

Aansturing van FMCW- radar voor de detectie en classificatie van mensen

Ter preventie van treinsuicide en
koperdiefstal

R. Wilmer en S. Gosseling

Technische Universiteit Delft

Goedkeuring Stage-/Afstudeerverslag van:

R. Wilmer en S. Gosseling.....

Titel verslag: Aansturing van FMCW-radar voor de detectie en classificatie van mensen.....

Opleidingsinstelling: TU Delft.....

Stage-/Afstudeerperiode: Academisch jaar 2013-2014, kwartaal 4.....

Vestiging/Afdeling: Delft.....

Stagebegeleider Thales: R. I. A. Harmanny.....

Dit verslag (zowel de papieren als de elektronische versie) is door de begeleider van Thales Nederland B.V. gelezen en becommentarieerd. Hierbij heeft de begeleider, naast inhoudelijke zaken, tevens gelet op gegevens die niet naar buiten mogen, zoals plattegronden, confidentiële informatie en organisatieschema's waarin namen staan vermeld.

In principe worden drie categorieën van verslagen onderscheiden, dit verslag valt onder de volgende categorie*:


- 1. Verslagen en/of samenvattingen hiervan, die vanwege veiligheidsredenen/commerciële aspecten intern (Thales) moeten blijven.
Het verslag blijft te allen tijde in het archief van Thales. Indien nodig kan dit verslag door een afgevaardigde van de opleidingsinstelling bij Thales worden ingezien, mits deze afgevaardigde een geheimhoudingsverklaring heeft ondertekend.
- 2. Verslagen en/of samenvattingen hiervan, die beperkt openbaar zijn (binnen eigen hogeschool/universiteit of studierichting).
- 3. Verslagen en/of samenvattingen hiervan, die publiek en dus volledig openbaar zijn en dus ook op internet gepubliceerd mogen worden.

In voorkomende gevallen moet een aangepast verslag voor de opleidingsinstelling worden gemaakt.

* De stagebegeleider van Thales geeft aan in welke categorie het verslag wordt ingedeeld. Het verslag wordt door de stagebegeleider afgetekend.

Akkoord:

Akkoord:
(alleen bij categorie 1)



(Stagebegeleider Thales)

(Opleidingsinstelling)

Delft, 18 juni 2014

(plaats/datum)

THALES

Samenvatting

In dit verslag gaan wij in op de aansturing van radar-hardware die door Thales Nederland is geleverd. Hierbij zullen de gebruikte radarmodules; de K-MC1 en de KOR-001 van RFBeam[®] besproken worden, alsmede de functiegenerator die hiervoor gebruikt is en het ontwerp van de behuizing. De radarhardware maakt deel uit van een groter systeem, waarbij het de bedoeling is om mensen door middel van radar en het doppler-effect te detecteren. Het idee kwam vanuit Thales om treinsuïcide te voorkomen, door mensen die zich op of langs het spoor bevinden te detecteren met radar. Aan ons is de opdracht gegeven een prototype hiervoor te ontwikkelen. De K-MC1 hebben we gebruikt om bekend te worden met radar en de aansturing hiervan. De KOR-001 is uiteindelijk gebruikt om ons prototype te bouwen. Aan de hand van de documentatie, de theorie over doppler en de vooraf gestelde eisen, hebben we de KOR-001 ingesteld, de werking ervan geverifieerd en proefmetingen verricht.



VOORWOORD

Wij zijn de TU Delft en Thales zeer erkentelijk voor dit Bachelor Afstudeerproject. We hebben hard gewerkt aan een leuk project, waarbij we werden uitgedaagd.

Persoonlijk willen wij P.S.M. Goossens en W.F. van der Zwan, beiden verbonden aan de afdeling Microwave Sensing, Signals and Systems van de TU Delft, bedanken voor hun inzet en steun. Ook danken wij prof. dr. O. Yarovoy, onze docent-begeleider, tevens verbonden aan de afdeling Microwave Sensing, Signals and Systems van de TU Delft. Vanuit Thales hebben we veel steun gehad aan opdrachtgever ir. R.I.A. Harmanny, waarvoor veel dank.

Bij dezen willen wij graag elkaar bedanken voor de mogelijkheid buiten openingstijden van de faculteit toch samen te kunnen werken.

Joëlle van Flickr[®], bedankt dat we je foto voor het voorblad mogen gebruiken [1].

We wensen onze opvolgers, alsmede Thales, veel succes met het vervolg op dit onderzoek. We zijn benieuwd naar welke resultaten zullen worden geboekt.

*S. Gosseling, R. Wilmer
Delft, juni 2014*

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	i
1 Inleiding	1
2 Verwant onderzoek	2
3 Systeem	3
3.1 Opdracht	3
3.2 Indeling systeem	3
3.3 Eisen	3
3.4 Plan van aanpak	4
3.5 Groepsproces	5
4 K-MC1	6
4.1 MATLAB [®] -code	7
5 KOR-module	9
5.1 Werking KOR-module	9
5.2 DDS	11
5.3 Eisen KOR-module	14
5.4 Verificatie KOR-module	15
6 Functiegenerator	18
6.1 Arduino	18
6.2 AVR ATmega16	18
6.3 Spanningsdeling	19
6.3.1 Parallelschakeling	19
6.3.2 Serieschakeling	19
6.4 Vermogensverbruik	20
7 Behuizing	22
8 Evaluatie	26
9 Conclusie	28
9.1 Hardware	28
9.2 Systeem	28
9.3 K-MC1	29
9.4 KOR-001	29
9.5 Functiegenerator	30
9.6 Behuizing	30
9.7 Toekomst	30

Definitielijst	31
Referenties	32
Bijlage A: Theoretische achtergrond	34
A.1 Dopplereffect	34
A.2 Micro-dopplereffect	35
A.3 Continuous-Wave Radar	36
A.4 Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar	36
A.5 I/Q	38
Bijlage B: Radarformules	39
Bijlage C: Datasheets	41
Bijlage D: Schetsen van de behuizing	51

1 INLEIDING

De treinreizigers in Nederland kampen regelmatig met vertragingen veroorzaakt door zelfmoord op het spoor en koperdiefstal. Er zijn in Nederland ongeveer 200 doden [2] per jaar door zelfdoding op het spoor. Hierdoor is er veel emotionele schade bij de reizigers en machinisten en ook veel financiële schade bij o.a. NS en ProRail. Naast de zelfdoding zijn er veel mensen die onbevoegd langs het spoor lopen en dieren die zich op het spoor bevinden.

Vanuit het radarbedrijf Thales is er dan ook het idee ontstaan onderzoek te doen naar radarmodules die mensen langs het spoor kunnen detecteren. De nood hiervan is ontstaan doordat er geen andere (radar-)systemen zijn die op deze manier ingezet kunnen worden. Er zijn wel camerasystemen die mensen kunnen herkennen, maar het bereik hiervan is beperkt, en werken deze niet bij elke weersomstandigheid, zoals mist. Radar werkt daarentegen bij elke weersomstandigheid.

Tegenwoordig zijn er militaire toepassingen van radarsystemen die mensen kunnen detecteren en die ook een groot gebied kunnen beslaan. Helaas zijn deze radarmodules vrij duur en groot. De radarmodules die wij in willen gaan zetten zijn ten opzichte van deze systemen relatief goedkoop en klein. Onze projectgroep heeft, in samenwerking met Thales, gewerkt aan een proof-of-concept voor deze radar.

Voor de radarmodule is het idee om deze in te zetten over een groot gebied langs het spoor. Er zullen dan ook vele modules ingezet moeten worden. Vanwege deze twee voorwaarden, zijn de volgende eisen wenselijk:

- De radar moet autonoom zijn in het detecteren van mensen en/of een voorwerp. Zo is er niet veel personeel nodig, dit scheelt in de kosten en voorzieningen
- De radarmodule moet goedkoop zijn, opdat het systeem economisch aantrekkelijk is.
- Het is wenselijk dat de radarmodule een grote afstand kan overbruggen, zodat het aantal te plaatsen modules gereduceerd kan worden.
- De radarmodules moeten onderhoudsarm zijn, ook om kosten te drukken.
- De radarmodules opereren buiten, dus moeten ze onder elke weersomstandigheid werken.
- Er moet communicatie komen met een centrale, waar meldingen van gedetecteerde mensen aan kan worden gedaan
- De modules moeten klein genoeg zijn om op te hangen langs het spoor.

Dit verslag bestaat uit 9 hoofdstukken. De eerste drie hoofdstukken gaan over ons systeem en verwant onderzoek. Daarna volgen vier hoofdstukken over de twee gebruikte radarmodules en de benodigde hardware. Daarna volgen er een evaluatie en conclusie. Radarthorie is in bijlage A te vinden. In bijlage C staan datasheets van de radarmodules.

2 VERWANT ONDERZOEK

Het detecteren van mensen is al langer een onderwerp van onderzoek. Het werk dat onze groep heeft uitgevoerd bouwt voort op eerder uitgevoerd onderzoek. De basis voor ons onderzoek vloeit voort de uit de master-thesis van Stephan de Groot, genaamd "Model-based Classification of Human Motion" [3]. In deze thesis wordt erop ingegaan hoe men aan de hand van de dopplersnelheid een mens kan identificeren.

Ook is onderzoek gedaan naar het detecteren van mensen in een gebouw aan de hand van FMCW-radar. Dit is gedaan in "A Study of UWB FM-CW Radar for the Detection of Human Beings in Motion Inside a Building" [4]

Voor de FFT processing is ook door Zhang Jun gekeken naar hoe men op basis van een fractionale FFT de bewegingen van een mens kan verduidelijken in "Analysis of Radar Human Gait Signal Based on Fractional Fourier Transforms" [5]

Omdat wij ook eventueel op de hardware de processing wilden implementeren is ook gekeken naar welke onderzoeken zijn gedaan naar dit type onderzoek. Hierbij kwamen wij op de volgende paper, waarbij wordt ingegaan op de implementatie op de FPGA van de processing rondom de toepassingen van het detecteren van mensen: "CW and Pulse-Doppler Radar Processing Based on FPGA for Human Sensing Applications" [6]

Omdat wij mogelijk gebruik gaan maken van een particle-filter in combinatie met de hardware, scheen de volgende paper ook wel handig: "Improved FPGA Implementation of Particle Filter for Radar Tracking Applications" [7]

3 SYSTEEM

In dit onderdeel van het verslag gaan wij in op de eisen die aan het systeem als geheel gesteld worden, daarna gaan wij dieper in op de eisen voor ons onderdeel. Ook gaan wij hier in op hoe het systeem in het algemeen is opgebouwd. In de hoofdstukken hierna gaan wij dieper in op ons onderdeel en de besluitvorming daarbij.

3.1 Opdracht

De algehele eis vanuit Thales is dat er een werkend prototype radarsysteem ontworpen werd. Dit prototype moet langs het spoor mensen en/of objecten kunnen detecteren. Hierbij is de wens om gebruik te maken van bestaande radarmodules en eventueel een extra camera om de detectie te bevestigen [8].

Gezien de tijd die voor ons project staat, is er gekozen een radarmodule te gebruiken die door Thales aangeleverd kan worden. Thales had systemen voor ons in de ISM-band rond 24.125 GHz. Dit is een onderzoeksband die vrij te gebruiken is; hierdoor kon er makkelijk getest worden.

3.2 Indeling systeem

Een radar is grofweg onder te verdelen in de volgende verschillende onderdelen:

- Radarhardware
- Processing
- Visualisatie detectie, zoals een melding in een meldkamer

Wij hadden een korte tijd om het radarsysteem te bouwen. Daarom hadden we besloten de daadwerkelijke visualisatie van de detectie niet te behandelen. Onze projectgroep bestond uit 6 personen. Vandaar dat wij de volgende onderverdeling hadden gemaakt:

- Radarhardware; zoals de behuizing, de radar zelf, voeding en dergelijke
- Algoritme om mensen te kunnen detecteren
- Processing; het verwerken van de data en de implementatie van het algoritme

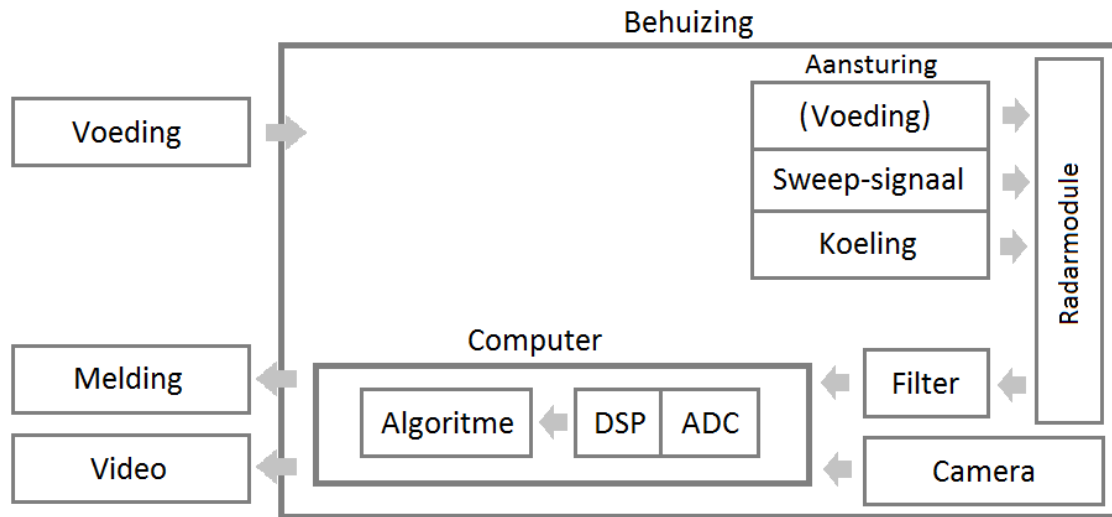
Wij hebben de radarhardware (de aansturing) op ons genomen. Het werk rondom het algoritme en de processing (DSP/filter) is door anderen gedaan. [9] [10]. Het systeem is geïmplementeerd zoals geïllustreerd in figuur 1.

3.3 Eisen

Ons onderdeel had te maken met de radarhardware van het systeem. Hierbij kan men denken aan de radar zelf, de behuizing en de housekeeping (voeding en koeling) voor het systeem.

Hierbij zijn de volgende eisen opgesteld:

- De radarmodule moet de juiste aansturing krijgen om te kunnen opereren volgens de gewenste specificaties.



Figuur 1. Blokschema van het systeem

- De radarmodules moeten een zo groot mogelijk bereik hebben. Wij beogen een bereik van ongeveer 2 km.
- De behuizing moet klein en handzaam zijn, zodat het makkelijk op te hangen is langs het spoor
- De behuizing moet de hardware beschermen tegen elk weertype
- De geïnstalleerde hardware moet, waar nodig, gekoeld worden.
- De hardware moet in de behuizing in te bouwen zijn
- Zo veel mogelijk van de hardware voor het prototype, moet ingebouwd worden in de behuizing
- Zo min mogelijk bewegende onderdelen, zodat de radarmodule weinig onderhoud kost.

Daarnaast heeft Thales enkele numerieke eisen voor het kunnen indentificeren van personen:

- Tijdsinterval voor één waarneming: < 0.1 s
- Doppler-resolutie: < 0.1 m/s
- De minimaal te detecteren doppler-snelheid: > 11 m/s

3.4 Plan van aanpak

Ons globale plan steekt als volgt in elkaar:

- 1) Ons verdiepen in de theorie over CW en FMCW radar en de toepassingen rond het detecteren van mensen
- 2) Met de K-MC1 module-ervaring opdoen en de mogelijkheden verkennen rondom het aansturen en uitlezen van de radar

- 3) Als we voldoende kennis hebben opgedaan met de K-MC1, de aansturing voor de KOR-module maken en de werking van de module verifiëren
- 4) De behuizing maken en alle onderdelen in de behuizing installeren

Eerst werd getest met de K-MC1 van RFBeam[®], in combinatie met de ST-100 starterkit (zie bijlage C). Hierdoor kon het ontvangen signaal via een USB-poort als audio-apparaat op een computer aangesloten worden.

3.5 Groepsproces

In het begin van het project waren er nog geen groepen gemaakt voor de verdeling van de taken. Men was zich eerst nog aan het inlezen over de werking van de radar d.m.v. een literatuuronderzoek.

Na een inleiding over radar bij Thales hebben we als groep overlegd over de globale werkverdeling, zoals besproken in hoofdstuk 3.2.

