

Realisatie van een Headbanging Orkest met behulp van bewegingssensoren en wireless links

Wouter Verstichel, Bart Kuyken

Promotoren: prof. dr. ir. Jan Vanfleteren, prof. dr. Marc Leman
Begeleiders: Frederick Bossuyt, dr. Michiel Demey

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van
Burgerlijk elektrotechnisch ingenieur

Vakgroep Elektronica en informatiesystemen
Voorzitter: prof. dr. ir. Jan Van Campenhout

Vakgroep Kunst-, muziek- en theaterwetenschappen
Voorzitter: prof. dr. Marc Leman

Faculteit Ingenieurswetenschappen
Academiejaar 2007-2008



Voorwoord

Graag willen we alle mensen bedanken die ons geholpen hebben deze scriptie tot een goed einde te brengen. Het was zeer interessant, maar daarom niet altijd even evident, een scriptie te maken voor twee zeer uiteenlopende vakgroepen. Daarom willen we van deze gelegenheid gebruik maken onze begeleiders Michiel Demey, bij de vakgroep kunst-muziek- en theaterwetenschappen, en Frederick Bossuyt, bij de vakgroep elektronica en informatiesystemen, te bedanken voor hun geduld, inzet en motivatie.

Onze promotoren Marc Leman, bij de vakgroep kunst- muziek- en theaterwetenschappen, en in het bijzonder Jan Vanfleteren, bij de vakgroep elektronica en informatiesystemen, zouden we graag hartelijk bedanken voor de kans en het vertrouwen.

Tot slot willen we iedereen bedanken die ons geholpen heeft onze scriptie door te lezen en feedback te geven: Hugo Kuyken, Willy Verstichel, An De Bock, Helena Vanderstraeten, Michiel Demey en Frederick Bossuyt, dank je wel.

Bart Kuyken, Wouter Verstichel, juni 2008

Toelating tot bruikleen

“De auteurs geven de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de scriptie te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze scriptie.”

Bart Kuyken, Wouter Verstichel, juni 2008

Realisatie van een Headbanging Orkest met behulp van bewegingssensoren en wireless links

door

Wouter VERSTICHEL en Bart KUYKEN

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van
BURGERLIJK INGENIEUR IN DE ELEKTROTECHNIEK:
OPTIE ELEKTRONISCHE CIRCUITS EN SYSTEMEN

Academiejaar 2007–2008

Promotoren: prof. dr. ir. J. VANFLETEREN, prof. dr. M. LEMAN

Scriptiebegeleiders: ir. F. BOSSUYT, dr. M. DEMEY

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Universiteit Gent

Vakgroep Elektronica en informatiesystemen

Voorzitter: prof. dr. ir. J. VAN CAMPENHOUT

Vakgroep Kunst-, muziek- en theaterwetenschappen

Voorzitter: prof. dr. M. LEMAN

Samenvatting

Deze scriptie presenteert een draadloos systeem geschikt voor een breed gamma aan bewegingsexperimenten. Aan de hand van accelerometers, gyroscopen en magnetometers wordt de beweging van meerdere gebruikers tegelijkertijd opgemeten en centraal verzameld. Deze data wordt gebruikt voor analyse, sonificatie en visualisatie van beweging.

Trefwoorden

Inertial Measurement Unit, digitaal muziekinstrument, MEMS sensoren, draadloze link

The HOP sensor: Wireless Motion Sensor

Bart Kuyken Wouter Verstichel

Supervisor(s): prof. dr. ir. Jan Vanfleteren, prof. dr. Marc Leman, ir. Frederick Bossuyt, dr. Michiel Demey

Abstract—This paper describes the HOP system: a wireless module built up by multiple nodes and receivers. The nodes detect acceleration, rotational motion and the earth magnetic field. At a rate of 100 samples per second per node the receivers collect measured values. The data can be acquired in real-time software like Pure Data and Max/MSP where they can be applied to a Kalman filter [1], [2] or used to analyze and/or sonify movement. Up to 15 nodes can be used simultaneously.

Keywords—Digital Musical Instrument, Wireless Sensors, Inertial Sensing, Hop Sensor, Inertial Measurement Unit

I. INTRODUCTION

THIS paper presents wireless motion sensors. Up to 15 people can attach a node to their body; the rotation, acceleration and earth magnetic field will be measured in three dimensions and transmitted to several receivers at a data rate of 100 samples per second. The collected data can be applied to a Kalman filter [1], [2] or used to analyze or sonify movement. Distances up to 50 meters are achieved between transmitter and receiver.

II. HARDWARE

A. Node

The sensors attached to the node are two gyroscopes, one accelerometer and one magnetometer. The user can choose between different transmitting modules, according to the desired broadcasting range. The first option is a self-designed PCB with a PCB wiggle antenna, the second option is an amplifier module.

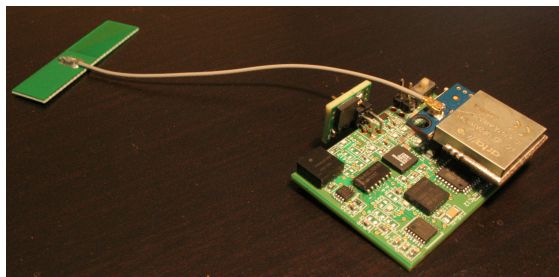


Fig. 1. Node with amplifier module.

The LIS3LV02DQ [3] of STMicroelectronics is able to measure human acceleration. This component provides an I^2C serial interface to communicate with the external world.

The gyroscopes used are IDG300's, produced by Invensense [4] with a range from -500 $^{\circ}/s$ to $+500$ $^{\circ}/s$, which is more than suitable for human motion applications.

The HMC1053 from Honeywell [5] measures the earth magnetic field in three dimensions. The output of the three internal Wheatstone bridges are amplified by using the LMV358 [6] differential OPAMP.

The radio chip used to establish the wireless link is the CYWM6936 chip from Cypress Semiconductor [7]. The chip

runs the WirelessUSB protocol, which accesses the 2.4 GHz ISM frequency band. The chip sends data at a rate of 256 kbit/s in DSSS format, which minimizes interference with other signals e.g. Bluetooth, WiFi. The user can choose between two different RF modules without manipulating the firmware in the microcontroller of the node: an unamplified module with PCB antenna with an output power of 4 dBm, or a power amplifier module with an external antenna and an output power of 20 dBm. The module without the amplifier requires less current, but reduces the operating range of the node.

The dataflow on the node is shown in figure 2. The rotational data is acquired by the internal ADC of the microcontroller, the ATmega168V of Atmel Corporation [8]. Because of the limitation on the number of channels on the internal Analog-to-Digital Converter (ADC), an external ADC is needed for the magnetometer. Both the external ADC and accelerometer communicate with the microcontroller through the I^2C protocol.

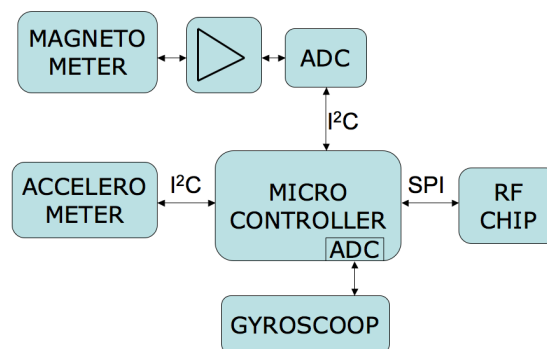


Fig. 2. Communication overview on the node.

The acceleration data is measured with a resolution of 12 bit, the gyroscope and magnetometer values are quantified with a precision of 10 bit. The microcontroller sends the data to the RF chip through the SPI interface. The RF chip transmits the data to several receivers.

B. Receiver

A receiver consists of a RF chip (CYWM6936), a microcontroller(ATmega168V), a 'USB to UART' chip (CP2102) [9] and an Ethernet controller (ENC28J60) [10]. The latter two allow communication with a host computer by both USB and Ethernet. The RF chip receives data from different nodes and sends it to the microcontroller through the SPI interface. The collected data of one timeslot is placed in several arrays, one for each node, ready to be sent to the computer. An overview of the communication is given in figure 4.

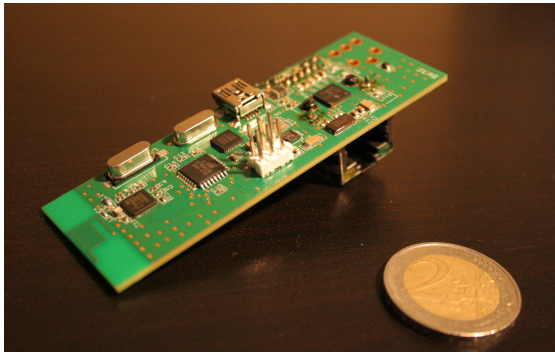


Fig. 3. Receiver.

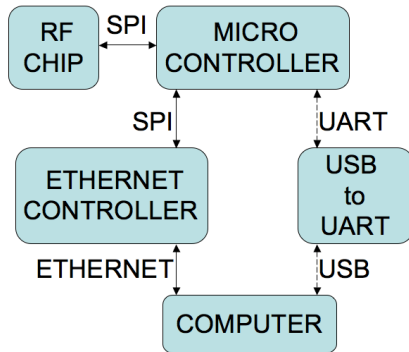


Fig. 4. Communication overview on the receiver.

III. TRANSMISSION

One central node is responsible for the general timing on the wireless link. Every ten milliseconds this node transmits a packet, indicating the start of a new timeslot for the other nodes. The other nodes respond on the same frequency channel using TDMA (Time Division Multiple Access): they all send their packet with their sensor values one after another in the same timeslot. Every receiver is able to receive all the packets. Multiple receivers are used to reduce packet loss. The collected data is loaded in a UDP packet: each byte represents a sensor value of a specific node. The last byte of every array is a counter indicating the timeslot. Once the timeslot is finished the receiver broadcasts this packet over the Ethernet. When a receiver does not get a packet from a node, the according spot in the UDP packet for that specific node is filled up with ones.

The use of Ethernet has multiple advantages: different computers can process the information simultaneously, each computer receives the data from each receiver and the number of receivers is unrestricted. The combination of the information from different receivers reduces packet loss. The combination of the different UDP packets from different receivers is handled by performing a logic AND operation.

IV. RESULTS

The weight of one node is 37 g and the dimensions are 15 mm x 50 mm x 30 mm, including a LiPo battery. The battery-life is approximately 20 hours. Distances up to 50 meters are allowed between transmitter and receiver when the power amplifier is

TABLE I
PROPERTIES.

Number of nodes	15
Operating range	50 meter
Samples per second	100
Battery lifetime	≈ 20 hours
Packet loss	≈ 1 procent

used. Without the amplifier distances of 7 meter are achieved. Packet loss is approximately 1 % in a radius of 30 meter with the amplifier, without the amplification the radius shrinks down to 5 meter. Shielding from the body is the major cause of packet loss. By using different receivers larger areas can be covered. The TDMA protocol allows the use of 15 nodes simultaneously. Furthermore the TDMA protocol assures a constant datarate of 100 samples per second. A node with amplifier consumes 45 mA. Figure 5 shows the consumption of the components on the node. Table I shows the major properties of the system.

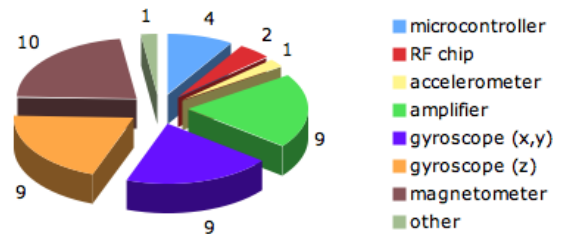


Fig. 5. Every nodes consumes up to 45 mA.

V. CONCLUSIONS

A complete wireless inertial measurement system was presented, able to support multi-user experiments for orientation and acceleration tracking in a wide range of applications.

REFERENCES

- [1] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. Series D, pp. 35–45, 1960.
- [2] Greg Welch and Gary Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," Tech. Rep., University of North Carolina, Chapel Hill, NC, USA, 1995.
- [3] "STMicroelectronics LIS3LV02DQ Accelerometer," <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/11115.htm>.
- [4] "InvenSense IDG-300 Dual-Axis Gyroscope," http://www.invensense.com/shared/pdf/IDG_300_Datasheet.pdf.
- [5] "Honeywell HMC1053 Three-Axis Magnetometer," <http://www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/HMC105X.pdf>.
- [6] "National Semiconductor LMV358 OPAMP," <http://www.national.com/pf/LM/LMV358.html>.
- [7] "Cypress Semiconductor RF Chip CYWUSB6935," http://download.cypress.com.edgesuite.net/design_resources/datasheets/contents/cywusb6935_8.pdf.
- [8] "Atmel Corporation ATmega168V Microcontroller," http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2545.pdf.
- [9] "Silicon Labs CP2102 USB to UART Bridge," http://www2.silabs.com/public/documents/tpub_doc/dsheet/Microcontrollers/Interface/en/cp2102.pdf.
- [10] "Microchip Technology ENC28J60 Ethernet Controller," http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en025831&part=AC16412.

Inhoudsopgave

Voorwoord	ii
Toelating tot bruikleen	iii
Overzicht	iv
Extended abstract	v
Inhoudsopgave	vii
Gebruikte afkortingen	x
1 Inleiding	1
2 Doelstelling	3
3 Technologievereisten	5
4 Vergelijkbare systemen	8
4.1 Gesture Follower	8
4.2 Wireless Sensor Platform	9
4.3 Celeritas	10
4.4 Senseable	11
5 Nulde generatie	13
5.1 Prestaties en tekortkomingen	14
6 Eerste generatie	16
6.1 Componentenkeuze	17
6.1.1 RF chip en antenne	17
6.1.2 Microcontroller	19
6.1.3 Accelerometer	19
6.1.4 USB to UART Bridge	20

6.2	Dataverzameling	20
6.2.1	Drukknoppen	21
6.2.2	Acceleratiewaarden	21
6.3	Transmissieprotocol	22
6.3.1	DSSS	22
6.3.2	TDMA	22
6.3.3	Frequentiehoppen	23
6.3.4	Timing	24
6.3.5	Time-outs	25
6.3.6	Uitpakken van de gegevens	26
6.4	Voeding	27
6.5	Schema en layout	27
6.5.1	Schema	27
6.5.2	Layout	28
6.6	Prestaties en mogelijke verbeteringen	29
6.6.1	Prestaties	29
6.6.2	Mogelijke verbeteringen	30
7	Tweede generatie	34
7.1	Componentenkeuze	34
7.1.1	RF chip	34
7.1.2	Oplaadchip	36
7.2	Transmissieprotocol	36
7.2.1	TDMA	36
7.2.2	Snelheid RF chip	37
7.2.3	Time-outs	38
7.3	Schema en layout	39
7.3.1	Node	39
7.3.2	Basisstation	43
7.4	Prestaties en mogelijke verbeteringen	46
7.4.1	Prestaties	46
7.4.2	Mogelijke verbeteringen	46
8	Derde generatie	49
8.1	Componentenkeuze	52
8.1.1	Gyroscoop	52
8.1.2	Magnetometer	52
8.1.3	Versterker	53
8.1.4	Antenne	54
8.1.5	Ethernet controller	56

8.2	Transmissieprotocol	56
8.2.1	Start van het protocol	56
8.2.2	Meerdere ontvangers	57
8.2.3	1 kanaal	58
8.2.4	Teller	58
8.2.5	Time-outs	58
8.3	Schema en layout	59
8.3.1	Node	59
8.3.2	Basisstation	69
8.4	Prestaties	74
9	Besluit	80
A	Communicatie tussen de verschillende componenten	84
A.1	Communicatie op de node	84
A.1.1	Communicatie tussen microcontroller en accelerometer: I^2C	84
A.1.2	Een implementatie in C van het I^2C protocol op de microcontroller	89
A.1.3	Communicatie tussen microcontroller en de RF chip: SPI	90
A.1.4	Een implementatie in C van het SPI protocol op de microcontroller	92
A.2	Communicatie op het basisstation: eerste en tweede generatie	93
A.2.1	Communicatie tussen microcontroller en computer: UART en USB	93
A.3	Communicatie op het basisstation: derde generatie	96
A.3.1	Communicatie tussen het basisstation en de computer: User Data- gram Protocol via Ethernet	96
	Bibliografie	103
	Lijst van figuren	106
	Lijst van tabellen	109

Gebruikte afkortingen

AC	Alternating Current
ADC	Analog-to-Digital Converter
DC	Direct Current
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
GF	Gesture Follower
GFSK	Gaussian Frequency-Shift keying
GSM	Global System for Mobile communications
I^2C	Inter-Integrated Circuit
IPEM	Institute for Psychoacoustics and Electronic Music
IRQ	Interrupt Request
kbit/s	kilobit per seconde
Mbit/s	Megabit per seconde
MISO	Master In Slave Out
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MOSI	Master Out Slave In
OPAMP	Operational Amplifier
PCB	Printed Circuit Board
RF	Radio Frequency
SPI	Serial Peripheral Interface Bus
TDMA	Time Division Multiple Access

UDP	User Datagram Protocol
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WSP	Wireless Sensor Platform

Hoofdstuk 1

Inleiding

Muziek bekleedt een centrale rol in het leven van de mens. Het is in staat emoties op te wekken die gaan van vreugde tot agressie en van nostalgie tot creativiteit. Muzikale beleving bevordert sociale contacten bij het dansen, het samen musiceren, het gezamenlijk bijwonen van een concert en ga zo maar verder. Waar vroeger muziek amper werd vernoemd in psychologische handboeken, wordt het medium nu erkend als een belangrijk en informatief studiedomein voor de cognitieve psychologie. Centraal daarbij staan de algemene principes van betekenisvorming, ontwikkeling en actuele omgang met muziektechnologie.

Hoe muziek ervaren wordt en hoe de mens zich gedraagt in de muzikale omgeving zijn enkele van de centrale vragen voor de muziekpsychologie en de systematische muziekwetenschap. Deze muziekwetenschappen trachten, hoofdzakelijk op basis van empirisch onderzoek, de natuurwetenschappelijke, psychologische en sociologische grondslagen van muziek beter te begrijpen en te verklaren [1]. Resultaten van dit onderzoek, dat gebaseerd is op observatie van en interactie met mensen, leiden tot inzicht in onze natuur, waarden, identiteit en levenskwaliteit.

Het onderzoeksgebied van de muziekpsycholoog omvat alle soorten van muzikaal gedrag zoals:

- het alledaagse luisteren naar muziek (bij het rijden, eten, werken...)
- muzikale rituelen en gelegenheden (feestelijk, sportief, politiek...)
- het leren bespelen van een instrument
- het vormen van een groepsidentiteit bij het dansen

- waarom we sommige muziek beter vinden dan andere muziek
- het emotioneel reageren op muziek
- de ontwikkeling van muzikaliteit tijdens het ouder worden
- improvisatie
- ...

De vakgebieden muziekpsychologie en systematische muziekwetenschap zijn nauw verbonden met het onderzoek dat gebeurt aan het Instituut voor Psychoacoustica en Elektronische Muziek (IPEM) [1], een onderzoeksinstituut dat de grondslagen van muziek en muziekperceptie experimenteel onderzoekt. Nauwgezette onderzoeksmethodes en geavanceerde meetinstrumenten zijn strenge vereisten om kwalitatieve en betekenisvolle resultaten te behalen. In het kader van dit experimenteel onderzoek werd het *headbanging orkest met bewegingssensoren en wireless links* ontwikkeld.

Hoofdstuk 2

Doelstelling

Op het IPeM wordt onderzoek uitgevoerd naar het gedrag van mensen in een muzikale omgeving. Voor deze scriptie werd gevraagd een technologie te ontwikkelen waarbij de beweging van mensen, als respons op muzikale stimuli, geregistreerd kan worden. Bewegingsexperimenten kunnen op die manier geregistreerd, bijgehouden en op elk moment opgevraagd worden om ze te onderwerpen aan grondige analyses. Resultaten kunnen antwoord geven op tal van vragen als: hoe beïnvloedt een muzikaal groepsgebeuren een individu, hoe evolueert het ritmegevoel bij kinderen, welk type muziek roept de hevigste emoties op enz. Experimenten kunnen ook in die zin omgedraaid worden, dat de bewegingsmetingen gebruikt worden om muziek te synthetiseren.

Bij het opmeten van beweging is nauwkeurige, stabiele, robuuste apparatuur essentieel. Bewegingssensoren worden in het algemeen op het lichaam geplaatst en dat brengt een heleboel complicaties met zich mee. Er moet gestreefd worden naar een oplossing die participanten in het experiment weinig tot niet hindert. Dat betekent dat bewegingssensoren best zo klein en licht mogelijk zijn, en zo weinig mogelijk bedrading omvatten. Daar de participant praktisch continu in beweging is, moet de meetapparatuur ook tegen een stootje kunnen.

De ontwikkelde technologie moet uiteraard ook betrouwbaar zijn. Daarmee wordt bedoeld dat de meetwaarden de beweging correct moeten representeren en dat een identieke meting op een ander tijdstip hetzelfde resultaat moet geven.

Aangezien op het IPeM regelmatig experimenten in groep worden uitgevoerd, is het de bedoeling een systeem uit te bouwen waar de beweging van meerdere individuen tegelijkertijd geëvalueerd kan worden. Niet onbelangrijk is het feit dat een experiment enige tijd in

beslag kan nemen. De technologie moet dus capabel zijn gedurende de hele duur van het experiment te functioneren, en daarbij dezelfde prestaties van begin tot einde volhouden.

Hoe deze doelstellingen zich laten vertalen in specifieke technologievereisten wordt besproken in het volgende hoofdstuk.

Hoofdstuk 3

Technologievereisten

Uitgaande van de doelstellingen beschreven in het vorige hoofdstuk, is het mogelijk de specificaties te vertalen in technische vereisten voor het algemene systeem.

Om een systeem te ontwerpen waarbij participanten in een experiment zo weinig mogelijk gehinderd worden door bedrading, is het aangewezen een draadloze link op te zetten. Meer bepaald een draadloos multipoint-to-one-point netwerk: meerdere bewegingssensoren kunnen hun meetwaarden naar één en dezelfde centrale rekeneenheid sturen, gezien het de bedoeling is voornamelijk groepsexperimenten uit te voeren. Het systeem kan dus opgesplitst worden in nodes die de bewegingswaarden verzamelen en versturen, en een basisstation dat de gegevens van de nodes ontvangt en doorstuurt naar een computer. Het aantal nodes per basisstation werd nog niet exact gespecificeerd, maar op lange termijn wordt wel verwacht over minimaal 8 nodes te beschikken.

Elke node bevat een sensor die de beweging van de gebruiker opmeet. Om beweging te meten is het aangewezen acceleratiesensoren te gebruiken. De gebruikelijke eenheid waarin de versnellingswaarden van een zogenaamde accelerometer wordt uitgedrukt, is g-kracht, waarbij 1 g staat voor de waarde van het zwaartekrachtsveld van de aarde. Vooraleer naar een geschikte accelerometer werd gezocht, werden eerst experimenten op het IPEM uitgevoerd met een commercieel systeem (Xsens [2]), om te onderzoeken welke g-krachten het menselijke lichaam kan ontwikkelen. Er werden waarden tot 6 g genoteerd.

Belangrijk voor een node is die op zo een manier te ontwerpen, dat achteraf extra functionaliteit kan toegevoegd worden. Zo kunnen gyroscopen en magnetometers extra informatie geven over de oriëntatie van een node.

Meetwaarden die aan het basisstation ontvangen worden, hebben als taak de beweging van de participanten in het experiment zo representatief mogelijk voor te stellen. Een constante en hoge datastroom van de node naar het basisstation is dus een strikte vereiste. Worden te weinig meetwaarden verzameld dan wordt de beweging niet nauwkeurig meer bemonsterd. Worden daarentegen teveel meetwaarden verzameld en doorgestuurd, dan wordt teveel bandbreedte van de draadloze link verbruikt en kunnen minder nodes tegelijkertijd van de voorziene frequentieband gebruik maken. Er moet dus een compromis gevonden worden voor het aantal acceleratiegegevens dat per seconde en per node wordt verzameld. Als standaard is hier 100 samples per seconde overeengekomen met het IPeM, wat zoveel betekent als 1 versnellingswaarde per 10 milliseconden. Deze datastroom moet uiteraard constant gehouden worden.

Het basisstation kan via de USB poort van een computer gevoed worden, maar voor de nodes is een oplossing met batterijen onoverkomelijk. Batterijen brengen het ongemak van een beperkte gebruiksduur met zich mee. Gezien een experiment enige tijd in beslag kan nemen en het niet wenselijk is batterijen te vervangen tijdens een experiment, is het belangrijk het vermogenverbruik van de nodes binnen de perken te houden. Hier is als standaard een levensduur van 6 uur voor de batterijen overeengekomen.

Doorheen het volledige onderzoek naar een geschikt en afgewerkt systeem werden verschillende tussenontwerpen gefabriceerd. Dit laat toe om het complexe probleem stap voor stap te benaderen. Voor een algemeen begrip van het afgewerkte systeem is het handig de verschillende tussenontwerpen één voor één te bespreken. In grote lijnen zijn drie belangrijke tussenstappen en bijbehorende ontwerpen te onderscheiden. Deze zullen we vanaf nu aanduiden met eerste, tweede en derde generatie. Vooraleer aan deze scriptie begonnen werd, was er al een instapsysteem beschikbaar van het hardware-ontwerpproject in de tweede proef [9], dat we gemakkelijks halve als nulde generatie zullen aanduiden.

De algemene specificaties werden gebundeld in tabel 3.1.

	specificaties
aantal nodes per ontvanger	>8
zendafstand	≈ 10 meter
samplerate	100 samples/s
vaste samplerate	ja
batterijlevensduur	>6 uur
sampleverlies	zo laag mogelijk
accelerometer	± 6 g

Tabel 3.1: Specificaties aan de scriptie.

Hoofdstuk 4

Vergelijkbare systemen

Om de toekomstige oplossing in een goede context te plaatsen is het nodig deze te vergelijken met bestaande systemen. Vergelijkbare systemen vallen uiteen in twee klassen.

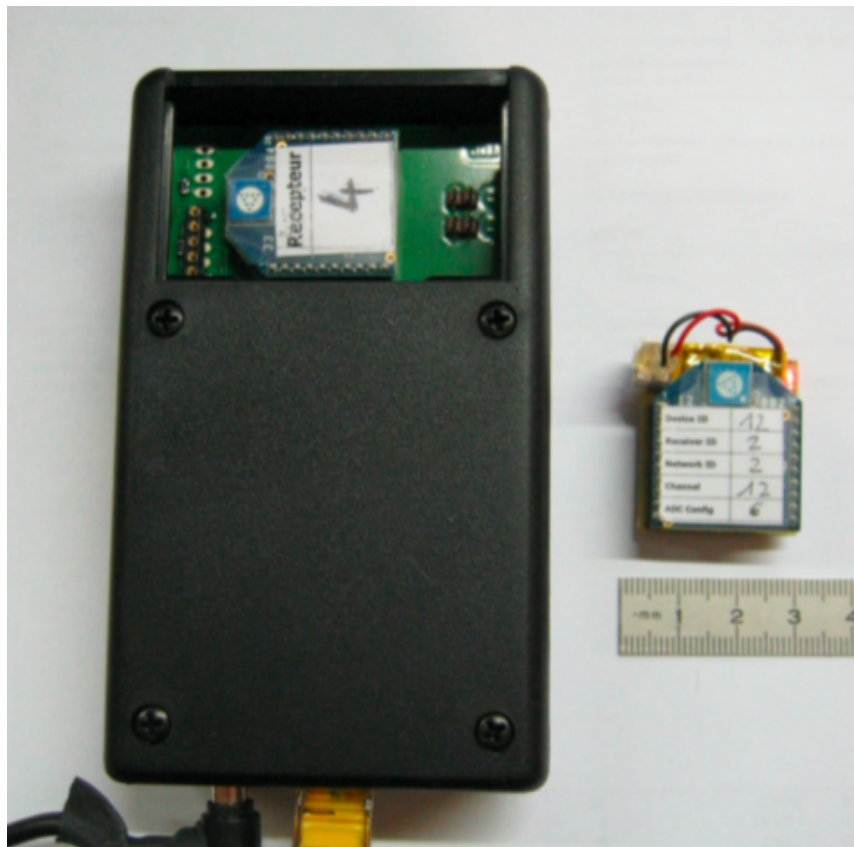
Enerzijds bestaan er commerciële oplossingen uitgerust met diverse sensoren zoals accelerometers, gyroscopen en eventueel magnetometers. Het toepassingsgebied van deze systemen is meestal de luchtvaart. De prioriteit bij deze systemen is in de eerste plaats nauwkeurigheid waardoor ze gauw duizenden euro's kosten. Ze zijn meestal niet draadloos waardoor het stroomverbruik niet belangrijk is. In het geval ze draadloos zijn, zijn ze meestal te groot om comfortabel gedragen te worden door dansers. Deze systemen zullen dan ook niet verder worden besproken. Een overzichtelijke lijst is terug te vinden in [3].

Anderzijds bestaan er draadloze systemen, ontwikkeld op diverse universiteiten, die zich focussen op hetzelfde toepassingsgebied. Hier worden vier recente systemen toegelicht die min of meer aan de vooropgestelde specificaties voldoen.

4.1 Gesture Follower

Een zeer eenvoudige oplossing is de Gesture Follower (GF) voorgesteld door Bevilacqua [4]. Hij gebruikt een eenvoudige XBee module [5]. Zo een XBee module heeft een aantal analoge ingangen en kan deze zonder tussenkomst van een microcontroller bemonsteren en doorsturen naar een andere XBee module. Het basisstation is ook uitgerust met een XBee module. De ontvangen waarden worden via Ethernet naar de computer doorgestuurd. De gegevens die verstuurd worden zijn vijf waarden met een precisie van 10 bits. Deze

gegevens zijn de uitgang van een drie-assige accelerometer en een twee-assige gyroscoop. Het zendvermogen is 0 dBm wat het bereik van de module beperkt tot ongeveer 7 meter. De samplerate van dit systeem is inherent verbonden aan de specificaties van de XBee module [5] en is 200 samples per seconde. Het systeem ondersteunt een node per basisstation en verbruikt 40 mA. De afmetingen zijn 38 mm op 27 mm op 11 mm.



Figuur 4.1: Gesture Follower.

4.2 Wireless Sensor Platform

Het Wireless Sensor Platform (WSP) [6] is een platform dat verschilt met de overige oplossingen doordat elke persoon, weliswaar uitgerust met verschillende nodes, een apart basisstation heeft. Dit basisstation noemt men een Data Aggregator. Deze Data Aggregator zal op zijn beurt de data doorsturen naar een computer via WiFi. Het voordeel van zo een systeem is dat het zeer schaalbaar is. Natuurlijk moet de danser dan in de buurt blijven

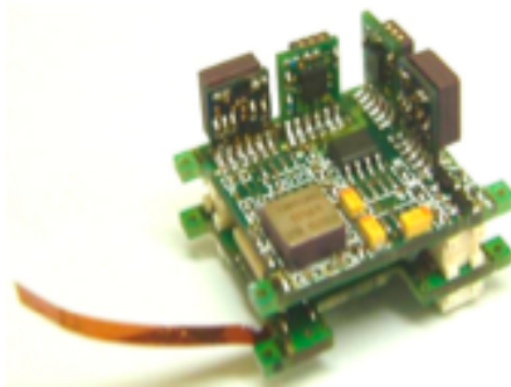
van zijn Data Aggregator. De data wordt per node verstuurd met een Nordic RF chip met een uitgangsvermogen van 0 dBm wat de afstand tot de Data Aggregator beperkt tot 7 meter. Er worden drie versnellingswaarden en een gyroscoopwaarde doorgestuurd met een resolutie van 10 bit. Deze sensoren zitten op een ander bordje zoals weergegeven op figuur 4.2. Op elke Data Aggregator kunnen vier nodes worden aangesloten. Het stroomverbruik van een node bedraagt 50 mA. Een node meet 20 mm op 20 mm op 45 mm.



