



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija



Gregor Krušič

**POZICIONIRANJE Z UPORABO ULTRAZVOKA
VEČ FREKVENC IN ALGORITMA RAZLIKE
ČASOV PRIHODA**

Diplomsko delo

Maribor, september 2015

POZICIONIRANJE Z UPORABO ULTRAZVOKA VEČ FREKVENC IN ALGORITMA RAZLIKE ČASOV PRIHODA

Diplomsko delo

Študent:	Gregor Krušič
Študijski program:	Univerzitetni študijski program Elektrotehnika
Smer:	Elektronika
Mentor:	doc. dr. Iztok Kramberger



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija

FERI

Številka: E1040731

Datum in kraj: 01. 10. 2014, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 46/2012)
izdajam

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

1. **Gregorju Krušiču**, študentu univerzitetnega študijskega programa ELEKTROTEHNIKA, smer Elektronika, se dovoljuje izdelati diplomsko delo pri predmetu Elektronska vezja.
2. **MENTOR:** doc. dr. Iztok Kramberger
3. **Naslov diplomskega dela:**
POZICIONIRANJE Z UPORABO ULTRAZVOKA VEČ FREKVENC IN ALGORITMA RAZLIKE ČASOV PRIHODA
4. **Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:**
POSITIONING USING MULTI-FREQUENCY ULTRASOUND AND ALGORITHM OF TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL
5. Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z "Navodili za izdelavo diplomskega dela". Skladno s 7. členom *Pravilnika o postopku priprave in zagovora diplomskega dela na dodiplomskem študiju* je bilo odobreno podaljšanje roka za oddajo diplomskega dela do 30. 09. 2015. Diplomsko delo študent-ka odda v treh izvodih (dva vezana izvoda in en v spiralo vezan izvod) ter en izvod elektronske verzije v referatu za študentske zadeve.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.



Dekan:

prof. dr. Borut Žalik

Borut Žalik

Obvestiti:

- kandidata,
- mentorja,
- odložiti v arhiv.

Pozicioniranje z uporabo ultrazvoka več frekvenc in algoritma razlike časov prihoda

Ključne besede: pozicioniraje, ultrazvok, Goertzel, TDOA

UDK: 621.38:681.586.48(043.2)

Povzetek

V danem diplomskem delu je bil razvit in izveden sistem za pozicioniranje v prostorih. Sistem za ta namen uporablja ultrazvočno merjenje razdalj med znanimi stacionarnimi točkami in neznanimi točkami. Pozicijo posamezne neznane točke sistem določa z uporabo namenskega algoritma, ki lahko njeno pozicijo določi že iz znanih razlik oddaljenosti od znanih točk.

Preverjena je bila tudi izvedljivost sočasnega merjenja oddaljenosti do več znanih točk. Za ta namen bi naj vsak ultrazvočni oddajnik oddajal ultrazvočne pulze drugačne frekvence, sprejemniki pa bi naj te frekvence razločili in tako prepoznali kateri impulz je od katerega oddajnika.

Positioning Using Multi-Frequency Ultrasound and Algorithm of Time Difference of Arrival

Key words: positioning, ultrasonic, Goertzel, TDOA

UDK: 621.38:681.586.48(043.2)

Abstract

In this thesis a system meant for defining positions inside of rooms was developed and build. For this purpose the system uses ultrasonic measuring of distances between known and unknown points. It determines the position of unknown points with the use of a dedicated algorithm, which can determine the position of unknown points just from the known differences between distances from known points.

