



LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

RADIOMODUULI RFM23B:N OHJELMOINTI

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietokone-elektronikka
Opinnäytetyö
Kevät 2013
Tarmo Ahonen

Lahden ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma

AHONEN, TARMO:

Radiomoduuli RFM23B:n ohjelmointi

Tietokone-elektronikan opinnäytetyö, 33 sivua, 4 liitesivua

Kevät 2013

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyö käsittelee radiomoduulin RFM23B ohjelmointia. Kesällä 2012 Lahden ammattikorkeakoulun tekniikan alan elektroniikan laboratorion toimeksiannosta suunnittelemani langaton kiinteistöanturijärjestelmä jäi radiomoduulin ohjelmoinnin osalta keskeneräiseksi. Näin radiomoduulin ohjelmointi valikoitui luontevasti opinnäytetyön aiheeksi. Opinnäytetyön motivaationa toimi radiomoduulin ohjelmointia varten tarvittavan tiedon hankkiminen ja järjestäminen helposti hyödynnettävään muotoon.

Aluksi työssä tarkasteltiin radiomoduulien osuutta kokonaisjärjestelmän näkökulmasta. Tämän jälkeen työssä selvitettiin radiomoduuli RFM23B:n ohjelmoinnin ja toiminnallisuuden kannalta oleelliset ominaisuudet. Lisäksi tarkasteltiin Texas Instrumentsin mikrokontrollereiden MSP430G2553 ja Stellaris LM4F120 ominaisuuksia radiomoduulin ohjelmoinnin kannalta. Virrankulutuksen optimointia selvitettiin virtabudjetin laskennan ja viiveiden huomioimisen näkökulmasta. Radiotien ominaisuuksia käsiteltiin langattoman tiedonsiirron näkökulmasta. Näiden tietojen pohjalta aloitettiin varsinainen ohjelmointi, joka tämän työn julkaisuvaiheessa oli vielä osittain kesken.

Koska SPI-väylän toimivuus on radiomoduulin hyödyntämisen kannalta ehdoton vaatimus, on sen toiminnallisuuden toteuttamista selvitetty yksityiskohtaisemmin MSP430-mikrokontrollerin ja radiomoduulin välisessä tiedonsiirrossa.

Varsinainen työ jatkuu vielä tämän opinnäytetyön jälkeenkin ohjelmiston viimeistelynä ja testaamisena. Funktioiden kuvaukset ja testisuunnitelma on lisätty tämän opinnäytetyön liitteisiin.

Asiasanat: sulautettu, ohjelmointi, langaton, SPI-väylä, virtabudjetti

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Information Technology

AHONEN, TARMO:

Programming of radio module RFM23B

Bachelor's Thesis in computer electronics, 33 pages, 4 pages of appendices

Spring 2013

ABSTRACT

This thesis deals with the programming of radio module RFM23B. There was a previous project done for the electronics laboratory of Lahti University of Applied Sciences, Faculty of Technology, in the summer of 2012. The objective was to plan a wireless sensor network for building maintenance needs. There was not enough time for programming the radio modules for the project, so their programming was chosen as the subject of this Bachelor's thesis. The main motivation for the thesis was to gather the required information and put that information in logical order to be able to program radio modules.

Firstly the part that radio modules play in the entire system was studied. Then data was gathered on the essential properties of radio module RFM23B. After that the properties of Texas Instrument's micro-controllers MSP430G2553 and Stellaris LM4F120 were examined from the programming viewpoint. For power consumption optimization, a power budget was calculated and the delays caused by power state changes were examined. Radio path properties that affect wireless data transfer were also briefly examined. After this groundwork, actual programming started, but some parts remained unfinished in the timeframe of the thesis.

The SPI interface is essential for both programming the module and data transfer; therefore the programming of the SPI interface between MSP430 and the radio module is thoroughly explained in the thesis.

Work will continue after the thesis: the rest of the software must be designed and tested. Function descriptions and a testing plan for the software have been added as appendices.

Key words: embedded, programming, wireless, SPI interface, power budget

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	KOKONAISJÄRJESTELMÄN PÄÄPIIRTEET	2
2.1	Kokonaisjärjestelmälle asetetut tekniset vaatimukset	2
2.2	Kokonaisjärjestelmälle asetetut taloudelliset vaatimukset	3
2.3	Langattoman tiedonsiirron asettamat rajoitteet	3
3	RADIOMODUULI RFM23B	4
3.1	Radiomoduulin ydin integroitu piiri Silicon Labs Si4431	4
3.2	Mikrokontrollerin ja radiomoduulin välinen SPI-väylä	6
3.3	RFM23B radiomoduulien välisen liikenteen ominaisuudet	7
3.4	Ohjelmoitavat keskeytykset	10
3.5	Muut hyödynnettävät ominaisuudet	11
3.5.1	Automaattinen taajuudensäätö AFC	11
3.5.2	Signaalin voimakkuuden mittaus RSSI	11
3.5.3	Herätysajastin WUT	11
3.5.4	Paristojännitteen ilmaisim LBD	12
3.5.5	Lepotila-aktiivitila ajastin TLDC	12
4	ANTURIYKSIKÖN MIKROKONTROLLERI MSP430G2553	13
4.1	Rekisterit ja keskeytysvektorit	14
4.2	Muistin organisointi	14
4.3	Oheislaitteiden määrittely ja rekisteriasetusten tekeminen	15
4.4	SPI master mode Gracen avulla toteutettuna	17
4.5	Käytettävät toimintatilat ja virransäästö	18
5	TIEDONKERUUYKSIKÖN MIKROKONTROLLERI LM4F120H5QR	20
5.1	CORTEX M4:n rekisterit	20
5.2	Rekisteriasetusten haasteellisuus ja ratkaisumallit	22
6	VIRRANKULUTUKSEN OPTIMOINTI	23
6.1	Virtabudjetin laatiminen	23
6.2	Järjestelmän virransäästötoimintojen aiheuttamat viiveet	24
7	RADIOTIEN OMINAISUUDET	25
7.1	Shannon-Hartley laki	25
7.2	Vapaan tilan vaimennus ja linkkibudjetti	26

7.3	Radiojärjestelmän topologia	27
7.4	Radiotien ominaisuuksien huomiointi ohjelmoinnissa	28
8	VARSINAISEN OHJELMOINNIN ALKUVAIHEET	29
8.1	Ensimmäinen vaihe – oheislaitteiden alustaminen	29
8.2	Toinen vaihe – tarvittavien keskeytysten käyttöönotto	30
8.3	Kolmas vaihe – datalehdistä tehtyjen havaintojen huomioiminen	31
9	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET	34
	LIITTEET	37

1 JOHDANTO

Motivaationa tähän opinnäytetyöhön oli käytännön tarve saada kesällä 2012 suunniteltuun kiinteistöanturijärjestelmään langaton tiedonsiirtoyhteys. Langattoman tiedonsiirtoyhteyden toteuttavilta radiomoduuleilta vaadittiin edullista hintaa ja 433 MHz:n ISM radiotaajuusalueella toimimista. Edullinen hinta määräytyi myyntikatelaskennalla lasketun komponenttibudjetin asettamasta maksimirajasta. Taajuusalueen määräytymisen perustana olivat riittävä kantama ja tiedonsiirtomäärä. 433 MHz:n ISM taajuus on testatusti luotettavin valinta ulkoanturisyksiköille. (Mikhaylov, Tervonen, Heikkilä & Käsäkoski 2012 3 – 4.)

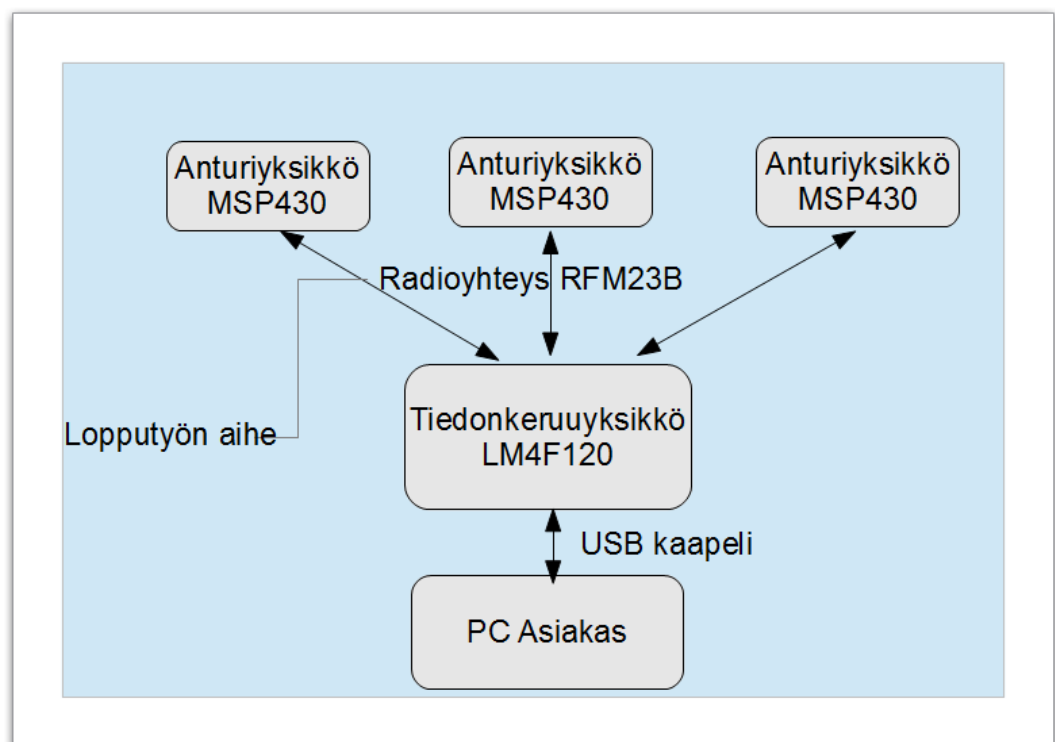
Hinnaltaan riittävän edullinen moduuli löytyi Hope Microelectronicsin tuotannosta, eli 433 MHz:n ISM taajuusalueella toimiva radiomoduuli HopeRF RFM23B FSK. Moduuli pohjautuu Silicon Labsin Si4431-lähetinvastaanotinpiiriin (Silicon Labs and Hope Microelectronics). Hinnan edullisuus johtuu osaltaan siitä, että piiriä ei suositella piirivalmistajan toimesta enää uusiin tuotteisiin (Si4430/31/32 RF Transceivers 2013). Edullisen hinnan lisäksi radiomoduulilta vaadittiin radiohäiriömääräysten emissiorajojen noudattamista. EU:n talousalueella vaaditaan radio ja telepäätelaitedirektiivin R & TTE asettamien rajoitusten täyttämistä. Käytettävä mittaussuunnitelma RFM23B:n tapauksessa on taajuusalueen perusteella ETSI standardi EN 300 220. (Evjen 2003 1.) Valmistajan sivuilta löytyvät moduulin mittaustulokset, joiden mukaan moduuli täyttää standardin vaatimukset ongelmitta. (Hope Microelectronics Co Ltd 2013.)

Tässä työssä paneudutaan laitteistonläheiseen ohjelmointiin, tavoitteena löytää sopivat rekisteriasetukset radiomoduulin jouhevalle toiminnalle. Tavoitteen saavuttamiseksi tutustutaan huolellisesti ohjelmoitavan laitteiston ominaisuuksiin, erityisesti niiden rekistereihin ja SPI-väylän toimintaan.

2 KOKONAIJSÄRJESTELMÄN PÄÄPIIRTEET

Langatonta tiedonsiirtoa käytetään kokonaisjärjestelmässä mittaustiedon siirtoon antureiden ja tiedonkeruuyksikön välillä.

Anturit toteutetaan Texas Instrumentsin MSP430 mikrokontrollereilla, tiedonkeruuyksikössä käytössä on Texas Instrumentsin LM4F120 mikrokontrolleri, tiedonkeruuyksikkö on liitettävissä Qt-pohjaista asiakasohjelmaa käyttävään tietokoneeseen, jossa olevaan tietokantaan mittausarvot saadaan siirrettyä. Rajallinen määrä mittausarvoja voidaan myös tallentaa itse tiedonkeruuyksikköön. Langaton tiedonsiirto anturiyksikön ja tiedonkeruuyksikön välillä toteutetaan HopeRF RFM23B radiomoduuleilla. Kuviossa 1 esitetään kokonaisjärjestelmän rakenne.



Kuvio 1. Kokonaisjärjestelmä ja tämän työn osuus kokonaisjärjestelmästä

2.1 Kokonaisjärjestelmälle asetetut tekniset vaatimukset

Järjestelmää käytetään kiinteistötekniisiin mittauksiin. Ulkoanturin käyttölämpötila-alue on Suomessa vallitsevan ilmaston mukainen. Mitattavia

suureita ovat ilman lämpötila, ilman suhteellinen kosteus ja ulkona mahdollisesti jatkossa myös tuulen nopeus ja suunta. Koska anturit ovat virransyötöltään itsenäisiä yksiköitä, on virransäästö huomioitava komponenttien valinnassa ja ohjelmiston suunnittelussa. Antureiden tulee olla helposti siirrettäviä, asentamisen on onnistuttava rakenteita rikkomatta, joten tiedonsiirtoväylänä antureiden ja tiedonkeruuyksikön välillä on käytettävä radiotietä.

