

Pauli Oikkonen

# TIEDONSIIRTO SÄHKÖVERKOSSA

Green PHY -modeemin suorituskyky

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta

Kandidaatintyö

Toukokuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Pauli Oikonen: Tiedonsiirto sähköverkossa, Power Line Communications  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma  
Toukokuu 2019

---

Moniin sulautettuihin järjestelmiin halutaan verkkoyhteys, ja eri syistä yhteys on monesti edullisinta muodostaa sähköverkon kautta. Sähköverkkoa voidaan käyttää muihinkin tiedonsiirtosovelluksiin, jopa multimediaan, mutta sulautetut järjestelmät asettavat erilaisia vaatimuksia verkkoyhteydelle, joka näissä onkin usein toteutettu eri tavalla.

Tässä työssä esitellään sähköisen tiedonsiirron peruseriaatteita, joita soveltaen käydään seuraavaksi läpi sähköverkon ominaispiirteitä tiedonsiirtokanavana. Tämän jälkeen tutustutaan tutkittavan laitteen Green PHY -standardiin eritellen, miten sulautettujen järjestelmien erityispiirteet heijastuvat standardissa.

Työn tarkoitus on mitata laitteiston suorituskykyä. Ensin esitellään laitteiden käyttöönotto ja käytetyt mittausten menetelmät, minkä jälkeen kuvaillaan mittausten suorittamista ja listataan tulokset. Viimeisenä pohditaan mittaustuloksia, joista havaitaan evaluaatiokäyttöön tarkoitettujen laitteiston toimivan selvästi rajoitetulla nopeudella, ja lisäksi kaupallista verrokkilaitteistoa vähemmän luotettavasti heikoilla yhteysväleillä. Merkittävä päätelmä on myös, että evaluaatiokäyttöön tarkoitettujen laitteiston ohjelmistossa on paljon tutkittavaa ja kehitettävää, koska valmistajan tarjoaman ohjelmiston siirto laitteelle muuttamattomana vaikuttaa selkeästi suorituskykyyn, ja tämän selitys vaatii ohjelmakoodin tutkimista.

Työ saavuttaa hyvin tavoitteensa valottaen evaluaatiolaitteiston suorituskykyä. Siirtonopeuksien selkeä riippuvuus laitteistolla käytettävästä ohjelmistosta tuli täytenä yllätyksenä, ja sitä onnistutaan jossain määrin tutkimaan ja kuvailemaan. Hypoteesi evaluaatio- ja kaupallisen laitteiston suorituskyvyn yhtäläisyydestä heikoissa tiedonsiirto-oloissa osoittautuu vääräksi, mutta sen syvällisempi tutkiminen tekisi työstä liian laajan.

Avainsanat: tiedonsiirto, sähköverkko, PLC, modeemi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

## ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopiston informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnan sähkötekniikan yksikölle. Työssä tutkitaan sulautettujen järjestelmien kehitykseen soveltuvia sähköverkkomodeemeja. Työ on tehty opiskelijana, ja sen ohjaajana on toiminut professori Markku Renfors Tampereen yliopistolta.

Haluan kiittää professori Markku Renforsia työn ohjaamisesta ja asiantuntevista neuvoista. Kiitos kuuluu myös muulle työn tekoa tukeneelle koulun henkilöstölle. Kiitän myös perhettäni ja ystäviäni tuesta, erityisesti Niko Ikosta tekstin oikolukemisesta.

Tampereella, 13. toukokuuta 2019

Pauli Oikkonen

# SISÄLLYSLUETTELO

Lyhenteet ja merkinnät . . . . .	iv
1 Johdanto . . . . .	1
2 Tiedonsiirto sähköverkossa . . . . .	2
2.1 Sähköverkko tiedonsiirtokanavana . . . . .	2
2.2 Modulaatio ja linjakoodaus . . . . .	3
2.3 Tiedonsiirtonopeus . . . . .	4
3 HomePlug Green PHY . . . . .	6
4 Mittaukset . . . . .	8
4.1 Mittausympäristöt ja laitteiden asennus . . . . .	8
4.2 Mittaukset . . . . .	9
4.2.1 Mittausjärjestelyt . . . . .	10
4.2.2 Tulokset . . . . .	11
5 Yhteenveto . . . . .	14
Lähdeluettelo . . . . .	15
Liite A SDK:n siirtäminen laitteelle . . . . .	16

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

DHCP	automaattisen IP-osoitteiden jaon protokolla (engl. Dynamic Host Configuration Protocol)
FSK	modulointi kanta-aallon taajuutta vaihtelemalla (engl. Frequency Shift Keying)
HPAV	HomePlug AV, multimediakäyttöön tarkoitettu spesifikaatio sähköverkkotiedonsiirrolle
HPGP, GP	HomePlug Green PHY, sulautetuille järjestelmille tarkoitettu spesifikaatio sähköverkkotiedonsiirrolle
HTTP	hypertekstin siirtoprotokolla (engl. Hypertext Transfer Protocol)
IP	tietoverkkojen välisen tiedonsiirron protokolla (engl. Internet Protocol)
JTAG	testausportti elektroniselle laitteistolle (engl. Joint Test Action Group, standardin kehittänyt ryhmä)
LAN	lähiverkko (engl. Local Area Network)
Mbps	megabittiä sekunnissa (engl. Megabits per second)
MCM	usean kanta-aallon modulaatio (engl. Multicarrier Modulation)
NAT	osoitteenmuunnos, eräs reititysmekanismi (engl. Network Address Translation)
QPSK	neljää eri vaihetta käyttävä modulaatiomenetelmä (engl. Quadrature Phase Shift Keying)
SNR	signaali-kohinasuhde (engl. Signal-to-Noise Ratio)
TAU	Tampereen yliopisto (engl. Tampere University)
TN-C	nollajohdinta myös suojamaana käyttävä maadoitusjärjestelmä
TN-S	erillisiin nolla- ja suojamaajohtimeen perustuva maadoitusjärjestelmä
TUNI	Tampereen korkeakouluuyhteisö (engl. Tampere Universities)
UART	usein sulautetuissa järjestelmissä käytetty sarjaliitäntä (engl. Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
URL	verkkosivun osoite (engl. Uniform Resource Locator)
USB	yleiskäyttöinen sarjaväylä (engl. Universal Serial Bus)
WLAN	langaton lähiverkko (engl. Wireless Local Area Network)

# 1 JOHDANTO

Esineiden Internet on sekä nykypäivää että tulevaisuutta. Mitä erilaisimmat kodinkoneet saavat verkkokäyttöliittymiä, ja tarvitsevat näin ollen myös verkkoyhteyden. Useisiin käyttötarkoituksiin soveltuu langaton kotiverkko, mutta WLAN-tekniikka (langaton lähiverkko, Wireless Local Area Network) on rajallinen niin kantamaltaan kuin tietoturvaltaan. Langallisella lähiverkolla voi saavuttaa suuren kantaman, korkean tiedonsiirtonopeuden ja erinomaisen tietoturvan, mutta verkko täytyy erikseen rakentaa. Tämä on usein haasteena, kun halutaan yhdistää verkkoon vaikka pihapiirin päärakennuksesta erillisiä rakennuksia tai vaikka antureita.