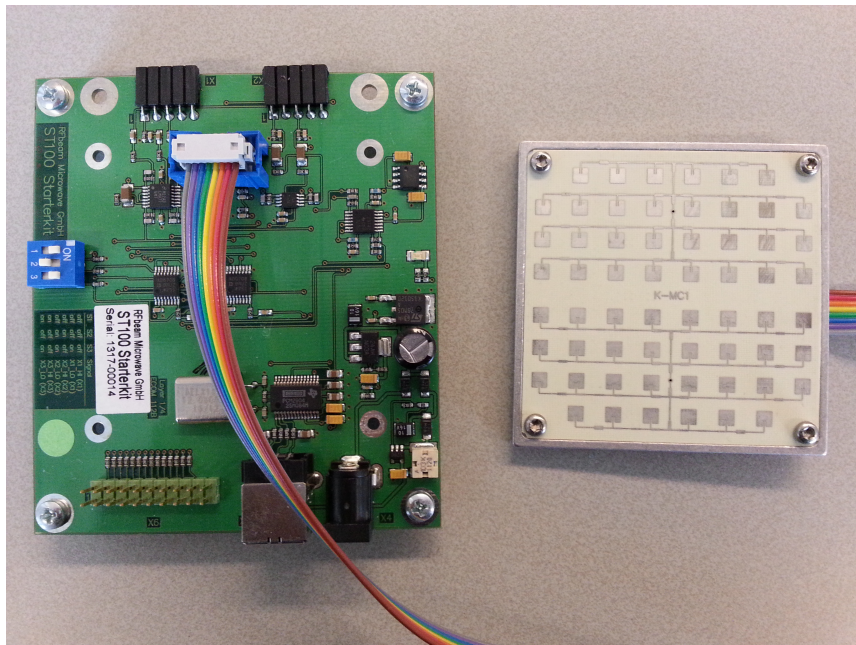
Hierna was elke groep bezig zich te verdiepen in zijn eigen onderdeel en werd er gewerkt aan de eerste opzet voor elk onderdeel. In deze fase was er weinig overleg onderling en in de groep leek het ons beter om ons eerst te focussen op het eigen onderdeel. Later pas zouden we het systeem als geheel behandelen. Hierbij waren er geen harde deadlines gesteld die wij als groep zouden moeten bereiken. We dachten dat het niet nodig was een projectleider te hebben.

Naarmate het project vorderde kwam er steeds meer overleg tussen de groepen onderling. Dit omdat de onderdelen van elke groep afhankelijk van elkaar zijn en er dus afstemming nodig was om de verschillende onderdelen te laten werken. De globale werkverdeling werkte wel goed, maar over de interactie tussen de verschillende onderdelen onderling was niet veel communicatie in de groep.

Na enkele weken hadden we overleg met onze begeleiders. Hieruit bleek dat onze groep zich meer moest gaan focussen op globaal overleg met de gehele groep en dat er een projectleider aangesteld moest worden. In plaats van tussen de groepen onderling afspraken proberen te maken, was het beter om in een groepsvergadering de onderlinge onderdelen op elkaar af te stemmen. Naar aanleiding van dit overleg werd een projectleider aangesteld, een projectplan opgesteld en vaste overlegtijden afgesproken.

Sindsdien is het proces voor de groep als geheel goed gegaan en heeft de groep als geheel veel overlegd.

4 K-MC1



Figuur 2. De ST-100 en K-MC1

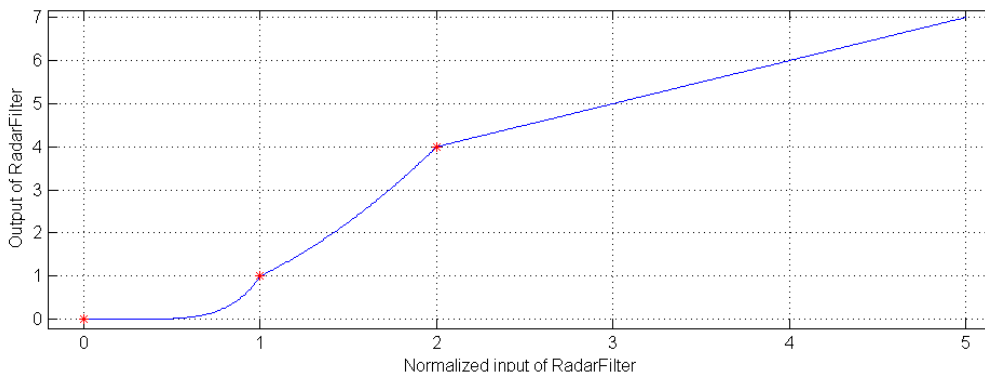
Om eerst bekend te worden met de werking van de radar, hebben wij ons, naast het literatuuronderzoek, in de radartheorie verdiept door middel van de radarmodule K-MC1. Het doel was om deze radar aan te sluiten en data ervan uit te lezen en te interpreteren.

D.m.v. de ST-100 starterkit van RFbeam [11] fungeerde de radar als USB-audioapparaat. Dit kon (en: is) in MATLAB[®] uitgelezen. Een ruisfilter op basis van machtsverheffen is ontworpen. Het ontworpen algoritme onderdrukt ruis goed en laat alsnog de informatie netjes door. Vergelijking 1 is geïmplementeerd. De vergelijking verwacht waardes die genormaliseerd zijn op een - empirisch te bepalen - ruisdrempel.

$$x_{\text{filtered}} = \text{threshold} \cdot \left([x \leq 1] \cdot x^6 + [1 < x \ \& \ x \leq 2] \cdot x^2 + [2 < x] \cdot (x + 2) \right) \quad (1)$$

De K-MC1 blijkt, in combinatie met de ST-100, niet over de volledige beschikbare diepte van 180 MHz te moduleren. De K-MC1 verwacht een spanning van 1 tot 10 V aan zijn VCO-ingang. De ST-100 kan maar een spanning van 0 tot 4 V aanbieden. Effectief wordt dus 1 tot 4 V gebruikt. Dit in combinatie met een gevoeligheid van 18MHz/s levert een verwachte modulatie diepte van $3V \cdot 18\text{MHz}/V = 54\text{MHz}$.

Hieruit volgen de theoretische waarden genoemd in tabel 4. Zie bijlage A voor de berekening van deze waarden.



Figuur 3. De overdracht van RadarFilter.m

K-MC1 module theoretische waarden:

Variabele	Waarde
Sampling frequentie	44.1 kHz
Range	40 m
Range-resolutie	2.78 m
N_{ramps}	128
Observatietijd	93.53 ms
Maximale doppler-snelheid	4.28 m/s
Doppler-resolutie	0.087 m/s

Zoals te lezen in hoofdstuk 3, voldoen de observatietijd en range-resolutie voor classificatie van mensen. De range is echter niet naar wens en het snelheidsbereik is niet voldoende voor classificatie.

4.1 MATLAB[®]-code

Alle MATLAB[®]-code die ons subgroepje heeft gemaakt, is van toepassing op de K-MC1. Vandaar dat deze hier behandeld is. Eenvoudige code, zoals plot-functies, is hier niet beschreven. We hebben de volgende .M-files geschreven:

- TESTEN.M
- RADARFILTER.M
- RADARWAVEFORMGEN.M
- RADARGENAUDIO.M
- RADARSPECTOGRAM.M
- RADARFMCWPROCESS.M
- RADARFMCWPLOT.M
- RADARTIMEPLOT
- RADARGENAUDIO.M

In TESTEN.M wordt de meting uitgevoerd en geplot. Er zijn enkele parameters nodig, te weten:

Sampling frequentie, audiokanalen, PlayDelay + StopDelay (delay's tegen skewing).

TESTEN.M bevat ook de UI en roept andere scripts aan.

In de UI wordt de opnametijd bepaald.

Ook moet de gebruiker ingeven wat er gedaan wordt:

Met het programma stoppen, variabelen resetten, een continue meting doen of een enkele meting doen.

RADARWAVEFORMGEN.M maakt de zaagtand voor FMCW-modulatie aan de hand van de zendtijd, sampling frequentie en zaagtandherhalingsfrequentie.

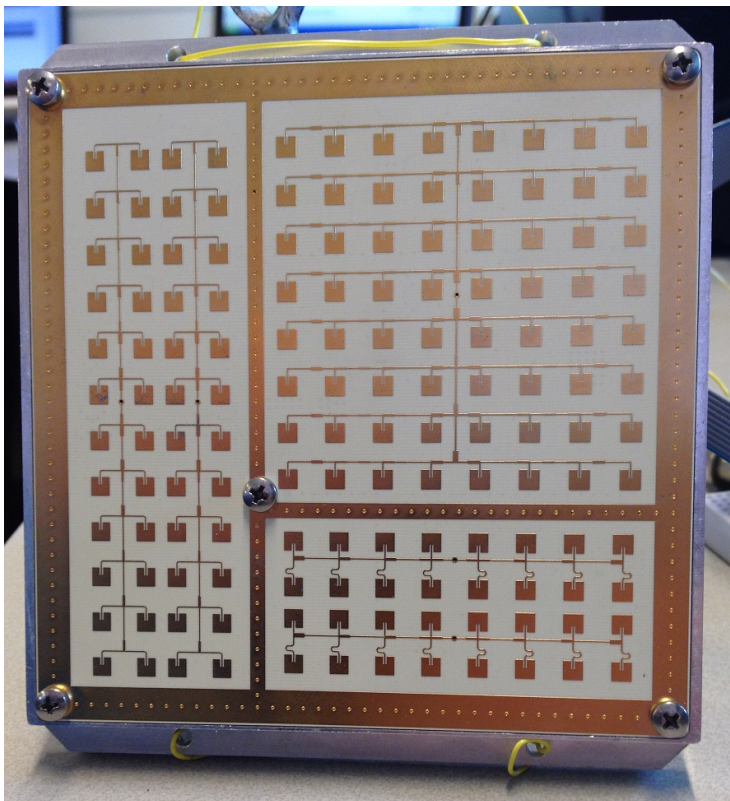
RADARGENAUDIO.M maakt hier vervolgens een audioplayer-object van.

RADARSPECTOGRAM.M wordt aangeroepen vanuit TESTEN.M en is verantwoordelijk voor de verwerking van het ontvangen signaal; Bij FMCW-data wordt RADARFMCWPROCESS.M aangeroepen voor verdere afhandeling. Is de data gewoon CW, dan zal met een Blackman-window een spectrogram gemaakt worden. Daarnaast wordt ook nog een gefilterde versie worden getoond. Deze filtering gebeurt met RADARFILTER.M.

RADARFILTER.M past een normalisering toe, machtsverheft het resultaat afhankelijk van of de data boven, onder of tussen drempels zit, en deelt vervolgens door de normering om weer op het originele amplitude uit te komen. Verdere uitleg staan bij hoofdstuk 4

Gezien onze code slechts in een vroeg stadium nodig was (later werd deze overgenomen door het algoritme-groepje) is onze FMCW-processing niet heel uitgebreid. RADARFMCWPROCESS.M vindt de pieken in de afgeleide (daar waar de frequentie overgaat van een up-ramp naar een down-ramp of vice versa) en plot deze samen met de data. Dit plotten gebeurt door RADARFMCWPLOT.M en RADARTIMEPLOT aan te roepen.

5 KOR-MODULE



Figuur 4. KOR-module

Na enkele weken kregen wij de KOR-001 radarmodule van Thales. De KOR-module is een experimentele radarmodule met één zendantenne en vier ontvangstantennes. Er zijn voor de elevation en de azimuth beide twee antennes. In dit hoofdstuk gaan wij kijken naar de aansturing van de KOR-module, en hoe wij aan de hand van de eisen van de algoritmegroep de KOR-module hebben ingesteld [9]. In de conclusie wordt bediscuseerd in hoeverre wij de doelen konden halen.

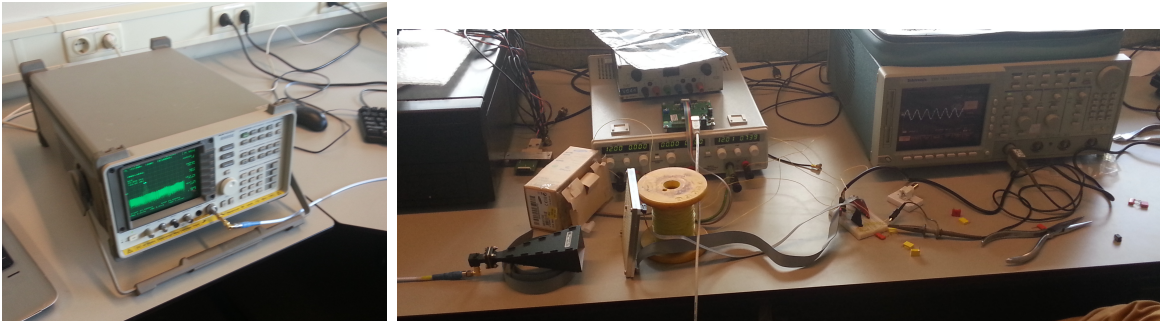
5.1 Werking KOR-module

In het begin was de documentatie van de KOR-module onvolledig. Zo was er geen duidelijk blokschema. Ook was er niet gedocumenteerd hoe de KOR-module aangestuurd moest worden. Na contact met RFbeam[®] kregen wij een bijgewerkte documentatie en bleek dat wij een FTDI-kabel konden gebruiken om de KOR-module aan te sturen.

Voor de KOR-module was er geen interface beschikbaar om deze aan te sturen en uit te lezen. Vandaar dat wij in samenwerking met de groep van de processing

een interface tussen de KOR-module en de DSP van de computer hebben gemaakt, nadat wij de juiste informatie hadden gekregen van RFbeam[®]. Op deze interface zitten de connectoren voor de FTDI-kabel, de voeding en de input en output kabel van de KOR-module. [10]

Vervolgens is er een meetopstelling gemaakt met de KOR-module om de werking te verifiëren. (figuur 5) Verderop in dit hoofdstuk gaan wij verder in op de verificatie van de werking van de KOR-module. Om de KOR-module in te stellen hebben we



Figuur 5. Meetopstelling voor de KOR-module

gebruik gemaakt van een FTDI-kabel. Deze verzorgt een interface tussen de seriële communicatiepoort van de KOR-module en de USB-poort van een computer. Via seriële communicatie kreeg men een interface (zie figuur 6) waar men de volgende onderdelen kan instellen:

- Center Frequency: De f_c van de VCO
- Span: de modulatie diepte van de sweep (voor FMCW)
- Ramp Time: hoe lang een ingestelde sweep duurt.
- Number of Steps: de resolutie/aantal stappen binnen een sweep

Uit de interface blijkt dat de KOR-module 3 verschillende modi ondersteunt:

- 1) CW: Continuous Wave. Er wordt op één vaste frequentie uitgezonden.
- 2) FSK: Frequency Shift Keying. Hiermee wordt, afhankelijk van de spanning op een ingangspin hoog of laag is, een van twee frequenties uitgezonden.
- 3) FSK/FMCW: Frequency-Modulated Continuous-Wave. In een aantal stappen, in een ingestelde tijd, wordt over een bereik gesweept. Als het totaal aantal stappen 2 is zullen er dus twee frequenties worden uitgezonden en is de FMCW-modus eigenlijk een FSK-modus.

```

-> [2J0lvia KOR-001 #
=====
Program Version U1.04 Sep 9 2013
Actual Mode: FSK/FMCW
[j] CW - Mode
-----
[a] Frequency 24.100 GHz [23.500 .. 24.500 GHz]
[k] FSK - Mode
-----
[b] Center Frequency 24.050 GHz [23.500 .. 24.500 GHz]
[c] Span 5000 kHz [0100 .. 5000 kHz]
[l] FSK/FMCW - Mode
-----
[d] Center Frequency 24.125 GHz [23.500 .. 24.500 GHz]
[e] Span 250 MHz [050 .. 250 MHz]
[f] Ramp Time 001 ms [1 .. 100 ms]
[g] Number of Steps 65535 [00000 .. 65535]
[s] Store data to EEPROM
->

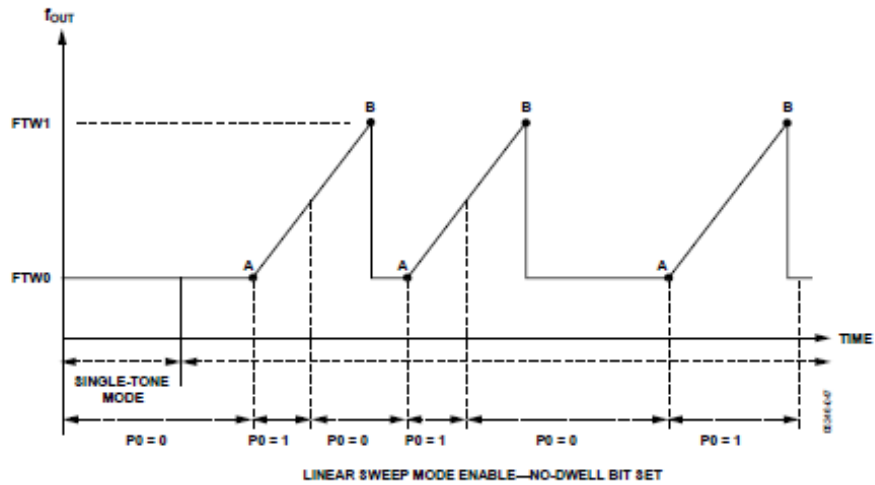
```

Figuur 6. De interface van de KOR-001

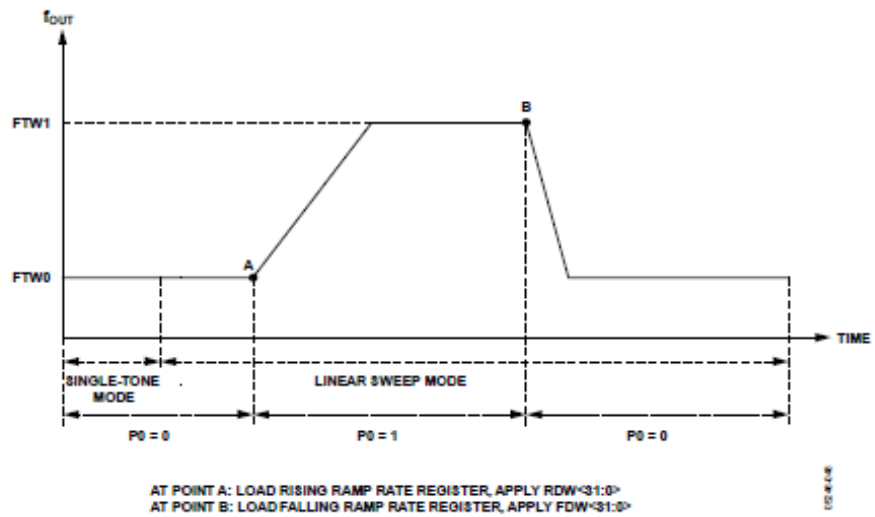
5.2 DDS

Vanuit de algoritmegroep was er de wens om een frequentiesweep in de vorm van een zaagtand te krijgen. De KOR-module bevat een DDS om de VCO aan te sturen. Om te kijken of dit mogelijk was met de DDS in de KOR-module werd bij RFbeam® extra gegevens opgevraagd omtrend de DDS. Uiteindelijk kregen wij de overview van het systeem en schema van de PLL, waar de DDS in zat. (bijlage C) Uit het laatste document bleek dat er gebruik werd gemaakt van de AD9959 DDS.

