



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

KANDIDAATINTYÖ

Lassi Heikkinen
Ilkka Leinonen
Antero Tossavainen

SÄHKÖ- JA TIETOTEKNIIKAN OSASTO
TIETOTEKNIikka
2008



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

KANDIDAATINTYÖ

**Suomenkielisen puhesyntetisaattorin toteuttaminen
difonikonkatenaatiosynteeseillä**

Lassi Heikkinen

Ilkka Leinonen

Antero Tossavainen

Ohjaajat: Juha Röning, Mirko Sallio

SÄHKÖ- JA TIETOTEKNIIKAN OSASTO

TIETOTEKNIikka

2008

Heikkinen L., Leinonen I., Tossavainen A. (2008) Suomenkielisen puhesyntetisaattorin toteuttaminen difonikonkatenaatisynteesillä. Oulun yliopisto, sähkö- ja tietotekniikan osasto. Kandidaatintyö, 65 s.

TIIVISTELMÄ

Puhsynteesin toteuttaminen sulautetuissa järjestelmissä on nykypäivänä tekniikan puolesta edullista ja pienikokoiset laitteistot tarjoavat puhsynteesille monipuoliset käyttömahdollisuudet.

Puhsynteesiä voidaan hyödyntää osana käyttöliittymää helpottamassa ihmisten ja laitteiden välistä vuorovaikutusta. Nykypäivän sovelluksissa puhsynteesiä hyödynnetään esimerkiksi auto- ja matkapuhelinteollisuuksien navigointisovelluksissa, näkörajoitteisten apuvälineissä sekä viihdeteollisuudessa luomaan hahmoille puheääni.

Tässä kandidaatintyössä esitetty, difonikonkatenaatiomenetelmällä tuotettu, suomenkielinen puhsynteesi toimii osana keskustelusovellusta helpottamassa ihmisten välistä kommunikaatiota. Sovellus kykenee kommunikoimaan verkossa samanlaisten sovellusten kanssa IRC-tyylisen viestinnän avulla.

Työssä on ollut erityisenä haasteena rajallinen muisti, jonka johdosta on tehty difonien esiintymistodennäköisyyksiin perustuva kompromissi difonien äänenlaadun ja käytettyjen difonien lukumäärän välillä. Tavoitteena on ollut muodostaa käytettävissä olevilla resursseilla mahdollisimman ymmerrättävä puhsynteesi.

Tavoitteessa on onnistuttu siltä osin, että on saavutettu varsin kattava suomenkielinen puhsynteesi ja suunnitelmien mukainen verkkotoiminnallisuus. Syntetisaattorin tuottaman puheen äänenlaadussa ja ymmärrettävyydessä on kuitenkin pieniä puutteita.

Avainsanat: sulautettu järjestelmä, puhsynteesi, konkatenaatio, difoni

Heikkinen L., Leinonen I., Tossavainen A. (2008) Implementing a Finnish speech synthesizer with diphone concatenative synthesis. The University of Oulu, Department of Electrical and Information engineering. Bachelor's thesis, 65 p.

ABSTRACT

Present-day advanced and affordable technology enables implementing speech synthesis in embedded systems whereas compact devices offer a wide array of use for speech synthesis.

Speech synthesis can be utilized as a part of a user interface to ease human-machine interaction. Speech synthesis is used for instance in navigational applications of car and mobile phone industries, in medical technology for visually impaired and in entertainment industry to produce speech for characters.

This Bachelor's thesis presents a Finnish speech synthesis solution which is produced with diphone concatenation synthesis and operates as a part of a voice chat application to make interpersonal network communication easier. The application is able to communicate via network with similar devices using IRC-style messaging.

The biggest challenge for this synthesizer project has been the finite memory capacity due to which a trade-off between the sound quality and the number of diphones has been made based on the incidence of the diphones. The main goal of this project has been to develop as understandable Finnish speech synthesis as possible with the available resources.

The targets have been met in implementing the network functionality and an extensive Finnish speech synthesis. However the sound quality and understandability of the synthesis still leave a little bit to be desired for.

Keywords: embedded system, speech synthesis, concatenation, diphone

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
ALKULAUSE	6
LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET	7
1. JOHDANTO	8
2. TAUSTA	9
2.1. FONETIIKKA.....	9
2.2. PUHESYNTESI	12
2.3. SULAUTETUN JÄRJESTELMÄN PUHESYNTESI	13
2.4. KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO	14
3. RATKAISUN KUVAUS	16
3.1. JOHDANTO	16
3.2. RAJOITUKSET.....	16
3.3. DIFONIKONKATENAATIOSYNTESI	16
3.3.1. Difonien valinta.....	16
3.3.1.1. Muutoksia aakkostoon.....	17
3.3.1.2. Difonien karsinta	17
3.3.2. Difonien toteutus	18
3.3.2.1. Difonien nauhoitus	18
3.3.2.2. Difonien käsittely	19
3.3.3. Puhesyntesi.....	19
3.4. TIETORAKENTEET	20
3.4.1. Ohjelmiston tiedostotyypit ja kuvaukset	20
3.4.2. Vakiot.....	20
3.4.3. Muuttujat	22
3.4.4. SNMP-viestit.....	22
3.5. ARKKITEHTUURI.....	24
3.5.1. Pääohjain	24
3.5.2. Käyttöliittymän ohjauskirjasto	24
3.5.3. Puheohjain	25
3.5.4. Verkko-ohjain	25
3.5.5. LED-ohjauskirjasto	25
3.5.6. LCD-ohjauskirjasto	25
3.6. RAJAPINNAT	25
3.7. KÄYTTÖLIITTYMÄ	26

3.7.1. Alkuvalikko	26
3.7.2. Keskusteluohjelman komennot	27
4. ELEFANSAATTORI.....	28
5. TESTAUS	29
5.1. Lähdekoodin staattinen analyysi	29
5.2. Yksikkötestaus.....	29
5.3. Integroititestaus	29
5.4. Järjestelmätestaus	30
5.4.1. Käyttöliittymän testaus.....	30
5.4.2. Puheohjaimen testaus	31
5.4.2.1. Lauseen validisuuden tarkistus.....	31
5.4.2.2. Äänitiedostojen toistaminen	32
5.4.3. Verkko-ohjaimen testaus	33
5.4.3.1. Viestien lähettäminen	33
5.4.3.2. Viestien vastaanottaminen	34
5.4.3.3. Verkkoasetusten muuttaminen.....	35
5.4.4. LED-ohjaimen testaus	35
5.4.5. LCD-ohjaimen testaus.....	36
5.4.6. Kokonaisuustestaus	36
5.4.7. Järjestelmätestien yhteenveto	37
6. PROJEKTIN KUVAUS	38
7. TULEVA KEHITYS.....	41
8. YHTEENVETO	42
9. LÄHTEET.....	43
10. LIITTEET.....	44

ALKULAUSE

Tämä kandidaatintyö on tehty Oulun yliopiston Sähkö- ja tietotekniikan osaston Tietotekniikan laboratoriossa osana Sulautettujen ohjelmistojen projekti (521275A) -kurssia.

Esitämme kiitokset työn ohjaajana toimineelle assistentti Mirko Sailiolle, työn valvojana toimineelle professori Juha Röningille, Abstract-kappaleen käännösavusta Sampo Besmondille sekä kasvatustieteiden kandidaatti Mia-Lotta Barnesille, joka ystävällisesti lainasi äänensä puhesyntetisaattorillemme.

Lisäksi haluamme kiittää ystäviämme ja perheitämme saamastamme tuesta ja kannustuksesta opiskeluidemme ja tämän kandidaatintyön teon aikana.

Oulussa 29. toukokuuta 2008

Lassi Heikkinen
Ilkka Leinonen
Antero Tossavainen

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

ASN.1	Abstract Syntax Notation Number One –määrittelykieli
A/D	Analog/Digital, analoginen/digitaalinen
BER	Basic Encoding Rules -säännöstö
CTS	Concept-To-Speech, käsitteestä puheeksi
DC	Direct Current, tasavirta
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory -puolijohdemuisti
FD	Full Duplex, samanaikainen lähettäminen ja vastaanottaminen tiedonsiirrossa
HMM	Hidden Markov Model, Markovin piilomalli
ID	Identification, tunniste
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers -järjestö
IP	Internet Protocol, verkkokerrosprotokolla
IRC	Internet Relay Chat, reaaliaikainen pikaviestintäpalvelu
I/O	Input/Output, siirräntä
JTAG	Joint Test Action Group, integroitujen piirien testausliityntästandardi
LCD	Liquid Crystal Display, nestekidenäyttö
LED	Light-Emitting Diode, valoa säteilevä diodi
Mbps	Megabits per second, megabittiä sekunnissa
OID	Object Identifier, objektin tunniste
PCM	Pulse Code Modulation, pulssikoodimodulaatio
PDU	Packet Data Unit, pakettidatayksikkö
PESQ	Perceptual Evaluation of Speech Quality, äänenlaadun arviointimenetelmä
RISC	Reduced Instruction Set Computer, käskykannaltaan yksinkertainen suoritin
ROM	Read-Only Memory, lukumuisti
SA/SD	Structured Analysis/Structured Design, rakenteinen analyysi ja suunnittelu
SNMP	Simple Network Management Protocol -tietoliikenneprotokolla
SOTA	State Of The Art, tämänhetkistä huipputasoa edustava
SRAM	Static Random Access Memory, staattinen käyttömuisti
SVN	Subversion-versionhallintajärjestelmä
TTS	Text-To-Speech, tekstistä puheeksi
UDP	User Datagram Protocol -internet-protokolla
UI	User Interface, käyttöliittymä
URL	Uniform Resource Locator, web-osoite
WAV	Wafeworm Audio Format -tiedostomuoto

1. JOHDANTO

Tässä sulautettujen ohjelmistojen projektissa on kehitetty difonikonkatenaatiosynteesiin pohjautuva suomenkielinen puhesyntetisaattori (myöhemmin Elefansaattori), joka myös keskustelee vastaavanlaisten järjestelmien kanssa verkon välityksellä UDP- ja SNMP-protokollia hyödyntäen. Projektin laitteistona toimii Egnite Softwaren Ethernet-piirilevy sekä muutamia käyttöliittymää monipuolistavia toimintoja tarjoava lisämoduuli.

Itse puhesynteesi sisältää tekstin esikäsittelyn ja difonien toiston. Difonien valinta sekä difonien nauhoitus ja äänenkäsittely on myös toteutettu projektin aikana. Työssä esitellään kehitetyn ratkaisun lisäksi myös ratkaisun ymmärtämiseen vaadittavat perusteet fonetiikasta, puhesynteesistä, puhesynteesistä sulautetuissa järjestelmissä, yksityiskohtaisempia teknisiä määritelmiä käytetystä laitteistosta, järjestelmän perusteellinen testaus, tulevan kehityksen pohdinta sekä kuvaus projektin suorittamisesta.

2. TAUSTA

2.1. Fonetikka

Fonetikka on puhetta tutkiva tieteenala, joka mahdollistaa ihmisten tuottamien puheäänteiden järjestelmällisen kartoittamisen. Fonetikka pyrkii ihmisen ääntöväylän (eng. vocal tract) tuottamien kaikkien äänteiden kuvaamiseen ja luokitteluun. Voidaksemme ymmärtää puhesynteesiä ja sen eri metodeja tulee meillä olla peruskäsitys fonetiikasta ja puheen muodostamisesta. [1, 2]

Jatkuva puhe on sarja monimutkaisia audiosignaaleja, joiden muodostaminen keinotekoisesti on hyvin haastavaa. Äänen perustaajuus ja formantit taajuudet ovat puhesynteesin keskeisimmät käsitteet [2]. Ihmispuheen taajuusalue asettuu yleensä noin 80 hertsin ja 10 000 hertsin välille [3].

Miesäänen puheen perustaajuus on yleensä noin 100 hertsia, naisilla vastaavasti noin 200 hertsia. Puheen perustaajuudella eli puheen äänenkorkeudella on hyvin paljon puhujasta johtuvia yksilöllisiä eroja. Puheen formantit taajuudet muodostuvat puheelimistön eri osien onkaloiden ja aukkojen akustisten ominaisuuksien aiheuttaessa ääneen resonanssitaajuuksia. [3]

Useimmissa kielissä kirjoitettu teksti ei vastaa sen lausumisasua siinä määrin, että sanojen lausuminen olisi mahdollista määrittää ilman erityistä symbolista esitystä. Jokaisella kielellä on erityiset foneettiset aakkoset. Foneemin (yhden äänteen) lausuminen riippuu kontekstista, puhujan ominaisuuksista ja tunnetilasta. Foneemien variaatioita kutsutaan allofoneiksi. [2, 4]

Äänteet voivat olla joko soinnillisia tai soinnittomia. Soinnillisten äänteiden muodostuessa keuhkoista tuleva ilmavirta saa aikaan äänihuulten värähtelyä (avautumista ja sulkeutumista) tietyllä taajuudella. Soinnittomissa äänteissä tätä äänihuulten avautumista ja sulkeutumista ei tapahdu, vaan äänihuulet ovat koko ajan joko auki tai kiinni. Äänteen soinnillisuuden ehto on, että ilmaa virtaa keuhkoista äänihuulten välistä. [5]

Foneettinen aakkosto jaetaan yleensä kahteen osaan: vokaaleihin ja konsonantteihin. Vokaalit ovat aina soinnillisia äänteitä, jotka muodostuvat äänijänteissä (lat. chorda vocalis), kun taas konsonantit voivat olla joko soinnillisia tai soinnittomia. Vokaaleilla on yleensä konsonantteja korkeampi amplitudi ja ne ovat usein myös konsonantteja vakaampia, helpompia analysoida ja kuvailla akustisesti. Konsonantit aiheuttavat hyvin nopeita muutoksia ja niiden synteettinen muodostaminen on usein vaikeaa [2].

Suomen kielen kahdeksan vokaalia voidaan jakaa eri kategorioihin niiden muodostamistavan perusteella, kuten kielen sijainti suun etu- tai takaosassa (taulukossa 1 edessä tai takana), ylhäällä, keskellä tai alhaalla, suun aukeamisen aste (taulukossa 1 suljettu tai avoin) ja äänenmuodostumisalueen leveys ja pyöreys. [2] Vokaalien muodostuminen on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Suomen kielen vokaalien luokittelu

Vokaalit		edessä		takana	
		leveä	pyöreä	leveä	pyöreä
suljettu	ylhäällä	i	y		u
		e	ö		o
avoin	alhaalla	ä		a	

Suomen kielessä vokaalien kirjoitusasusta on usein pääteltävissä vokaalien ääntämys. Lyhyet vokaalit kirjoitetaan /i, e, ä, y, ö, a, o, u/ kun taas pitkien kirjoitusasu on /ii, ee, ää, yy, öö, aa, oo, uu/ [6]. Vokaalin pituuden havaitseminen on kuulon perusteella mahdollista [6]. Joskus tavun keskuksen, ytimen, muodostaa kaksi peräkkäistä ja laadultaan erilaista vokaalia, jolloin kyseessä on diftongi, esimerkiksi *sait*, *suot* tai *sauna* [5].

Suomen kielen konsonanttien ääntämisen kannalta erityisen tärkeitä seikkoja ovat sointi, ääntymistapa ja -paikka. Konsonanttien ryhmittelyn kannalta keskeistä on miten vapaasti ilmavirta ja ääni pääsevät virtaamaan ulkoilmaan konsonanttia äännettäessä. [5]

Suomen kielen konsonantit voidaan luokitella seuraavasti:

1. Umpiäänteet (klusiilit): /k, p, t, g, b, d/. Ääntöväylä suljetaan, mikä aiheuttaa äänen pysähtymisen tai vaimenemisen.
2. Hankausäänteet (fricatiivit): /f, h, s/. Ääntöväylän supistaminen joltain alueelta aiheuttaa ilmavirrassa turbulenssia, mikä saa aikaan äänessä säröytymistä (eng. noise). Suomen kielen hankausäänteet ovat soinnittomia.
3. Nasaalit: /n, m, ~/. Ääntöväylä on suljettu, mutta velumi (kapea kohta ääniväylällä suun takaosassa) avaa reitin nasaaliin onteloon.
4. Täryäänteet (tremulantit): /r/. Kielen yläosa värähtelee nopeasti (20 – 25 Hz) hammasvallia vasten aiheuttaen voimakkaasti amplitudimoduloituneen äänen.
5. Laideäänteet (lateraalit): /l/. Kielen kärki sulkee ääntöväylän jättäen ilmavirralla sivureitin.
6. Puolivokaalit: /j, v/. Puolivokaalit ovat lähes vokaalien kaltaisia, mutta epävakaampia, eivätkä niin kontekstivapaita kuin tavalliset vokaalit.

Taulukossa 2 on eritelty Suomen kielen konsonantit (nasaalit, puolivokaalit, umpi-, hankaus-, täry- ja laideäänteet) ja niiden muodostumispaikat (huulet, hampaat, kurkunpää, kitalaki ja -purje).