2.2 Kokonaisjärjestelmälle asetetut taloudelliset vaatimukset

Järjestelmän tarvetta ja hinnoittelua kartoitettiin keskustelemalla tuntemieni ajateltuun asiakassegmenttiin kuuluvien henkilöiden kanssa. Jotta tuotteella olisi kysyntää kiinteistöjen lämpötilan ja kosteuden tilapäisessä tarkkailussa, pitää muutaman anturin järjestelmän kokonaishinnan jäädä alle 500 euron.

Järjestelmän kokonaishinnasta johdettiin suunnitteluvaiheessa kaupallisesti kannattavan valmistuksen sallimat maksimihinnat kaikille yksiköille.

Komponenttilistauksen jälkeen oli havaittavissa että valmiin radiomoduulin hankintahinnan kannattavuusraja on noin 7 euroa.

2.3 Langattoman tiedonsiirron asettamat rajoitteet

Radiomoduulien välityksellä tapahtuvalla tiedonsiirrolla on rajoitteita.

Siirtonopeutta rajoittavat yhteyden kaistanleveys ja signaalin voimakkuus sekä vastaanotinosan herkkyys. Yhteyden peruslaatuun vaikuttavat radiomoduulien keskinäinen etäisyys sekä radiomoduulien välissä olevien kiinteiden esteiden rakenne. Lisäksi yhteyden laatuun vaikuttavat monitie-etenemisen ja heijastumisen aiheuttama haitta signaalin eheydessä, muiden laitteiden aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt sekä samalla taajuusalueella toimivien muiden radiolähettimien aiheuttama interferenssi. (Tiusanen 2010, 1.)

433 MHz:n ISM taajuudella toimivan radiomoduulin tapauksessa signaalin voimakkuutta ja kaistanleveyttä rajoittavat viranomaismääräykset. Lähettimen efektiivinen säteilyteho ERP on 25 mW, kun toimintajakso on alle 10 % yhden tunnin aikana. (Viestintävirasto 2013, 69.)

3 RADIOMODUULI RFM23B

Ohjelmoinnin kohteena on radiomoduuli HopeRF RFM23B. Kyseessä on edullisen hankintahinnan omaava, (heinäkuussa 2012 Transfer Multisort Elektronikista hankittuna 6,03 €/kpl kolmen kappaleen erissä) korkean integraatioasteen 433 MHz:n ISM taajuusalueen lähetinvastaanotin.

Radiomoduulin ohjelmointi tapahtuu rekisteriasetusten välityksellä, rekistereitä on kaiken kaikkiaan 128 kappaletta, joista osa varattuja ja osalla taas säädetään useampaa muuttujaa. Rekisteriasetusten tekemistä varten on olemassa Excel-laskentataulukko, josta saadaan rekisteriarvot halutuilla parametreilla. Nämä saadut arvot tulee syöttää ulkoisella mikrokontrollerilla sijaitsevasta ohjelmasta SPI-väylää pitkin radiomoduulin rekistereille.

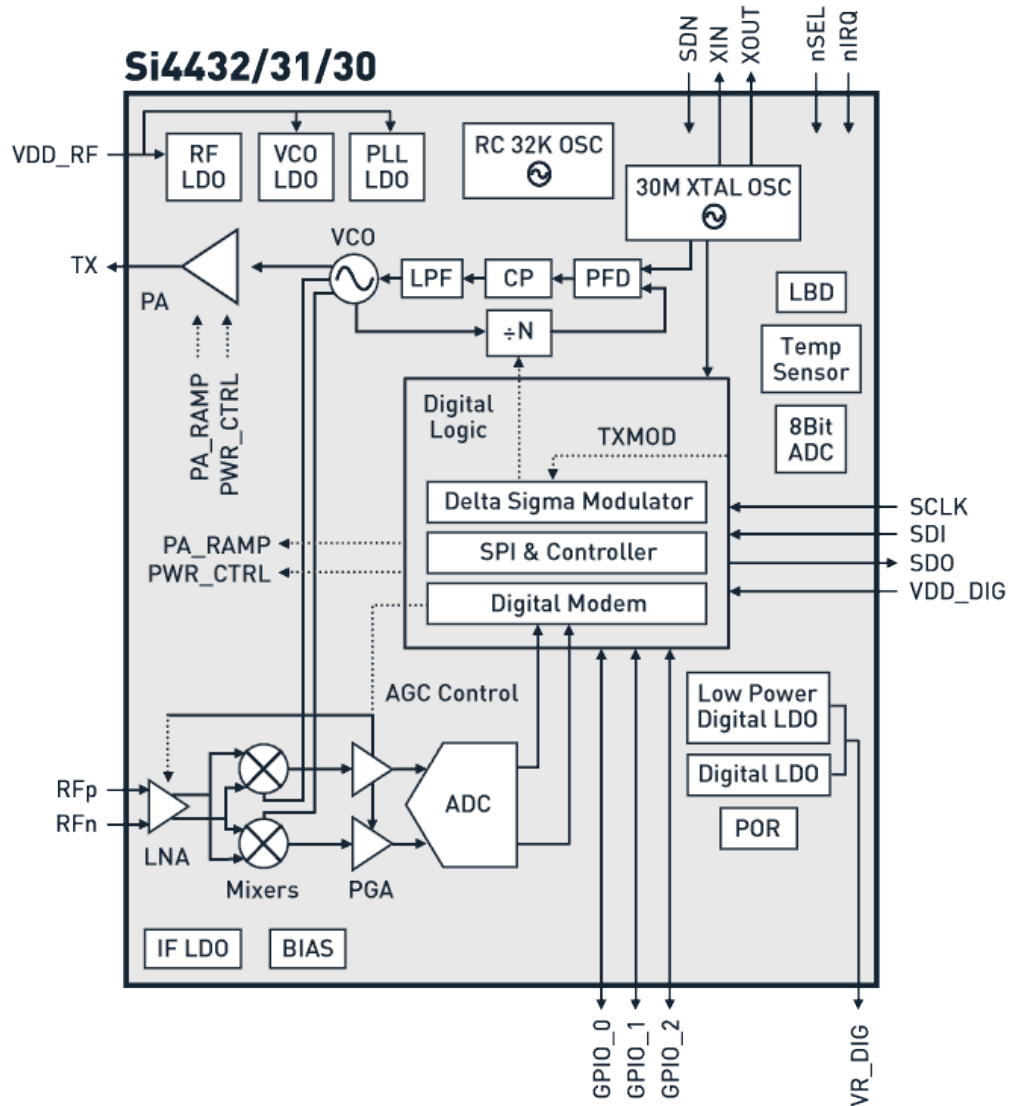
Myös radiomoduulin lähtevän datan puskuri RX FIFO ja saapuvan datan puskuri TX FIFO käyttävät tiedonsiirtoon mikrokontrollereiden kanssa SPI-väylää. Anturiyksikön mikrokontrollerina toimii Texas Instrumentsin MSP430G2553, tiedonkeruuyksikön mikrokontrolleri on Texas Instrumentsin LM4F120H5QR.

3.1 Radiomoduulin ydin integroitu piiri Silicon Labs Si4431

Radiomoduulin ydin on integroitu piiri Si4431. Sitä käytettäessä on radiomoduulin kytkentään vaadittava ulkoisten komponenttien määrä suhteellisen pieni. Ulkoinen 30 MHz:n kide vaaditaan, usein otetaan käyttöön myös ulkoinen 32,768 kHz:n kide, lisäksi kelat ja kondensaattorit antennin impedanssin sovittamiseksi. Piirin valmistajalta saatavassa referenssikytkennässä (LIITE 1.) on yhteensä 37 komponenttia. RFM23B on komponenttimäärältään vähäisempi koska EBID Eeprom -osuutta ei moduulissa ole.

Piirissä on yhdeksän toiminnallista lohkoa: matalakohinainen tulevan signaalin vahvistin RX LNA (Low Noise Amplifier), tulevan signaali I-Q sekoitin RX I-Q Mixer, ohjelmoitava vahvistin sekoittimen jälkeiselle signaalille PGA (Programmable Gain Amplifier), analogia-digitaalimuunnin ADC, digitaalinen modeemi, vaihelukittu silmukka syntetisaattori PLL Synthesizer, jännitteellä ohjattava oskillaattori VCO, lähtevän signaalin tehovahvistin PA, 30 MHz kideoskillaattorin muut komponentit paitsi itse kide, 6 kappaletta LDO

jänniteregulaattoreita. Varsinaisten toiminnallisten lohkojen lisäksi piirille on integroitu 8-bittinen ADC, paristojännitesensori LBD, lämpötilasensori, 32,768 kHz:n RC-oskillaattori (Silicon Labs 2010, 37 – 40). Kuviossa 2 on lohkokaaivio kuvattuna graafisessa muodossa.

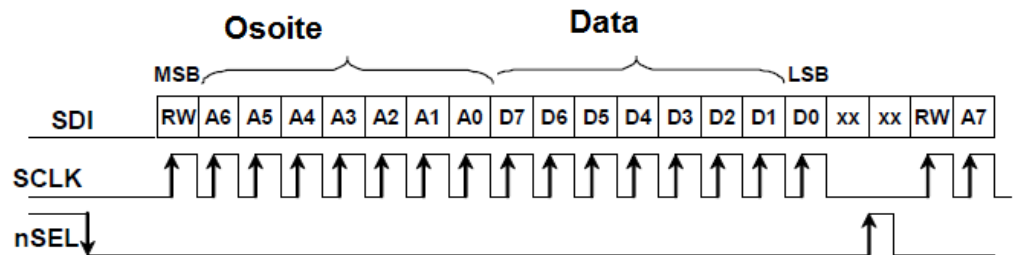


Kuvio 2. Silicon Labs Si4431 piirin lohkokaaivio (Silicon Labs 2010, 2.)

Piirin käyttöjännitealue on 1,8 – 3,6 V, suositeltu käyttöjännite on 3,3 V (Silicon Labs 2010, 66). Piirin sallittu käyttölämpötila-alue on -40 - 85 °C (Silicon Labs 2010, 1).

3.2 Mikrokontrollerin ja radiomoduulin välinen SPI-väylä

RFM23B:n ja mikrokontrollerin välinen tiedonsiirto tapahtuu SPI-väylän välityksellä. Mikrokontrollerilla luetaan ja kirjoitetaan tietoa RFM23B:n 128:sta 8-bittisestä rekisteristä. Tiedonsiirron maksiminopeuden rajaa kello-signaali SCLK sallittu maksimitaajuus 10 MHz:ä (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 14). Kuviossa kolme esitetään SPI-väylälle lähetettävän datan rakenne.



Kuvio 3. SPI-väylän osoitteviittaus ja datapaketti (Silicon Labs 2010, 18.)

Yleisten SPI-signaalien (SCLK, SDI, SDO, nSEL) lisäksi käytettävissä on moduulin keskeytysrekisterien hyödyntämiseksi nIRQ signaali. Jos luetaan tai kirjoitetaan peräkkäisiä rekisterejä, ei osoitetta tarvitse antaa ensimmäistä seuraavalle rekisterille, vaan toimenpide jatkuu niin pitkään kuin signaali nSEL on alhaalla (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 15). Kuviossa neljä esitetään jatkuvan kirjoituksen ja luvun ajoitusdiagrammit.

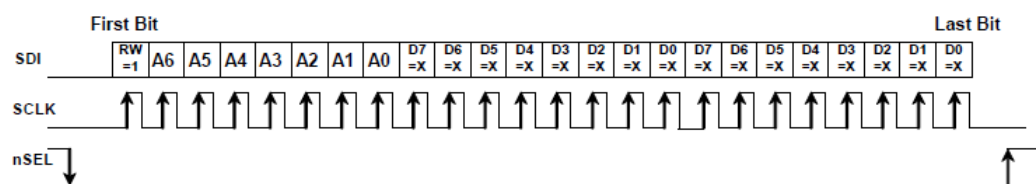


Figure 5. SPI Timing—Burst Write Mode

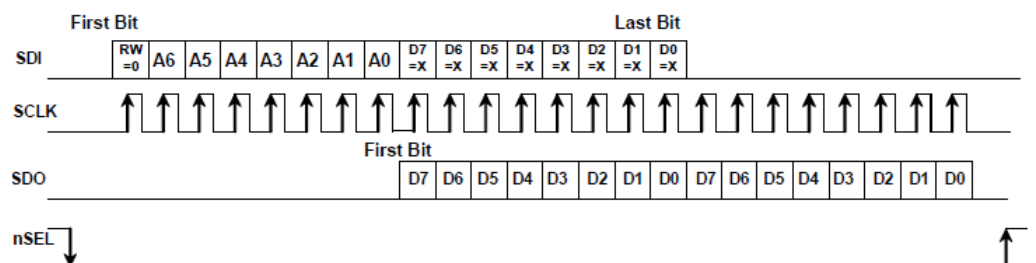


Figure 6. SPI Timing—Burst Read Mode

Kuvio 4. SPI-väylän jatkuva kirjoitus ja lukeminen. (Silicon Labs 2010, 19.)

