinen tavu on synkronointimerkki, jonka arvo on 0xA4. Seuraavassa tavussa kerrotaan varsinaisen tiedon pituus, jonka arvo ERG-komentopaketissa on 9. Kolmas tavu on viestin tyyppi, jonka arvo on tässä tapauksessa 0x4F. Neljännen tavun eli kanavan arvoksi annetaan 5. Sivunumeron, joka on viides tavu, arvoksi annetaan 0x31. Seuraavat viisi tavua eivät ole käytössä, joten niiden arvoksi annetaan 0xFF. Yhdestoista ja kahdestoista tavu sisältävät halutun pyöräilytehon resoluutiolla 0,25 W. Tämä tarkoittaa sitä, että tavoiteteho kerrotaan neljällä ennen sen asettamista tavutaulukkoon. Viimeinen tavu sisältää tarkistussumman. ERG-komentopaketin kokoaminen ja tarkistussumman laskeminen on esitetty kuvassa 11.

```

class TacxExample
{
    private byte CalculateChecksum(byte[] data)
    {
        byte xorBinary = 0;

        for (int i = 1; i < data.Length - 1; ++i)
        {
            byte binary = data[i];
            byte previousBinary = 0;
            if (i > 1) previousBinary = xorBinary;
            else previousBinary = data[0];

            xorBinary = (byte)(previousBinary ^ binary);
        }

        return xorBinary;
    }

    public byte[] GetErgCommandPacket(float targetPower)
    {
        targetPower = Math.Max(0.0f, Math.Min(targetPower, 4000.0f));
        ushort intTargetPower = (ushort)Math.Round(targetPower * 4);

        byte[] command = new byte[13];
        command[0] = 0xA4;
        command[1] = 0x09;
        command[2] = 0x4F;
        command[3] = 0x05;
        command[4] = 0x31;
        command[5] = 0xFF;
        command[6] = 0xFF;
        command[7] = 0xFF;
        command[8] = 0xFF;
        command[9] = 0xFF;
        command[10] = (byte)(intTargetPower);
        command[11] = (byte)(intTargetPower >> 8);
        command[12] = CalculateChecksum(command);

        return command;
    }
}

```

Kuva 11. ERG-komentopaketin kokoaminen ja tarkistussumman laskeminen Tacx-harjoitusvastuksille

7 Pohdintaa

Bluetooth on paljon monimutkaisempi ja monipuolisempi teknologia kuin se päältä katsoen vaikuttaa. Yli kahdenkymmenen vuoden aikana Bluetoothista on kirjoitettu tuhansia sivuja teknistä tietoa ja siitä on kirjoitettu paljon artikkeleita. Tiedon paljouden ja useiden eri versioiden vuoksi Bluetoothista on vaikea kirjoittaa kaikki tilanteet ja muutokset huomioiden, joten tämäkin työ on puutteellinen joiltain osa-alueilta.

Bluetoothin käyttöönotto ei ollut kovin haastavaa, koska se on laajasti tuettu standardi. Yksinkertaisten laitteiden tukeminen onnistuu vaivatta, kiitos kattavien dokumenttien. Ongelmia tulee vastaan vasta kehittäessä tukea laitteille, jotka eivät syystä tai toisesta pysty noudattamaan Bluetoothin standardeja. Jos laitteiden dokumentaatio on puutteellista tai suljettua, niiden tukeminen on vaikeaa tai niitä ei voi käytännössä ollenkaan tukea. Pöytätietokoneiden ja kannettavien Bluetooth-tuki on muutenkin puutteellista verrattuna älypuhelimien, mikä toi omat haasteensa toteutukseen.

Olen tyytyväinen siihen, mitä olen saanut aikaan. Työn tavoitteeseen päästiin, eli Windows- ja Mac-tietokoneilla voidaan kommunikoida erilaisten Bluetoothia käyttävien fitness-laitteiden kanssa. Toteutusta voidaan tarpeen tullen laajentaa tukemaan yhä useampia laitteita. Minulla ei ollut aiempaa kokemusta Bluetoothista ennen tätä toimeksiantoa. Työn aikana olen oppinut paljon erilaisista teknologioista, uusista ohjelmointikielistä ja kehityksestä Mac-laitteilla.