De DDS genereert een oplopende of aflopende spanning, die wordt getriggerd op de opgaande (oplopende spanning) of neergaande (aflopende spanning) flank van een externe blokglaf die wordt aangeboden op de P0-ingang van de DDS. Dit is het geval voor als de DDS is ingesteld in een dwell-modus, waarbij de huidige spanning wordt aangehouden tot het volgende triggermoment. Volgens de datasheet van de DDS [12, p. 25-27] kan de DDS in een dwell of no-dwell modus. Bij een no-dwell modus wordt er na een opgaande flank van de externe blokglaf een opgaande spanning gegenereerd die bij het bereiken van het maximum weer direct terugspringt naar 0 V. Bij een dwell modus krijgt men na een opgaande flank van de blokglaf een opgaande spanning, waarna de spanning op het ingestelde maximum blijft. Zie figuur 7. Er wordt pas een neergaande spanning gegenereerd, als er vanuit de blokglaf een neergaande flank komt. Zie figuur 8.



Figuur 7. No-dwell modus, uit [12, p. 27]

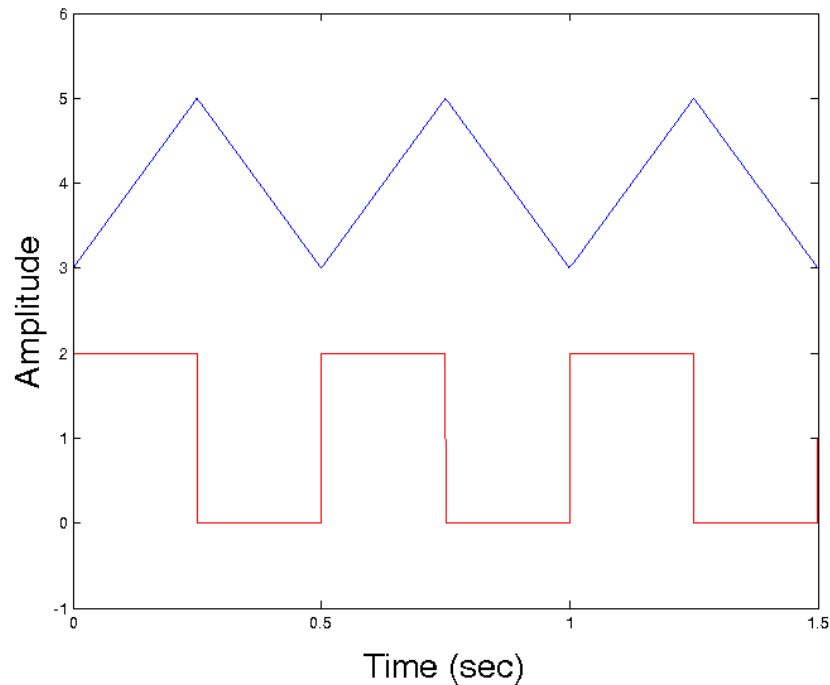


Figuur 8. Dwell modus, uit [12, p. 27]

Om een zaagtand te genereren moest de DDS in een no-dwell modus gezet worden door middel van een bit in een register. Hiervoor zouden wij via de SPI-interface de microcontroller van de KOR-module moeten benaderen, want via de FTDI-interface kan men dit niet instellen. Gezien het voor ons veel tijd zou kosten om ons hierin te verdiepen, werd er besloten om geen gebruik te maken van SPI.

Vanwege deze keuze moesten we werken met een driehoeksvorm van de DDS. Om een driehoeksvorm te krijgen, moest er een blokgolf aangeboden worden op de ramp up/down-ingang die snel genoeg was om op het juiste moment een op- of neergaande

flank te hebben. Hiervoor moet de upramp even groot zijn als de downramp, dus dat de blokgolf een dutycycle van 50% heeft en dat bij het bereiken van het gewenste maximum er weer een neergaande flank komt en bij het gewenste minimum weer een opgaande flank komt bij de blokgolf en bij het bereiken van het gewenste minimum weer een opgaande flank, enzovoort. (figuur 9)



Figuur 9. Zaagandspanning getriggerd op de rode blokgolf

De algoritmegroep had berekend dat er een modulatie diepte van 25 MHz gebruikt moest worden bij een ramp-time van 0.1 ms. Dit komt overeen met een sweeprate van 250 GHz/s. Het maximum van de KOR-module is 250 MHz in 1 ms, wat precies overeenkomt met een sweeprate van 250 GHz/s.

Door miscommunicatie is tijdens de metingen de gehele blokgolf ingesteld op een periodetijd van 0.1 ms. Hierdoor sweept de KOR-module maar gedurende 50 μ s omhoog. Dit resulteert in een modulatie diepte van 12.5 MHz. De afstandseigenschappen zijn met een factor twee verslechterd: Het bereik is gehalveerd door gehalveerde observatietijd en de afstandsresolutie is twee keer zo groot door gehalveerde modulatie diepte.

Inmiddels is de AVR microcontroller ingesteld op de juiste periodetijd van 0.2 ms. De KOR-module is als volgt ingesteld:

- Center Frequency: 24.125 GHz
- Span: 250 MHz

- Ramp time: 1 ms
- Number of Steps: 65535

Number of Steps hadden we zo groot mogelijk gezet opdat de resolutie van de uitgangsspanning van de DDS zo groot mogelijk is en de frequentieverschuiving van de VCO dus zo geleidelijk mogelijk verloopt.

5.3 Eisen KOR-module

Zoals te lezen in hoofdstuk 3, voldoen de observatietijd en range-resolutie voor classificatie van mensen. In tegenstelling tot de K-MC1, is het snelheidsbereik wel voldoende voor classificatie. Ook is het bereik van de KOR-module 1.8 km, wat dicht bij de beoogde 2 km is, en veel beter is t.o.v. de K-MC1.

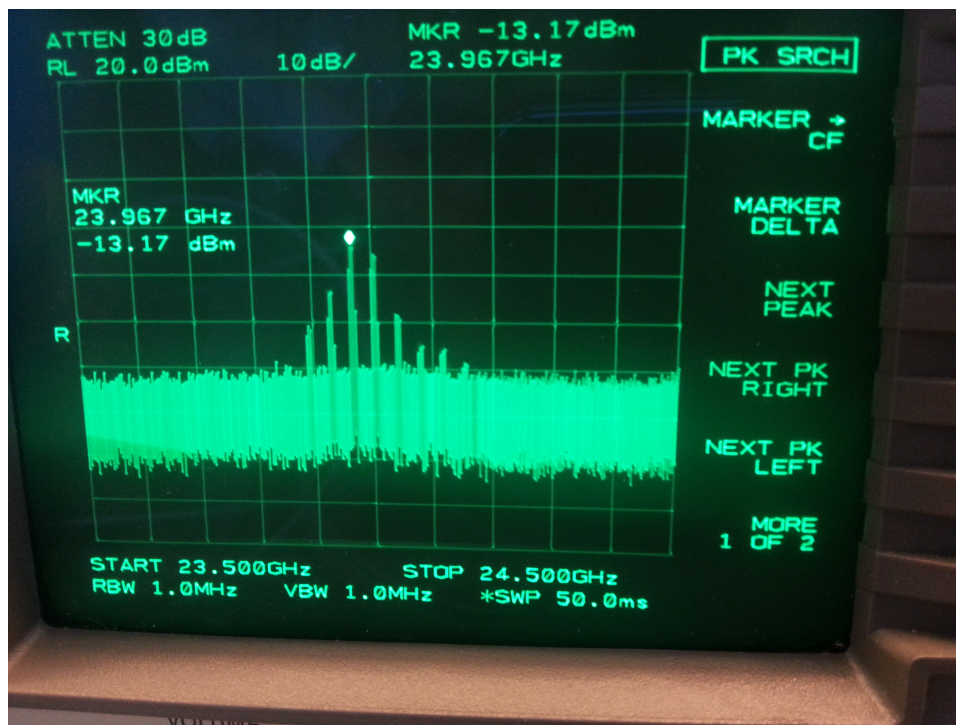
Hieruit volgen de theoretische waarden genoemd in tabel 4. Zie bijlage A voor de berekening van deze waarden.

K-MC1 module theoretische waarden:

Variabele	Waarde
Sampling frequentie	6 MHz
Range	1.8 km
Range resolution	3 m
N_{ramps}	400
Maximale doppler snelheid	14.06 m/s
Doppler resolutie	0.091 m/s

5.4 Verificatie KOR-module

Voor de verificatie van de werking KOR-module hebben we gebruik gemaakt van de eerder besproken meetopstelling (zie hoofdstuk 5.1 en figuur 5). Eerst wilden we kijken of de KOR-module wel een vaste frequentie uit kon zenden volgens de instellingen die via de FTDI-interface waren opgegeven. Op de spectrum-analyzer kregen wij een spectrum te zien dat ongeveer gelijk was aan figuur 10. Hierbij hadden wij de hoorn (de ontvangstantenne van de spectrumanalyzer) op een afstand van 30 cm van de radar module geplaatst. Bij deze meting was de KOR-module



Figuur 10. Spectrum op de analyzer

ingesteld op 24 GHz. Hierbij zijn er duidelijk nog images te zien van een mixer binnen de KOR. Het blijkt dat de afstand tussen de pieken ongeveer 40 MHz bedraagt. Als men kijkt naar het blokschema van de KOR-module (zie bijlage C) dan ziet men voor de Tx-antenne nog een Image-Reject Mixer, waar het I/Q-signaal gemengd wordt met het LO-signaal. In de tabel "Characteristics" van de datasheet ziet men onder "Transmitter" de Transmit Frequency, waarbij de beschrijving staat dat de Tx-frequentie de LO-frequentie + 40 MHz is. Hieruit concluderen wij dat de images veroorzaakt worden door de mixer.

Als extra verificatie hadden we op de uitgang van de KOR-module een oscilloscoop aangesloten. Hiermee konden we zien hoe de KOR-module reageerde als we

bewegingen maakte voor de radar. Bij de meting met de spectrumanalyser bleek dat de KOR-module op een f_c van 23 GHz uitzond. Volgens de documentatie van de KOR-module zou de radar maar tussen de 23.540 GHz en 24.540 GHz mogen uitzenden. Gezien het schema en gegevens van de KOR zouden er de volgende dingen aan de hand kunnen zijn:

- De oscillatorswitch zou de verkeerde oscillator kunnen hebben geselecteerd. Voor de zekerheid werd deze ingang op de ground worden gezet, waardoor de switch de interne oscillator selecteert.
- De opamp na de Image-Reject mixer zou niet goed zijn aangeschakeld. Door de PA-ingang op ground te schakelen zou deze ingeschakeld moeten zijn.
- Het signaal van de functiegenerator op de ramp up/down-ingang zou niet de juiste waarden van 3.3 V en 0 V hebben voor het hoog en laag signaal. Dit kunnen we met een oscilloscoop controleren.
- De instellingen via de FTDI zouden niet goed kunnen staan. Deze kunnen we voor de zekerheid controleren.
- Mocht de functiegenerator een juiste blokglof genereren en staan de instellingen goed, dan zouden we kunnen kijken op de spectrumanalyser of de frequentie nu wel verschuift.
- Mochten wij niets zien, dan kunnen we voor de zekerheid nog op de ramp up/down een vast hoog signaal aanbieden om te kijken op de spectrum analyzer of de frequentie niet naar een vaste frequentie toe gaat. Dit omdat de refreshrate van de spectrumanalyser maar 50 ms was, en er dus een kans bestaat dat we het spectrum niet zien verschuiven, omdat de verschuiving te snel zou gaan.
- De uitgang van de KOR controleren of deze een verschilfrequentie laat zien als we een bewegend voorwerp in de radar plaatsen, zoals met de hand voor de radar bewegen.

De ingang van de oscillatorswitch en de PA-ingang hadden wij op de ground aangesloten. Op de oscilloscoop was er een blokgolf te zien van de functiegenerator met 0 V en 3.3 V. Als de KOR-module via de FTDI-interface op FSK werd gezet, dan zagen wij de frequentie verschuiven naar de ingestelde frequentie, bij zowel de CW-als FMCW-modus werd er nog steeds een signaal van 23 GHz uitgezonden. Ook als wij de f_c aanpasten, veranderde er in deze twee modi niets op de spectrumanalyser. Als wij op de ramp up/down ingang een vaste spanning aanboden bleek de frequentie niet verschoof naar een ander vast punt en op een f_c 23 GHz bleef. Op de oscilloscoop namen wij waar dat er bij geen beweging voor de radar er geen signaal uit kwam en bij beweging voor de radar zagen wij een signaal met een grote amplitude.

Na al deze stappen te hebben doorlopen waren we tot de conclusie gekomen dat deze KOR-module niet goed functioneert.

Thales kon ons van een andere KOR-module voorzien. Na nogmaals de spanning, blokgolf en de rest van de ingangen te hebben gecontroleerd, sloten wij deze KOR-module aan. Bij deze module scheen de FMCW-modus ook niet te werken. Na het doorlopen van het stappenplan deden wij nog een extra controle op de kabels die naar de KOR-module liepen. Toen kwamen wij erachter dat bij de connector van bandkabel

naar pin-header van de KOR-module, het kanaal voor de ramp up/down-ingang kapot was. Nadat de connector gerepareerd en doorgemeten was, bleek na controle op de spectrum analyzer dat deze KOR-module wel werkte als wij een blokgolf aanboden op de ramp up/down van de KOR-module.

6 FUNCTIEGENERATOR

Voor de FMCW-modus van de KOR-module is er een externe blok golf nodig voor de triggering. Eerst gebruikten wij hier een functiegenerator voor. Aangezien het één van onze eisen was om zo veel mogelijk hardware in de behuizing te bouwen, was ervoor gekozen om de functiegenerator te vervangen door een microcontroller.

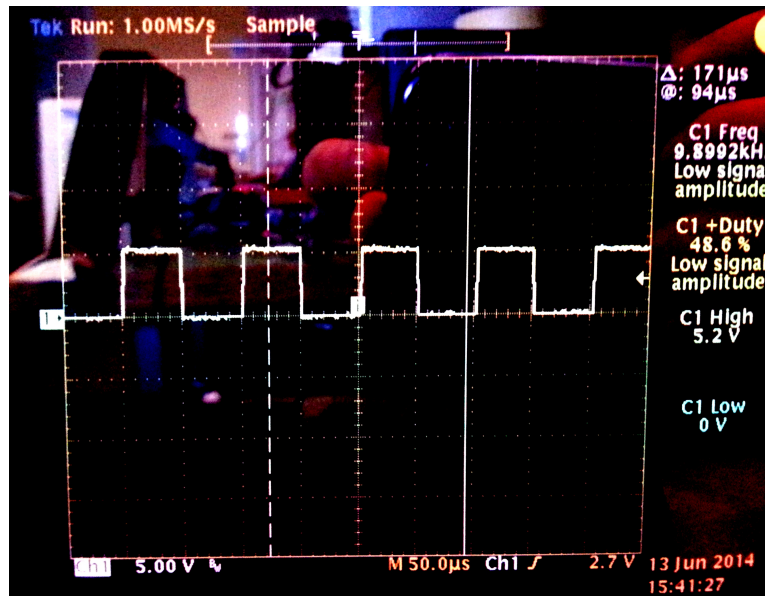
6.1 Arduino

Eerst werd ons vanuit de TU Delft een Arduino Mega 2560 aangeboden. Deze hebben wij min of meer de gewenste blok golf kunnen laten maken. De frequentie was echter niet stabiel genoeg en was niet precies in te stellen door het relatief hoge niveau van de programmeertaal, dus is er gekozen voor een microcontroller.

6.2 AVR ATmega16

De AVR ATmega16 is een microcontroller die voor derdejaarsstudenten van de TU Delft makkelijk te gebruiken is; in een van de vakken die in het kwartaal vóór het Bachelor Afstuderen wordt gegeven is deze behandeld. Er was nog code voor een zoemer voorhanden van een van de groepsleden; die heeft deze gedeeld. De code is later aangepast naar een 10 kHz-blok golf. Zie 11. Na metingen bleek er miscommunicatie geweest te zijn; er moest een 5 kHz-blok golf aangeboden worden. Inmiddels is de AVR geherprogrammeerd, en heeft een periodetijd van 0.2 ms. Uit de AVR komt een blok golf met een spanning van 5.2 V. Dit is geverifiëerd met een oscilloscoop, zie figuur 11. Deze moet nog d.m.v. een spanningsdeling omlaag worden getransformeerd naar de 3.3 V die de KOR-001 wil.