Kotiautomaatio ei yleensä tarvitse suurta tiedonsiirtokapasiteettia. Sen sijaan tietoturva on kotiautomaatiossa erityisen tärkeää, ja tässä erillinen langallinen verkko on huomattavasti langatonta parempi, sillä siihen on vaikeampi tunkeutua. Erillisen langallisen lähiverkon rakentaminen on turhaa, jos tietoverkkona käyttääkin olemassaolevaa sähköverkkoa. Siihen on monia eri standardeja, joista tässä työssä tutkitaan erityisesti kotiautomaatioon suunnattua HomePlug Green PHY:tä.

Työssä käydään ensiksi läpi elektronisen tiedonsiirron teknistä perustaa ja sähköverkon erityispiirteitä tiedonsiirtokanavana. Suurinopeuksinen digitaalinen tiedonsiirto on teknisesti erittäin monimutkaista eikä sen perusteista voida antaa kuin pintaraapaisu sen selkiyttämiseksi, mitä erityisvaatimuksia sähköverkon käyttö asettaa tiedonsiirrolle. Täältä pohjalta perehdytään Green PHY:n spesifikaatioon ja arvioidaan mittausympäristöistä, mitkä tekijät niissä vaikuttavat tiedonsiirron toimintaan, ja kuinka altis Green PHY näille häiriöille on.

Toteutuksesta kuvataan käytettyjen Devolo dLAN -evaluaatiomodeemien käyttöönotto painottaen laitteita ohjaavaan prosessoriin tutustumista, sillä sulautettujen järjestelmien kehittäjälle on tärkeää kyetä ohjaamaan ja säätämään modeemin toimintaa. Modeemien toimivuutta ja häiriöalttiutta arvioidaan tämän jälkeen mittaamalla tiedonsiirron toimintaa niiden yli erilaisissa olosuhteissa ja tutkimalla suorituskykyä, erityisesti siirtonopeutta. Tuloksista tehdään päätelmiä laitteiston toimintavarmuudesta ja arvioidaan, minkälaisiin tiedonsiirtosovelluksiin ne ovat omiaan.

## 2 TIEDONSIIRTO SÄHKÖVERKOSSA

Langallinen tiedonsiirto on tavanomaisesti toteutettu erillisin verkoin, joissa siirrettävä informaatio kuljetetaan useimmiten sähköisen signaalin muodossa. Erillinen verkko ei kuitenkaan ole elektronisen viestinnän edellytys, ja joskus onkin eduksi, ettei tietoverkkoyhteyden rakentaminen vaadi erillistä pienjännitesignaaliverkkoa. Verkkovirta-asennuksia on joka puolella, ja käyttövirran lisäksi tässä verkossa voidaan siirtää myös informaatiota.

### 2.1 Sähköverkko tiedonsiirtokanavana

Tiedonsiirtojärjestelmiä mallinnetaan yleisesti viitenä osana, jotka ovat informaatiolähde, lähetin, siirtotie, vastaanotin ja vastaanottaja. Informaatiolähteestä syntyy viesti, jonka lähetin muuntaa siirtotietä varten sopivaan muotoon ja lähettää siirtotien yli. Vastaanotin toimii käänteisesti lähettimeen nähden, purkaen siirtotietä varten tehdyn signaalimuunnoksen, että viesti saadaan takaisin alkuperäiseen muotoon vastaanottajan luettavaksi. [12, s. 2]

Tässä työssä käsiteltävää LAN-tietoliikennettä (lähiverkko, Local Area Network) voidaan tavanomaisimmin käytetyn Ethernet-verkon lisäksi siirtää sähköverkossa, joka asettaa omat haasteensa. Sähköverkko on siirtotienä hankala mallintaa, ja kanavan siirtofunktio vaihtelee niin ajan kuin taajuudenkin funktiona. Kanavalla esiintyy myös monentyyppistä kohinaa. Erityisesti lyhyen aikavälin vaihtelu on merkittävää, sillä sähkölaitteiden aiheuttamat häiriöt korkeilla taajuuksilla vaihtelevat verkkojännitteen hetkellisamplitudin funktiona.

Korkeataajuisia häiriöitä tuottavien sähkölaitteiden lisäksi haasteensa tuo se, että sähköasennukset eroavat huomattavan paljon maittain, yksinkertaisena esimerkkinä Yhdysvalloissa yleinen 120/240 voltin kaksivaihejärjestelmä ja Euroopassa yleinen 230/400 voltin kolmivaihejärjestelmä. Nykyaikainen TN-S-suojamaadoitusjärjestelmä erillisine nolla- ja suojamaajohtoineen aiheuttaa myös voimakasta ja hyvin vahvasti taajuusselektiivistä "kampamaista" vaimenemista. [7, s. 9, 12—14] TN-S on muun muassa Suomessa ollut vuodesta 1994 pakollinen uusissa kiinteistöjen sisäisissä sähköverkkoasennuksissa, kun taas tätä vanhemmat rakennukset usein käyttävät yhdistettyä nolla- ja suojamaajohtointia (TN-C) [4]. Tästä johtuen sähköverkkotiedonsiirron voidaan olettaa toimivan myös huomattavan eri tavalla yksittäisen maan sisällä eri aikakausien rakennuksissa.

Rakennusten sisäisessä verkossa käytetään tavallisesti korkeataajuisista tiedonsiirtoa, ja tällaisen siirtotien vaste on huomattavan taajuusriippuvainen. Merkittävimmät häiriöt syntyvät monitie-etenemisenä, kun signaali heijastuu johdon päästä takaisin. Koska korkeataajuusalueen 2—30 MHz aallonpituudet ovat noin 10—150 m, samaa suuruusluokkaa kuin häiriöitä aiheuttavien johtovetojen pituus, näistä johdoista takaisin heijastuvan signaalin tietyt taajuuskomponentit voivat olla 180 asteen vaihe-erossa varsinaisen signaalin vastaaviin taajuuksiin nähden. Jos heijastuva signaali ei juuri vaimene, se vaimentaa voimakkaasti kanavan vastetta näillä taajuuksilla. Yleisesti ottaen rakennusten sisäiset verkot ovat jakeluverkkoja haaroittuneempia, mikä aiheuttaa useita notkoja siirtotien taajuusvasteeseen. Lisäksi verkkoon kytketyt kodinkoneet vaikuttavat erilaisin tavoin kanavan vasteeseen ja aiheuttavat häiriöitä.