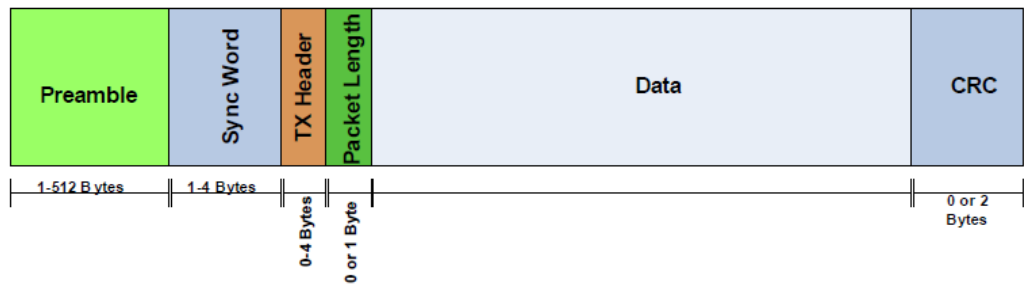
Anturiyksiköissä käytettävän mikrokontrollerin MSP430G2253 maksimikellotaajuus SPI-väylälle on kontrollerin oma kellotaajuus (Texas Instruments 2013b, 33). Koska antureissa on erittäin tärkeää säästää virtaa, ei sovelluksessa tulla käyttämään maksimikellotaajuutta, joten anturiyksiköissä SPI-väylällä käytettävän kellosignaalin taajuuden tulee määräämään MSP430G2253-kontrollerille ohjelmoitu kellotaajuus.

Tiedonkeruuyksikön mikrokontrollerin LM4F120H5QR maksimikellotaajuus SPI-väylälle on puolet kontrollerin omasta kellotaajuudesta isäntänä. Mikäli kellosignaalin lähteenä käytetään oskillaattoria PIOSC, on maksimi kellotaajuus isäntänä 25 MHz ja orjana $1/6$ PIOSC:n taajuudesta. (Texas Instruments 2013c, 913.)

Käytännössä moduulin ja kontrollerin välisen SPI-väylän kellosignaalin miniminopeus on arvo, jolla viiveet huomioiden voidaan saavuttaa langattomalle signaalille suunniteltu tiedonsiirtonopeus.

3.3 RFM23B radiomoduulien välisen liikenteen ominaisuudet

RFM23B radiomoduuli sisältää automaattisen pakettikäsittelijän. Ohjelmakirjaston tulee olla kyseistä pakettikäsittelijää hyödyntävä, tällöin radiomoduuli hoitaa itsenäisesti sille sen rekisteriasetuksin määritellyn pakettirakenteen. Lähetettävä ja vastaanotettava data kulkevat moduulin omien muistipuskurien kautta ja automaattinen pakettikäsittelijä muodostaa datan ympärille muut määritellyt kentät (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 38). Kuviossa viisi esitellään radiomoduulin pakettirakenne, kun käytetään automaattista pakettikäsittelijää.



Kuvio 5. RFM23Bn pakettirakenne automaattista pakettikäsittelijää käytettäessä. (Silicon Labs 2010, 42.)

Purskeen alustusosa eli preamble tarvitaan radiolähetteen havainnointiin. Synkronointisanalla tarkistetaan radiolähetteen riittävä voimakkuus. Tx Header-kenttää voidaan hyödyntää lähettäjän tunnistamisessa ja vastaanottajan määrittämisessä. Paketin pituus voidaan kertoa. Näiden jälkeen tulee varsinainen siirrettävä tieto. Lopuksi voidaan lisätä CRC-virheentarkistuskoodi.

Ohjelmoinnin lähtökohdaksi otetaan yhdistelmä, joka tarjoaa riittävän tiedonsiirtonopeuden radiomääräysten sallimalla kaistanleveydellä. Rekisteriasetusten tekemiseksi valmistajan sivuilta löytyy valmis Microsoft Excel-laskentataulukko. Laskentataulukosta saadaan radio-osalle rekisteriasetusten arvot halutulla modulaatiolla, keskiarvoisella ja tiedonsiirtonopeudella (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 45). Kuvassa yksi on kuvattuna näkymä käytetyn laskentataulukon parametrien syöttösivulta.

Notes: This spread sheet calculates the register values for RF22B/23B/31B/42B/43B. The input parameters can be set in the gray cells. There are five separate Calculators for GFSK/FSK RX Modem, Carrier Frequency, TX Frequency Deviation, TX DR and OOK RX Modem

1) First, select modulation type. Enable/Disable Manchester, crystal tolerance, data rate Rb and frequency deviation Fd at Grey boxes.

2) Select RF Carrier Frequency. For the frequency hopping application, you need to specify CH spacing and CH number.

3) For GFSK/FSK, you need to select AFC Enable/Disable and specify Max. Rb error; for OOK, you need to specify RX bandwidth.

4) Go to either FIFO MODE or PH+FIFO MODE sheet and make your selection by configuring the boxes.

5) Registers setting summary will appear at the last sheet (REGISTERS Settings SUMMARY)

Important: to use this calculator, you must enable some of the Excel Add-ins (inside "Tools" tab, select Analysis ToolPak and Analysis ToolPak - VBA)

Select Modulation type:	Select Enable/Disable Manchester Mode:	SelectCrystalTolerance(ppm):	RX/TX Carrier Frequency(MHz)	Rb(kbps)
GFSK	ON Manchester Mode is Enabled	50 50	433	64

When Manchester is enabled Rb is the data rate before the Manchester encoding

GFSK/FSK Modem Settings			OOK RX Modem Settings		
AFC	Max.Rb Error	Deviation(kHz)	OOK RX BW [kHz]		XtalFreq[kHz]
Enable	= < 1%	10	200		30 000

Instructions: Enter in desired frequency and program the Register Values into the appropriate SPI Registers
Channel spacing must be a multiple of 10kHz ranging from 10kHz to 2.55MHz. Channel number ranges from 0 to 255.

RX/TX Carrier Frequency Settings	Application Parameters		Center Frequency	IF Frequency
	RF Carrier Frequency [MHz]		Fc [MHz]	[kHz]
	433		433	937.5
Register values (HEX)				Carrier Frequency WDS COMMANDS
band select	hssel	fs[4:0]	fs[15:0]	reg.75 53 S2 F553
75h	U	75h	76h 77h 490U	reg.76 4B S2 F64B
				reg.77 00 S2 F700

Instructions: Enter in desired Data-Rate and program the Register Values into the appropriate SPI Registers

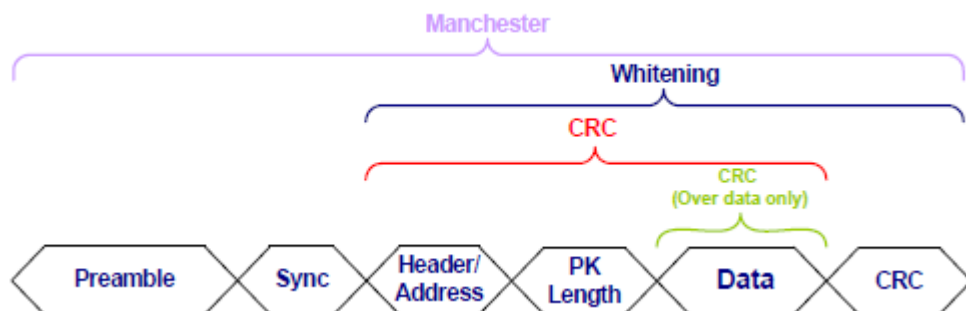
TX Data Rate Settings	Desired Data-rate	Decimal Value	Register Values			TX DATA RATE WDS COMMANDS		
	kbps	td[15:0]	td[15:0]	td[bits:scale]	opou[7:0]	reg.6E 10 S2 EE10	reg.6F 62 S2 EF62	reg.70 0E S2 F00E
	64	dec. 4194	hex 1062	bit 0	hex C0	reg.58 C0 S2 D8C0		

Instructions: Enter in desired deviation and program the Register Values into the appropriate SPI Registers

TX Frequency Deviation Settings	Desired Deviation	Decimal Value	Register Values	TX Frequency Deviation WDS COMMANDS		
	KHz	fd[8:0]	fd[8:0]	reg.72 10 S2 F210	reg.71 23 S2 F123	
	10	dec. 16	hex 010			

Kuva 1. Näkymä rekisteriasetusten tekemistä helpottavasta Excel laskentataulukosta

Tarkoituksenmukaisen modulaation ja tiedonsiirtonopeuden lisäksi yhteyden luotettavuutta voidaan parantaa datan valkaisulla (data whitening). Lisäksi lähetettävä data voidaan Manchester koodata ja osalle kokonaispaketista laskea CRC-tarkiste (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 42). Kuviossa kuusi on kuvattuna signaalin luotettavuutta parantavien keinojen vaikutusalue koko paketissa.



Kuvio 6. Erilaiset keinot signaalin luotettavuuden parantamiseen. (Silicon Labs 2010, 46.)

Manchester-koodauksessa signaali nousee ja laskee kerran jokaista tilan muutosta kohden eli käytännössä tehollisen datan siirron nopeus puolittuu. Manchester-koodatun signaalin maksimitiedonsiirtonopeus on rajattu 128 kbps. Datan valkaisussa datalle tehdään XOR-operaatio piirin sisäisellä PN9 generaattorilla luodun näennäisesti satunnaisen jakson kanssa. Tämän XOR-laskutoimituksen seurauksena siirrettävässä datassa ei ole enää pitkiä yhtenäisiä 0 tai 1 jaksoja. (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 42.)

Mahdollisia modulaatiotapoja datalle ovat OOK, FSK, GFSK (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 1). Lyhenne OOK tulee sanoista On-Off keying, eli binääridata esitetään kantoaaltoa katkomalla. Lyhenne FSK tulee sanoista Frequency Shift Keying, jossa binääridata esitetään taajuden muutoksella. Lyhenne GFSK tulee sanoista Gaussian Frequency Shift Keying, se poikkeaa FSK:stä siinä että lähetettävään signaaliin käytetään Gauss suodatusta, jolloin saadaan lähetteen kaistanleveys kapeammaksi. (Silicon Labs 2009, 13.)

Kaistanleveyteen vaikuttaa myös tiedonsiirtonopeus, mitä suurempi nopeus, sitä leveämpi kaista vaaditaan (Silicon Labs 2009, 16). Kaistanleveyttä voidaan myös säätää määrittelemällä huippujen poikkeama keskitaajuudesta (peak deviation): mitä pienempi ero, sitä kapeampi kaistanleveys (Silicon Labs 2009, 17).

3.4 Ohjelmoitavat keskeytykset

Jotta radiomoduuleilla saadaan toteutettua OSI-mallin kaksi alinta kerrosta eli fyysinen kerros ja siirtokerros, ohjelmoinnissa hyödynnetään automaattisen pakettikäsitelijän lisäksi RFM23B:n keskeytysrekistereitä. Ohjelmoitavia keskeytyksiä on yhteensä 16 kappaletta, niistä valitaan aktiiviseksi ne, joita on tarkoitus hyödyntää (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 19). Taulukossa yksi on listattu radiomoduuli RFM23B:n keskeytysrekisterit.

Taulukko 1. RFM23B:n keskeytysrekisterit. (Silicon Labs 2010, 23.)

Add	R/W	Function/Description	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	POR Def.
03	R	Interrupt Status 1	ifferr	itxffafull	itxffaem	irxffafull	iext	ipksent	ipkvalid	icrcerror	—
04	R	Interrupt Status 2	iswdet	ipreaval	iprainval	irssi	iwut	ilbd	ichiprdy	ipor	—
05	R/W	Interrupt Enable 1	enfferr	enbxffafull	enbxffaem	enrxffafull	enext	enpksent	enpkvalid	enrcrcerror	00h
06	R/W	Interrupt Enable 2	enswdet	enpreaval	enpreainval	enrssi	enwut	enlbd	enchiprdy	enpor	01h

3.5 Muut hyödynnettävät ominaisuudet

3.5.1 Automaattinen taajuudensäätö AFC

AFC (Automatic Frequency Control)-ominaisuus otetaan käyttöön, koska anturiyksiköiden lämpötila saattaa poiketa huomattavasti tiedonkeruuyksikön lämpötilasta. Eri lämpötilaisten lähettimien taajuudet saattavat poiketa jonkin verran toisistaan. Tätä vaikutusta voidaan kompensoida automaattisen taajuudensäädön avulla.

AFC vaatii 8 bittiä lisää preamblen pituuteen toimiakseen kunnolla.

Toiminnallisesti AFC korjaa vastaanottotaajuuden IF suodattimen päästökaistan keskelle. Koska AFC leventää vastaanottoaistia noin kolmanneksella, menetetään hieman vastaanottoherkkyydessä. (Silicon Labs 2010, 29 – 30.)

3.5.2 Signaalin voimakkuuden mittaus RSSI

Koska signaalin voimakkuudella on iso merkitys yhteyden laadulle, halutaan se tietää. Tätä varten moduulissa on RSSI (Received Signal Strength Indicator) eli vastaanotetun signaalin voimakkuuden osoitus. Kyseessä on 8-bittinen arvo, jonka mittausväli on -120 dBm – 0 dBm, joten resoluutio on noin 0,5 dBm. (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 57.)

3.5.3 Herätysajastin WUT

Virransäästötoimintojen hyödyntämiseen tarvitaan herätysajastin WUT (Wake-Up Timer). Herätysajastusta voidaan käyttää joko sisäisen kello-oskillaattorin

ohjaamana tai ulkoiselta mikrokontrollerilta tulevalla signaalilla.