Figuur 4.2: Zendeel (links) en sensoreel (rechts) van de WSP

4.3 Celeritas

Celeritas [7] is een systeem ontwikkeld aan de universiteit van Limerick en Cork en voorgesteld op de conferentie voor New Interfaces for Musical Expression (NIME) in 2007 in New York. De Celeritas heeft een Nordic RF chip en kan hiermee data versturen over een afstand van 7 meter aan een datarate van 1 Mbit/s. Het is mogelijk om het sensornetwerk uit te rusten met acht verschillende nodes die in theorie maximaal 72 samples per seconde doorsturen naar een basisstation. Deze datarate is een absoluut maximum als gevolg van de beperking van de datastroom van het basisstation naar de computer. Deze bedraagt maximaal 115200 bit/s. De data van elke node bestaat uit drie versnellingswaarden, drie gyroscoopwaarden, drie uitgangen van een magnetometer en een sensornummer, elk twee bytes groot. Elke sample bestaat bijgevolg uit 20 bytes. Deze bytes worden over de UART lijn naar de computer telkens met een start- en stopbit uitgebreid, waardoor het totale pakket 200 bits groot wordt. Zo wordt voor acht sensoren (1600 bit) over een lijn van 115200 bit/s de plafondwaarde van 72 samples per sensor per seconde bekomen. Het vermogenverbruik van de sensor wordt niet gespecificeerd, maar de levensduur van de batterij is een drietal uur. Het systeem meet 25 mm op 25 mm op 50 mm en weegt 30 gram.

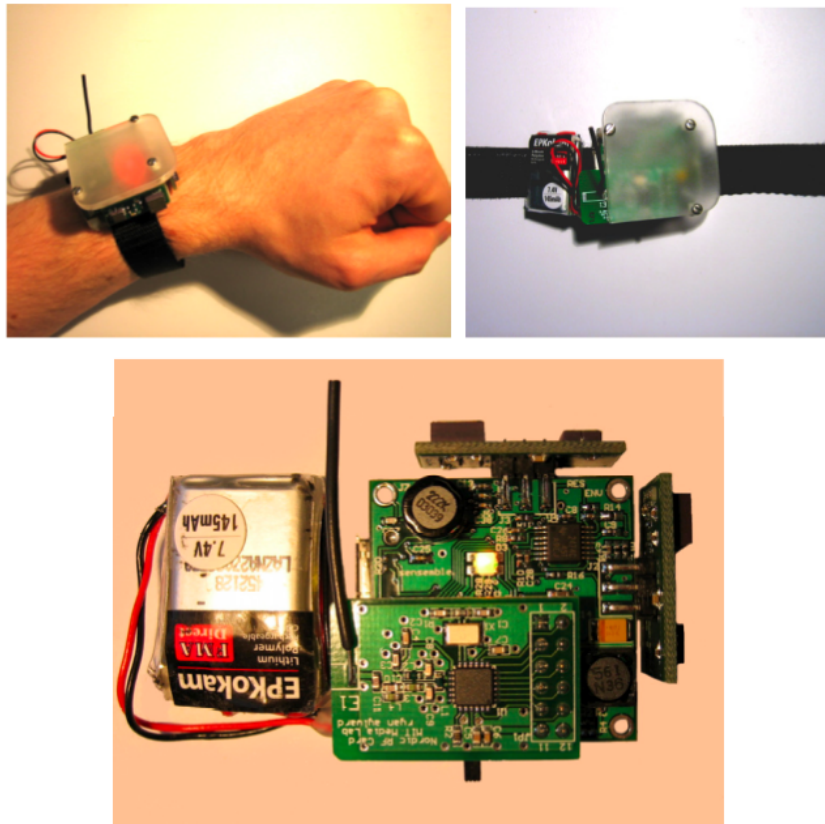


Figuur 4.3: Celeritas.

4.4 Sensemble

Sensemble [8] werd ontwikkeld aan het Massachusetts Institute of Technology Media Lab. Het betreft een hoogwaardig systeem waar tot 20 sensoren per basisstation kunnen worden aangesloten. In tegenstelling tot het ontwerp besproken in de vorige paragraaf werd hier een vaste samplerate vooropgesteld. Deze samplerate werd ingesteld op 100 samples per seconde. De verschillende nodes zijn uitgerust met accelerometers en gyroscopen. De data die de nodes volgens een TDMA protocol naar het basisstation doorsturen, bestaat uit drie acceleratiewaarden en drie gyroscopwaarden met een resolutie van twaalf bit. Voor de draadloze link werd een RF chip van Nordic gebruikt die data doorstuurt aan een datarate van 1Mbit/s. Het stroomverbruik van deze oplossing bedraagt 65 mA. De grootte van een node bedraagt 40 mm op 40 mm op 20 mm. Dit systeem is superieur aan de voorgaande door de combinatie van het grote aantal nodes dat het ondersteunt met de vaste samplerate van 100 samples per seconde.

De systemen worden nog eens vergeleken in tabel 4.4.



Figuur 4.4: Sensemble.

	GF	WSP	Celeritas	Sensemble	HOP Specificaties
aantal nodes	1	4	8	20	> 8
zendafstand	7 meter	7 meter	7 meter	7 meter	≈10 meter
samples/seconde	200	NA	< 72	100	100
vaste samplerate	NA	ja	nee	ja	ja
stroomverbruik	40 mA	50 mA	NA	65 mA	NA ¹
accelerometer	±3 g	±3 g	±2 g	±1,7g	±6 g

Tabel 4.1: Specificaties van vergelijkbare systemen.

¹ voorlopige vereiste aan het HOP systeem is dat batterijen minstens zes uur meegaan

Hoofdstuk 5

Nulde generatie

Tijdens de tweede proef elektrotechniek: elektronische circuits en systemen werd er samen met Maarten De Bock aan het hardware-ontwerpproject *Headbangsensor* gewerkt [9], dat de voorloper zou worden van de huidige scriptie. Het project leverde een werkend draadloos systeem op waarbij maximum twee nodes meetgegevens konden doorsturen naar een basisstation. Dit basisstation was verbonden via een USB kabel met een computer. Deze nodes konden dan aan 50 samples per seconde de ogenblikkelijke temperatuur en versnelling draadloos doorsturen, tot een afstand van ongeveer 20 meter. De versnelling werd gemeten volgens de drie assen. De nodes bestonden toen nog uit twee PCB's: één bord met de temperatuursensor en accelerometer, en één bord met de microcontroller en RF chip. De twee PCB's waren eenvoudig verbonden met enkele kabels en soldeer pasta, en waren ter demonstratie bevestigd in een haarband. Het volledige systeem was gebaseerd op een artikel uit het magazine Elektor [10, 11], dat de iDwaRF van chip45 [12] toelichtte. De iDwaRF is een draadloze module met netwerkmogelijkheden, en heeft als voordelen het gebruik van gratis firmware voor de implementatie van het protocol en ruimte voor het ontwikkelen van eigen toepassingen.

De gegevens die verzameld werden in het basisstation werden door het softwareprogramma PureData geïnterpreteerd. Op het IPeM had men enkele applicaties met dit programma ontwikkeld die zorgden voor de sonificatie van de gegevens. Zo kon een demonstrant de haarband aandoen en in real-time geluid genereren door te *headbangen*.

Om het systeem te voeden, gebruikten we drie AAA-batterijen die we in serie plaatsten. Zo verkregen we 4,5 Volt die met een spanningsregelaar begrensd werd tot 3,3 Volt.

Dit complete systeem is een ideaal uitgangspunt voor onze scriptie. We hadden reeds een

verkenning van de componenten en de software achter de rug en enige ervaring met het tekenen van een PCB-design in OrCAD.

5.1 Prestaties en tekortkomingen

De belangrijkste tekortkoming van dit ontwerp is de lage samplerate. De samplerate is bovendien niet vast. Dit komt omdat de iDwaRF module geen Time Division Multiple Access (TDMA) schema gebruikt voor het verzenden van gegevens. Het ontwerp is bovendien niet praktisch in de omgang: het bestaat uit twee PCB's verbonden met enkele draden. Het is ook niet mogelijk om het aantal nodes uit te breiden door meerdere ontvangers te gebruiken. De belangrijkste eigenschappen zijn weergegeven in tabel 5.1.



Figuur 5.1: Headbangsensor bevestigd op haarband.

	nulde generatie
aantal sensoren	2
zendafstand	12 meter
samplerate	50 samples/s
vaste samplerate	nee
stroomverbruik	50 mA
accelerometer	± 6 g

Tabel 5.1: Prestaties nulde generatie.

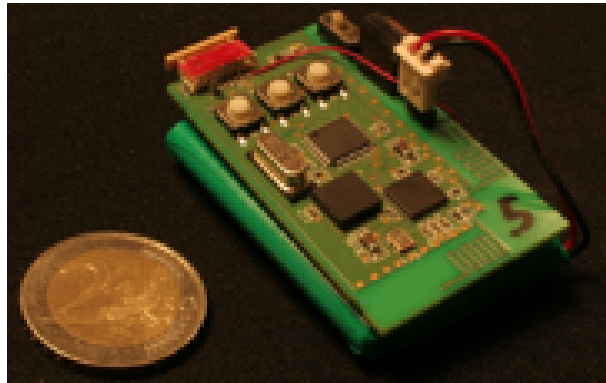
Hoofdstuk 6

Eerste generatie

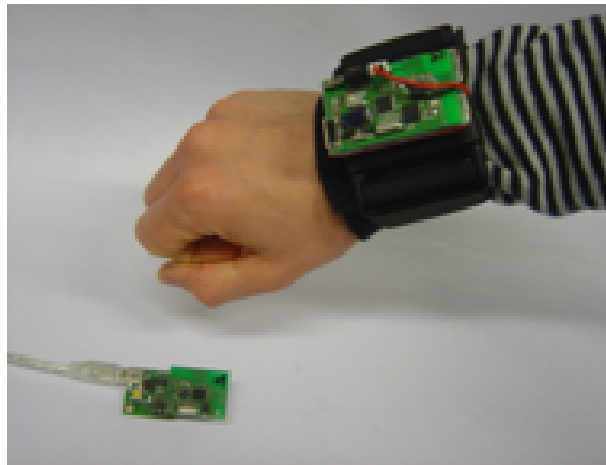
Doel van dit ontwerp is een systeem uitbouwen met drie tot vier nodes, aangesloten op één basisstation. Elke node moet daarbij in staat zijn om gegevens door te sturen aan een datarate van 100 samples per seconde. Het systeem moet dus minstens drie keer sneller werken als het systeem van de nulde generatie. De versnellingsdata werd in het vorig ontwerp doorgestuurd aan 50 samples per seconde. Dit hield in dat het iDwaRF protocol aangepast zou moeten worden aan onze specifieke applicatie om tot een efficiëntere data-overdracht te komen.

Een bijkomende vereiste vanuit het IPEM was dat de nodes van drukknoppen voorzien moesten worden. Zo konden software-applicaties op het IPEM uitgebreid worden met extra functionaliteit voor de gebruiker. Een bijkomende LED was nodig om duidelijk te kunnen indiceren wanneer een node in werking was. Een timestamp in de node zou het mogelijk maken metingen op te slaan en bewegingen achteraf te reconstrueren. Er werd ook gevraagd een elegantere oplossing te zoeken voor de voeding.

Voor het vorige ontwerp werd steeds een iDwaRF-transceiverbord besteld en werd er achteraf een zelf ontworpen PCB aan bevestigd met accelerometer en temperatuursensor. Een nieuw ontwerp gaf dus de kans alle hardware van het vorige ontwerp te verzamelen op één bord. Het gaf ook de vrijheid de vorm van het bord volledig zelf te bepalen. Een GSM batterij werd regelmatig geopperd als mogelijke verbetering voor de voeding van het bord (meer hierover in paragraaf 6.4), dus kreeg het bord de dimensies van een GSM batterij. Zo konden, bij het afwerken van de node met voeding in de haarband, de afmetingen compact gehouden worden om de gebruiker zo weinig mogelijk te hinderen bij bewegingsexperimenten.



Figuur 6.1: Node - eerste generatie.



Figuur 6.2: Node op een velcro band en basisstation verbonden met USB kabel.

6.1 Componentenkeuze

De verschillende componenten waaruit de nodes en het basisstation zijn opgebouwd, worden hier toegelicht.

6.1.1 RF chip en antenne

Aangezien het aanvankelijk ontwerp van het hardware-ontwerpproject op de iDwaRF module was gebaseerd, lag de keuze voor de RF chip vast: de CYWUSB6935 van Cypress Semiconductor [13]. Deze chip was zo geschikt dat besloten werd om die te hergebruiken

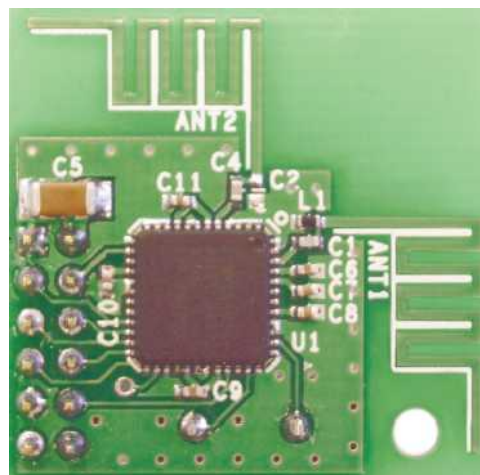
voor de eerste generatie van het systeem.

Het basisstation is een ontwerp van iDwaRF. Omdat besloten werd dezelfde RF chip te gebruiken kon opnieuw het basisstation bij chip45 besteld worden, zonder zelf een layout te tekenen. De nodes van de eerste generatie zijn volledig in OrCAD ontworpen (zie paragraaf 6.5).

De RF chip werkt volgens het WirelessUSB protocol van Cypress Semiconductor: Een draadloos radiocommunicatieprotocol dat ontworpen is voor korte afstanden en variabele bandbreedtes, en gebruik maakt van de 2,45 GHz ISM-frequentieband. De chip heeft een uitzendvermogen van maximum 0 dBm en een gevoeligheid van -95 dBm. In de vrije ruimte kan tot 30 meter ver verstuurd worden aan een datarate van 16 kbits/s. Experimenten binnen leverden een bereik van ongeveer 12 meter. De RF chip kan gebruik maken van 78 verschillende frequentiekanalen.

De voeding mag tussen 2,7 en 3,6 Volt liggen. Uitzenden gebeurt via Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS). Deze modulatietechniek heeft als voordeel dat ze zeer ongevoelig aan interferentie is. De antenne is een geïntegreerde PCB antenne [14].

Een ander voordeel aan deze RF chip is dat de communicatie met de microcontroller via het Serial Peripheral Interface (SPI) protocol (bijlage A.1.3) kan verlopen.



Figuur 6.3: RF chip CYWUSB6935 met PCB antennes.

6.1.2 Microcontroller

Net zoals bij de RF chip lag de keuze voor de microcontroller, ATmega168V van Atmel Corporation [15], vast door verder te bouwen op de iDwaRF architectuur. Dankzij het hardware-ontwerpproject was er al veel knowhow in verband met het programmeren van deze component (figuur 6.4).

Deze microcontroller had zich al bewezen bij het vorige ontwerp. Grote voordelen zijn de interfaces voor SPI, I²C en UART (voor meer informatie over de verschillende communicatieprotocollen: zie bijlage). De microcontroller beschikt over acht Analooq-naar-Digitaal Converters (ADC) en heeft meer dan voldoende geheugenruimte. Hij verbruikt heel weinig stroom: bij een klokfrequentie van 7,2 MHz verbruikt deze slechts 4mA. De microcontroller werkt bij voedingsspanningen tussen 1,8 en 5,5 Volt.



Figuur 6.4: Microcontroller ATmega168V van Atmel Corporation.

6.1.3 Accelerometer

Onderzoek op het IPeM met de Xsens [2] bewees dat normale menselijke bewegingen tot ongeveer 6 g konden gaan. Om in alle richtingen te kunnen meten is het ook van belang dat de accelerometer drie meetassen bezit. Een I²C interface, metingen die voldoende boven de 100 samples per seconde liggen en een lage ruisgevoeligheid brachten de keuze bij de LIS3LV02DQ [16] van STMicroelectronics (figuur 6.5). Bij deze component is het ook nog mogelijk het meetinterval van +/- 6 g te reduceren tot +/- 2 g, voor applicaties waarbij minder bruuske bewegingen voorkomen.

Wanneer de acceleratiewaarden door de microcontroller opgevraagd worden, antwoordt de accelerometer met 12 bits per richting. In het I²C protocol waar byte per byte verstuurd wordt, vertaalt zich dat in 2 bytes per richting, waarbij de 4 meest beduidende bits opgevuld worden met redundante informatie.



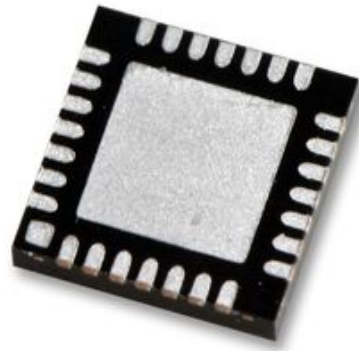
Figuur 6.5: Accelerometer LIS3LV02DQ van STMicroelectronics.

6.1.4 USB to UART Bridge

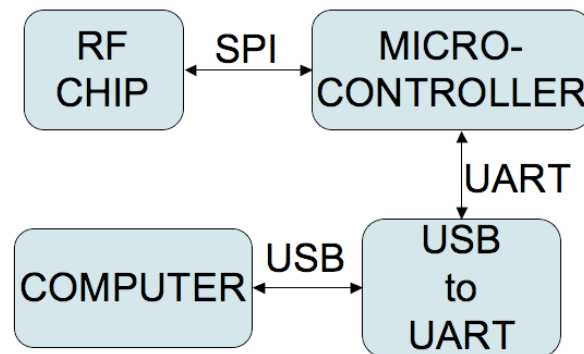
Deze component is enkel aanwezig op het basisstation en verzorgt de communicatie met de computer. Meer wordt duidelijk in figuur 6.7. De output van de microcontroller is opgebouwd volgens het Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART) protocol en wordt door de USB to UART Bridge CP2102 [17] van Silicon Labs (figuur 6.6) geconverteerd naar het voor een computer verstaanbare USB protocol. De informatie die deze weg aflegt bestaat uit de acceleratiegegevens, de informatie van de drukknoppen en een timestamp die door het basisstation zelf wordt toegevoegd.

6.2 Dataverzameling

Het is belangrijk het totale aantal bytes dat de node moet verzenden zo laag mogelijk te houden. Hoe minder bytes verstuurd worden naar het basisstation, hoe meer nodes toegevoegd kunnen worden aan het systeem. De node moet in totaal drie acceleratiegegevens (volgens de drie dimensies) en informatie van drie drukknoppen doorsturen. De node moet geen adres doorsturen dankzij het TDMA protocol, zie paragraaf 6.3.2.



Figuur 6.6: USB to UART Bridge CP2102 van Silicon Labs.



Figuur 6.7: Communicatieinterfaces bij het basisstation - eerste generatie.

6.2.1 Drukknoppen

De drie drukknoppen kunnen door de gebruiker aangewend worden om software-applicaties aan te sturen. Elke drukknop communiceert als vanzelfsprekend met de microcontroller met een 0 of 1, naargelang de drukknop ingedrukt is of niet. Deze drie drukknoppen betekenen voor de draadloze link een extra overlast aangezien de informatie van de drukknoppen ook verstuurd moet worden naar het basisstation. Dit probleem wordt handig opgelost door deze waarden te bundelen in de zogenaamde acceleratiebytes (zie volgende paragraaf).

6.2.2 Acceleratiewaarden

Elke acceleratie wordt door de accelerometer in twaalf bit geleverd. Over de I^2C lijn betekent dit zoveel als twee bytes (16 bits) met vier betekenisloze bits. De totale acceleratie

in de drie richtingen wordt dus voorgesteld door zes bytes. Door in de microcontroller van elke twee acceleratiebytes per richting al minstens de vier minst significante bits en de vier betekenisloze bits te verwijderen, schieten er slechts acht bits (en dus één byte) per richting over. Zo wordt de totale acceleratie niet door zes, maar door drie bytes voorgesteld. In elke byte wordt ook nog een bit gebruikt voor een drukknop. Een byte bestaat dus uit zeven bits acceleratie en één bit voor de drukknop. Door deze ingreep is de acceleratie minder precies, maar voor de toepassingen waarvoor het systeem ingezet wordt, is de nauwkeurigheid zeker nog voldoende. Met zeven bits wordt immers nog een nauwkeurigheid van 0,1 g bereikt. De snelheid van het systeem verbeterde aanzienlijk. Het versturen van een byte, zie ook paragraaf 6.3.1, neemt een halve milliseconde in beslag. Het versturen van drie in plaats van zes bytes levert dus een tijds winst van 1,5 milliseconden op. Dit is veel in vergelijking met het tijdsinterval van tien milliseconden (wat overeenstemt met een samplerate van 100 samples per seconde). Zo wordt de totale bagage per node beperkt tot drie bytes, en de verbruikte bandbreedte minimaal gehouden.

6.3 Transmissieprotocol

6.3.1 DSSS

De draadloze link tussen de nodes en het basisstation wordt tot stand gebracht door de RF component van Cypress. Zoals gezegd gebruikt deze een DSSS (direct-sequence spread spectrum). Dit betekent dat de RF chip pulstreinen uitstuurt. Een puls van een pulstrein wordt in de literatuur een chip genoemd. Bij het zenden worden deze chips aan een frequentie van 1 MHz verzonden. De Cypress laat nu toe om met elke 64 chips een bit te associëren. Dit komt neer op een datasnelheid van 16 kbit/s. Het versturen van 1 byte neemt dan een tijd van 0,5 ms in beslag. Het is ook mogelijk om twee of vier bits te coderen in deze 64 chips. De datasnelheid wordt hier natuurlijk drastisch door verhoogd, maar na testen bleek de draadloze link te onbetrouwbaar bij deze datasnelheden.

6.3.2 TDMA

De specificaties aan het ontwerp zijn bijzonder star. De data moet in realtime verstuurd worden en dit aan een frequentie van 100 samples per seconde. De gegevens kunnen hierdoor niet worden gebufferd. De vooropgestelde specificaties laten het ook niet toe de samplerate eventueel te verlagen. Het efficiëntste en tegelijkertijd eenvoudigste protocol

dat zich hiervoor leent is het time division multiple access (TDMA) protocol. Dat betekent dat de nodes elk om beurt hun gegevens doorsturen. Een groot voordeel is dat het basisstation door het vaste tijdschema heel eenduidig weet welke node aan het sturen is, zodat de nodes geen adresinformatie moeten verzenden en kostbare tijd gewonnen wordt. Aangezien de vooropgestelde datatransmissie 100 samples per seconde bedraagt, moeten alle nodes binnen de 10 milliseconden het protocol afwerken. Voor het schrijven van een transmissieprotocol werd bij dit systeem volledig afgestapt van het iDwaRF protocol, om het protocol volledig aan onze noden aan te passen. Zo zullen we op termijn tot een sneller en efficiënter systeem komen.

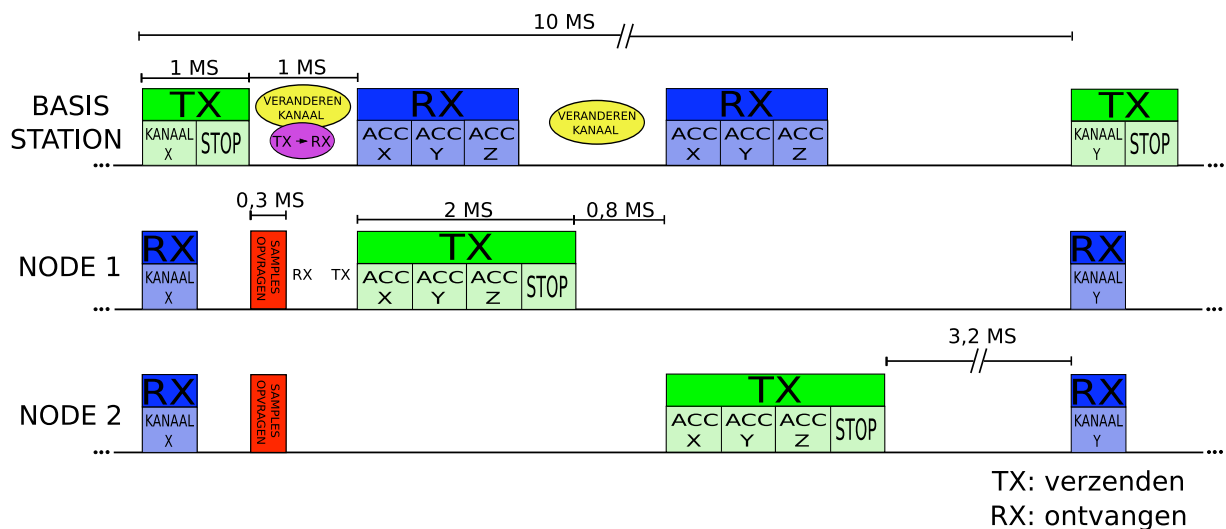
Om de tijd op de verschillende nodes te synchroniseren zendt het basisstation een startsignaal uit aan het begin van elk tijdsinterval. Hiermee weten de nodes dat het basisstation klaar is voor ontvangst. Doordat elke node wacht op het startsignaal wordt duidelijk dat het basisstation de snelheid volledig controleert. Nu sturen de nodes een voor een hun meetwaarden door naar het basisstation. Dit is mogelijk doordat elke node een vast nummer heeft, waardoor de node weet wanneer het de gegevens mag doorsturen.

6.3.3 Frequentiehoppen

Soms komt het voor dat gegevens verloren gaan wanneer het signaal van de node verstoord wordt. Sampleverlies kan teruggedrongen, maar nooit helemaal weggewerkt worden. Wanneer de gebruiker met de node te ver van het basisstation staat, zal de ontvangst bijvoorbeeld veel slechter zijn. Andere oorzaken zijn obstakels tussen node en basisstation. Zo absorbeert het menselijke lichaam een aanzienlijk deel van de energie die de antenne uitzendt. Stoorbronnen die op gelijke frequenties uitzenden zorgen ook voor sampleverlies. Op zich is het geen ramp wanneer een sample verloren gaat, omdat de 100 samples per seconde waaraan de menselijke beweging opgemeten wordt in ons systeem ruim boven de benodigde samplefrequentie ligt. Wel is het hinderlijk wanneer bij experimenten meerdere samples na elkaar verloren gaan. Dit wordt een *burst* genoemd. Bij een burst ontstaat er een hiaat in de meting, die kan worden veroorzaakt doordat een apparaat een sterk signaal uitstuurt in dezelfde frequentieband (bv. Bluetooth, WLAN).

Deze vorm van sampleverlies kan gedeeltelijk vermeden worden door de node telkens op een ander frequentiekanaal te laten zenden. In theorie zullen evenveel gegevens verloren gaan, maar liggen die nu meer gespreid in de tijd, waardoor er geen onoverkomelijke hiaten meer in het experiment verschijnen. Basisstation en node moeten beide op hetzelfde kanaal

ingesteld worden voor een succesvolle gegevensoverdracht. Om die reden werd het basisstation zo geprogrammeerd dat per interval van 10 milliseconden op een pseudo-willekeurige manier een frequentiekanaal werd gekozen door het basisstation. Het nummer van dit kanaal (gaande van 1 tot en met 78) wordt verpakt in het startsignaal dat naar de nodes wordt verzonden. Zo weten de nodes op welke frequentie ze de informatie moeten doorsturen. Elke 10 milliseconden wordt dus een andere frequentie gebruikt, wat het systeem veel minder gevoelig maakt voor bursts.



Figuur 6.8: Timing diagram TDMA protocol eerste generatie.

6.3.4 Timing

Het timing diagram is weergegeven in figuur 6.8. Zoals gezegd duurt het versturen van een byte een halve ms. Wanneer informatie met de RF chip verstuurd wordt, moet deze beëindigd worden met een stopbyte. Het startsignaal van het basisstation bestaat dus uit twee bytes, wat 1 ms in beslag neemt bij het versturen. De twee nodes ontvangen het startsignaal en kunnen zo hun klok synchroniseren met het basisstation.

De nodes zenden elk op een verschillend kanaal, omdat er anders ongewenste interferentie optreedt. In paragraaf 6.1.1 werd reeds vermeld dat de RF chip over 78 verschillende frequentiekanaalen beschikt, die weinig tot niet met elkaar interfereren. Het basisstation moet daardoor wel telkens van kanaal wisselen wat ongeveer 0,8 ms in beslag neemt. Een extra

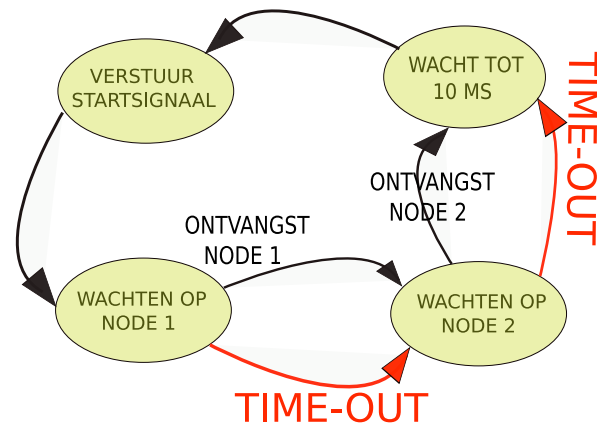
tijdsvertraging treedt op wanneer de RF chip van zenden naar ontvangen omgeschakeld wordt. In dit interval kunnen wel de gegevens van de accelerometer worden uitgelezen.

Zoals te zien op figuur 6.8 zijn er nog 3,2 ms resterend. Er zijn experimenten geweest om drie nodes aan te sluiten maar toen kon de datatransmissie van 100 samples per seconde niet gehaald worden. Inderdaad, wanneer de eenvoudige som uitgerekend wordt voor de extra tijd die een derde node met zich meebrengt, wordt duidelijk dat dit niet lukt: het basisstation heeft 0,8 ms nodig om van kanaal te veranderen, de derde node 2 ms om de gegevens door te sturen, en daarna moet het basisstation in 1 ms van kanaal veranderen en van ontvang- naar zendmodus omschakelen om de startbyte van het volgende tijdsinterval te versturen. Dat brengt de extra benodigde tijd op 3,8 ms. Omdat de prioriteit in dit ontwerp lag op een vaste samplerate van 100 samples per seconde werd ervoor gekozen het aantal nodes voorlopig op twee te houden. Het opdrijven van dit aantal werd vooropgezet voor het volgende ontwerp.

Een andere mogelijkheid is elke node te laten luisteren wanneer de voorgaande node klaar is met versturen, waarop de luisterende node dan overschakelt van de luister- naar de zendmodus om de volgende gegevens te versturen. Dit maakt de code in de microcontroller heel wat generieker, maar nu is het zo dat het omschakelen tussen deze twee modi één van de meest kritische vertragingen in het protocol is. Door daarentegen elke node na ontvangst van het startsignaal meteen te laten omschakelen naar de zendmodus worden overbodige vertragingen ontweken en kan de procedure in minimale tijd afgewerkt worden. Nadeel van deze manier van werken is dat voor elke node een andere vaste tijdsoffset gecodeerd moet worden in de microcontroller. Naar het volgende ontwerp toe is dit de manier om het hoogst mogelijk aantal nodes per basisstation aan te sluiten.

6.3.5 Time-outs

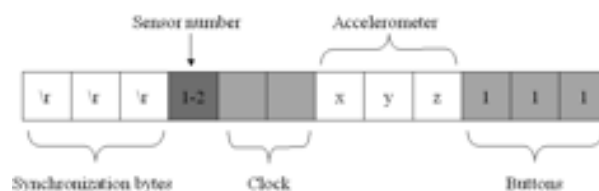
Wanneer het basisstation een sample niet toegestuurd krijgt van een node, mag het basisstation niet blijven wachten. Daarom zijn er time-outs geprogrammeerd in de microcontroller van het basisstation: wanneer geen sample ontvangen wordt binnen een bepaalde tijd, wordt het sample als verloren beschouwd en wordt overgeschakeld naar de volgende stap in het protocol. Dit wordt duidelijker gemaakt in figuur 6.9.



Figuur 6.9: Time-outs bij het basisstation.

6.3.6 Uitpakken van de gegevens

De drie bytes die door de node werden verzonden (zie paragraaf 6.2), worden uitgepakt door het basisstation wanneer alle informatie volledig ontvangen is. Een datapakket, zie figuur 6.10, wordt geconstrueerd en naar de computer verstuurd via USB (datarate 921,6 kbit/s). De eerste drie bytes worden door de computer herkend als start van een nieuw datapakket. Meteen daarna wordt het nodenummer verstuurd. Merk op dat dit nummer niet door de node verstuurd wordt. Het basisstation weet perfect van welke node het gegevens ontvangt, aan de hand van de verstreken tijd na het versturen van het startsignaal. Dit is inherent aan het TDMA protocol. Na het nodenummer worden twee bytes met het tijdstip van het startsignaal verstuurd. Zo kan het experiment achteraf door de computer gereconstrueerd en hergebruikt worden, wanneer de applicatie niet in realtime uitgevoerd wordt. De drie volgende bytes zijn acceleratiegegevens: per dimensie één byte. De laatste drie bytes bevatten de toestand van de drukknoppen, 0 of 1, ingedrukt of niet.



Figuur 6.10: Pakket dat computer ontvangt van het basisstation.