Yleisesti ottaen sähköverkoille siirtoteinä on taajuusvastekäyrän notkojen lisäksi tyypillistä myös alipäästösuodinmaisuuksia, jota virranahdintoilmiö ja vierekkäisten, eri suuntiin korkeataajuisista viestisignaalia kuljettavien johdinten välinen kapasitanssi aiheuttavat. Myös johdinten pituus itsessään vaikuttaa kanavan alipäästösuodatuksen voimakkuuteen; mitä pitempi kaapeli on, sitä jyrkemmin sen vaimennus tyypillisesti kasvaa taajuuden funktiona. [7, s. 17—18, 41—42, 53—55] Tästä johtuen pitkän kantaman tiedonsiirrossa tavanomaisesti käytetäänkin matalampia taajuusalueita, lyhyen kantaman siirrossa taas korkeampia.

## 2.2 Modulaatio ja linjakoodaus

Yksinkertainen esimerkkivaihtoehto sähköverkkomodeemin modulaatiotavaksi on FSK (Frequency Shift Keying), jossa symbolivirta moduloidaan esittämällä eri symbolit eritaajuisina sinusoidiaaltoina. Kun symbolien lukumäärä on  $M$ , FSK käyttää  $M$  eritaajuisia aaltoa. Modulaation spektrihiyötysuhde  $M$ -FSK:lle on

$$\rho = \frac{\log_2 M}{M},$$

joka selvästi heikkenee suurilla symbolimäärillä. Tämä ei ole optimaalista, sillä SNR:n (signaali-kohinasuhde, engl. Signal-to-Noise Ratio) kasvaessa vaaditaan suurempien symboliaakkosten käyttämistä, että kanavan informaatiokapasiteettia voidaan skaalata SNR:n mukaan [14, s. 495—496].

MCM:ssä (usean kanta-aallon modulaatio, engl. Multicarrier Modulation) korkean siirtonopeuden informaatiovuo ositellaan matalan siirtonopeuden alivoiksi, jotka moduloidaan itsenäisinä kapeakaistaisiksi signaaleiksi ja lähetetään rinnakkaisina kanavina siirtotien yli. Koska yksittäinen kanava on kapeakaistainen, sen taajuusvaste on likimain tasainen. Tämän lisäksi MCM mahdollistaa siirtotehon optimaalisen jaon kanavien kesken sen mukaan, miten hyvä milläkin kapealla kanavalla on kuuluvuus. Nämä edut ovat erityisen merkittäviä taajuusselektiivistä siirtotietä — kuten kotitaloussähköverkkoa — käytettäessä. [7, s. 262—263, 287]



Digitaalisen signaalin linjakoodaukseen ennen modulaatiota on useita tekniikoita omine erityispiirteinen, jotka ratkaisevat kuhunkin käyttötarkoitukseen valikoituvan koodin. Eräs moderni koodiluokka ovat turbokoodit, joita muun muassa tutkielman aiheena oleva Green PHY (jäljempänä myös GP) käyttää. Näissä koodeissa virheenkorjaus toteutetaan purkuvaiheessa iteroimalla arviota vastaanotetun signaalin merkityksestä kahden dekooderin välillä, kunnes dekooderit ovat yhtä mieltä sisällöstä. [1, s. 618]

## 2.3 Tiedonsiirtonopeus

Millä tahansa siirtotiellä on luontevaa pitää parhaana sitä tiedonsiirtomenetelmää, joka saavuttaa korkeimman nopeuden. Signaalin laatu voi olla hankala mitata, mutta siirtonopeus on selkeästi mitattavissa. Tutkimalla sen käyttäytymistä eri tavalla häiriöisissä ympäristöissä voidaan myös järjestelmän sisäisestä toiminnasta vetää johtopäätöksiä, kun nopeuteen vaikuttavia tekijöitä tunnetaan.

Kohinaisen kanavan, jonka kaistanleveys on  $W$ , suurin mahdollinen tiedonsiirtokapasiteetti riippuu SNR:stä, kapasiteetin  $C$  ollen

$$C = W \log_2(1 + SNR) \quad (2.1)$$

bittiä sekunnissa. Täten signaali-kohinasuhteen lisäys kasvattaa kapasiteettia logaritmisesti. Tämän kapasiteetin lähestyminen edellyttää soveltuvaa koodausmenetelmää, koska diskreettejä symboleita lähettävän systeemin maksimitiedonsiirtonopeus on

$$R_{bit} = \log_2(M) * R_{sym},$$

missä  $R_{bit}$  on tiedonsiirtonopeus,  $R_{sym}$  symbolitaajuus ja  $M$  symboliaakkoston koko. Tästä on luontevaa päätellä, että kaistanleveyden ja näin ollen myös symbolitaajuuden pysyessä vakiona  $M$ :n on mukauduttava SNR:n vaihteluun, että kanavan kapasiteetti kyettään hyödyntämään. Koska HomePlug Green PHY käyttää ainoastaan QPSK-modulaatiota (Quadrature Phase Shift Keying), jonka  $M = 4$ , sen siirtonopeus ei kasva rajattomiin signaalin laadun parantuessa vaan leikkautuu. Tämä on toisaalta luontevaa, sillä standardin korkein tiedonsiirtonopeus  $C \approx 10Mbps$ , jota voidaan yleisesti ottaen pitää alhaisena. [13, s. 33—39, 61] [5, s. 16]

Kaavasta 2.1 voidaan johtaa pienin kaistanleveys, jolla tämä teoreettisella optimikanavalla olisi mahdollista, kun Green PHY:n käyttämä kaistanleveys  $W = 30MHz - 2MHz =$

28MHz: [5, s. 16]

$$\begin{aligned}\log_2(1 + SNR) &= \frac{C}{W} \\ 1 + SNR &= 2^{\frac{C}{W}} \\ SNR &= 2^{\frac{C}{W}} - 1 \\ SNR &= 2^{\frac{10Mbps}{28MHz}} - 1 \approx 0,28dB.\end{aligned}$$

Käytännössä tavoitenopeuden saavuttaminen vaatii tietysti tätä korkeamman SNR:n, mutta tästä tuloksesta voidaan jo selkeästi päätellä Green PHY:n merkittävän hyödyn olevan toimintavarmuus ja vakaa tiedonsiirtokapasiteetti runsaskohinaisillakin siirtoteillä. Tämä sopii hyvin siihen, että GP on tarkoitettu enemmän kotiautomaatio- kuin multimediakäyttöön.