Omdat de duty cycle niet heel constant lijkt te zijn, hebben we gekozen voor een kleine offset: de positieve duty-cycle is nu 48.6% en de negatieve duty-cycle is nu 51.4%. Als de positieve duty-cycle iets groter is dan de negatieve, zal de frequentie van de VCO langzaam omhoog lopen doordat er langer omhoog gegaan wordt dan omlaag. We gebruiken niet de hele modulatie diepte van 250 MHz, maar slechts de laagste 50 MHz hiervan. Er is dus ruimte voor skewing naar hogere frequenties. Nu is het wel zo dat onze frequentie geen heel nette driehoeksgolf uitstuurt. Omdat - en dit is geverifiëerd met de processing-groep - niet heel de sweep wordt gebruikt, maar ongeveer 90% van de upsweep, kan dit geen kwaad.



Figuur 11. AVR-output op de oscilloscoop

6.3 Spanningsdeling

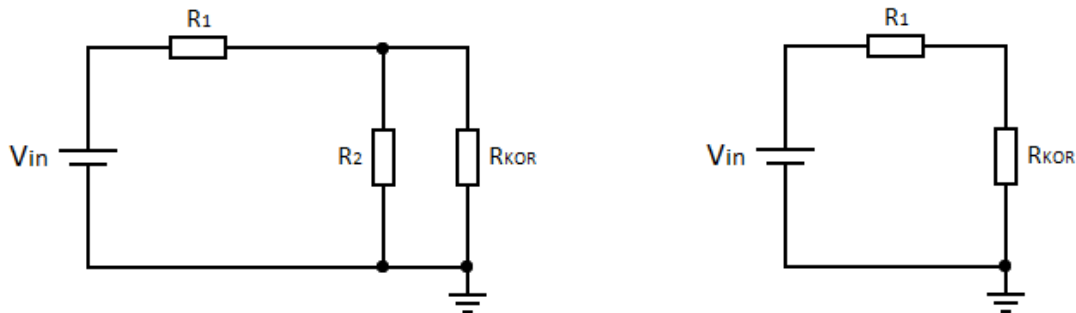
Volgens de specificaties heeft de KOR-module voor het ramp up/down signaal een spanning van 0 V en 3.3 V nodig, met voor het hoge signaal een minimum van 2.4 V. Uit de Arduino kwam er een spanning tussen de 0 V en 5.0 V. Aangezien er geen maximumspanning was gedefinieerd voor het hoge signaal bij de KOR-module, hebben we aangenomen dat de KOR-module maar 3.3 V aan kon en dus besloten om een spanningsdeling toe te passen tussen de microcontroller en de ingang van het ramp up/down van de KOR-module.

6.3.1 Parallelschakeling

De ingangsimpedantie van de KOR-module was niet bekend. Hierbij hebben wij de aanname gemaakt dat deze minimaal 1 k Ω moest zijn. Omdat de ingangsimpedantie niet bekend was hadden wij besloten om de spanningsdeler parallel aan de ingang van de KOR-module aan te sluiten. Bij een parallelschakeling geldt dat de kleinste weerstand de grootste invloed heeft op de totale weerstand en dus ook welke spanning deze parallelschakeling in de serieschakeling krijgt. Om de juiste spanningsdeling te krijgen begonnen we iteratief de waarde van de weerstand R_2 te verhogen. We begonnen met een weerstand van 100 Ω en kwamen uiteindelijk op een weerstand van 320 Ω totdat de gewenste spanning bereikt was.

6.3.2 Serieschakeling

Toen wij de AVR gingen gebruiken leek het ons beter om van een parallelschakeling over te stappen op een serieschakeling, want dan hoeven wij maar één weerstand te



Figuur 12. Parallelschakeling (l) en serieschakeling van (r) van de spanningsdeler

gebruiken in plaats van 2 weerstanden, daarnaast bleek er minder vermogen gebruikt te worden (zie hoofdstuk 6.4). De AVR-microcontroller had spanningsniveaus tussen de 0 V en 5.2 V.

Om te bepalen welke weerstand R_1 gebruikt moest worden hebben we gebruik gemaakt van een weerstand van 1.8 k Ω en de functiegenerator. Bij de functiegenerator werd de spanning V_{in} vanaf 0 V incrementieel verhoogd tot 2 V. Over de R_{KOR} bleek een spanning te staan van 0.67 V. De frequentie is gevarieerd van 1 kHz tot 100 kHz, om het frequentieafhankelijke gedrag te bekijken. Hierbij bleef de spanning constant, waaruit volgt dat $R_{KOR} = 3573\Omega$ en geen reactantie heeft. Uiteindelijk is er voor R_1 een weerstand van 2.2 k Ω gebruikt. Deze hogere weerstandswaarden zorgen ook voor een lagere stroom, en dus wordt er minder vermogen verstoekt in de weerstanden. Op de oscilloscoop zagen wij uiteindelijk een mooie spanning van 3.2V.

6.4 Vermogensverbruik

Middels een simpele online-simulatie kunnen de geleverde en opgenomen vermogens berekend worden. [13] De Arduino Mega 2560 leverde een spanning van 5.0 V bij een logische "1". Over R_{KOR} stond volgens de meting en de simulatie een spanning van 2.4 V. Qua vermogensverdeling is deze schakeling niet ideaal. Vanuit de simulatie volgt dat de KOR-module 1.6 mW opneemt van de 41 mW. Deze schakeling heeft een efficiëntie van 3.9%, dit komt doordat deze schakeling een relatief lage totale weerstand heeft.

De AVR AT Mega 16 leverde een spanning van 5.2 V bij een logische "1". Over R_{KOR} stond er een spanning van 3.2 V en verbruikte 2.9 mW. Omdat de totale weerstand veel hoger is dan de parallelschakeling, loopt er minder stroom. Er wordt maar 4.7

mW totaal gebruikt. Het rendement hierbij is 61.7%, wat een significante verbetering is t.o.v. de parallelschakeling.

7 BEHUIZING

De behuizing is het uiteindelijke resultaat van ons hardware-onderdeel. Alle benodigde mobiele apparatuur moet hier in komen. In de groep is besloten om de ADC en DSP in de computer te laten, omwille van de tijd. Onze behuizing heeft een aantal eisen:

- De behuizing moet klein zijn en handzaam zijn
- Zo veel mogelijk hardware moet in de behuizing passen
- De radarmodule moet beschermd tegen weersomstandigheden en hitte
- Er moeten zo min mogelijk bewegende onderdelen in de behuizing komen

In de behuizing moesten de volgende onderdelen komen:

- KOR-module
- Camera
- Printplaat voor de connectoren en het filter
- Printplaat voor de AVR-microcontroller

Hierbij zaten wij er ook nog aan te denken om een symmetrische voeding in de behuizing te monteren. Dit om onder andere het filter te voorzien van een spanning van $\pm 12V$. Gezien de kosten, en het feit dat er toch al een computer extern gebruikt wordt, leek het ons beter om een externe symmetrische voeding te gebruiken.

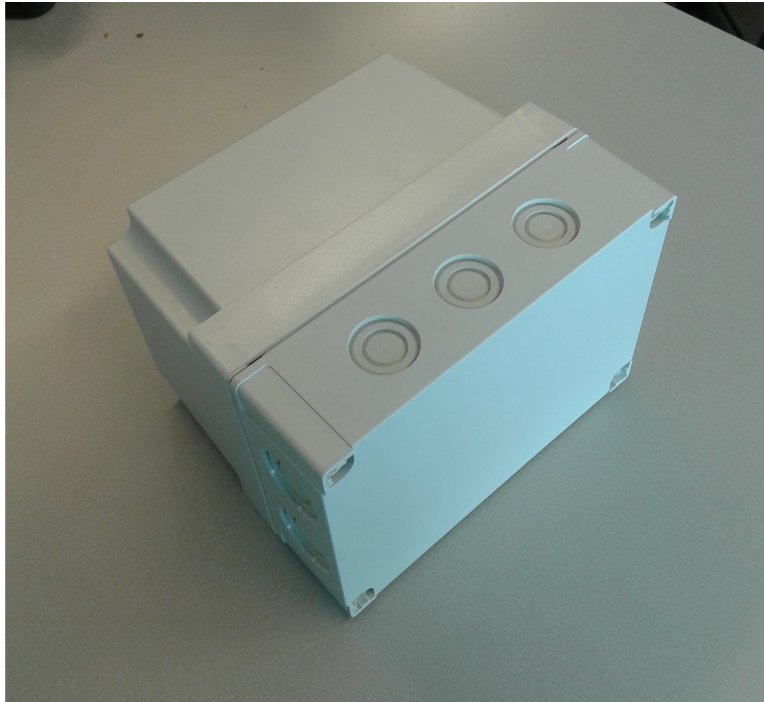
De KOR heeft een frontoppervlak van 11x11 cm en daarnaast moest een webcam met een diameter van 2.5 cm erin passen. Op basis hiervan is besloten een behuizing van 18x15x13 cm te bestellen.

Op de PCB komen alle connecties voor de KOR. Aangezien de PCB nog in de maak is, kunnen we alleen een concept voor de uitgangen meenemen. Na metingen blijkt de PCB maximaal een afmeting van ongeveer 15x12 cm te mogen hebben. Voor de behuizing hebben we in samenspraak met de processinggroep de volgende in- en uitgangen bepaald:

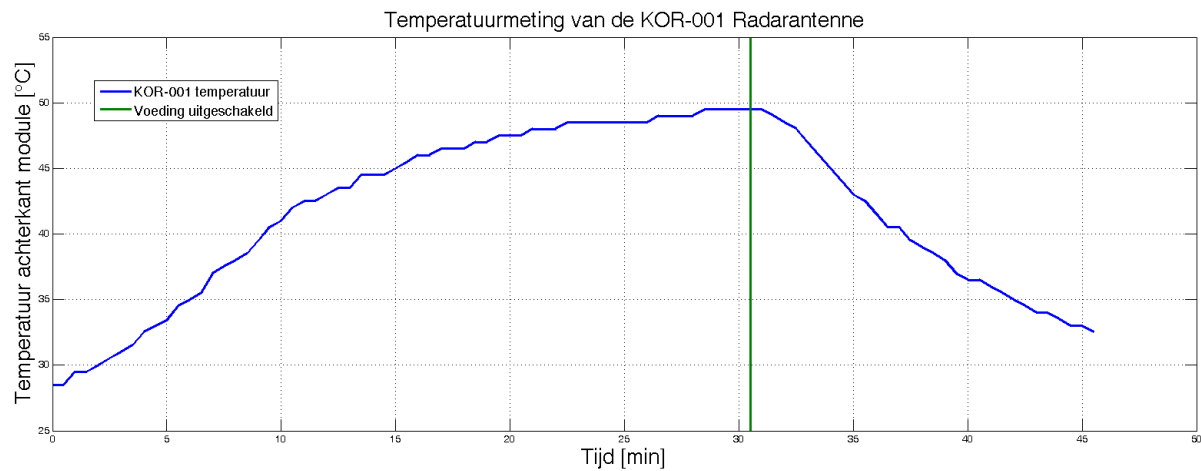
- 6 SMA-connectoren voor de I/Q- en angle-uitgangen van de Rx_1 en Rx_2 antenne.
- 1 SMA-connector voor het trigger signaal vanaf de AVR
- 1 SMA-connector voor de referentie 100 MHz klok van de KOR-module
- 1 USB-ingang
- Connectoren voor de voeding (+12 V, 0 V en -12 V)

De KOR-module bleek ook heel erg warm te worden. Vandaar dat wij een warmtemeting bij de KOR-module hebben uitgevoerd om te kijken hoe warm de module wordt.

Uit de meting blijkt de KOR-module na enige tijd ongeveer 50°C te worden. Dit was voor ons ook de aanleiding om de module actief te gaan koelen. Hierbij hebben we besloten om een koelelement op de achterkant van de module te bevestigen en in de behuizing kleine fans te plaatsen om de warmte af te voeren. De fans zijn mechanische onderdelen, wat meer onderhoud zou kunnen gaan kosten. In plaats van fans zou men Peltier-elementen kunnen gebruiken als koelelementen, aangezien deze geen mechanische bewegende onderdelen heeft. Na controle bleek de gebruikte manier van koelen afdoende om de geproduceerde hitte af te voeren.



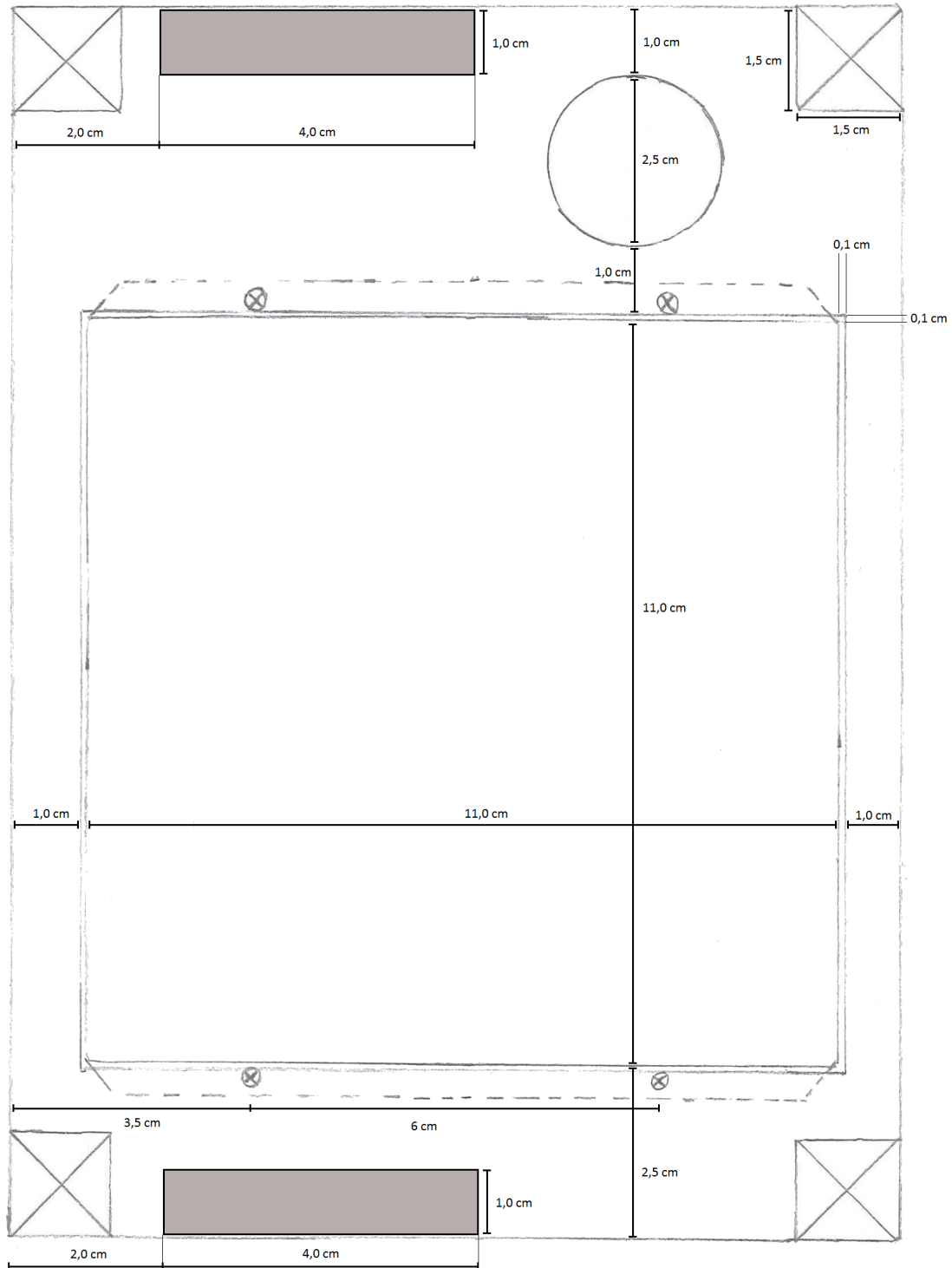
Figuur 13. Behuizing



Figuur 14. Temperatuurmeting van de achterkant van de KOR-001 radarmodule vanaf aanzetten. Bij de groene lijn is de voeding uitgeschakeld.

De radargolven kunnen niet door het plastic van de behuizing heen. Vandaar dat er voor de KOR-module een gat komt met schuim ervoor, wat de module beschermt tegen het weer, maar wel de radargolven doorlaat. Op basis van de eisen hebben we

het ontwerp gemaakt. In figuur 15 is het vooraanzicht getekend en in bijlage D is het zijaanzicht en achteraanzicht getekend. Bij de figuren in de bijlage zijn ook met stippellijnen de maximale afmetingen voor de PCB aangegeven. Bij het achteraanzicht zijn de SMA- en USB-aansluitingen ter illustratie weergegeven. Omdat het PCB-ontwerp nog niet af is, is de plaatsing van de PCB en uitgangen nog niet definitief.



Figuur 15. Vooraanzicht KOR, de grijze vlakken zijn de fans

8 EVALUATIE

Eerst hebben we ons ingelezen middels een literatuuronderzoek en met de K-MC1 ons geïntereerd op radarmodules. Wel bleek groepsproces niet goed te gaan; er was geen communicatie tussen de groepen en dus enige verschuiving van de taken. Uiteindelijk is dit, na overleg met onze begeleider, opgelost, maar dit zorgde voor slechte samenwerking. Na de K-MC1 aan de praat gekregen te hebben, hebben wij onze code overgedragen aan de groep van het algoritme. Toen zijn we aan de hardware bezig gegaan.

De K-MC1 hebben we gebruikt om ons te oriënteren op radarmodules. CW is goed gelukt, FMCW kon niet volledig worden aangestuurd.