Taulukko 2. Suomen kielen konsonanttien luokittelu artikulaatiopaikoittain

Konsonantit		huulet	huulet ja yläham-paat	hammasvalli			kita-laki	kita-purje	kurkun-pää
				etu	keski	taka			
umpiäänteet	tenuis media	p b		t	d			k g	
hankausään-teet	koruäänteet rakoäänne		f		s				h
nasaalit		m			n			~	
täryäänteet					r				
laideäänteet					l				
puolivokaalit			v				j		

Konsonanttien synteessissä saavutetaan usein parhaita tuloksia silloin kun nämä edellä mainitut kuusi akustisilta ominaisuuksiltaan erilaista konsonanttiryhmää käsitellään erikseen. Varsinkin tremulantti /r/ vaatii erityistä huomiota. [2]

Puhe ei koostu pelkästään jonosta peräkkäisiä äänteitä, vokaaleja ja konsonantteja, vaan se sisältää paljon muutakin informaatiota, jopa sellaista, joka on puheen merkityksen välittymisen kannalta keskeistä. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi puheen kvantiteetti, paino, intonaatio ja rajailmiöt. [5]

Kvantiteetti tarkoittaa puheessa käytetyn yksittäisen äänteen pituutta. Paino tarkoittaa, että jokin puheessa käytetty sana tai tavu äännetään ympäristöstä voimakkaampana erottuvana. Intonaatio tarkoittaa puheessa esiintyvää sävelkulkua. Kaikki puheen soinnilliset äänteet sisältävät sävelkorkeuden. Yhtäjaksoiselle puheelle on tyypillistä sanojen, tavujen, fraasien ja lauseiden rajoilla esiintyvät erityiset foneettiset ilmiöt eli rajailmiöt, kuten esimerkiksi tauot ja tempon vaihtelut. [5]

Ihmisen puhekommunikaation vaiheet eriteltynä alkaen hetkestä, jolloin puhuja päättää sanoa jotain ja päättyen hetkeen, jolloin kuulija vastaanottaa viestin [1]:

1. Neurolinguistinen ohjelmointi: valinta, järjestely ja ajoitus
2. Neuromuskulaarinen vaihe: neuroimpulssien motorinen välitys ja yksittäisten lihasten supistuminen
3. Orgaaninen vaihe: kokonaisten elinten liikehdintä

4. Aerodynaaminen vaihe: laajentuminen, supistuminen ja ilman sisään- ja ulosvirtaus ääniväylällä
5. Akustinen vaihe: ääniaaltojen eteneminen puhujan ääniväylältä
6. Neuroreseptiivinen vaihe: ääreellinen auditiivinen stimulaatio ja saapuvan neuroimpulssin välitys
7. Neuroligüistinen tunnistus: sisään tulevien signaalien tunnistaminen puheääniteiksi

2.2. Puhesynteesi

Puhesynteesiä toteuttavaa sovellusta kutsutaan puhesyntetisaattoriksi. Puhesyntetisaattorin voidaan ajatella tuottavan keinotekoisesti kappaleessa 2.1. *Fonetikka* esitetyn ihmispuheen mallin vaiheet 2 – 4. Varsinkin näkö- ja puherajotteisille sekä lukihäiriöisille syntetisaattorit ovat tärkeä apuväline. Niitä voidaan käyttää myös esimerkiksi viihdeteollisuudessa tuottamaan hahmoille ääni, autojen reittiopasjärjestelmissä opastamaan kuljettajaa, joka ei pysty lukemaan tekstiä ajaessaan sekä erilaisissa aikataulu- ja numeropalveluissa, jolloin ihmiset vapautuvat mielekkäämpiin töihin, kun yksinkertaiset puhetehtävät korvataan syntetisaattorilla. [2, 7, 8]

1700-luvun lopulla alan pioneerit Wolfgang von Kempelen ja Christian Kratzenstein onnistuivat tuottamaan muutamia ääniteitä mekaanisella synteesillä. 1900-luvulla elektromekaaninen ja elektroninen sekä varsinkin 2000-luvulla digitaalinen synteesi on vaikuttanut merkittävästi alan kehitykseen. [7]

Puhesynteesimenetelmiä on karkeasti eroteltuna kolmenlaisia: yhdistellään valmiiksi nauhoitettuja ääninäytteitä (konkatenaatio), yhdistetään eri aaltomuotoja (formantti) tai pyritään mallintamaan matemaattisesti ihmisen koko äänentuottamismekanismeja (artikulatorinen). Kaikissa kolmessa menetelmässä on hyvät ja huonot puolensa. Tällä hetkellä laadukkain ääni tuotetaan pääsääntöisesti konkatenaatiosynteesillä. [2]

Konkatenaatiosynteesin ongelma on kielen monimutkaisuuden takia tarvittavat suuret tietokannat. Ei ole realistista tallentaa kaikkia maailman ääniteitä eri tunnetiloilla, vivahteilla ja painotuksilla. [2]

Formanttisynteesillä on teoriassa mahdollista tuottaa luonnollista ihmisääntä erilaisilla painotuksilla ja vivahtella hyvin pienillä resursseilla ja tästä syystä tällä hetkellä sen käyttökohteet ovat sulautetuissa järjestelmissä, koska menetelmällä päästään käytännössäkin täysin ymmärrettävään puheeseen. [2]

Artikulatorisen synteesin arvellaan ratkaisevan puhesynteesin ongelmat tulevaisuudessa, kun ihmisten äänentuottoelimistön pinta-alat, heijastusominaisuudet ja ilman virtaus opitaan mallintamaan riittävän tarkasti. [2]

Vähemmän merkittävistä teknologioista ovat HMM-pohjainen (Hidden Markov Model) synteesi ja siniaaltosynteesi. HMM hyödyntää puheentunnistusta varten kehitettyjä menetelmiä, mutta ongelmana on vokooderin aiheuttama pieni "pöörinä". Paljon laskentatehoa vaativa siniaaltosynteesi simuloi puhetta siniaalloilla. [9, 10]

Puhesynteesimenetelmät voidaan luokitella myös niiden saaman syötteen perusteella. Matkapuhelimista tutussa analyysi-resynteesissä saadaan syötteenä puhetta, joka analysoidaan ja lähetetään siirtokanavaa pitkin toiseen päähän, missä suoritetaan resynteesi. Konseptista puheeksi -synteesissä (CTS, eng. Concept-To-Speech) luetaan dataa tietokannoista, jonka tietokone on mahdollisesti itse luonut (esimerkiksi juna-aikataulukuluutukset). Kolmas tapa on tekstistä puheeksi -menetelmä (TTS, eng. Text-To-Speech), jossa syntetisaattori saa syötteenä normaalia tekstiä, jonka se tulkitsee puheeksi. [11]

Tekstistä puheeksi -synteesi on menetelmistä haastavin, koska siinä järjestelmä ei itse kuule, miltä puheen pitäisi kuulostaa, kuten analyysi-resynteesissä ja toisaalta syöte voi olla mitä tahansa, kun CTS-menetelmässä mahdollinen syöte on yleensä hyvin rajallinen. TTS:n haasteet liittyvät painotuksiin, äänensävyihin ja muuhun informaatioon tekstissä. [2, 12]

Suuri osa puhesynteesitoteutuksista ei ota kantaa semanttisuuteen, eli ei siis tutki asiayhteyttä, koska se on vaikeaa tehdä luotettavasti käyttämättä paljon resursseja. Yleensä korkeintaan päädytään tekemään tulkinta tilastollisuuden tai viereisten sanojen perusteella. Varsinkin numerot ja lyhenteet ovat TTS-tekniikkaan perustuvalla syntetisaattorille vaikeita; esimerkiksi *1997* luetaan erilailla riippuen siitä, onko se vaikka sosiaaliturvatunnuksen loppuosa tai rahamäärä. Toisaalta lyhenne *mm.* voi olla kontekstista riippuen joko millimetri, muunmuassa tai maailmanmestaruus. Lisäksi puheen oikea tauotus eroaa tekstissä, missä tauot ovat yleensä sanojen välissä, kun puheessa ne ovat usein myös sanojen keskellä. [2, 12]

Puhesynteesin laadun arviointikriteerejä ovat luonnollisuus ja ymmärrettävyys. Useimmissa ratkaisuihin pyritään maksimoimaan molemmat. Lopputulosta on kuitenkin vaikea arvioida objektiivisesti täsmällisesti, koska jokainen ihminen kuulee ja ymmärtää puhetta eri tavalla. Puhesynteesitutkimus on samaan aikaan hyvin kansainvälistä niin kuin suurin osa nykypäivän tutkimuksesta on, mutta myös kansallista, koska monet kielet ovat hyvin erilaisia. [7, 8]

2.3. Sulautetun järjestelmän puhesynteesi

Sulautetuissa järjestelmissä joudutaan tekemään kompromisseja rajallisten tallennus- ja laskentatehokapasiteettien vuoksi. Formanttisynteesi voidaan toteuttaa elektromekaanisilla komponenteilla, jolloin ei tarvita prosessointia. Lisäksi formanttisynteesi ei tarvitse suurta tietokantaa esitallennetuille näytteille. Näistä syistä formanttisynteesi on varsin hyvä ratkaisu sulautetuissa järjestelmissä, mutta sen huono puoli on äänenlaadun luonnottomuus ja robottimaisuus. Formanttien avulla voidaan kuitenkin, ainakin teoriassa, päästä luonnolliseen lopputulokseen, mutta se vaatii paljon osaamista äänilähteen antaman signaalin suodattamisessa. Tällöin voitaisiin myös helposti tuottaa puhetta eri painotuksilla ja tunnetiloilla ilman merkittävää resurssien lisäämistä. Tästä syystä formanttisynteesi on artikulatorisen synteesin kanssa tutkimuksen kannalta hyvin mielenkiintoinen menetelmä - niissä on potentiaalia ratkaista puhesynteesin ongelmat eli tuottaa luonnollista puhetta vähillä resurssivaatimuksilla. [2]

Jos resurssit eivät ole rajoitteena, niin formanttisynteesiä parempaan äänenlaatuun päästään konkatenaatiosynteesillä. Tämä tekniikka on myös yksinkertainen toteuttaa, sillä siinä ei tarvita formanttisynteesin vaatimien suodattimien rakentamista. Konkatenaatiosynteesillä on järkevää tuottaa vain yhdenlaista puhetta, koska erikuuloisille puheäänille, tunnetiloille ja muille vivahteille pitäisi tallentaa omat ääninäytteet. [2]

Yksinkertaisimmillaan konkatenaatiosynteesissä on siis kyse ääninäytteiden yhteenliittämisestä. Sitä voidaan tehdä difoni-, tavu-, sana- tai jopa lausetasolla ja näiden perusteella myös erilaiset konkatenaatiosynteesit jaotellaan [2]. Yhdistämällä eri kirjaimia vastaavia ääniteitä ei saada ymmärrettävää puhetta vaan synteesi perustuu difoneihin, jotka ovat yhden äänteen loppupuoliskon ja seuraavan äänteen alkupuoliskon yhdistelmä eli siirtymä [8]. Tällöin tarvitaan tietokanta kaikista eri äänneyhdistelmistä [2]. Tarvittavien difonien määrä vaihtelee kielestä riippuen muutasta sadasta muutamaan tuhanteen, ja tästä syystä difonipohjainen konkatenaatiosynteesi sopii varsin hyvin sulautettuihin järjestelmiin [2]. Difonipohjainen toteutus on helpoimmasta päästä eri synteesimenetelmistä, joten sille on runsaasti lähdemateriaalia ja sitä käyttäviä ilmaisohjelmistoja. Tästä syystä se on suosittu menetelmä tutkimuksessa [2].

Difonisynteesiä parempi puheäänienlaatu saavutetaan niin kutsutulla unit selection -menetelmällä, missä yhdistellään difonien lisäksi tavuja, sanoja ja yleisimpiä lauseita [13]. Kun tietokanta sisältää runsaasti ääninäytteitä (gigatavuja), niin saavutetaan nyky menetelmistä paras lopputulos, mutta tällöin sen käyttö sulautetuissa järjestelmissä on vaikeaa suuren tallennuskapasiteettitarpeen vuoksi [8]. Eräs konkatenaatiosynteesin erikoistapaus on menetelmä, jossa tallennetaan täsmälleen kyseessä olevalle tarpeelle tarvittavat lauseet ja sanat (eng. domain specific method). Esimerkki tällaisesta on juna-aikataulukuuulutukset rautatieasemalla. [8]

2.4. Käytettävä laitteisto

Tämän sulautettujen ohjelmistojen projektin laitteisto on egnite Softwaren suunnittelema ja valmistama Ethernet 2.1 Board -alusta. Fyysisiltä mitoiltaan 80 * 100 mm kokoinen Ethernet 2.1 -piirilevy sisältää seuraavat tekniset ominaisuudet:

- Atmega 128 RISC -mikrokontrolleri
- FD IEEE 802.3 10/100 Mbps -verkkosovitin
- RS-232 ja RS-485 -sarjaportit
- 128 kilotavun Flash ROM
- 4 kilotavun EEPROM
- 32 kilotavun SRAM
- 22 ohjelmoitavaa digitaalista I/O-väylää
- 8-kanavainen 10-bittinen A/D-muunnin
- 2 kpl 8- ja 16-bittisiä laskureita/kelloja
- LED-valoa virransyötölle ja verkkoliikenteen aktiivisuudelle
- 8 – 12 V DC-virtalähde.

Ethernut-alustan keskeisin osa on Atmega 128 -mikrokontrolleri. Ohjelmistokoodi tallennetaan Ethernutiin JTAG-liitäntän kautta. [14]

Ethernut-alustalle on kehitetty Oulun yliopiston Teknillisessä tiedekunnassa vuonna 2005 erillinen liitännäinen lisämoduuli, joka sisältää seuraavat, myös Elefansaattori-projektissa käytetyt, ohjelmallisesti ohjattavissa olevat rakenteet:

- 96 * 28 pikselin LCD-pistematriisinäyttö, jolla voidaan näyttää 16 * 4 merkkiä
- 4 erillistä punaista LED-valoa
- 3.5 mm stereojakki äänen ulostuloa varten.

3. RATKAISUN KUVAUS

3.1. Johdanto

Elefansaattori-projektin ohjelmisto on osa sulautettua järjestelmää, joka pystyy tuottamaan ymmärrettävää suomenkielistä puhetta sekä kommunikoiimaan muiden samanlaisten järjestelmien kanssa verkossa. Ohjelmiston suunnittelussa on käytetty SA/SD-kieltä ja implementointi on toteutettu C-kielellä. Kommunikointiin verkossa käytetään UDP- ja SNMP-protokollia. Varsinainen puhesynteesi on toteutettu difonikonkatenaatiosynteesillä.

3.2. Rajoitukset

Projektin yksinkertaistamiseksi on päätetty, että ohjelmisto vastaanottaa ja lähettää viestejä, joiden pituudet saavat olla enintään 64 merkkiä. Käyttäjä- ja kanavanimet ovat rajoitetut viidentoista merkin pituuteen. Puhesyntetisaattori ei syntetisoi viestejä, joissa on erikoismerkkejä tai numeroita. Syntetisoitavat viestit saavat sisältää ainoastaan suomen kielen aakkosia: /a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r, s, t, u, v, w, x, y, z, å, ä, ö/. Puhesyntetisaattorin toteutuksessa ei ole otettu huomioon kaikkia puhutun suomen kielen ominaisuuksia, kuten kvantitatiivinen vaihtelu, puheen paino, intonaatio, tempon vaihtelu tai puheen tauot.

Käytössä olevan laitteiston pienen muistikapasiteetin (128 kilotavua) vuoksi ei ole mahdollista hyödyntää kaikkia suomen kielen difoneja, vaan muistiin mahtuu vain noin sata difonia. Pienen muistin vuoksi myös äänitiedostojen WAV-formaatiksi on valittu 8-bittinen 8 kHz PCM.

3.3. Difonikonkatenaatiosynteesi

3.3.1. Difonien valinta

Difonivalinnassa on hyödynnetty kahdeksan tuhannen sanan testiaineistoa, joka sisältää pääministeri Matti Vanhasen puheen¹, Johanneksen Evankeliumin luvut 1-4² sekä tieteellisen artikkelin kasveista³. Teksteistä on poistettu lyhenteet ja latinankieliset termit.

Suomen kielen 29 aakkosta tuottavat yhteensä 899 (29 * 31) erilaista kirjainten välistä siirtymää eli difonia. Sanojen alut ja loput on huomioitu difonien kokonaismäärää kasvattavina erikoistapauksina, joissa sanan ensimmäiseen kirjaimen siirrytään ”tyhjältä” ja sanan viimeisestä kirjaimesta siirrytään ”tyhjään”. Difonien yhteydessä tätä tyhjää kirjainta on myöhemmin kuvattu merkillä ”_”.

Difonien karsinta on suoritettu kahdessa vaiheessa.

¹ Pääministeri Matti Vanhasen puhe Elinkeinoelämän keskusliiton 100-vuotisjuhlassa 2008

² Raamattu. Vuonna 1992 käyttöön otettu suomennos.

³ Wikipedia tietosanakirja – Kasvi (luettu 3.3.2008). URL: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Kasvi>

3.3.1.1. Muutoksia aakkostoon

Ensimmäisessä, ylemmän tason karsintavaiheessa on tehty muutoksia puhesynteesissä huomioituihin aakkosiin. Poistetut kirjaimet on valittu niiden pienen esiintymistodennäköisyyden ja helpon korvattavuuden perusteella. On pyritty valitsemaan uusi kirjain, joka kuulostaa mahdollisimman paljon alkuperäiseltä kirjaimelta mahdollisimman laajassa kontekstissa. Nämä aakkoston muutokset on päivitetty vastaavasti myös käytettyyn testiaineistoon. Taulukossa 3 on esitelty nämä muutokset.

Taulukko 3. Puhesynteesissä korvattavat kirjaimet

Kirjain	Suhteellinen osuus testiaineistossa (%)	Korvaava kirjain tai kirjainyhdistelmä
b	0.079	p
c	0.004	s
d	0.557	t
f	0.052	v
g	0.075	k
q	0.002	k
w	0	v
x	0.002	ks
z	0.002	ks
å	0	o
ä	4.767	a
ö	0.575	o

Muutoksien avulla aakkosten määrää on pienennetty 29 kirjaimesta 17 kirjaimen. Tämä kirjainten vähentäminen pienentää merkittävästi mahdollisten difonien määrää, sillä 19 erilaista kirjainta tuottaa 899 difonin sijaan vain 399 difonia ($19 * 21$).

3.3.1.2. Difonien karsinta

Difonien karsinnassa ei ole huomioitu eri difonien sointiin tai ääntämykseen perustuvia tärkeyseroja, vaan difonien valinta on tehty ainoastaan difonien esiintymistiheyden perusteella.

Kullekin difonille on laskettu esiintymistiheys testiaineistossa, minkä perusteella arvioidaan difonin esiintymistodennäköisyyttä puhesynteesin syötteenä olevassa mielivaltaisessa tekstissä. Esiintymistodennäköisyyden perusteella on tehty valintoja yleisimpien difonien mahdollistamiseksi laitteiston rajalliseen muistiin.

Useissa yhteyksissä on noussut esille mahdollisuus hyödyntää difonien toistamista takaperin suomen kielen puhesynteesissä. Tätä ilmiötä tutkittiin Elefansaattori-projektissa nauhoittamalla sana *saippuakauppias*, toistamalla se takaperin ja arvioimalla puheen selkeyttä. Sana kuulostaa takaperin toistettuna ymmärrettävyydeltään varsin käyttökelpoiselta ja tämän perusteella on päätetty hyödyntää difonien toistamista takaperin myös Elefansaattori-projektin puhesynteesissä. Näin saadaan lähes kaksinkertaistettua syntetisoitujen difonien määrä.

Difonin toistaminen takaperin ei vastaa ymmärrettävyydeltään eikä autenttisuudeltaan tavanomaisesti muodostettua difonia, vaan on näiltä osin laadultaan heikompi. Hyödyntämällä difonien toistamista takaperin saavutetaan kuitenkin merkittävää etua puhesynteesissä, sillä käytettävissä olevan muistin puitteissa voidaan tuottaa lähes kaksinkertainen määrä difoneja.

Liitteessä 1 on eritelty kaikki testiaineistossa esiintyvät käänteiset difoniparit, esimerkiksi *au* ja *ua*. Koska oikeinpäin toistetun difonin ymmärrettävyys on takaperin toistettua difonia parempi, äänitettäväksi difoniksi on pareista valittu esiintymistodennäköisyydeltään suurempi difoni. Tämä on myös korostettu harmaalla taustalla liitteessä 1. Difoniparin harvinaisempi difoni tuotetaan toistamalla todennäköisempi difoni takaperin.

Testiaineistossa esiintyi 273 erilaista difonia, joista saadaan 190 käyttöön hyödyntämällä käännettyjä difoneja, kun rajoitetaan tallennettavien difonien määrä sataan. Kahdesta samasta kirjaimesta koostuvia difoneja ei käännetä. Nämä sata yleisintä difoniparia kattavat 96.18 % testiaineiston difoneista. Ulkopuolelle jäävien 88 difonin osuus testiaineistosta on ainoastaan 3.82 %. Näitä 88 difonia sekä 126 difonia, joita ei esiintynyt testiaineistossa ollenkaan, ei toisteta Elefansaattorin puhesynteesissä. Nämä difonit olisi mahdollista korvata joillakin muilla äänillä, mutta ymmärrettävyyden vuoksi on päädytty toistamaan mielummin ”tyhjää” kuin väärää difonia. Puhesynteesissä käytetyt ja ulkopuolelle jätetyt difonit on erotettu toisistaan liitteessä 1.

3.3.2. Difonien toteutus

3.3.2.1. Difonien nauhoitus

Difonikonkatenaatiosynteesin äänenlaadun kannalta on merkittävää, että difonit tulevat tallennetuiksi riittävällä äänenlaadulla ja selkeästi lausuttuina. Difonien laadun voidaan ajatella määrittävän puhesynteesin laadulle ylärajan, joten on tärkeää minimoida difonimateriaalista kaikki häiriötekijät.