### 3 HOMEPLUG GREEN PHY

HomePlug Green PHY on erityisesti kotiautomaatioon tarkoitettu sähköverkkotiedonsiirtoprotokolla, joka perustuu aikaisempaan HomePlug AV -standardiin. Kotiautomaation ja älylaitteiden usein tiukoista energiankulutusvaatimuksista johtuen Green PHY:tä on yksinkertaistettu huomattavasti, ja siihen on mm. lisätty matalalla tiedonsiirtokapasiteetilla selviäviä laitteita varten matalatehoinen tila. Green PHY kuitenkin tukee koko HomePlug AV:n taajuusalueita 2—30 MHz, mikä mahdollistaa tarvittaessa kohtalaisen korkean siirtonopeuden. Yksinkertaistaminen näkyy muun muassa siinä, että kaikki kolme Green PHY:n käyttämää kommunikaatiotilaa käyttävät QPSK-modulaatiota ja ½-nopeussuhteen turbokoodausta, kun taas AV sallii näille useita muitakin vaihtoehtoja. [5, s. 16—17]

Green PHY määrittelee fyysisen verkon (PhyNet) ja loogisen verkon (AV In-Home Logical Network, AVLN) konseptit. Jokaisella lähetyksasemalla on oma PhyNet, joka koostuu asemista, jotka voivat fyysisesti kommunikoida kyseisen aseman kanssa. Loogisen verkon kaikilla asemilla on sama verkkotunnus (Network Identifier, NID) ja verkon jäsenavain (Network Membership Key, NMK). Loogista verkkoa hallinnoi yksi koordinaattori (Central Coordinator, CCo), ja kaksi asemaa samassa loogisessa verkossa voivat kommunikoida keskenään, jos ne kuuluvat toistensa fyysisiin verkkoihin. [5, s. 27—28]

Kaikki asemat kykenevät verkon hallintaan, jonka vähimmäisvaatimuksina on uusien asemien assosiointi ja autentikointi, loogisen verkon sisällä uniikin laitetunniin (Terminal Equipment Identifier, TEI) jako ja CSMA-pohjainen (Carrier Sense Multiple Access) koordinoimaton verkon jako, jossa asemat kuuntelevat ennen lähettämistä, ettei kukaan muu ole jo lähettämässä. Valinnaisina ominaisuuksina asema voi toteuttaa myös esimerkiksi siirtotien aikataulujaon koordinoinnin (Time Division Multiple Access, TDMA), jolloin CSMA:ta ei tarvita siirtotien vapauden varmistamiseen. Tämä on HomePlug AV:ssa pakollinen ominaisuus, mutta Green PHY ei sitä vaadi. [5, s. 30, 337][1, s. 788]

Turvallisuuden kannalta Green PHY:n looginen verkko muistuttaa paljolti Category 5 -kaapeloitua lähiverkkoa. Vain käyttäjän hyväksymät laitteet saavat liittyä loogiseen verkkoon, koska loogisen verkon sisälle päässeet asemat oletetaan kaikki rehellisiksi. Tämä johtuu muun muassa siitä, että loogisten verkkojen sisällä jaetaan salausavaimia. Käytetyillä turvallisuusratkaisuilla pyritään suojautumaan asiantuntevia mutta jossain määrin resursseiltaan rajoitettuja hyökkääjiä vastaan, esimerkkitapauksena liikennettä salakuunteleva teknisesti osaava naapuri, jolla voi olla käytössään esimerkiksi 10 tehokasta PC-tietokonetta. [5, s. 31—32]

Aiemmin kuvatun mukaisesti fyysinen kerros vastaa HomePlug AV:ta tietyn yksinkertaisuus. Lähetin-vastaanotin muistuttaa huomattavan paljon tyypillistä usean kantaallon modulaatiota käyttävää radiolähetin-vastaanotinta: siirrettävä informaatio enkoodataan digitaalisesti modulaatiolle suotuisaan muotoon, muunnetaan moduloitaviksi kompleksisymboleiksi, OFDM-moduloidaan (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, eräs monen kantaallon modulaatiotyyppi) käänteisellä Fourier-muunnoksella, ja lähetetään siirtotielle analogisen käsittelyn jälkeen. Vastaanotettu signaali puretaan vastaavasti Fourier-muunnoksella ja turbo-dekooderilla digitaaliseksi. [5, s. 35—36, 127]

Koska siirtotienä käytetyt sähköverkot eroavat suuresti toisistaan niin taajuus- kuin aika-selektiivisyydeltään, tiedonsiirto edellyttää kanavan ominaisuuksiin mukautumista. Koska Green PHY käyttää pelkästään QPSK-modulaatiota eikä sen näin ollen tarvitse selvittää erityisen hyvin kuuluvia kantaaltoaajuuksia alivuokohtaisen modulaatiotavan päättämiseksi, se ei siirron aluksi erikseen estimoiki kanavaa, vaan mukautuu ainoastaan dynaamisesti sen ajallisesti muuttuviin ominaisuuksiin [5, s. 236, 240]. Tämän ansiosta lähettäjän ei tarvitse ennen siirtoa selvittää vastaanottajalta, miten mikäkin taajuus kuuluu vastaanottopäässä.

## 4 MITTAUKSET

Tiedonsiirtokyvyn selvittämiseksi Green PHY -laitteistoa mitattiin käyttäen erilaisia sähköverkkoja siirtotienä kahden Devolo dLAN Green PHY -evaluaatiolaitteen muodostamalle GP-verkolle. Parhaan mahdollisen suorituskyvyn selvittämiseksi siirtotienä käytettiin sähköverkosta irtonaista jatkojohtoa, jonka yli viestittäessä signaalin laadun pitäisi olla erinomainen häiriölähteiden puutteesta johtuen. Käytännön tilanteiden mallintamiseksi laitteita käytettiin myös erilaisilla yhteyksillä kotitaloussähköverkossa. Mittauksen informaatiolähteenä ja -kohteena käytettiin tavanomaisia PC-tietokoneita, joista toinen oli kytketty Green PHY -verkkoon Ethernet-kytkimen kautta.

### 4.1 Mittausympäristöt ja laitteiden asennus

Mittaukset suoritettiin Tupsulassa, Tampereella sijaitsevassa opiskelijatalossa. Tupsula on valmistunut vuonna 1988, ja sen suojamaadoitusjärjestelmä on sähköverkkotiedon-siirrolle suotuisaa TN-C-tyyppiä. Tämä ei selvinnyt saadusta sähkökaaviosta, joten asia selvitettiin irrottamalla pistorasian suojakuori ja varmistamalla, että maadoitusliuskaa ei ole kytketty erilliseen suojamaajohtoon, vaan nollajohtoon. Kaaviosta ei myöskään käynyt ilmi, mitkä asunnot on kytketty mihinkin vaiheeseen, joten yhteenkytketyt asunnot jouduttiin selvittämään katsomalla sulakekaapista, minkä värinen vaihejohto kuhunkin asuntoon menee.

Devolo dLAN -laitteet asennettiin ohjeiden mukaisesti ensin varmistamalla jumpperien oikea asento. Sen jälkeen tiedonsiirtoon käytettävä verkkovirtaliitin asennettiin pistokkeeseen ja virtalähteenä toimiva Micro USB -johto liittimeen, jonka jälkeen Ethernet-johto asennettiin. Ohjeen mukaisesti laitteiden käynnistyttyä painettiin kummastakin Pair-painikkeita, jolla laitteet sopivat yhteisen salasanan ja pariutuvat [3, s. 4]. Yhteyden toimivuus testattiin selaamalla Internetiä päätelaitteena toimineella kannettavalla, jolloin data kulkisi Green PHY -verkon yli pöytäkoneelle ja sillä toimivan NAT-reitityksen (osoitteenmuunnos, engl. Network Address Translation) kautta ulkoverkkoon. Tämä toimi odotetusti.