Virrankulutuksen kannalta parempi tapa on käyttää ulkoiselta mikrokontrollerilta tulevaa signaalia herätysajastimen sijasta. (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 52 – 53.)

3.5.4 Paristojännitteen ilmaisimien LBD

Koska anturit ovat paristokäyttöisiä, on hyödyllistä tietää pariston jännitetilä, jotta paristo ehditään vaihtamaan ajoissa. Moduulissa on tätä varten LBD (Low Battery Detector) -ominaisuus. LBD:n hyödyntämisessä on huomioitava siihen liittyvä virhetoiminta. Sen käyttö SLEEP tilassa saattaa aiheuttaa kohonnutta virrankulutusta, joten sitä on syytä hyödyntää ulkoisen mikrokontrollerin ajastamalla rutiinilla. (Silicon Labs 2012b, 3.)

LBD antaa pariston varaustilan 5-bittisenä binäärilukuna. Käytännön mittausväli on 1,7 – 3,2 volttia. LBD:n antama binääriluku muunnetaan jännitearvoksi kaavalla: jännite voltteina = 1,7 + (0,05 * binääriarvo). (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 51.)

3.5.5 Lepotila-aktiivivtila ajastin TLDC

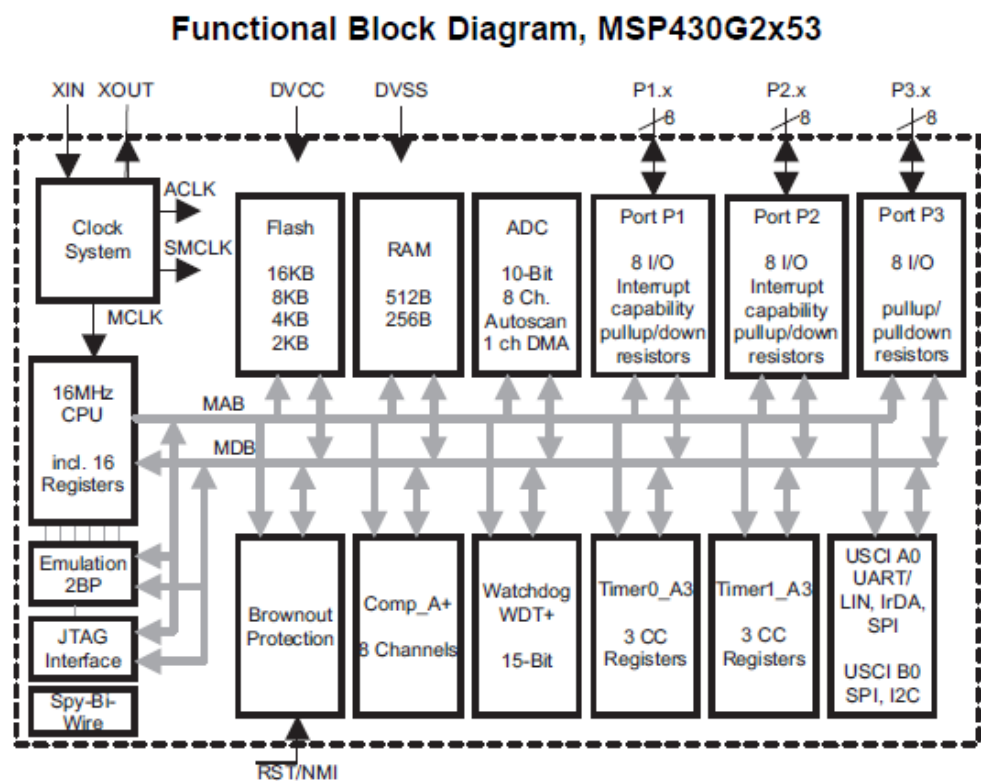
Pariston säästämiseksi voidaan käyttää automaattista lepotila-aktiivivtila ajastusta. Vastaanotin kytketään päälle ja päältä pois syklisesti. Havaittuaan signaalin vastaanotin pysyy aktiivivtilassa TLDC:n laskentakaavalla (kaava 1) määriteltävän ajan. (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 54.)

$$TLDC = ldc [7 : 0] \times \frac{4 \times 2^R}{32 \cdot 768} ms \quad (1)$$

ldc[7:0] = rekisteriosoitteeseen 19h asetettu arvo, R = rekisteriosoitteeseen 14h asetettu arvo.

4 ANTURIYKSIKÖN MIKROKONTROLLERI MSP430G2553

Anturiyksikön mikrokontrolleri MSP430G2553 on Texas Instrumentsin 16-bittisen MSP430-mikrokontrolleriperheen edullisimman tuotesarjan (Value Line) monipuolisin edustaja. Mikrokontrolleri on optimoitu paristokäyttöisiin anturijärjestelmiin, siinä on viisi erilaista virransäästötilaa. Tyypillinen käyttötarkoitus on analogisten anturisignaalien muuntaminen digitaaliseksi dataksi ja sen jälkeen tiedon prosessointi joko näytölle tai siirtotielle (Texas Instruments 2013b, 1). Kuvio seitsemän esittää MSP430G2553:n toiminnallisen lohkokaaavion.



Kuvio 7. MSP430G2553 mikrokontrollerin lohkokaavio. (Texas Instruments 2013b, 5.)

MSP430 perheen mikrokontrollereissa käytetään Von Neumann -arkkitehtuuria, eli data ja ohjelma operoivat samassa muistiavaruudessa (Texas Instruments 2012a, 27).

4.1 Rekisterit ja keskeytysvektorit

Kontrollerissa on 16 kappaletta 16-bittisiä rekistereitä: niistä neljä ensimmäistä ovat varattuja (ohjelmanalaskuri, pino-osoitin, tilarekisteri, vakiorekisteri), loput 12 ovat yleisrekistereitä. (Texas Instruments 2013b, 9.)

Keskeytysvektori-osoitteita on 32 kappaletta: niistä käytössä on 17 kappaletta, joista 11 kappaletta ovat ohjelmallisesti otettavissa käytöstä pois tai käyttöön. Mikrokontrollerin ja radiomoduulin välisen tiedonsiirron kannalta tärkeitä keskeytysvektoreita ovat yleisen sarjaliikenneliittymän USCI tarvitsemat. (Texas Instruments 2013b, 11.)

Eritysfunktioirekistereitä (SFR) on neljä kappaletta, muista rekistereistä poiketen ne ovat 8-bittisiä. Kaksi ensimmäistä SFR-rekisteriä sisältää käytettävien keskeytysten määrittelyn. Kahdessa seuraavassa sijaitsevat keskeytysten liput. Niistä on syytä ottaa käyttöön ainakin yleiseen sarjaliikenneliittymään USCI liittyvät keskeytykset ja liput. (Texas Instruments 2013b, 12.)

4.2 Muistin organisointi

Muisti jakaantuu neljään erilliseen osaan: Muistialueen alaosassa on oheispiirien vaatimat rekisterit osoitteesta 0100h osoitteeseen 00h asti, sen jälkeen seuraa varsinainen 512 tavun kokoinen RAM-muisti osoitteesta 0x03FF osoitteeseen 0x0200 asti. Flash-muistin alussa on muistin itsensä tarvitsemalle tiedolle varattu 256 tavua osoitteesta 010FFh osoitteeseen 01000h. Varsinaisen ohjelmamuistin osuus flash-muistista on 16 kB:ä osoitteesta 0xFFFF osoitteeseen 0xC000. Tämän muistialueen alareunaan sijoittuvat käytettävät keskeytysvektorit (välille 0xFFFF – 0xC000). (Texas Instruments 2013b, 13.)

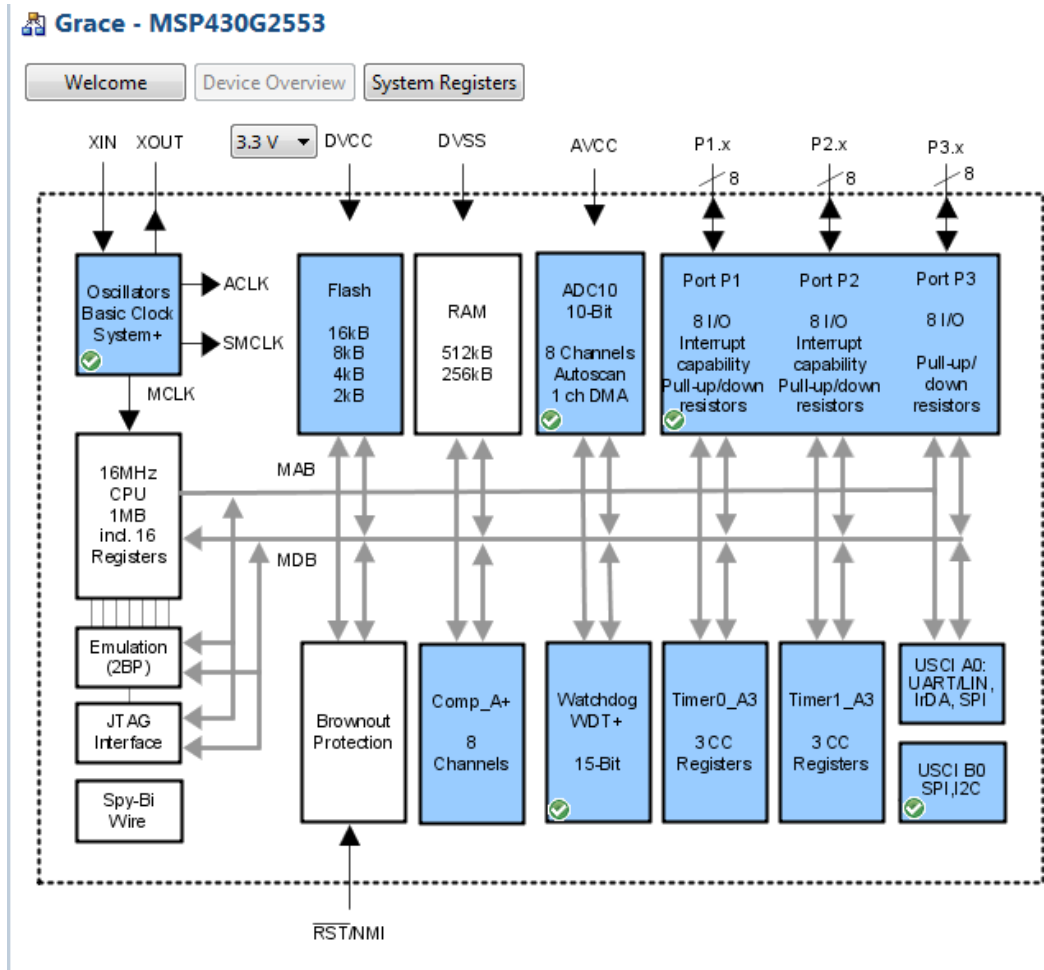
Syy osoitteiden näennäisesti käänteiseen järjestykseen on MSP430:n käyttämä tapa järjestää tietoa; eniten merkitsevät bitit tulevat ylempään parittomaan osoitteeseen ja vähemmän merkitsevät bitit alempaan parilliseen osoitteeseen (Texas Instruments 2012a, 28). Tästä voidaan päätellä MSP430 sarjan mikrokontrollereiden käyttävän little endian -tavujärjestystä.

4.3 Oheislaitteiden määrittely ja rekisteriasetusten tekeminen

Oheislaitteita varten otetaan käyttöön kellopiirit MCLK (järjestelmän kello) ja SMCLK (oheislaitteille johdettu kello). Näitä tarvitaan USCI:n (yleinen sarjaliikenneliittymä) hyödyntämiseen. Lisäksi tarvitsee määrittellä eri liittymien käyttämät digitaaliset tulot ja lähdöt (Digital I/O) ja käytettävät ajastimet (WDT+, Timer_A3). Paristojännitteen tarkkailuun voidaan käyttää komparaattoria Comparator_A+. (Texas Instruments 2013b, 14 – 17.)

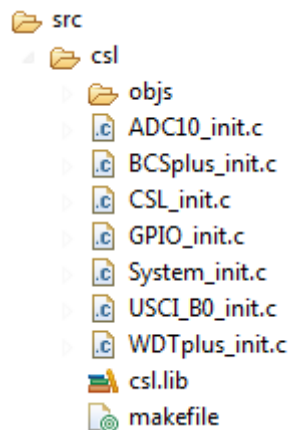
Oheislaitteiden rekisterit jakautuvat sanan (16 bittiä) ja tavun (8 bittiä) kokoisiin. Oheislaitteiden rekistereitä, johon ohjelmoinnilla voidaan vaikuttaa, on kaiken kaikkiaan 80 kappaletta, kun kyseessä on piirin 20-nastainen versio. (Texas Instruments 2013b, 18 – 20.)

Tuollaisen rekisterimäärän asetusten määrittelemisen puhtaasti datalehden ja sovelluksen perusteella olisi varsin raskasta; niinpä Texas Instruments on tehnyt graafisen käyttöliittymän Grace näiden parametrien automaattista asettamista varten. Käyttämässäni Code Composer Studio -versiossa 5.2.1 on Grace asennettu jälkikäteen, versiosta 5.3 alkaen se on integroitu automaattisesti mukaan asennuspakettiin (Grace Quick Start Guide 2013). Kuvassa kaksi on näkymä ohjelmointiliittymästä. Aktiiviseksi valitut oheislaitteet näkyvät tummennetulla pohjalla.