The practicability of simultaneous measuring of distances from known points has been also verified. For this purpose each ultrasonic transmitter should send an ultrasonic pulse of different frequency and ultrasonic receivers should distinct those frequencies between which pulse is from which transmitter.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	IZHODIŠČA SISTEMA ZA POZICIONIRANJE	1
2.1	Princip pozicioniranja.....	2
2.2	TDOA ¹ algoritem.....	3
2.3	Merjenje razdalj z uporabo ultrazvoka več frekvenc.....	3
3	ZASNOVA IN IZVEDBA SISTEMA ZA POZICIONIRANJE	7
3.1	Centralni vgrajen sistem	7
3.1.1	Komunikacijski del centralnega vgrajenega sistema	7
3.1.2	Mikrokrmilnik na centralnem vgrajenem sistemu.....	10
3.1.3	Napajalni del centralnega vgrajenega sistema.....	11
3.1.4	Tiskano vezje centralnega vgrajenega sistema.....	11
3.2	Oddajna enota.....	13
3.2.1	Povezava oddajne enote s centralnim vgrajenim sistemom	14
3.2.2	Mikrokrmilnik na oddajni enoti.....	15
3.2.3	Napajanje oddajne enote.....	15
3.2.4	Konfiguracija.....	16
3.2.5	Ohišje oddajne enote.....	17
3.2.6	Tiskano vezje oddajne enote	18
3.2.7	Program za mikrokrmilnik na oddajni enoti	19
3.3	Sprejemna enota	21
3.3.1	Digitalno signalno procesiranje na sprejemni enoti	21
3.3.2	Napajanje sprejemne enote	24
3.3.3	Povezava sprejemne enote s centralnim vgrajenim sistemom	24
3.3.4	Sprejemni del za ultrazvok.....	25
3.3.5	Tiskano vezje sprejemne enote	29
3.4	Računalniški program	30
4	REZULTATI IN MERITVE.....	31
4.1	Merjenje razdalj z uporabo ultrazvoka več frekvenc.....	31
4.2	Odstopanje meritev.....	33
4.3	Čas osveževanja	33
4.4	Redundantnost oddajnikov v primeru TDOA algoritma	33
5	SKLEP.....	35
6	VIRI.....	36
7	PRILOGE	37

KAZALO SLIK

SLIKA 2.1: BLOKOVNI DIAGRAM SISTEMA ZA POZICIONIRANJE.....	2
SLIKA 2.2: PRINCIP DOLOČANJA POZICIJE TOČKE T IZ ZNANIH RAZDALJ MED NJO IN STACIONARNIMI TOČKAMI A, B IN C	2
SLIKA 2.3: SHEMA PRVEGA PASOVNO PREPUSTNEGA SITA.....	4
SLIKA 2.4: OJAČENJE PRVEGA PASOVNO PREPUSTNEGA SITA.....	4
SLIKA 2.5: ČASOVNI POTEK SIMULIRANEGA SIGNALA 5000 TER 5250 HZ IN NJEGOVA FOURIERJEVA TRANSFORMACIJA	5
SLIKA 2.6: 3D GRAF FOURIERJEVE TRANSFORMACIJE POSAMEZNIH ČASOVNIH ODSEKOV	6
SLIKA 2.7: ANALIZA SIGNALA Z GOERTZEL-OVIM ALGORITMOM.....	6
SLIKA 3.1: SHEMA PERIFERIJE PRIMERNE ZA VEČ VZPOREDNIH RS-485 VODIL	8
SLIKA 3.2: SHEMA PERIFERIJE ZA BREZŽIČNO KOMUNIKACIJO	8
SLIKA 3.3: SHEMA PERIFERIJE FTDI PRETVORNIKA.....	9
SLIKA 3.4: SHEMA PERIFERIJE ZA PROCESIRANJE PODATKOV	10
SLIKA 3.5: SHEMA NAPAVALNEGA DELA CENTRALNEGA VGRAJENEGA SISTEMA.....	11
SLIKA 3.6: NAČRTOVANO TISKANO VEZJE V 2D IN 3D POGLEDU.....	12
SLIKA 3.7: SESTAVLJEN CENTRALNI VGRAJEN SISTEM VGRAJEN V PLASTIČNO OHIŠJE	12
SLIKA 3.8: ULTRAZVOČNI ODDAJNIK MA40S4S.....	13
SLIKA 3.9: SHEMA ODDAJNEGA DELA ULTRAZVOČNEGA ODDAJNIKA	13
SLIKA 3.10: SHEMA KOMUNIKACIJSKEGA DELA ODDAJNE ENOTE	14
SLIKA 3.11: MIKROKRMILNIK PIC18F23K20 V SSOP OHIŠJU.....	15
SLIKA 3.12: SHEMA PRIKLJUČITVE MIKROKRMILNIKA V ODDAJNI ENOTI	15
SLIKA 3.13: SHEMA NAPAVALNEGA DELA	16
SLIKA 3.14: DIP STIKALO	16
SLIKA 3.15: SHEMA DIP STIKALA.....	16
SLIKA 3.16: 3D NAČRT OHIŠJA ODDAJNE ENOTE	17
SLIKA 3.17: IZDELANO OHIŠJE IN PODNOŽJE ODDAJNE ENOTE.....	17
SLIKA 3.18: NAČRTOVANO TISKANO VEZJE	18
SLIKA 3.19: NAČRTOVANO TISKANO VEZJE V 3D POGLEDU.....	18
SLIKA 3.20: BLOKOVNI DIAGRAM PROGRAMA ZA MIKROKRMILNIK NA ODDAJNI ENOTI	20
SLIKA 3.21: RAZVOJNA PLOŠČA STARTKIT Z XCORE JEDROM.....	21
SLIKA 3.22: RAZVOJNA PLOŠČA STARTKIT Z IZVEDENO PREDELAVO	22
SLIKA 3.23: BLOKOVNI DIAGRAM PROGRAMA V XMOS PROCESORJU	23
SLIKA 3.24: SHEMA NAPAVALNEGA DELA SPREJEMNE ENOTE	24
SLIKA 3.25: SHEMA KOMUNIKACIJSKEGA DELA SPREJEMNE ENOTE	25
SLIKA 3.26: ULTRAZVOČNI SPREJEMNIK MA40S4R.....	25
SLIKA 3.27: GRAF PRIČAKOVANE NAPETOST NA IZHODU ULTRAZVOČNEGA SPREJEMNIKA V ODVISNOSTI OD ODDALJENOSTI OD ODDAJNIKA	26