Elefansaattorin difonit on nauhoitettu akustoidussa huoneessa pyrkien minimoimaan taustamelun vaikutus difonimateriaaliin. Kohina ja särö on minimoitu käyttämällä nauhoituksessa laadukasta mikrofonietaustetta ja laajakalvoista kondensaattorimikrofonia. Difonien raakamateriaali on tallennettu PCM WAV-formaattiin 44.1 kHz näytteenottotaajuudella ja 16 bitin bittisyvytydellä.

Nauhoitustilanteen puheen luonnollisuus on pyritty säilyttämään nauhoittamalla difonit pääasiassa tavallisten suomenkielisten sanojen sisällä. Sanoja on lausuttu useita peräkkäin yhden nauhoituskerran aikana, jotta sanojen lausuminen tuntuisi

mahdollisimman luonnolliselta.

Liitteessä 2 on esitetty sanalista, jonka mukaisesti puhesynteesissä hyödynnettävät sata difonia on nauhoitettu. Huomattavaa on, että *y-* ja *o-*kirjainten välistä siirtymää tallennettaessa on käytetty *yö-*sanaa, vaikka aiemmin *ö-*kirjain on korvattu aakkostoon *o-*kirjaimella. Syy *yo-*siirtymän korvaamiseen *yö-*siirtymällä on, että suomen kielessä *y-*kirjaimen jälkeen ei esiinny koskaan *o-*kirjainta. Muissa tapauksissa *o-*kirjainta käytetään *ö-*kirjaimen sijaan.

3.3.2.2. *Difonien käsittely*

Difonien nauhoituksen jälkeen difonit on käsiteltävä puhesynteesissä hyödynnettävään muotoon. Elefansaattori-projektissa difonit on leikattu raakamateriaalista yhden difonin (esimerkiksi *au*) mittaisiksi WAV-tiedostoiksi, jotka on tallennettu kyseisen difonin nimellä (esimerkiksi *au.wav*).

Difonien leikkaaminen sopivan pituisiksi äänitiedostoiksi on puhesynteesin laadun eli puheen ymmärrettävyyden kannalta difonien nauhoituksen jälkeen merkittävin yksittäinen vaihe. Jos difonit on leikattu liian pitkiksi tai lyhyiksi ei tuotettu synteettinen puhe kuulosta ymmärrettävältä. On hankala määrittää yleispätevää sääntöä difonin pituudelle, vaan difonien leikkaus on tehtävä yksityiskohtaisesti ja laatu arvioitava kuuntelemalla.

Difonien leikkaamisen lisäksi keskeisiä difonien äänenkäsittelyn vaiheita ovat äänen voimistaminen ja tiedoston koon minimoiminen.

Difonimateriaalissa ei varsinaisesti ole redundanssia, mutta käytettävissä olevan rajallisen muistin vuoksi Elefansaattorin difonit on tallennettu 8 kHz 8 bitin PCM WAV-formaattiin. Elefansaattorin difoneja ei ole jälkikäsittelyssä kompressoitu, vaan luonnollista ”ilmakompressiota” on hyödynnetty jo nauhoitusvaiheessa. Difonien lausujan ja mikrofoniin väliin on jätetty noin 20 cm ilmaa, jonka havaittiin tuottavan luonnollista kompressiota ääneen.

Jälkikäsittelyssä puhesynteesin äänenvoimakkuutta on pyritty kasvattamaan voimistamalla äänitiedostoja äänieditorilla. Äänitiedostoja on voimistettu säröytymistä välttämällä korkeintaan 10 desibeliä. Jokainen difoni on kuitenkin vahvistettu yksilöllisesti ja jos 10 dB vahvistus on osoittautunut liian voimakkaaksi, on säröytymisen minimoimiseksi vahvistus tuolloin jätetty pienemmäksi. Tästä johtuen äänitiedostojen keskinäiset voimakkuussuhteet eivät siis lopputuloksessa vastaa aivan täysin alkuperäistä tilannetta, mutta puhesynteesin äänenvoimakkuutta on saatu toimenpiteellä kasvatettua merkittävästi.

3.3.3. *Puhsynteesi*

Difonikonkatenaatiosynteesissä keinotekoinen puhe tuotetaan toistamalla etukäteen nauhoitettuja äänitiedostoja syötteenä saatavan tekstin mukaisesti. Esimerkiksi sana *mikko* tuotetaan Elefansaattori-projektin synteesissä toistamalla seuraavat difonit peräkkäin: *_m, mi, ik, kk, ko, o_*. Edellä mainitussa esimerkissä difoni *o_* tuotetaan

toistamalla difoni *_o* takaperin. Eli sana *mikko* tuotetaan seuraavasti: *_m, mi, ik, kk, ko, käänteinen _o*.

3.4. Tietorakenteet

Tässä kappaleessa kuvataan ohjelmistossa käytetyt tietorakenteet, kuten tiedostotyypit, muuttujastrukturit, vakiot ja verkkoviestit.

3.4.1. Ohjelmiston tiedostotyypit ja kuvaukset

Ohjelmisto on toteutettu C-kielellä ja lähdekoodi on tallennettu *.c* ja *.h* -tiedostotyyppihin. Taulukossa 4 on lista ja kuvaukset ohjelmiston lähdekoodin tiedostoista.

Taulukko 4. Ohjelmakoodin sisältävät tiedostot

Tiedosto	Kuvaus
main.c	Pääohjaimen lähdekoodi
ui.c	Käyttöliittymän toiminnallisuus
ui.h	Käyttöliittymän funktioprototyypit
network.c	Verkko-ohjaimen toiminnallisuus
network.h	Verkko-ohjaimen vakiot, tietorakenteet ja funktioprototyypit
puhe.c	Puheohjaimen toiminnallisuus
puhe.h	Puheohjaimen funktioprototyypit
lcd.c	LCD-ohjaimen toiminnallisuus
lcd.h	LCD-ohjaimen funktioprototyypit
hd44780.c	LCD-näytön kontrollifunktiot
hd44780.h	LCD-näytön ohjelmistovakiot ja funktioprototyypit
led.c	LED-ohjaimen toiminnallisuus
led.h	LED-ohjaimen funktioprototyypit
urom.c	WAV-äänitiedostot

3.4.2. Vakiot

Taulukossa 5 on lista ohjelmistossa käytetyistä vakioista. Vakioita käytetään selventämään muuttujille asetettujen numeroarvojen merkitystä.

Taulukko 5. Vakiot

Vakio	Arvo	Kuvaus ja käyttötarkoitus
OFF	0x00	Debug-viestit ja puhesynteesi
ON	0x01	Debug-viestit ja puhesynteesi
PORT	161	Lähetys- ja vastaanottoportti
MYMAC	00 06 152 32 00 00	Oletus-MAC
MYIP	10.10.21.1	Oletus-IP
MYMASK	255.255.255.0	Oletus-MASK
GET_REQUEST	0xA0	SNMP-tietotyyppi
GET_RESPONSE	0xA2	SNMP-tietotyyppi
SET_REQUEST	0xA3	SNMP-tietotyyppi
TRAP	0xA4	SNMP-tietotyyppi
SEND_MESSAGE	0x01	SNMP-viestitoiminto
REQUEST_NAME	0x02	SNMP-viestitoiminto
CHANNEL_QUERY	0x03	SNMP-viestitoiminto
LEAVE_CHANNEL	0x04	SNMP-viestitoiminto
SIZE_SNMP_MESSAGE_HEADER	7	SNMP-viestin headerin vakiokoko
SIZE_SNMP_MESSAGE_BODY	26	SNMP-viestin rungon vakiokoko

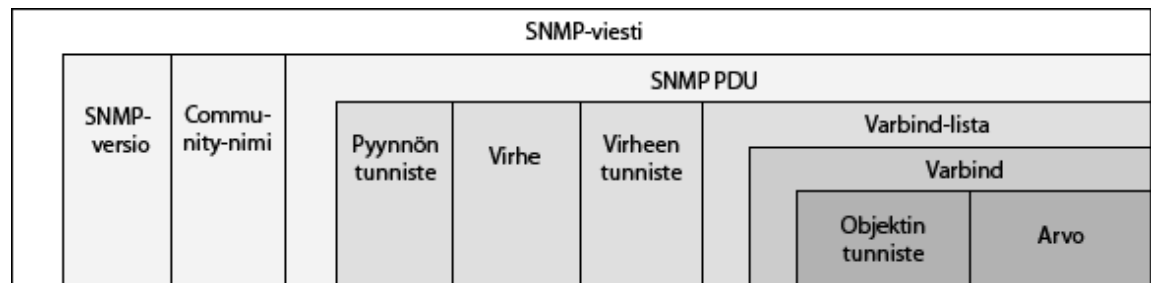
3.4.3. Muuttujat

Taulukko 6. Tärkeimmät muuttujat ohjelmistokoodissa

Nimi	Tyyppi	Kuvaus
debug	int	Debug-viestit (päällä tai pois päältä)
mute	int	Puhesynteesi (päällä tai pois päältä)
verkkoyhteys	int	Verkkoyhteys (päällä tai pois päältä)
inbuf[128]	char	Tallentaa käyttäjän näppäimistöltä antamat komennot
ip[16]	char	Käyttäjän antama IP-osoite
mask[16]	char	Käyttäjän antama MASK
channel[16]	char	Kanava, jolla käyttäjä on
nick[16]	char	Käyttäjänimike
*uart	FILE	Osoite UART-rajapinnan puskuriin
*sock	UDPSOCKET	Osoite verkkoyhteyden sokkettiin

3.4.4. SNMP-viestit

Ohjelmisto käyttää SNMP-protokollaa viestinvälitykseen verkossa. Kuvassa 3 [15] on esitelty tyypillisen SNMP-viestin rakenne ja taulukossa 7 [15] on kuvaukset SNMP-viestin kenttien sisällöstä.



Kuva 3. SNMP-viestin rakenne.

Taulukko 7. SNMP-viestin rakenne

Kenttä	Kuvaus
SNMP-viesti	Koko SNMP-viestiä kuvaava sekvenssi, joka sisältää SNMP-version, Community-nimen ja SNMP PDU:n.
SNMP-versio	Kokonaisluku, joka sisältää käytetyn SNMP:n versionumerotiedon. SNMPv1 = 0.
Community-nimi	Octet string -tyyppinen muuttuja, jota käytetään antamaan ohjelmistolle tietoa, mille kanavalle viestit lähtevät.
SNMP PDU	SNMP PDU sisältää SNMP-viestin rungon. Kolme yleisintä PDU:ta ovat GetRequest, GetResponse ja SetRequest.
Pyynnön tunniste	Kokonaisluku, joka toimii tietyn SNMP-pyynnön tunnisteenä.
Virhe	SNMP-managerin lähettämässä pyynnössä virhe (kokonaisluku) on asetettu 0x00-arvoon. SNMP-agentti asettaa virhekoodin tähän kenttään vastausviestissä, jos viestin prosessoinnin aikana tapahtuu virhe. Muutamia virhekoodeja: 0x00 – Ei virhettä. 0x01 – Vastausviesti liian suuri lähetettäväksi. 0x02 – Pyydetyn objektin nimeä ei löydetty. 0x03 – Pyynnön ja SNMP-agentin tietotyypit eivät vastanneet toisiaan. 0x04 – SNMP-manageri yritti asettaa vain-luku-parametrin. 0x05 – Yleinen virhe (jokin muu, kuin yläpuolella esitetty virhe).
Virheen tunniste	Virheen tapahtuessa virheen tunniste sisältää osoittimen virheen aiheuttaneeseen objektiin. Muussa tapauksessa virheen tunniste on 0x00.
Varbind-lista	Varbind-sekvenssi.
Varbind	Sekvenssi, joka sisältää kaksi kenttää: objektin tunniste ja arvo objektin tunnisteelle tai tunnisteelta.
Objektin tunniste	Objektin tunniste osoittaa johonkin tiettyyn SNMP-agentin parametriin.
Arvo	SetRequest PDU – Arvo on haettu SNMP-agentin määrittämälle OID:lle. GetRequest PDU – Nollaksi määrätty arvo (null), joka varaa paikan saapuvalla datalla. GetResponse PDU – SNMP-agentin määrittämän OID:n palauttama arvo.

Viestien esittämiseen on käytetty ASN.1-tietotyyppejä ja BER-säännöstöä [15].

Viesteissä käytettävät ASN.1-tietotyypit ovat listattuina taulukoista 8 ja 9.

Taulukko 8. Yksinkertaiset tietotyypit

Tietotyyppi	Tunniste
Integer	0x02
Octet String	0x04
Null	0x05
Object Identifier	0x06

Taulukko 9. Monimutkaiset tietotyypit

Tietotyyppi	Tunniste
Sequence	0x30
GetRequest PDU	0xA0
GetResponse PDU	0xA2
SetRequest PDU	0xA3

Ohjelmiston tarkka toimintakuvaus verkkoliikenteestä ja SNMP-viestien pakkaamisesta, purkamisesta, lähettämisestä ja vastaanottamisesta on esitetty liitteissä 7-11.

3.5. Arkkitehtuuri

Tässä kappaleessa on esitelty eri ohjelmistomoduulit. Ohjelmiston ylimmän tason arkkitehtuurikuvaus on esitetty liitteessä 3. Alakappaleissa on kuvattu keskeisimmät moduulit ja niiden toiminta.

3.5.1. Pääohjain

Pääohjain ohjaa ja koordinoi koko muuta ohjelmistoa. Se muodostaa ohjelmiston rungon, josta seurataan ohjelmiston tapahtumia ja kutsutaan muiden moduuleiden funktioita. Pääohjaimen kontrolloima ohjelmistoarkkitehtuuri on esitelty liitteessä 4 ja Pääohjaimen toiminta liitteessä 5.

3.5.2. Käyttöliittymän ohjauskirjasto

Käyttöliittymän ohjauskirjasto sisältää funktiot, jotka kontrolloivat käyttäjälle näkyvien viestien ja tekstien lähettämistä sarjaportin kautta terminaali-ohjelmalle. Kirjaston

funktioita käyttävät Pääohjain, Verkko-ohjain ja Puheohjain.

3.5.3. Puheohjain

Puheohjaimen funktioihin on rakennettu puhesyntetisaattorin toiminta. Se saa pääohjaimelta syntetisoitavan tekstin, käsittelee sen ohjelmistolle sopivaksi kappaleiden 3.2. *Rajoitukset* ja 3.3. *Difonikonkatenaatio* mukaisesti ja lähettää laitteistolle. Laitteisto muokkaa sen kaiuttimelle sopivaan signaaliin ja tuottaa äänen kaiuttimesta. Puheohjaimen toiminta on kuvattu liitteiden 6 ja 7 tilakaavioissa.

3.5.4. Verkko-ohjain

Verkko-ohjain kontrolloi kaikkia verkosta tulevia ja sinne lähteviä viestejä. Verkko-ohjain vastaanottaa ja käsittelee kaikki verkosta saapuvat viestit. Se myös kokoaa ja lähettää kaikki verkkoon lähtevät viestit funktiokutsussa annettujen parametrien perusteella. Verkko-ohjaimen toiminta on kuvattu liitteiden 8, 9, 10 ja 11 tilakaavioissa. Liitteiden 12 ja 13 sekvenssikaaviot kuvaavat SNMP-viestiliikennettä verkon yli eri käyttäjien välillä.

3.5.5. LED-ohjauskirjasto

LED-ohjauskirjasto sisältää funktiot, jotka kontrolloivat laitteiston neljää LED-valoa. Kontrollifunktiot säätävät niiden pinnien virtaa laitteistossa, joihin LED-valot on kytketty. Virran voi säätää päälle ja pois päältä, jolloin LED-valot syttyvät ja sammuvat.

Elefansaattori-projektissa LED-valot palavat, kun ohjelmisto tuottaa puhetta. Muulloin LED-valot ovat pois päältä.

3.5.6. LCD-ohjauskirjasto

LCD-ohjauskirjasto sisältää funktiot, jotka kontrolloivat laitteiston LCD-näyttöä. Funktioilla voi alustaa näytön, tyhjentää näytön, asettaa kursorin haluttuun paikkaan ja tulostaa tekstiä näytölle.

Elefansaattori-projektissa LCD-näyttöä käytetään tulostamaan käyttäjälle tervehdys ohjelman käynnistämisen yhteydessä.

3.6. Rajapinnat

Kaikki ohjelmiston sisäiset rajapinnat ovat funktiorajapintoja. Ohjelmistolla on IP/UDP- ja SNMP-viestirajapinnat muihin käyttäjiin verkon kautta.

Pääohjain ja Käyttöliittymän funktiot kommunikoivat tietokoneen kuvaruudun, näppäimistön ja terminaaliohjelman kanssa sarjaportin välityksellä. Kaikki näytölle tulevat viestit ja käyttäjän kirjoittamat komennot välitetään sarjaportin kautta.

Järjestelmän LCD- ja LED-osia sekä puheen syntetisoinnissa tarvittavaa äänipiiriä ohjataan suorilla ohjelmistokomennoilla.

3.7. Käyttöliittymä

Elefansaattorin käyttöliittymänä toimii terminaaliohjelma ja tietokoneen näppäimistö, joiden avulla käyttäjä kommunikoi järjestelmän kanssa. Komennot annetaan tietokoneen näppäimistön kautta ohjelmalle. Suositeltu terminaaliohjelma on Tera Term Pro, johon on syytä asettaa seuraavat asetukset:

- 1) File → New connection → Serial: PORT: COM 1
- 2) Setup → Serial port → Baud rate: 115200
- 3) Setup → Terminal
 - a. Terminal size: 100 x 45
 - b. Term size = win size: valittuna
 - c. Local echo: valittuna
- 4) Setup → Font → Font: Courier New, Size: 12

3.7.1. Alkuvalikko

Ohjelmistoa käynnistettäessä terminaaliohjelman kuvaruutuun avautuu käyttöliittymän alkuvalikko, jossa käyttäjä voi valita toiminnon kolmesta eri vaihtoehdosta. Hän voi yhdistää verkkoon ja avata keskusteluohjelman, testata pelkkää järjestelmän puheesynteesiä tai asettaa omat verkkoasetukset. Alla alkuvalikkotuloste:

ELEFANSAATTORI - SOP 2008

Tekijät:

Lassi Heikkinen

Ilkka Leinonen

Antero Tossavainen

Valitse toiminto:

- 1) Yhdistä verkkoon ja avaa keskusteluohjelma
 - 2) Testaa puheesynteesiä
 - 3) Muuta verkkoasetuksia
- >

Käyttäjän valitessa ensimmäisen vaihtoehdon ohjelma yhdistää järjestelmän verkkoon, avaa keskusteluohjelman ja alkaa automaattisesti kuunnella verkosta tulevia viestejä.

Lisäksi ohjelma tulostaa käyttäjälle ohjeet kaikista komennoista. Kaikki verkosta tulevat muiden samalla kanavalla olevien käyttäjien viestit tulostetaan ruudulle ja syntetisoidaan puheena järjestelmän kaiuttimesta.

Valitsemalla toisen vaihtoehdon alkuvalikossa käyttäjä voi testata pelkästään järjestelmän puhesynteesiominaisuutta. Hän voi kirjoittaa lauseen, jonka järjestelmä syntetisoi ja toistaa kaiuttimesta.

Verkkoasetuksissa käyttäjä voi asettaa oman IP-osoitteen ja käytettävän MASK:n.