Met de KOR-module zijn we lang bezig geweest om deze werkend te krijgen. Ondanks gebrekkige documentatie is het ons wel gelukt om deze radarmodule in te stellen. Gelukkig was er wel goede support vanuit Thales, en RFbeam[®]. Er waren wel beperkingen aan de aansturing van de KOR-module, hierdoor hebben we niet volledig aan de eisen van de algoritmegroep kunnen voldoen. Wel hebben we de aansturing zodanig kunnen instellen, dat we bruikbare data hebben kunnen genereren met de KOR-module. Aan de hand van de gebruikte methodes hebben we de KOR-module goed kunnen evalueren. Wel heeft het veel tijd gekost om de problemen van de kapotte KOR-module te onderzoeken.

De functiegenerator hebben we goed kunnen instellen. Omdat een kast van een functiegenerator te groot is en we deze graag in willen bouwen, hebben we voor een microcontroller gekozen. Eerst was dit de Arduino Mega 2560. Er bleek inconsistentie te zijn van de frequentie van de Arduino, hetgeen de aansturing van de KOR-module niet ten goede kwam. In plaats van de Arduino hebben dus een AVR ATmega16 gebruikt. Deze was simpel te implementeren door voorgaande ervaring met de AVR ATmega16. Deze bleek een blokgolf te genereren met constante frequentie. Er was een kleine schommeling in de duty-cycle. Hierdoor is besloten de duty-cycle net iets kleiner dan 50% te maken. Dit zodat de frequentie niet "wegloopt". De KOR-module had voor een logische "1" een spanning van 3.3V nodig. De Arduino en de AVR leverden niet deze spanning. Hiervoor was een serie- en parallelschakeling gecomplementeerd, waarbij de serieschakeling de hoogste efficiëntie had. We hebben aan alle eisen kunnen voldoen wat betreft de functiegenerator.

Het was duidelijk welke componenten er in de behuizing zouden moeten komen, waardoor de afmeting goed te kiezen was. Aan de hand van overleg met de processinggroep hebben we besloten welke onderdelen in de behuizing geplaatst worden. Ook kan de behuizing niet volledig waterdicht te zijn door het gebruik van ventilatoren voor de koeling van de KOR-module. We hebben geen tijd gehad om naar de implementatie van andere oplossingen te kijken. Wel is het ons gelukt om

de KOR-module via de huidige koelingsmethoden goed te koelen, waardoor we voldeden aan de eisen die wij aan de behuizing stelden konden voldoen.

9 CONCLUSIE

9.1 Hardware

Aan de hand van de eisen aan de aansturing en de behuizing, kunnen we concluderen dat de aansturing van de KOR-module voor een groot gedeelte is gelukt. Ons is gelukt FMCW-data uit de KOR-module te verkrijgen. De radarmodule blijft koel en beschermd. De functiegenerator geeft een stabiele blokgolf. In de behuizing zitten nu de radarmodule, de functiegenerator, koeling, en een webcam ingebouwd.

Het is ons niet gelukt om ook de voeding in te bouwen; dit met het oog op de gestelde tijd. De behuizing is niet volledig waterdicht. Dit komt door de koeling; we hebben gekozen voor een effectieve manier die berust op ventilatoren. Hierdoor zijn er luchtgaten nodig om lucht aan te zuigen. Hier kan dus ook water doorheen.

Ook gebruiken we nu een driehoeksvorm i.p.v. een zaagtandvorm om de VCO van de radarmodule aan te sturen. Dit had te maken met de DDS in no-dwell modus kunnen zetten; wij konden dit niet door de interface die RFbeam[®] heeft aangebracht. Een zaagtand zou effectiever zijn, maar helaas is dit ons niet mogelijk gemaakt.

9.2 Systeem

De origineel gestelde eisen aan het systeem zijn:

- De radar moet autonoom zijn in het detecteren van mensen en/of een voorwerp. Zo is er niet veel personeel nodig, dit scheelt in de kosten en voorzieningen
- De radarmodule moet goedkoop zijn om het systeem economisch aantrekkelijk te laten zijn.
- Het is wenselijk dat de radarmodule een grote afstand kan overbruggen, zodat het aantal te plaatsen modules gereduceerd kan worden.
- De radarmodules moeten onderhoudsarm zijn, ook om kosten te drukken.
- De radarmodules operen buiten, dus moeten ze onder elke weersomstandigheid werken.
- Er moet een communicatie komen met een centrale, waar meldingen van gedetecteerde mensen aan kan worden gedaan
- De modules moeten klein genoeg zijn om op te hangen langs het spoor.

Wij hebben aan de technische eisen voldaan. De radarmodule kan een grote afstand overbruggen: 1.8 km. Door het gebruik van radartechnologie kan ons systeem onder elke weersomstandigheid werken, en is het onderhoudsarm. Ook is de behuizing klein genoeg om in het spoorlandschap op te nemen.

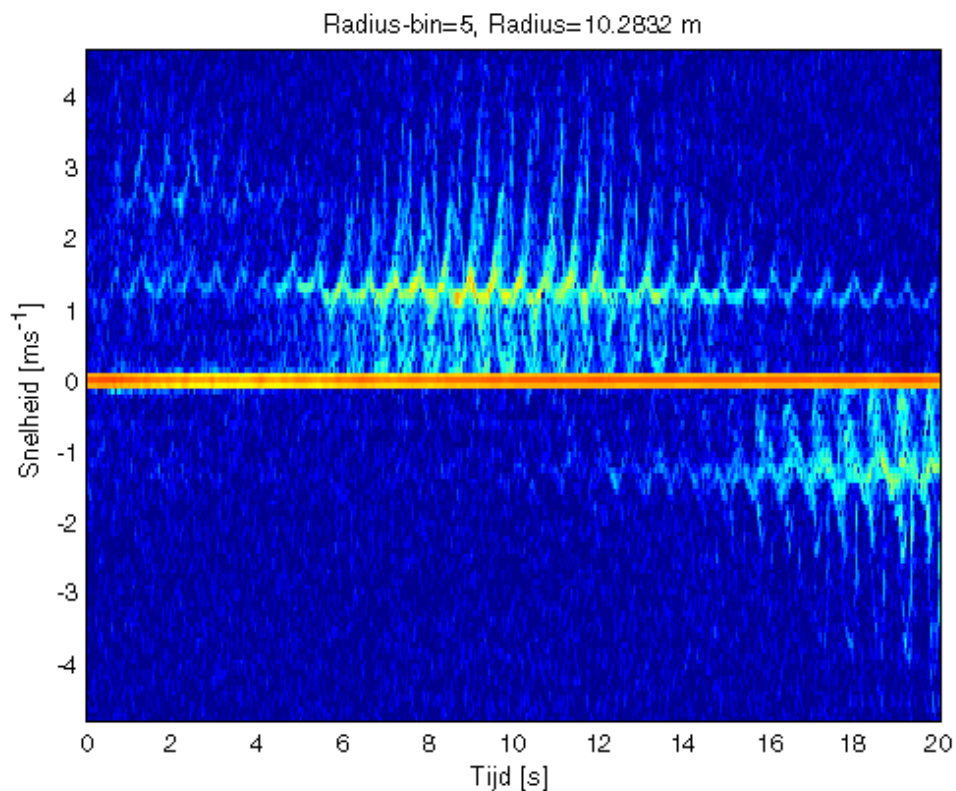
Wel is er in het prototype actieve koeling gebruikt, waardoor meer onderhoud nodig is. Ons systeem is niet autonoom, en ook niet verbonden aan een centrale. Ook kunnen wij geen kostenschatting maken. Doordat ons systeem slechts een proof-of-concept is, zijn deze 4 punten niet erg.

Radar lijkt ons nog steeds een goed alternatief voor het geschetste probleem.

9.3 K-MC1

De K-MC1 heeft ons geholpen bekend te raken met radartechnologie. We konden niet van de hele modulatie diepte van de K-MC1 gebruik maken, maar wel is gelukt de interface te verzorgen. Een deel van onze code is hergebruikt voor de KOR-module, hiervoor is de code wel aangepast door de algoritme-groep. De prestaties van de K-MC1 waren, zoals eigenlijk verwacht, niet voldoende om mensen te detecteren.

In figuur 16 is het resultaat te zien. Op ongeveer 10 m is een “slice” gehaald uit de FMCW-data. Op 10 s passeert op 10 m een mens die van de radar wegloupt. Op 20 s passeert een persoon die naar de radar toe loopt.



Figuur 16. Het resultaat van het algoritme-groepje van FMCW-data [9].

9.4 KOR-001

De verificatie van de werking van de KOR-module was via de huidige meetopstelling vrij eenvoudig te bepalen. Wel kunnen wij niet volledig aan de eisen van de algoritme-groep voldoen, doordat wij geen zaagtandspanning uit de DDS hebben kunnen genereren voor de VCO. Ondanks de beperkte documentatie hebben wij de KOR-module kunnen instellen naar de gewenste specificaties. De numerieke eisen

van Thales om personen te classificeren zijn gehaald. Wel is er door miscommunicatie twee keer te snel getriggerd, maar de functiegenerator is aangepast, zodat de juiste triggersignaal gegenereerd worden.

9.5 Functiegenerator

Aan de gestelde eisen voor de functiegenerator is voldaan; er is een blokgolf van 10 kHz gegenereerd, met een spanning van 3.3 V. Wel was hier een spanningsdeling voor nodig. Hierbij wordt een serieschakeling gebruikt, aangezien deze het hoogste rendement had. Hier is de KOR-module in opgenomen. Ook is de de generator ingebouwd in de behuizing, door te kiezen voor een AVR-microcontroller i.p.v. een kast van een functiegenerator. Het triggersignaal is ook beschikbaar gemaakt aan de buitenkant van de behuizing, zodat de verwerkingseenheid goed kan triggeren.

9.6 Behuizing

Bij de behuizing is het gelukt om enkele hardwareonderdelen in te bouwen. Omdat dit nog een concept is, is het nog niet erg dat de andere onderdelen nog niet in de behuizing ingebouwd zijn. Deze kunnen immers later nog in de behuizing gebouwd worden. Door het gebruik van actieve koeling is de behuizing niet meer waterdicht, door een andere manier van bouwen of koelmethodes zou de behuizing op dit punt wel waterdicht gemaakt kunnen worden. Gezien de weinige tijd die wij hadden zijn wij er niet meer aan toe gekomen om hieraan verder te werken. Verder hebben wij de KOR-module kunnen goed kunnen koelen en ook is er schuim geplaatst voor de module. Hierdoor is de radar beschermd tegen de weersomstandigheden.

De behuizing voldoet niet volledig aan de gewenste specificaties, slechts gedeeltelijk. Er is ruimte voor verbetering, maar gezien de tijd die wij voor ons project, hebben we compromissen moeten sluiten.

9.7 Toekomst

In het vervolg zou de behuizing waterdicht gemaakt kunnen worden. Een passieve koelmethode die ook voldoet aan de warmte-ontwikkeling van de KOR-module moet dan gerealiseerd worden. Ook zou er meer hardware ingebouwd kunnen worden, zoals de voeding, de ADC, de DSP, etc. Er kan gekeken naar een SPI-interface met de KOR-module, om met een zaagtand in plaats van een driehoek de VCO te moduleren. Ook is een verbinding naar een centrale nog te realiseren.

DEFINITIELIJST

Hieronder volgt een lijst met alle definities.

CW	Continous-wave radar. Radartechniek met enkele frequentie. Alleen geschikt voor snelheidsmeting.
FMCW	Frequency-modulated continous-wave radar. Radartechniek waarbij over een frequentiebereik wordt gemoduleerd. Geschikt voor afstandsmeting, minder voor snelheid.
Dopplereffect	Het verschijnsel dat een object met een snelheid t.o.v. de waarnemer, zal gereflecteerde frequenties moduleren, evenredig met de radiële snelheid.
Micro-doppler	Kleine karakteristieken in het dopplereffect. Uitgelegd in bijlage A.
ISM-band	Frequentieband in het EM-spectrum. Loopt van 24.000 GHz tot 24.250 GHz. Is vrij te gebruiken voor onderzoek.
Observatietijd	Tijdsinterval voor één waarneming.
Elevation	Hoek tussen de kijkrichting en het grondvlak
Azimuth	Hoekverdraaiing van de kijkrichting over het grondvlak; rechtsom t.o.v. "rechtdoor".
FSK	Frequency Shift Keying. Modulatietechniek waarbij van twee frequenties gebruikt wordt gemaakt.
PLL	Phase-locked loop. Onderdeel van radardetectoren om een goede timing te verkrijgen
LO	Local Oscillator. Onderdeel van radardetectoren. Gebruikt om het informatiesignaal van basisband naar RF of vice-versa te moduleren
I/Q	Het teruggemixte complexe signaal kent twee kanalen: een in-fase- en een quadratuurkanaal. Uitgelegd in bijlage A.
RF	Radiofrequentie. De frequentie waarop het signaal wordt uitgezonden.
VCO	Voltage-controlled oscillator. Een component waarbij de uitgestuurde frequentie afhangt van de spanning op de ingang, meestal lineair.
DSP	Digital Signal Processor. Apparaat dat de digitale signaalverwerking verzorgt.
ADC	Analog-to-digital converter. Zet signalen van het analoge domein om naar het digitale domein.
Filter	De interface tussen de KOR-001 radarmodule en de ADC van de computer. Het spanningsbereik van de KOR-module (0 tot 5 V) en de computer (-2 tot +2 V) komen niet overeen.
Sweep-signaal	Het aan de KOR-module aangeboden signaal.
FTDI	Bedrijf dat de USB-kabel voor seriële communicatie met de KOR-module levert.
SPI	Serial Peripheral Interface. Protocol voor seriële communicatie.
DDS	Direct Digital Synthesizer. Dedicated hardware om golfvormen te genereren.
Dwell	Uitgelegd in hoofdstuk 5.2.
No-dwell	Uitgelegd in hoofdstuk 5.2.
PCB	Printed circuit board. Een voorbedrukte printplaat.
SMA	SubMiniature version A. Type coaxiale RF-connector met 50 Ω impedantie.
AVR	De AVR atmega16 microcontroller
Arduino	De Arduino Mega 2560 microcontroller
Microcontroller	Een microprocessor die wordt gebruikt om elektronica aan te sturen en via bijv. Assembly kan worden geprogrammeerd.

REFERENTIES

- [1] J. Kole. (2009) zoefzoef. [Online]. Available: http://www.flickr.com/photos/joelle_kole/4195048490/
- [2] *ProRail jaarverslag*. Prorail, 2012.
- [3] S. Groot, "Model-based classification of human motion using a particle filter approach," Ph.D. dissertation, TU Delft, 2011.
- [4] C. P. N. Maaref, P. Millot and O. Picon, "A study of uwb fm-cw radar for the detection of human beings in motion inside a building," in *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 47, no. 5, may 2009.
- [5] Z. Jun, "Analysis of radar human gait signal based on fractional fourier transforms."
- [6] Q. L. Yazhou Wang and A. E. Fathy, "Cw and pulsedoppler radar processing based on fpga for human sensing applications," in *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 51, no. 5, may 2013.
- [7] B. Ye and Y. Zhang, "Improved fpga implementation of particle filter for radar tracking applications," in *2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, 2009.
- [8] R. I. A. Harmanny and A. Yarovoy, "Radar/eo security sensor against train suicide, station safety and copper theft," 2014, bap proposal.
- [9] R. B. en P. G. Lagerweij, "Fmcw radar algoritme ontwikkeling voor de detectie en classificatie van mensen gebruik makend van het μ doppler-effect," 2014, bachelor thesis, Delft University of Technology.
- [10] A. M. Flipse and J. P. Coenen, "Signaalverwerking van een radarsysteem voor spoorbewaking," 2014, bachelor thesis, Delft University of Technology.
- [11] "St-100 starterkit," RFbeam Microwave GmbH, Tech. Rep., 2010, user manual of the ST-100 Starterkit.
- [12] "4-channel, 500 mspms dds with 10-bit dacs," Analog Devices, Inc., Tech. Rep., 2005-2008, datasheet of the AD9959.
- [13] Falstad circuit simulator applet. [Online]. Available: <http://www.falstad.com/circuit/>
- [14] C. Wolff. (2006) Radartutorial.eu. [Online]. Available: <http://www.radartutorial.eu/11.coherent/co06.en.html>
- [15] W. Wiesbeck, "Lecture script radar system engineering," 2003/2004.
- [16] V. C. Chen, *The Micro-Doppler effect in Radar*, 2011.
- [17] J. Figueras i Ventura, *Design of a High Resolution X-band Doppler Polarimetric Radar*, 2009.
- [18] "K-mc1 radar transceiver," RFbeam Microwave GmbH, Tech. Rep., 2013, datasheet of the K-MC1.
- [19] "Kor-001 3d radar transceiver," RFbeam Microwave GmbH, Tech. Rep., 2013, datasheet of the KOR-001.