6.4 Voeding

De voeding van de nulde generatie bestond uit drie AAA batterijen in serie. Met een spanningsregelaar werd deze spanning op 3,3 Volt gebracht. Een batterijhouder met drie AAA batterijen is echter zwaar en groot. Daarom werd gezocht naar een elegantere voeding. Een eerste oplossing was het gebruik van een step-up converter. Deze oplossing laat toe het systeem te voeden met één enkele AAA batterij. Er werd een aparte PCB gemaakt waarop de MAX1674 chip van Maxim [18] staat. Deze PCB meet 20 mm op 15 mm en liet inderdaad toe de 1,5 Volt van de AAA batterij op te drijven tot 3,3 Volt, maar als snel bleek dat de levensduur van de batterij maar twee uur was. Na onderzoek bleek dat de DC/DC converter bijzonder inefficiënt werkte. Het probleem werd door de zendchip veroorzaakt. Deze zorgde voor stroompieken die de voeding enorm belastten. Het plaatsen van condensatoren verhielp het probleem niet: na een experiment bleek dat de grootte van de condensator aan de uitgang van de step-up converter 5 mF zou moeten zijn. Condensatoren met deze capaciteit bestaan niet in SMD verpakking en zijn zeer groot, waardoor een andere oplossing werd gezocht die werd gevonden bij Li-ion batterijen. Deze batterijen hebben een uitgangsspanning van 3,7 Volt waardoor er geen step-up converter meer nodig was. Verder beschikken deze batterijen over een grote capaciteit en zijn ze oplaadbaar. Er bestaat van deze soort een grote verscheidenheid aan groottes en capaciteiten. De gekozen batterij was een Li-ion batterij van VARTA met (bijna) dezelfde afmetingen als de node en met een capaciteit van 1100 mAh.

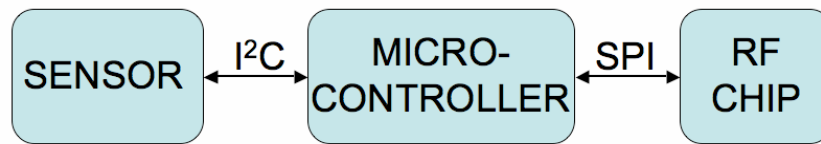
6.5 Schema en layout

6.5.1 Schema

Figuur 6.11 geeft schematisch de verschillende communicatieprotocollen weer die worden gebruikt op de node. De microcontroller en de RF chip communiceren via het SPI protocol (bijlage A.1.3). De microcontroller en de accelerometer gebruiken op hun beurt het I^2C protocol (bijlage A.1.1).

Zoals in het hoofdstuk over communicatieprotocollen wordt uitgelegd (bijlage A), zijn er voor het SPI protocol vier lijnen nodig en voor het I^2C protocol twee lijnen. Op figuur 6.12 is het schema weergegeven van de node.

Links van de microcontroller zijn de twee I^2C verbindinglijnen (SDA en SCL) te zien



Figuur 6.11: Communicatieinterfaces bij de node - eerste generatie.

die zorgen voor communicatie met de accelerometer. Er zijn geen pull-up weerstanden nodig, omdat deze in de accelerometer zijn geïntegreerd. Op het schema is ook te zien hoe de drukknoppen zijn verbonden met de microcontroller: bij het indrukken wordt een pin van de microcontroller verbonden met de massa, bij het loslaten zal de interne pull-up weerstand van de microcontroller de pin weer hoog brengen.

Rechts van de microcontroller zijn de vier verbindinglijnen (MISO, MOSI, \overline{SS} en SCK) van het SPI protocol te zien die zorgen voor communicatie met de RF chip. Er zijn drie extra verbindingen tussen de microcontroller en de RF chip, de \overline{RESET} lijn de \overline{PD} lijn en de IRQ lijn. De \overline{RESET} lijn dient ervoor de RF chip bij het opstarten hardwarematig te resetten. De \overline{PD} lijn dient ervoor de RF chip in slaapstand te brengen en stroom te sparen, maar doordat het ontwakken uit deze slaapstand relatief lang duurt (2 ms) [13] wordt deze lijn niet gebruikt. De IRQ lijn kan gebruikt worden door de RF chip om een interrupt te genereren op de microcontroller.

Rechts van de RF chip is de verbinding met de antenne te zien. Om de PCB antenne te matchen met de uitgang van de RF chip zit hier een matchingnetwerk tussen [19].

Bovenaan zijn de vier programmeerlijnen samen met de voeding en de massa te zien, deze zijn verbonden met een MOLEX connector om de microcontroller te kunnen programmeren.

6.5.2 Layout

Het verschil met het vorige systeem van de nulde generatie situeert zich vooral in de layout: waar vroeger de node nog bestond uit twee PCB's die onhandig met elkaar via draadjes verbonden waren, is de node nu een afgewerkt bord met de dimensies van een GSM batterij. De node kan bijgevolg aan een batterij bevestigd worden waarbij de afmetingen van het systeem compact blijven. Dit maakt de eerste generatie praktisch voor gebruik in bewegingsexperimenten.

Een afbeelding van de Layout in OrCAD wordt gegeven in figuur 6.13. De grondvlakken op boven- en onderkant zijn voor het overzicht in deze tekening weggelaten. In het echte design zijn die aanwezig om spanningsverschillen in de massa te vermijden. De voedingsbanen zijn om die reden ook iets dikker getekend om de voedingsspanning grotendeels constant te houden.

De gevouwen monopoolantennes voor ontvangen en zenden zijn duidelijk te onderscheiden. Er zijn geen andere componenten geplaatst in de directe omgeving van de antennes om interferentie te vermijden. Het delicate hoogfrequentontwerp is zo klein mogelijk gehouden en bevindt zich op het kleine oppervlak tussen de antennes en RF chip. De spoelen en condensatoren die vlak aan de antennes liggen vormen een matching circuit voor de impedantie van de antennes.

Het basisstation heeft nog geen nieuw ontwerp in dit stadium en daarom wordt het iDwaRF basisstation hier ingezet.

6.6 Prestaties en mogelijke verbeteringen

6.6.1 Prestaties

De belangrijkste verbetering ten opzichte van het vorige ontwerp is de vaste samplerate van 100 samples per seconde. Het stroomverbruik is hierdoor wel wat toegenomen. Het is door de strakke timing niet meer mogelijk de RF chip in shutdown te brengen. Het systeem laat nu toe meerdere systemen te gebruiken in een zelfde ruimte. Dit door de verschillende systemen een verschillende frequentieband toe te kennen. Zo kan het aantal nodes mits gebruik van meerdere ontvangers drastisch worden uitgebreid.

Met de gebruikte Li-ion batterij wordt voor een levensduur van 15 uur gezorgd. Het sampleverlies is afhankelijk van de afstand tussen node en basisstation en is weergegeven in grafiek 6.14. Deze grafiek is opgesteld onder de volgende omstandigheden: een persoon danst op de aangegeven afstand gedurende één minuut, wat overeenkomt met 6000 samples, de ontvanger staat verticaal opgesteld in de vrije ruimte. Het gemiddelde van vijf metingen per afstand is weergegeven in de grafiek.

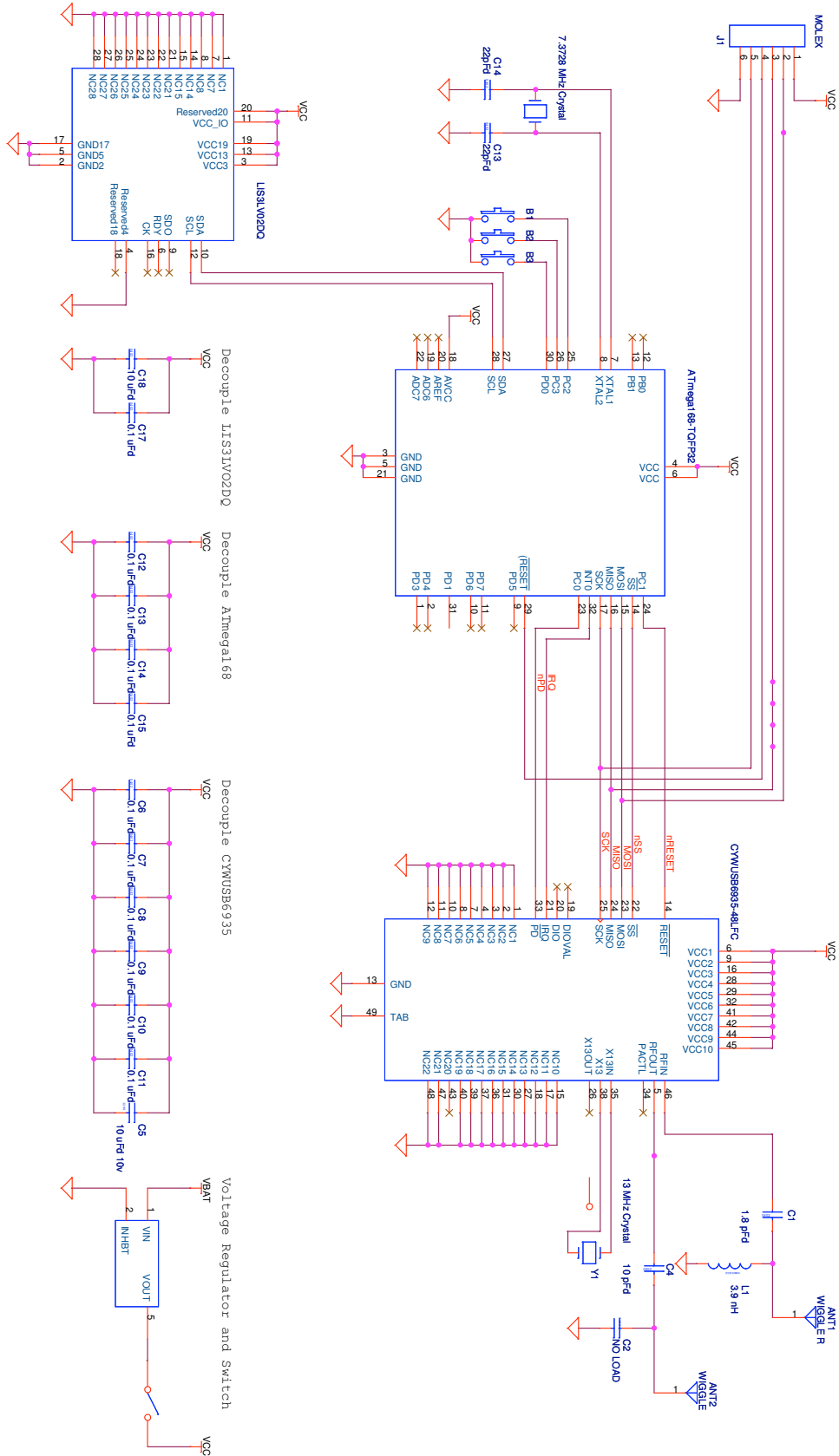
De belangrijkste eigenschappen van de eerste generatie zijn weergegeven in tabel 6.1.

	nulde generatie	eerste generatie
aantal nodes	2	2
zendafstand	12 meter	12 meter
samplerate	50 samples/s	100 samples/s
vaste samplerate	nee	ja
stroomverbruik	50 mA	70 mA
accelerometer	± 6 g	± 6 g
uitbreiding meer nodes	nee	ja

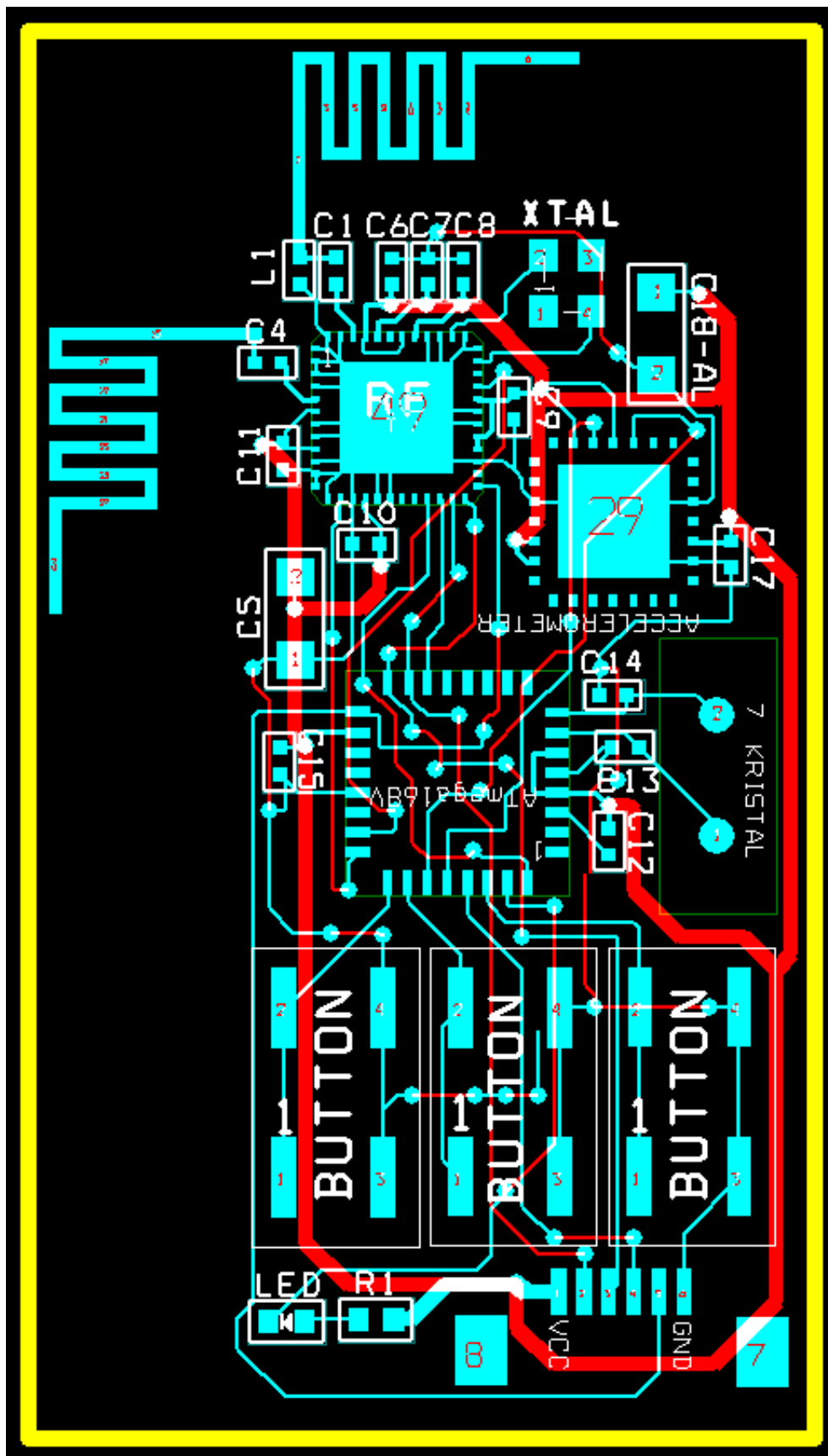
Tabel 6.1: Prestaties eerste generatie.

6.6.2 Mogelijke verbeteringen

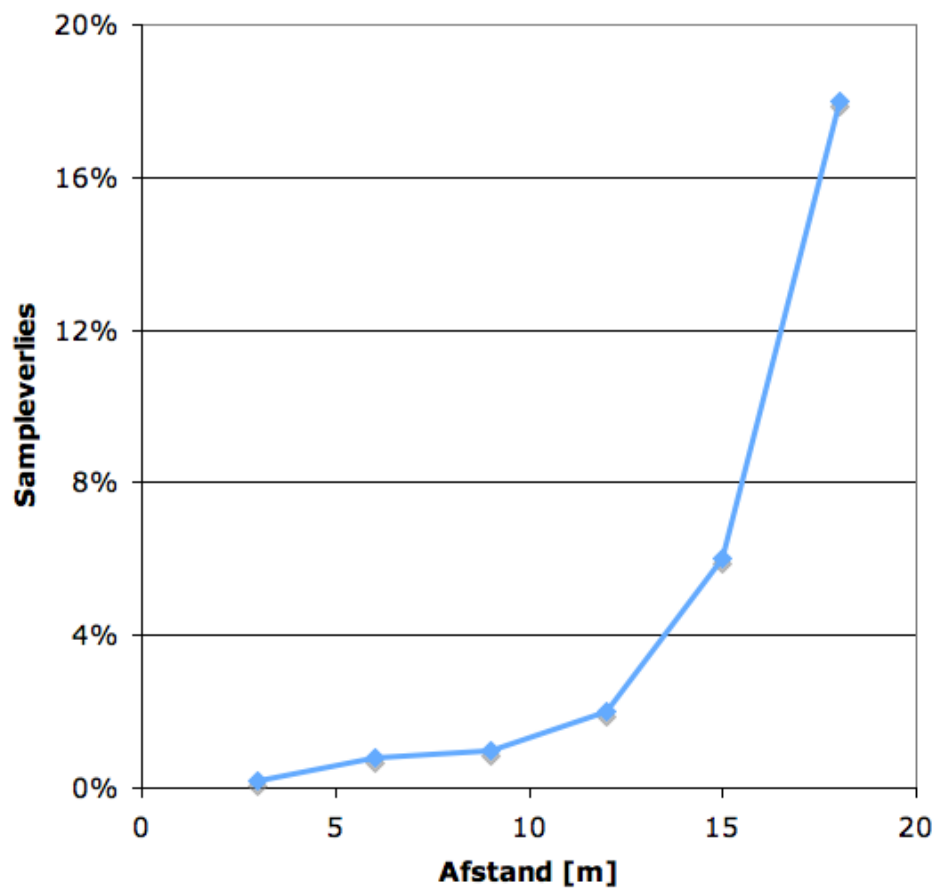
Het systeem is duidelijk beter dan het vorige systeem, maar er zijn nog meer verbeteringen nodig. Het belangrijkste punt waaraan gewerkt moet worden, is het aantal nodes per ontvanger. Dit betekent dat de RF chip, die door zijn trage zendsnelheid de oorzaak is van het beperkte aantal nodes, moet vervangen worden. Het stroomverbruik moet ook omlaag. Met het oog op meerdere nodes dringt zich ook een praktische vraag op: veel nodes betekent veel batterijen, hoe moet men deze tegelijkertijd opladen? Het lijkt dus nuttig de nodes in de toekomst te voorzien van een oplaadcircuit.



Figuur 6.12: Schema van node - eerste generatie.



Figuur 6.13: OrCAD layout van node - eerste generatie.



Figuur 6.14: Het sampleverlies van een node in functie van de afstand tot het basisstation.

Hoofdstuk 7

Tweede generatie

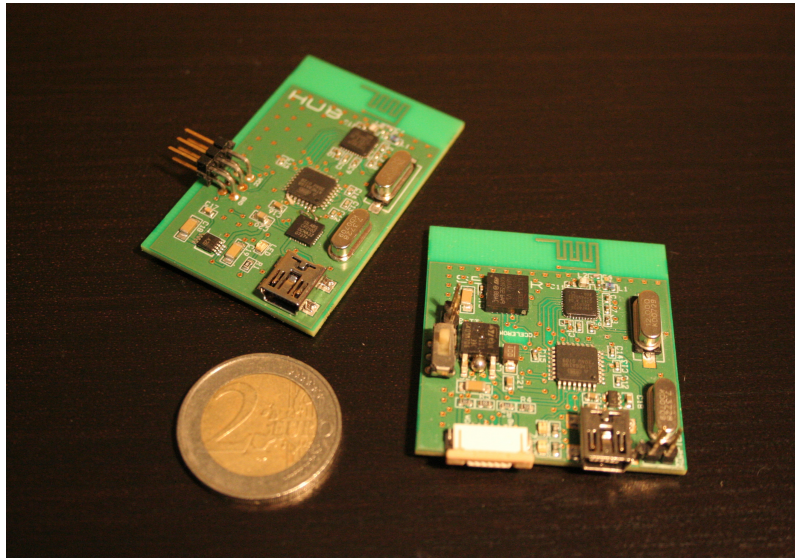
De tekortkomingen van het vorige systeem waren de aanleiding om over te gaan tot een nieuw ontwerp. De nieuwe prioriteiten waren: meer nodes per basisstation, minder vermogenverbruik en eenvoudiger opladen van de batterij. Meer nodes betekent zoveel als het kiezen voor een snellere RF chip. Bij deze keuze kan ook rechtstreeks ingespeeld worden op het batterijverbruik, daar de RF chip bij het vorige ontwerp het meeste stroom verbruikte. Een nieuwe RF chip houdt in dat het basisstation deze keer zelf ontworpen moet worden, met andere woorden: er wordt volledig afgestapt van de iDwaRF-modules. Om het opladen te vereenvoudigen zal gekozen worden voor een oplaadchip die mee geïntegreerd wordt op het PCB.

De vereiste dat elke node aan een frequentie van 100 samples per seconde de acceleratiegegevens doorstuurt, blijft behouden. Een andere blijvende specificatie is de LED die aangeeft wanneer een node in werking is. Met een spanningsdeler zal nu de spanning over de batterij gecontroleerd worden om tijdig te waarschuwen wanneer een batterij opgeladen moet worden. De voeding wordt opnieuw verzorgd door een LiPo-batterij.

7.1 Componentenkeuze

7.1.1 RF chip

De hoofdvereiste van dit systeem is het verhogen van het aantal nodes dat aangesloten kan worden op een basisstation. Dit wordt mogelijk gemaakt door de bandbreedte van de draadloze communicatie te verhogen. Een RF chip die dit mogelijk maakt is de CYRF6936



Figuur 7.1: Basisstation (links) en node (rechts) - tweede generatie.

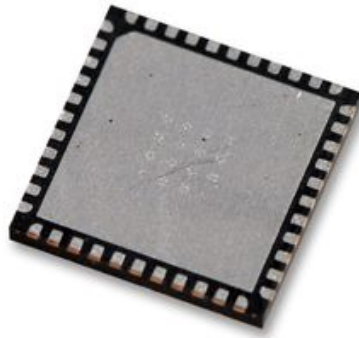
[20] van Cypress Semiconductor (figuur 7.2). Omdat de RF chip van de node wordt gewijzigd moet voor het basisstation een eigen ontwerp gemaakt worden, waarbij de nieuwe RF chip geïntegreerd wordt op het PCB van het basisstation (zie paragraaf 7.3.2).

De keuze voor Cypress Semiconductor is niet toevallig. We zijn reeds bekend met producten van het bedrijf en hun design layouts voor PCB antennes. De CYRF6936 heeft een maximale DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) datarate van 256 kbit/s en een GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying) datarate van 1 Mbit/s.

Ook deze RF chip werkt volgens het WirelessUSB protocol van Cypress Semiconductor: een draadloos radiocommunicatieprotocol dat ontworpen is voor korte afstanden en grote bandbreedtes, en gebruik maakt van de 2,45 GHz ISM (Industrial, Scientific and Medical) frequentieband. De chip heeft een uitzendvermogen van maximum 4 dBm (ten opzichte van 0 dBm voor de CYWUSB6935 van de eerste generatie) en een gevoeligheid van -97 dBm bij een datarate van 128 kbit/s en -93dBm bij 256 kbit/s (ten opzichte van -95 dBm voor de CYWUSB6935 bij 16 kbit/s). De afstand die overbrugd kan worden ligt boven de 10 meter. Het stroomverbruik ligt aanzienlijk lager als bij de CYWUSB6935: bij het zenden wordt in plaats van 69 mA nu slechts 21 mA verbruikt. Het verbruik kan nog lager gebracht worden door de chip in slaapstand te zetten wanneer de node geen gegevens hoeft te verzenden. Bij ontvangst voert de chip intern een CRC-check uit om te controleren of de data correct ontvangen is.

De voeding mag tussen 1,8 en 3,6 Volt liggen. De verpakking neemt minder plaats in beslag als de vorige RF chip en als antenne wordt opnieuw voor een geïntegreerde PCB-antenne gekozen.

De communicatie met de microcontroller verloopt volgens het SPI protocol (bijlage A.1.3).



Figuur 7.2: CYRF6936 van Cypress Semiconductor.

7.1.2 Oplaadchip

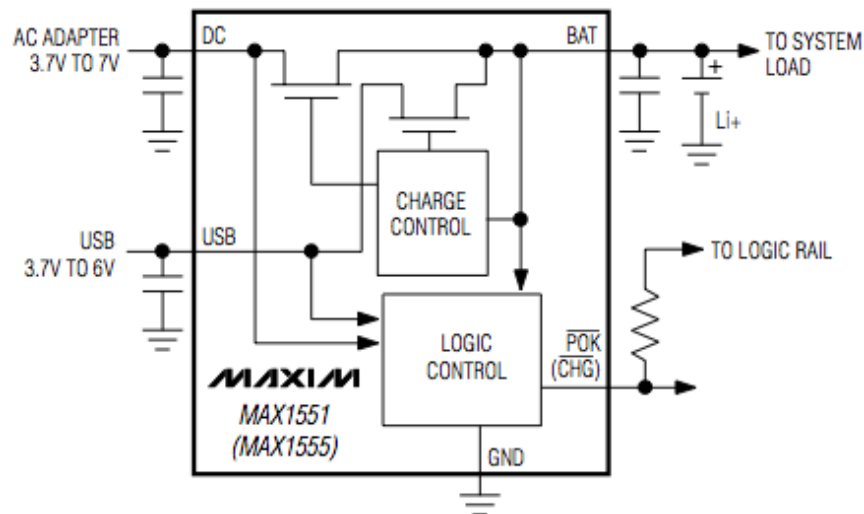
Voor dit systeem willen we de batterij kunnen opladen zonder die af te koppelen van de node. Daarom moet er een oplaadcircuit voorzien worden op de node. Een chip die ons deze mogelijkheid biedt is de MAX1551 [21] van Maxim Integrated Products (figuur 7.3).

De Li-ion en LiPo GSM batterijen die we gebruiken kunnen via deze chip met zowel USB als AC adapter opgeladen worden. Op de node zijn met andere woorden een USB connector en aansluiting voor AC adapter voorzien. Dit maakt het mogelijk de batterijen op te laden zonder deze eerst los te koppelen van een node.

7.2 Transmissieprotocol

7.2.1 TDMA

Het transmissieprotocol wordt opnieuw via het TDMA schema toegepast (zie ook paragraaf 6.3.2). Een overzicht van het exacte verloop wordt gegeven in figuur 7.4. Merk op dat het voor de nieuwe RF chip niet meer nodig is een stopbyte te sturen op het einde van een

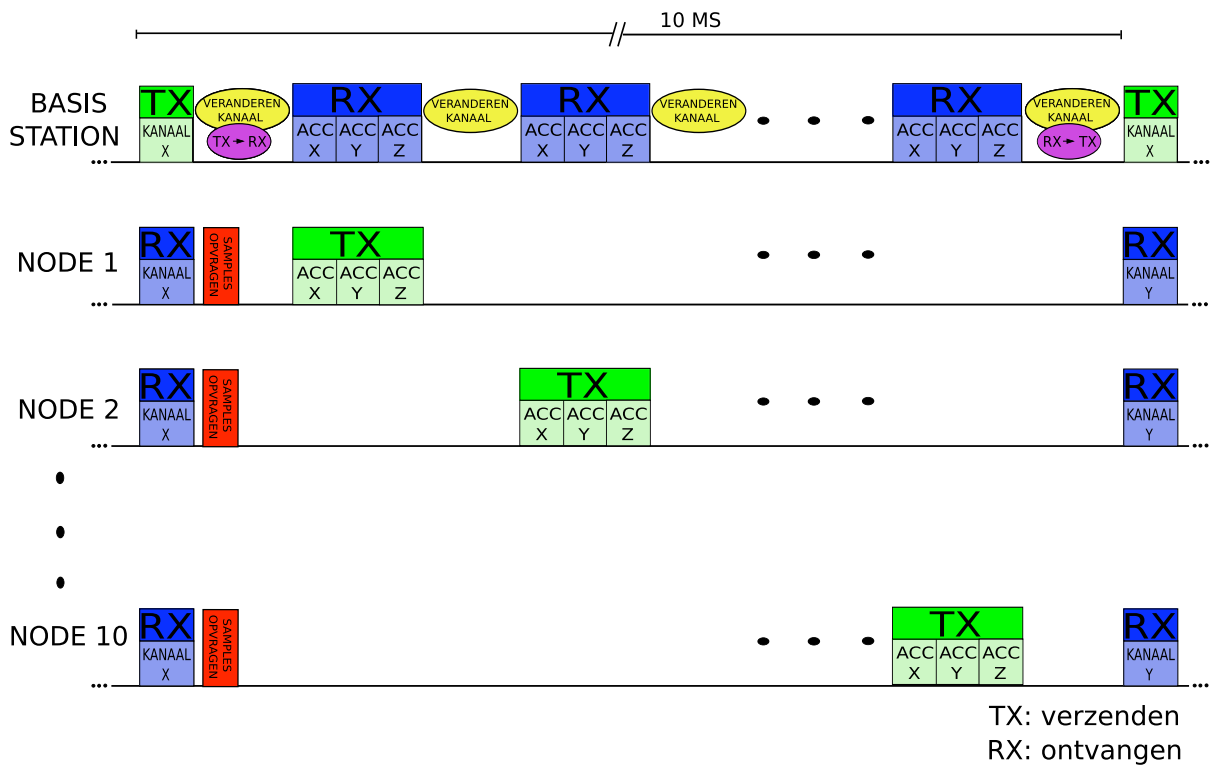


Figuur 7.3: Oplaadchip MAX1551 van Maxim Integrated Products.

pakket, waardoor er weer heel wat bandbreedte vrijkomt. Een pakket bestaat zo slechts uit drie bytes: de acceleratie in x-, y- en z-richting. Het frequentiehoppelen (paragraaf 6.3.3) wordt nog steeds toegepast.

7.2.2 Snelheid RF chip

Doordat de RF chip nu veel sneller is kunnen meer nodes aangesloten worden op het systeem. Het versturen van de gegevens en het veranderen van kanaal nemen nu minder tijd in beslag waardoor er extra tijd vrijkomt in het vooraf bepaalde tijdsinterval van 10 milliseconden. De maximale snelheid van de RF chip is 1 Mbit/s. Toch werd ervoor geopteerd de snelheid op 256 kbit/s te zetten. De reden hiervoor is te zoeken bij het sampleverlies en zendafstand. De snelheid moest immers groot zijn om veel nodes te bedienen, maar ook niet te groot om het risico op fouten te onderdrukken. In paragraaf 7.4.2 wordt hier dieper op ingegaan en wordt een figuur gegeven waar het sampleverlies uitgezet wordt in functie van de snelheid van de RF chip. Door voor een snelheid van 256 kbit/s te kiezen is het mogelijk tien nodes per basisstation aan te sluiten. Zo lag het aantal nodes boven de aanvankelijke specificatie van acht nodes per basisstation en is het sampleverlies aanvaardbaar (≈ 1 procent).



Figuur 7.4: Timing diagram TDMA protocol tweede generatie.

7.2.3 Time-outs

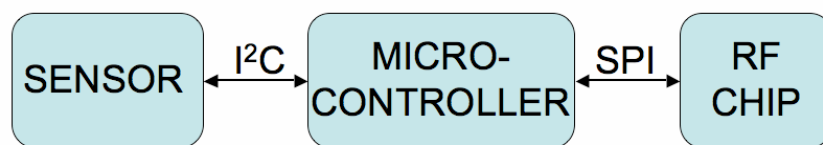
Het verliezen van pakketten werd op dezelfde manier aangepakt als in de eerste generatie. Er werden met andere woorden opnieuw vaste time-outs geïmplementeerd in het basisstation. De werkwijze werd reeds getoond in figuur 6.9: het basisstation luistert op kanaal x naar node y . Wanneer er geen gegevens ontvangen worden binnen een vooraf bepaalde tijd, wordt het basisstation uit de wachtstatus gehaald en ingesteld op het volgende kanaal, luisterend naar node $y+1$. Het verschil met figuur 6.9 situeert zich enkel in het feit dat er nu geen twee maar tien nodes met het basisstation verbonden zijn.

7.3 Schema en layout

7.3.1 Node

Schema

Figuur 7.5 geeft schematisch de verschillende communicatieprotocollen weer die op de node gebruikt worden. De microcontroller en RF chip communiceren zoals in de eerste generatie via het SPI protocol (bijlage A.1.3). De microcontroller en de accelerometer gebruiken op hun beurt het I^2C (bijlage A.1.1) protocol.



Figuur 7.5: Communicatieinterfaces bij de node - tweede generatie.

In figuur 7.6 is het schema weergegeven van de node zoals die ontworpen is voor de tweede generatie.