3.7.2. Keskusteluohjelman komennot

Taulukossa 10 on eritelty komennot, jotka ovat käytössä, kun käyttäjä on kirjautuneena verkkoon ja keskusteluohjelma on auki.

Taulukko 10. Keskusteluohjelman komennot

Komento	Kuvaus
/help	Tulostaa ohjelman käyttöohjeet ja komennot käyttäjälle.
/nick <name>	Asettaa oman käyttäjänimen.
/join <channel>	Liittyy channel-nimiselle kanavalle. Käyttäjä voi olla pelkästään yhdellä kanavalla samaan aikaan. Jos hän on ennestään jollain muulla kanavalla, kirjaa järjestelmä hänet automaattisesti ulos ja liittää uudelle kanavalle.
/msg <text>	Lähetää enintään 64 merkin mittaisen viestin verkkoon.
/name	Kysyy kaikkien verkossa olevien käyttäjien nimeä.
/channel	Pyytää kaikkia saman verkon käyttäjiä ilmoittamaan, millä kanavalla he ovat.
/mute	Asettaa puhesyntetisaattorin päälle tai pois päältä.
/debug	Asettaa debug-viestit päälle tai pois päältä.
/quit	Katkaisee yhteyden verkkoon ja palaa alkuvalikkoon.

4. ELEFANSAATTORI

Tässä kappaleessa kuvataan Elefansaattori-projektissa tuotetun puhesyntetisaattorin toimintaa, saavutuksia sekä puutteita.

Syntetisaattorin käyttöliittymäksi muotoutui yksinkertainen ja toimiva ratkaisu, jonka avulla loppukäyttäjän on vaivatonta hyödyntää ohjelmiston tarjoamia palveluita. Käyttäjä valitsee alkuvalikosta ”1” edetäkseen keskusteluohjelmaan ja muodostaakseen verkkoyhteyden, ”2” testatakseen puhesynteesiä tai ”3” määrittääkseen järjestelmän verkkoasetukset. IRC-tyyliset komennot mahdollistavat käyttäjän liittymisen kanavalle ja viestien lähettämisen.

Järjestelmä lähettää verkkoviestejä tehtävänannon mukaisesti ja myös vastaanottaa muiden vastaavien laitteiden lähettämiä viestejä. Vastaanottaessaan muiden käyttäjien lähettämiä keskusteluviestejä Elefansaattori parsii synteesin ulkopuolelle rajatut erikoismerkkejä tai numeroita sisältävät tai liian pitkät lauseet pois.

Seuraavassa vaiheessa järjestelmä muokkaa viestien merkistön kohdalleen Elefansaattorin puhesynteesille määritetyn merkkikorvaavuuden perusteella. Lopuksi ohjelmisto käynnistää varsinaisen puheen tuotannon ja toistaa WAV-tiedostoja äänipiirin kautta halutussa järjestyksessä.

Muistin riittämättömyyden vuoksi Elefansaattori-projektissa on jouduttu poikkeamaan alkuperäisen suunnitelman mukaisesta tekstin parsimisesta siltä osin, että *z*- ja *x*-kirjaimia korvaavat *ts*- ja *ks*-kirjainyhdistelmät on jouduttu vaihtamaan yhden merkin mittaisiin vastineisiin. Sekä *z*- että *x*-kirjainta korvataan puhesynteesissä *s*-kirjaimella. Muistin rajallisen määrän vuoksi on jouduttu tekemään kompromisseja ja tämä on yksi niistä.

Äänenlaatua ei ole arvioitu difonikohtaisesti, sillä laajan kontekstin vuoksi esimerkiksi PESQ-testaus olisi työlästä. Sen sijaan äänenlaatua on karkeasti arvioitu subjektiivisesti ryhmän jäsenten toimesta.

Elefansaattorin tuottama puhe on enimmäkseen tyydyttävää, mutta puheen ymmärrettävyys vaihtelee eri sanojen välillä. Jotkut kirjaimet tuottavat järjestelmälle vaikeuksia toisia kirjaimia enemmän. Esimerkiksi vokaalien toistaminen onnistuu konsonantteja paremmin. Järjestelmän tuottamaa puheen ymmärrettävyyttä heikentää paikoittain voimakas säröytyminen ja konsonanttien ”poksahdus”. Äänenlaadun puutteet johtuvat osittain difonien heikosta ääniformaatista, mutta jossain määrin myös difonien sisällöllisistä ominaisuuksista.

5. TESTAUS

Testaus on yksi ohjelmistoprojektin laadunvalvonnan keskeisimmistä menetelmistä. Elefansaattori-projektin testaus suoritetaan ohjelmistotestauksen V-mallin [16] mukaisesti alkaen ensin yksikkötestauksesta moduulitasolla, mistä siirrytään moduulien integrointitestaukseen ja lopulta koko järjestelmän testaamiseen.

Yksikkö- ja integrointitestauksen suoritti ohjelmakoodin kirjoittaja, mutta järjestelmätestaus käytettiin ulkopuolista tahoa, joka ei ollut itse kirjoittanut testattavana olevaa ohjelmakoodia. Ennen testausta ohjelmakoodin laadukkuus varmistettiin staattisella analyysillä.

Virheet minimoitiin jo ohjelmakoodin kirjoitusvaiheessa usein tapahtuvien katselmusten avulla ja pitämällä ohjelma yksinkertaisena niin, että toteutettiin vain tarpeelliset vaatimusmäärittelyn mukaiset toiminnot. Lisäksi ohjelmaan implementoitiin debug-viestien tulostaminen ja pidettiin ohjelmamoduulit erillään toisistaan, että niitä voitiin testata toisistaan riippumatta. Virheiden syntymistä ehkäistiin lisäksi pitämällä tekninen dokumentaatio, järjestelmän toimintaperiaatteet, suunnitelmat ja toteutus tarkkoina ja ymmärrettävinä.

5.1. Lähdekoodin staattinen analyysi

Ohjelmakoodia käännettäessä tarkistettiin kääntäjän antamat varoitukset ja korjattiin kaikki syntaksivirheet. Myös muistialueen virheellinen käyttö paljastui AVR Studion debugger-työkalun avulla jo ohjelmakoodin kirjoittamisvaiheessa.

5.2. Yksikkötestaus

Ajanpuutteen vuoksi ei toteutettu erillistä testiohjelmaa simuloimaan ohjelman käyttöä, joten yksikkötestaus tehtiin ohjelmakoodin implementoinnin yhteydessä debug-viestien analysoinnin ja katselmusten avulla.

If- ja for-rakenteet tarkistettiin erityisellä huolellisuudella, jotta kaikki vaihtoehdot tulivat käsitellyiksi. Yksikkötestauksen teki pääosin ohjelmakoodin kirjoittaja, mutta katselmointiin osallistuivat myös muut ohjelmiston kehittäjät. Difonien oikeellisuus tarkistettiin editointivaiheessa.

5.3. Integrointitestaus

Integrointitestaus toteutettiin ohjelmakoodin implementoinnin aikana ja sen teki ohjelmakoodin kirjoittaja. Kehitysympäristönä käytettyyn AVR Studio -ohjelmaan kuuluu debugger-työkalu, jonka avulla tarkasteltiin askel kerrallaan muuttujien arvoja tietyissä tilanteissa ja ohjelman etenemisreittejä.

5.4. Järjestelmätestaus

Järjestelmätestaukseen ja sen dokumentointiin keskitettiin suurimmat voimavarat. Kun järjestelmän kaikki toiminnallisuus oli implementoitu, ajettiin läpi kaikki suunnitellut testitapaukset ja löydetty virheet pyrittiin korjaamaan. Testaus pyrittiin ulkoistamaan, koska kehittäjät ovat monesti itse sokeita omille virheilleen.

Testattavana olivat käyttöliittymä, puhe-, verkko-, LED- ja LCD-ohjaimien toiminta sekä koko järjestelmän kokonaisuustestaus, missä ohjelmistoa testattiin todellista käyttötilannetta vastaavassa kahden laitteiston verkossa. Puheohjainta testattaessa tarkistettiin, että ohjelmisto hyväksyy ja hylkää lauseet oikein ja toistaa oikeat äänitiedostot. Verkko-ohjainta testattaessa tarkistettiin, että lähtevät ja saapuvat viestit käsitellään oikein ja verkkoasetusten muuttaminen toimii.

5.4.1. Käyttöliittymän testaus

Testi suoritetaan käynnistämällä ohjelmisto ja valitsemalla alkutilanteessa vaihtoehto ”1) Liity verkkoon ja avaa keskusteluohjelma”. Keskusteluohjelman kaikki komennot käydään läpi. Testi katsotaan onnistuneeksi, jos käyttöliittymä suorittaa kyseisen komennon kutsun. Varsinaisten komentojen toiminnallisuudet käydään läpi myöhemmissä kappaleissa.

Taulukko 11. Käyttöliittymän testitapaukset

Nro	Kuvaus	Komento	Onnistumiskriteeri	Tulos
1	Ohjelman ohjeet	/help	Ohjelma tulostaa ohjeet terminaalin näytölle.	OK
2	Käyttäjänimen asettaminen	/nick Seppo	Ohjelma tallentaa käyttäjänimen ja tulostaa viestin ”Nimikkeesi on vaihdettu. Uusi nimike: Seppo”.	OK
3	Liian pitkän käyttäjänimen asettaminen (16 merkkiä)	/nick mattianttimajava	Ohjelma tulostaa ”**** Virhe: Antamasi nimike on liian pitkä. Max pituus 15 merkkiä!”	OK
4	Kanavalle liittyminen	/join kanava	Ohjelma tallentaa kanavan muistiin ja tulostaa viestin ”Liityit kanavalle ”kanava”.”	OK
5	Liian pitkä kanavan nimi kanavalle liittyessä	/join liianpitkakanava	Ohjelma tulostaa ”**** Virhe: Antamasi kanavan nimi on liian pitkä. Max pituus 15 merkkiä!”	OK
6	Viestin lähettäminen kanavalle	/msg Moi kaikille ryhmille	Ohjelma tulostaa lähetyksen onnistuessa viestin ”Viesti lähetetty!”	OK

7	Kysely verkossa olevien käyttäjien nimistä	/name	Ohjelma tulostaa lähetyksen onnistuessa viestin ”Kysely lähetetty!”	OK
8	Kysely verkossa olevien käyttäjien kanavista	/channel	Ohjelma tulostaa lähetyksen onnistuessa viestin ”Kanavakysely lähetetty!”	OK
9	Puhesyntetisaattorin mykistäminen (on oltava päällä testiä aloitettaessa)	/mute	Ohjelma tulostaa viestin ”Puhesynteesi: POIS”.	OK
10	Puhesyntetisaattorin kytkeminen takaisin päälle (on oltava mykistetty testiä aloitettaessa)	/mute	Ohjelma tulostaa viestin ”Puhesynteesi: PÄÄLLÄ”.	OK
11	Asettaa debug-viestit päälle (on oltava pois päältä testiä aloitettaessa)	/debug	Ohjelma tulostaa viestin ”Debug viestit: PÄÄLLÄ”.	OK
12	Asettaa debug-viestit pois päältä (on oltava päällä testiä aloitettaessa)	/debug	Ohjelma tulostaa viestin ”Debug viestit: POIS”.	OK
13	Paluu alkuvalikkoon	/quit	Ohjelma palaa alkuvalikkoon.	OK
14	Virheellinen komento	/virhe	Ohjelma tulostaa ”**** Virhe: Väärä komento!”	OK

5.4.2. Puheohjaimen testaus

Puheohjaimen testaus suoritetaan valitsemalla ohjelmiston alkuvalikosta vaihtoehto ”2) Testaa puheynteesiä”. Puheohjaimen testaus on jaettu kahteen alla olevaan vaiheeseen. Puheohjaimen testauksessa hyödynnetään laitteistoon aiemmin implementoitua debug-viestitoiminnallisuutta.

5.4.2.1. Lauseen validisuuden tarkistus

Puheohjaimen ensimmäinen vaihe, lauseen validisuuden tarkistus, katsotaan hyväksytyksi, jos laitteisto hyväksyy ja hylkää onnistuneesti kaikki testauksessa käytettävät esimerkkilauseet. Lause tulee hylätä, jos sen pituus on enemmän kuin 64 merkkiä tai jos se sisältää muita merkkejä kuin suomen kielen aakkosia. Kirjaimet voivat olla isoja tai pieniä kirjaimia.

Taulukko 12. Lauseen validisuuden tarkistuksen testitapaukset

Nro	Kuvaus	Lause	Onnistumiskriteeri	Tulos
1	pitkä lause (65 merkkiä)	elefantit ovat savannin suurimpia otuksia ja ne voivat juoda koko	Ohjelma tulostaa ”*** Virhe: Lause liian pitkä syntetisoitavaksi!”	OK
2	pitkä lause (64 merkkiä)	kirahvit ovat savannin suurimpia otuksia ja ne voivat juoda suon	Toistetaan lause.	OK
3	pitkä sana	paineannahilaatioantimateriatytkki	Toistetaan lause.	OK
4	isoja kirjaimia	JoKa ToInEn KiRjAiN oN iSo	Toistetaan lause.	OK
5	vierasperiäisiä kirjaimia	zorro ja xena vai celilia ja bob öljysi äitin ja åken	Toistetaan lause.	OK
6	erikoismerkkejä	\r\n "();"	Ohjelma tulostaa ”*** Virhe: Väärä merkki lauseessa: \”.	OK
7	lyhenteitä	NATO mm km	Toistetaan lause	OK
8	numeroita	1234567890	Ohjelma tulostaa ”*** Virhe: Väärä merkki lauseessa: 1”.	OK
9	aakkoset	abcdefghijklmnopqrstuvwxyzaöö	Toistetaan lause.	OK
10	normaali lause	Tässä lauseessa ei pitäisi olla mitään vikaa	Toistetaan lause.	OK

5.4.2.2. Äänitiedostojen toistaminen

Puheohjaimen toista vaihetta, äänitiedostojen toistamista, arvioidaan toistamalla laitteistolla kymmenen esimerkkilauseetta. Testausvaihe katsotaan läpäistyksi, jos toistetaan kaikki testilauseiden difonit, jotka ovat tallennettuina muistissa. Testilauseissa huomioidaan myös difonien toistaminen takaperin. Difonit tarkastetaan debug-viestien avulla.

Taulukko 13. Äänitiedostojen toistamisen testitapaukset

* kuvaa difonin toistamista takaperin

~ kuvaa difonin jättämistä puhesynteesin ulkopuolelle

Nro	Lause	Onnistumiskriteeri	Tulos
1	JoKa ToInEn KiRjAiN oN iSo	Toistetaan difonit _j, jo, *ko, ka, a_, *t_, to, oi, in, *en, en, n_, _k, *ik, *ri, ~, ja, ai, in, n_, _o, on, n_, *i_, is, *os, *_o	OK
2	zorro ja xena vai celilia ja bob öljysi äitin ja åken	Toistetaan difonit _s, *os, or, ~, *or, *_o, _j, ja, a_, _s, se, en, *an, a_, _v, va, ai, i_, _s, se, *le, li, *li, li, *ai, a_, _j, ja, a_, _p, *op, op, *_p, _o, ol, ~, ~, ys, *is, i_, *a_, ai, it, *it, in, n_, _j, ja, a_, _o, *ko, ke, en, n_	OK
3	ovela mato ovella mattoa lato	Toistetaan difonit _o, *vo, ve, *le, la, a_, _m, ma, *ta, to, *_o, _o, *vo, ve, *le, ll, la, a_, _m, ma, *ta, tt, to, ~, a_, _l, la, *ta, to, *_o	OK
4	LED ja LCD ohjaimen testaus	Toistetaan difonit _l, le, *te, t_, _j, ja, a_, _l, ~, st, t_, _o, ~, ~, ja, ai, *mi, me, en, n_, *t_, te, *se, st, ta, au, us, *_s	OK
5	Lassi Ilkka Antero	Toistetaan difonit _l, la, *sa, ss, *is, i_, *i_ *li, ~, kk, ka, a_, *a_, an, nt, te, er, *or, *_o	OK

5.4.3. Verkko-ohjaimen testaus

Verkko-ohjaimen testaus suoritetaan valitsemalla alkuvalikossa ”1) Yhdistä verkkoon ja avaa keskusteluohjelma”. Verkon toiminnan testaaminen voidaan jakaa kahteen pääryhmään. Ensimmäisessä testiryhmässä testataan kaikki ohjelmistossa määritellyt verkkoon lähetettävät viestit. Toisessa testiryhmässä testataan kaikkien määriteltyjen verkosta tulevien viestien vastaanottaminen ja käsittely. Myös verkkoasetuksien muuttaminen testataan.

5.4.3.1. Viestien lähettäminen

Käyttäjä lähettää käyttöliittymän keskusteluohjelmiston komennoilla kaikki mahdolliset käyttäjän määrittelemät viestit verkkoon. Lähetettävien viestien sisällön tarkistamiseen käytetään Ethereal – Network Protocol Analyzer -ohjelmaa. Viesteistä tarkistetaan, että

niiden sisältö vastaa kappaleessa 3.4.4. *SNMP-viestit* annettuja määritelmiä.

Taulukko 14. Viestien lähettämisen testitapaukset

Nro	Kuvaus	Komennot	Onnistumiskriteeri	Tulos
1	Lähetetään testiviesti kaikille saman kanavan käyttäjille	/join kanava /msg testiviesti	Ethereal tunnistaa viestin ja seuraavat tietokentät ovat oikein: PDU Type = SET Community String = kanava OID = 1 Value = testiviesti	OK
2	Lähetetään kanavakysely kaikille saman verkon käyttäjille	/channel	Ethereal tunnistaa viestin ja seuraavat tietokentät ovat oikein: PDU Type = GET Community String = control OID = 3	OK
3	Lähetetään nimikysely kaikille saman kanavan käyttäjille	/join kanava /name	Ethereal tunnistaa viestin ja seuraavat tietokentät ovat oikein: PDU Type = GET Community String = kanava OID = 2	OK
4	Ohjelmisto lähettää TRAP-viestin	/quit	Ethereal tunnistaa viestin TRAP-viestiksi.	OK

5.4.3.2. Viestien vastaanottaminen

Kaikki määritellyt verkosta tulevat viestit lähetetään NetSNMP-ohjelmalla käyttäjän laitteistolle määrittelemään IP-osoitteeseen. Ohjelmiston tulisi automaattisesti käsitellä nämä viestit ja lähettää takaisin verkkoon tarvittavat vastaukset. Testeillä tarkistetaan, että ohjelmisto osaa käsitellä verkosta tulevat viestit ja lähettää tarvittavat vastaukset.