LIJST VAN FIGUREN

1	Blok-schema van het systeem	4
2	De ST-100 en K-MC1	6
3	De overdracht van RadarFilter.m	7
4	KOR-module	9
5	Meetopstelling voor de KOR-module	10
6	De interface van de KOR-001	11
7	No-dwell modus, uit [12, p. 27]	12
8	Dwell modus, uit [12, p. 27]	12
9	Zaagtandspanning getriggerd op de rode blokgolf	13
10	Spectrum op de analyzer	15
11	AVR-output op de oscilloscoop	19
12	Parallelschakeling (l) en serieschakeling van (r) van de spanningsdeler	20
13	Behuizing	23
14	Temperatuurmeting van de achterkant van de KOR-001 radar-module vanaf aanzetten. Bij de groene lijn is de voeding uitgezet.	23
15	Vooraanzicht KOR, de grijze vlakken zijn de fans	25
16	Het resultaat van het algoritme-groepje van FMCW-data [9].	29
17	Voorbeeld radarreflectie	34

18	Dopplersnelheid-tijd grafiek	35
19	Het blokschema van een FMCW-Radar	36
20	De uitgaande en ingaande signalen bij een antenne in FMCW-Modus. Met Tx het uitgezonden en Rx het ontvangen signaal met een tijdvertraging τ . ΔT is de periodetijd van de zaagtand en ΔF de modulatiediepte.	37
21	Schets van de zijkant van de behuizing.	51
22	Schets van de achterkant van de behuizing. Afmetingen: 12x17 cm	52

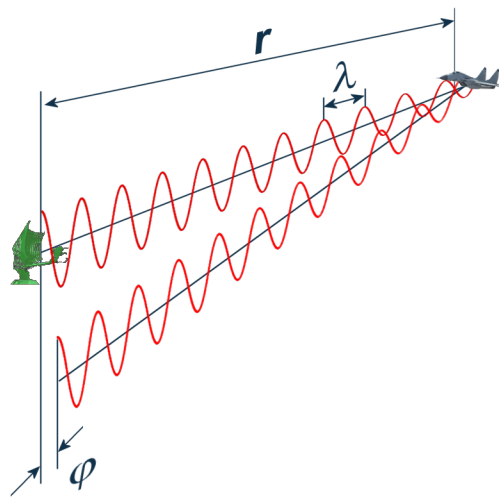
BIJLAGE A

THEORETISCHE ACHTERGROND

Met Radartechnologie kan gebruik gemaakt worden van een ongemoduleerde frequentie waarop verzonden wordt (continuous-wave radar [CW]) of een gemoduleerde draaggolf (frequency-modulated continuous-wave radar [FMCW]). Met CW-radar kan alleen snelheid gemeten worden. Aangezien wij ook genteresseerd zijn in de afstand van een object tot de radar, hebben we gekozen voor FMCW. In dit hoofdstuk maken we duidelijk hoe van FMCW gebruik gemaakt kan worden om de afstand tot, en de snelheid van een object te bepalen.

A.1 Dopplereffect

Bij een radar wordt er veelal gebruik gemaakt van het dopplereffect. Als een voorwerp dat t.o.v. de radar beweegt, een radarsignaal reflecteert, zal het gereflecteerde radarsignaal een andere frequentie hebben dan het oorspronkelijk uitgezonden was. [14] [15]



Figuur 17. Voorbeeld radarreflectie

Zoals in figuur 17 te zien is, komt het gereflecteerde radarsignaal met een faseverschil weer bij de radar aan. Men kan het faseverschil - de volledige fase over tweemaal de verschilafstand - definiëren als:

$$\varphi = \frac{2r}{\lambda} \cdot 2\pi \quad (2)$$

Het doel heeft een radiale snelheid:

$$v_r = \frac{\partial r}{\partial t} \quad (3)$$

De faseverandering is dan:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = 2 \cdot \frac{v_r}{\lambda} \cdot 2\pi \quad (4)$$

Hieruit volgt de dopplereffrequentie:

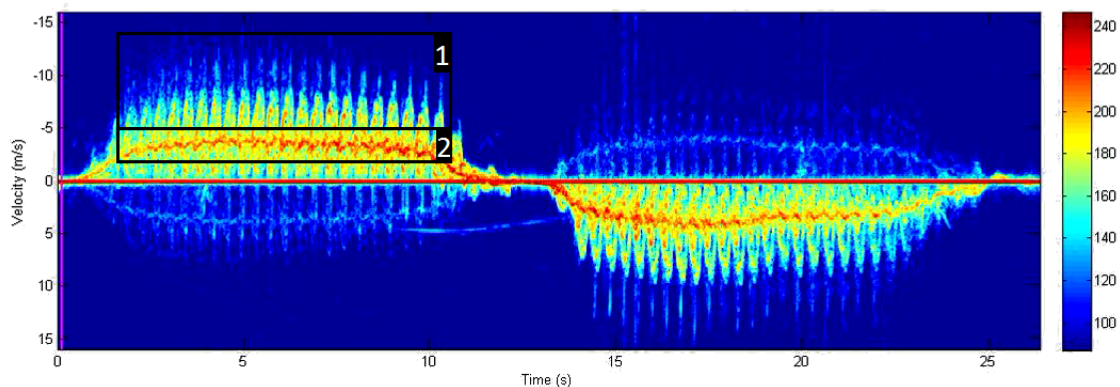
$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{1}{2\pi} \frac{4\pi \cdot v_r}{\lambda} = \frac{2v_r f_c}{c} \quad (5)$$

A.2 Micro-dopplereffect

Er zijn veel voorwerpen die onderdelen hebben die een oscillerende beweging maken, zoals de propellers bij een vliegtuig. Bij een mens zijn het de lichaamsdelen die met verschillende snelheden bewegen tijdens het lopen. Zo bewegen de handen en voeten sneller (en langzamer) dan de romp van een mens. Hierdoor geven deze hogere dopplereffrenties af dan de romp zelf. De dopplereffrenties van de bewegende onderdelen, die bovenop de beweging van het voorwerp zelf komen, zorgen voor het micro-dopplereffect.

In figuur 18 loopt er een mens van en naar de radar toe. In gebied 2 in de figuur is een rood gebied te zien, wat een sterke reflectie representeert. Dit gebied heeft een kleine oscillatie rondom een snelheid van ongeveer 3 m/s. Dit is de romp van het lichaam, wat met een constante snelheid voortbeweegt. De handen en voeten van een mens hebben een grotere oscillatie, wat ook terug te zien is in gebied 1. Hierin zijn duidelijke pieken te zien, van een grotere snelheid dan gebied 2.

Dit micro-dopplereffect is het sneller bewegen van kleine onderdelen, zoals de handen en voeten ten opzichte van het grotere voorwerp, zoals de romp. [16]



Figuur 18. Dopplersnelheid-tijd grafiek

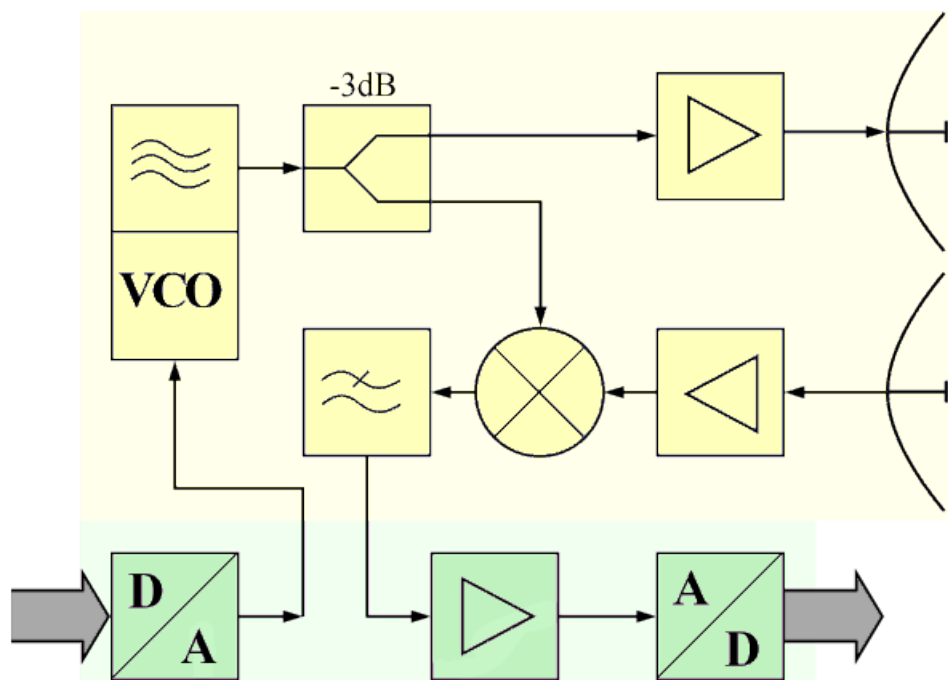
A.3 Continuous-Wave Radar

In figuur 19 is een voorbeeld van de opbouw van een FMCW-radar te zien. Een CW-radar lijkt hierop. Het enige verschil is dat de RF-frequentie constant is; Bij CW is er geen modulatie, en zal het uitgezonden signaal tijdens operatie dezelfde frequentie behouden. Het ontvangen signaal wordt gemixt met het op dat moment uitgezonden signaal van de VCO. Na het terugmengen en een low-passfilter blijft er een verschilfrequentie over, als verschil tussen het uitgezonden signaal en binnenkomend signaal. Deze verschilfrequentie is de dopplerfrequentie. Vervolgens kan men via een AD-converter het signaal via een DSP verder verwerken.

Aan de hand van de dopplerfrequentie kan men de snelheid van een object bepalen, en met μ -doppler kan een schatting van het soort object gemaakt worden. Helaas kan men niet de afstand van het object bepalen aan de hand van CW-radar. Voor het bepalen van de afstand van een voorwerp moet gebruik gemaakt worden van FMCW-radar.

A.4 Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar

In figuur 19 is een voorbeeld van de opbouw van een FMCW-radar te zien. Bij een FMCW-radar wordt de RF-generator aangestuurd om de uitgezonden frequentie te moduleren. Dit kan volgens verschillende modulatievormen, bijvoorbeeld een driehoeksvorm of zaagtand.

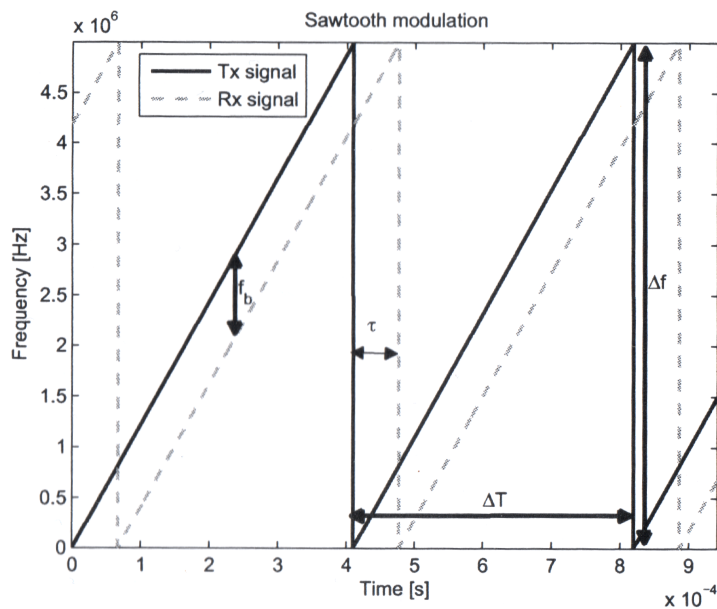


Figuur 19. Het blokschema van een FMCW-Radar

Het uitgezonden signaal reflecteert op objecten en komt na een tijdsvertraging τ terug bij de ontvanger, volgens: [17, p. 23-26]

$$\tau = \frac{2r}{c} \quad (6)$$

Met r de afstand van het doel tot de radar en c de lichtsnelheid. Als deze objecten bewegen zal er een doppler-shift plaatsvinden op de ontvangen golf. Doordat de lokale oscillator al verder is gemoduleerd, zal ook door de tijdsvertraging, veroorzaakt door de afstand, een verschilfrequentie ontstaan. Dit wordt ook wel beatsignaal genoemd, en heeft een beat-frequentie f_b . Dit is in figuur 20 geïllustreerd.



Figuur 20. De uitgaande en ingaande signalen bij een antenne in FMCW-Modus. Met Tx het uitgezonden en Rx het ontvangen signaal met een tijdvertraging τ . ΔT is de periodetijd van de zaagtand en Δf de modulatie diepte.

Bij een zaagtandmodulatie geldt:

$$f_b = \frac{\Delta f}{\Delta T} \quad (7)$$

Na een AD-conversie, wordt er een FFT over het ontvangen signaal gedaan om het zogenaamde range spectrum te bepalen. Een FFT levert een dubbelzijdig spectrum op. Om de range te bepalen heeft men maar één zijde van het FFT-spectrum nodig. Hierdoor zal een spectrum met n_s samples $n_s/2$ range resolutie cellen opleveren. De maximale afstand die men kan meten hangt af van de maximale beatfrequentie

gemeten kan worden. Volgens Nyquist is dit de helft van de sampling frequentie f_s , waaruit volgt:

$$r_{max} = \frac{c \Delta T f_s}{2 \Delta f} \quad (8)$$

Uiteindelijk volgt hieruit de theoretische range-resolutie. In praktijk is de gebruikte bandbreedte minder dan de modulatie diepte Δf : [17]

$$\Delta r = \frac{c}{2 \cdot \Delta f} \quad (9)$$

De dopplersnelheid wordt bepaald aan de hand van het faseverschil tussen de verschillende opvolgende sweeps. De fasedraaiing tussen twee sweeps wordt bepaald door:

$$\phi(r_0) = 2\pi f_D \Delta T \quad (10)$$

Om de dopplersnelheid te bepalen, neemt men van de eerste FFT een N_{sweeps} aantal sweeps van een range cell. Hieruit kan de dopplersnelheid bepaald worden. Omdat de fase een bereik heeft tussen de 0 en 2π volgt:

$$f_{Dmax} = \pm \frac{1}{2\Delta T} \quad (11)$$

Na het invullen van vergelijking 5, krijgt men:

$$v_{Dmax} = \pm \frac{\lambda}{4\Delta T} \quad (12)$$

Het aantal sweeps voor de tweede FFT bepaalt de snelheidsresolutie:

$$\Delta v_D = \frac{2v_{Dmax}}{N_{sweeps}} \quad (13)$$

A.5 I/Q

Zoals te zien in het blokschema van de KOR-module, wordt het ontvangen signaal gemixt met twee orthogonale signalen, een sinus en een cosinus. Elk signaal kan worden gedecomposeerd in een lineaire combinatie van een sinus en een cosinus; Zo kan een exacte representatie worden verkregen van het signaal. De KOR-001 heeft ook twee hulpantennes, die vlak naast de twee hoofdontvangstantennes liggen, die alleen een I-kanaal leveren. Dit kan vergeleken worden met de I-kanalen uit de hoofdantennes om hoekinformatie (azimuth en elevation) te verkrijgen.

BIJLAGE B

RADARFOMULES

$$\tau = \frac{1}{B} \quad (14)$$

De tijdnauwkeurigheid [s] is omgekeerd evenredig met de gebruikte bandbreedte [Hz].

$$f_d = \frac{-2V_r}{\lambda} \quad (15)$$

De dopplerverschuiving [Hz] is evenredig met de radiale snelheidscomponent [m/s], en omgekeerd evenredig met de gebruikte golflengte. Voor een duidelijk dopplersignaal moeten er dus RF-frequenties gebruikt worden.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (16)$$

De golflengte [m] is omgekeerd evenredig met de gebruikte frequentie (RF) [Hz]

$$\tau_d = \frac{2R}{C} \quad (17)$$

De delay van een doelecho [s] is evenredig met de afstand tussen antenne en doel [m].

$$\delta R = \frac{c}{2B} \quad (18)$$

De range-resolutie [m], oftewel de 'blob-grootte' van een puntdoel in de range-dimensie, is omgekeerd evenredig met de gebruikte bandbreedte. Volgt uit (14) en (17). Range-resolutie hangt zowel bij puls als FMCW samen met het nauwkeurig kunnen meten van een delay [s].

$$f_b = SR \cdot \tau_d \quad (19)$$

De FMCW beat-frequentie [Hz] is evenredig met de sweep rate [Hz/s] en de delay van een echo [s]. De sweep rate is de steilheid van de frequentie-helling.

$$\Delta f = \frac{f_s}{N_{\text{fft}}} \quad (20)$$

De afstand tussen twee frequenties (of frequentiefilters) na een FFT [Hz] is evenredig met de sample-frequentie [Hz], en omgekeerd evenredig met het aantal punten van de FFT [-]. Het aantal samples voor de FFT is gelijk aan het aantal bins na de FFT. De frequentiebins zijn equidistant verdeeld van 0 Hz tot f_s Hz. Let op aliasing bij sampling!

$$\delta v = \frac{\lambda}{2T} \quad (21)$$

De doppler-resolutie [m/s], oftewel de blob-grootte van een puntdoel in de snelheidsdimensie is omgekeerd evenredig met de integratietijd. Deze integratietijd bij meerdere pulsen of sweep is gelijk aan N_{fft} maal de herhalingstijd [s]. Hoe kleiner de golflengte (hogere RF), des te beter wordt de doppler-resolutie.

BIJLAGE C

DATASHEETS

Hierna volgen de belangrijkste pagina's uit de datasheets van achtereenvolgens de ST-100 [11], de K-MC1 [18] en de KOR-001 [19].

Functional Overview

RFbeam ST100 Starterkit hardware features 3 inputs (connectors X1 – X3) for different radar module types. The inputs differ in input sensitivity and in physical pin arrangement. Many RFbeam modules may directly be connected and mounted to the Starterkit PCB.

All module connectors feature also an FM output.