SLIKA 3.28: SHEMA LOGARITEMSKEGA OJAČEVALNIKA PRIPRAVLJENA NA SIMULACIJO V PROGRAMU MULTISIM	27
SLIKA 3.29: PRENOSNA FUNKCIJA LOGARITEMSKEGA OJAČEVALNIKA	27
SLIKA 3.30: FREKVENČNA KARAKTERISTIKA SIMULIRANEGA PASOVNO PREPUSTNEGA SITA.....	28
SLIKA 3.31: SHEMA ULTRAZVOČNEGA SPREJEMNEGA DELA SPREJEMNE ENOTE.....	28
SLIKA 3.32: NAČRTOVANO TISKANO VEZJE ULTRAZVOČNE SPREJEMNE ENOTE	29
SLIKA 3.33: KONČANA SPREJEMNA ENOTA	29
SLIKA 3.34: UPORABNIŠKI VMESNIK RAČUNALNIŠKEGA PROGRAMA.....	30
SLIKA 4.1: IZDELAN SISTEM ZA POZICIONIRANJE.....	31
SLIKA 4.2: MATEMATIČNA FFT TRANSFORMACIJA PREJETEGA, OJAČENEGA IN VZORČENEGA ULTRAZVOČNEGA SIGNALA NA SPREJEMNI ENOTI, KI STA GA SOČASNO GENERIRALA DVA ENAKO ODDALJENA ODDAJNIKA, PRVI NA 39 KHZ IN DRUGI NA 41 KHZ	32
SLIKA 4.3: GRAF RAZDALJ MED PRESEČIŠČI TREH KROŽNIC (LEVO) IN ŠTIRIH KROŽNIC (DESNO) V ODVISNOSTI OD KOEFICIENTA N.....	34

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

- TDOA - **T**ime **D**ifference **O**f **A**rrival - algoritem razlike časov prihoda
- COM - **C**ommunication port - komunikacijski priključek na računalniku, lahko tudi virtualen
- LED - **L**ight **E**mitting **D**iode - dioda, ki oddaja svetlobo
- PLL - **P**hase-**L**ocked **L**oop - množilnik frekvence, ki deluje s pomočjo ohranjanja izhodnega signala v fazi s vhodnim signalom
- ISP - **I**n **S**ystem **P**rogramming - zmožnost programiranja mikrokrmilnika, ko je ta že vgrajen
- SMD - **S**urface-**M**ount **D**evice - komponenta, ki se pritrdi direktno na površino tiskanega vezja
- MIPS - **M**ilion **I**nstructions **P**er **S**econd - število milijonov inštrukcij, ki jih lahko procesor opravi v eni sekundi

1 UVOD

Predlog za nalogo izhaja iz gledališke stroke, kjer se poraja želja po platformi, ki bi se lahko računalniško vodeno pomikala po virtualno začrtani poti na odru. Tudi sicer se v mnogih aplikacijah potrebuje lokacija raznih naprav (kvadrokopterji, viličarji,...) in trenutno uveljavljeni postopki za to niso primerni ali dostopni.