Taulukko 15. Viestien vastaanottamisen testitapaukset

Nro	Kuvaus	Komento	Onnistumiskriteeri	Tulos
1	Lähetetään SNMP-viesti käyttäjälle NetSNMP-ohjelmalla	snmpset -r 0 -t 1 -v 1 -c kanava udp:10.10.21.1 1.3.6.1.3.55.0.1 s ”fantti”	Ohjelma näyttää terminaaliohjelman käyttöliittymässä lähettäjän IP-osoitteen ja viestin ”fantti” ja syntetisoi lauseen.	OK
2	Lähetetään kanavakyselyviesti käyttäjälle NetSNMP-ohjelmalla	snmpget -r 0 -t 1 -v 1 -c control udp:10.10.21.1 1.3.6.1.3.55.0.3	Ohjelma lähettää verkkoon automaattisen vastauksen, millä kanavalla käyttäjä on. Viestin sisältö tarkistetaan Ethereal-ohjelmalla.	OK
3	Lähetetään nimikyselyviesti käyttäjälle NetSNMP-ohjelmalla	snmpget -r 0 -t 1 -v 1 -c kanava udp:10.10.21.1 1.3.6.1.3.55.0.2	Ohjelma lähettää verkkoon automaattisen vastauksen, mikä sisältää käyttäjän nimikkeen. Viestin sisältö tarkistetaan Ethereal-ohjelmalla.	OK

5.4.3.3. Verkkoasetusten muuttaminen

Verkkoasetuksia voidaan muuttaa valitsemalla alkuvalikossa ”3) Muuta verkkoasetuksia”. Seuraavaksi ohjelmalle annetaan IP-osoite ja MASK.

```
Anna oma IP-osoite: 10.10.21.1
Anna verkon maski: 255.255.255.0
```

Verkkoasetukset ovat päivittyneet onnistuneesti, jos annetut osoitteet tulostuu, kun alkuvalikossa valitaan ”1) Yhdistä verkkoon ja avaa keskusteluohjelma”.

Testin tulos: OK

5.4.4. LED-ohjaimen testaus

LED-ohjaimen toiminta testataan valitsemalla alkuvalikosta ”2) Testaa puhesynteesiä”. Laitteistolla ajetaan läpi samat testilauseet kuin kappaleessa 5.4.2.2. *Äänitiedostojen toistaminen*. Jos LED-valot ovat päällä jokaisen lauseen toiston aikana, katsotaan LED-ohjaimen toiminnan olevan määritelmän mukaista.

Taulukko 16. LED-ohjaimen testitapaukset

Nro	Lause	Onnistumiskriteeri	Tulos
1	JoKa ToInEn KiRjAiN oN iSo	LED-valot palavat syntetisoinnin aikana.	OK
2	zorro ja xena vai celilia ja bob öljysi äitin ja åken	LED-valot palavat syntetisoinnin aikana.	OK
3	ovela mato ovella mattoa lato	LED-valot palavat syntetisoinnin aikana.	OK
4	LED ja LCD ohjaimen testaus	LED-valot palavat syntetisoinnin aikana.	OK
5	Lassi Ilkka Antero	LED-valot palavat syntetisoinnin aikana.	OK

5.4.5. LCD-ohjaimen testaus

LCD-ohjaimen toiminta testataan käynnistämällä ohjelmisto viisi kertaa. Jos näytölle tulee projektiin implementoitu tervehdysteksti onnistuneesti jokaisella kerralla, katsotaan LCD-ohjaimen toiminta läpäistyksi. LCD-ohjaimen toimintaa ei tarvitse testata tämän projektin puitteissa perusteellisemmin, sillä LCD-ohjainta ei käytetä projektissa muuhun tarkoitukseen kuin tervehdystekstin välittämiseen käyttäjälle.

Taulukko 17. LCD-ohjaimen testitapaukset

Nro	Komento	Onnistumiskriteeri	Tulos
1-5	Käynnistetään laitteisto (testi toistetaan 5 kertaa)	LCD-näytölle tulee käynnistettäessä teksti ”Elefansaattori”.	OK

5.4.6. Kokonaisuustestaus

Kokonaisuustestauksen tarkoituksena on testata laitteiston toimivuus todellista käyttäjätilannetta vastaavassa asetelmassa. Kaksi Elefansaattori-järjestelmää (taulukossa 18 Ele1 ja Ele2) kytketään samaan verkkoon ja muodostetaan keskusteluyhteys. Elefansaattorissa verkkoon yhdistäminen tapahtuu valitsemalla alkuvalikossa ”2) Yhdistä verkkoon ja avaa keskusteluohjelma”. Testin lähtötilanteessa molemmat Elefansaattorit ovat verkossa ja liittyneet kanavalle ”kanava”. Elefansaattori 2:n verkkoasetukset tulee muuttaa ennen verkkoon liittämistä valitsemalla alkuvalikosta ”3) Muuta verkkoasetuksia” ja määrittämällä IP-osoitteeksi 10.10.21.2 ja aliverkon peitteeksi 255.255.255.0.

Koska Elefansaattori-laitteisto on testiasetelmassa niin lähettävänä kuin vastaanottavanakin osapuolena, voidaan yhdellä testillä tarkistaa samanaikaisesti sekä

viestien lähettämisen että vastaanottamisen toiminnallisuus.

Testeillä varmistetaan, että puhesynteesi toimii verkon yli eli että toisen Elefansaattorin lähettämä viesti syntetisoidaan toisessa Elefansaattorissa. Myös kanavanvaihto, kanavakysely, käyttäjänimen asettaminen ja kysyminen sekä puhesynteesin mykistäminen testataan. Toistettavat difonit tarkistetaan debug-viestien avulla. Testitapaukset esitellään taulukossa 18.

Taulukko 18. Kokonaisuustestauksen testitapaukset

Nro	Kuvaus	Komennot	Onnistumiskriteeri	Tulos
1	Puhesynteesi verkon yli	Ele1: /msg ovela mato ovella mattoa lato	Ele2: Ohjelma toistaa difonit o, ve, *le, la, a_, _m, ma, *ta, to, *_o, _o, *vo, ve, *le, ll, la, a_, _m, ma, *ta, tt, to, ~, a_, _l, la, *ta, to, *_o	OK
2	Puhesynteesin mykistäminen	Ele2: /mute Ele1: /msg ovela mato ovella mattoa lato	Ele2: Ohjelma ei toista difoneja o, ve, *le, la, a_, _m, ma, *ta, to, *_o, _o, *vo, ve, *le, ll, la, a_, _m, ma, *ta, tt, to, ~, a_, _l, la, *ta, to, *_o	OK
3	Käyttäjänimen asettaminen ja kysyminen	Ele1: /nick Seppo Ele2: /name	Ele2: Ohjelma tulostaa ”Käyttäjän 10.10.21.1 nimi on Seppo”.	EI OK
4	Kanavalle liittyminen ja kysyminen	Ele1: /join testikanava Ele2: /channel	Ele2: Ohjelma tulostaa ”Käyttäjä 10.10.21.1 on kanavalla testikanava”.	OK

5.4.7. Järjestelmätestien yhteenveto

Testien avulla havaittiin ohjelmakoodin kehityksen aikana ohjelmakoodissa virheitä, joista suurin osa saatiin korjattua. Ainoastaan kokonaisuustestauksen testi numero kolme ei täyttänyt onnistumiskriteeriä ohjelmiston viimeisessä kehitysversiona.

6. PROJEKTIN KUVAUS

Elfansaattori-projekti toteutettiin Oulun yliopistossa keväällä 2008 kolmen teknillisen tiedekunnan sähkö- ja tietotekniikan osaston opiskelijan (Lassi Heikkinen, Ilkka Leinonen ja Antero Tossavainen) toimesta.

Projekti suoritettiin demokraattisessa hajautetussa ryhmässä, jolla ei ollut pysyvää johtajaa, vaan tehtävät koordinoitiin siihen sopivimman henkilön toimesta. Projekti jaettiin tehtäviin ryhmän jäsenten henkilökohtaisten kiinnostusten ja vahvuuksien perusteella. Ryhmän rakenne osoittautui toimivaksi ja tehokkaaksi. Osaltaan ryhmän rakenteen toimivuuteen vaikuttivat jäsenten aikaisempi yhteinen toiminta sekä kokemus omilla osaamisalueillaan.

Projektin alussa tutustuimme fonetiikan ja puhesynteesin perusteisiin saaden ymmärrystä projektin vaatimuksista ja tavoitteista. Niiden pohjalta kirjoitimme kandidaatintyön teoriaosuuden. Seuraavaksi tutustuimme Ethernut-alustaan ja teimme ohjelmistolle korkean tason suunnitelmat ja kaaviot. Suunnittelussa edettiin tarkempiin kuvauksiin kaikilla ohjelmiston vaatimusalueilla samalla kun osa ryhmästä kehitti puhesynteesiä ja tarvittavia difoneja. Projektin joka vaiheessa suunnitelmia tarkennettiin samalla kun eri ominaisuuksia implementoitiin ja parannettiin ohjelmistossa. Lopussa suoritettiin testaus ja arvio projektin onnistumisesta.

Elfansaattori-projektin eniten ongelmia tuottanut osa-alue oli verkkotoiminnallisuuden toteuttaminen, jossa laitteiston muistinhallinta ja testiverkossa ilmentyneet selittämättömät ongelmat hidastivat implementointia. Ongelmat saatiin kuitenkin selvitettyä ja verkko-ohjain toimimaan lopulta toivotulla tavalla. Toinen vaikeuksia tuottanut osa-alue oli difonien tuottaminen. Runsaasta difonien muokkauksesta huolimatta synteesin tuottamaa puhetta ei saatu kaikilta osin ymmärrettäväksi.

Koko projektin etenemisen ajan web-pohjainen projektinhallintatyökalu (trac 0.10.3) toimi keskeisenä alustana projektin kehityksessä. Myös versionhallintaa (Subversion 1.4.6) hyödynnettiin ohjelmakoodin ylläpidossa. Versionhallinta auttoi jäseniä pysymään projektin kehityksessä ajan tasalla sekä varastoi projektin suorituksessa kehitetyt ohjelmakoodit, kandidaatintyön asiakirjat sekä difonien äänitiedostot.

Projektin toteuttamisessa kului yhteensä noin 400 työtuntia. Tämä pitää sisällään aiheeseen perehtymisen, ratkaisun suunnittelun, implementoinnin ja testauksen sekä projektin dokumentoinnin.

Ryhmän ”Elefantit” vastuualueiden ja työtuntien erittely:

Lassi Heikkinen (137 h)

- kandidaatintyön kirjoitus
 - Tiivistelmä (2 h)
 - Alkulause (1 h)
 - Lyhenteiden ja merkkien selitykset (3 h)
 - 2.2. Puhesynteesi (15 h)
 - 2.3. Sulautetun järjestelmän puhesynteesi (5 h)

- 3.3. Difonien valinta (22 h)
- 5. Testaus (19 h)
- 7. Tuleva kehitys (2 h)
- Lähteet (2 h)
- kandidaatintyön tekstin ja muotoilun yhdenmukaistaminen (30 h)
- puhesyntetisaattorin suunnittelu ja implementointi
 - LCD-ohjauskirjasto (4 h)
 - difonien suunnittelu ja nauhoitus (10 h)
- SVN-versionhallinnan ja trac-projektihallintatyökalun ylläpito (10 h)
- projektin suunnittelu (12 h)

Ilkka Leinonen (113)

- projektivaatimukseen tutustuminen (6 h)
- luennot ja analyysi (8 h)
- kandidaatintyön kirjoitus
 - 3. Ratkaisun kuvaus (1 h)
 - 3.1. Johdanto (1 h)
 - 3.2. Rajoitukset (1 h)
 - 3.4. Tietorakenteet (4 h)
 - 3.5. Arkkitehtuurikuvaus (2 h)
 - 3.6. Rajapinnat (1 h)
 - 3.7. Käyttöliittymäkuvaus (2 h)
 - 5. Testaus (4 h)
- puhesyntetisaattorin suunnittelu ja implementointi
 - ohjelmiston ylin taso (2 h)
 - käyttöliittymä (6 h)
 - pääohjain (10 h)
 - verkko-ohjain (43 h)
 - puheohjain (12 h)
 - LED-ohjauskirjasto (2 h)
- difonien nauhoitus (4 h)
- dokumentin katselmointi (4 h)

Antero Tossavainen (135 h)

- kandidaatintyön kirjoitus
 - Tiivistelmä (5 h)
 - Abstract (3 h)
 - Alkulause (2 h)
 - Lyhenteiden ja merkkien selitykset (5 h)
 - 1. Johdanto (4 h)
 - 2.1. Fonetikka (20 h)
 - 2.4. Käytettävä laitteisto (2 h)
 - 3.2. Rajoitukset (4 h)
 - 3.3. Difonikonkatenaatiosynteesi (20 h)
 - 4. Elefansaattori (5 h)

- 5. Testaus (3 h)
- 6. Projektin kuvaus (6 h)
- Lähteet (2 h)
- kandidaatintyön tekstin ja muotoilun yhdenmukaistaminen (20 h)
- puhesyntetisaattorin suunnittelu ja implementointi
 - LCD-ohjauskirjasto (4 h)
 - difonien suunnittelu, nauhoitus ja editointi (20 h)
- projektin suunnittelu (10 h).

Ryhmän jäsenten työtuntien yksityiskohtaisempi erittely on liitteissä 14, 15 ja 16.

7. TULEVA KEHITYS

Jos projektin laitteisto pysyy muuttumattomana, äänenlaatua voidaan lähteä parantamaan difonivalinnasta alkaen. Elefansaattori-ratkaisussa on päädytty tekemään difonivalinta pelkästään tilastollisuuteen pohjautuen, mutta ottamalla mukaan muita kriteerejä voidaan todennäköisesti saavuttaa parempi lopputulos. Difonivalinnassa tulisi painottaa difoneja, jotka ovat kuulemisen kannalta olennaisempia kuin toiset.

Myös difonien editointia kehittämällä on mahdollista vaikuttaa myönteisesti synteettisen puheen ymmärrettävyyteen ja luonnollisuuteen. Difoneja tulisi kuunnella useissa eri sanayhteyksissä ja tehdä editointipäätökset puhesynteesin kokonaisuus huomioon ottaen.

Elefansaattorin ohjelmisto hyödyntää lähes kaiken laitteiston tarjoaman olevan muistin. Optimaalisessa tilanteessa koko muisti olisi käytössä, jolloin difoneja mahtuisi muistiin vielä enemmän ja niiden laatua voitaisiin parantaa. Difonit tallennetaan Elefansaattori-projektissa ilman pakkausta, joten esimerkiksi Huffman-koodauksella saataisiin mahtumaan enemmän difoneita. Koodauksen on kuitenkin tärkeää olla tarpeeksi yksinkertainen, jotta laitteiston laskentateho riittää purkamaan koodauksen täyttäen sovelluksen aikavaatimukset.

On mahdollista, että käytettävissä olevan rajallisen muistin puitteissa parhaaseen äänenlaatuun ja puheen ymmärrettävyyteen päästään formantilla synteessimenetelmällä. Myös järjestelmä, joka yhdistää difonikonkatenaatio- ja formanttisynteesiä parhaita ominaisuuksia voi olla kyseisessä Ethernet-alustassa hyvä ratkaisu. Difoneja kannattaisi todennäköisesti hyödyntää konsonanttien muodostamisessa ja formanttia menetelmää vokaalien muodostamisessa, sillä formantin menetelmän tuottaman puheen luonnottomuus korostuu erityisesti konsonanteilla.

Jos laitteistoon olisi mahdollista lisätä muistia, voisi difonit tallentaa huomattavasti paremmalla äänenlaadulla ja päätyä Elefansaattori-projektin ratkaisua parempaan lopputulokseen.

8. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä kuvattu suomenkielinen puhesyntetisaattori on yksi esimerkki difonikonkatenaatiosynteesisistä. Käytössä olevien resurssien ja käytettyjen menetelmien tuloksena saatu äänenlaatu jättää parannettavan varaa.

Elefansaattori-projektin puitteissa ei implementoitu muita puhesynteesimenetelmiä, joten ei voida tehdä johtopäätöstä, että esimerkiksi formanttisynteesisillä saataisiin käytössä olleilla resursseilla parempi lopputulos. Selvää on kuitenkin, että formanttisynteesi on yksi tutkimisen arvoinen menetelmä vastaavissa projekteissa.

Projektia suoritettaessa ei myöskään tutkittu kuinka paljon difonien ääniformaatin laadun parantaminen kasvattaisi puheen ymmärrettävyyttä. Äänenlaatua oltaisiin voitu yrittää parantaa pakkaamalla äänitiedostot ja lisäämällä poistettuja taajuuksia äänitiedostoihin. Projektissa asetettujen rajoitusten vuoksi tätä vaihtoehtoa ei kuitenkaan tutkittu ja siksi ei voida varmasti sanoa, millainen vaikutus äänitiedostojen pakkauksen viiveettömällä purkamisella olisi ollut laitteiston suorituskyvylle ja puheen tuottamiselle. Ei siis voida suoraan tehdä johtopäätöstä, että tässä projektissa tulisi hyödyntää pakkausta.

9. LÄHTEET

- [1] A Practical introduction to phonetics (1988). J. C. Catford. Oxford University Press.
- [2] Review of Speech Synthesis Technology (1999). Sami Lemmetty. Teknillisen korkeakoulun Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto.
- [3] Äänipää (luettu 16.4.2008). Hannu Karisto, Jouni Kenttämies, Ari Koivumäki ja Pertti Korpinen. URL: <http://www.aanipaa.tamk.fi>.
- [4] Introduction to phonetics (1970). L. F. Brosnahan, Bertil Malmberg. Cambridge University Press.
- [5] Fonetikan perusteet (1981). Kalevi Wiik. Werner Söderström Osakeyhtiö.
- [6] Fonetikan perusanasto (luettu 25.2.2008). Antti Iivonen, Mari Horppila, Miika Heikkonen ja Olli Rissanen (2000). Helsingin yliopiston Fonetikan laitos. URL: <http://www.opiskelijakirjasto.lib.helsinki.fi/fonterm>.
- [7] Review of text-to-speech conversion for English. Journal of the Acoustical Society of America, JASA vol. 82. Dennis H. Klatt (1987).
- [8] Missä viipyvät puhuvat tietokoneet? Tiede-lehti 8/2005. Janos Honkonen (2005).
- [9] Hidden Markov Models: Past, Present, and Future. Proceedings of Eurospeech 89. Lee K. (1989).
- [10] Speech perception without traditional speech cues. Science, 1981. Remez, R.E., Rubin, P.E., Pisoni, D.B., & Carrell, T.D.
- [11] Puhesynteesi (2001). Martti Vainio. Helsingin yliopiston Fonetikan laitos. URL: <http://www.ling.helsinki.fi/~marvaini/perusteet/luento06-4up.pdf>.
- [12] Multilingual Phoneme to Grapheme Conversion System Based on HMM. Proceedings of ICSLP 92. Renzepopoulos P., Kokkinakis G. (1992).
- [13] CMU ARCTIC databases for speech synthesis (2003). John Kominek and Alan W. Black. Language Technologies Institute, School of Computer Science, Carnegie Mellon University.
- [14] Ethernet Version 2.1 Hardware User`s Manual (2005). egnite Software GmbH.
- [15] Rane Corporation www-sivut, joulukuu 2005 (luettu 8.4.2008). URL: <http://www.rane.com/note161.html>.
- [16] Ohjelmistotekniikka Luentokalvot (2006). Pekka Sangi, Juha Röning. Oulun yliopisto.