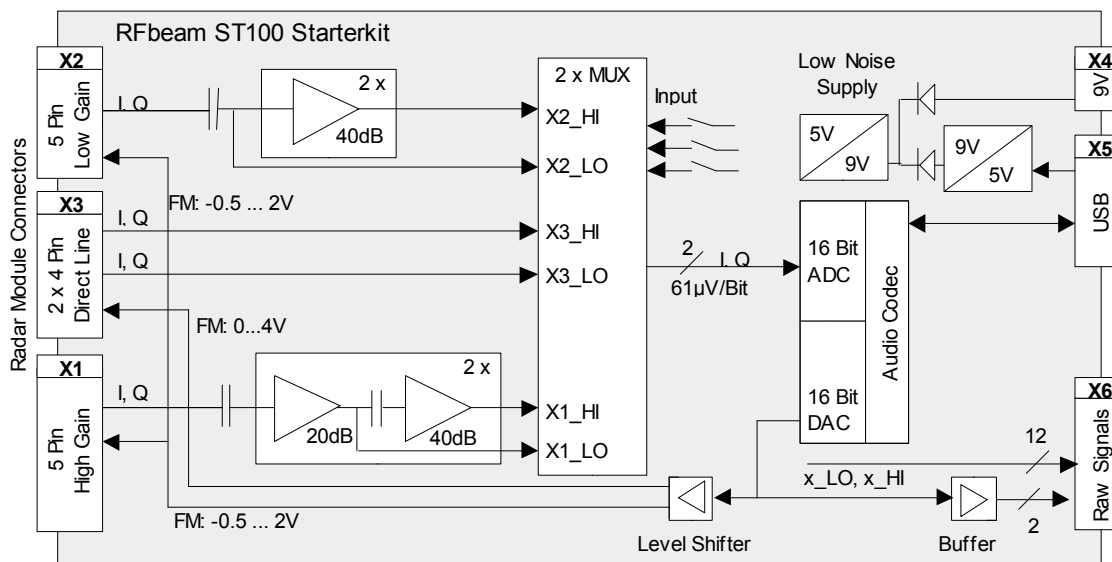
Radar signals are converted by a 16Bit ADC and transmitted by a standard USB audio protocol.

A 16Bit DAC drives the FM inputs of the radar modules and is also driven by a standard USB audio protocol.

This DAC may also be used to play back recorded radar waveforms and feed them to your signal processing hardware. This is useful to simulate and analyse sensor behaviour with real world signals.

All important radar signals are available at connector X6. This allows signal analysis by standard measurement equipment like multimeter and oscilloscope.

Blockdiagram



Software Features

The **RFbeam SignalViewer** software is included in the Starterkit and features:

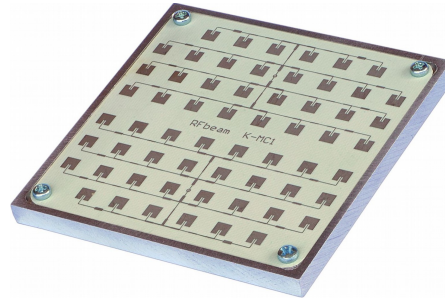
- FFT Power Spectrum Display from 5Hz to 20kHz
- Graphically Configurable Frequency and Peak Detection
- Automatic calculation of the speed according to the measured doppler signal
- Time Domain Display (scope) with Trigger and Filter Functions
- Streaming to Standard 16Bit Audio Wave Files
- Realtime or Manual Controlled Playback Function with the option to stream to the X6 Connector

Additional Software (not included in Starterkit)

- On Request

Features

- 24 GHz short range transceiver
- 180 MHz sweep FM input
- High sensitivity, with integrated RF/IF amplifier
- Dual 30 patch antenna
- Buffered I/Q IF outputs
- Additional DC IF outputs
- Beam aperture 25°/12°
- RSW Rapid Sleep Wakeup
- Slim 6mm thickness construction



Applications

- Traffic supervision
- Object speed measurement systems
- Ranging and distance detection
- Industrial sensors

Description

K-MC1 is a 60 patch doppler module with an asymmetrical narrow beam for long distance sensors. It is ideally suited for traffic supervision.

This module includes a RF low noise amplifier and two 47dB IF preamplifiers for both I and Q channels. The need for external analogue electronics will be significantly reduced by this feature. For special signal condition applications, an additional buffered Mixer DC output is provided. This greatly improves flexibility in FSK ranging applications.

The unique "RSW" *Rapid Sleep Wakeup* function with <4us wakeup time makes this module ideal for battery operated equipment. Typical duty cycle in RWS mode may be < 1% with full movement detection capability by sampling the IF signals.

An extremely slim construction with only 6mm depth gives you maximum flexibility in your equipment design.

Powerful starter kits with signal conditioning and visualization are available.

Blockdiagram

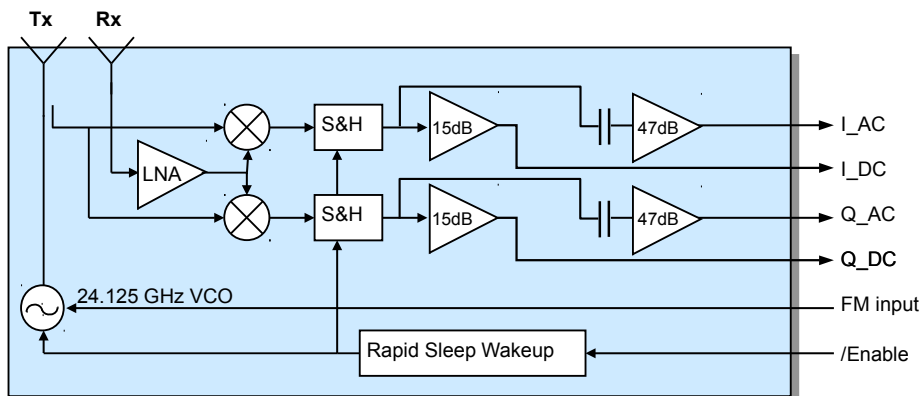


Fig. 1: K-MC1 Blockdiagram

K-MC1 RADAR TRANSCEIVER

Datasheet

Characteristics

Parameter	Conditions / Notes	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating conditions						
Supply voltage		V_{CC}	4.75	5.0	5.25	V
Supply current	Module enabled (Pin 1 = V_{IL})	I_{CC}		70	100	mA
	Module RSW mode (Pin 1 = V_{IH})			7	10	mA
VCO input voltage		U_{VCO}	1		10	V
VCO pin resistance	Internal pulldown 10k	R_{VCO}		10k		Ω
Operating temperature		T_{op}	-20		+80	$^{\circ}C$
Storage temperature		T_{st}	-20		+80	$^{\circ}C$
Power down/Enable						
Module power down	Input tied high with pullup 10k	V_{IH}	$V_{CC}-0.7$		$V_{CC}+0.3$	V
Module enable		V_{IL}	-0.2		2	V
Minimum enable time	Sample&Hold capacitor charged	t_{on}	4			μs
Maximum hold time	S&H error <10%	t_{off}			2	ms
Hold Step	Charge injection visible at DC output	V_{step}		6		mV
Transmitter						
Transmitter frequency	$U_{VCO}=5V, T_{amb}=-20^{\circ}C \dots +60^{\circ}C$	f_{TX}	24.050	24.150	24.250	GHz
Frequency drift vs temp.	$V_{CC}=5.0V, -20^{\circ}C \dots +60^{\circ}C$ <small>Note 1</small>	Δf_{TX}		-1.0		MHz/ $^{\circ}C$
Frequency tuning range		Δf_{VCO}		180		MHz
VCO sensitivity		S_{VCO}		18		MHz/V
VCO Modulation Bandwidth	$\Delta f=20MHz$	B_{VCO}		3		MHz
Output power	EIRP	P_{TX}	+16	+18	+20	dBm
Output power deviation	Full VCO tuning range	ΔP_{TX}		+/- 1		dBm
Spurious emission	According to ETSI 300 440	P_{spur}			-30	dBm
Receiver						
Antenna gain	$F_{TX}=24.125GHz$ <small>Note 2</small>	G_{Ant}		18.5		dBi
LNA gain	$F_{RX}=24.125GHz$	G_{LNA}		16		dB
Mixer Conversion loss	$f_{IF}=500Hz$	D_{mixer}		-6		dB
Receiver sensitivity	$f_{IF}=500Hz, B=1kHz, S/N=6dB$	P_{RX}		-123		dBm
Overall sensitivity	$f_{IF}=500Hz, B=1kHz, S/N=6dB$	D_{system}		-141		dBc
IF output						
IF output impedance	_AC outputs	R_{IF_AC}		100		Ω
	DC outputs	R{IF_DC}		100		Ω
IF Amplifier gain	_AC outputs	G_{IF_AC}		47		dB
	DC outputs	G{IF_DC}		15		dB
I/Q amplitude balance	$f_{IF}=500Hz, U_{IF}=100mV_{pp}$ (_AC outputs)	ΔU_{IF}		3		dB
I/Q phase shift	$f_{IF}=500Hz, U_{IF}=100mV_{pp}$ (_AC outputs)	φ	80	90	100	$^{\circ}$
IF frequency range	-3dB Bandwidth (_AC outputs)	f_{IF_AC}	40		15k	Hz
	-3dB Bandwidth (_DC outputs)	f_{IF_DC}	0		500	kHz
Spurious signals	Internal regulator @100kHz at DC output	V_{sp}			0.1	mVrms

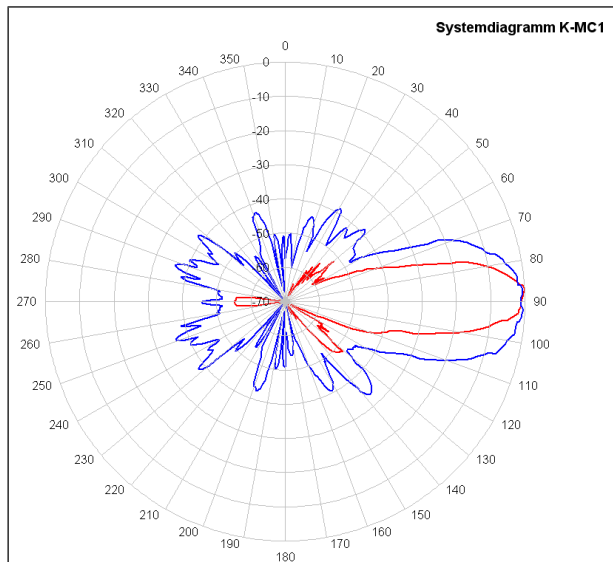
K-MC1 RADAR TRANSCEIVER

Datasheet

Parameter	Conditions / Notes	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
IF output (continued)						
IF noise voltage	$f_{IF} = 500\text{Hz}$	$U_{IFnoise}$		22		$\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$
	$f_{IF} = 500\text{Hz}$	$U_{IFnoise}$		-93		dBV/Hz
IF output offset voltage	$V_{CC} = 5\text{V}$, $_AC$ outputs	U_{os_AC}	2.0	2.5	3.0	V
	no object in range, VCO pin open, $_DC$ outputs	U_{os_DC}	0.5	2.5	4.5	V
Supply rejection	Rejection supply pins to $_AC$ outputs, 500Hz	D_{supply}		-24		dB
Antenna						
Horizontal -3dB beamwidth	E-Plane	W_e		12		$^\circ$
Vertical -3dB beamwidth	H-Plane	W_h		25		$^\circ$
Horiz. sidelobe suppression		D_e		-20		dB
Vert. sidelobe suppression		D_h		-18		dB
Body						
Outline Dimensions	connector left unconnected			65*65*6		mm^3
Weight				50		g
Connector	Module side: AMP X-338069-8			8		pins

- Note 1 Transmit frequency stays within 24.050 to 24.250GHz over the specified temperature range when the VCO pin is left open
- Note 2 Theoretical value, given by Design

Antenna System Diagram



This diagram shows module sensitivity in both azimuth and elevation directions. It incorporates therefore the transmitter and receiver antenna characteristics.

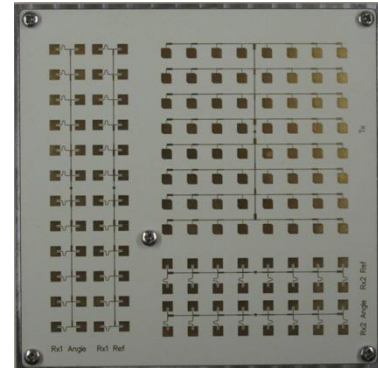
Fig. 2: Antenna system diagram

KOR-001 3D RADAR TRANSCEIVER

Customer Specific Datasheet
For technology information only

Features

- This is not an RFbeam Standard product
- 24 GHz K-band Superhet Transceiver
- Highest Sensitivity Receiver
- Measure of Speed, Distance and Angle
- Monopulse, 1xTX-Antenna, 4xRX-Antenna
- PLL Controlled Frequency Generation
- I/Q IF Doppler output with 3MHz Bandwidth
- Integrated FSK and FMCW mode
- Configuration over Serial Interface
- 20dBm EIRP output power



Applications

- Traffic monitoring
- Industrial Applications
- Security systems

Description

KOR-001 is a Doppler transceiver for measuring speed, distance and angle of an object. The superhet structure gives best sensitivity for enhanced measurement distance. An easy interface allows the use of FSK and FMCW

modulation. Modulation bandwidth can be programmed over a serial line. All frequencies are PLL controlled to ensure a low temperature drift. High bandwidth I/Q outputs allow use of high FSK switching frequencies.