Yhteyden nopeutta mitattiin siirtämällä dataa linkkinä toimineen GP-verkon yli kannettavalle. Ensimmäisissä yhteyskokeiluissa käytettiin mittauksessa äärimmäisen yksinkertaista oimatekoista HTTP-palvelinta, joka vastaa GET-pyyntöihin lähettämällä vastauksena siirrettävän tiedoston. Ohjelma on kehitetty Linuxille, ja sen lähdekoodi on saatavis-

sa GitHubista [10]. Yhteyden mittaamiseksi molempiin suuntiin ohjelma asennettiin kummallekin tietokoneelle. Testidatana käytettiin varmuuden vuoksi /dev/urandomista peräisin olevaa kohinaa, ettei mikään osa tiedonsiirtoketjua kykenisi vääristelemään tuloksia kompressoimalla siirrettävää dataa.

Käytettävän kohinan voi generoida käskyllä:

```
dd if=/dev/urandom of=/tmp/noise bs=1024 count=1048576
```

Palvelimen käynnistäminen:

```
./lan_dl /tmp/noise
```

Tiedoston vastaanotto:

```
wget -O /dev/null 192.168.0.1:8080
```

Varsinaiset mittaukset tehtiin tämän jälkeen `iperf`-suorituskykymittausohjelmalla. Koska `iperf`:llä saadut tulokset olivat megabiteinä sekunnissa (Mbps), HTTP-menetelmällä saadut kilotavuina sekunnissa (kB/s) olleet mittaustulokset muunnettiin myös Mbps:ksi vertailun helpottamiseksi. Koska yksi tavu on 8 bittiä ja yksi megabitti 1024 kilobittiä, kaava

$$R(\text{Mbps}) = \frac{R(\text{kB/s})}{1024 \frac{\text{MB}}{\text{kB}}} * 8 \frac{\text{b}}{\text{B}} = \frac{R(\text{kB/s})}{128}$$

muuntaa kilotavut sekunnissa megabiteiksi sekunnissa.

Optimisiirtoympäristönä mittauksissa käytettiin irtonaista kolmiosaista sisäjatkojohtoa. Tämän yli dataa lähetettäessä siirtonopeus oli noin 480 kB/s (3,75 Mbps), ja kahteen suuntaan samalla tavalla dataa siirrettäessä saatiin eri suuntien siirtonopeudeksi noin 240 ja 300 kB/s (1,88 ja 2,34 Mbps, yht. 4,22 Mbps). Koska Green PHY:n nopeudeksi on ilmoitettu 10 Mbps, on saavutettu siirtonopeus huomattavan paljon tätä alhaisempi. Tästä nousee kysymys, onko dLAN oletuksena jonkinlaisessa virransäästötilassa jossa siirtonopeus on rajoitetumpi, koska TCP:n hyötysuhde ei yksittäistä suurta HTTP-vastausta lähetettäessä selitä tätä [6, s. 272, 273]. Erikoista on myös, että kahteen eri suuntaan samaan aikaan lähetettäessä siirtonopeuksien summa on selkeästi yhdensuuntaista siirtoa suurempi, sillä siirtotie on yksikanavainen eikä kaksisuuntaisen liikenteen näin ollen tulisi olla yksisuuntaista nopeampaa.

## 4.2 Mittaukset

Ennen mittauksia kokeiltiin toiselle laitteelle asentaa valmistajan ohjelmistokehityspaketti (Software Development Kit, SDK), `dlan-greenphy-sdk`, koska laitteella valmiina oleva ohjelma on äärimmäisen minimalistinen, eikä esimerkiksi tarjoa HTTP-käyttöliittymää.

Tarvittavan ympäristön asentaminen, SDK:n kääntäminen ja asennus laittelle on kuvattu tarkemmin liitteessä A.