Links van de microcontroller zijn zoals bij de eerste generatie de twee verbindinglijnen (SDA en SCL) van het I^2C te zien die zorgen voor communicatie met de accelerometer.

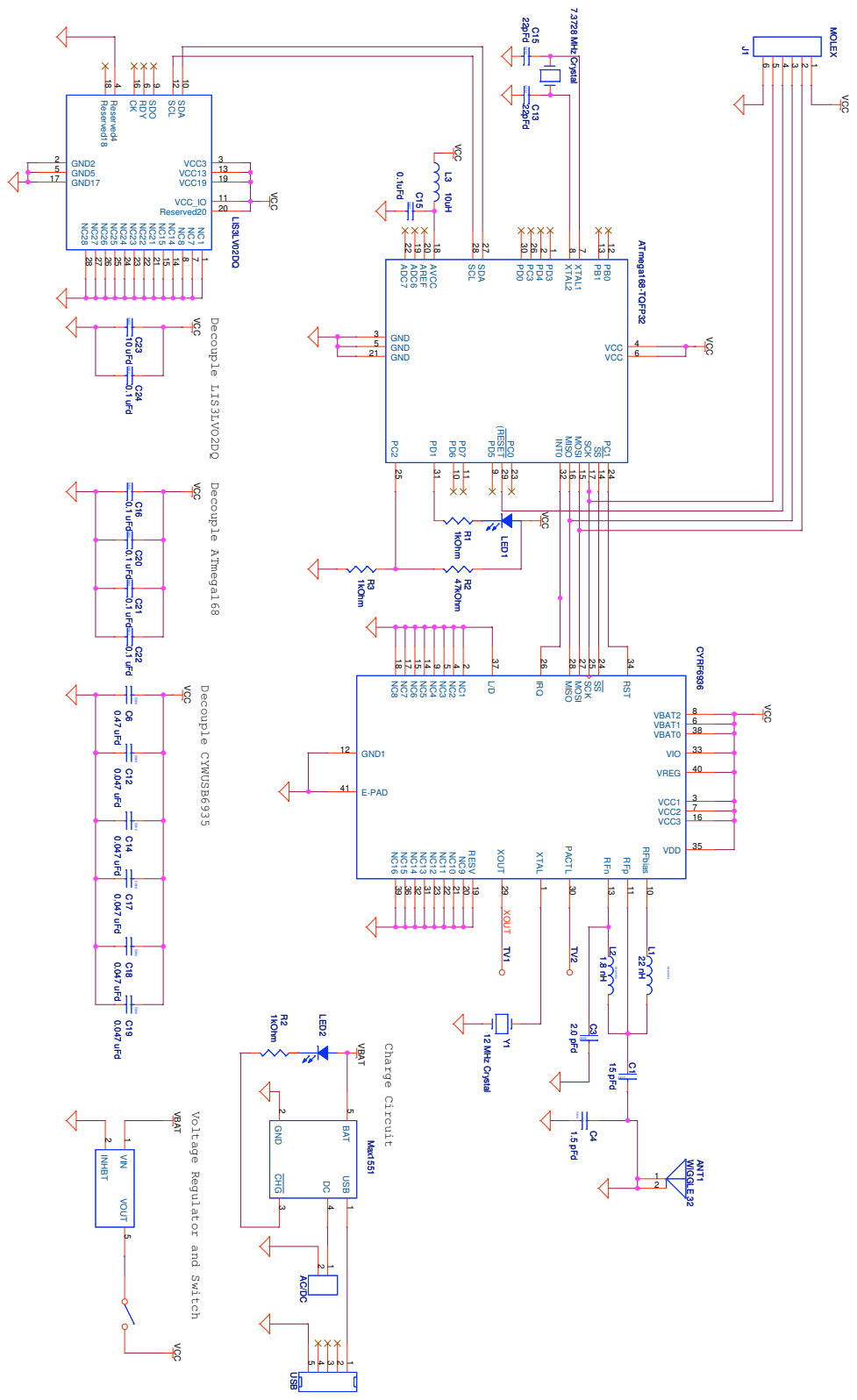
Rechts van de microcontroller zijn zoals bij de eerste generatie de vier verbindinglijnen (MISO, MOSI, \overline{SS} en SCK) van het SPI protocol te zien die zorgen voor communicatie met de RF chip. Bij de nieuwe RF chip zijn er in tegenstelling tot de RF chip van de eerste generatie twee extra lijnen. De \overline{RESET} lijn en de IRQ lijn. Deze hebben dezelfde functie als deze lijnen in de eerste generatie. Er is ook een extra LED te zien, om feedback te krijgen van de node. Staat de node aan? Is er een verbinding met het basisstation?

Rechts van de RF chip is de verbinding met de antenne te zien. De spoelen en condensatoren zorgen voor een matching netwerk tussen de PCB antenne en RF chip [19].

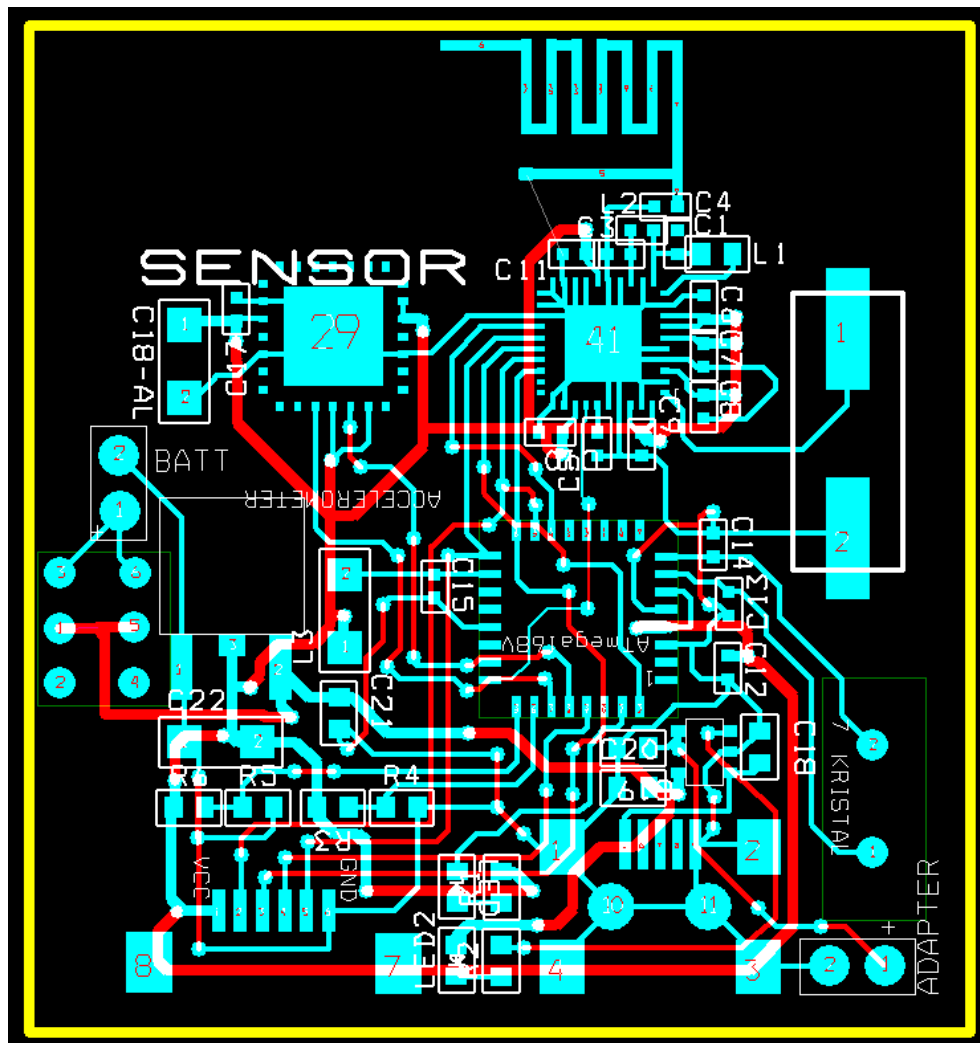
Bovenaan zijn opnieuw de vier programmeerlijnen samen met de voeding en de massa te zien.

Layout

Op figuur 7.7 is de layout van de node te zien. Op de figuur is duidelijk te zien dat de antenne verschillend is van de degene gebruikt in de eerste generatie. Deze antenne [22] is via condensatoren en spoelen verbonden met de RF chip. Deze condensatoren en spoelen zorgen voor het matching netwerk. Links is plaats voorzien voor een spanningsregelaar en een schakelaar. Onderaan links is de MOLEX connector te zien die dient voor het programmeren van de microcontroller en onderaan rechts bevindt zich de USB connector. Juist boven de USB connector ziet men het oplaadcircuit en daarboven de microcontroller. Helemaal rechts is plaats voorzien voor het kristal van de RF chip (bovenaan) en het kristal van de microcontroller (onderaan). Linksboven staat de accelerometer. Grondvlakken zijn voor het overzicht opnieuw achterwege gelaten in de layout. Bemerk dat deze layout opnieuw tweelagig is en de componenten op één enkele zijde geplaatst kunnen worden. Door het ontwerp met de hand te routeren was het mogelijk om dit zeer compact te maken.



Figuur 7.6: Schema van node - tweede generatie.



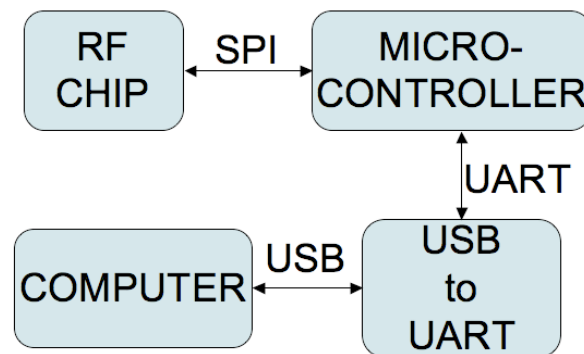
Figuur 7.7: OrCAD Layout van node - tweede generatie.

7.3.2 Basisstation

Omdat voor dit ontwerp een nieuwe RF chip gebruikt werd, was het noodzakelijk een nieuw basisstation te ontwerpen. Het resultaat van het schema is gegeven in figuur 7.9 en de layout in figuur 7.10.

Schema

Figuur 7.8 geeft schematisch de verschillende communicatieprotocollen weer die gebruikt worden op de hub. Naast het SPI protocol wordt hier het UART protocol gebruikt. Via de USB to UART chip CP2102 [17] zal de informatie die verzonden wordt op de UART lijn vertaald worden naar het USB protocol voor de computer.

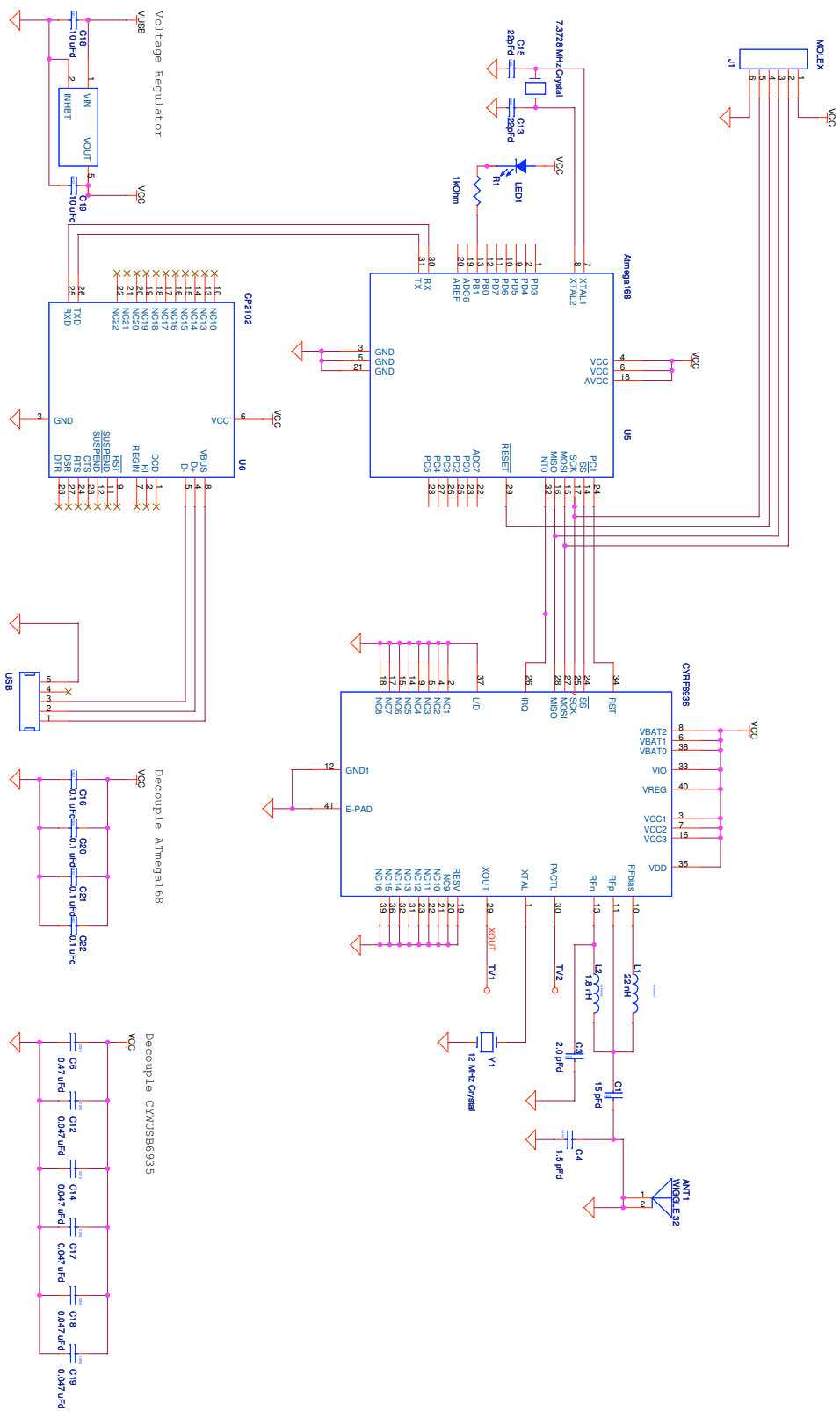


Figuur 7.8: Communicatieinterfaces bij het basisstation - tweede generatie.

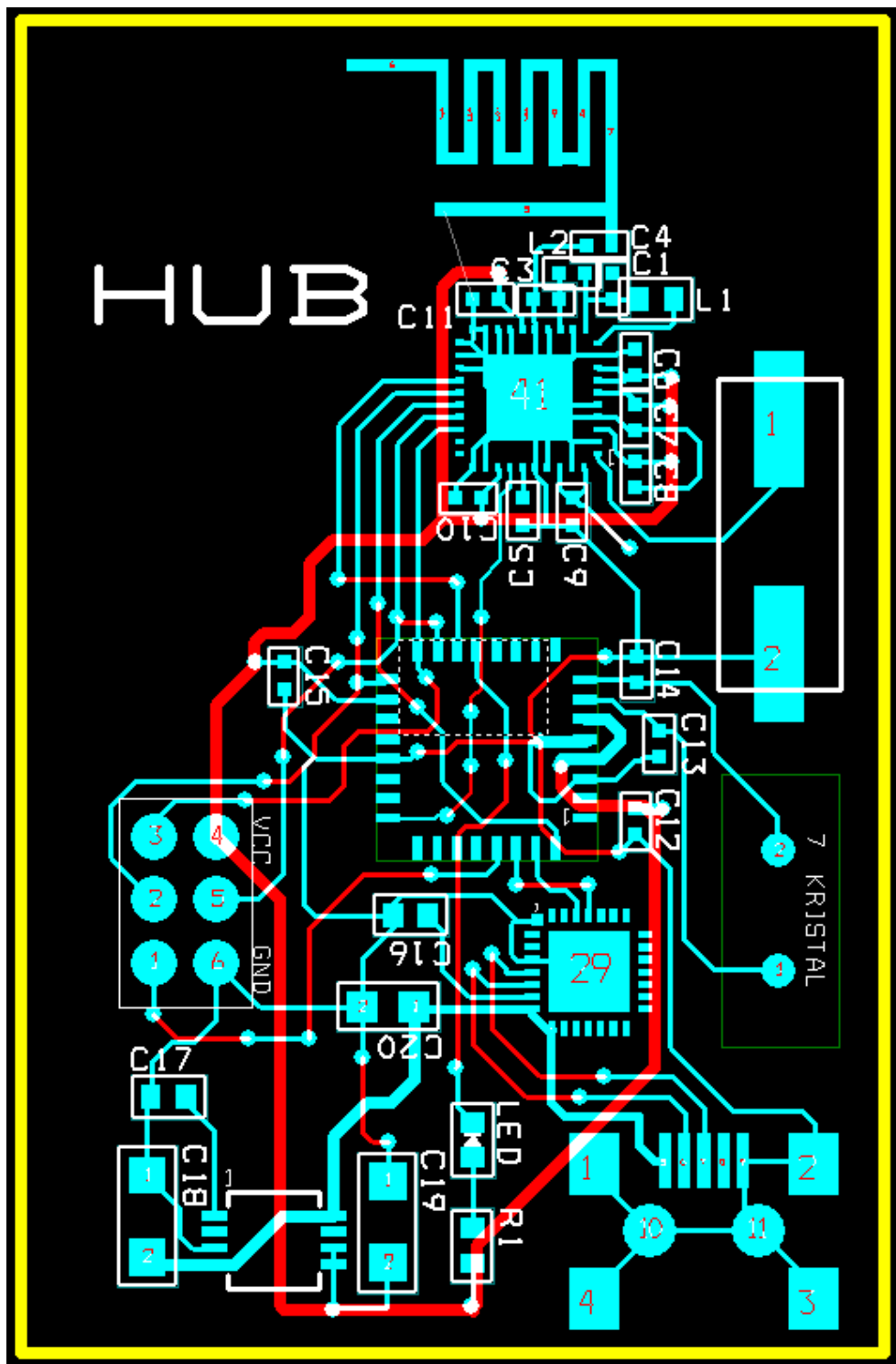
In figuur 7.9 wordt het schema van het basisstation getoond. Dit is zeer gelijkaardig aan het schema van de node. De SPI lijnen zorgen weer voor de verbinding tussen de microcontroller en de RF chip. De RX en TX lijnen ondersteunen het UART protocol (bijlage A.2.1). Rechts van de USB to UART chip is de verbinding met de USB connector te zien.

Layout

Ook de layout is zeer gelijkaardig aan die van de node. De antenne en de daarbij horende RF chip zijn duidelijk zichtbaar bovenaan. Rechts zijn opnieuw de twee kristallen zichtbaar en onderaan de USB connector. Boven de USB connector staat de USB to UART chip en daarboven de microcontroller.



Figuur 7.9: Schema van basisstation - tweede generatie.



Figuur 7.10: OrCAD layout van basisstation - tweede generatie.

7.4 Prestaties en mogelijke verbeteringen

7.4.1 Prestaties

Stroomverbruik

De nodes van de eerste generatie verbruiken ongeveer 70 mA. Zoals eerder al vermeld verbruikt de nieuwe RF chip een pak minder (21 mA tegenover 69 mA van de oude RF chip bij zenden). Zo komen we uit bij een gemiddeld verbruik van ongeveer 30 mA.

Snelheid en aantal nodes

Doordat de RF chip nu met een hoger debiet data kan zenden (256 kbit/s), is het mogelijk om meerdere nodes aan een basisstation te hechten. Het is mogelijk om een basisstation te verbinden met tien nodes. Dit is een aanzienlijke verbetering ten opzichte van de vorige generatie waar er maar twee nodes aangesloten konden worden op een basisstation.

Oplaadcircuit

Het is mogelijk de Li-ion batterij op te laden via USB of AC/DC adapter, zonder de batterij van het bord los te halen. Dit maakt het systeem een heel stuk praktischer. De oplaadtijd van de batterij bedraagt acht uur als een USB plug wordt aangesloten en drie uur als het opladen via een adapter verloopt.

De verwezenlijkingen van dit ontwerp worden nog eens gebundeld in tabel 7.1. Om de evolutie duidelijk te maken worden ook nog eens de prestaties van de twee vorige generaties getoond.

7.4.2 Mogelijke verbeteringen

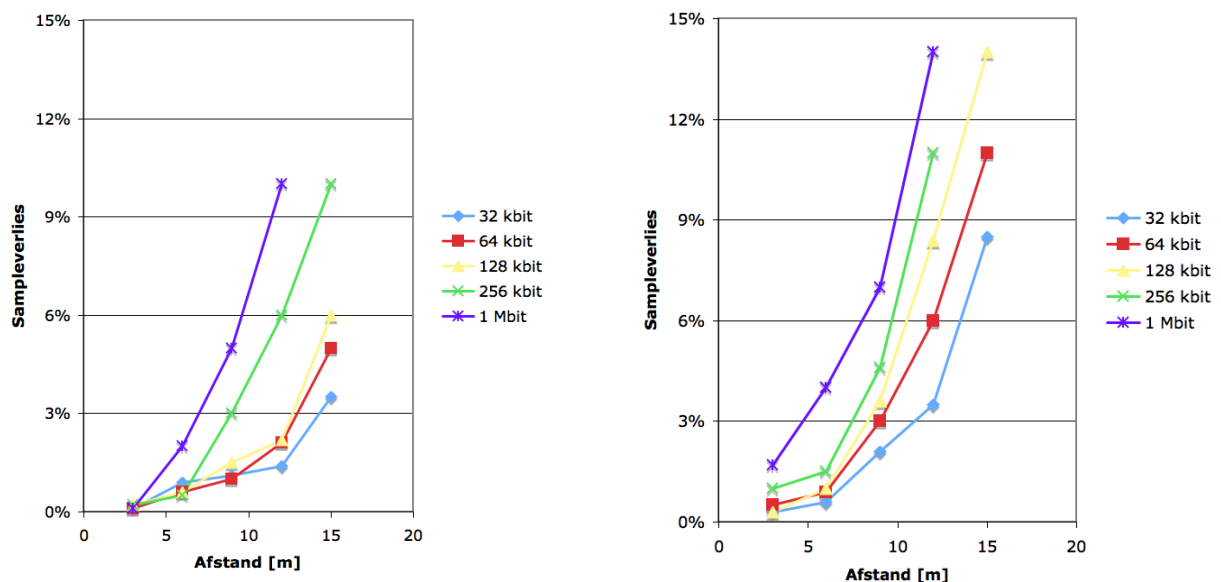
Snelheid, sampleverlies en afstand

Een hoger datadebiet zorgt voor een groter sampleverlies en dus voor een inkrimping van de maximale afstand tussen node en basisstation. Op figuur 7.11 is het sampleverlies weergegeven. Zoals in de test bij de eerste generatie lieten we een persoon één minuut dansen op de aangegeven afstand. De meting herhaalden we vijfmaal en is uitgezet in de grafiek. Links is het sampleverlies weergegeven waarbij de node tien centimeter zit van het lichaam verwijderd is. Rechts is het sampleverlies weergegeven waarbij de node 0,5 centimeter van het lichaam verwijderd is. Het is duidelijk dat het sampleverlies evenredig

	nulde generatie	eerste generatie	tweede generatie
aantal nodes	2	2	10
zendafstand	12 meter	12 meter	7 meter
samplerate	50 samples/s	100 samples/s	100 samples/s
vaste samplerate	nee	ja	ja
stroomverbruik	50 mA	70 mA	30 mA
uitbreiding meer nodes	nee	ja	ja
zendsnelheid	16 kbit/s	16 kbit/s	256 kbit/s

Tabel 7.1: Prestaties tweede generatie.

is met de snelheid van het verzenden en de afstand tot het basisstation. Bij experimenten bleek het sampleverlies soms ook in bursts voor te komen. Na onderzoek bleek dit het gevolg te zijn van obstructie van de zichtlijn (vanaf nu aangeduid met LOS: line of sight) tussen node en basisstation door het lichaam. De belangrijkste reden hiervoor is dat wanneer de node heel dicht tegen het lichaam geplaatst wordt, het lichaam de straling voor een groot stuk afschermt. Verbreken van de LOS zorgt voor minder problemen wanneer de afscherming ver genoeg van de node en het basisstation verwijderd is.



Figuur 7.11: Het sampleverlies in functie van de afstand met de node 10 cm (links) en 0.5 cm (rechts) van het lichaam verwijderd.

Het probleem van sampleverlies kan op twee manieren bestreden worden: het uitgezonden signaal versterken of meerdere ontvangers in de ruimte opstellen. Door het uitgezonden signaal te versterken is het systeem beter bestand tegen attenuatie, om toch een correcte dataoverdracht te garanderen. Door meerdere ontvangers in de ruimte op te stellen is de kans veel groter dat er een LOS met de node is.

Beide voorgestelde oplossingen impliceren ook dat de maximale afstand tussen node en basisstation groter wordt. Zo wordt nog meer bewegingsvrijheid gegarandeerd tijdens experimenten. Met verschillende ontvangers is het zelfs mogelijk het experiment te laten doorgaan in meerdere ruimtes.

Meer bewegingssensoren

Omdat in dit stadium van de scriptie de vooropgestelde specificaties al goed benaderd werden, was de wens er het systeem nog uit te breiden en nog krachtiger te maken door meer bewegingssensoren toe te voegen. Dit zou dan, samen met de versterker en meerdere ontvangers, de hoofdbrok worden van het derde en laatste ontwerp.

Hoofdstuk 8

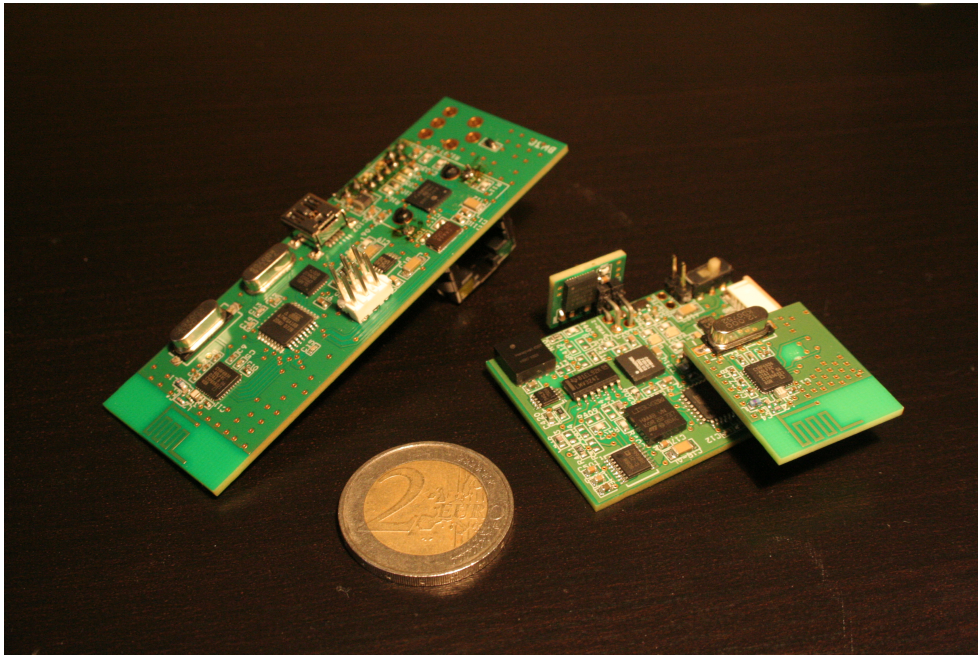
Derde generatie

Met het ontwerp van de tweede generatie werd voldaan aan de hoofdvereiste van deze scriptie: onderzoek hoeveel nodes tegelijkertijd door één basisstation opgevangen kunnen worden en breid vervolgens het systeem uit met een maximale hoeveelheid nodes. Of zoals de scriptie getiteld is: van 2 *headbangsensors* naar een *headbangorkest*.

Een systeem is nooit perfect en daarom wouden we de kans grijpen met het derde en laatste ontwerp nog enkele aspecten te verbeteren. Zo wordt er met deze derde generatie naar gestreefd een systeem uit te bouwen waar nog minder datapakketten verloren gaan, waar de afstand tussen node en basisstation nog verder vergroot kan worden en waar de node een nog completere reconstructie van de beweging kan geven.

Meerdere ontvangers met Ethernet

Er werd reeds duidelijk gemaakt dat problemen zich kunnen voordoen wanneer het lichaam zich bevindt tussen antenne van de node en antenne van het basisstation, omdat de uitgezonden straling van de antenne voor een groot stuk door het menselijke lichaam geabsorbeerd wordt. Dit voorval kan echter niet vermeden worden en zo zal gegevensverlies optreden wanneer het signaal gehinderd wordt. In sommige gevallen kan het geen kwaad een beperkte hoeveelheid data te verliezen, aangezien de samplefrequentie van 100 samples per seconde ruim gekozen is, maar in andere gevallen moet er een andere oplossing gezocht worden. Die oplossing vertaalt zich in het plaatsen van meerdere ontvangers in de ruimte (met *ontvanger* wordt een basisstation bedoeld, maar deze term is nu niet meer passend omdat er meerdere aanwezig zijn). Voor deze derde generatie werd een systeem ontwikkeld waarbij het aantal ontvangers variabel is en de gegevens van alle ontvangers verzameld



Figuur 8.1: Ontvanger (links) en node (rechts) - derde generatie.

worden op de computer met Ethernet (bijlage A.3.1). Op deze manier werd een oplossing ontwikkeld om gegevensverlies sterk terug te dringen. Naarmate het gegevensverlies meer of minder teruggedrongen moet worden kan gevarieerd worden met het aantal ontvangers. Dit maakt het systeem zeer dynamisch.

Grotere zendafstand

De afstand tussen node en basisstation kan vergroot worden door het uitgezonden signaal van de node te versterken. Ook gegevensverlies zal verminderen door meer vermogen uit te zenden. Voor dit ontwerp werd een oplossing ontwikkeld met een vermogenversterker (paragraaf 8.1.3). Omdat een versterker nu eenmaal meer vermogen verbruikt en de afstand bij experimenten niet altijd groot hoeft te zijn, werd de node zo ontworpen dat gewisseld kan worden tussen een systeem met versterker of zonder versterker. Dit komt de wensen van de gebruiker ten goede en maakt de node modulair.

Meer bewegingssensoren

De derde en misschien wel grootste vernieuwing in dit ontwerp, naast het terugdringen van gegevensverlies en vergroten van de maximale afstand tussen node en basisstation, is dat

de node het toelaat de volledige oriëntatie van het nodebord te laten reconstrueren. Niet enkel de versnelling wordt doorgegeven, maar nu kan ook de oriëntatie van de gebruiker afgeleid worden. Deze uitbreiding houdt in dat er naast de drie-assige accelerometer ook nog gyroscopen en een magnetometer op het PCB komen te staan. Met Kalman-filtering [23, 24] kan vervolgens uit al deze gegevens een nauwkeurig beeld geschetst worden van de oriëntatie en acceleratie op elk punt in de tijd. Deze rekenmethode werd reeds in 1960 ontwikkeld. Ze zoekt de best passende benadering tussen een reeks meetgegevens zonder dat alle waarden vooraf bekend hoeven te zijn, met andere woorden: deze methode maakt het mogelijk in realtime de actuele beweging af te leiden en voorspellingen te doen over volgende meetgegevens.

Het toevoegen van gyroscopen en magnetometer zorgde voor bijkomende uitdagingen. Deze componenten nemen extra plaats in op een ontwerp waar de afmetingen nauwelijks groter gedimensioneerd mogen worden. De node mag immers niet veel groter dan een GSM batterij zijn, en dat was al het geval bij de tweede generatie waar deze extra componenten nog niet op stonden. De nieuwe sensoren brengen trouwens nog een heleboel randcomponenten met zich mee, zoals ontkoppelcondensatoren, OPAMPS, ADC's en Power MOSFET's die ook veel plaats innemen. Een grote uitdaging werd dus gevormd bij het layouten.

Een tweede uitdaging werd gevormd bij de datatransmissie. Waar bij de eerste generatie het aantal te verzenden bytes beperkt werd tot drie, komt dat aantal nu een pak hoger te staan: drie dimensies voor de acceleratie, de hoekversnelling van de gyroscopen voor elke as en de drie waarden van de magnetometer voor elke dimensie. Daar komt nog een byte bovenop voor een teller. Het transmissieprotocol moet vandaar heel nauwkeurig afgestemd zijn om het grote aantal nodes aan te kunnen.

Een laatste moeilijkheid die de extra sensoren met zich meebrachten was het bekomen van de geschikte componenten. Drie-assige magnetometers en drie-assige gyroscopen die op drie Volt werken zijn heel moeilijk te vinden. Hierover wordt dieper ingegaan in paragraaf 8.1.