10. LIITTEET

- Liite 1 Difonien esiintyminen testiaineistossa
- Liite 2 Difonien nauhoituksessa käytetty sanalista
- Liite 3 Ohjelmiston ylimmän tason arkkitehtuurikuvaus
- Liite 4 Pääohjaimen kontrolloima ohjelmistoarkkitehtuuri
- Liite 5 Pääohjaimen toimintaa kuvaava tilakaavio
- Liite 6 Puheohjaimen toiminta: Lauseen syntetisointi
- Liite 7 Puheohjaimen toiminta: Difonin soittaminen
- Liite 8 Verkko-ohjaimen toiminta: Komentojen/viestien vastaanottaminen
- Liite 9 Verkko-ohjaimen toiminta: SNMP-viestin purkaminen
- Liite 10 Verkko-ohjaimen toiminta: SNMP-viestin lähettäminen
- Liite 11 Verkko-ohjaimen toiminta: TRAP-viestin lähettäminen
- Liite 12 SNMP-viestiliikennettä kuvaava sekvenssikaavio 1
- Liite 13 SNMP-viestiliikennettä kuvaava sekvenssikaavio 2
- Liite 14 Lassi Heikkisen ajanseuranta
- Liite 15 Ilkka Leinosen ajanseuranta
- Liite 16 Antero Tossavaisen ajanseuranta

Liite 1: Difonien esiintyminen testiaineistossa

#	Difoni			Difonia vastaava käännetty difoni			Difonin ja sitä vastaavan käännetyin difonin summa		
	difoni	luku- määrä	suhteel- linen osuus	difoni	luku- määrä	suhteel- linen osuus	luku- määrä	suhteel- linen osuus	kumulatiivinen osuus
1	_a	228	0,39 %	a_	2428	4,12 %	2656	4,51 %	4,51 %
2	_n	259	0,44 %	n_	2159	3,66 %	2418	4,10 %	8,61 %
3	at	574	0,97 %	ta	1560	2,65 %	2134	3,62 %	12,23 %
4	is	925	1,57 %	si	810	1,37 %	1735	2,94 %	15,17 %
5	en	1210	2,05 %	ne	486	0,82 %	1696	2,88 %	18,05 %
6	_t	734	1,25 %	t_	811	1,38 %	1545	2,62 %	20,67 %
7	an	1118	1,90 %	na	364	0,62 %	1482	2,51 %	23,19 %
8	et	541	0,92 %	te	829	1,41 %	1370	2,32 %	25,51 %
9	as	580	0,98 %	sa	667	1,13 %	1247	2,12 %	27,63 %
10	it	737	1,25 %	ti	420	0,71 %	1157	1,96 %	29,59 %
11	ak	228	0,39 %	ka	882	1,50 %	1110	1,88 %	31,47 %
12	al	506	0,86 %	la	584	0,99 %	1090	1,85 %	33,32 %
13	in	877	1,49 %	ni	212	0,36 %	1089	1,85 %	35,17 %
14	es	417	0,71 %	se	658	1,12 %	1075	1,82 %	37,00 %
15	av	255	0,43 %	va	801	1,36 %	1056	1,79 %	38,79 %
16	_s	729	1,24 %	s_	264	0,45 %	993	1,68 %	40,47 %
17	st	810	1,37 %	ts	86	0,15 %	896	1,52 %	41,99 %
18	_e	426	0,72 %	e_	465	0,79 %	891	1,51 %	43,50 %
19	tu	452	0,77 %	ut	430	0,73 %	882	1,50 %	45,00 %
20	_i	141	0,24 %	i_	733	1,24 %	874	1,48 %	46,48 %
21	il	363	0,62 %	li	499	0,85 %	862	1,46 %	47,95 %
22	el	413	0,70 %	le	438	0,74 %	851	1,44 %	49,39 %
23	aa	847	1,44 %			0,00 %	847	1,44 %	50,83 %
24	am	295	0,50 %	ma	541	0,92 %	836	1,42 %	52,25 %
25	_k	828	1,40 %			0,00 %	828	1,40 %	53,65 %
26	ai	549	0,93 %	ia	220	0,37 %	769	1,30 %	54,96 %
27	_j	730	1,24 %			0,00 %	730	1,24 %	56,19 %
28	_o	584	0,99 %	o_	122	0,21 %	706	1,20 %	57,39 %
29	aj	85	0,14 %	ja	568	0,96 %	653	1,11 %	58,50 %
30	ot	318	0,54 %	to	322	0,55 %	640	1,09 %	59,59 %
31	no	180	0,31 %	on	456	0,77 %	636	1,08 %	60,66 %
32	tt	625	1,06 %			0,00 %	625	1,06 %	61,73 %
33	ll	612	1,04 %			0,00 %	612	1,04 %	62,76 %
34	im	186	0,32 %	mi	423	0,72 %	609	1,03 %	63,80 %
35	io	105	0,18 %	oi	471	0,80 %	576	0,98 %	64,77 %
36	lo	164	0,28 %	ol	405	0,69 %	569	0,97 %	65,74 %
37	_m	561	0,95 %	m_	3	0,01 %	564	0,96 %	66,70 %
38	ik	287	0,49 %	ki	275	0,47 %	562	0,95 %	67,65 %
39	ei	336	0,57 %	ie	226	0,38 %	562	0,95 %	68,60 %

40	su	219	0,37 %	us	320	0,54 %	539	0,91 %	69,52 %
41	iv	184	0,31 %	vi	325	0,55 %	509	0,86 %	70,38 %
42	em	172	0,29 %	me	294	0,50 %	466	0,79 %	71,17 %
43	ku	278	0,47 %	uk	183	0,31 %	461	0,78 %	71,95 %
44	ty	289	0,49 %	yt	171	0,29 %	460	0,78 %	72,74 %
45	ko	289	0,49 %	ok	164	0,28 %	453	0,77 %	73,50 %
46	_v	446	0,76 %			0,00 %	446	0,76 %	74,26 %
47	ah	151	0,26 %	ha	287	0,49 %	438	0,74 %	75,00 %
48	_p	433	0,73 %	p_	3	0,01 %	436	0,74 %	75,74 %
49	ar	264	0,45 %	ra	167	0,28 %	431	0,73 %	76,47 %
50	ks	310	0,53 %	sk	116	0,20 %	426	0,72 %	77,20 %
51	ek	122	0,21 %	ke	302	0,51 %	424	0,72 %	77,92 %
52	os	294	0,50 %	so	118	0,20 %	412	0,70 %	78,62 %
53	lu	189	0,32 %	ul	210	0,36 %	399	0,68 %	79,29 %
54	ee	386	0,65 %			0,00 %	386	0,65 %	79,95 %
55	ap	90	0,15 %	pa	275	0,47 %	365	0,62 %	80,57 %
56	_h	364	0,62 %			0,00 %	364	0,62 %	81,18 %
57	jo	282	0,48 %	oj	63	0,11 %	345	0,59 %	81,77 %
58	ou	65	0,11 %	uo	263	0,45 %	328	0,56 %	82,33 %
59	ii	310	0,53 %			0,00 %	310	0,53 %	82,85 %
60	nu	105	0,18 %	un	194	0,33 %	299	0,51 %	83,36 %
61	uu	290	0,49 %			0,00 %	290	0,49 %	83,85 %
62	_l	285	0,48 %	l_	4	0,01 %	289	0,49 %	84,34 %
63	er	207	0,35 %	re	80	0,14 %	287	0,49 %	84,83 %
64	ss	272	0,46 %			0,00 %	272	0,46 %	85,29 %
65	mu	179	0,30 %	um	83	0,14 %	262	0,44 %	85,74 %
66	eh	116	0,20 %	he	142	0,24 %	258	0,44 %	86,17 %
67	nt	254	0,43 %	tn	3	0,01 %	257	0,44 %	86,61 %
68	ir	45	0,08 %	ri	191	0,32 %	236	0,40 %	87,01 %
69	op	114	0,19 %	po	109	0,18 %	223	0,38 %	87,39 %
70	ev	102	0,17 %	ve	120	0,20 %	222	0,38 %	87,76 %
71	ov	103	0,17 %	vo	114	0,19 %	217	0,37 %	88,13 %
72	nn	215	0,36 %			0,00 %	215	0,36 %	88,50 %
73	ht	213	0,36 %	th	1	0,00 %	214	0,36 %	88,86 %
74	sy	93	0,16 %	ys	109	0,18 %	202	0,34 %	89,20 %
75	hi	93	0,16 %	ih	107	0,18 %	200	0,34 %	89,54 %
76	uv	60	0,10 %	vu	140	0,24 %	200	0,34 %	89,88 %
77	ip	38	0,06 %	pi	152	0,26 %	190	0,32 %	90,20 %
78	ns	188	0,32 %	sn	1	0,00 %	189	0,32 %	90,53 %
79	kk	185	0,31 %			0,00 %	185	0,31 %	90,84 %
80	mo	66	0,11 %	om	118	0,20 %	184	0,31 %	91,15 %
81	_y	147	0,25 %	y_	36	0,06 %	183	0,31 %	91,46 %
82	sv	182	0,31 %			0,00 %	182	0,31 %	91,77 %
83	ej	30	0,05 %	je	144	0,24 %	174	0,30 %	92,07 %
84	pu	131	0,22 %	up	31	0,05 %	162	0,27 %	92,34 %
85	oy	8	0,01 %	yo	151	0,26 %	159	0,27 %	92,61 %
86	_u	90	0,15 %	u_	67	0,11 %	157	0,27 %	92,88 %

87	ky	73	0,12 %	yk	81	0,14 %	154	0,26 %	93,14 %
88	mm	154	0,26 %			0,00 %	154	0,26 %	93,40 %
89	my	79	0,13 %	ym	72	0,12 %	151	0,26 %	93,66 %
90	ru	59	0,10 %	ur	86	0,15 %	145	0,25 %	93,90 %
91	iu	12	0,02 %	ui	131	0,22 %	143	0,24 %	94,14 %
92	hy	60	0,10 %	yh	83	0,14 %	143	0,24 %	94,39 %
93	ny	61	0,10 %	yn	80	0,14 %	141	0,24 %	94,63 %
94	kn	7	0,01 %	nk	132	0,22 %	139	0,24 %	94,86 %
95	kt	20	0,03 %	tk	114	0,19 %	134	0,23 %	95,09 %
96	au	87	0,15 %	ua	47	0,08 %	134	0,23 %	95,32 %
97	or	68	0,12 %	ro	66	0,11 %	134	0,23 %	95,54 %
98	ep	21	0,04 %	pe	109	0,18 %	130	0,22 %	95,76 %
99	ae	44	0,07 %	ea	82	0,14 %	126	0,21 %	95,98 %
100	ju	92	0,16 %	uj	29	0,05 %	121	0,21 %	96,18 %

Puhesynteesissä käytettyjen ja puhesynteesin ulkopuolelle jätettyjen difonien raja.

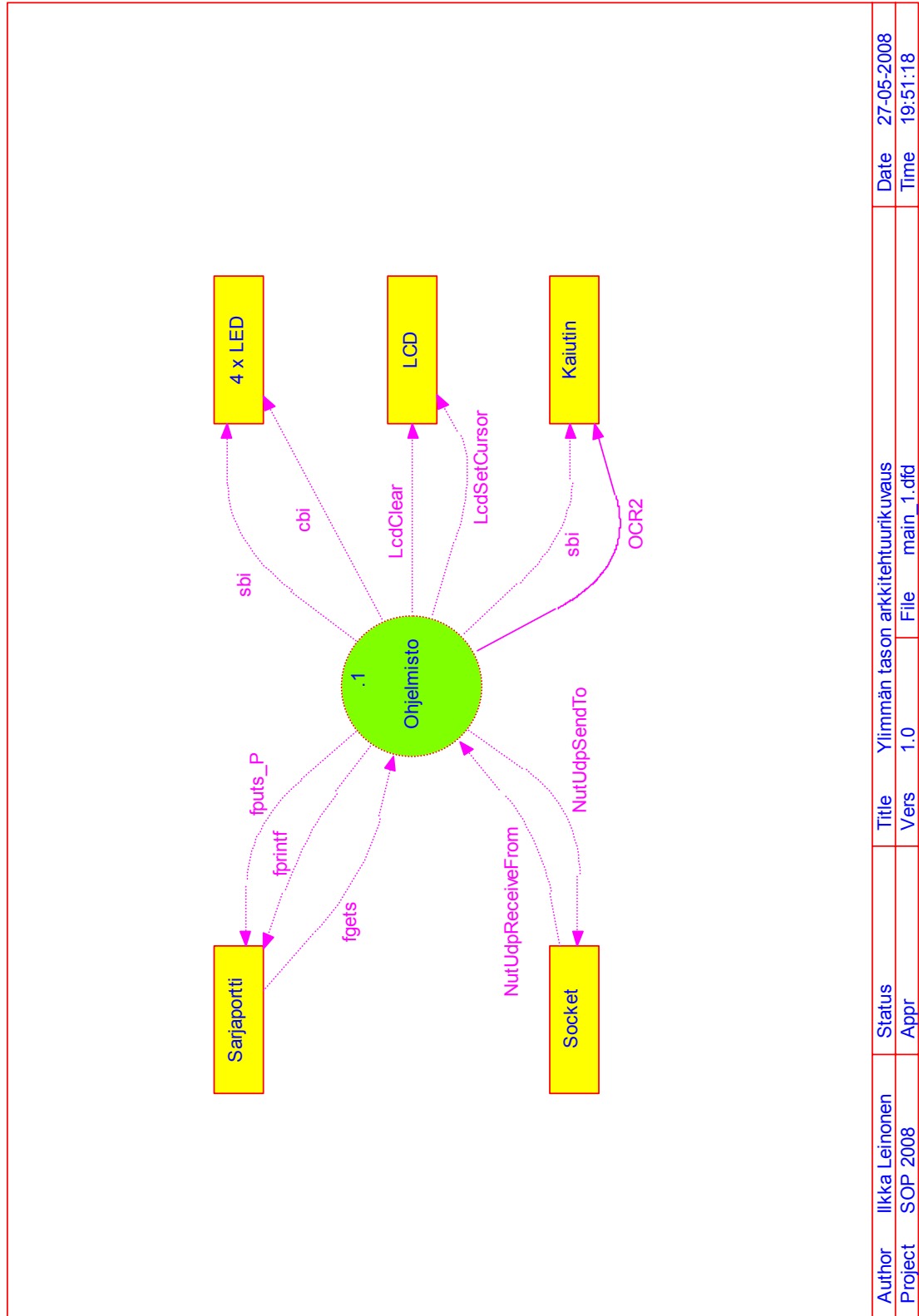
101	ho	42	0,07 %	oh	77	0,13 %	119	0,20 %	96,39 %
102	kr	9	0,02 %	rk	109	0,18 %	118	0,20 %	96,59 %
103	_r	111	0,19 %	r_	1	0,00 %	112	0,19 %	96,78 %
104	hu	43	0,07 %	uh	49	0,08 %	92	0,16 %	96,93 %
105	kl	11	0,02 %	lk	81	0,14 %	92	0,16 %	97,09 %
106	lm	91	0,15 %			0,00 %	91	0,15 %	97,24 %
107	vy	21	0,04 %	yv	67	0,11 %	88	0,15 %	97,39 %
108	lt	84	0,14 %			0,00 %	84	0,14 %	97,53 %
109	oo	83	0,14 %			0,00 %	83	0,14 %	97,68 %
110	ly	38	0,06 %	yl	44	0,07 %	82	0,14 %	97,81 %
111	eu	61	0,10 %	ue	17	0,03 %	78	0,13 %	97,95 %
112	ay	49	0,08 %	ya	21	0,04 %	70	0,12 %	98,07 %
113	mp	68	0,12 %			0,00 %	68	0,12 %	98,18 %
114	rt	31	0,05 %	tr	27	0,05 %	58	0,10 %	98,28 %
115	iy	8	0,01 %	yi	50	0,08 %	58	0,10 %	98,38 %
116	py	42	0,07 %	yp	15	0,03 %	57	0,10 %	98,47 %
117	ij	39	0,07 %	ji	14	0,02 %	53	0,09 %	98,56 %
118	yy	53	0,09 %			0,00 %	53	0,09 %	98,65 %
119	lj	50	0,08 %			0,00 %	50	0,08 %	98,74 %
120	pp	49	0,08 %			0,00 %	49	0,08 %	98,82 %
121	ao	18	0,03 %	oa	28	0,05 %	46	0,08 %	98,90 %
122	rj	46	0,08 %			0,00 %	46	0,08 %	98,98 %
123	rv	45	0,08 %			0,00 %	45	0,08 %	99,05 %
124	ry	13	0,02 %	yr	25	0,04 %	38	0,06 %	99,12 %
125	hm	37	0,06 %			0,00 %	37	0,06 %	99,18 %
126	lv	35	0,06 %			0,00 %	35	0,06 %	99,24 %
127	rr	33	0,06 %			0,00 %	33	0,06 %	99,30 %
128	rs	24	0,04 %	sr	8	0,01 %	32	0,05 %	99,35 %
129	ey	26	0,04 %	ye	6	0,01 %	32	0,05 %	99,41 %
130	ps	17	0,03 %	sp	14	0,02 %	31	0,05 %	99,46 %

131	nv	29	0,05 %			0,00 %	29	0,05 %	99,51 %
132	hn	15	0,03 %	nh	12	0,02 %	27	0,05 %	99,55 %
133	ls	2	0,00 %	sl	24	0,04 %	26	0,04 %	99,60 %
134	lp	19	0,03 %	pl	7	0,01 %	26	0,04 %	99,64 %
135	eo	12	0,02 %	oe	11	0,02 %	23	0,04 %	99,68 %
136	pr	15	0,03 %	rp	5	0,01 %	20	0,03 %	99,71 %
137	rm	15	0,03 %			0,00 %	15	0,03 %	99,74 %
138	hr	5	0,01 %	rh	10	0,02 %	15	0,03 %	99,77 %
139	np	14	0,02 %			0,00 %	14	0,02 %	99,79 %
140	hl	6	0,01 %	lh	7	0,01 %	13	0,02 %	99,81 %
141	hk	13	0,02 %			0,00 %	13	0,02 %	99,83 %
142	hj	12	0,02 %			0,00 %	12	0,02 %	99,85 %
143	hv	12	0,02 %			0,00 %	12	0,02 %	99,87 %
144	mn	1	0,00 %	nm	11	0,02 %	12	0,02 %	99,89 %
145	nj	11	0,02 %			0,00 %	11	0,02 %	99,91 %
146	sm	10	0,02 %			0,00 %	10	0,02 %	99,93 %
147	nl	6	0,01 %			0,00 %	6	0,01 %	99,94 %
148	jy	4	0,01 %	yj	2	0,00 %	6	0,01 %	99,95 %
149	rl	5	0,01 %			0,00 %	5	0,01 %	99,96 %
150	sj	5	0,01 %			0,00 %	5	0,01 %	99,97 %
151	km	3	0,01 %			0,00 %	3	0,01 %	99,97 %
152	rn	3	0,01 %			0,00 %	3	0,01 %	99,98 %
153	tj	2	0,00 %			0,00 %	2	0,00 %	99,98 %
154	uy	2	0,00 %			0,00 %	2	0,00 %	99,98 %
155	sh	2	0,00 %			0,00 %	2	0,00 %	99,99 %
156	pk	2	0,00 %			0,00 %	2	0,00 %	99,99 %
157	tv	1	0,00 %	vt	1	0,00 %	2	0,00 %	99,99 %
158	tp	1	0,00 %			0,00 %	1	0,00 %	100,00 %
159	ph	1	0,00 %			0,00 %	1	0,00 %	100,00 %
160	kv	1	0,00 %			0,00 %	1	0,00 %	100,00 %
	Σ	31106	52,78 %		27831	47,22 %	58937	100,00 %	