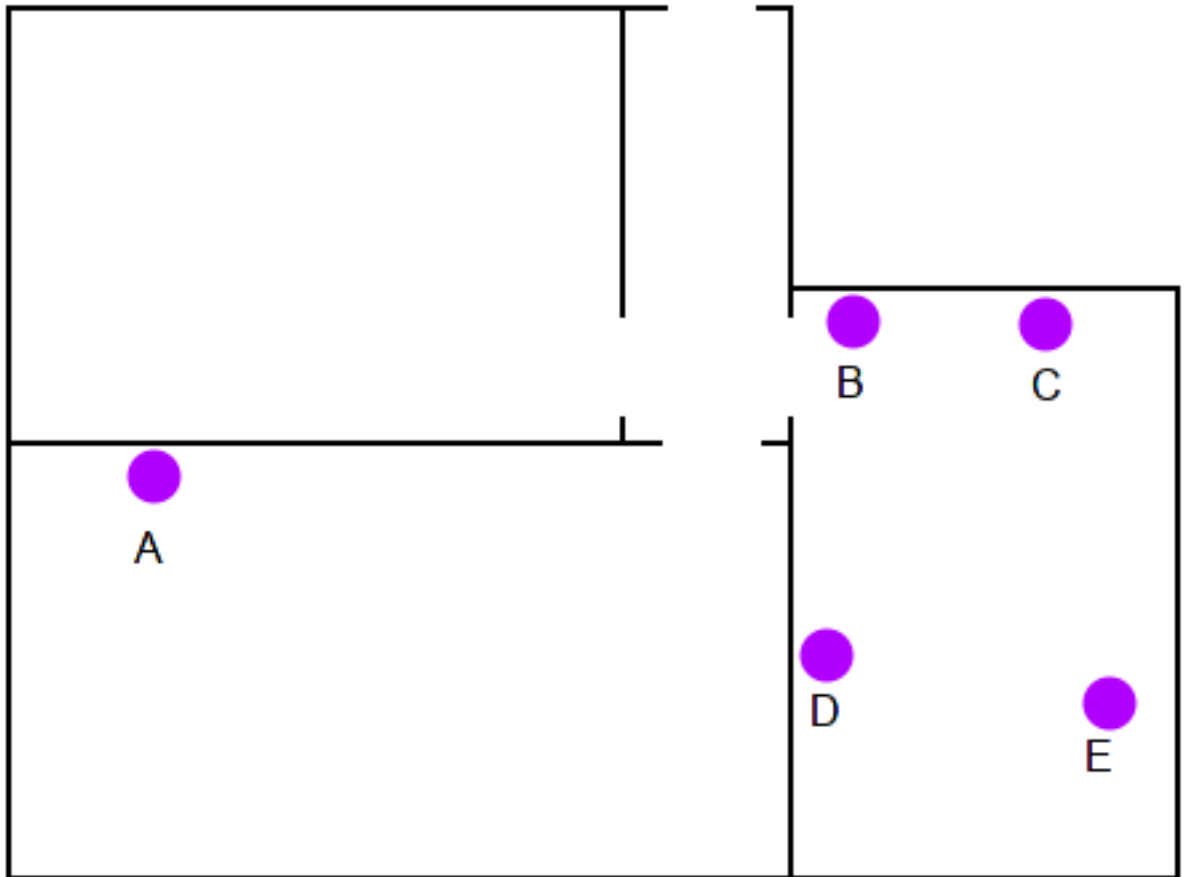
### 4.2.1 Mittausjärjestelyt

SDK:n kokeilun jälkeen havaittiin erikoinen ilmiö. Asennuksen jälkeen suurin saavutettava tiedonsiirtonopeus sähköverkosta irtonaisen jatkojohdon yli yhteen suuntaan noin 200 kB/s (n. 1,9 Mbps), kuten myös kahteen suuntaan tapahtuvien siirtojen nopeuksien summa. Koska mitään muuta järkevää syytä toiminnan muutokselle ei ollut, on oletettava sen johtuvan valmistajan tarjoamasta SDK:sta, joka toimii jollain ratkaisevalla tavalla eri lailla kuin laitteella valmiina ollut ohjelmisto. Laite, jolle SDK oli asennettu, oli kahdessa mittauksessa yhdistetty kuvan 4.1 pistorasiaan A — sitä ei käytetty mittauksissa, joissa pistorasiaan A oli kytketty ZyXELin modeemi.

Huoneiston sisällä havaittiin suurta vaihtelua eri pistorasioiden välillä: makuuhuoneesta dataa lähettäessä yhden keittiön pistorasian kautta siirtonopeus oli noin 200 kB/s (1,9 Mbps), toisen noin 15 kB/s (0,12 Mbps). Yli 2 Mbps:n siirtonopeuteen ei laitteistolla koskaan päästy. Myös tiedonsiirto huoneistosta sen ulkopuolelle osoittautui mahdottomaksi, vaikka sulakekaapista vaihejohtojen väriä vertaamalla varmistettiin, että mittauksessa käytettyjen asuntojen pitäisi olla kytketty samaan vaihejohtoon.

Koska HomePlug AV ja Green PHY ovat keskenään yhteensopivia, kokeiltiin laitteella myös tiedonsiirtoa ZyXELin valmistamaan HomePlug AV -modeemiin. Tämä onnistui siten, että dLANilla painettiin Pair-nappulaa, ja ZyXELillä Reset/Encrypt-nappulaa. ZyXELin modeemi ilmeisesti nollasi itsensä noin 5-10 kertaa noin yhden hertsin taajuudella, jonka jälkeen yhteys oli muodostettu. Tämänkinlaisen yhteyden maksiminopeudeksi mitattiin sama noin 1,9 Mbps optimiolosuhteissa, tässä tapauksessa tietoa virroitettun jatkojohdon yli siirtämällä, koska ZyXELin modeemi ottaa käyttövirtansa samasta verkkopistokkeesta, jota se käyttää myös tiedonsiirtoon. Koska dLANien välinen tiedonsiirtonopeus myös rajoittui optimiolosuhteissa 1,9 Mbps:iin, voidaan pitää selvänä, että nimenomaan Green PHY -modeemi rajoittaa nopeutta. Aiemmin mitatun, pelkistä dLAN-laitteista koostuvalla verkolla selkeästi huonosti kuuluvaksi havaitun pistorasian keittiössä todettiin myös päästävän noin 1,9 Mbps läpi, kun siihen yhteyden vastaanottajaksi kytkettiin ZyXEL-modeemi.

Kahdella ZyXEL-modeemilla mitattiin myös varmuuden vuoksi eri yhteysvälien toimivuutta, koska on täysin mahdollista, että kehityskäyttöön tarkoitetuilla evaluaatiolaitteilla yhteyden saavuttaminen toimii jostain tutkimattomasta syystä oletuksena heikommin kuin kuluttajakäyttöön tarkoitettulla kaupallisella laitteistolla. Yhteyden muodostaminen asunnosta ulos ei ZyXELeilläkään onnistunut useista yrityksistä huolimatta, joten Tupsulan asuntojen välinen sähköverkko selvästi ei ole läpäisevä HomePlug-tekniikan käyttämällä taajuusalueella. Huoneiston sisäisessä verkossa ZyXEL-modeemeilla kykeni hyvin siirtämään tietoa, mutta tähän ei paneuduttu erityisen syvällisesti, sillä Harri Pursiaisen kandi-



**Kuva 4.1.** Käytetyt pistorasiat huoneistossa. A sijaitsee makuuhuoneessa ja B—E keittiössä. E on pistorasiaan kytketty jatkojohto

daatintutkielma käsittelee tiedonsiirron suorituskykyä HomePlug AV -kalustolla erityisesti huoneiston sisäisessä verkossa [11].

Soluhuoneesta dLAN-modeemilta keittiössä sijaitsevan jatkojohdon päähän ZyXEL-modeemille yhteyden muodostaminen ei onnistunut. ZyXELien käyttöohje ei suosittele käyttämään jatkojohtoja, sillä ne heikentävät voimakkaasti kuuluvuutta, joten tulos on ymmärrettävä. Yhteysväli kokeiltiin myös kahdella ZyXELillä, joiden välille saatiin muodostettua yhteys. Kuten aiempi havainto keittiön huonosti kuuluvasta pistorasiasta, tämäkin on yllättävä löydös, sillä dLANin käyttämä Green PHY -standardi on AV:stä nimenomaan suhteellisen hitaat yhteydet huomioon ottaen yksinkertaistettu versio, jolloin huonosti kuuluvilla yhteysväleillä kummankin standardin kuuluisi toimia jokseenkin samanlaisesti. Ilmiö voi myös johtua siitä, että kaupallisella ZyXELillä on valmiit tyyppilliseen kotitalouskäyttöön optimoidut oletusasetukset ja dLANilla ei, mutta tätä ei tarkemmin tutkittu.

## 4.2.2 Tulokset

Siirtonopeuksien mittaaminen HTTP:llä ei ole optimaalista, sillä mitattu siirtonopeus ei vastaa fyysisen kerroksen siirtonopeutta. Yhden verkkokerroksen välistä saa pois suorittamal-



la mittauksen `iperf`-ohjelmalla, joka toimii suoraan TCP:n tai UDP:n päällä. Varsinaiset systemaattiset mittaukset suoritettiin ajamalla `iperf`-palvelinta PC:llä, josta oli yhdistetty HPAV- tai Green PHY -modeemi pistorasiaan A, ja yhdistämällä johonkin muista pistorasioista toisella sähköverkkomodeemilla kytketty tietokone tähän palvelimeen. Jokainen yksittäinen mittaus toistettiin viidesti, että mahdollisesta satunnaisvaihtelusta voisi saada kuvaa. Mittaustuloksista laskettiin yhteenvetona keskiarvot jokaisen mittauksen viidestä suorituskerrasta, ja nämä lukemat kirjattiin taulukkoon 4.1. Tulokset ovat myös erillisinä taulukoissa 4.2, 4.3, 4.4 ja 4.5.