Kuva 2. Grace ohjelmointiliittymän näkymä

Gracen avulla ohjelmoija valitsee käyttämänsä oheislaitteet ja Grace generoi valintojen perusteella tarvittavat alustukset rekistereitä varten. Gracen generoimat c-kieliset tiedostot löytyvät ohjelman käännoksessä käytettävästä lähdekirjastosta. (Grace Quick Start Guide 2013.) Kuvasta kolme nähdään minne tiedostot



sijoittuvat lähdepuussa.

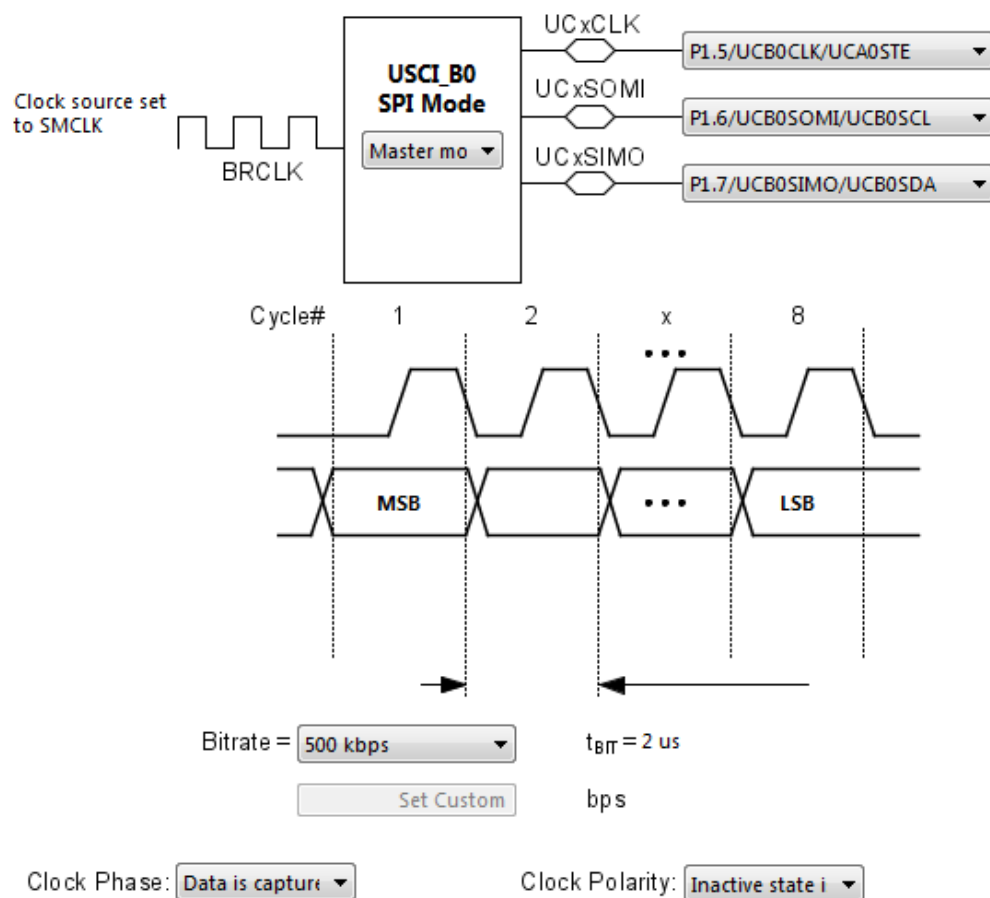
Kuva 3. Gracen generoimat alustustiedostot lähdepuussa

4.4 SPI master mode Gracen avulla toteutettuna

Koska yleistä sarjaliikenneväylää USCI:a tullaan käyttämään SPI-väylän toteutukseen mikrokontrollerin toimiessa isäntänä ja radiomoduulin toimiessa orjana, on syytä selvittää tarkemmin kyseisen tilanteen liikenteen muodostus.

Tarvittavat asetukset voidaan toteuttaa Gracen avulla. Ensimmäiseksi haetaan Si4431:n datalehdessä tarvittavat SPI-parametrit. SPI-liikenteen ajoituskaavion perusteella voidaan todeta, että data luetaan sisään kellon nousevalla reunalla ja muuttuu laskevalla reunalla. Asetetaan Gracea hyödyntäen tämän mukaisesti kellon toiminta, ajoituskaaviosta nähdään, että datan järjestys on MSB ensin, asetetaan siirrettävän datan järjestys tämän mukaisesti (Silicon Labs 2010, 18 - 19). Kuva neljä on ruutukaappaus tehdystä asetuksesta.

USCI_B0 - Basic User Mode



Kuva 4. SPI-väylän parametrien asetus Grace ohjelmointityökalulla

Lopputuloksena Gracen muodostama USCI_B0:n rekistereiden määrittely on seuraava:

```

void USCI_B0_init(void)
{
    /* Disable USCI */
    UCB0CTL1 |= UCSWRST;

    /*
     * Control Register 0
     *
     * UCCKPH -- Data is captured on the first UCLK edge and changed on
the following edge
     * ~UCCKPL -- Inactive state is low
     * UCMSB -- MSB first
     * ~UC7BIT -- 8-bit
     * UCMST -- Master mode
     * UCMODE_0 -- 3-Pin SPI
     * UCSYNC -- Synchronous Mode
     *
     * Note: ~<BIT> indicates that <BIT> has value zero
     */
    UCB0CTL0 = UCCKPH + UCMSB + UCMST + UCMODE_0 + UCSYNC;

    /*
     * Control Register 1
     *
     * UCSSEL_2 -- SMCLK
     * UCSWRST -- Enabled. USCI logic held in reset state
     */
    UCB0CTL1 = UCSSEL_2 + UCSWRST;

    /* Bit Rate Control Register 0 */
    UCB0BR0 = 2;

    /* Enable USCI */
    UCB0CTL1 &= ~UCSWRST;
}

```

4.5 Käytettävät toimintatilat ja virransäästö

Koska kyseessä on paristokäyttöinen laite, on virransäästötoimintojen ohjelmoinnilla tärkeä merkitys pariston kestolle. MSP430G2553:lla on viisi erilaista toimintatilaa: aktiivitila, LPM0, LPM1, LPM2, LPM3, LPM4. Kaikissa LPM-tiloissa CPU on sammutettu; muiden sammutettujen toimintojen määrä vaihtelee tilan mukaan. (Texas Instruments 2013b, 10.)

Virransäästön optimoimiseksi CPU:n kellotaajuudeksi asetetaan 1 MHz; tällöin SMCLK:n taajuus on 500 kHz. Tällöin virrankulutus aktiivitilassa on

maksimissaan 420 μA . Jotta SPI-väylä olisi toiminnassa mahdollisimman nopeasti palattaessa virransäästötilasta aktiivitilaan, on kellon SMCLK pysyttävä aktiivisena. Käyttöön voidaan ottaa virransäästötila LPM0, tällöin virrankulutus tippuu noin neljännekseen (2,2V Vcc aktiivitila 230 μA , 2,2V LPM0 tila 56 μA). (Texas Instruments 2013b, 22 – 23.)

Kun LPM0 on käytössä, voidaan radiomoduulilta tulevan keskeytyksen (RX FIFO rxafthr, TX FIFO txethr tai txafthr) avulla palata takaisin aktiivitilaan (Silicon Labs 2010, 41 – 42).

Ohjelmoinnin tavoitteena on LPM3 virransäästötilassa (virrankulutus on noin 1 μA) vietettävän ajan maksimoiminen. Tavoite toteutuu ulkoisia keskeytyksiä hyödyntämällä.

5 TIEDONKERUUYKSIKÖN MIKROKONTROLLERI LM4F120H5QR

Tiedonkeruuyksikön mikrokontrolleri LM4F120H5QR sisältää 32-bittisen ARM CORTEX M4 -prosessorin, joka toimii 80 MHz:n kellotaajuudella. Prosessori itsessään sisältää lukuisia erillisiä lohkoja, laskennallisen suorituskyvyn kannalta tärkeimpänä liukulukulaskentayksikkö FPU. Lisäksi muistisuojayksikköä MPU voidaan hyödyntää antamalla tietyille käyttöjärjestelmän suojuille toiminnoille etusija suorituksessa. (Texas Instruments 2013c, 49)

Prosessoriytimeen on integroitu myös 24-bittinen ajastin SysTick, hierarkkinen keskeytysvektoreiden käsittelijä NVIC (65 keskeytystä, kahdeksan keskeytystasoa, seitsemän käsittelijää), järjestelmäkontrollilohko SCB (Texas Instruments 2013c, 50).

Prosessoriytimen lisäksi tarvitaan muistia, LM4F120H5QR sisältää neljä erilaista muistiyksikköä: 32 KB SRAM, 256 KB Flash, 2 KB EEPROM, sisäinen ROM muisti. Tiedonsiirtoon on tarjolla erilaisia sarjaliitännöitä, lisäksi sisäistä tiedonsiirtoa varten on 32-kanavainen suoramuistiosoituskontrolleri μ DMA. Muistin ja tiedonsiirtoliitännöiden lisäksi piiriltä löytyy oskillaattoreita (PIOOSC, LFIOOSC, HIB LFIOOSC), ajastimia (6 kpl 16/32 bittiä leveitä, 6 kpl 32/64 bittiä leveitä), kaksi 12-bittistä ADC-muunninta, 2 komparaattoria, LDO regulaattori. (Texas Instruments 2013c, 51 – 65.)

5.1 CORTEX M4:n rekisterit

Rekistereitä on 22 kappaletta, 13 ensimmäistä rekisteriä (R0 – R12) ovat 32 bittiä leveitä yleisrekistereitä. Pino-osoitin rekisterin SP tieto osoittaa joko pääohjelmaan tai prosessiin riippuen kontrollirekisterin ASP bitin arvosta (jos ASP = 1 osoitetaan prosessin pinoon, jos ASP = 0 osoitetaan pääohjelman pinoon). Linkkirekisteri osoittaa paluuosoitteen (aliohjelman, funktion suorituksen, keskeytyksen jälkeen). Ohjelmanalaskuri PC osoittaa senhetkisen suoritusosoitteen. (Texas Instruments 2013c, 75 – 78.)

Ohjelman tilarekisteri PSR on jaettu kolmen osan kesken: sovelluksen suoritukselle APSR, suorituksen tilalle EPSR, keskeytyksille IPSR. APSR kertoo lippujen tilan edellisen käskyn suorituksen jälkeen. EPSR kertoo tilatietoa, jota ei

voi hyödyntää suoraan lukemalla, sen sijaan keskeytyskäsittelijät pystyvät hyödyntämään EPSR:stä saatavan tiedon. IPSR kertoo keskeytystapahtuman aiheuttaneen poikkeuksen numeron. (Texas Instruments 2013c, 79.)

Ohjelmoitavien keskeytysten vaikutus määräytyy PRIMASK- rekisterin viimeisen bitin arvon perusteella; mikäli PRIMASK bitti on 1, käsitellään ainoastaan poikkeukset (rautakeskeytykset). Reaaliaikaisessa prosessissa on usein sellaisia aikakriittisiä suoritusjaksoja, jolloin keskeytyksiä ei voida sallia, silloin on syytä asettaa PRIMASK bitti arvoon 1, kriittisen suoritusjakson jälkeen voidaan PRIMASK bitti palauttaa arvoon 0. (Texas Instruments 2013c, 83.)

FAULTMASK -rekisteri on PRIMASK- rekisteriä jyrkempi, ainoastaan NMI-keskeytykset pääsevät läpi, kun FAULTMASK- rekisterin viimeinen bitti on asetettu arvoon 1 (Texas Instruments 2013c, 84). NMI keskeytyksiä ovat ulkoiset keskeytykset, ne voidaan määrittellä nastoille 10 (PD7) ja 28 (PF0). (Texas Instruments 2013c, 1134.)

BASEPRI-rekisterillä voidaan säätää läpi pääsevien keskeytysten ja poikkeuksien määrää valitsemalla 3 bitin avulla se hierarkkinen taso, joka saa keskeyttää prosessin suorituksen. Esimerkiksi asettamalla BASEPRI-rekisterin bitteihin [7:5] arvo b111 saadaan aikaiseksi tilanne, jossa keskeytysten ja poikkeuksien vaikutus on estetty prioriteettitasosta 7 alkaen. (Texas Instruments 2013c, 85.)

Kontrollirekisteri CONTROL määrää sen, onko liukulukuyksikkö käytössä. Tämä tapahtuu asettamalla FPCA bitti arvoon 1. Jotta FPCA bitin saa asettaa arvoon 1, tulee SCB:n ACTLR-rekisterissä bitin DISFPCA arvo olla 0 ja FPU:n FPCC-rekisterissä bitin ASPEN arvo 1 (Texas Instruments 2013c, 86, 155, 194). Kuten jo aiemmin pino-osoitin rekisterin yhteydessä todettiin, määrää kontrollirekisterin ASP bitti sen, mihin pino-osoitin osoittaa. Kontrollirekisterin TMPL bitti määrää sen, saako säiettä suorittaa ainoastaan etuoikeutetut ohjelman osat vai sallitaanko säikeet myös normaalille koodille. TMPL bitin ollessa asetettuna arvoon 1 on säikeen suoritus sallittu myös normaalille koodille. (Texas Instruments 2013c, 87.)