Grotere nauwkeurigheid

Het laatste ontwerp moet het meest nauwkeurige zijn. Voorheen werd de acceleratie per dimensie in zeven (eerste generatie) of acht bit (tweede generatie) doorgestuurd. De accelerometer stelt echter twaalf bits ter beschikking. Voor de derde generatie werd bijgevolg gekozen alle bits door te sturen naar het basisstation, omdat zelfs het minst significante bit

ruisongevoelig is. De gyroscopen en magnetometer, beide analoge componenten, worden door de ADC's op het PCB omgezet naar tien bit. Ook voor deze meetwaarden worden alle bits over de draadloze link verstuurd. Elke node moet bijgevolg per tijdsinterval dertien bytes doorsturen, ruim vier keer meer dan in de vorige generatie.

8.1 Componentenkeuze

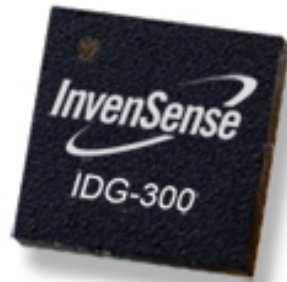
8.1.1 Gyroscop

In het ideale geval is dit een enkele component die de hoeksnelheid in drie dimensies opmeet. Op de markt zijn echter nog geen drie-assige gyroscopen te vinden, waardoor minimum twee gyroscopen op de node gebruikt moeten worden: een eerste die meet in het xy-vlak en een tweede volgens de z-as. Drie gyroscopen gebruiken is niet aangewezen omdat er dan nog meer plaats in het design wordt ingenomen. Een geschikte 2-assige gyroscop werd bij InvenSense gevonden: de IDG-300 [25] (figuur 8.2). Wat deze component zo aantrekkelijk maakt is enerzijds de capaciteit om volgens twee assen te meten, en anderzijds het hoge meetbereik tot 500 graden per seconde. Verder werkt deze component op een voedingsspanning van 3 tot 3,3 Volt.

Bij het zoeken naar een gyroscop die volgens de z-as meet, trad er een nieuw probleem op. Er waren enkel dergelijke gyroscopen te vinden die werken op een voedingsspanning van 5 Volt. Ofwel moest dus de voedingsspanning voor deze component omhoog getransformeerd worden, ofwel moest er nagegaan worden of het mogelijk was een gyroscop verticaal te plaatsen. Er werd voor de tweede mogelijkheid geopteerd. Een gyroscop verticaal plaatsen neemt minder plaats in dan een step-up converter. Dit werd verwezenlijkt door de verticale gyroscop te bevestigen op een extra PCB die met de node verbonden werd via een gekantelde pinheader, zie figuur 8.1. Voor de verticale gyroscop werd ook de IDG-300 gekozen.

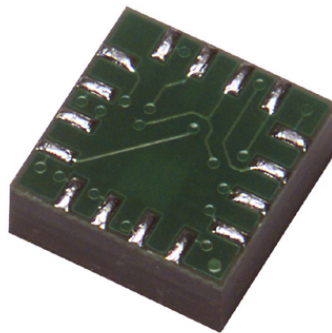
8.1.2 Magnetometer

De magnetometer HMC1053 van Honeywell [26] is het meest geschikt voor dit ontwerp (figuur 8.3). Deze component meet volgens drie assen en werkt op een voedingsspanning van 3,3 Volt. Een nadeel aan deze component is de analoge uitgang, waardoor een signaalconditioneringscircuit met OPAMP's, condensatoren, weerstanden en ADC's nodig is.



Figuur 8.2: Gyroscoop IDG-300 van InvenSense.

De totale kostprijs zou echter veel duurder uitvallen moest de digitale equivalent met I^2C aangewend worden. Om die reden werd de analoge component gekozen.



Figuur 8.3: Magnetometer HMC1053 van Honeywell.

8.1.3 Versterker

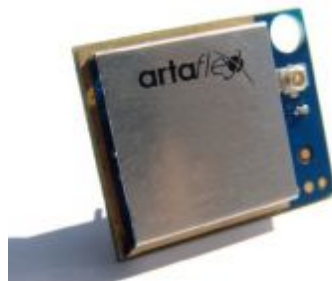
Verantwoording

Om dataoverdracht betrouwbaarder te maken en het systeem te laten werken wanneer nodes en basisstation nog verder van elkaar verwijderd zijn, is het nodig het uitgezonden vermogen van de nodes te verhogen. Het signaal dat de RF chip stuurt naar de antenne moet dus versterkt worden. Ofwel konden we ervoor kiezen het volledige RF gedeelte (chip + antenne) te vervangen door een complete module (bv XBee PRO [5]), ofwel konden we een vermogenversterker aanschaffen die het signaal van de huidige RF chip versterkt. Er werd niet voor de XBee PRO gekozen hoewel deze module zeer populair is. Reden hiervoor

is dat dit de RF architectuur van de node en basisstation volledig zou wijzigen, aangezien de huidige RF chip dan niet meer gebruikt wordt. De communicatie met de microcontroller verloopt overigens voor deze module via UART. Op het basisstation wordt het UART kanaal van de microcontroller reeds gebruikt voor communicatie met de computer, dus een XBee PRO module gebruiken zou inhouden dat voor de communicatie met de computer een andere oplossing zou gezocht moeten worden. De ervaring leert ons dat teveel stappen ineens nemen in een nieuw ontwerp de kans op fouten aanzienlijk verhoogt. Om die reden werd voor een vermogenversterker geopteerd die compatibel is met de reeds bestaande architectuur.

AWA24S

Er zijn twee interessante modules op de markt die door de RF chip van ons ontwerp aangestuurd worden. De eerste module vonden we bij Unigen Corporation [27], de tweede bij Artaflex Modules [28]. De tweede genoot de voorkeur omdat die iets kleiner is en gemakkelijk te bestellen is bij Digi-Key. De AWA24S van Artaflex Modules (figuur 8.4) kan uitzenden aan een vermogen van 20 dBm en verbruikt daarbij minder dan 200 mA (in tegenstelling tot de XBee PRO die 215 mA verbruikt en de module van Unigen die meer dan 220 mA verbruikt). De versterker kan ook in slaapstand gebracht worden en heeft dan quasi geen stroom nodig.

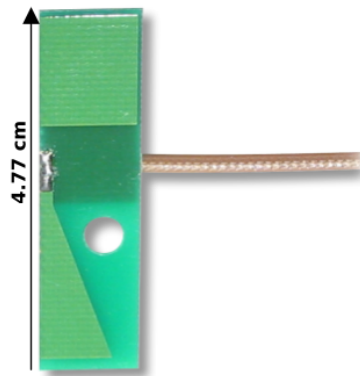


Figuur 8.4: Vermogenversterker AWA24S van Artaflex Modules.

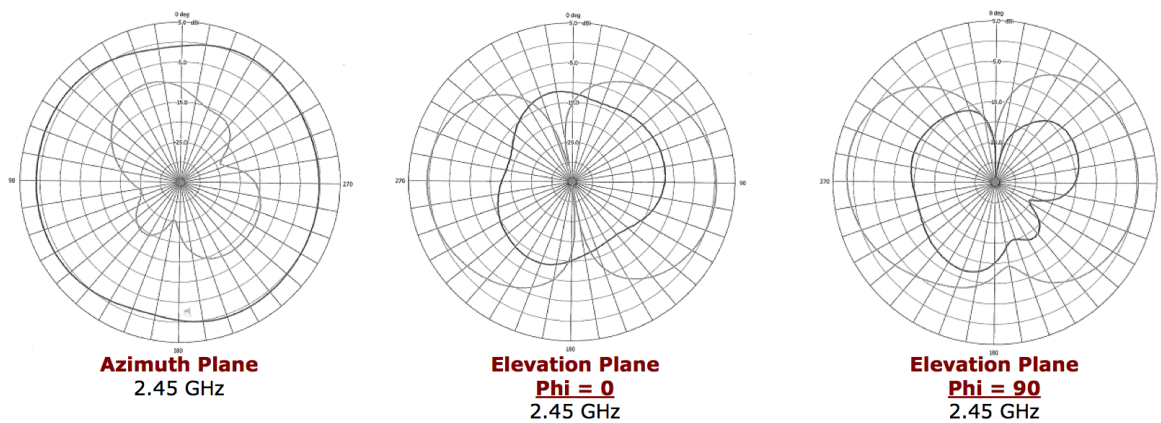
8.1.4 Antenne

Nu een vermogenversterker gebruikt wordt, moet uitgekeken worden naar een nieuwe antenne, daar de PCB antenne van het vorige ontwerp nu niet meer ingezet kan worden. Een geschikte antenne voor dit systeem is een antenne die weinig tot niet directief is, met

andere woorden: een antenne die in alle richtingen vrij uniform uitzendt. De beweging van een proefpersoon is immers willekeurig en vandaar is niet op voorhand geweten hoe de antenne van de node naar het basisstation gericht zal zijn. De NanoBlue antenne van Laird Technologies [29] (figuur 8.5) is in dit opzicht heel geschikt. Het stralingspatroon is geschetst in figuur 8.6. Verder kan deze antenne heel eenvoudig aan de versterker bevestigd worden met een IPEX MHF connector.



Figuur 8.5: NanoBlue antenne van Laird Technologies.

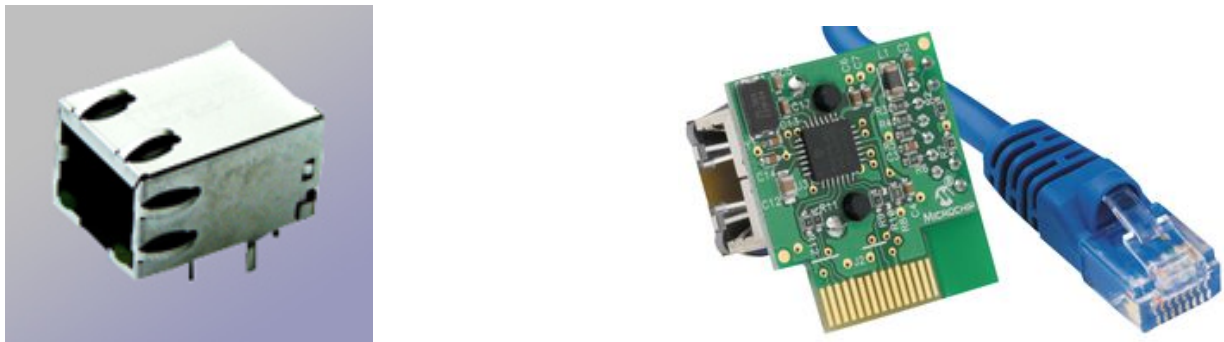


Figuur 8.6: Stralingspatroon van de NanoBlue antenne.

8.1.5 Ethernet controller

Door meerdere ontvangers te gebruiken is een systeem nodig waarbij de ontvangen gegevens verzameld worden op een centraal punt, de computer. Het Ethernet protocol leent zich hier heel goed toe. Op elke ontvanger wordt een MAG Jack connector (figuur 8.7.a) geplaatst en de data wordt nu met Ethernet-pakketten naar de computer verstuurd.

Als Ethernet controller werd de ENC28J60 van Microchip Technology [30] (figuur 8.7.b) gekozen. Deze component behandelt automatisch de fysische laag en datalinklaag [31] en kan via SPI (bijlage A.1.3) aangestuurd worden door de microcontroller.

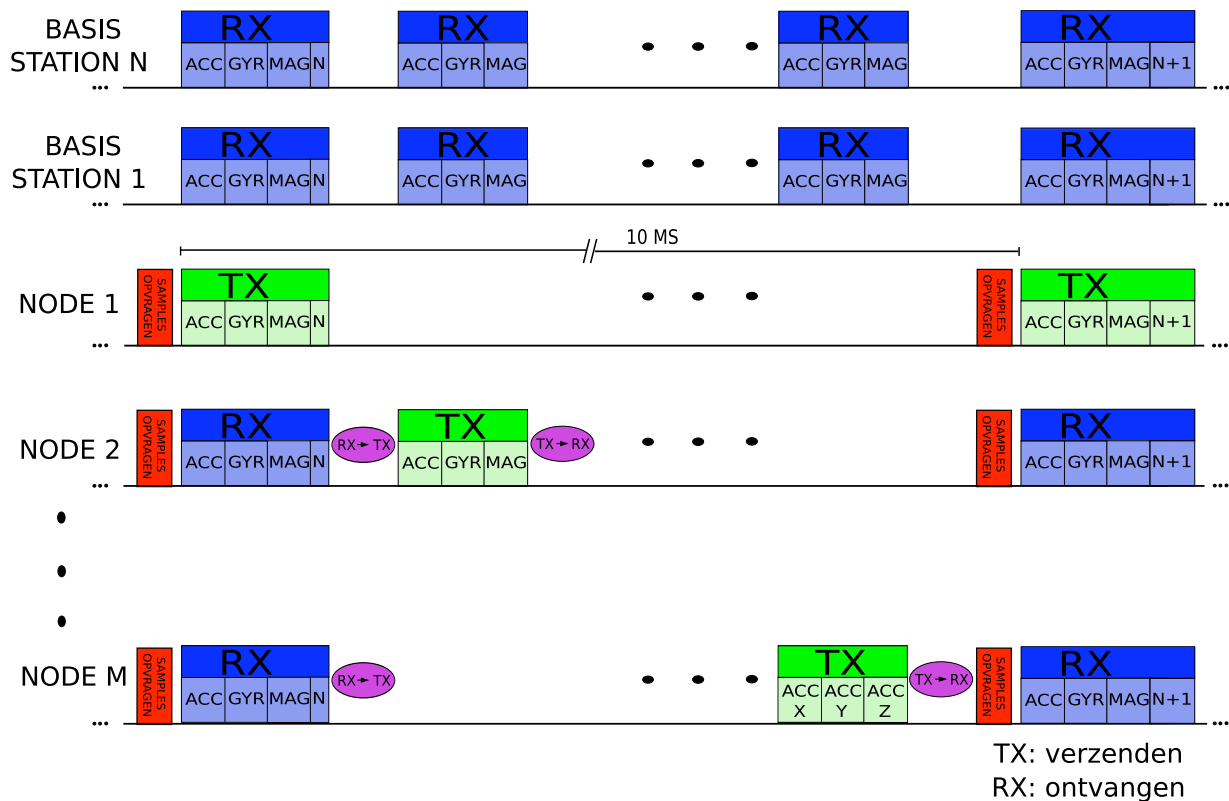


Figuur 8.7: MAG Jack connector (links) en Ethernet controller op PICtail bord (rechts).

8.2 Transmissieprotocol

8.2.1 Start van het protocol

In figuur 8.8 wordt een overzicht gegeven van het nieuwe transmissieprotocol. Waar bij de eerste en tweede generatie het basisstation een startsignaal zond, fungeren nu de gegevens van de eerste node als startsignaal. Alle nodes luisteren op het kanaal van de eerste node. Wanneer ze merken dat de eerste node zijn informatie doorgezonden heeft, gaan zij zelf om de beurt over tot zenden. Via deze nieuwe methode wordt de vertraging vermeden die het basisstation met het zenden van een startsignaal veroorzaakt.



Figuur 8.8: Timing diagram TDMA protocol derde generatie.

8.2.2 Meerdere ontvangers

Dat het basisstation geen startsignaal meer stuurt is trouwens niet alleen een kwestie van tijdsinstelling. Nu het mogelijk is meerdere ontvangers aan te sluiten is er geen sprake meer van een centraal basisstation. In figuur 8.8 wordt duidelijk dat elke ontvanger dezelfde rol in het protocol speelt en in staat is alle nodes te horen. Wanneer er nu een pakket verloren gaat bij een ontvanger is de kans reëel dat een andere ontvanger dat pakket wel ontvangen heeft. De computer is vervolgens in staat de gegevensstroom van alle ontvangers te bundelen. Een pakket wordt nu pas als verloren beschouwd wanneer geen enkele ontvanger het pakket ontvangen heeft.

De eerste node vormt de centrale klok voor het systeem aangezien elke andere node reageert op de eerste node. De microcontroller van de eerste node is zo geprogrammeerd dat hij precies elke 10 milliseconden (100 samples per seconde) acceleratiegegevens naar het basisstation doorstuurt. Merk op dat de ontvangers en centrale node nu nooit meer hoeven

te veranderen van zend- naar ontvangmodus.

8.2.3 1 kanaal

Bij de nieuwe RF chip wordt veel minder hinder van interferentie ondervonden als bij de oude RF chip. Er treedt zelfs zo weinig interferentie op dat alle ontvangers op hetzelfde kanaal kunnen sturen. Zowel ontvangers als nodes hoeven dus niet meer te veranderen van kanaal, wat opnieuw tijds winst oplevert. Het aantal nodes die maximaal aan te sluiten zijn per systeem verhoogt dus opnieuw ten opzichte van de vorige generatie. Aan een snelheid van 256 kbit/s kunnen 15 nodes alle gegevens opmeten en doorsturen in 10 milliseconden. Aan een snelheid van 1 Mbit/s kan dit aantal zelfs boven de 20 oplopen. Bij hogere snelheden gaat echter de sensitiviteit van de ontvanger naar omlaag. Dit betekent hoger sampleverlies en een kleinere maximale afstand tussen zender en ontvanger. Voor deze generatie blijft de snelheid dus op 256 kbit/s staan.

8.2.4 Teller

De meetwaarden van de eerste node worden bij het verzenden aangevuld met een teller. Zo wordt eenduidig voor de ontvangers bepaald over welk tijdsinterval het gaat. Dit is essentieel bij de reconstructie op de computer. Geen enkele andere node hoeft dit nummer te versturen. Wanneer een ontvanger de eerste node hoort, weet de ontvanger dat alle opeenvolgende pakketten binnen de 10 milliseconden bij hetzelfde tijdsinterval horen. De ontvanger voegt bij het versturen van de gegevens naar de computer wel een teller toe voor elk sample, dit opnieuw om reconstructie op de computer mogelijk te maken. Doordat geen enkele node, met uitzondering van de eerste node, een teller hoeft te versturen, wordt nuttige bandbreedte vrijgehouden.

8.2.5 Time-outs

Ontvanger

Het is mogelijk dat een ontvanger de eerste node tijdelijk niet hoort. Dan wordt dus ook de teller niet ontvangen en weet de ontvanger in principe niet over welk tijdsinterval het gaat. Wat er gebeurt, is gelijkaardig met het principe van figuur 6.9, uitgelegd in paragraaf 6.3.5: de ontvanger wacht op node x . Wanneer een bepaald tijdstip overschreden wordt en er nog steeds geen ontvangst is, schakelt de ontvanger over naar node $x+1$. De ontvanger verstuurt dan een leeg datapakket naar de computer waar wel nog een teller inzit. Die

teller heeft de ontvanger zelf ingevuld op basis van het laatste goed ontvangen pakket. Het lege datapakket heeft in feite nog steeds evenveel bytes als een origineel datapakket, maar nu wordt elke byte op 0xFF gezet, of beter gezegd: elke bit wordt op 1 gezet. De computer kan nu heel eenvoudig uit alle ontvangen pakketten het beste pakket halen door een logische AND uit te voeren op alle bytes.

Node

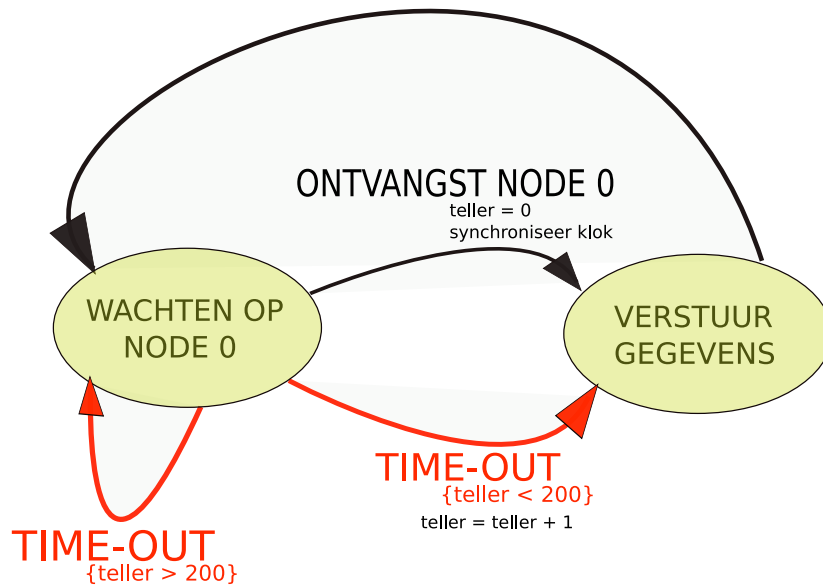
Stel nu dat het signaal van de eerste node volledig gehinderd wordt, dan zou dit kunnen betekenen dat alle andere nodes geen meetwaarden doorsturen omdat ze geen startsignaal ontvangen. Met dit probleem is handig rekening gehouden door elke node een interne time-out mee te geven; wanneer een node geen startsignaal ontvangt binnen de opgegeven tijd zal die node via een interne klok toch de gewenste gegevens doorsturen binnen het juiste tijdsinterval. Die interne klok wordt enkel gebruikt in het geval de node geen startsignaal ontvangt, en wordt telkens gekalibreerd bij het correct ontvangen van een startsignaal. Dit is nodig omdat de frequentie van het kristal van twee nodes heel miniem verschilt: orde 30 ppm. Een node mag zeker tot tien seconden vertrouwen op de interne klok vooraleer pakketten beginnen interfereren. Wanneer de node na twee seconden nog steeds geen startsignaal ontvangt, wat zoveel betekent als 200 tijdsintervallen met time-out na elkaar, wordt verondersteld dat de eerste node is afgezet en het experiment ten einde is. Deze situatie wordt nog eens duidelijk gemaakt in figuur 8.9.

8.3 Schema en layout

8.3.1 Node

De node bestaat uit drie aparte PCB bordjes: een nodebord, een verticaal gyroscoopbord en een zendbord, dat eventueel kan vervangen worden door een versterkermodule.

Op het nodebord staat de microcontroller samen met de accelerometer, een twee-assige gyroscoop (voor de x- en y-richting) en een magnetometer (figuur 8.17). Op het verticale gyroscoopbord, een apart PCB dat via een connector op het nodebord bevestigd wordt, staat dezelfde gyroscoop als die op het nodebord. Voor deze component wordt slechts één as gebruikt om de rotatie om de z-as te bepalen. Het zendbord is een bord waarop de RF chip is geplaatst samen met een PCB antenne. De connector waarin dit bord wordt vastgeklikt is compatibel met die van de versterkermodule, zodanig dat op elk moment dit bord vervangen kan worden door een versterkermodule (zie figuur 8.12).

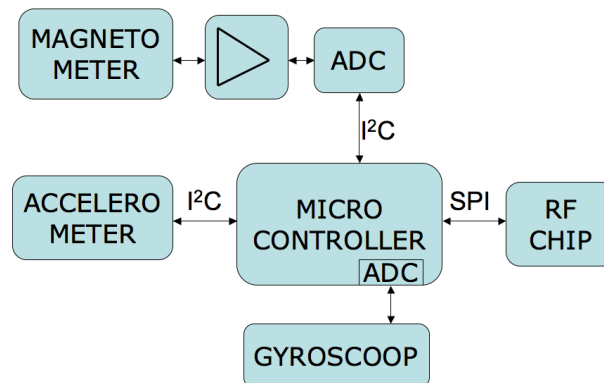


Figuur 8.9: Toestandsdiagram voor node x.

De versterker staat boven de node, waardoor de afmetingen in x- en y-richting niet vergroten. De node past bijgevolg nog steeds op een GSM-batterij. Enkel de hoogte van het bord wordt iets groter maar dit is niet hinderlijk bij het bewegen met een node op het lichaam. Het zendbord gebruiken zou een optie zijn wanneer de metingen gebeuren op kleine afstand van het basisstation en het batterijverbruik zo laag mogelijk gehouden moet worden. Door deze ingreep wordt het systeem van de derde generatie ineens een stuk aantrekkelijker, aangezien dit systeem nu tegemoet kan komen aan de wensen voor enerzijds grote afstanden, anderzijds laag batterijverbruik.

De communicatie tussen de verschillende componenten is weergegeven in figuur 8.10. De RF chip en de accelerometer communiceren respectievelijk volgens het I^2C en SPI protocol met de microcontroller, net als bij de vorige twee generaties. De gyroscoop is een analoge component en zijn waarde wordt door de interne analoog-naar-digitaal converter (ADC) van de microcontroller omgezet naar een digitale waarde. De magnetometer is ook een analoge component, maar de uitgang van de magnetometer (grootteorde mV) moet voorversterkt worden met een OPAMP wil men de component kunnen uitlezen. De microcontroller heeft zes ADC kanalen. Aangezien ook de spanning over de batterij gemeten moet worden zijn zes ADC kanalen te weinig. Het is met andere woorden nodig een externe ADC te gebruiken voor de magnetometer. Deze externe ADC wordt door de

microcontroller via het I^2C protocol uitgelezen.



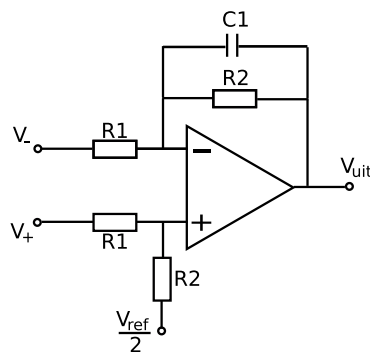
Figuur 8.10: Communicatieinterfaces bij de node - derde generatie.

Schema

nodebord Het schema van het nodebord is te zien in figuur 8.13. Aan de rechterkant van de microcontroller zijn opnieuw de SPI lijnen voor de RF chip te zien (samen met de \overline{RESET} lijn en de IRQ lijn). Deze lijnen zijn verbonden met de connector voor de RF chip. Naast deze lijnen zijn er ook drie extra lijnen voorzien om de eventuele versterker aan te sturen (uitgangsvermogen regelen, shutdown status instellen...).

Rechts is de twee-assige gyroscoop te zien die verbonden is via een laagdoorlaatfilter met de microcontroller (om de hoge frequentie componenten, die veroorzaakt worden door de resonatiefrequentie van de vibrerende massa's in de gyroscoop, weg te filteren). De verticale gyroscoop is via de connector „TO GYRO Z” op dezelfde wijze verbonden met de microcontroller. De ADC van de microcontroller heeft een referentiespanning nodig. De voedingsspanning wordt door een laagdoorlaatfilter gestuurd (de spoel en de condensator) en als referentiespanning gebruikt [15]. Links is zoals in de tweede generatie te zien dat de microcontroller verbonden is met de accelerometer via SDA en SCL lijnen. De externe ADC is ook verbonden met deze SDA en SCL lijnen.

Het schema rond de magnetometer is weergegeven in figuur 8.14. Dit schema maakt ook deel uit van het nodebord. De magnetometer bestaat uit drie verschillende Wheatstone bruggen, één voor elke as. De uitgang van deze bruggen is van de orde van enkele milliVolt en moet dus versterkt worden. Deze versterking gebeurt via een differentiële versterkerschakeling (figuur 8.11) De versterking bedraagt dan $\frac{R_2}{R_1}$ [32].



Figuur 8.11: Differentiële versterker in magnetometer circuit.

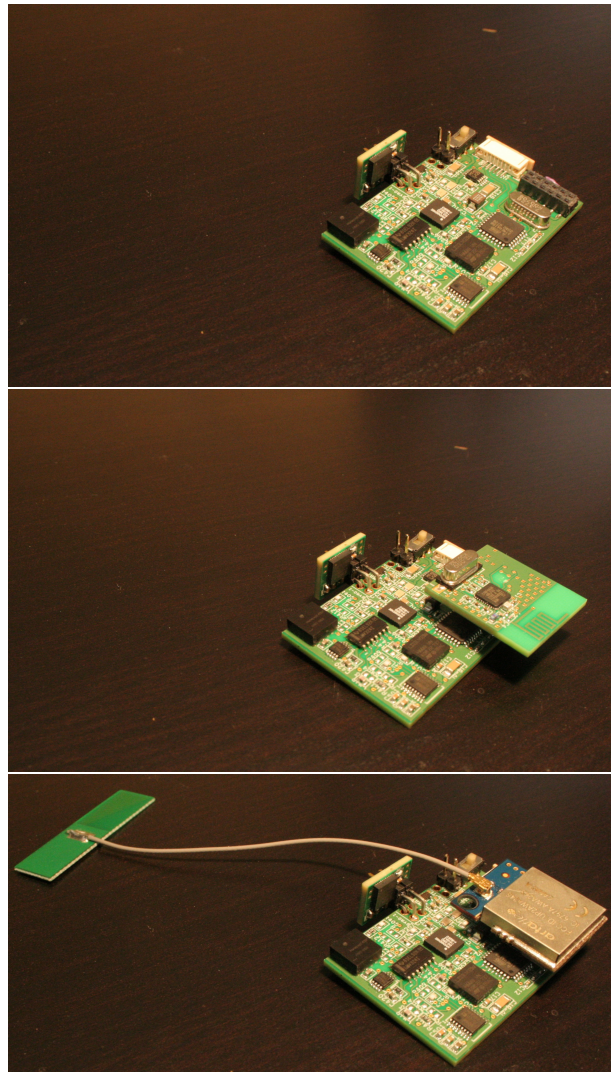
De uitgang van deze versterking wordt naar de ADC gestuurd. Helemaal links op de figuur staat een set/reset schakeling; de weerstanden gebruikt in de Wheatstone brug kunnen in verzadiging treden door een sterk extern magnetisch veld. In dit geval is het nodig de weerstanden te resetten. Dit gebeurt door de set/reset pinnen van de magnetometer een sterke stroom te sturen (≈ 0.4 A). De condensator links (C420) fungeert als een reservoir en wordt via een weerstand opgeladen tot de voedingsspanning. Een HEXFET Power MOSFET [33] (met een zeer lage aanweerstand, van de orde 0.1 Ohm) zal deze lading bij het aanschakelen door de set/reset pinnen sturen (dit pad heeft een weerstand van 6 Ohm, waardoor de benodigde stroomsterkte gehaald wordt).

verticale gyroscoopbord Het verticale gyroscoopbord biedt ruimte voor de gyroscoop die de draaiing rond de z-as zal meten. De uitgang wordt zoals voor de gyroscoop op het nodebord via een laagdoorlaatfilter naar de interne ADC van de microcontroller gestuurd.

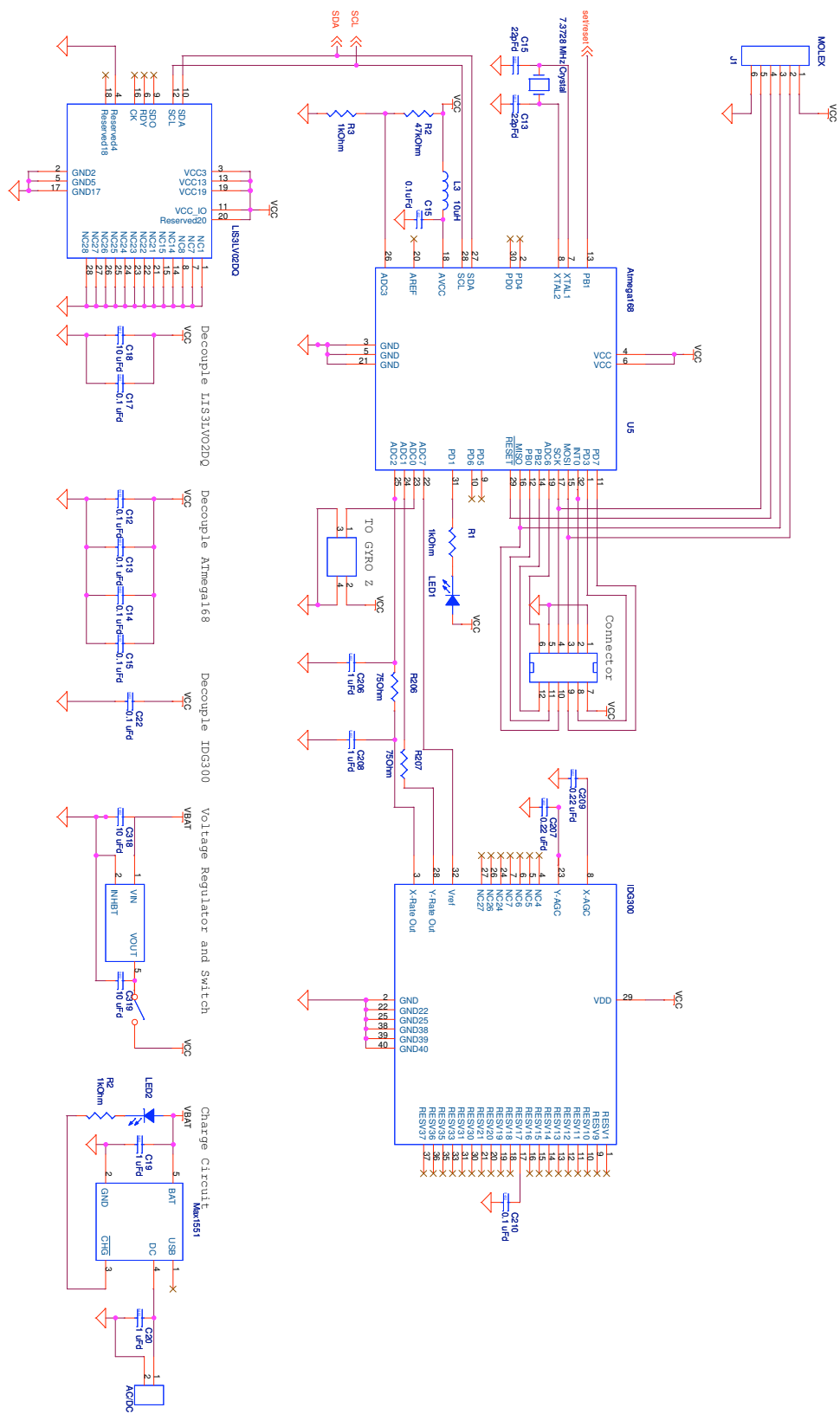
zendbord Het zendbord bevat de RF chip en de PCB antenne, de layout is dezelfde als de layout rond de RF chip in de tweede generatie (figuur 7.7).