**Taulukko 4.1.** Mittaustulokset eri modeemityyppien yhdistelmien välillä

Yhteysväli	GP → GP	GP → AV	AV → AV	AV → GP
A → B	1.91 Mbps	3.05 Mbps	32.86 Mbps	3.77 Mbps
A → C	1.72 Mbps	3.02 Mbps	19.22 Mbps	3.72 Mbps
A → D	1.97 Mbps	3.02 Mbps	12.98 Mbps	3.69 Mbps
A → E	—	—	12.28 Mbps	2.07 Mbps

Koska erityisen mielenkiintoista oli verrata Green PHY -modeemin toimintaa AV-modeemiin, suoritettiin kaikki mittaukset neljästi. Kahdessa mittauksista lähettävä modeemi oli Devolon ja kahdessa ZyXELin laite, kuten myös vastaanottava modeemi. Kuten laitteiden huippunopeuseroista voisi olettaa, tiedonsiirto kahden HomePlug AV -modeemin välillä oli suurella erolla nopeinta. Huomionarvoista on myös, että Green PHY -modeemien välillä tiedonsiirto toimii selkeästi heikommin kuin AV-modeemilta GP:lle tai GP:ltä AV:lle. Tämä ilmiö on selkeästi havaittavissa kummallakin dLAN-modeemilla, vaikka toiselle niistä oli asennettu Devolon SDK.

**Taulukko 4.2.** Kaikki mittaustulokset GP → GP

Mittaus	1	2	3	4	5
A → B	1.91 Mbps	1.95 Mbps	1.82 Mbps	1.96 Mbps	1.92 Mbps
A → D	1.68 Mbps	1.76 Mbps	1.73 Mbps	1.70 Mbps	1.75 Mbps
A → C	2.04 Mbps	2.00 Mbps	1.92 Mbps	1.86 Mbps	2.03 Mbps
A → E			—		

**Taulukko 4.3.** Kaikki mittaustulokset GP → AV

Mittaus	1	2	3	4	5
A → B	3.05 Mbps	3.06 Mbps	3.04 Mbps	3.03 Mbps	3.07 Mbps
A → C	3.04 Mbps	2.98 Mbps	2.98 Mbps	3.04 Mbps	3.05 Mbps
A → D	3.03 Mbps	3.03 Mbps	2.98 Mbps	3.04 Mbps	3.04 Mbps
A → E			—		

Toinen tärkeä huomio mittaustuloksissa koskee E-pistoketta, joka oli pistorasiaan kytketty jatkojohto. Kuten tuloksista nähdään, A-pistorasiasta siihen saatiin yhteys ainoastaan ZyXELin AV-modeemilla riippumatta siitä, kumpi laite toisessa päässä oli kytkettynä. Tä-

**Taulukko 4.4.** Kaikki mittaustulokset AV → AV

Mittaus	1	2	3	4	5
A → B	31.9 Mbps	33.0 Mbps	32.9 Mbps	33.2 Mbps	33.3 Mbps
A → C	17.5 Mbps	19.4 Mbps	20.3 Mbps	19.8 Mbps	19.1 Mbps
A → D	10.8 Mbps	11.6 Mbps	10.7 Mbps	17.6 Mbps	14.2 Mbps
A → E	12.2 Mbps	13.5 Mbps	10.8 Mbps	11.9 Mbps	13.0 Mbps

**Taulukko 4.5.** Kaikki mittaustulokset AV → GP

Mittaus	1	2	3	4	5
A → B	3.84 Mbps	3.78 Mbps	3.76 Mbps	3.76 Mbps	3.73 Mbps
A → C	3.68 Mbps	3.74 Mbps	3.66 Mbps	3.76 Mbps	3.74 Mbps
A → D	3.68 Mbps	3.72 Mbps	3.69 Mbps	3.71 Mbps	3.66 Mbps
A → E	1.92 Mbps	2.21 Mbps	2.21 Mbps	2.08 Mbps	1.92 Mbps

mä oli yllättävä löydös, sillä aiemmin todetun mukaisesti Green PHY -standardi on AV:stä yksinkertaistettu versio, josta on karsittu pois erityisesti ominaisuuksia, jotka mahdollistavat paljon GP:n maksiminopeutta 10 megabittiä sekunnissa nopeamman tiedonsiirron erityisen hyvissä olosuhteissa. Tähän voi olla monta syytä, esimerkiksi on mahdollista, että ZyXEL käyttää korkeampaa lähetystehoä.

## 5 YHTEENVETO

Vertaamalla HomePlug Green PHY -evaluaatiolaitteistoa kaupalliseen HomePlug AV -laitteistoon voidaan nopeasti todeta, että evaluaatiolaitteistoa ei ole tarkoitettu kuluttajakäyttöön. ZyXELin HPAV-modeemi on vaivaton ottaa käyttöön, ja huoneiston sisäisessä sähköverkossa se kykenee saavuttamaan multimediakäyttöön hyvin riittävän kymmenien megabittien sekuntinopeuden. Devolon GP-evaluaatiomodeemi on tähän verrattuna hidas, ja lisäksi sen maksiminopeus rajoittui mittauksissa selkeästi standardin mahdollistamaa huippunopeutta pienemmäksi.

Erikoinen löydös evaluaatiolaitteistolla oli, että valmistajan tarjoaman `dlan-greenphy-sdk`-ohjelmiston asentaminen laitteelle selvästi rajoitti siirtonopeutta entisestään. Ohjelmiston asentaminen on koekäytössä välttämätöntä, sillä muuten laitteella ei ole esimerkiksi HTTP-käyttöliittymää ollenkaan. Koska ohjelmiston vaihto vaikutti laitteen toimintaan niin merkittävästi, vaikuttaa myös hyvin mahdolliselta, että ohjelmallisesti säätämällä laitteen siirtonopeutta voisi nostaa lähemmäs standardin mukaista huippunopeutta.

Ohjelmiston muokkaaminen olisi mielenkiintoista myös, koska tulosten mukaan GP-modeemilla yhteyden saanti huonolaatuisilla yhteysväleillä on kaupallista AV-modeemia vaikeampaa. Tälle olisi helppo kuvitella syyksi se, että myös lähetysteho on ohjelmallisesti säädettävissä. Standardien keskinäisillä eroilla tätä on vaikea selittää, koska GP-standardia voidaan pitää AV:n karsittuna versiona ilman hyvälaatuisilla yhteysväleillä suuren nopeuden saavuttamiseksi tarvittavia tekniikoita, jolloin suorituskyvyn kuuluisi huonoilla väleillä olla samankaltainen. Evaluaatiolaitteisto onkin nimenomaan tarkoitettu verkotettujen sulautettujen laitteiden kehittämiseen, jolloin modeemin ARM-prosessorin uudelleenohjelmointi jokseenkin vastaa kehitettävän sulautetun järjestelmän ohjelmointia.