Blockdiagram

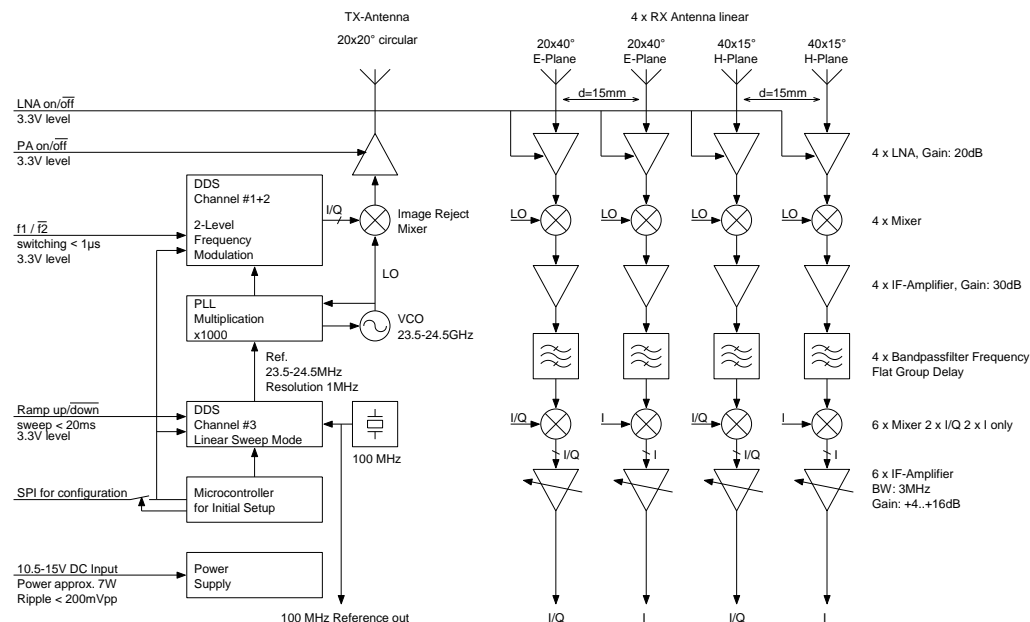


Fig. 1: Block diagram

KOR-001 3D RADAR TRANSCEIVER

Customer Specific Datasheet
For technology information only

Characteristics

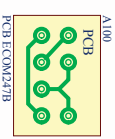
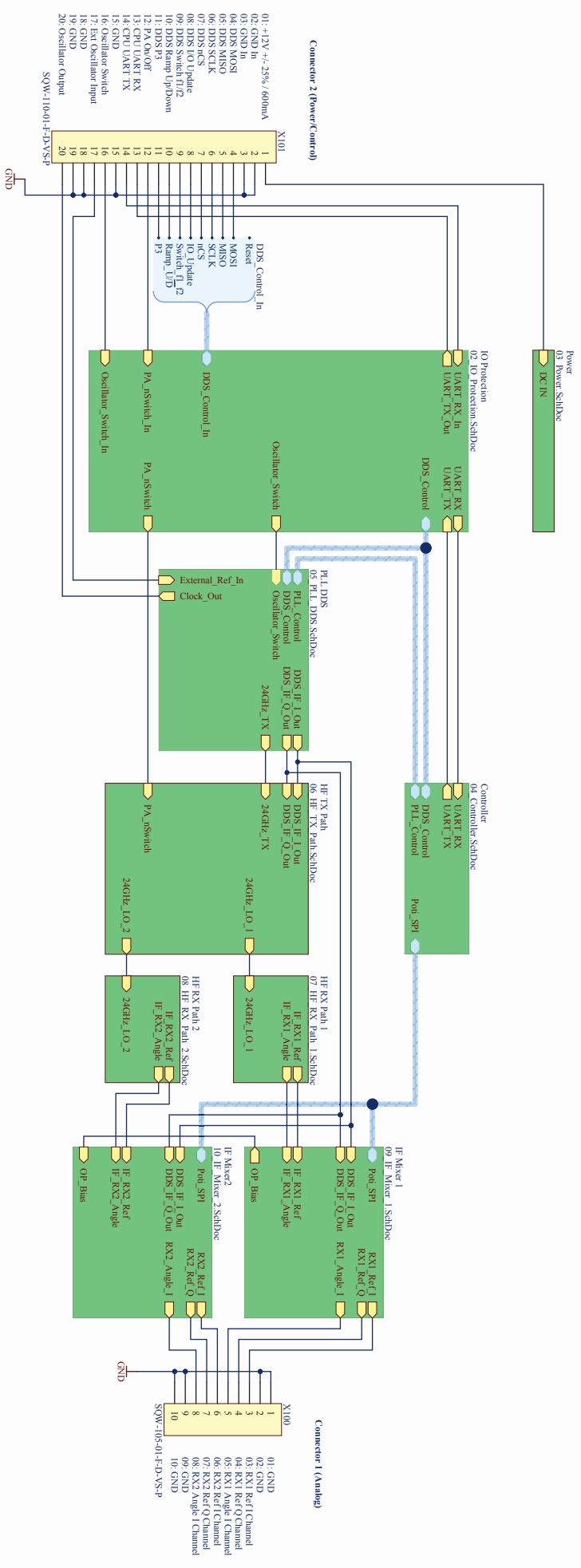
Parameter	Min	Typ	Max	Unit	Testing Method
<i>Operating Conditions</i>					
Supply Voltage	10.5	12.0	15.0	V	
Voltage Ripple			200	mV _{pp}	
Supply Current		600		mA	Input Voltage = 12V
Logic '1' Level	2.4			V	(3.3V) f1/f2, Ramp up/down, PA/LNA on/off, SPI
Logic '0' Level			0.8	V	(3.3V) f1/f2, Ramp up/down, PA/LNA on/off, SPI
Operating Temperature	-20		+65	°C	
Storage Temperature	-40		+85	°C	
<i>Transmitter</i>					
LO Frequency	23.500		24.500	GHz	Full specification only for 24.000 – 24.250GHz
Transmitter Frequency	23.540		24.540	GHz	TX frequency = LO frequency + 40MHz
Frequency Step Width		1		kHz	
FMCW Sweep Time	20			ms	Sweeping from 24.000 – 24.250GHz
FSK Switching Time			1	µs	Step from 24.100GHz to 24.110GHz
PLL Settling Time			20	µs	Step from 24.100GHz to 24.110GHz
Output Power		+17	+20	dBm	EIRP power, 24.000 – 24.250GHz
Output Power Deviation		+/- 1		dB	Frequency sweeping from 24.000 – 24.250GHz
Frequency Drift vs. Temperature			+/- 50	ppm	-20°C - +65°C
Maximum Frequency Error			100	ppm	Absolute deviation of 24.100GHz Carrier
Phase Noise		-85		dBc	@100kHz, 24.125GHz
Spurious		-30		dBc	24.000 – 24.250GHz, not LO or other Sideband
Out of Band Spurious		-40		dBc	Non-harmonic or Subharmonic frequencies
LO Suppression		15		dBc	
Suppression of other Sideband		20		dBc	
<i>TX-Antenna</i>					
Antenna Gain		19		dBi	
Polarisation		V			Linear, vertical
Horizontal -10dB Beamwidth	18	20	22	°	
Vertical -10dB Beamwidth	18	20	22	°	
Sidelobe Suppression		25		dB	
<i>RX-Antenna 'RX1'</i>					
Antenna Gain		14		dBi	
Polarisation		H			
Horizontal -10dB Beamwidth	13	15	17	°	
Vertical -10dB Beamwidth			40	°	
Sidelobe Suppression		25		dB	

KOR-001 3D RADAR TRANSCEIVER

Customer Specific Datasheet
For technology information only

<i>RX-Antenna 'RX2'</i>				
Antenna Gain	14			dBi
Polarisation	V			
Horizontal -10dB Beamwidth	40			°
Vertical -10dB Beamwidth	18	20	22	°
Sidelobe Suppression	25			dB
<i>Receiver</i>				
LNA Gain	18			dB
LNA Noisefigure	4.0			dB
Mixer Conversion Loss	-10			dB
IF Phase Error	15			°
IF Amplifier Gain	32			dB
IF Bandwidth	10			MHz
Receiver Sensitivity	-141			dBm
Overall Sensitivity	158			dBc
<i>Doppler Output</i>				
Frequency Range	3	3M		Hz
IF Buffer Gain	4	10	16	dB
Noise Floor	-96			dBV/Hz
DC Offset	2.0	2.5	3.0	V
I/Q Amplitude Balance	+/- 1			dB
I/Q Phase Shift	80	90	100	°
Phase Offset RX1	10			°
Phase Offset RX2	10			°
<i>Body</i>				
Outline Dimensions	110x110x10			mm
Weight	250			g

Olvia KOR-001 - 3D Radar Sensor

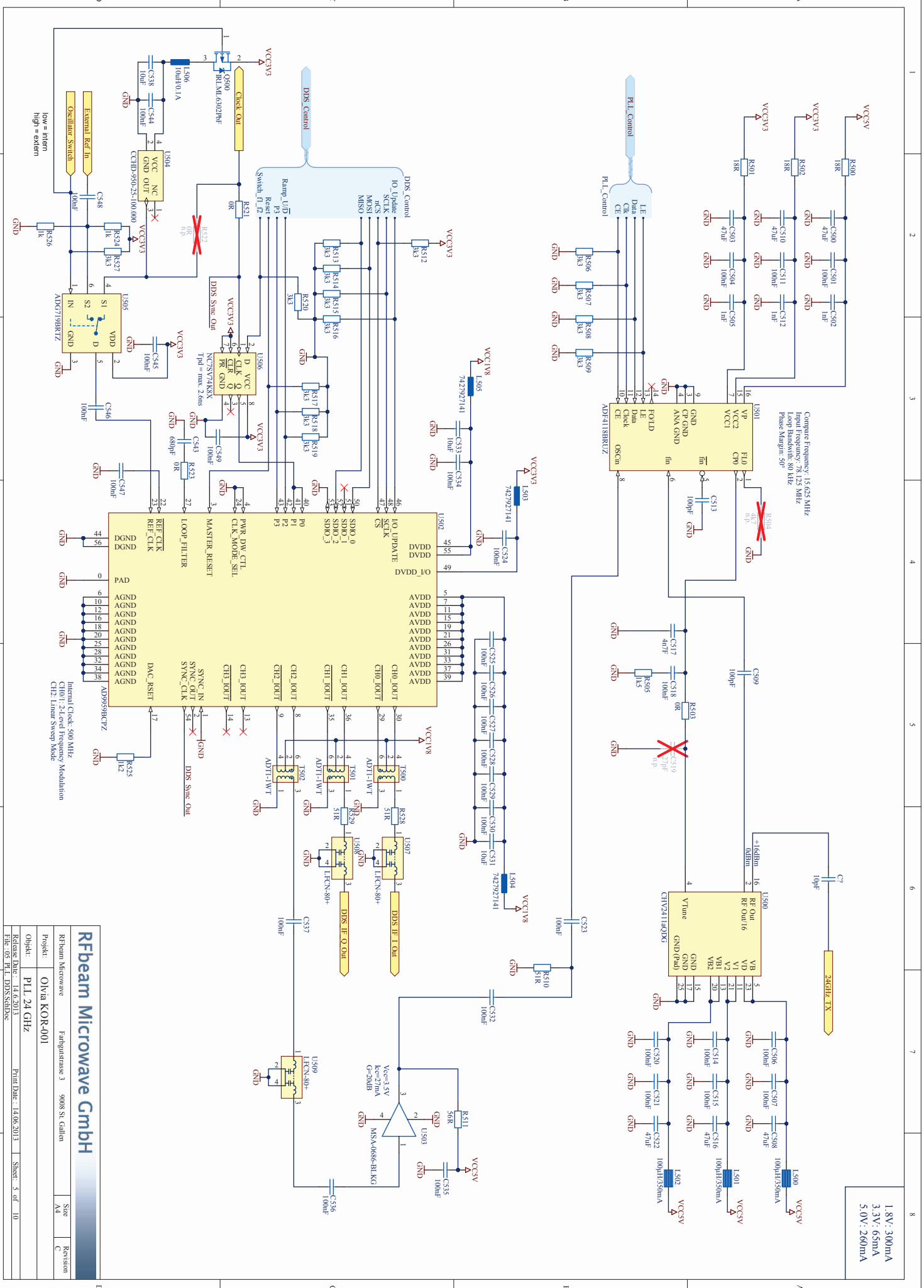


- A100 Case Olvia KOR-001
- A101 DDD-0214-1
- A102 M2.5x4mm
- A103 M2.5x4mm
- A104 M2.5x4mm
- A105 M2.5x4mm
- A106 M2.5x4mm
- A107 M2.5x4mm
- A108 M2.5x4mm

- FID100 Fiducial
- FID101 Fiducial
- FID102 Fiducial
- FID103 Fiducial
- FID104 Fiducial
- FID105 Fiducial

RFbeam Microwave GmbH

Rfbeam Microwave	Fahrgaststrasse 3	9008 St. Gallen	Size	Revision
Projekt:	Olvia KOR-001		A4	C
Objekt:	Overview			
Release Date:	14.6.2013	Print Date:	14.06.2013	Sheet: 1 of 10
File: 01_Overview_SchDoc				



Compute Frequency: 15.625 MHz
 Input Frequency: 78.125 MHz
 Loop Bandwidth: 80 MHz
 Phase Margin: 50°

1.8V: 300mA
 3.3V: 65mA
 5.0V: 260mA

RFbeam Microwave GmbH

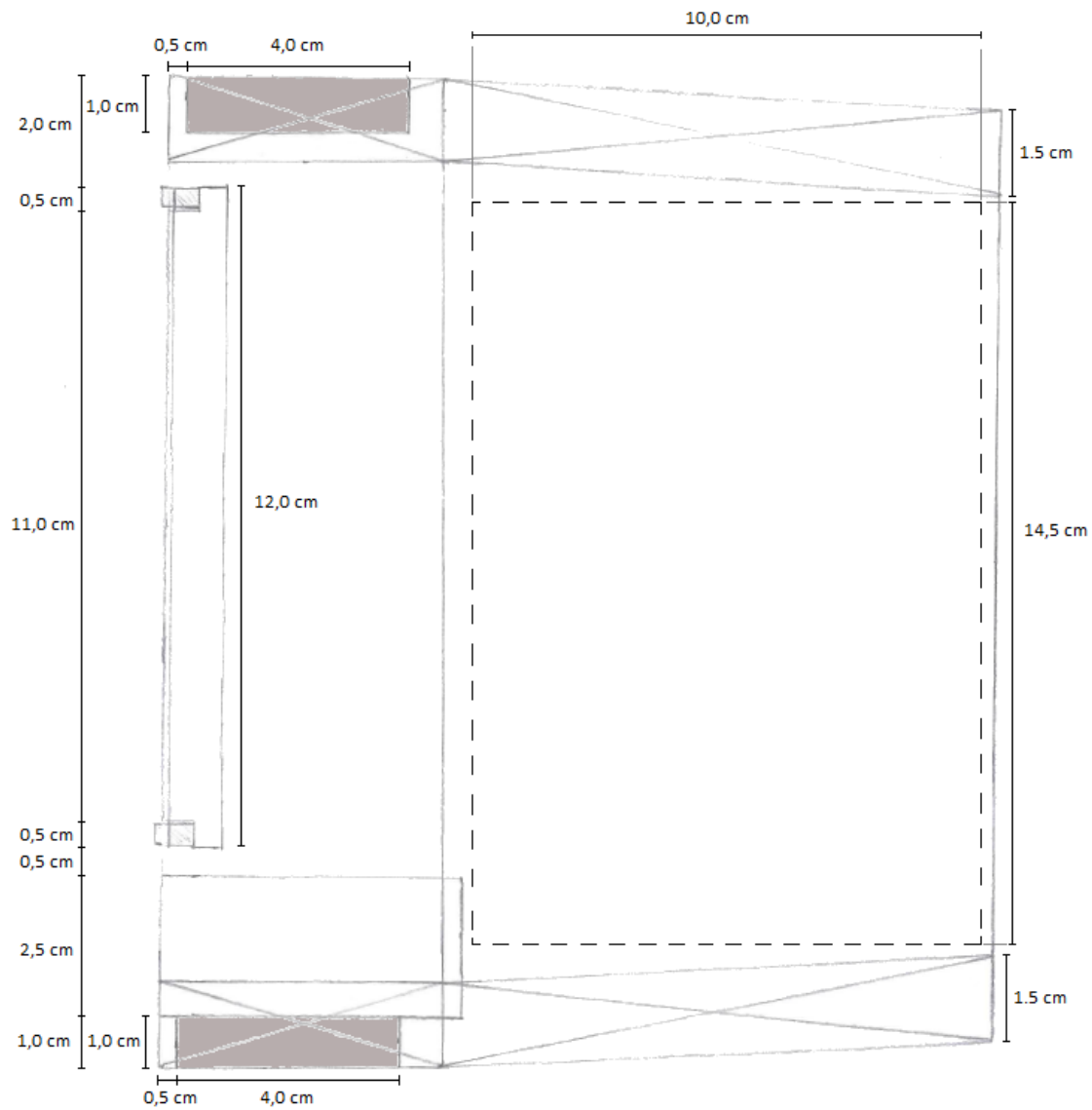
RFbeam Microwave	Fabrikstrasse: 3	9008 St. Gallen	Size	Revision
Projekt:	Olivia KOR-001		A4	C
Objekt:	PLL 24 GHz			
Release Date:	14.6.2013	Print Date:	14.06.2013	Sheet: 5 of 10
File:	05_PLL_DDS.SchDoc			

Internal Clock: 500 MHz
 CH01: 2.4 GHz Frequency Modulation
 CH2: Linear Sweep Mode

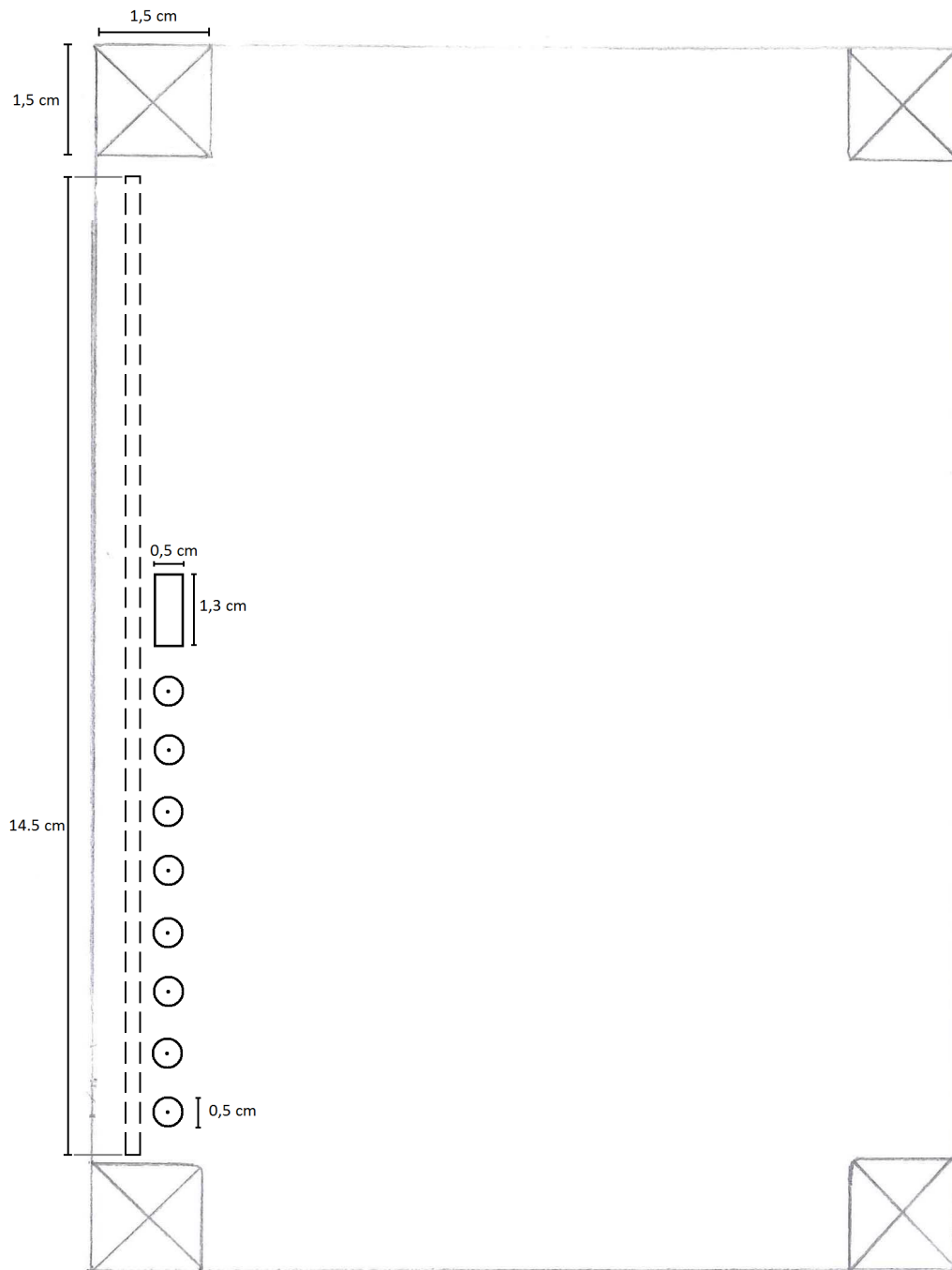
low = internal
 high = external

BIJLAGE D

SCHETSEN VAN DE BEHUIZING



Figuur 21. Schets van de zijkant van de behuizing.



Figuur 22. Schets van de achterkant van de behuizing. Afmetingen: 12x17 cm