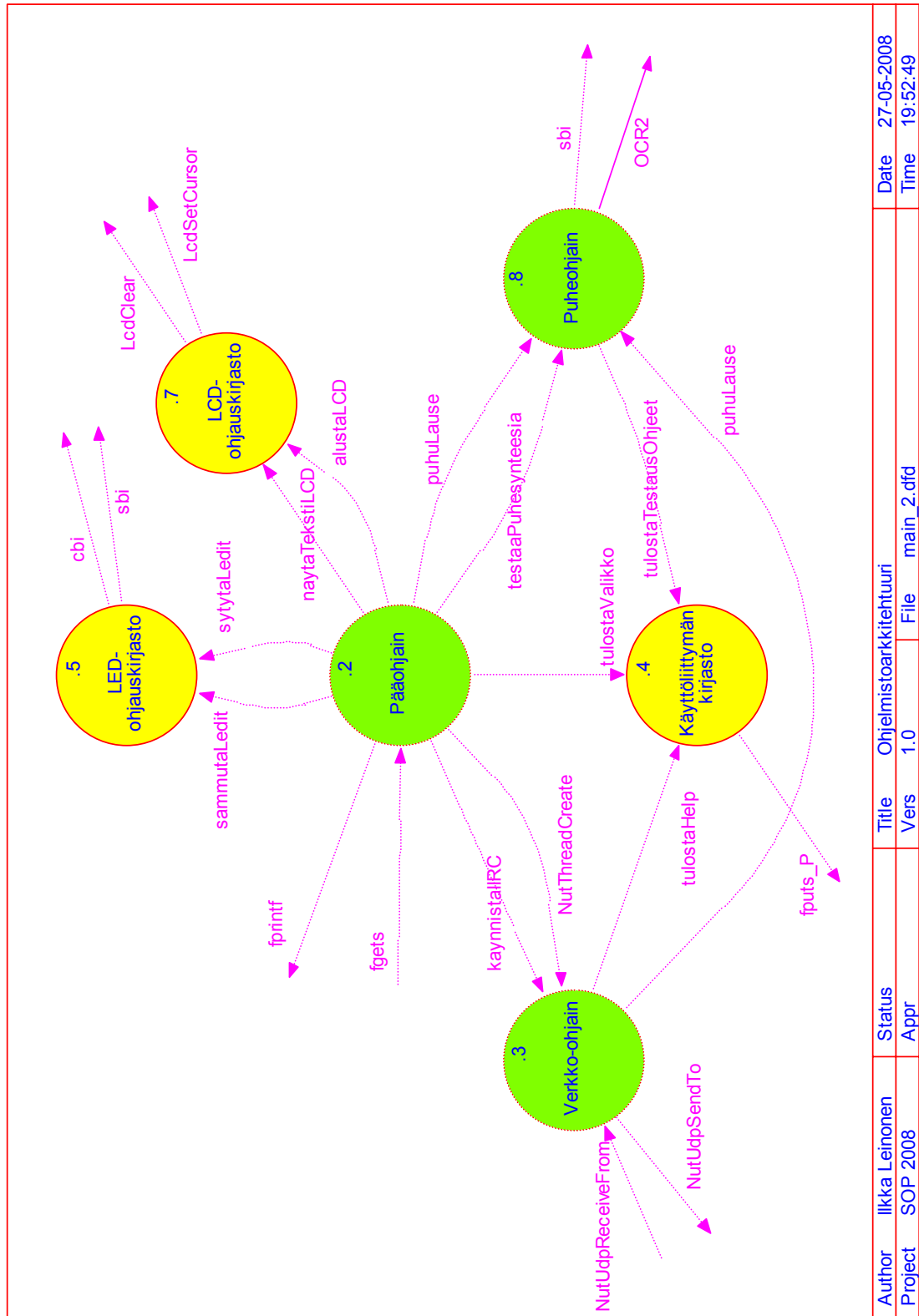
Liite 2: Difonien nauhoituksessa käytetty sanalista

Sana	Difonit	Sana	Difonit
tita	it, a_, ta	erhe	er, he
titan	n_	vessa	ve, ss
ismot	is, t_	rinta	nt, ri
hevonen	en	oppi	op, pi
antero	an, te	voro	vo, or
sana	sa, _s	onni	nn
kala	ka, la	ahteri	ht
selin	se, in	ystävä	ys, _y
vaste	_v, va, e_, st	ihminen	ih
tuli	tu, li	vuosi	vu
maali	aa, ma, i_	ansa	ns
klemmari	le, _k	omena	om
aito	ai, to	kasvo	sv
joi	_j, oi	jee	je
oja	_o, ja	puna	pu
millon	_m, mi, ll, on	yö	yo
olitte	ol, tt	ujuttaa	_u, ju
meikus	me, us, ei, ik	yksi	yk
tyvikuva	vi, ty, ku	amme	mm
pahako	_p, ha, ko	myös	my
arkku	ar, kk	urpo	ur
askel	ke, sk	ui	ui
ulos	ul, os	yhtälö	yh
heepa	_h, ee, pa	ynseä	yn
jos	jo	onko	nk
luomu	_l, uo, mu	itku	tk
iina	ii	auto	au
luun	un, uu	hopea	pe, ea

Liite 3: Ohjelmiston ylimmän tason arkkitehtuurikuvaus

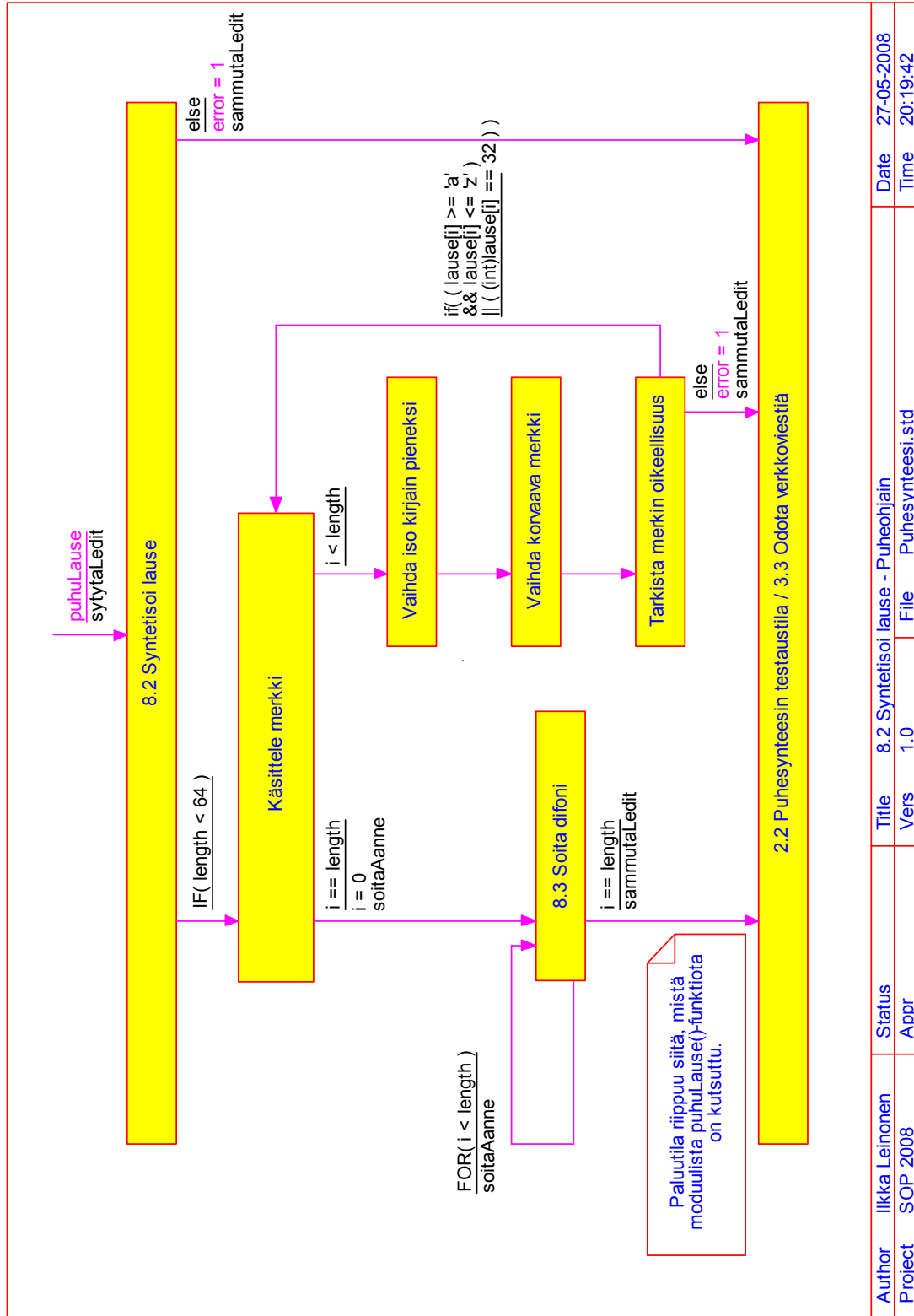


Liite 4: Pääohjaimen kontrolloima ohjelmistoarkkitehtuuri

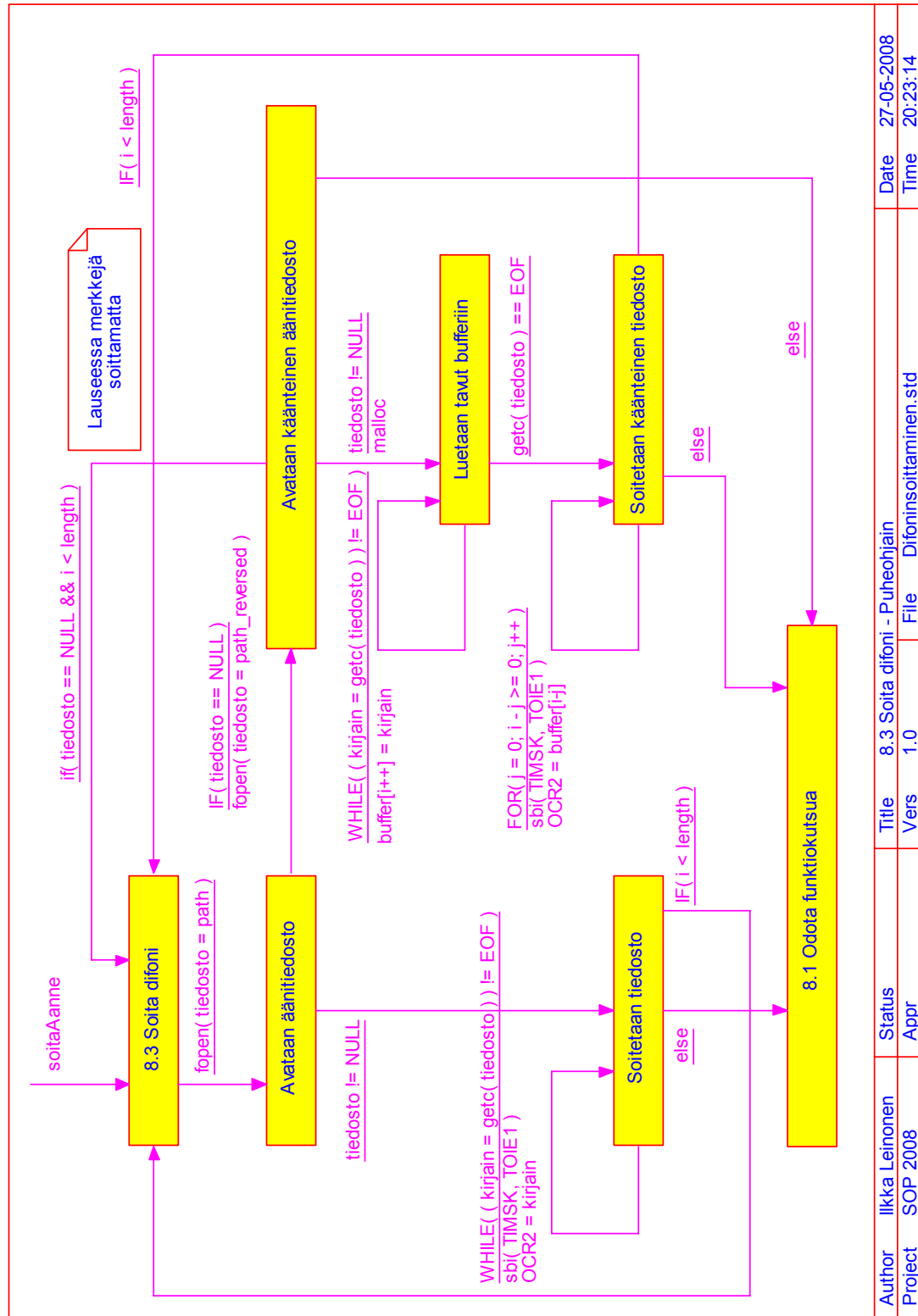


Author	Ilkka Leinonen	Status	Appr	Title	Ohjelmistoarkkitehtuuri	File	main_2.dfd	Date	27-05-2008
Project	SOP 2008	Vers	1.0	Vers	1.0	File	main_2.dfd	Time	19:52:49

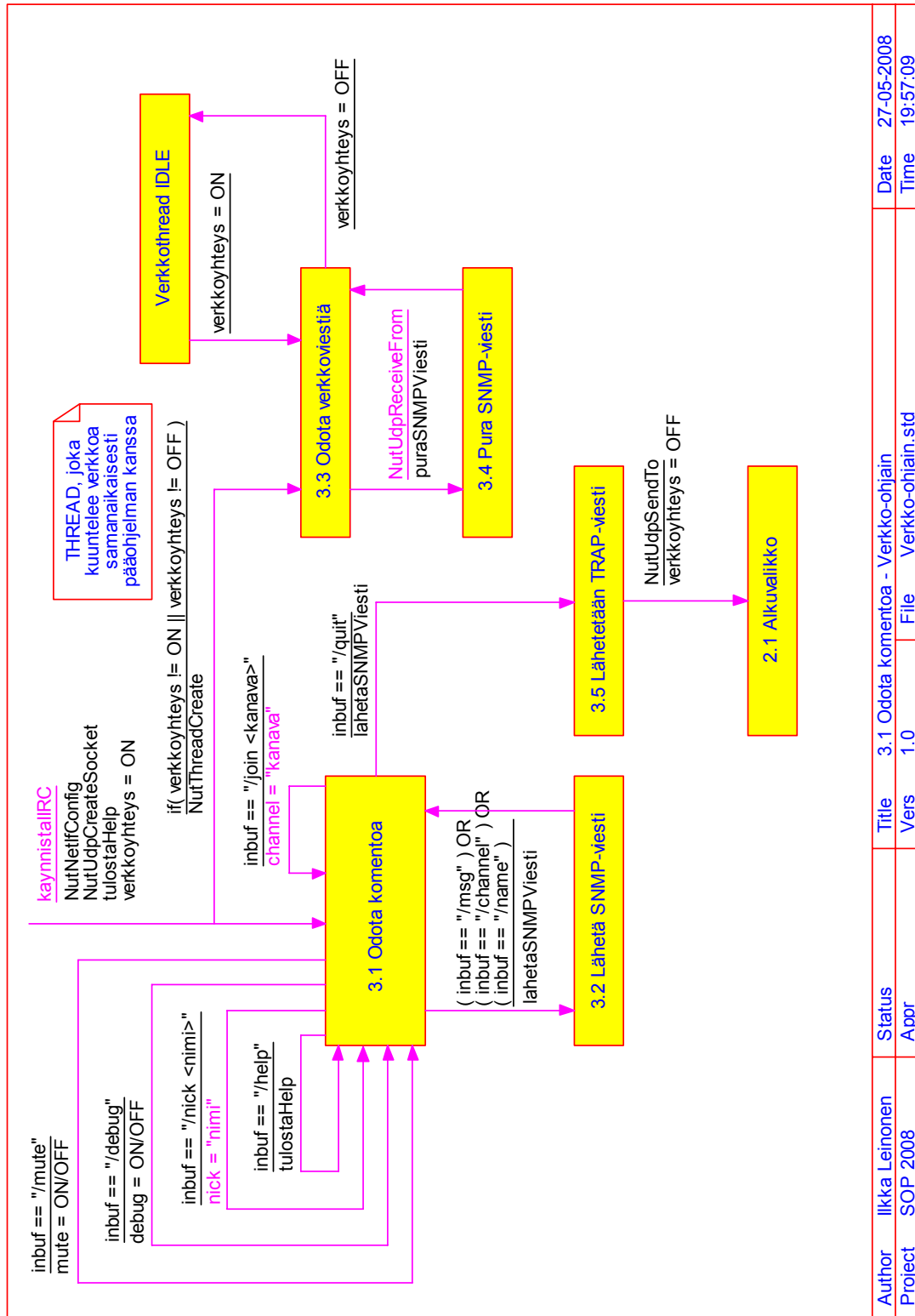
Liite 6: Puheohjaimen toiminta: Lauseen syntetisointi



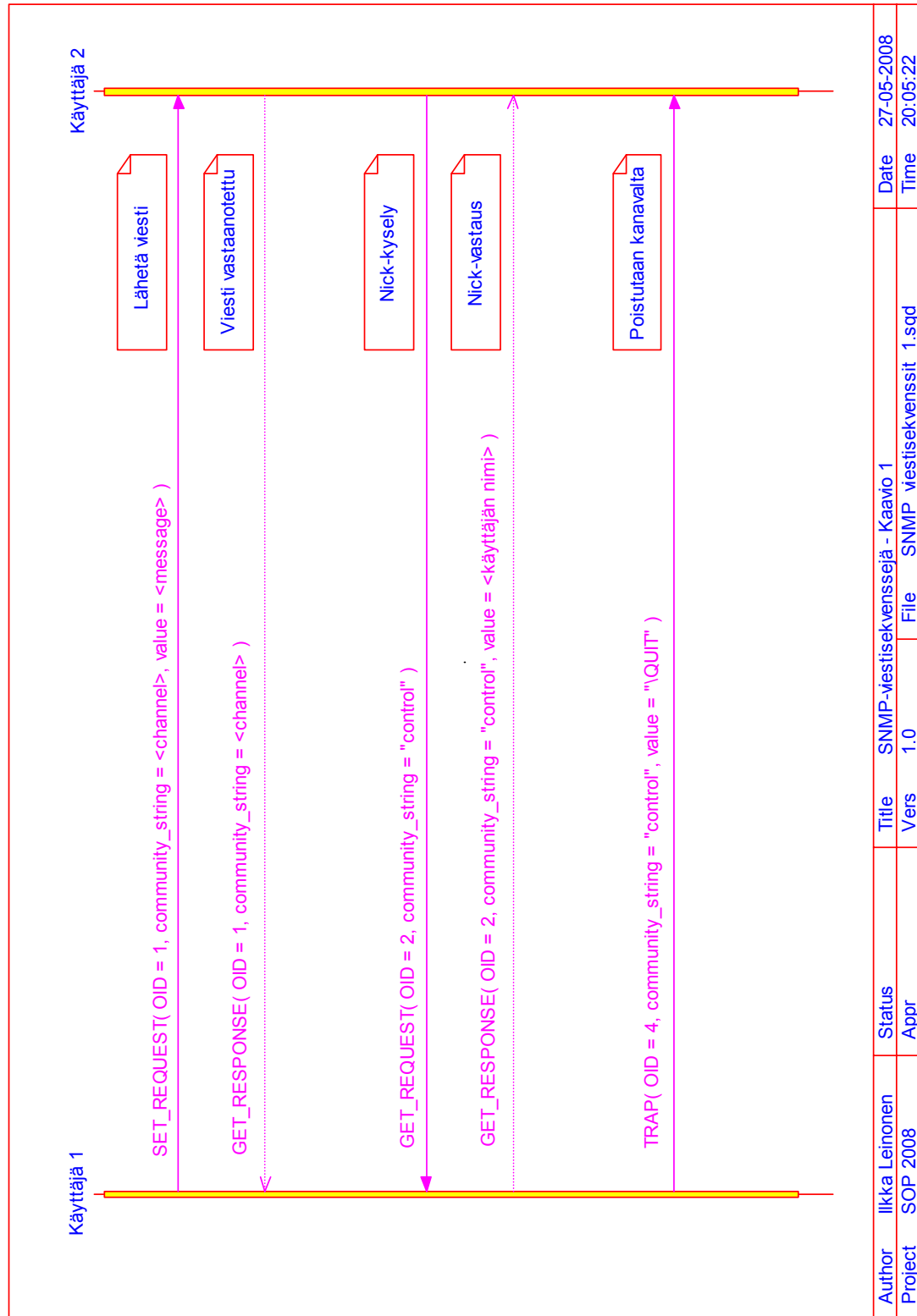
Liite 7: Puheohjaimen toiminta: Difonin soittaminen