Layout

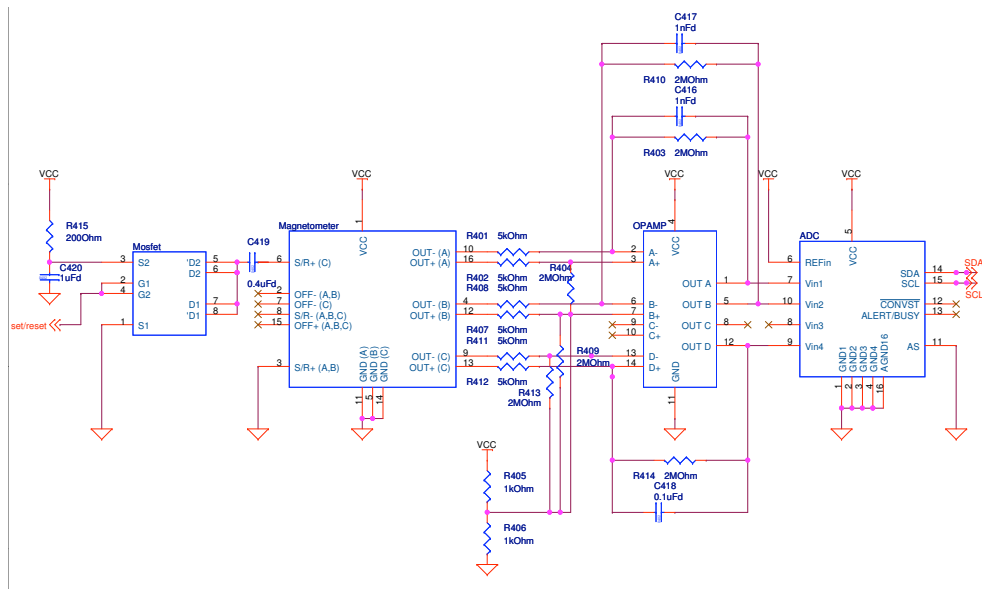
De layout in OrCAD van de verschillende borden is te zien in figuren 8.17, 8.18 en 8.19. De verschillende componenten zijn aangeduid. Opnieuw zijn de verschillende borden met de hand gerouteerd. Op deze wijze was het mogelijk om het ontwerp tegelijkertijd zeer compact en tweelagig te houden, waarbij alle componenten langs één enkele zijde geplaatst konden worden.



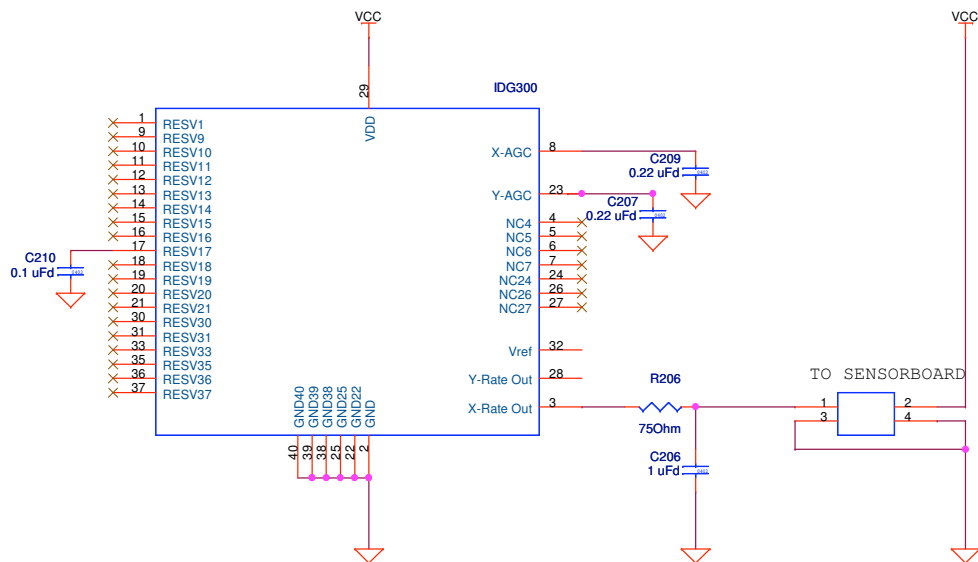
Figuur 8.12: Twee verschillende RF modules op het nodebord.



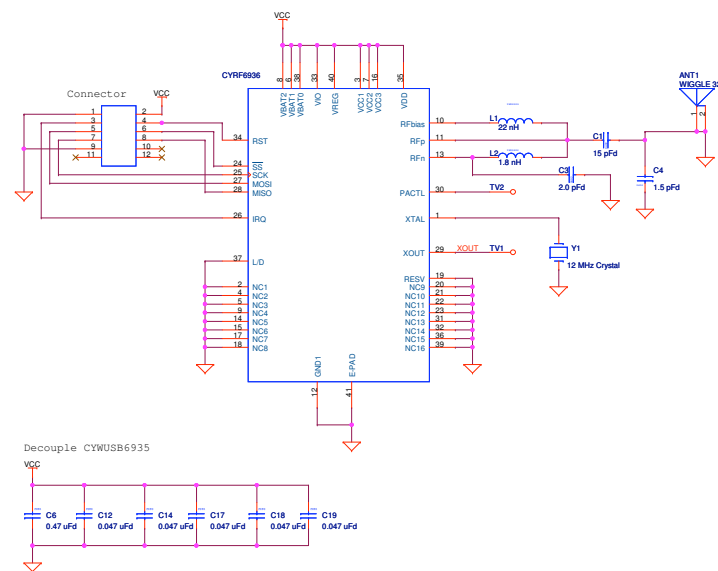
Figuur 8.13: Schema van node - derde generatie - deel 1.



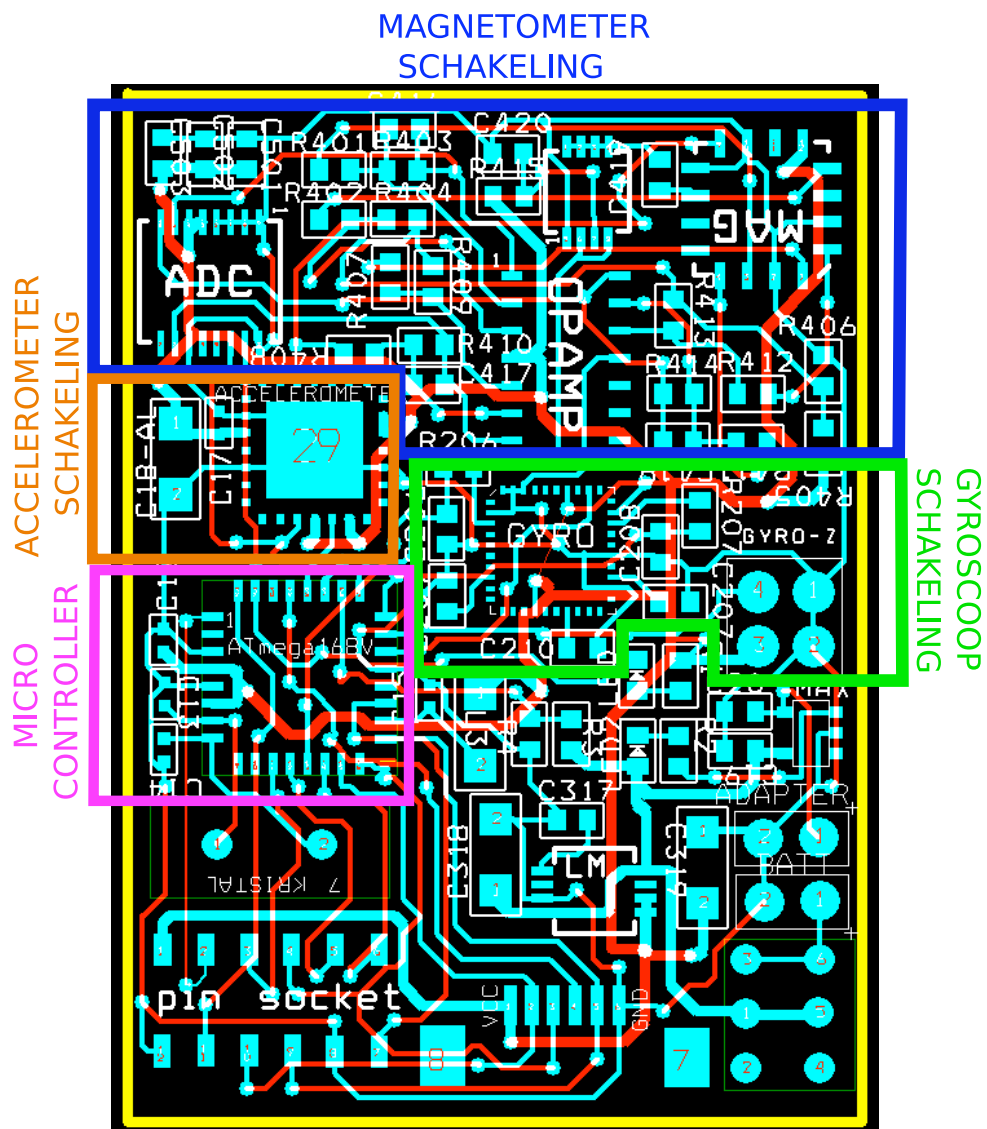
Figuur 8.14: Schema van node - derde generatie - deel 2.



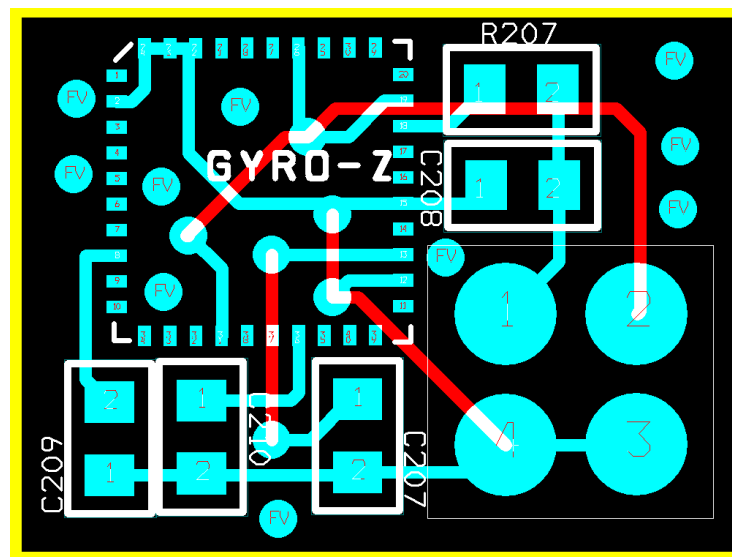
Figuur 8.15: Schema van verticale gyroscoop voor node - derde generatie.



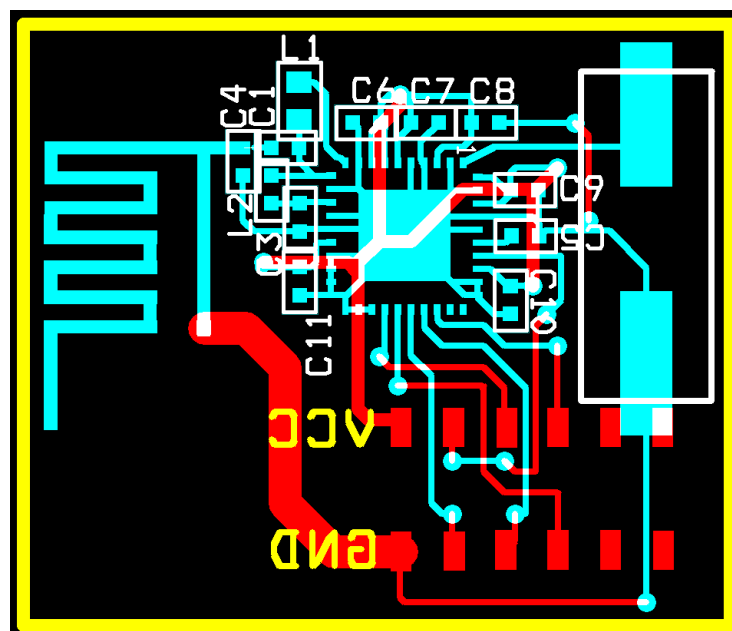
Figuur 8.16: Schema van zendbord zonder versterker - derde generatie.



Figuur 8.17: OrCAD Layout van node - derde generatie.



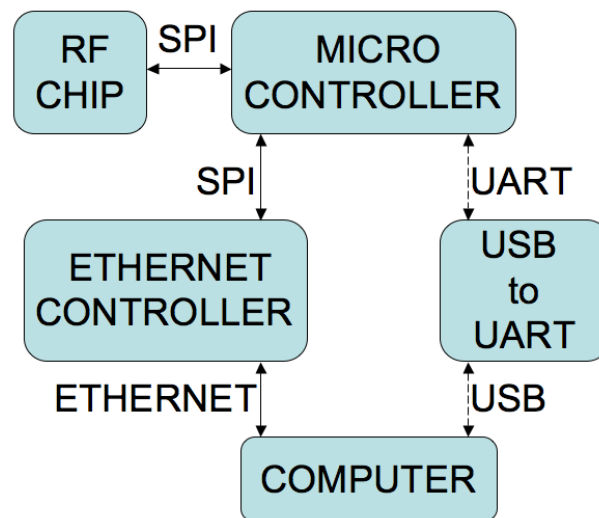
Figuur 8.18: OrCAD Layout van verticale gyroscoop - derde generatie.



Figuur 8.19: OrCAD Layout van zendbord zonder versterker - derde generatie.

8.3.2 Basisstation

De communicatie tussen de verschillende componenten van het basisstation van de derde generatie is weergegeven in figuur 8.20. Aangezien de RF chip in de tweede generatie dezelfde is als in de derde generatie gebeurt de communicatie tussen de microcontroller en de RF chip opnieuw met het SPI protocol. De communicatie met de computer kan zoals bij de tweede generatie verzorgd worden via USB, maar nu ook via Ethernet.



Figuur 8.20: Communicatieinterfaces bij de ontvanger - derde generatie.

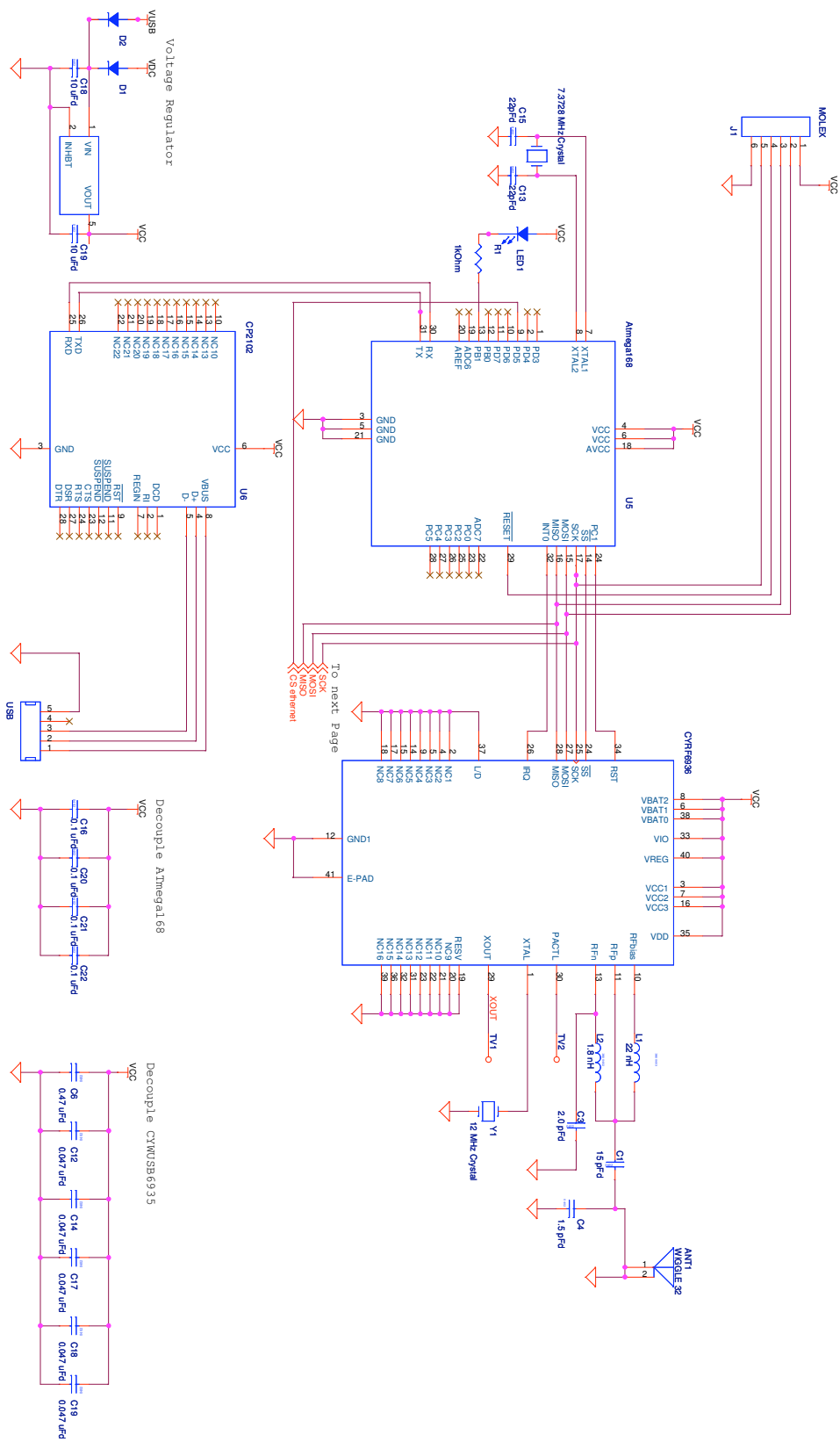
Schema

Het schema van het basisstation van de derde generatie is zeer gelijkaardig aan het schema van de tweede generatie (figuur 7.9). Het eerste deel van het schema, figuur 8.21 is identiek aan het schema van de tweede generatie. Het tweede deel van het schema (figuur 8.22) is een uitbreiding die de Ethernet controller aanstuurt. De vier SPI lijnen komen toe bij de Ethernet controller langs links en de controller zal op zijn beurt de MAG Jack aansturen.

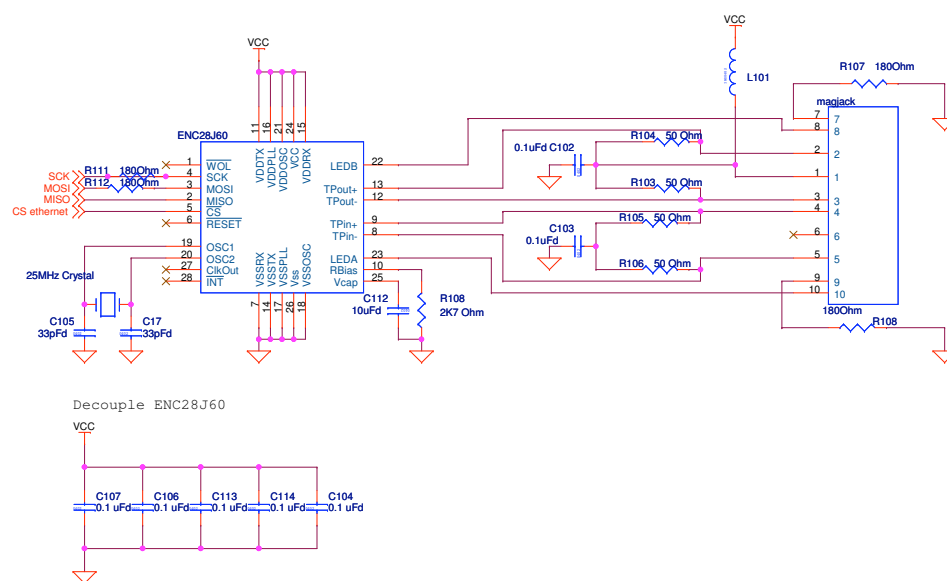
Layout

De layout is ook zeer gelijkaardig aan de layout van de tweede generatie (figuur 8.23). Op het bovenste deel van de figuur is zoals bij de tweede generatie de RF chip, de microcontroller en de USB to UART chip te zien. Onderaan is er een nieuw stuk bijgekomen: de

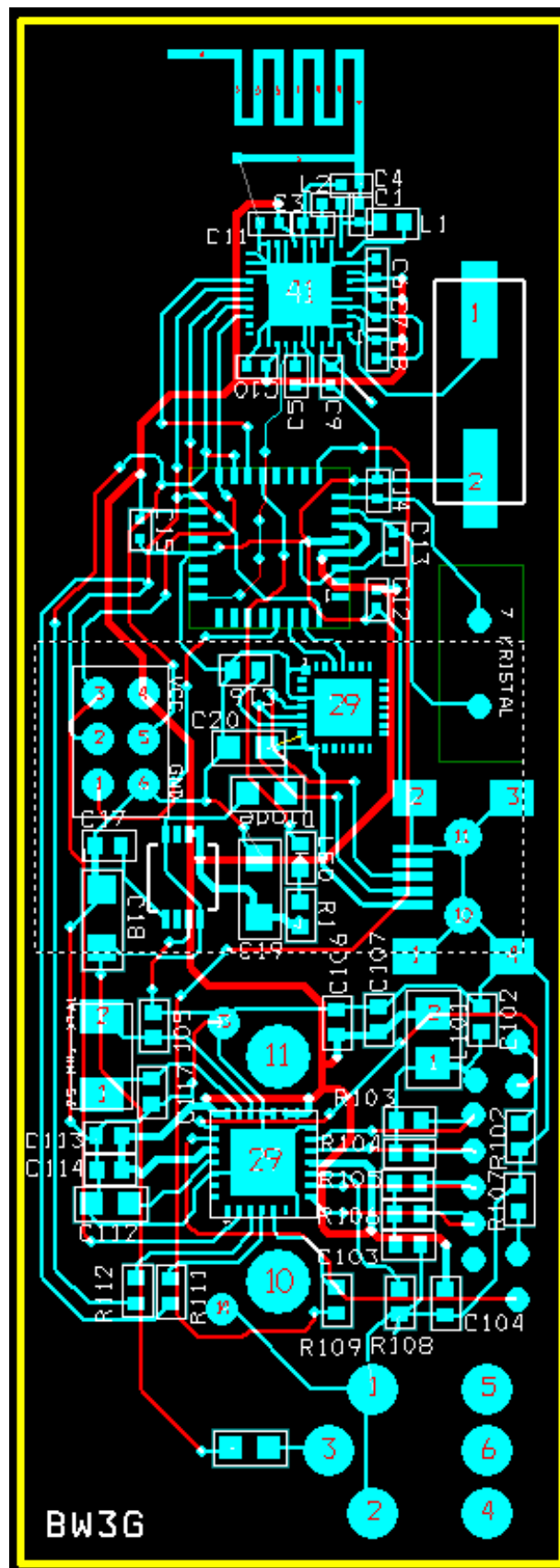
Ethernet controller en zijn randcomponenten. De MAG Jack zelf komt aan de andere kant van het bordje te zitten. Bij de vorige ontwerpen hing het basisstation rechtstreeks met een USB kabel aan de computer. Deze kabel stond tegelijk in voor de communicatie en de voeding. Aangezien de ontvangers niet meer allemaal rechtstreeks aan de computer hangen moet een nieuwe oplossing voor de voeding gevonden worden: op elke ontvanger is nu een AC/DC connector geplaatst, helemaal onderaan op de layout te zien.



Figuur 8.21: Schema van basisstation - derde generatie - deel 1.



Figuur 8.22: Schema van basisstation - derde generatie - deel 2.



Figuur 8.23: OrCAD Layout van basisstation - derde generatie.

8.4 Prestaties

De belangrijkste eigenschappen van het systeem van de derde generatie zijn weergegeven in tabel 8.1.

Aantal nodes

Door alle nodes (op de eerste na, zie paragraaf 8.2) op hetzelfde kanaal te laten zenden kan het aantal nodes ten opzichte van de tweede generatie sterk opgedreven worden. Het aantal komt nu op 15 nodes te staan. Dit aantal kan nog verhoogd worden door de zendsnelheid op de RF chip in te stellen op 1 Mbit/s in plaats van 256 kbit/s. De gevoeligheid van de RF chip gaat echter omlaag met het verhogen van de zendsnelheid, en daarmee vermindert ook het bereik.

Aantal sensoren

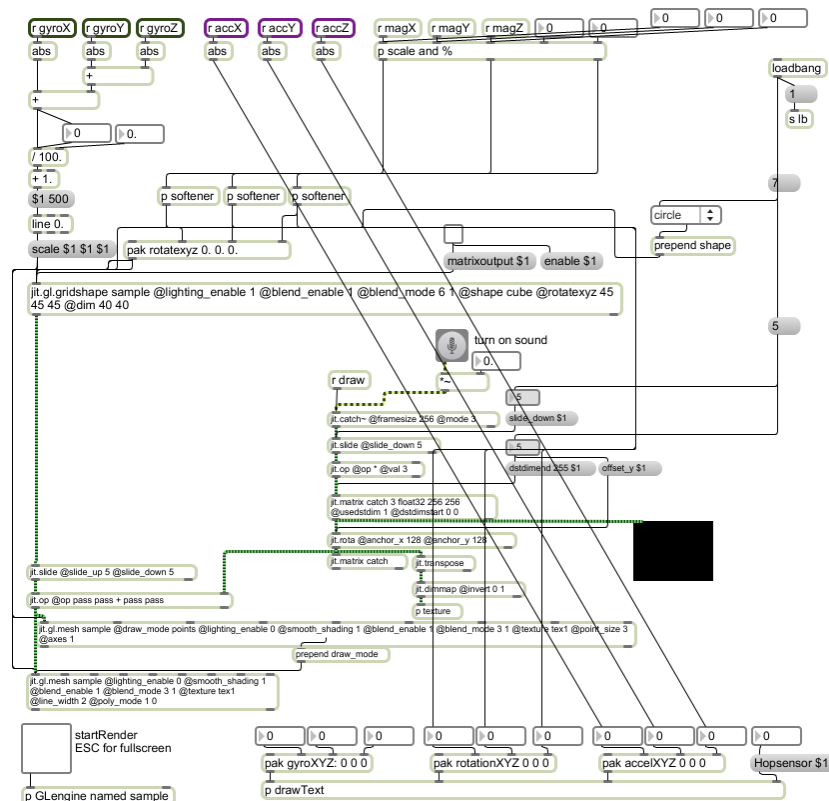
In tegenstelling tot een accelerometer bij de vorige generaties, worden nu drie verschillende sensoren (accelerometer, magnetometer en gyroscoop) gebruikt. Dit heeft een enorm voordeel wat betreft de reconstructie van de beweging van het nodebord. Het is nu mogelijk om via Kalman filtering [23, 24] de oriëntatie van het bord te bepalen. In samenwerking met ir. Benoit Huyghe werd dit succesvol uitgetest op het CMST in Zwijnaarde. Het resultaat hiervan is te zien in figuur 8.27. Door het grote aantal sensoren kunnen ook meer complexe toepassingen in signaalverwerkende programma's zoals Max/MSP worden ontwikkeld. Een voorsmaakje is te zien in figuur 8.24 en 8.26. Op de figuren zijn verschillende meetkundige objecten te zien waar de kleur, oriëntatie en grootte bepaald worden door de uitgangen van de sensoren op een node.

Resolutie

De resolutie is niet meer beperkt tot acht bit, maar bedraagt respectievelijk twaaf, tien en nog eens tien bit voor de accelerometer, gyroscoop en magnetometer.

Zendafstand

Door de versterker op de nodes te gebruiken in plaats van de zelf ontworpen zendbordjes kan de zendafstand van de bordjes vergroot worden tot 50 meter. Dit is een aanzienlijke



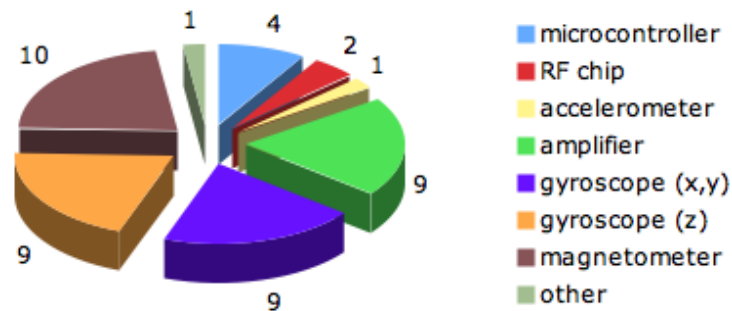
Figuur 8.24: Applicatie in Max/MSP.

verbetering ten opzichte van de tweede generatie. Het stroomverbruik gaat trouwens maar heel weinig omhoog (zie volgende paragraaf) door de versterker regelmatig in slaapmodus te zetten.

Stroomverbruik

Het totale stroomverbruik van de node bedraagt 45 mA. Het stroomverbruik van de verschillende componenten is weergegeven in figuur 8.25. Het is duidelijk dat de sensoren het meeste stroom verbruiken. Zonder de extra bewegingssensoren, en dus met dezelfde architectuur als in de tweede generatie, zou elke node slechts ongeveer 9 mA verbruiken.

RF chip Het is duidelijk dat de RF chip zeer weinig stroom verbruikt: slechts 2mA. Door het sterke optimaliseren van de firmware van de microcontroller is het mogelijk om de RF chip maar heel even aan te zetten. De microcontroller houdt via een interne klok de



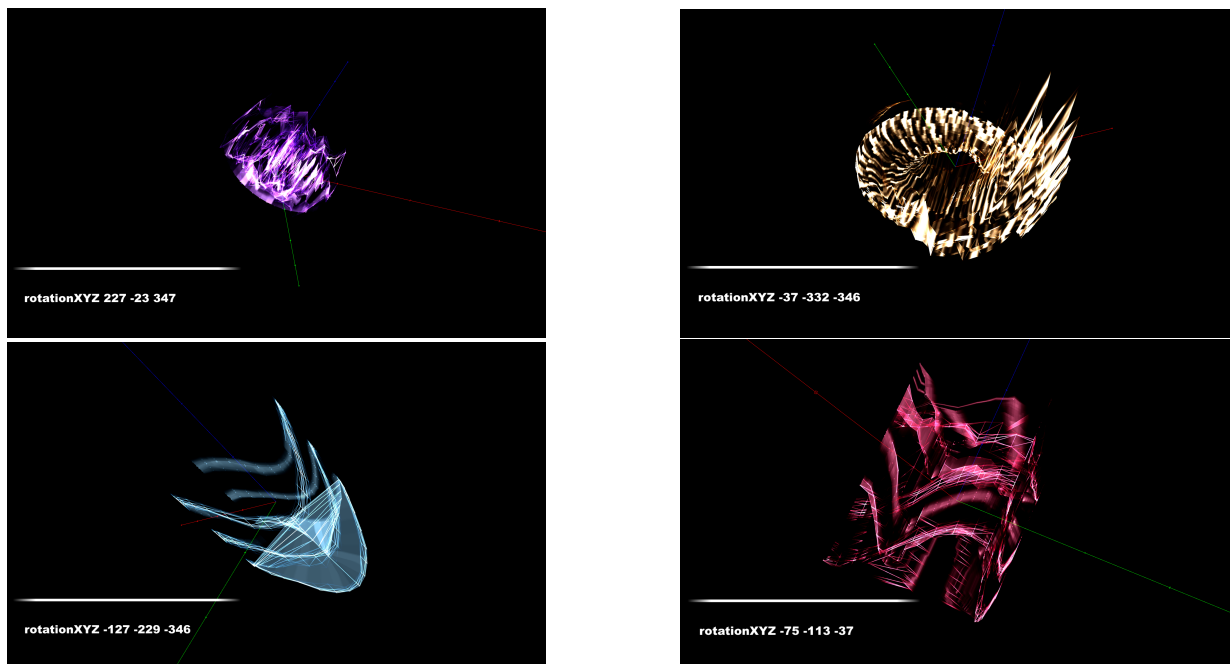
Figuur 8.25: Stroomverbruik bij derde generatie - uitgedrukt in mA.

tijd bij. Op het moment dat hij denkt een startsignaal te zullen ontvangen, schakelt hij de RF chip heel even in ontvangstmodus. De microcontroller zal direct na ontvangst van het startsignaal (of na een time-out) de RF chip in slaapmodus brengen. Na een vooropgesteld tijdsinterval (zie paragraaf 8.2) zal de microcontroller de chip in zendmodus schakelen. De gegevens worden verzonden en de RF chip wordt opnieuw in slaapmodus gezet.