Cilj tega diplomskega dela je bil zasnovati in izdelati sistem za dvodimenzionalno pozicioniranje znotraj prostorov. Sistem bi naj za pozicioniranje uporabljal ultrazvok. Velika prioriteta pri razvoju bi naj bila zanesljivost in odzivnost sistema ter natančnost pozicioniranja. Pozicionirana enota ne bo imela žične povezave s preostalim sistemom, kar v sistem dovede nepredvidljive zakasnitve in s tem potrebo po uporabi TDOA¹ algoritma. Da bi bil čas osveževanja čim višji se je pojavila tudi zamisel, s katero bi bilo mogoče meriti več razdalj sočasno in sicer z uporabo ultrazvoka več frekvenc.

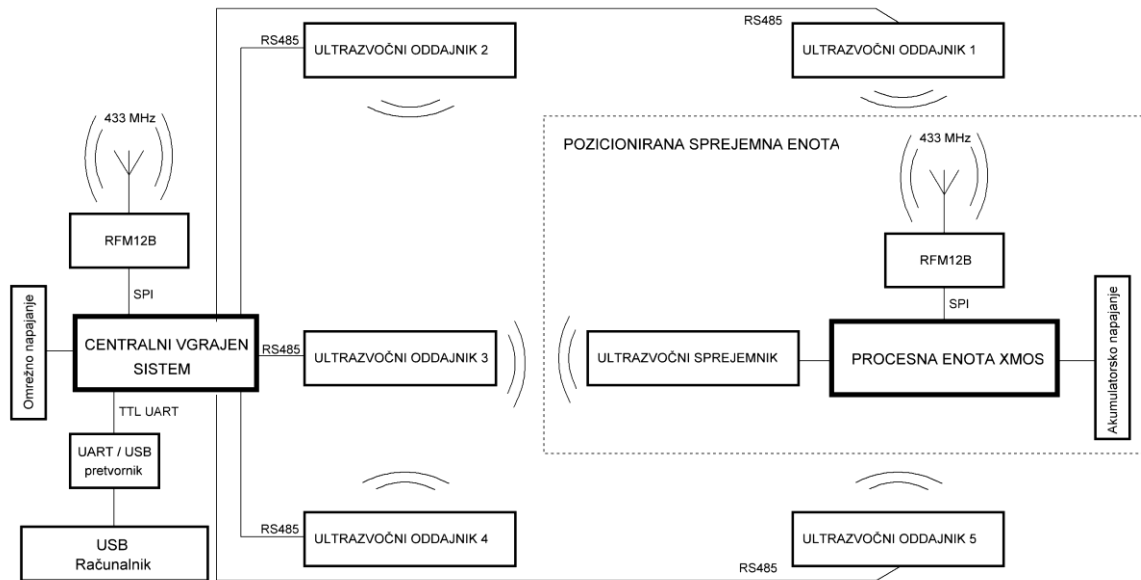
2 IZHODIŠČA SISTEMA ZA POZICIONIRANJE

Razvoj sistema se prične s postavitvijo želenih karakteristik sistema:

- določitev pozicije naj bo znotraj mej natančnosti +/-1 cm in točnosti +/-5 cm;
- osveževanje pozicije naj bo vsaj 5 krat na sekundo;
- sistem naj bo razdeljen na več podsistemov;
- pozicioniranje naj poteka po postopku z merjenjem razdalj med znanimi stacionarnimi točkami in neznanimi pozicioniranimi;
- pozicionirati naj bo možno vsaj 10 neznanih točk;
- za merjenje razdalj naj bo uporabljen ultrazvok več frekvenc;
- za določitev pozicije naj bo uporabljen algoritem TDOA¹;

Na podlagi izhodišč je izdelan blokovni diagram na sliki 2.1, ki prikazuje razdelitev danega sistema na manjše enote.