Viimeisenä M4 ytimen omana rekisterinä on liukulukulaskennan tilanmääritys rekisteri FPSC, jonka avulla saadaan virheilmoitukset matemaattisesti

mahdottomista laskutilanteista ja määritellään, miten pyöristys hoidetaan sekä laskutoimituksen yleinen tarkkuus (Texas Instruments 2013c, 88 – 89).

5.2 Rekisteriasetusten haasteellisuus ja ratkaisumallit

Koska mikrokontrolleri sisältää satoja erillisiä rekisterejä (pelkästään M4 ytimen oheislaitteille on 94 eri rekisteriä) on rekisteriasetusten kohdalleen asettaminen varsin hankalaa ja erittäin aikaa vievää. Pelkällä 1190 sivuisen datalehden lukemisella se ei välttämättä onnistu.

Ongelmaan on kuitenkin olemassa valmis ratkaisu, eli Stellarisware-ohjelmakirjaston hyödyntäminen rekisteriasetusten tekemisessä. Ohjelmakirjastoa käytettäessä voidaan soveltaa kahta eri tapaa: joko suoraa rekisteriosoitusta tai ohjelmallista rekisteriosoitusta. (Texas Instruments 2012b, 11.)

Suoraa rekisteriosoitusta käytettäessä hyödynnetään Stellarisware-ohjelmakirjastosta inc-hakemistosta löytyvää `lm4f120h5qr.h`-tiedostoa ottamalla se käännöstä varten mukaan (eli `#include lm4f120h5qr.h`). Kyseinen header-tiedosto sisältää makrot kaikkien komponenteissa olevien rekisterien käsittelyyn ja kaikkien rekisterien bittikenttien osoitteet ja oletusarvot. Mainittakoon että kyseisessä tiedostossa on yli 10000 riviä, joten kokokin on puhtaaksi tekstitiedostoksi suuri 551 kilotavua.

Ohjelmallista rekisteriosoitusta käytettäessä taas hyödynnetään Stellarisware-ohjelmakirjastosta `driverlib`-hakemistosta ohjelmoitavalle oheislaitteelle löytyvää API-funktioiden määrittelyä (SPI-väylä `/driverlib/ssi.h` tiedosto) ja ajuritiedostoa (`/driverlib/ssi.c`) (Texas Instruments 2012b, 333).

Korkeaa suoritusnopeutta vaativissa rutiineissa on syytä käyttää suoraa rekisteriosoitusta, muuten voidaan käyttää ohjelmallista rekisteriosoitusta. Mikään ei estä käyttämästä molempia tapoja, esimerkiksi suoritetaan oheislaitteiden alustukset ohjelmallisella rekisteröintitavalla ja varsinaiseen prosessin ajon aikaiseen suorittamiseen taas käytetään suoraa rekisteriosoitusta. (Texas Instruments 2012b, 13.)

6 VIRRANKULUTUKSEN OPTIMOINTI

Virransäästötoimintojen käyttö on välttämätöntä kohtuullisen toiminta-ajan saavuttamisessa. Virransäästötoimintojen käyttämisen kannalta oleellisia tietoja ovat yksiköiden osien virrankulutus eri toimintatiloissa ja aika, jonka yksiköt ovat eri toimintatiloissa.

6.1 Virtabudjetin laatiminen

Tarvittavia tietoja ovat virtalähteen kapasiteetti ja yksiköiden osien virrankulutus eri toimintatiloissa sekä niiden käyttämä aika eri toimintatiloissa.

Anturiyksiköiden virtalähteenä käytetään 3000 mAh 1,5 voltin AA-koon litiumparistoja. Litiumparistojen valinta perustuu siihen, että ne kestävät hyvin kylmää, niiden itsepurkautuminen on vähäistä ja niiden purkauskäyrä on hyvin tasainen. (Energizer 2013, 7.)

Virtabudjetin laskentaa varten Silicon Labsilta löytyy valmis Excel-laskentataulukko. Datalehdistä saadut virrankulutuservot ja verkkoa suunniteltaessa ajateltujen toimintajaksojen pituus syötetään taulukkoon, tuloksena saadaan arvioitu virtalähteen kesto-aika. Laskentataulukon käyttö muutti omaa ajatustani verkon liikenteen toteuttamisessa, koska malli, jossa anturit kuuntelevat tiheästi, oli virrankulutuksen kannalta todella huono. Optimoin virrankulutusta muuttamalla verkon toimintamallin sellaiseksi, että anturit pääasiassa lähettävät ja tiedonkeruuyksikkö pääasiassa kuuntelee. Kuviossa kahdeksan on radiomoduulin arvioitu virrankulutus 15 sekunnin välein tapahtuvalla kuuntelulla ja kerran minuutissa tapahtuvalla lähetyksellä.

Calculation:			
Radio related calculations		Microcontroller related calculations	
Total consumed charge for transmit by year:	45,9491 mAh/year	Total consumed charge during transmit by year:	1,2264 mAs/year
Total consumed charge for Receive by year:	175,0248 mAh/year	Total consumed charge during receive by year:	7,3584 mAs/year
Standby state charge consumption	3,9420 mAh/year	Consumed charge in sleep mode:	0,8757 mAh
Total consumption of the RF chip:	224,9159 mAh/year	Total consumption of the uP :	9,4605 mAh/year
Average load current of the module:	27,9 uA		
Total consumption of the module:	234,4 mAh/year		
Estimated Battery Life:	12,80 years 154 months	Note: The actual battery life is influenced also by the self-discharge of the battery.	

Kuvio 8. Radiomoduulin arvioitu virrankulutus ja paristojen kesto.

Laskentataulukkoa käyttämällä selvisi myös tiedonsiirtonopeuden merkitys virrankulutuksessa, tiedonsiirtonopeuden puolittuminen kaksinkertaisti virrankulutuksen.

Laskentataulukolla saatu arvio kertoo radiomoduulin osuuden virrankulutuksesta, mikrokontrollerin osuuden arvioimiseksi laskin anturiyksikön osalta sen toiminta-ajat eri toimintatiloissa. Arvion pohjana olivat aktiivitulassa 30 %, LPM0-tilassa 10 %, LPM3-tilassa 60 %, eli keskimääräinen virrankulutus olisi $(0,3 * 0,47) + (0,1 * 0,12) + (0,6 * 0,001) = 0,154 \text{ mA} = 154 \mu\text{A}$. Mikrokontrollerin ja radiomoduulin arvioitu yhteiskulutus on siis $28 + 154 = 182 \mu\text{A}$. Tällöin 3000 mAh:n kapasiteetti antaa toiminta-aikaa 16483 tuntia eli noin 686 vuorokautta.

Todellinen virrankulutus voidaan laskea vasta valmiin toimivan koodin pohjalta saatavasta ajoaika-analyysistä.

6.2 Järjestelmän virransäästötoimintojen aiheuttamat viiveet

Radiomoduulin eri toimintatilojen välissä on siirtymäaikoja, jotka on otettava ohjelmoinnissa huomioon, samoin mikrokontrollereiden virransäästötoimintojen käytöstä tulee viiveitä, jotka täytyy ottaa huomioon.

Standby-tilasta lähetystilaan menee oletusarvoisesti yhteensä 821 μs , lähetystilasta poistumiseen 5 μs . Standby-tilasta vastaanottotilaan menee oletusarvoisesti 800 μs . (Hope Microelectronics Co Ltd 2011, 20.)

MSP430G2253 palaa virransäästötoiminnasta toimintatilaan tyypillisesti 1,5 mikrosekunnissa (Texas Instruments 2013b, 31). LM4F120H5QR-kontrollerin palautuminen riippuu virransäästötoiminnan syvyydestä ja käytetyistä oskillaattoreista; vaihteluaika on kahdesta kellojaksosta aina 500 mikrosekuntiin asti. (Texas Instruments 2013c, 1170 – 1171.)

7 RADIOTIEN OMINAISUUDET

Tässä luvussa tarkastellaan radiotien ominaisuuksia lähinnä radiomoduulin ohjelmoinnin näkökulmasta, eli haetaan järkevää pohjaa modulaation valinnalle ja pohditaan käytännön ja teorian eroja.

7.1 Shannon-Hartley laki

Teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus radiotiellä voidaan määrittellä Shannon-Hartleyn lain (kaava 2) avulla.

$$C_c = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2)$$

C_c = tiedonsiirtonopeus b/s, B = kanavan kaistanleveys hertseinä, S = signaalin teho, N = kohinan teho. (Kärkkäinen 2013, 3.)

Käytännössä Shannonin lain avulla lasketusta maksimitiedonsiirtonopeudesta jäädaän jälkeen, mihin syynä ovat radiomoduulin rajalliset modulointimenetelmät. Piirin valmistaja pitää parhaana modulaatiovaihtoehtona GFSK:ta, koska se hyödyntää kaistaa tehokkaimmin eli tarjoaa puhtaimman spektrin ja parhaan suorituskyvyn. (Silicon Labs 2010, 32.)

Rekisteriasetus laskentataulukko antaa 128 kbps tiedonsiirtonopeuden kaistanleveydeksi 208 kHz:ä, kun GFSK modulaatioissa käytetään +/- 40 kHz:n poikkeamaa. Vastaanotolle AFC kytkettynä on tällöin arvioitu -100 dBm:n herkkyys bittivirhetason BER ollessa alle 10^{-3} .

Oletetaan kohinasoksi kanavalla -80 dBm ja signaalin voimakkuudeksi vastaanotossa -60 dBm. Koska Shannonin kaavassa käytetään todellisia tehoja, muunnetaan luvut milliwateiksi. Kohinataso on $10^{(-80/10)} = 10^{-8}$ mW ja signaalinvoimakkuus 10^{-6} mW eli S/N on paljaana lukuna $10^{-6} / 10^{-8} = 100$. Sijoitetaan tiedot kaavaan $208000 * \log_2 101 = 1384908 = 1384$ kbps, eli käytännön tulos on alle kymmenesosa teoreettisesta maksimista.

7.2 Vapaan tilan vaimennus ja linkkibudjetti

Radiosignaalin teoreettista kantamaa arvioidaan usein vapaan tilan vaimennuksen pohjalta; vapaan tilan vaimennus on 20 dB jokaista etäisyyden dekadia kohden, koska signaalin lähteen katsotaan olevan pistemäinen ja säteilevän isotrooppisesti eli tasaisesti kaikkiin suuntiin. Kun ”pallon” pinta-ala kasvaa, on antennilla yhä vähemmän hyödynnettävää säteilytehoa sen sieppauspinta-alaa kohden, toisaalta mitä pienempi aallonpituus, sitä vähemmän sieppauspinta-alaa samalla periaatteella mitoitettulla antennilla. Nämä tekijät kytketään yhteen Friisin yhtälöllä (kaava 3) (Tiusanen 2010, 2):

$$\text{Vaimennus} = 20 * \log_{10}(4\pi * \text{etäisyys}/\text{aallonpituus}) \quad (3)$$

Käytännössä signaali vaimentuu enemmän, yleensä tila ei ole täysin vapaa. Lisäksi signaalin heijastuminen erilaisista pinnoista vaimentaa tai vahvistaa vapaasti etenevää signaalia vaihe-erosta riippuen. Maaheijastus aiheuttaa nk. sokean pisteen eli vaihe-ero maasta heijastuneen signaalin ja vapaasti etenevän signaalin välillä on sellainen, että signaalien summautuessa ei jää riittävän vahvaa signaalia vastaanottimelle ilmaistavaksi. (Kvaksrud 2008, 4 – 6.)

Linkkibudjetti tarkoittaa käytännössä sitä, että riittääkö signaalin tehon ja vastaanottimen herkkyyden summa siirtotiellä ilmenevän vaimenemisen kompensoimiseen. Edellisessä osiossa valittua GFSK-modulaatiota ja Manchester-koodausta käytettäessä antaa laskentataulukko 64 kbps todellisen tiedonsiirtonopeuden (eli 128 kbps bittivirta) omaavalle signaalille 10^{-3} bittivirhetasolla -103 dBm vastaanotto herkkyyden (Manchester-koodaus antaa 3 dBm paremman herkkyyden samalla virhetasolla), radiomoduulin maksimi lähetysteho on 13 dBm, tällöin linkkibudjettimme on $13 + 103 = 116$ dB.

Oletetaan moduulien etäisyydeksi 500 metriä, jolloin vapaan tilan vaimennus on $20 * \log_{10}(4\pi * 500/0,69) = 79$ dB, eli vapaan tilan vaimennuksen perusteella jäisi vielä reilusti varaa, 20 dB:n säännön perusteella 5 kilometrin kohdallakin signaali olisi vielä ilmaistavissa (vaimennus 99 dB). Viiden kilometrin kohdalla ei ole kuitenkaan yleensä suoraa näkyvyyttä antennilta antennille, koska maanpinta on kaareva ja lisäksi välille osuu usein jo merkittävä määrä esteitä (kasvillisuutta, rakennuksia). Lisäksi täytyy huomioida kohinatason vaikutus; kohinataso saattaa

olla muiden taajuuden käyttäjien ja muista laitteista tulevien sähkömagneettisten häiriöiden takia vastaanottimen herkkyyttä korkeammalla tasolla. Jos kohinataso on aikaisemmassa osiossa mainittu -80 dBm, niin vastaanotettavan signaalin vahvuuden täytyy valittu tiedonsiirtonopeus huomioiden olla mielellään noin 10 - 15 dBm kohinatason yläpuolella. Tällöin todellinen linkkibudjettimme on $13 + 65 = 78$ dB, joten puolen kilometrin yhteysvälin toimivuudesta ei voida enää taata.