SDK-ohjelmiston asentaminen laitteelle selvästi vaikutti sen suorituskykyyn, ja sen takia mittaustuloksiin on syytä suhtautua varauksella. Mittaustuloksiin tämä voi aiheuttaa virheitä myös siksi, että vain toisella GP-modeemilla oli valmistajan SDK asennettuna, joten ne eivät toimineet täysin samalla tavalla keskenään. Tämän tutkielman tärkeimpänä antina voidaankin pitää sen paljastumista, miten paljon tutkittavaa ja kehitettävää evaluaatiomodeemien ohjelmistossa on.

## LÄHDELUETTELO

- [1] J. R. Barry, E. A. Lee ja D. G. Messerschmitt. *Digital Communication*. Springer, 2004.
- [2] devolo. *GitHub: dlan-greenphy-sdk*. Commit: 9965346bcbbe3e3b9d4acea77ac92cfe94fdd3fc. URL: <https://github.com/devolo/dlan-greenphy-sdk> (viitattu 10.04.2019).
- [3] devolo. 2012. URL: [https://www.codico.com/fxdata/codico/prod/media/devolo\\_dlan\\_green\\_phy\\_module\\_data\\_sheet\\_1216.pdf](https://www.codico.com/fxdata/codico/prod/media/devolo_dlan_green_phy_module_data_sheet_1216.pdf) (viitattu 13.04.2019).
- [4] P. Harsia. TN-järjestelmä (2013). URL: <http://tate.blogs.tamk.fi/sahkoinen-talotekniikka/sahkoverkko/tn-jarjestelma/> (viitattu 08.05.2019).
- [5] *HomePlug Green PHY Specification*. 2013. URL: <http://www.homeplug.org/tech-resources/spec-acknowledgement/?spec=gp> (viitattu 12.02.2019).
- [6] J. F. Kurose ja K. W. Ross. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. Pearson, 2009.
- [7] L. Lampe, A. M. Tonello ja T. G. Swart. *Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid*. Wiley, 2016.
- [8] NXP Semiconductors. MCUXpresso Integrated Development Environment (IDE) (). URL: <https://www.nxp.com/support/developer-resources/software-development-tools/mcuxpresso-software-and-tools/mcuxpresso-integrated-development-environment-ide:MCUXpresso-IDE> (viitattu 10.04.2019).
- [9] NXP Semiconductors. *Using an LPC-Link2 as an LPC4370 evaluation board*. URL: <https://community.nxp.com/thread/389142> (viitattu 13.04.2019).
- [10] P. Oikkonen. *GitHub: lan\_dl*. Commit: 05ed0460d889c1d23f22b0a0b983685b309a64f1. URL: [https://github.com/moptim/lan\\_dl](https://github.com/moptim/lan_dl) (viitattu 09.05.2019).
- [11] H. Pursiainen. PLC-tekniikan luotettavuus ja tietoturva. Kandidaatintyö, Tampereen yliopisto. 2019.
- [12] C. E. Shannon. A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal* (1948). URL: <http://math.harvard.edu/~ctm/home/text/others/shannon/entropy/entropy.pdf> (viitattu 11.02.2019).
- [13] M. Valkama ja M. Renfors. *ELT-43007 Digital Communication: Lecture material*. 2019. URL: [http://www.cs.tut.fi/courses/ELT-43007/LectureNotes/ELT43007\\_LectureNotes\\_Spring2019.pdf](http://www.cs.tut.fi/courses/ELT-43007/LectureNotes/ELT43007_LectureNotes_Spring2019.pdf) (viitattu 08.05.2019).
- [14] M. Valkama, J. Talvitie ja M. Renfors. *ELT-41307 Communication Theory: Lecture Material*. 2018. URL: [http://www.cs.tut.fi/kurssit/ELT-41307/Lectures/ELT41307\\_lecture\\_notes\\_Fall\\_2018.pdf](http://www.cs.tut.fi/kurssit/ELT-41307/Lectures/ELT41307_lecture_notes_Fall_2018.pdf) (viitattu 08.05.2019).

## A SDK:N SIIRTÄMINEN LAITTEELLE

Laitteelle on sen valmistajalta saatavilla avointa lähdekoodia oleva ohjelmistokehityspaketti (Software Development Kit, SDK), dlan-greenphy-sdk. Paketin mukana tulevassa lyhyessä ohjeessa neuvotaan asentamaan laitteessa käytetyn suorittimen valmistajan NXP:n MCUXpresso-kehitysympäristö (Integrated Development Environment, IDE). Kehitysympäristö on saatavilla Windowsille ja Linuxille, joskin Linux-puolelta ainoastaan Ubuntu (16.04 tai uudempi) on tuettu. Asennusohjelman ajaminen Debian 9:llä ei onnistunut, sillä asennus riippui paketista, jota Debianin oletuspaketihakemistossa ei ollut tarjolla. Ohjelmaa ei myöskään saatu toimimaan käsin .deb-arkistosta purkamalla: näin asennettu ohjelma kykeni kääntämään SDK:n, mutta käännetyt ohjelmiston laitteelle siirto epäonnistui ilman informatiivista virheilmoitusta. Ubuntu 18.10:llä IDE:n asennus sujui ongelmitta, kuten myös SDK:n kääntäminen ja laitteelle siirtäminen. [2] [8]

SDK:n ajamiseen laitteella debug-tilassa käytettiin LPC-Link2-adapteria, joka tässä toimi USB-väylään kytkettävänä JTAG-debuggerina. Kumpaakaan adapterin jumppereista ei tarvitse sulkea: JP1 sallii itse adapterin ohjelmoinnin, mitä ei kuulu tapahtua adapteria toisen laitteen ohjelmointiin käytettäessä. JP2 taas virroitaa ohjelmoitavan laitteen adapterin kautta, mutta tätä ei tarvitse käyttää, jos dLANilla on jo USB-virransyöttö. Jokaisen ohjelmointikerran jälkeen uudestaan ohjelmointi näyttää vaativan LPC-Link2:n uudelleenkäynnistämisen virtajohdon irrottamalla ja kiinnittämällä. Laitteella on myös UART-liitäntä, jonka oletusnopeus on 115200 baudia, ja johon laitteen ohjelmisto lähettää jonkinlaisia debug-viestejä. [9]

SDK:hon sisältyy yksinkertainen HTTP-käyttöliittymä, joka muistuttaa kotitalouksiin myytävien WLAN-tukiasemien tai reitittimien vastaavia käyttöliittymiä. Oletuksena ohjelmisto pyytää käynnistyessään DHCP:llä IP-osoitteen laitteelta, johon se on Ethernet-kaapelilla liitetty, joten tätä käyttöä varten laite tulee kytkeä reitittimeen tai DHCP-palvelimelliseen tietokoneeseen. Vakio-ohjelmiston käyttöliittymä ei anna tietoa itse Green PHY -modeemin toiminnasta, ainoastaan Ethernet-rajapintaan ja laitteen suorittimella ajettavaan FreeRTOSiin liittyvää tietoa on saatavilla.