Versterker Als het zelf ontworpen zendbord vervangen wordt door de versterker zal het stroomverbruik toenemen. Door de versterker enkel aan te schakelen als deze moet zenden is dit extra stroomverbruik beperkt tot 9 mA.

Microcontroller De microcontroller verbruikt 4 mA. Hier is nog enige optimalisatie mogelijk door de microcontroller in zijn dode tijd in slaapmodus te schakelen, en kan 2 mA gewonnen worden. Hier werd evenwel niet voor geopteerd, omdat deze dode tijd veel beter kan gebruikt worden om extra berekeningen uit te voeren om bijvoorbeeld het Kalman algoritme [23, 24] toe te passen op de binnengekomen signalen.

Sensoren De sensoren verbruiken het meeste stroom. De twee gyroscopen verbruiken elk 9 mA en de weerstanden in de magnetometer verbruiken 10 mA. De accelerometer verbruikt een stroom van 1 mA. De gyroscopen en de accelerometer hebben een opstarttijd van respectievelijk 20 ms en 9 ms en kunnen dus niet afgezet worden in de tijd dat ze niet uitgelezen worden. De magnetometerwaarden zijn echter het resultaat van een weerstandsmeting die quasi ogenblikkelijk kan gebeuren. Het stroomverbruik van de magnetometer kan dus nog veel naar beneden gehaald worden door de voeding naar de interne



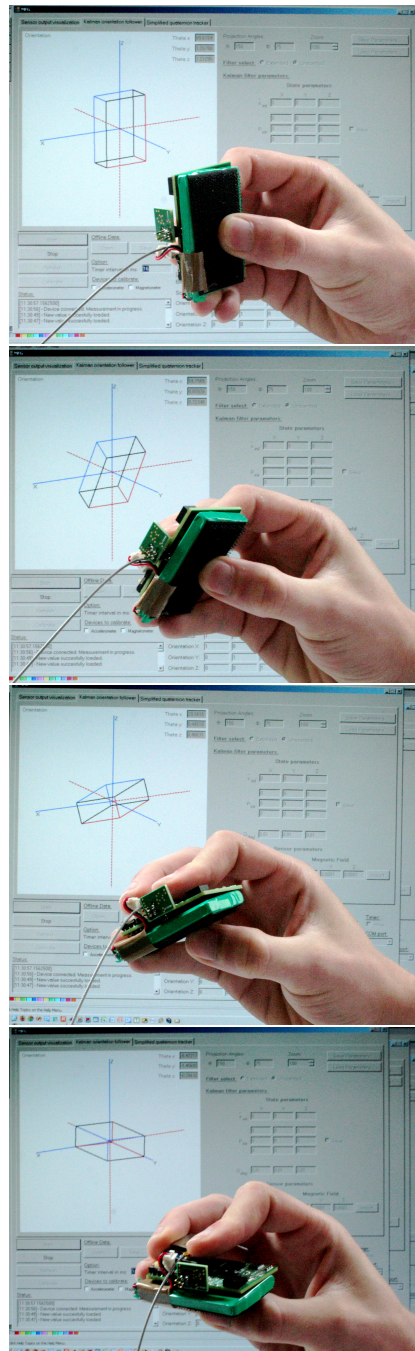
Figuur 8.26: Visualisatie in Max/MSP.

brug van Wheatstone enkel aan te schakelen op het moment dat de weerstanden gemeen worden. Op deze wijze zou het stroomverbruik van de magnetometer naar enkele μA terugschroefd kunnen worden.

Overige De overige componenten: de oplaadchip, de externe ADC, weerstanden... verbruiken bij benadering 1mA.

	nulde generatie	eerste generatie	tweede generatie	derde generatie
aantal nodes	2	2	10	15
zendafstand	12 meter	12 meter	7 meter	50 meter
samplerate	50 samples/s	100 samples/s	100 samples/s	100 samples/s
vaste samplerate	nee	ja	ja	ja
stroomverbruik	50 mA	70 mA	30 mA	45 mA
sensoren	accelerometer	accelerometer	accelerometer	accelerometer gyroscop magnetometer
uitbreiding meer nodes	nee	ja	ja	ja
zendsnelheid	16 kbit/s	16 kbit/s	256 kbit/s	256 kbit/s

Tabel 8.1: Prestaties derde generatie.



Figuur 8.27: Visualisatie Kalman filtering.

Hoofdstuk 9

Besluit

In deze scriptie werd een draadloos bewegingssysteem ontworpen. Via tussenontwerpen zijn we in een jaar tijd stap voor stap tot een compleet en werkend eindproduct gekomen dat volledig beantwoordt aan de opgelegde specificaties en deze zelfs overtreft (zie ook tabel 9.1):

- Naast een accelerometer bevat elke node nu ook gyroscopen en een drie-assige magnetometer. De waarden van deze sensoren worden met hoge resolutie uitgelezen. De node kan nu niet enkel acceleratie meten, zoals vooropgezet, maar is een volledig draadloze *inertial measurement unit*: het is mogelijk de absolute oriëntatie van elk nodebord te bepalen.
- Het aantal nodes die aan te sluiten zijn per basisstation is variabel en het maximum is in de laatste ontwerpen drastisch toegenomen tot 15, bijna het dubbele van wat vooropgesteld werd. Groepsexperimenten worden hierdoor gemakkelijk ondersteund.
- Door het gebruik van een versterker nam de zendafstand toe tot 50 meter en werd het sampleverlies beperkt gehouden
- Ondanks componenten als versterkers en bewegingssensoren die veel vermogen opslorpen, bleef het stroomverbruik beperkt tot 45 mA. Een oplaadbare LiPo batterij met een capaciteit van 1300 mAh levert hierdoor ongeveer 25 uur stroom per herlaadbeurt.

Het eindproduct is een gebruiksvriendelijk, betaalbaar en nauwkeurig meetsysteem:

- Een node vereist geen ingewikkelde procedures om aangeschakeld te worden: een eenvoudige klik op de schakelaar volstaat. Bij een ontvanger moet men enkel een

	specificaties	derde generatie
aantal nodes per ontvanger	>8	15
zendafstand	≈ 10 meter	50 meter
samplerate	100 samples/s	100 samples/s
vaste samplerate	ja	ja
batterijlevensduur	>6 uur	≈ 25 uur
sampleverlies	zo laag mogelijk	≈ 1 procent
accelerometer	± 6 g	± 6 g

Tabel 9.1: Verwachtingen en resultaten van het ontwerp.

AC/DC adapter en Ethernet kabel inpluggen. De gegevens worden op het lokale netwerk gebroadcast en zijn voor iedereen beschikbaar.

- Een interface werd ontwikkeld voor populaire signaalverwerkende programma's zoals Pure Data en Max/MSP. Als men met verschillende ontvangers wil werken is het enkel nodig deze aan te sluiten op het lokale netwerk, de interface zal de bijkomende ontvangers automatisch detecteren en de binnenkomende informatie combineren.
- De kostprijs per node ligt rond de 150 euro, terwijl vergelijkbare commerciële systemen gauw 600 tot 1000 euro kosten.
- De ruis op de meetwaarden van de sensoren is zelfs bij een resolutie van 10 bit niet detecteerbaar.
- Er kan eenvoudig tussen RF modules geschakeld worden zonder de firmware in de node aan te passen. De inplugbare versterker levert grote zendafstanden op. De module zonder versterker is geschikt voor kleinschalige experimenten en nog lager stroomverbruik.
- Door het geïntegreerde oplaadsysteem op elke node moet men enkel een AC/DC adapter op de node aansluiten om de batterij op te laden.

Wanneer de verschillende eigenschappen van het systeem vergeleken worden met bestaande systemen (tabel 9.2) kunnen we stellen dat ons ontwerp bijzonder goed scoort op zowel primaire als secundaire specificaties. Ons systeem zendt in tegenstelling tot de andere systemen aan een lagere datarate. Het uitzenden aan 256 kbit/s gebeurt via DSSS terwijl het uitzenden aan 1 Mbit/s gebeurt via GFSK. DSSS is veel minder gevoelig aan

interferentie dan GFSK en geniet daarom onze voorkeur. De chip laten uitzenden aan 1 Mbit/s zou ons toelaten het aantal nodes uit te breiden tot meer dan twintig, maar zou de zendafstand verkorten.

Uitbreidingen

Kalman Filtering Het systeem zou nog uitgebreid kunnen worden door Kalman filtering rechtstreeks op de node toe te passen. De microcontroller heeft nog 6 ms resterend in het na het uitlezen van de sensorwaarden en het afwerken van het TDMA protocol. Dit is ruim genoeg, rekening houdend met het feit dat de microcontroller slechts twee klokcycli nodig heeft voor een vermenigvuldiging en klokt aan een frequentie van 7 MHz.

GPS De sensoren kunnen met een GPS chip uitgebreid worden. Het uitgangssignaal kan dan via het Kalman algoritme gecombineerd worden met de waarden van de andere sensoren om niet enkel de oriëntatie, maar ook de locatie van de node af te leiden. Er bestaan chips met afmetingen van een centimeter op een centimeter die een nauwkeurigheid van twee meter garanderen [34]. Een GPS verbruikt ongeveer 20mA, heeft weinig randcomponenten nodig en kan via SPI of I^2C uitgelezen worden, wat het realistisch maakt deze chip te integreren.

	GF	WSP	Celeritas	Senseable	derde generatie
aantal nodes	1	4	8	20	15
zendafstand	7 meter	7 meter	7 meter	7 meter	50 meter
samples/s	200	NA	< 72	100	100
vaste samplerate	NA	ja	nee	ja	ja
stroomverbruik	40 mA	50 mA	NA	65 mA	45 mA
accelerometer	±3 g	±3 g	±2 g	±1,7g	±6 g
zendsnelheid	256 kbit/s	1 Mbit/s	1 Mbit/s	1 Mbit/s	256 kbit/s
sensoren	acc (3D) ¹ gyr (2D) ²	acc (3D) gyr (1D)	acc (3D) gyr (3D) mag (3D) ³	acc (3D) gyr (3D)	acc (3D) gyr (3D) mag (3D)
oplaadcircuit	nee	nee	nee	nee	ja
vrijheidsgraden	5	4	6	6	6
afmetingen [cm^3]	3,8x2,7x1,1	4,5x2x2	5x2,5x2,5	4x4x2	5x3x1,5
gewicht [g]	NA	NA	30 g	45 g	37 g
zendvermogen	0 dBm	0 dBm	0 dBm	0 dBm	20 dBm
sensitiviteit	- 92 dBm	- 93 dBm	- 93 dBm	- 93 dBm	- 93 dBm
oplaadsysteem	nee	nee	nee	nee	ja

Tabel 9.2: Vergelijking bestaande systemen met eindontwerp.

¹ acc: accelerometer

² gyr: gyroscoop

³ mag: magnetometer

Bijlage A

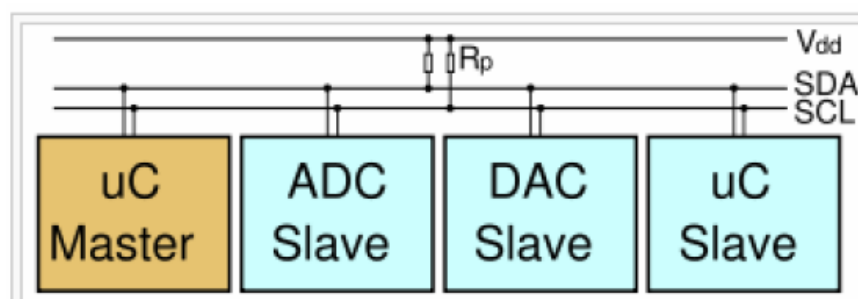
Communicatie tussen de verschillende componenten

A.1 Communicatie op de node

A.1.1 Communicatie tussen microcontroller en accelerometer: I^2C

Het I^2C protocol

Het I^2C protocol is een busprotocol. De bus bestaat uit vier lijnen: massa, voeding, een kloklijn (SCL) en een datalijn (SDA). Op een bus zijn een master en verschillende slaves aangesloten. De master is in ons geval de Atmel microcontroller (ATMega168V) en de slave de accelerometer (LIS3LV02DQ). De master controleert de kloklijn, de slaves kunnen enkel luisteren naar deze lijn.



Figuur A.1: De vier lijnen van de I^2C bus die de master verbindt met de verschillende slaves.

De I^2C componenten op de bus hebben een 7 bit adres, wat het aantal componenten op de bus limiteert tot 128. Als de master wil communiceren met de I^2C slaves zal die een startbit verzenden.

Het I^2C protocol en de accelerometer

Het I^2C protocol wordt in het ontwerp gebruikt om de verschillende registers te lezen of te overschrijven in de accelerometer. Op deze manier is het mogelijk om de acceleratie te achterhalen en kunnen bepaalde instellingen van de accelerometer worden veranderd.

Het schema om een register uit te lezen is weergegeven in figuur A.2. Als eerste stap zal de master (de microcontroller) een startconditie genereren op de bus. Aangezien het I^2C protocol een busprotocol is, is het nodig om het adres van de component die men wil uitlezen aan te leggen. De microcontroller legt dan ook het 7 bit adres (SAD) van de accelerometer aan op de bus. Dit adres wordt aangevuld met een één om aan te tonen dat een schrijfoperatie volgt (het registeradres van het register dat we willen lezen wordt geschreven naar de accelerometer). De accelerometer zal bij het ontvangen van zijn adres reageren met een slave acknowledgement (SAK). Hierna legt de microcontroller het adres van het register (SUB) aan die het wil lezen. De accelerometer bevestigt ontvangst met een SAK. De microcontroller moet nu een repeated start (SR) aanleggen gevolgd door het adres van de slave component. Dit adres wordt aangevuld met een nul om aan te tonen dat het om een leesoperatie gaat. De accelerometer bevestigt met een SAK en stuurt vervolgens de data. De microcontroller stuurt een master acknowledgement (MAK) bij correcte ontvangst van de data. De microcontroller stuurt een stop conditie (SP) waaruit de slave afleidt dat de transactie afgelopen is.

Master	ST	SAD + W		SUB		SR	SAD + R			NMAK	SP
Slave			SAK		SAK			SAK	DATA		

Figuur A.2: Het uitlezen van een register van de accelerometer via I^2C .

Het schema om een byte in een register van de accelerometer te schrijven is weergegeven in figuur A.3. Als eerste stap zal de master (de microcontroller) een startconditie genereren op de bus. De microcontroller legt dan het 7 bit adres van de accelerometer aan op de bus. Dit adres wordt aangevuld met een één om aan te tonen dat een schrijfoperatie

volgt (het registeradres van het register dat we willen schrijven wordt geschreven naar de accelerometer). De accelerometer zal bij het ontvangen van zijn adres reageren met een slave acknowledgement (SAK). Hierna legt deze het adres van het register (SUB) aan die het wil schrijven. De accelerometer bevestigt ontvangst met een SAK. De microcontroller blijft schrijven naar de accelerometer en een repeated start is dus onnodig. De microcontroller legt de data aan die moet worden geschreven in het register. De accelerometer bevestigt met een SAK. De microcontroller stuurt een stop conditie (SP) waaruit de slave afleidt dat de transactie afgelopen is.

Master	ST	SAD + W		SUB		DATA		SP
Slave			SAK		SAK		SAK	

Figuur A.3: Het schrijven van een register van de accelerometer via I^2C .

Het I^2C protocol en de microcontroller: de Two-Wire-module (TWI-Module)

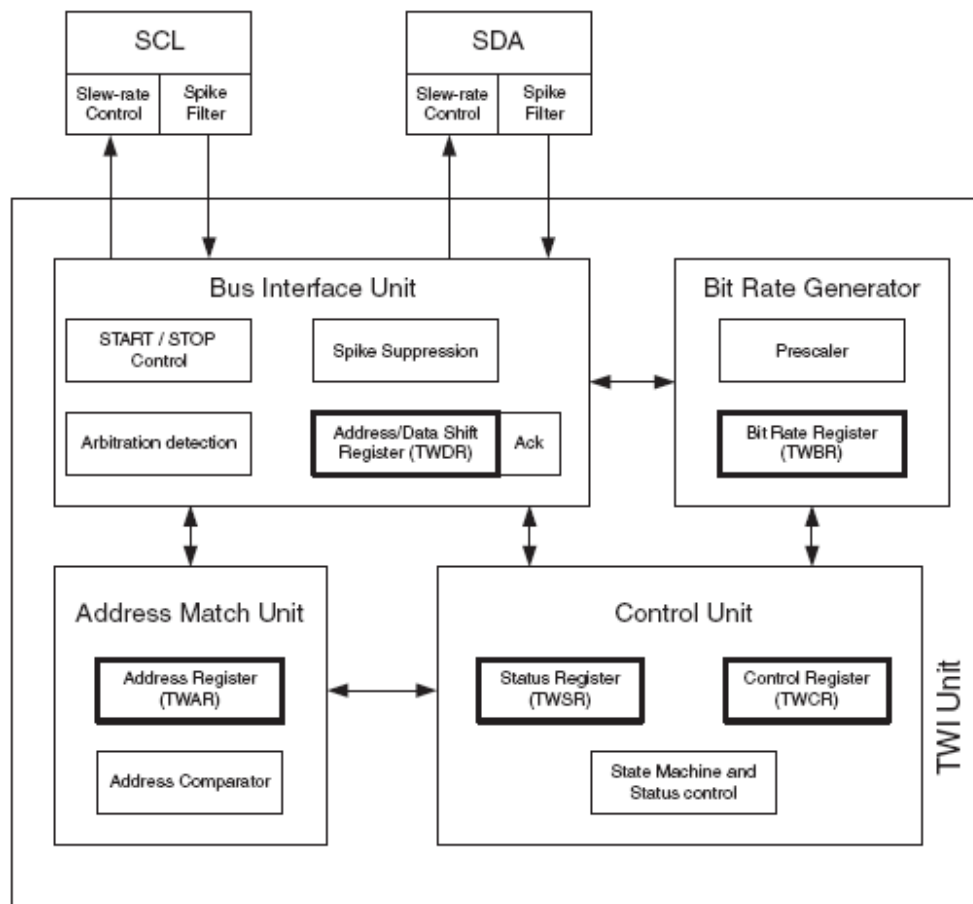
De TWI module is weergegeven in figuur A.4. De module bestaat uit vier delen: De Bus Interface Unit, een Bit Generator, een Address Match Unit en een Control Unit. De verschillende units hebben elk hun specifieke registers. Hieronder wordt dieper ingegaan op de verschillende registers.

Bit Generator Unit Deze unit controleert de klokfrequentie van de klok op de SCL lijn. De klokfrequentie van de SCL lijn wordt bepaald door de registers TWI Bit Rate Register (TWBR) en TWI Status Register (TWSR) en dit op de volgende wijze:

$$SCL_{klokfrequentie} = \frac{kristalklokfrequentie}{16+2*TWBR*prescalervalue}$$

De prescaler value wordt bepaald in TWSR en kan de waarde 1, 4, 16 of 64 aannemen. Het TWBR register is een register van 8 bits en kan elke waarde aannemen

Bus Interface Unit De unit heeft een TWI Data and Adress register (TWDR) en een Start/Stop controller. Het TWDR is een 8 bit register en bevat de data die verstuurd of ontvangen wordt over de SDA lijn. Dit kan het adres zijn van een I^2C component, een ontvangen byte of een subadres van de accelerometer. De unit zal ook automatisch een AK



Figuur A.4: Schematische weergave van de TWI module

of een NAK genereren. Dit gebeurt volledig automatisch, maar het resultaat (bv er is een NAK verstuurd) is te zien in het TWSR register (Zie hiervoor de uitleg van het TWSR register bij de control unit). De Start/Stop controller genereert de start/stop condities van het I^2C protocol.

Address Match Unit Deze unit heeft enkel een functie als de microcontroller een slave is op de I^2C bus. Dit is in deze scriptie niet van belang omdat de microcontroller de functie van een master heeft op de bus.

Control Unit Deze unit is het controleorgaan van de TWI module. De controle volgt uit de instellingen in het TWI Control Register (TWCR). De unit rapporteert de gebeurte-

nissen, zoals het ontvangen of versturen van een byte op de bus in het TWI Status Register (TWSR). Telkens het TWSR register wordt geupdated wordt de TWI Interrupt Flag bit in het TWCR register hoog gezet. Door het monitoren van deze bit kan men zien of er zich een gebeurtenis op de bus voordoet. Het TWCR register bestaat uit acht bits die allen kunnen gelezen of geschreven worden (op bit 1 na). Dit is weergegeven in figuur A.5. De TWINT bit is de genoemde interrupt bit, de TWI Enable Acknowledge Bit (TWEA bit) moet op één staan, zodanig dat telkens het moet een ACK wordt verstuurd, de TWI Start Condition Bit (TWSTA) of TWI Stop Condition Bit (TWSTO) op één zetten heeft als gevolg dat er respectievelijk een start conditie of een stop conditie wordt verzonden door de microcontroller. De TWI Write Collision Flag (TWWC) verraadt een botsing, de TWI Enable Bit (TWEN) moet op één gezet worden als men de TWI-module wil activeren. De laatste bit, de TWIE bit behandelt interrupts die gegenereerd worden als de microcontroller als slave op de bus is aangesloten.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	TWINT	TWEA	TWSTA	TWSTO	TWWC	TWEN	-	TWIE	TWCR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R/W	R	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figuur A.5: Het TWCR register.

Het TWSR register is te zien in figuur A.6. De vijf meest significante bits verwijzen naar de status van de TWI-module op het huidige moment. Voor de verschillende statussen waarin de TWI-module zich kan bevinden en de respectievelijke combinaties van bits in het TWSR register wordt verwezen naar [?]. De twee minst significante bits bepalen de prescaler value van de SCL klok. In figuur A.7 zijn de verschillende prescaler waarden weergegeven met hun overeenkomstige bitinstellingen in het TWSR register.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	TWS7	TWS6	TWS5	TWS4	TWS3	-	TWPS1	TWPS0	TWSR
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R/W	R/W	
Initial Value	1	1	1	1	1	0	0	0	

Figuur A.6: Het TWSR register.

TWPS1	TWPS0	Prescaler Value
0	0	1
0	1	4
1	0	16
1	1	64

Figuur A.7: De prescaler waarden overeenkomstig aan de bitinstellingen in het TWSR register.

A.1.2 Een implementatie in C van het I^2C protocol op de microcontroller

Om het voorgaande te verduidelijken wordt hier een stuk code in C uitgelegd. De code zal de microcontroller een register in de accelerometer laten overschrijven. Het is zo dat de accelerometer naast de vele andere registers een speciaal controleregister heeft. Dit controleregister heet *CTRLREG2* en heeft als subadres 20h. Als de microcontroller hierin de byte 80h wegschrijft zal de accelerometer werken met een bereik van 6g. Schrijft de microcontroller in het register 00h dan zal de accelerometer met een bereik van 2g werken. In dit stukje code dat te zien is zal de waarde 80h worden weggeschreven in het *CTRLREG2* register.

```

TWCR = (1<<TWINT) | (1<<TWSTA) | (1<<TWEN); // zend startconditie
loop_until_bit_is_set(TWCR, TWINT); // wacht todat uitgevoerd is

TWDR = 0x3A; // zend i2c adres met r/w bit 1
TWCR = (1<<TWINT) | (1<<TWEN); // start zenden
loop_until_bit_is_set(TWCR, TWINT); // wacht todat uitgevoerd is

TWDR = 0x21; // zend subadres
TWCR = (1<<TWINT) | (1<<TWEN); // start zenden
loop_until_bit_is_set(TWCR, TWINT); // wacht todat uitgevoerd is

TWDR = 0x80; // zend data
TWCR = (1<<TWINT) | (1<<TWEN); // start zenden
loop_until_bit_is_set(TWCR, TWINT); // wacht todat uitgevoerd is

TWCR = (1<<TWINT) | (1<<TWSTO) | (1<<TWEN); // zend stopconditie

```

Figuur A.8: Een stuk voorbeeldcode die het I^2C protocol verduidelijkt.

Als eerste opmerking moet gezegd worden dat TWINT en TWSTA gehele getallen zijn tussen nul en zeven. Ze hebben de waarde van de bitpositie van de respectievelijke bit.

In eerste instantie (zie ook het I^2C protocol en de accelerometer en figuur A.3) wordt een startconditie verstuurd door de microcontroller. Hiervoor wordt de interrupt bit in het TWI controle register op één gezet. De TWI module moet natuurlijk ook geactiveerd worden, daarom wordt de TWEN bit op één gezet en om de TWI module een start conditie te laten versturen wordt de TWSTA bit ook op één gezet. De microcontroller wacht nu op het op nul komen van de interruptbit TWINT. Als deze op nul komt betekent dit dat de startconditie is verzonden. Het volgende dat de microcontroller doet, is de data die verstuurd moet worden in het TWI Data Register (TWDR) steken. Deze data is natuurlijk het I^2C adres van de accelerometer aangevuld met een één (het gaat om een schrijfoperatie). De TWINT bit wordt weer op één gezet en de TWI module wordt geactiveerd. De microcontroller zal dan opnieuw wachten totdat de data is verstuurd en SAK ontvangen is (wachten totdat de interrupt vlag weer nul is). Op dezelfde wijze wordt dan het subadres verstuurd om vervolgens de data die in het controle register moet komen te versturen. In laatste instantie wordt een stopconditie verstuurd door de TWSTO bit op één te brengen in het TWI controle register.

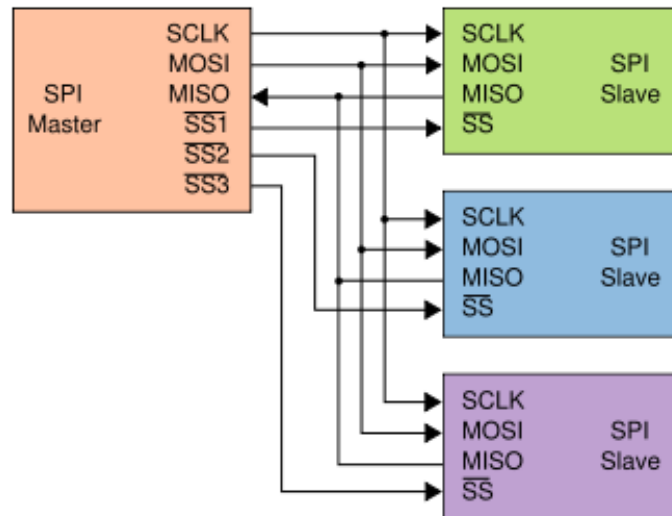
A.1.3 Communicatie tussen microcontroller en de RF chip: SPI

Het SPI protocol

Het Serial Peripheral Interface Bus (SPI) protocol is eveneens een busprotocol. De bus bestaat uit vier lijnen de Master Output Slave Input (MOSI) lijn, de Master Input Slave Output (MISO) lijn, de kloklijn (Serial Clock: SCLK) en de Slave Select (SS) lijn. Op een bus zijn een master en verschillende slaves aangesloten. De master is in ons geval de microcontroller (ATMega168) en de slave is de RF chip (CYWUSB6935). Dit is weergegeven op figuur A.9. De master controleert de klok zoals bij het I^2C protocol. De slaves op de SPI bus hebben geen adres, de master kan elke slave afzonderlijk adresseren door de SS lijn van die slave laag te brengen.

Het SPI protocol en de RF chip

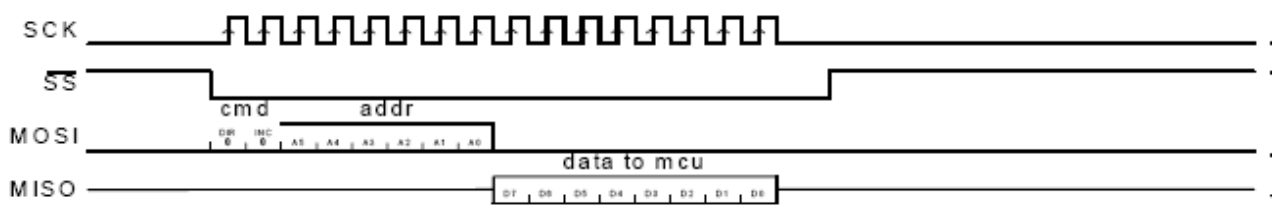
Het SPI protocol wordt gebruikt om de verschillende registers in de RF chip te lezen of te overschrijven. De data die de RF chip draadloos ontvangt kan zo bij de microcon-



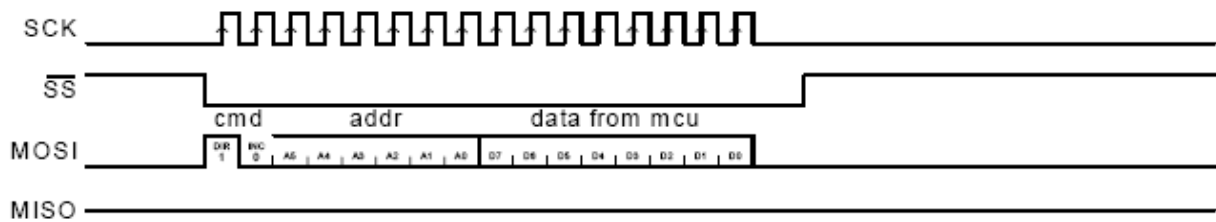
Figuur A.9: De master en een aantal slaves op een SPI bus.

troller komen en bepaalde instellingen, zoals de datarate van de RF chip kunnen worden aangepast.

Het SPI protocol is eenvoudiger dan het I^2C protocol omdat het meer datalijnen heeft. In figuur A.10 is een leesoperatie te zien van een register van de RF chip. Als de master op de bus een register wil uitlezen zal deze in eerste instantie de SS lijn laag brengen. Vervolgens zal deze de klok op de SCLK lijn brengen. Dan zal deze een datapakket op de MOSI lijn aanbrengen. Dit pakket bestaat uit 8 bits, waarvan de meest significante (DIR) vertelt aan de slave dat het wil schrijven of lezen. De overige bits buiten een bit die gebruikt wordt bij burst leesoperaties, coderen het adres van het register dat uitgelezen wordt. De DIR bit is hoog waardoor de RF chip weet dat het om een leesoperatie gaat en zendt als antwoord de 8 bit registerinhoud naar de microcontroller. Een schrijfoperatie verloopt zeer analoog en is te zien in figuur A.11.



Figuur A.10: Een leesoperatie op een SPI bus.