7.3 Radiojärjestelmän topologia

Luontainen topologia yhden tiedonkeruuyksikön ja alle 20 anturiyksikköä sisältävälle järjestelmälle on tähtitopologia. Tiedonkeruuyksikkö on keskellä ja anturiyksiköt ovat sen ympärillä. Tiedonsiirto tapahtuu half-duplex-periaatteella niin että tiedonkeruuyksikkö kuuntelee, kun anturiyksiköt lähettävät tietoa.

Jotta tiedettäisiin, mistä tieto tulee ja kenelle se on tarkoitettu, hyödynnetään automaattisen pakettikäsittelijän välityksellä TxHeader- kenttiä. Niitä tarvitaan kaksi kappaletta: toisella identifioidaan lähettäjä ja toisella vastaanottaja.

Rekisteriosoitteeseen 33 h kirjoitetaan bittikuvio 010 niin, että kokonaistavun D6 on 0, D5 on 1 ja D4 on 0. TxHeader-kenttien halutut arvot kirjoitetaan rekisteriosoitteisiin 3A h ja 3B h, näistä 3A-osoitteessa oleva lähetetään ensin. Kentät on ohjelmoitava samalla periaatteella kaikkiin järjestelmän piiriin kuuluviin radiomoduuleihin, koska näitä TxHeader-kenttiä oletetaan myös vastaanotossa olevan yhtä monta kuin lähetteessä. (Silicon Labs 2011, 16–17.)

Tähtitopologiassa järkevä informaatio anturiyksikön kentille on asettaa toiseen muistipaikkaan lähettävän yksikön id ja toiseen isännän id. Tiedonkeruuyksikön tapauksessa toiseen kenttään tulee yksikön id ja toisen kentän sisältö vaihtuu sen mukaan, minkä anturiyksikön kanssa keskustellaan.

7.4 Radiotien ominaisuuksien huomiointi ohjelmoinnissa

Modulaatioksi valitaan GFSK, koska se tarjoaa puhtaimman spektrin ja hyvän vastaanottoherkkyyden. Otetaan käyttöön Manchester-koodaus koska se vähentää bittivirheitä eli saadaan lisää hyödynnettävää herkkyyttä tätä kautta.

Hyödynnetään automaattisen pakettikäsittelijän CRC-virheentarkistus; vain tarkastuksesta läpimenevät paketit siirretään vastaanoton puskuriin ja sieltä mikrokontrollerille.

8 VARSINAISEN OHJELMOINNIN ALKUVAIHEET

8.1 Ensimmäinen vaihe – oheislaitteiden alustaminen

Jotta tarvittavat oheislaitteet saadaan käyttöön, tarvitsee niiden käyttämät rekisterit alustaa. MSP430:n tapauksessa nämä alustukset on määritelty Gracen avulla, LM4F120:n tapauksessa alustukset voidaan suorittaa valmiiden API-funktioiden avulla. Alustuksessa määritellään piiriltä tarvittavien digitaalisten I/O- nastojen toiminta ja SPI-väylän toiminta.

Radiomoduulin alustamista varten tehdään header tiedosto `rmfmap.h`, joka sisällytetään käännöksessä mukaan. Tässä tiedostossa on RMF23B:n rekistereiden osoitteet. Hyvää ohjelmointitapaa käytettäessä ei käytetä rekisteriasetusten laskentataulukosta saatuja arvoja, koska ne ovat bittikenttiä, eivät yksittäisten rekisteriasetusten arvoja. Laskentataulukosta saatuja arvoja voidaan kyllä hyödyntää yksittäisten bittien arvojen selvittämisessä (hex -> bin muunnos).

Esimerkki: Laskentataulukosta on saatu osoitteelle 30h arvo ACh eli 10101100b, käytännössä tämä tarkoittaa, että käytössä ovat `enpackrx`, `crconly`, `enpacktx`, `encrc`, CCITT laskettu crc-tarkiste (Silicon Labs 2012a, 36). Kuviossa yhdeksän on ympyröity arvon 1 saavat rekisterin bitit.

Register 30h. Data Access Control								
Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Name	enpackrx	lsbfrst	crconly	skip2ph	enpacktx	encrc	crc[1:0]	
Type	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	

Reset value = 10001101

Kuvio 9. Esimerkissä asetettavat rekisterin Data Access Control bitit.

Header tiedostosta löytyy tällöin seuraavat tiedot:

```
/* register 30h Data Access control, enpackrx, lsbfrst, crconly,
skip2ph, enpacktx, encrc, crc[1:0] */
#define DACCON          (0x30) // this is the address
#define ENPACKRX       (0x80) // check that dtmod = 10 at reg 71h
#define LSBFRST        (0x40)
#define CRCONLY        (0x20)
#define SKIP2PH        (0x10)
#define ENPACKTX       (0x08)
#define ENCRC          (0x04)
```

```

#define CRC_CCITT      (0x00)
#define CRC_CRC16     (0x01)
#define CRC_IEC16     (0x02)
#define CRC_BIAVA     (0x03)

```

Käytössä on funktio writeRMR(address). Tällöin halutut rekisteriasetukset saadaan suorittamalla writeRMR(DACCON) = ENPACKRX + CRCONLY + ENPACKTX + ENCRC + CRC_CCITT

8.2 Toinen vaihe – tarvittavien keskeytysten käyttöönotto

Koska sekä radiomoduulilla että mikrokontrollerilla on käytössä lepojaksuja, täytyy keskeytyksiä hyödyntää niiden saamisessa takaisin aktiivitilaan.

Radiomoduulin tarjoamista keskeytyksistä otetaan käyttöön ainakin lähetys- ja vastaanottopuskureiden tilatietoja tarjoavat kolme rekisteriä jotka on ympäröity kuviossa 10:

Register 03h. Interrupt/Status 1

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Name	ifferr	itxffafull	itxffaem	irxffafull	iext	ipksent	ipkvalid	icrerror
Type	R	R	R	R	R	R	R	R

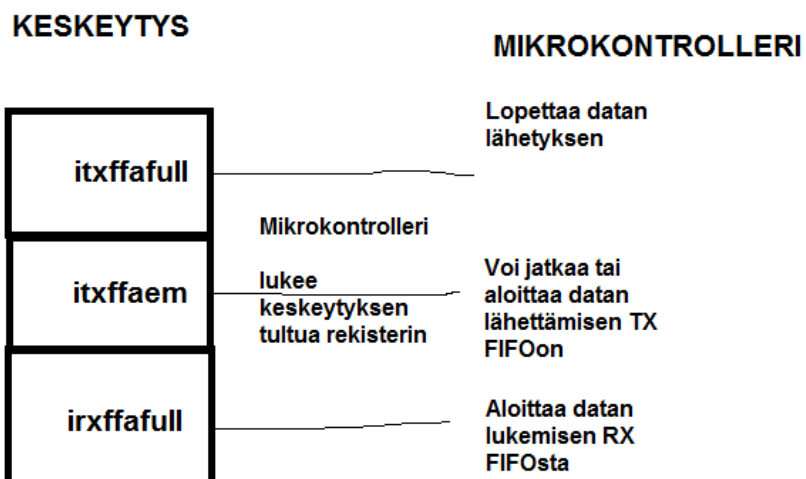
Reset value = xxxxxxxx

Kuvio 10.

Ne saadaan käyttöön asettamalla rekisteristä Interrupt Enable 1 osoitteessa 5h bitit 6 – 4 (Silicon Labs 2012a, 6, 10). Niiden raja-arvot asetetaan rekistereissä 7Ch, 7Dh, 7Eh (Silicon Labs 2012a, 57 – 58).

Kun joku asetetuista raja-arvoista saavutetaan, lähettää radiomoduuli keskeytyspyynnön vetämällä signaalin nIRQ alas. Kun mikrokontrollerilta käydään lukemassa tilarekisteri 03h, nousee signaali takaisin ylös ja tilarekisteri nollataan. (Silicon Labs 2012a, 6.)

Kuviossa 11 on esitelty keskeytysten avulla toteutetun ohjelmallisen logiikan toimintaa, mitä mikrokontrolleri tekee saatuaan radiomoduulilta keskeytyksen.



Kuvio 11. Radiomoduulilta tulevien keskeytysten suoritus.

Muita keskeytyksiä ei välttämättä tarvita radiomoduulin FIFO-puskurin hallintaan. Tosin myös ipksent- ja ipkvalid-keskeytyksiä voitaisiin hyödyntää itxffaem- ja irxffafull-keskeytysten sijasta tai ohella.

Koska kyseessä on mikrokontrollerin ulkoinen keskeytys, täytyy datalehdessä tarkastaa, mille nastoille se on saatavissa ja mikä keskeytysvektori sille voidaan asettaa.

8.3 Kolmas vaihe – datalehdistä tehtyjen havaintojen huomioiminen

Datalehdistä löytyy myös sellaisia tietoja, joiden jääminen huomioimatta aiheuttaa huomattavaa ajanhukkaa testaamisessa. Radiomoduulin osalta löysin kaksi sellaista asiaa, jotka saattavat jäädä havaitsematta. Ensimmäinen on luonteeltaan kriittinen, vaikka se ei ole varsinainen virhe.

Eli jos puskurit tarvitsee tyhjentää, täytyy puskurin tyhjentäminen suorittaa kahdessa vaiheessa: ensin tehdään puskurille reset ja sitten clear.

Vastaanottopuskurin tyhjentämiseksi ensin $ffclr_{rx} = 1$ sitten $ffclr_{rx} = 0$, lähetyspuskurin tyhjentämiseksi ensin $ffclr_{tx} = 1$ sitten $ffclr_{tx} = 0$ (Silicon Labs 2012a, 14). Kuvio 12 on lisätty muistutukseksi tästä havainnosta.

Register 08h. Operating Mode and Function Control 2

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Name	antdiv[2:0]			rxmpk	autotx	enldm	ffclrx	ffcltx
Type	R/W			R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Reset value = 00000000

Jotta puskurit saa tyhjennettyä tulee ympäröidyt rekisterit asettaa kahteen kertaan, ensin arvoon 1 ja sitten arvoon 0. Muuten puskurit eivät tyhjene !

Kuvio 12. Muista oikea menetelmä FIFO:n tyhjentämisessä.

Toinen tärkeä havainto vaikuttaa virrankulutusta kasvattavasti, mikäli se jätetään huomioimatta. Kun lähetys on hoidettu loppuun, jää radiomoduuli valmiustilaan READY. STANDBY-tilaan pääsemiseksi tulee rekisteriosoitteeseen 7h kirjoittaa arvo 00h, eli asettaa sekä pll on että xton arvoon 0. (Silicon Labs 2011, 3.)

9 YHTEENVETO

Työ yllätti hitaudellaan. Hitauteen vaikutti oman osaamistason ja kokemuspohjan lisäksi tiedonhankinnan hankaluus. Tietoa oli kyllä saatavilla, mutta tiedon löytämisessä meni runsaasti aikaa. Valmistajan sivuilta ei löytynyt lähtökohdaksi muuta kuin datalehti ja rekisteriarvojen laskentataulukko, vasta piirin valmistajan ja piirin tyyppin selviämisen jälkeen pääsin todenteolla eteenpäin.

Toki tiedon joutui edelleenkin kokoamaan useista sirpaleista, kuten lähdeluettelosta on havaittavissa, mutta ne sirpaleet alkoivat muotoutua valmiiksi kokonaisuudeksi. Kokonaisuuden saaminen opinnäytetyön muotoon oli varsin raskas prosessi rajallisen ajan takia, työ täytyi saattaa kirjalliseen muotoon ennen varsinaisen ohjelmoinnin täydellistä valmistumista.

Osa niistä parhaista opeista ja havainnoista jäi tähän työhön kirjaamatta. Sulautettujen järjestelmien ohjelmoinnin taidossa edistymisen kannalta löysin työn aikana hyödyllisiä nettilähteitä (LIITE 2), joten varsinainen oppiminen jatkuu alan luonteen mukaisesti tämän opinnäytetyön valmistumisen jälkeenkin.

Paras oppi, minkä tämä työ antoi, oli huomata käytännössä, kuinka lähellä laitteistoa sulautetun järjestelmän ohjelmoiminen menee. Ilman rekisterien tarkkaa tuntemista, on mahdotonta rakentaa luotettavaa ohjelmaa, samoin nopeaa toimintaa vaadittaessa on voitava kirjoittaa suoraan rekistereihin. Siinä on tämän työn todellinen haaste ja todellinen palkitsija.

Tämän opinnäytetyön päädyttyä tähän vaiheeseen tulee varsinainen työ vielä jatkumaan liitteessä kolme esiteltyjen funktioiden testaamisessa liitteessä neljä esitellyn suunnitelman mukaisesti.