Lähteet

- Absolute Astronomy. 2018. Bluetooth. Haettu osoitteesta <http://www.absoluteastronomy.com/topics/Bluetooth>
- Bluetooth SIG. 2011. Bluetooth SIG Extends Bluetooth Brand, Introduces Bluetooth Smart Marks. Haettu osoitteesta <https://web.archive.org/web/20150203053330/http://www.bluetooth.com/Pages/Press-Releases-Detail.aspx?ItemID=138>
- Bluetooth SIG. 2018a. Origin of the Bluetooth Name. Haettu osoitteesta <https://www.bluetooth.com/about-us/bluetooth-origin>
- Bluetooth SIG. 2018b. Bluetooth Brand Guide & Logos. Haettu osoitteesta <https://www.bluetooth.com/develop-with-bluetooth/marketing-branding>
- Bluetooth SIG. 2018c. GATT Overview. Haettu osoitteesta <https://www.bluetooth.com/specifications/gatt/generic-attributes-overview>
- Bluetooth SIG. 2018d. GATT Specifications. Haettu osoitteesta <https://www.bluetooth.com/specifications/gatt>
- Bluetooth SIG. 2018e. Our History. Haettu osoitteesta <https://www.bluetooth.com/about-us/our-history>
- Bluetooth SIG. 2018f. Radio Versions. Haettu osoitteesta <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/radio-versions>
- Bluetooth SIG. 2018g. Topology Options. Haettu osoitteesta <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/topology-options>
- Bluetooth SIG. 2018h. Traditional Profile Specifications. Haettu osoitteesta <https://www.bluetooth.com/specifications/profiles-overview>
- Galeev, M. 2011. Bluetooth 4.0: An introduction to Bluetooth Low Energy – Part II. Haettu osoitteesta https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1278966

Hodgdon, C. 2003. Adaptive Frequency Hopping for Reduced Interference between Bluetooth® and Wireless LAN. Haettu osoitteesta <https://www.design-reuse.com/articles/5715/adaptive-frequency-hopping-for-reduced-interference-between-bluetooth-and-wireless-lan.html>

Jaycon Systems. 2017. Bluetooth Technology: What Has Changed Over The Years. Haettu osoitteesta <https://medium.com/jaycon-systems/bluetooth-technology-what-has-changed-over-the-years-385da7ec7154>

Kardach, J. 2008. Tech History: How Bluetooth got its name. Haettu osoitteesta <https://www.embedded.com/print/4182202>

Kroeter, E. 2015. Bluetooth Security 101. Haettu osoitteesta <https://blog.bluetooth.com/bluetooth-security-101>

Nokia. 2007. Wibree forum merges with Bluetooth SIG. Haettu osoitteesta https://web.archive.org/web/20070616082658/http://www.wibree.com/press/Wibree_pressrelease_final_1206.pdf

Padgett, J. & Bahr, J. & Batra, M. & Holtmann, M. & Smithbey, R. & Chen, L. & Scarfone, K. 2012. Guide to Bluetooth Security. Haettu osoitteesta <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-121r1.pdf>

Poole, I. 2018a. Bluetooth data file transfer, links & codec. Haettu osoitteesta <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/bluetooth/data-file-transfer-links.php>

Poole, I. 2018b. Bluetooth radio interface, modulation, & channels. Haettu osoitteesta <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/bluetooth/radio-interface-modulation.php>

Poole, I. 2018c. What is Bluetooth Smart: Bluetooth Low Energy, BLE. Haettu osoitteesta <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/bluetooth/what-is-bluetooth-smart-low-energy-ble.php>

Staab, W. & Armstrong, S. 2014. Bluetooth 101 – Part VI – Bluetooth Architecture. Haettu osoitteesta <https://hearinghealthmatters.org/waynesworld/2014/bluetooth-101-part-vi/>

Texas Instruments. 2016. Generic Access Profile (GAP). Haettu osoitteesta http://dev.ti.com/tirex/content/sim-plelink_cc2640r2_sdk_1_40_00_45/docs/blestack/ble_user_guide/html/ble-stack-3.x/gap.html

Woolley, M. 2016. A Developers Guide To Bluetooth. Haettu osoitteesta <https://blog.bluetooth.com/a-developers-guide-to-bluetooth>