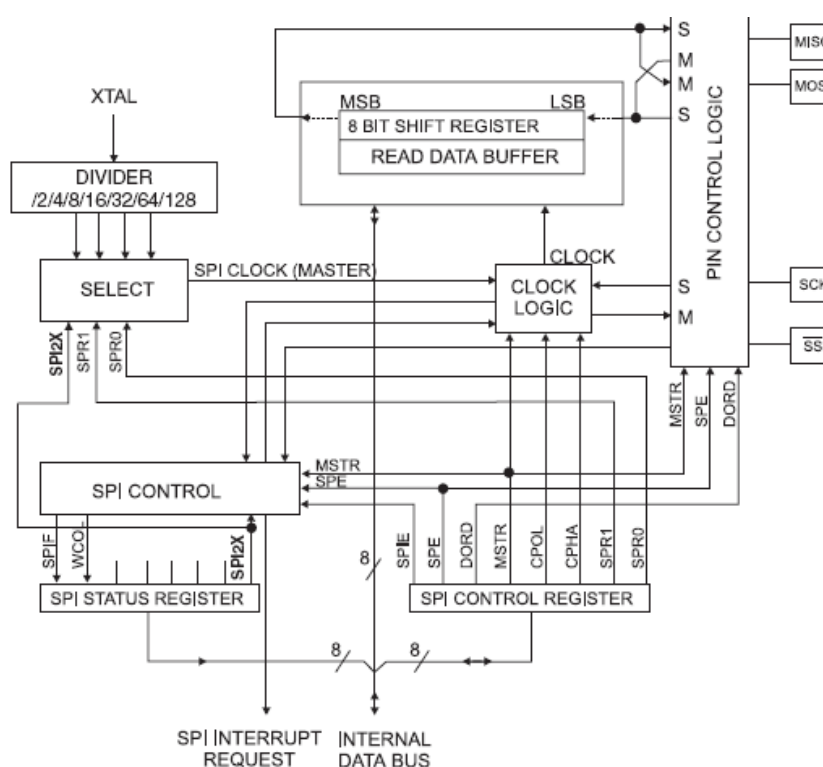
Figuur A.11: Een leesoperatie op een SPI bus.

Het SPI protocol en de microcontroller

De microcontroller heeft een speciale SPI module die de verschillende SPI operaties automatisch uitvoert. De module is schematisch weergegeven in figuur A.12. De microcontroller kan ingesteld worden als een slave of een master op de bus. Voor de toepassing is het enkel interessant om te zien hoe de microcontroller werkt als slave op de bus. Als de microcontroller als master is ingesteld zal deze het kloksignaal op de bus genereren. Dit kloksignaal wordt afgeleid van het extern kristal. Verder heeft de module nog een controleregister (SPCR), statusregister (SPSR) en een databuffer (SPDR). De databuffer houdt de te verzenden of ontvangen informatie bij. Het eerste wat wordt gedaan is de SS lijn laag brengen, zo weet de slave dat er zal worden gecommuniceerd met hem over de SPI lijn. Als er nu een byte wordt weggeschreven in het SPDR register zal de module de klok aanleggen op de SCLK lijn en zal de verschillende bits via een shift register versturen over de MOSI lijn. Na de transmissie zal de SPI module de klok stoppen en de End Of Transmission FLAG (SPIF) bit hoog zetten in het SPSR register.

A.1.4 Een implementatie in C van het SPI protocol op de microcontroller

Zoals bij I^2C wordt hier een stuk code in C gebruikt om het SPI protocol en de implementatie ervan op de microcontroller te verduidelijken. De RF chip heeft verscheidene registers waarmee tal van instellingen kunnen worden ingesteld. De waarde van het CHANNEL register van de RF chip bepaalt op welke frequentie de chip zal uitzenden. Het uitvoeren van onderstaande C code zal als resultaat hebben dat het CHANNEL register wordt overschreven. Het eerste wat gebeurt is de chip select lijn laag brengen. Vervolgens wordt het register adres in het dataregister geschreven, de meest significante bit wordt evenwel



Figuur A.12: Een schematische weergave van de SPI module van de microcontroller.

op één gezet om te tonen dat het om een schrijfoperatie gaat. De microcontroller zal dan wachten totdat de SPIF op één komt te staan. Als deze vlag op één komt zal het registeradres verstuurd zijn. Daarna wordt het register van de RF chip overschreven door het verzenden van de variable nieuwKanaal. Als laatste stap zal de microcontroller de SS lijn hoog brengen. De transactie is voltooid.

A.2 Communicatie op het basisstation: eerste en tweede generatie

A.2.1 Communicatie tussen microcontroller en computer: UART en USB

De communicatie tussen de computer en het basisstation gebeurt via een USB kabel. Op het basisstation bevindt zich een CP2102 USB to UART chip van Silicon Labs. De microcontroller verstuurt via het UART protocol de informatie naar de CP2102 chip. Deze


```

low(PORTB, CYWM_nSS);           //chip select laag
SPDR = 0x80 | 0x20             //stuur registeradres
while(!(SPSR & (1<<SPIF)));    //wacht totdat SPIF bit hoog is
SPDR = nieuwKanaal;           //stuur nieuwe waarde kanaal
while(!(SPSR & (1<<SPIF)));    //wacht totdat SPIF bit hoog is
high(PORTB, CYWM_nSS);        //chip select hoog

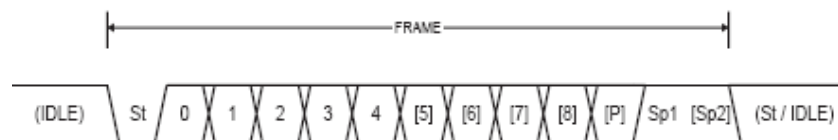
```

Figuur A.13: Een stuk voorbeeldcode die het SPI protocol verduidelijkt.

component zal de gegevens dan via USB versturen naar de computer. Op de computer is het voldoende een driver van Silicon te installeren. Als de CP2102 chip verbonden wordt met de computer via een USB kabel zal er een virtuele compoort worden aangemaakt die gemakkelijk kan uitgelezen worden via een terminalprogramma zoals hyperterm. Er zal hier niet worden ingegaan op het USB protocol, maar wel op het UART protocol.

Het UART protocol

In tegenstelling tot de voorgaande protocollen is het UART protocol geen busprotocol. Het is een protocol tussen een master en een receiver die twee lijnen nodig heeft, een RX en een TX lijn. Het protocol ondersteunt full duplex operatie, het is dus mogelijk om tegelijkertijd gegevens te ontvangen en te verzenden. Deze gegevens worden in een frame gegoten. Op figuur A.14 is zo een frame weergegeven. Een Frame begint met een start bit. De start bit is altijd laag. Vervolgens kunnen er 5 tot 8 bits worden verzonden, eventueel stuurt men hierna een pariteitsbit. Het frame wordt afgesloten met één of twee stopbits (altijd hoog). De lijn is dan weer IDLE, de lijn is dus hoog.



Figuur A.14: Een frame zoals in het UART protocol gebruikt.

Het UART protocol en de microcontroller

De microcontroller heeft een UART module. Dit hardware gedeelte voert het grootste deel van het protocol zelfstandig uit net zoals bij de TWI module en de SPI module. De UART

module wordt gecontroleerd door een aantal 8 bit registers. Het eerste register is het I/O DATA register (UBR). Gegevens die hier naartoe worden geschreven, zullen naar de TX lijn gestuurd worden, als men uit het register leest zal de RX lijn worden gelezen. Het tweede register is het Control en Status Register A (UBSR1A). Deze is weergegeven in figuur A.15.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	RXCn	TXCn	UDREn	FEn	DORn	UPEn	U2Xn	MPCMn	UCSRnA
Read/Write	R	R/W	R	R	R	R	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	1	0	0	0	0	0	

Figuur A.15: Het Status en Controleregister A

De belangrijkste bits zijn de meest significante en tweede meest significante bit. Deze worden op één gebracht door de module als de module een goed pakket heeft ontvangen of verzonden. De bits vijf tot twee worden op één gezet bij het optreden van verschillende errors (bv frame error en parity check error). De module heeft nog twee extra controle registers namelijk controleregisters B en C. Controleregister B is weergegeven in figuur A.16 en controleregister C is weergegeven in figuur A.17. De twee hoogste bits in het controleregister B schakelen de interrupt aan voor respectievelijk het ontvangen van een pakket of het versturen van een pakket. Bit vier en drie zetten respectievelijk het ontvangstdeel en het zenddeel van de UART module aan, de pinnen PD0 en PD1 krijgen zo hun specifieke functie als RX en TX lijn. Bit twee uit controle register B bepaalt samen met bit twee uit controle register C het aantal bits in een frame. De twee minst significante bits hebben enkel een functie als men beslist om frames met negen bits te gebruiken.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	RXCIEn	TXCIEn	UDRIEn	RXENn	TXENn	UCSZn2	RXB8n	TXB8n	UCSRnB
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figuur A.16: Het Status en Controleregister B

Het derde controleregister bepaalt in grote mate welk soort UART men gaat gebruiken en hoe de verschillende frames eruit zien. Zo bepalen de twee meest significante bits van het derde controleregister, welke soort UART protocol men wil gebruiken (synchroon of asynchroon). Bits vijf en vier bepalen de pariteitsbit, moet er één zijn en zo ja heeft deze

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	<div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 5px;"> UMSELn1 UMSELn0 UPMn1 UPMn0 USBSn UCSZn1 UCSZn0 UCPOLn </div>							UCSRnC	
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	1	1	0	

Figuur A.17: Het Status en Controleregister C

een even of een oneven pariteit. Bit drie bepaalt het aantal stopbits (één of twee). De minst significante bits bepalen grotendeels hoeveel bits een frame zal bevatten. Het laatste register is het Baud Rate register, dit register bepaalt de snelheid van gegevensoverdracht. Het verband tussen de Baudrate en de waarde van het UBRR register zijn de volgende

$$BAUD = \frac{\text{kristalklok frequentie}}{8(UBRR+1)}$$

$$UBRR = \frac{\text{kristalklok frequentie}}{8(BAUD)} - 1$$

Een implementatie van het UART protocol in C op de microcontroller

Het voorgaande zal nu verduidelijkt worden aan de hand van een stukje voorbeeldcode. Het stukje code is te zien in figuur A.18. Het implementeert het verzenden van acht bits die in de variabele data zitten. In eerste instantie wordt de UART module geïntialiseerd door de baudrate van het protocol in te stellen. Het zend- en ontvangstdeel wordt geactiveerd waarna de frame wordt gedefinieerd (lengte, pariteitsbit,..). Het volgende dat gedaan wordt is kijken of de zendbuffer leeg is en indien dit niet het geval is, wordt er gewacht. Het laatste dat gedaan wordt is de data expliciet versturen door ze in het UDR register weg te schrijven.

A.3 Communicatie op het basisstation: derde generatie

A.3.1 Communicatie tussen het basisstation en de computer: User Datagram Protocol via Ethernet

Het bleek na experimenteren met de tweede generatie nodig om meerdere ontvangers te hebben. Deze moeten elk hun informatie doorsturen naar de computer. Dit is het eenvoudigst te realiseren door elk basisstation te voorzien van een Ethernet controller (ENC28J60). De controller is een stand-alone chip, het implementeert de fysische en datalink van het

```

//ubrr is een 16 bit variabele
U16 ubrr;
//ubrr wordt correct geïntialiseerd
ubrr = (U16)((fOSC / (8.0 * BAUDRATE)) - 1.0 );
UBRR1H = (U8)(ubrr>>8);
UBRR1L = (U8)ubrr;
//Receive interrupt bit wordt aangezet en ontvangmodule
//en zendmodule worden geactiveerd
UCSRB = (1<<RXCIE) | (1<<RXEN) | (1<<TXEN);
//frame bestaat uit 8 bits, geen parity bit en 1 stopbit
UCSRC = (1<<URSEL)|(0<<USBS)|(3<<UCSZ0);
// wacht tot empty buffer vlag wordt gezet
while (!(UCSR1A & (1<<UDRE)));
// schrijf de data naar buffer, dit activeert ook het zenden
UDR = data;

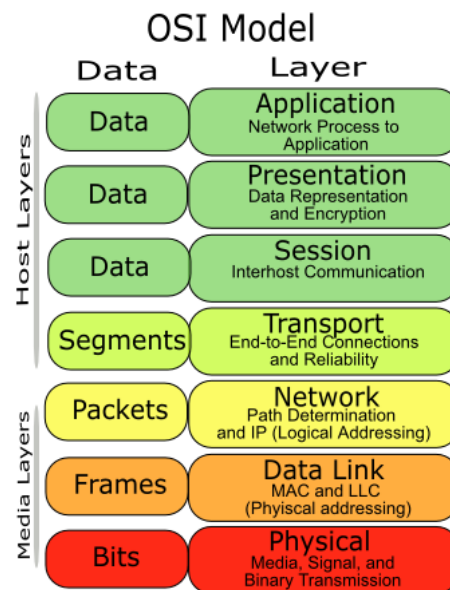
```

Figuur A.18: Een stuk voorbeeldcode die het verzenden van één byte illustreert

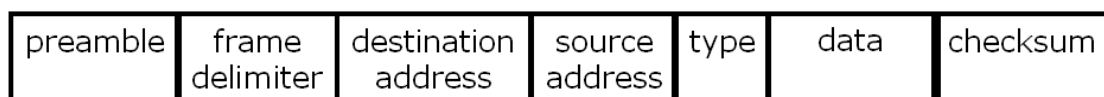
OSI model (figuur A.19). De controller kan communiceren met de microcontroller via het SPI protocol. Dit protocol is uitgelegd in A.1.3, en zal hier dan ook niet verder uitgelegd worden.

De controller laat ons toe IP pakketten te versturen op de netwerklaag, waarbij niet naar de implementatie op datalinklaag en fysieke laag moet gekeken worden (preamble, collisions opvangen etc). Om dit te implementeren zal de microcontroller een IP pakket aanmaken met de nodige informatie. Dit pakket wordt naar de Ethernet controller verstuurd worden via de SPI lijnen. Door de inherente implementatie van het Ethernet protocol op de controller zal dit pakket op de juiste wijze verstuurd worden over het netwerk. Om zo een pakket samen te stellen is het nodig om pakketten op de verschillende lagen van het OSI model te bestuderen.

Een pakket op de datalinklaag is in dit geval een Ethernet frame (zie Figuur nr A.20). Een frame start met een preamble en Frame Delimiter en eindigt met een Cycle Redundancy Check (CRC). Aangezien de Ethernet controller de datalinklaag implementeert is deze in staat deze zelfstandig te genereren zonder tussenkomst van de microcontroller. Na de Frame Delimiter komen de zes bytes die het Mac adres van de ontvanger bevatten. In deze deze scriptie zullen broadcast pakketten verzonden worden over het netwerk. Dit betekent dat het MAC bestemmingsadres FF-FF-FF-FF-FF-FF zal zijn. Het MAC bronadres zal het MAC adres zijn van het betreffende basisstation. Het type veld bevat twee bytes die vertellen welk soort data wordt getransporteerd door het Ethernet Frame. Het Ethernet Frame zal in deze scriptie altijd een IP pakket transporteren, de waarde van dit veld is dan ook (HEX) 0008. Na dit veld volgt de data die het ethernet Frame zal transporteren. Dit is in dit geval een IP pakket.



Figuur A.19: De verschillende lagen in het OSI Model



Figuur A.20: De structuur van een Ethernet Frame

Een pakket op de netwerklaag wordt een Datagram (zie figuur A.21) genoemd. Zo een Datagram wordt ingekapseld in een Frame op de datalinklaag. Het eerste veld vertelt de ontvanger welke versie wordt gebruikt. In de scriptie zal altijd IPv4 worden gebruikt. Dit veld bevat dan ook steeds de waarde 4. Het volgende veld bevat de lengte van de IP Header in woorden uitgedrukt. De Header bevat geen opties en zal daarom steeds de waarde 5 bevatten. Het volgende veld is de Datagramlengte en dit is de lengte van het hele Datagram. De drie volgende velden dienen om om te gaan met fragmentatie (het opsplitsen van een IP Datagram en het in verschillende Ethernet Framen stoppen). Om problemen te vermijden zal het vlaggen veld de waarde 04 krijgen, hierdoor zal het IP pakket nooit worden opgesplitst. Het volgende veld is de Time To Live, dit wordt ingesteld op 64. De IP Datagrammen zullen steeds een UDP segment transporteren, de waarde van dit veld is dan ook 17 wat de code is voor UDP segmenten. Het volgend veld is de Headerchecksum, deze wordt door de microcontroller berekend en correct ingevuld. De laatste twee velden bevatten het IP adres van de bron (basisstation) en de ontvanger

(multicast adres bv 192.168.255.255). Daarna volgen de gegevens, in deze scriptie zal dat een UDP Segment zijn.

4-bit Version	4-bit Header length	ToS	Total length of packet	
Identification			Flags	Fragment offset
TTL	protocol		Header	Checksum
Source IP address				
Destination IP address				
Options (if any)				
Data				

Figuur A.21: De structuur van een IP Datagram

Een pakket op de transportlaag wordt een Segment (zie Figuur A.22) genoemd. Zo een Segment wordt ingekapseld in een Datagram op de Datalinklaag. Een segment op de transportlaag kan naar verschillende poorten van een computer worden verstuurd. Het is dan ook nodig om twee velden in de UDP Header te voorzien voor het bronpoortnummer en het bestemmingspoortnummer. Verder zijn ook velden voorzien voor de lengte van de header en een checksum. Het segment eindigt met de eigenlijke dat die moet worden verstuurd.

Bronpoort	Bestem. Poort
Lengte	checksum
data	

Figuur A.22: De structuur van een UDP Segment

Een implementatie van het UDP protocol in C op de microcontroller

In figuur A.23 en A.24 wordt het aanmaken en verzenden van een pakket geïllustreerd. In figuur A.23 wordt het pakket aangemaakt en in de variabele buf gestoken. Het is duidelijk te zien hoe achtereenvolgens een Frame, Datagram en een Segment worden aangemaakt. De checksums van de verschillende header worden berekend met hiervoor geschreven functies. In de laatste regels is duidelijk te zien hoe de data wordt toegevoegd aan het UDP segment

In figuur A.24 is het eigenlijke versturen van een UDP pakket te zien. In eerste instantie wordt verteld aan de Ethernet module, waar de data die we straks naar de module sturen in het geheugen komt. Daarvoor wordt het EWRPT (Ethernet Write Pointer) register ingesteld op de waarde *TXSTARTINIT*. Het is ook nodig om de module te zeggen welk deel van het geheugen moet worden verstuurd over het netwerk. Dit wordt gedaan door de registers ETXST (Ethernet Start Pointer) en ETXND (Ethernet End Pointer) in te stellen op de waarde *TXSTARTINIT* en *TXSTARTINIT* + lengte buffer. Hierna wordt via SPI de buffer in het geheugen van de microcontroller geschreven om dan een signaal te geven aan de module dat de data mag verstuurd worden.

```

uint8_t i=0;
uint16_t ck;
//Ethernet
//-----
while(i<6){
    buf[ETH_DST_MAC +i]=0xFF;           //broadcast
    buf[ETH_SRC_MAC +i]=macaddr[i];
    i++;
}
buf[ETH_TYPE_H_P]=ETHTYPE_IP_H_V;
buf[ETH_TYPE_L_P]=ETHTYPE_IP_L_V;
//IP
//-----
buf[IP_P]= 0x45; //versie 4 Header lengte 5
buf[IP_TOTLEN_H_P]=0;
buf[IP_TOTLEN_L_P]=IP_HEADER_LEN+UDP_HEADER_LEN+datalen;
buf[IP_FLAGS_P]=0x40; // niet fragmenteren
buf[IP_FLAGS_P+1]=0; // Fragment offset
buf[IP_TTL_P]=64; //ttl
buf[IP_PROTO_P] = IP_PROTO_UDP_V;
buf[IP_DST_P+0] = ipaddr[0];
buf[IP_DST_P+1] = ipaddr[1];
buf[IP_DST_P+2] = 255;
buf[IP_DST_P+3] = 255;
i=0;
while(i<4){
    buf[IP_SRC_P+i]=ipaddr[i];
    i++;
}
// Zet de Checksum bytes tijdelijk op nul
buf[IP_CHECKSUM_P]=0;
buf[IP_CHECKSUM_P+1]=0;
// Bereken Checksum
ck=checksum(&buf[IP_P], IP_HEADER_LEN,0);
buf[IP_CHECKSUM_P]=ck>>8;
buf[IP_CHECKSUM_P+1]=ck& 0xff;
//IP
//-----
buf[UDP_DST_PORT_H_P]=port>>8;
buf[UDP_DST_PORT_L_P]=port & 0xff;
// Bereken UDP Header lengte
buf[UDP_LEN_H_P]=0;
buf[UDP_LEN_L_P]=UDP_HEADER_LEN+datalen;
// zero the checksum
buf[UDP_CHECKSUM_H_P]=0;
buf[UDP_CHECKSUM_L_P]=0;
// Schrijf data in gegevensveld UDP Datagram
i=0;
while(i<datalen){
    buf[UDP_DATA_P+i]=data[i];
    i++;
}
ck=checksum(&buf[IP_SRC_P], 16 + datalen,1);
buf[UDP_CHECKSUM_H_P]=ck>>8;
buf[UDP_CHECKSUM_L_P]=ck& 0xff;

```

Figuur A.23: Een stuk voorbeeldcode dat het verzenden van een UDP pakket illustreert


```
uint16_t len =UDP_HEADER_LEN+IP_HEADER_LEN+ETH_HEADER_LEN+datalen;
// We schrijven in het geheugen van de Ethernet module
// het is nodig om te zeggen waar dit zal zijn aan de module.
enc28j60Write(EWRPTL, TXSTART_INIT&0xFF);
enc28j60Write(EWRPTH, TXSTART_INIT>>8);
// De Ethernet module moet ook weten welk stuk dat in het geheugen
// moet worden verzonden, de module zal de gegevens verzenden die
// zich bevinden vanaf adres dat zich in register ETXST bevindt tot
// het adres dat zich in register ETXND bevindt.
enc28j60Write(ETXSTL, TXSTART_INIT&0xFF);
enc28j60Write(ETXSTH, TXSTART_INIT>>8);
enc28j60Write(ETXNDL, (TXSTART_INIT+len)&0xFF);
enc28j60Write(ETXNDH, (TXSTART_INIT+len)>>8);

// Schrijf pakket weg naar de module via SPI
enc28j60WriteBuffer(len, buf);
// Zeg de Ethernetmodule dat deze het pakket verzend
// Zet in register ECON1 van de module ECON1_TXRTS op 1
enc28j60WriteOp(ECON1, ECON1_TXRTS);
```

Figuur A.24: Een stuk voorbeeldcode dat het verzenden van een UDP pakket illustreert

Bibliografie

- [1] Instituut voor Psychoacoustica en Elektronische Muziek. <http://www.ipem.ugent.be/>.
- [2] Inertial sensing technologies, for human and machine motion. <http://www.xsens.com/>.
- [3] List of Inertial Measurement Units. <http://damien.douxchamps.net/research/imu/>.
- [4] Bevilacqua et al. Wireless sensor interface and gesturefollower for music pedagogy. In *Proceedings of the 2007 Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME 07)*, pages 124–129, New York, USA, June 6-9, 2007.
- [5] XBee 802.15.4 OEM RF Modules - Digi International. <http://www.digi.com/products/wireless/point-multipoint/xbec-series1-module.jsp>.
- [6] Chulsung Park, Pai H. Chou, and Yicun Sun. A wearable wireless sensor platform for interactive art performance. In *Proceedings of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2006)*, pages 52–59, Pisa, Italy, April 3-5, 2006.
- [7] G. Torre, M. Fernstrom, and B. O’Flynn. Celeritas: Wearable wireless system. In *Proceedings of the 2007 Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME 07)*, pages 205–208, New York, USA, June 6-9, 2007.
- [8] R. Aylward and J.A. Paradiso. A compact, high-speed, wearable sensor network for biomotion capture and interactive media. In *Proceedings of the Sixth International IEEE/ACM Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 07)*, pages 280–389, Cambridge, MA, USA, April 25-27, 2007.

- [9] M. De Bock, B. Kuyken, and W. Verstichel. Hardware ontwerpproject: De Headbangsensor. 2007.
- [10] Elektor - Electronics Worldwide. <http://www.elektor.nl/>.
- [11] E. Lins and C. Meinhardt. Draadloze Dwerg: iDwaRF: WirelessUSB-module met netwerkfunctie. *Elektuur*, 521:48–55, maart, 2007.
- [12] iDwaRF-Net. <http://www.chip45.com/index.pl?page=iDwaRF-Net&lang=en>.
- [13] Cypress Semiconductor RF Chip CYWUSB6935. http://download.cypress.com.edgesuite.net/design_resources/datasheets/contents/cywusb6935_8.pdf.
- [14] Cypress Semiconductor WirelessUSB Dual Antenna Design Layout Guidelines - AN5033. http://download.cypress.com.edgesuite.net/design_resources/application_notes/contents/wirelessusb_tm__dual_antenna_design_layout_guidelines__an5033_12.pdf.
- [15] Atmel Corporation ATmega168V Microcontroller. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2545.pdf.
- [16] STMicroelectronics LIS3LV02DQ Accelerometer. <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/11115.htm>.
- [17] Silicon Labs CP2102 USB to UART Bridge. http://www2.silabs.com/public/documents/tpub_doc/dsheet/Microcontrollers/Interface/en/cp2102.pdf.
- [18] Maxim Integrated Products MAX1674 Step-Up Converter . http://www2.silabs.com/public/documents/tpub_doc/dsheet/Microcontrollers/Interface/en/cp2102.pdf.
- [19] Cypress Semiconductor WirelessUSB LS Printed Circuit Board Layout Guidelines - AN5030. http://download.cypress.com.edgesuite.net/design_resources/application_notes/contents/wirelessusb_ls_tm__printed_circuit_board_layout_guidelines__an5030_12.pdf.
- [20] Cypress Semiconductor RF Chip CYRF6936. http://download.cypress.com.edgesuite.net/design_resources/datasheets/contents/cyrf6936_8.pdf.
- [21] Maxim Integrated Products MAX1551 Batterij Oplader. <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX1551-MAX1555.pdf>.

- [22] Cypress Semiconductor WirelessUSB Antenna Design Layout Guidelines - AN5032. http://download.cypress.com.edgesuite.net/design_resources/application_notes/contents/wirelessusb_tm_antenna_design_layout_guidelines___an5032_12.pdf.
- [23] R. E. Kalman. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*, 82(Series D):35–45, 1960.
- [24] Greg Welch and Gary Bishop. An Introduction to the Kalman Filter. Technical report, University of North Carolina, Chapel Hill, NC, USA, 1995.
- [25] InvenSense IDG-300 Dual-Axis Gyroscope. http://www.invensense.com/shared/pdf/IDG_300_Datasheet.pdf.
- [26] Honeywell HMC1053 Three-Axis Magnetometer. <http://www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/HMC105X.pdf>.
- [27] Unigen Corporation UGWJ4US LETO-M WirelessUSB Radio Module. http://www.unigen.com/product_detail.php?pid=729.
- [28] Artaflex Modules AWA24S 2.4 GHz Radio Module with Integrated Power Amplifier. <http://www.artaflexmodules.com/product.html?id=4>.
- [29] Laird Technologies NanoBlue Internal Antenna - Embedded. <http://www.lairdtech.com/pages/products/Wireless-Internal-Antennas-NanoBlue.asp>.
- [30] Microchip Technology ENC28J60 Ethernet Controller. http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en025831&part=AC16412.
- [31] J. F. Kurose and K. W. Ross. *Computernetwerken: Een 'top-down' benadering*. Pearson Education Benelux, Third edition, 2005.
- [32] L. Weyten. *Cursus Analoge Elektronica*. UGent, 2006.
- [33] Internal Rectifier IRF7509 HEXFET Power MOSFET. <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf7509.pdf>.
- [34] U-Blox G5010 GPS. <http://www.u-blox.com/products/ubx-g5010.html>.

Lijst van figuren

4.1	Gesture Follower.	9
4.2	Zenddeel (links) en sensordeel (rechts) van de WSP	10
4.3	Celeritas.	11
4.4	Senseable.	12
5.1	Headbangsensor bevestigd op haarband.	14
6.1	Node - eerste generatie.	17
6.2	Node op een velcro band en basisstation verbonden met USB kabel.	17
6.3	RF chip CYWUSB6935 met PCB antennes.	18
6.4	Microcontroller ATmega168V van Atmel Corporation.	19
6.5	Accelerometer LIS3LV02DQ van STMicroelectronics.	20
6.6	USB to UART Bridge CP2102 van Silicon Labs.	21
6.7	Communicatieinterfaces bij het basisstation - eerste generatie.	21
6.8	Timing diagram TDMA protocol eerste generatie.	24
6.9	Time-outs bij het basisstation.	26
6.10	Pakket dat computer ontvangt van het basisstation.	26
6.11	Communicatieinterfaces bij de node - eerste generatie.	28
6.12	Schema van node - eerste generatie.	31
6.13	OrCAD layout van node - eerste generatie.	32
6.14	Het sampleverlies van een node in functie van de afstand tot het basisstation.	33
7.1	Basisstation (links) en node (rechts) - tweede generatie.	35
7.2	CYRF6936 van Cypress Semiconductor.	36
7.3	Oplaadchip MAX1551 van Maxim Integrated Products.	37
7.4	Timing diagram TDMA protocol tweede generatie.	38
7.5	Communicatieinterfaces bij de node - tweede generatie.	39
7.6	Schema van node - tweede generatie.	41

7.7	OrCAD Layout van node - tweede generatie.	42
7.8	Communicatieinterfaces bij het basisstation - tweede generatie.	43
7.9	Schema van basisstation - tweede generatie.	44
7.10	OrCAD layout van basisstation - tweede generatie.	45
7.11	Het sampleverlies in functie van de afstand met de node 10 cm (links) en 0.5 cm (rechts) van het lichaam verwijderd.	47
8.1	Ontvanger (links) en node (rechts) - derde generatie.	50
8.2	Gyroscoop IDG-300 van InvenSense.	53
8.3	Magnetometer HMC1053 van Honeywell.	53
8.4	Vermogenversterker AWA24S van Artaflex Modules.	54
8.5	NanoBlue antenne van Laird Technologies.	55
8.6	Stralingspatroon van de NanoBlue antenne.	55
8.7	MAG Jack connector (links) en Ethernet controller op PICtail bord (rechts).	56
8.8	Timing diagram TDMA protocol derde generatie.	57
8.9	Toestandsdiagram voor node x.	60
8.10	Communicatieinterfaces bij de node - derde generatie.	61
8.11	Differentiële versterker in magnetometer circuit.	62
8.12	Twee verschillende RF modules op het nodebord.	63
8.13	Schema van node - derde generatie - deel 1.	64
8.14	Schema van node - derde generatie - deel 2.	65
8.15	Schema van verticale gyroscoop voor node - derde generatie.	65
8.16	Schema van zendbord zonder versterker - derde generatie.	66
8.17	OrCAD Layout van node - derde generatie.	67
8.18	OrCAD Layout van verticale gyroscoop - derde generatie.	68
8.19	OrCAD Layout van zendbord zonder versterker - derde generatie.	68
8.20	Communicatieinterfaces bij de ontvanger - derde generatie.	69
8.21	Schema van basisstation - derde generatie - deel 1.	71
8.22	Schema van basisstation - derde generatie - deel 2.	72
8.23	OrCAD Layout van basisstation - derde generatie.	73
8.24	Applicatie in Max/MSP.	75
8.25	Stroomverbruik bij derde generatie - uitgedrukt in mA.	76
8.26	Visualisatie in Max/MSP.	77
8.27	Visualisatie Kalman filtering.	79

A.1	De vier lijnen van de I^2C bus die de master verbindt met de verschillende slaves.	84
A.2	Het uitlezen van een register van de accelerometer via I^2C	85
A.3	Het schrijven van een register van de accelerometer via I^2C	86
A.4	Schematische weergave van de TWI module	87
A.5	Het TWCR register.	88
A.6	Het TWSR register.	88
A.7	De prescaler waarden overeenkomstig aan de bitinstellingen in het TWSR register.	89
A.8	Een stuk voorbeeldcode die het I^2C protocol verduidelijkt.	89
A.9	De master en een aantal slaves op een SPI bus.	91
A.10	Een leesoperatie op een SPI bus.	91
A.11	Een leesoperatie op een SPI bus.	92
A.12	Een schematische weergave van de SPI module van de microcontroller. . .	93
A.13	Een stuk voorbeeldcode die het SPI protocol verduidelijkt.	94
A.14	Een frame zoals in het UART protocol gebruikt.	94
A.15	Het Status en Controleregister A	95
A.16	Het Status en Controleregister B	95
A.17	Het Status en Controleregister C	96
A.18	Een stuk voorbeeldcode die het verzenden van één byte illustreert	97
A.19	De verschillende lagen in het OSI Model	98
A.20	De structuur van een Ethernet Frame	98
A.21	De structuur van een IP Datagram	99
A.22	De structuur van een UDP Segment	99
A.23	Een stuk voorbeeldcode dat het verzenden van een UDP pakket illustreert	101
A.24	Een stuk voorbeeldcode dat het verzenden van een UDP pakket illustreert	102

Lijst van tabellen

3.1	Specificaties aan de scriptie.	7
4.1	Specificaties van vergelijkbare systemen.	12
5.1	Prestaties nulde generatie.	15
6.1	Prestaties eerste generatie.	30
7.1	Prestaties tweede generatie.	47
8.1	Prestaties derde generatie.	78
9.1	Verwachtingen en resultaten van het ontwerp.	81
9.2	Vergelijking bestaande systemen met eindontwerp.	83