LÄHTEET

Energizer. 2013. Lithium Iron Disulfide Handbook and Application Manual [viitattu 12.4.2013]. Energizer. Saatavissa:

http://data.energizer.com/PDFs/lithiuml91192_appman.pdf

Evjen, P. 2003. AN001 SRD regulations for license free transceiver operation [viitattu 31.3.2013]. Texas Instruments. Saatavissa:

<http://www.ti.com/lit/an/swra090/swra090.pdf>

Grace Quick Start Guide. 2013. [viitattu 5.4.2013]. Texas Instruments. Saatavissa:

http://processors.wiki.ti.com/index.php/Grace_Quick_Start_Guide

Hope Microelectronics Co Ltd. 2013. Mittaustulokset standardi EN300220 RFM23-434 MHz [viitattu 31.3.2013]. HopeRF. Saatavissa:

<http://www.hoperf.com/upload/rf/ETSI-RFM23-434.pdf>

Hope Microelectronics Co Ltd. 2011. RFM22B/23B ISM TRANSCEIVER MODULE V1.0. [viitattu 15.2.2013]. HopeRF. Saatavissa:

http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM22B_23B.pdf

Kvaksrud, T.-I. 2008. Range Measurements in an Open Field Environment [viitattu 7.4.2013]. Texas Instruments. Saatavissa:

<http://www.ti.com/lit/an/swra169a/swra169a.pdf>

Kärkkäinen, K. 2013. JATKUVAN AWGN-KANAVAN KAPASITEETTI — SHANNON-HARTLEY – LAKI [viitattu 8.4.2013]. Oulun Yliopisto. Saatavissa:

http://www.ee.oulu.fi/~kk/dtsp/21_Shannon_Hartley.pdf

Mikhaylov, K., Tervonen, J., Heikkilä, J. & Käsäkoski, J. 2012. Wireless Sensor Networks in Industrial Environment: Real-Life Evaluation Results [viitattu 12.2.2013]. Proc. BCFIC 2012, Apr. 25-27 2012. Saatavissa:

http://cc.oulu.fi/~kmikhayl/site-assets/pdfs/2012_BCFIC.pdf

Silicon Labs and Hope Microelectronics' Wireless Module Targets Green Energy. 2013. [viitattu 31.3.2013]. Silicon Labs. Saatavissa:

<http://www.silabs.com/products/wireless/Pages/Hope-Microelectronics-Wireless-Module.aspx>

Si4430/31/32 RF Transceivers. 2013. [viitattu 31.3.2013]. Silicon Labs.

Saatavissa:

<http://www.silabs.com/products/wireless/EZRadioPRO/Pages/si44303132.aspx>

Silicon Labs. 2009. 2009 EZRADIOPRO® RF TESTING QUICK-START GUIDE [viitattu 29.3.2013]. Silicon Labs. Saatavissa:

<http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/2009.pdf>

Silicon Labs. 2010. Si4430/31/32 ISM TRANSCEIVER Rev 1.1. [viitattu 31.3.2013]. Silicon Labs. Saatavissa:

<http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si4430-31-32.pdf>

Silicon Labs. 2011. AN537 FIFO MODE, DIRECT MODE, AND PACKET HANDLER OPERATION FOR EZRADIOPRO [viitattu 1.4.2013]. Silicon Labs. Saatavissa:

<http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/AN537.pdf>

Silicon Labs. 2012a. AN440 Si4430/31/32 REGISTER DESCRIPTIONS [viitattu 10.4.2013]. Silicon Labs. Saatavissa:

<http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/AN440.pdf>

Silicon Labs. 2012b. Si4x3xErrata (rev. B) [viitattu 31.3.2013]. Silicon Labs.

Saatavissa:

<http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si4x3xErrata.pdf>

Texas Instruments. 2012a. MSP430x2xx Family User's Guide [viitattu 7.4.2013].

Texas Instruments. Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/ug/slau144i/slau144i.pdf>

Texas Instruments. 2012b. Stellaris® Peripheral Driver Library User's Guide [viitattu 7.4.2013]. Texas Instruments. Saatavissa:

<http://www.ti.com/lit/ug/spmu019o/spmu019o.pdf>

Texas Instruments. 2013a. LM4F120H5QR ROM User's Guide [viitattu 7.4.2013]. Texas Instruments. Saatavissa:

<http://www.ti.com/lit/ug/spmu245a/spmu245a.pdf>

Texas Instruments. 2013b. SLAS735H –APRIL 2011–REVISED FEBRUARY 2013.[viitattu 25.3.2013] Texas Instruments. Saatavissa:

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf>

Texas Instruments. 2013c. Stellaris® LM4F120H5QR Microcontroller [viitattu 25.3.2013] Texas Instruments. Saatavissa:

<http://www.ti.com/lit/ds/spms294g/spms294g.pdf>

Tiusanen, J. 2010. Langattomien laitteiden käyttäminen maatalaolosuhteissa [viitattu 15.2.2013]. Maataloustieteiden päivät 2010. Saatavissa:

<http://www.smts.fi/jul2010/esite2010/085.pdf>

Viestintävirasto. 2013. Taajuusjakotaulukko 26.3.2013 [viitattu 1.4.2013].

Viestintävirasto. Saatavissa:

https://www.viestintavirasto.fi/attachments/Taajuusjakotaulukko_26032013.pdf

LIITTEET

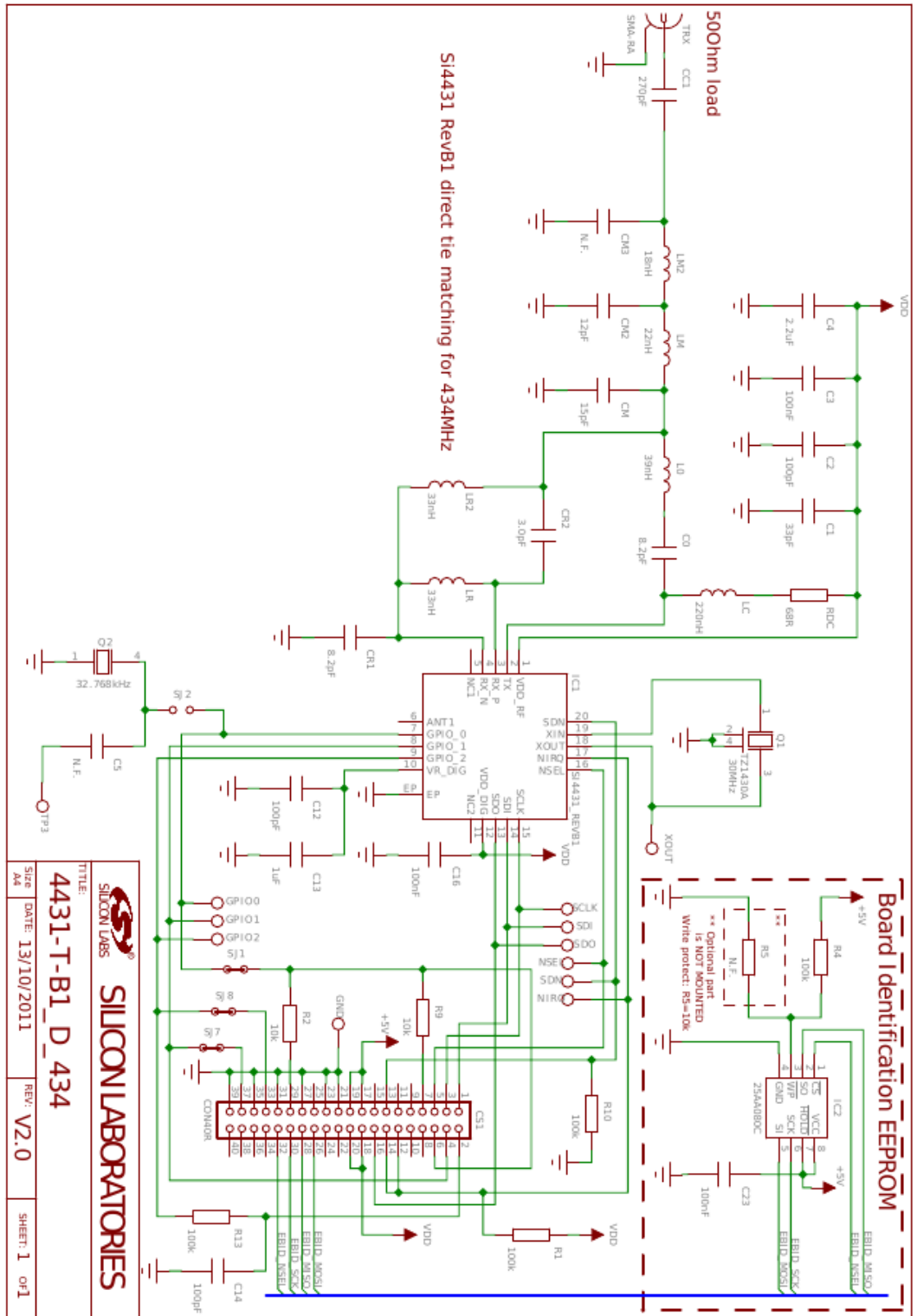
LIITE 1. Silicon Labs Si4431 mallikytkenä, sarja D

LIITE 2. Työn aikana sulautettujen järjestelmien ohjelmoinnin kannalta hyväksi havaittuja nettisivustoja.

LIITE 3. Tarvittavien funktioiden suppeat kuvaukset

LIITE 4. Suppea testaussuunnitelma

LIITE 1. Silicon Labs Si4431 mallikytentä, sarja D



LIITE 2. Työn aikana sulautettujen järjestelmien ohjelmoinnin kannalta hyväksi havaittuja nettisivustoja.

<http://www.ganssle.com/>

Jack Gansslen sivusto, artikkeliosuudessa löytyy paljon asiaa sopivasti huumorilla höystettynä.

<http://embeddedgurus.com/>

Nigel Jonesin Stack Overflow blogi oli hyödyksi ohjelmiston suunnittelussa, Miro Samekin State Space blogia taas tuli luettua lähinnä siksi että aikoinaan aikuiskoulutuskeskuksessa käymälläni Java kurssilla opin hyödyntämään UML kuvantamista ohjelmoinnissa, pikku hiljaa UML on tulossa mukaan myös sulautettujen järjestelmien ohjelmointiin.

<http://www.edn.com/>

Silloin tällöin vastaan tulee mielenkiintoisia artikkeleja, viimeisin mieleen jäänyt on langattomien järjestelmien tietoturvaan liittynyt:

<http://www.edn.com/design/systems-design/4410267/The-Right-and-Wrong-Way-to-Implement-Cryptographic-Algorithms-in-Embedded-Electronic-Systems>

<http://www.eetimes.com/>

Pitää hyvin ajan tasalla laitteistopuolen uutuuksista, ajoittain lisäksi laadukkaita artikkeleita erilaisten sulautettujen järjestelmien suunnittelusta.

Google+ , signaali kohinasuhde on ainakin toistaiseksi varsin hyvä, seuraamiani yrityksiä ovat muun muassa Texas Instruments, Freescale, Maxim Integrated, Adafruit, DigiKey, RS Electronics, ohjelmoinnin puolelta lähinnä Qt projekti, Linux jakelut OpenSuse ja Mageia sekä KDE työpöytäympäristö

LIITE 3. Tarvittavien funktioiden suppeat kuvaukset

rfm.c tiedoston funktiot

writeRMR(address)

- osoitteeseen lisätään bittimaski 0x100, jotta 8-bitti asettuu ykköseksi ja saadaan aikaiseksi rekisteriin kirjoitus

readRMR(address)

- hyödynnetään esim. RSSI arvon lukemisessa, keskeytysrekisterien lukemisessa

readFIFO (void)

- burst mode puskurin lukeminen

writeFIFO(void)

- burst mode puskuriin kirjoittaminen

initRM(void)

- radiomoduulin alustaminen

main.c tiedostossa toteutettavat radiomoduuliin liittyvät funktiot:

setDelay(void)

- virransäästötilojen aiheuttamien viiveiden huomiointi

irRMCheck(void)

- radiomoduulin antamien keskeytysten käsittely, luetaan keskeytysrekisterit ja käsitellään saadun arvon mukaisesti

LIITE 4. Suppea testaussuunnitelma

SPI-väylä:

Ennen radiomoduulin kytkemistä SPI-väylään liittyvän koodin toimimista tutkitaan kahden MSP430 Launchpadin välillä, toinen master toinen slave, debuggaus tapahtuu slave puolella, tarkistetaan että oikeat arvot tulevat perille.

Ensimmäinen kytkeminen radiomoduuliin:

Luetaan firmware tiedot, jotta saadaan varmuus että kyseessä on firmwären versio b. Sen jälkeen asetetaan rekisterit ja luetaan annetut asetukset, tarkistetaan että arvot ovat oikein.

Radiomoduulien välinen liikenne:

Seurataan RSSIn voimakkuutta, pakettien tulemistä läpi. Testataan häiriökestoisuus laittamalla yksi moduuli lähettämään jatkuvaa häiriösignaalia(PN9:llä generoitua dBm 0) testattavien moduulien yhteysvälin puoliväliin.

Tutkitaan hyödynnetäänkö Manchester-koodauksen sijasta datan valkaisu. Selvitetään parantaako tehon pudotus pakettien läpimenoa hankalissa monitieheijastumisolosuhteissa.