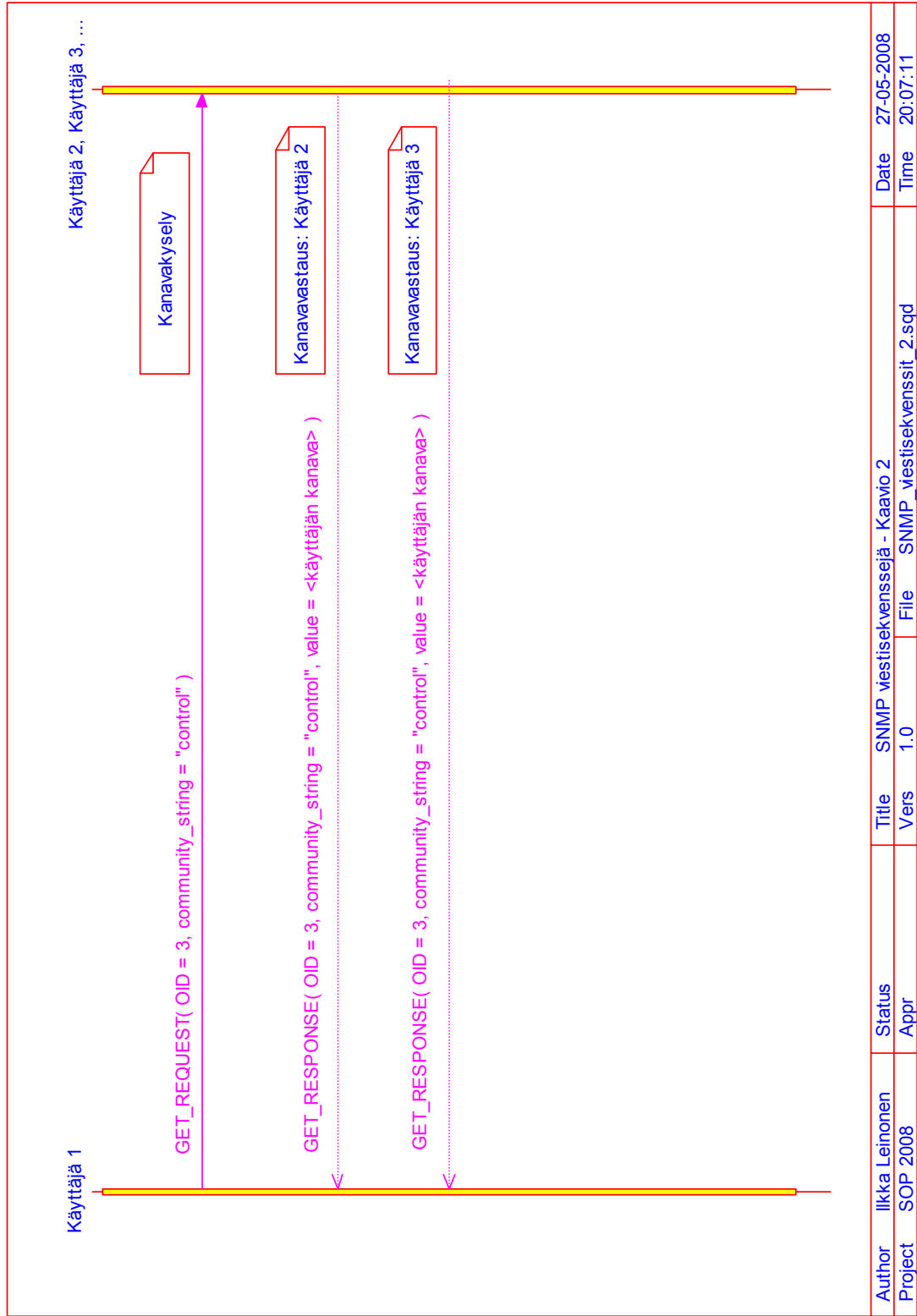
Liite 8: Verkko-ohjaimen toiminta: Komentojen/viestien vastaanottaminen



Liite 12: SNMP-viestiliikennettä kuvaava sekvenssikaavio 1



Liite 13: SNMP-viestiliikennettä kuvaava sekvenssikaavio 2



Author	Ilkka Leinonen	Status	SNMP viestisekvenssejä - Kaavio 2	Date	27-05-2008
Project	SOP 2008	Appr	Vers 1.0	Time	20:07:11
			File	SNMP_viestisekvenssit_2.sqd	

Liite 14: Lassi Heikkisen ajanseuranta

Vaiheet	
0	Luento ja kirjallisuus
1	Suunnittelu ja vaatimusmäärittely
2	Korkean tason suunnittelu
3	Yksityiskohtainen suunnittelu
4	Suunnitelman katselmointi
5	Ohjelmakoodin implementaatio
6	Ohjelmiston katselmointi
7	Ohjelmamoduulien yhdistäminen
8	Debuggaus
9	Testaus
10	Dokumentointi

Päiväys	Aloitus	Lopetus	Tauko	Saldo	Vaihe	Kommentit
2008-01-08	12:15	14:00		1:45	0	Aloitusluento
2008-01-10	12:15	14:00		1:45	0	Puhesynteesiluento
2008-01-14	19:30	20:00		0:30	1	Aiheeseen tutustumista
2008-01-16	8:15	10:00		1:45	0	Laitteiston esittelyä ja käyttöliittymän suunnittelua
2008-01-17	7:50	8:15		0:25	1	Aikataulujen suunnittelua
2008-01-22	14:15	14:45		0:30	1	Aikataulujen suunnittelua
2008-01-31	15:50	24:00	2:00	6:10	0	Aiheeseen perehtymistä
2008-02-01	0:00	1:00		1:00	0	Aiheeseen perehtymistä
2008-02-03	16:00	21:00		5:00	10	Tausta-kappaleen kirjoittamista
2008-02-12	14:00	15:20		1:20	1	Uuden ryhmän jäsenen perehdytys, difonien etsimistä
2008-02-13	15:00	15:30		0:30	2	Korkean tason suunnitelman katselmointi
2008-02-13	15:30	16:00		0:30	0	Kandidaatityön ohjeisiin tutustumista
2008-02-14	15:00	17:40		2:40	10	Tausta-kappaleen parantelua
2008-02-19	10:10	12:00		1:50	10	Dokumentaation parantelua
2008-02-19	12:15	14:00		1:45	0	Suunnitteluluento
2008-02-19	23:00	24:00		1:00	10	Versiohallinnan asennus
2008-02-23	10:30	13:20	1:00	1:50	10	Lähteiden parantelua
2008-02-25	10:20	15:00	0:30	4:10	10	Lähteiden parantelua
2008-02-26	2:00	3:05		1:05	10	Projektinhallintaohjelman asennus
2008-02-27	12:10	15:00		2:50	3	Difonien suunnittelua
2008-03-03	14:00	17:30		3:30	3	Puhesynteesin suunnittelua
2008-03-04	11:30	16:30		5:00	3	Difonivalintaa
2008-03-04	13:30	15:00		1:30	10	Dokumentaation parantelua
2008-03-04	21:40	24:00	0:15	2:05	10	Ratkaisun kuvaus -kappaleen kirjoittamista
2008-03-05	0:00	1:00		1:00	10	Ratkaisun kuvaus -kappaleen kirjoittamista
2008-03-11	14:45	15:15		0:30	2	Äänitysstudion varaaminen
2008-03-12	14:15	16:00		1:45	3	Difonien nauhoittaminen
2008-03-14	13:30	15:15		1:45	9	Difonien editointia
2008-03-17	13:00	15:30		2:30	10	Testaus-kappaleen kirjoittamista
2008-03-19	13:00	16:15		3:15	9	Puhesynteesin testausta
2008-03-20	10:30	18:15	0:45	7:00	5	LED-, LCD- ja puhesynteesiohjaimien implementointia
2008-03-21	18:00	19:00		1:00	10	Testaus-kappaleen parantelua
2008-04-07	13:30	14:30		1:00	10	Dokumentaation parantelua
2008-04-08	12:45	15:00		2:15	10	Dokumentaation parantelua
2008-04-09	11:30	16:20		4:50	10	Dokumentaation parantelua (lyhenteet)
2008-04-10	17:10	18:00		0:50	10	Dokumentaation parantelua
2008-04-11	13:15	14:45		1:30	10	Dokumentaation parantelua
2008-04-11	19:40	21:00		1:20	10	Oikeinkirjoituksen tarkistelu
2008-04-12	15:20	16:40		1:20	10	Oikeinkirjoituksen tarkistelu

2008-04-14	11:00	15:30		4:30	10	Dokumentaation parantelua
2008-04-15	12:15	16:20		4:05	10	Dokumentaation parantelua
2008-04-16	14:20	19:50	0:45	4:45	10	Dokumentaation parantelua, versiohallinnan päivitys
2008-05-05	16:00	19:50	0:20	3:30	10	Tiivistelmä ja Alkulause -kappaleiden kirjoitus
2008-05-07	16:45	19:45		3:00	10	Tuleva kehitys -kappaleen kirjoitus
2008-05-11	18:30	21:17		2:47	10	Testaus-kappaleen parantelua
2008-05-12	16:30	21:00		4:30	10	Testaus-kappaleen parantelua
2008-05-19	12:00	15:00		3:00	10	Dokumentaation parantelua
2008-05-22	14:00	20:00	1:00	5:00	10	Dokumentaation parantelua
2008-05-27	19:00	22:00		3:00	10	Testaus-kappaleen parantelua
2008-05-28	12:30	23:30	3:00	8:00	10	Dokumentaation parantelua
2008-05-29	16:00	21:00		5:00	10	Dokumentaation parantelua
2008-05-30	8:00	12:00		4:00	0	Lopullisen työn esittely

Yhteensä: 137 tuntia

Liite 15: Ilkka Leinosen ajanseuranta

Vaiheet	
0	Luento ja kirjallisuus
1	Suunnittelu ja vaatimusmäärittely
2	Korkean tason suunnittelu
3	Yksityiskohtainen suunnittelu
4	Suunnitelman katselmointi
5	Ohjelmakoodin implementaatio
6	Ohjelmiston katselmointi
7	Ohjelmamoduulien yhdistäminen
8	Debuggaus
9	Testaus
10	Dokumentointi

Päiväys	Aloitus	Lopetus	Tauko	Saldo	Vaihe	Kommentit
2008-02-11	11:00	14:00		3:00	1	Projektivaatimuksiin tutustuminen
2008-02-12	10:00	13:00		3:00	1	Puhesynteesiin tutustuminen
2008-02-12	14:00	16:00		2:00	1	Ryhmätapaaminen
2008-02-13	12:30	16:00		3:30	2	Suunnitteludokumentin kirjoittaminen
2008-02-18	12:00	15:30		3:30	10	Suunnitteludokumentin kirjoittaminen
2008-02-19	10:00	11:30		1:30	10	Dokumentaation muokkaaminen
2008-02-19	12:15	14:00		1:45	0	Suunnitteluluento
2008-02-21	10:00	15:00	1:00	4:00	3 & 5	Pääohjaimen implementointi
2008-02-22	12:00	17:00	1:00	4:00	3 & 5	Käyttöliittymän implementointi
2008-02-25	10:00	14:00	0:30	3:30	3	Suunnitteludokumentin päivittäminen
2008-03-04	12:00	16:00		4:00	1	Verkko-ohjaimen suunnittelu
2008-03-05	13:00	16:30		3:30	1	Verkko-ohjaimen suunnittelu
2008-03-11	13:00	16:00		3:00	5	Verkko-ohjaimen implementointi
2008-03-12	12:30	16:00		3:30	10	Verkko-ohjaimen implementointi
2008-03-13	13:00	16:00		3:00	5	Difonien äänittäminen
2008-03-17	11:00	12:30		1:30	3	SA/SD kaavioiden muokkaaminen
2008-03-18	13:00	16:00		3:00	3	SA/SD kaavioiden muokkaaminen
2008-03-20	10:30	18:00	2:00	5:30	5	LCD-, LED- ja Puheohjaimen impl.
2008-03-25	10:00	12:00		2:00	0	Milestone 2 - Demonstraatio
2008-04-08	12:40	14:00		1:20	10	Ohjelmistoarkkitehtuurin päivitys
2008-04-11	10:00	14:40	1:30	3:10	5	Puhesynteesin implementointi
2008-04-15	12:00	16:40		4:40	5	Puhesynteesin implementointi
2008-04-18	13:30	16:15		2:45	5	Verkko-ohjaimen implementointi
2008-04-21	13:00	15:30		2:30	5	Verkko-ohjaimen implementointi
2008-04-24	13:30	16:50		3:20	5	Verkko-ohjaimen implementointi
2008-04-29	11:00	16:30	1:10	4:20	5	Verkko-ohjaimen implementointi
2008-05-07	13:00	17:00		4:00	10	Dokumentaation päivitys
2008-05-12	13:00	18:00		5:00	5	Verkko-ohjaimen implementointi
2008-05-13	14:00	18:00		4:00	10	Dokumentaation päivitys
2008-05-20	14:30	16:15		1:45	10	Dokumentaation päivitys
2008-05-22	14:00	16:30		2:30	5	Verkko-ohjaimen implementointi
2008-05-23	14:45	16:20		1:35	5	Verkko-ohjaimen implementointi
2008-05-27	13:00	20:40	1:00	6:40	3 & 5	Verkko-ohjaimen implementointi
2008-05-28	12:00	16:00		4:00	5 & 9	Testaus ja bugien korjaus
2008-05-29	19:30	23:30	2:00	2:00	10	Dokumentin viimeistely
2008-05-30	10:00	11:00		1:00	11	Lopullisen työn esittely

Yhteensä: 113 tuntia

Liite 16: Antero Tossavaisen ajanseuranta

Vaiheet	
0	Luento ja kirjallisuus
1	Suunnittelu ja vaatimusmäärittely
2	Korkean tason suunnittelu
3	Yksityiskohtainen suunnittelu
4	Suunnitelman katselmointi
5	Ohjelmakoodin implementaatio
6	Ohjelmiston katselmointi
7	Ohjelmamoduulien yhdistäminen
8	Debuggaus
9	Testaus
10	Dokumentointi

Päiväys	Aloitus	Lopetus	Tauko	Saldo	Vaihe	Kommentit
2008-01-08	12:15	14:00	0:15	1:30	0	Aloitusluento
2008-01-22	14:15	14:45		0:30	1	Projektin suunnittelua
2008-01-31	15:50	18:10	2:00	0:20	10	SOTA-tutkimusta
2008-02-01	12:15	16:00	1:00	2:45	10	Fonetiikkaan perehtymistä
2008-02-02	14:00	19:00	2:00	3:00	10	Fonetiikkaan perehtymistä
2008-02-03	13:00	22:15	3:00	6:15	10	Kandidaatityön kappaleiden 2.1 ja 2.4 kirjoittamista
2008-02-19	10:10	12:00		1:50	10	Kandidaatityön muotoilua
2008-02-19	12:15	14:00	0:15	1:30	0	Suunnitteluluento
2008-02-23	13:00	18:00	2:00	3:00	10	Fonetiikkaan perehtymistä ja kandidaatityön kirjoittamista
2008-02-25	10:00	14:00	0:30	3:30	10	Kandidaatityön yhdistämistä ja muotoilua
2008-03-03	14:00	17:30		3:30	2	Puhesynteesin suunnittelua
2008-03-04	11:00	16:30		5:30	2	Difonien valinnan suunniteelua
2008-03-05	11:30	13:30		2:00	2	Difonien suunnittelua
2008-03-11	14:45	15:15		0:30	11	Äänitysstudion varaus
2008-03-12	14:15	16:00		1:45	11	Difonien nauhoitusta
2008-03-14	13:30	15:15		1:45	1	Difonien editointia
2008-03-17	13:00	18:30	1:30	4:00	3	Difonien editointia
2008-03-18	21:00	23:00		2:00	3	Difonien editointia
2008-03-19	13:00	16:15		3:15	5	LCD:n implementointi
2008-03-20	10:30	18:30	3:00	5:00	5	Ohjelmistokehitystä ja koodin katselmointia
2008-04-07	13:30	14:30		1:00	10	Kandidaatityön kirjoitusta
2008-04-08	11:45	15:00		3:15	10	Kandidaatityön kirjoitusta
2008-04-09	11:30	16:20		4:50	10	Kandidaatityön kirjoitusta
2008-04-10	12:00	18:00		6:00	10	Kirjoitusluento, kandidaatityön kirjoitusta
2008-04-11	11:00	14:30		3:30	10	Kandidaatityön kirjoitusta
2008-04-13	22:30	23:00		0:30	10	Ajanseurannan hallintaa
2008-04-14	11:00	16:00	0:30	4:30	10	Kandidaatityön muokkausta
2008-04-15	12:00	16:15		4:15	10	Kandidaatityön kirjoitusta ja muokkausta
2008-04-16	13:00	16:15		3:15	10	Kandidaatityön kirjoitusta ja muokkausta
2008-04-17	11:30	14:30		3:00	3	Difonien leikkely ja konvertointi
2008-04-18	11:30	13:00		1:30	10	Projektin hallintaa
2008-04-28	11:00	11:45		0:45	10	Difonien leikkely ja konvertointi
2008-04-29	11:15	16:45	0:30	5:00	10	Difonien leikkely ja konvertointi, SNMP-nuusinta
2008-05-07	16:00	19:00		3:00	10	Kandidaatityön kirjoitusta ja muokkausta
2008-05-08	16:00	23:30		7:30	10	Kandidaatityön kirjoitusta ja muokkausta
2008-05-10	11:00	13:30		2:30	10	Kandidaatityön kirjoitusta ja muokkausta
2008-05-11	19:00	21:00		2:00	10	Kandidaatityön kirjoitusta ja muokkausta
2008-05-12	17:00	21:00		4:00	10	Kandidaatityön kirjoitusta ja muokkausta
2008-05-22	14:00	20:00	1:00	5:00	10	Kandidaatityön kirjoitusta ja muokkausta

2008-05-25	14:00	14:30		0:30	10	Kandidaatintyön kirjoitusta ja muokkausta
2008-05-27	16:30	12:00		4:30	10	Kandidaatintyön kirjoitusta ja muokkausta
2008-05-28	10:30	18:00	3:00	4:30	10	Kandidaatintyön kirjoitusta ja muokkausta
2008-05-29	16:00	19:00		3:00	10	Kandidaatintyön kirjoitusta ja muokkausta
2008-05-30	8:00	12:00		4:00	10	Lopullisen työn esittely

Yhteensä: 135 tuntia