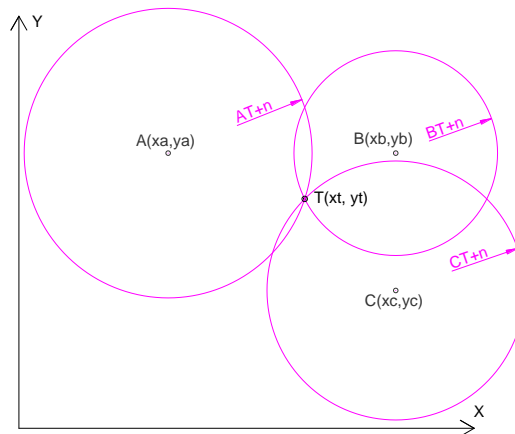
¹ TDOA - Time Difference Of Arrival, algoritem razlike časov prihoda



Slika 2.1: Blokovni diagram sistema za pozicioniranje

2.1 Princip pozicioniranja

Pozicijo točke, ki se nahaja na ravni ploskvi lahko določimo, če poznamo njeno oddaljenost od treh točk z znano pozicijo. V omejenih primerih bi bilo dovolj že poznavanje oddaljenosti od dveh znanih točk. Za lažjo predstavo služi slika 2.2. Če so v koordinatni sistem vrisane znane točke A , B in C , ter okrog njih začrtane krožnice, katerih polmeri (AT , BT in CT) so enaki oddaljenosti pozicionirane točke od znanih točk, se te vse skupaj sekajo v pozicionirani točki T . Z nekaj izračuni, se da izračunati koordinate te točke.



Slika 2.2: Princip določanja pozicije točke T iz znanih razdalj med njo in stacionarnimi točkami A , B in C

2.2 TDOA¹ algoritem

V danem sistemu je povezava do pozicionirane točke brezžična in dopušča možnost odpravljanja napak med prenosom. To lahko povzroči nepredvidljive zakasnitve, kar onemogoča meritev absolutnih razdalj med znanimi in neznanimi točkami v sistemu. Razlike med razdaljami vendarle ni problem izmeriti, bodo pa te zamaknjene za določeno konstanto n (glej sliko 2.2). Določitev vrednosti te konstante v danem sistemu omogoča algoritem razlike časov prihoda z imenom TDOA¹. Algoritem iz razlike razdalj med znanimi in neznanimi točkami v sistemu pozicioniranja poišče najbolj smiselno vrednost te konstante. Ko je ta smiselna se namreč več krožnic seka v eni točki. v praksi, kjer se pojavi še nekaj napake, se točke ne sekajo točno v eni točki, temveč gre za množico presečišč z minimalno medsebojno razdaljo. Ta presečišča potemtakem obdajajo pozicionirano točko T .

2.3 Merjenje razdalj z uporabo ultrazvoka več frekvenc

Ultrazvok potuje s hitrostjo običajnega zvoka. Ta po zraku potuje s hitrostjo približno 340 m/s, oziroma tako, kot pravi enačba (2.1), ki velja za suh zrak. Če na eni točki oddajamo ultrazvočne impulze, na drugi pa jih sprejemamo, ter ob tem merimo čas, ki ga je posamezni impulz potreboval, da je prepotoval razdaljo med oddajnikom in sprejemnikom, lahko izračunamo razdaljo, ki jo je prepotoval. Glede na počasnost potovanja in izzvenevanja zvoka, je hitrost ponavljanja meritev omejena. Po meritvah sodeč je v opremljenem prostoru velikosti 5x5 metrov ta čas dobrih 100 ms. Za dan sistem je bila podana zahteva, da naj zmore pozicionirati veliko število točk brez upada časa osveževanja, zato so znane stacionarne točke oddajniki ultrazvoka, neznane pozicionirane točke pa sprejemniki.

$$c_{air} = 331,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\vartheta^{\circ\text{C}}}{273,15^{\circ\text{C}}}} \quad (2.1)$$

Tu je:

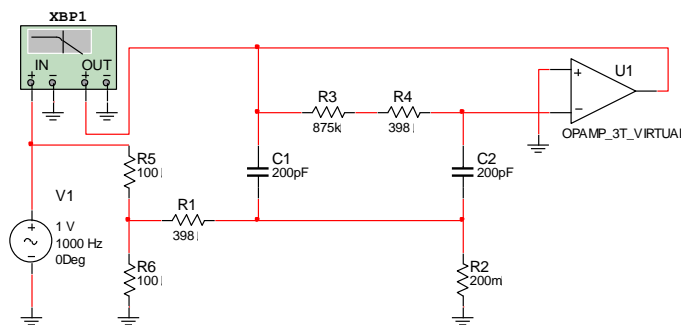
c_{air} - hitrost zvoka v zraku [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]

ϑ - temperatura zraka [$^{\circ}\text{C}$]

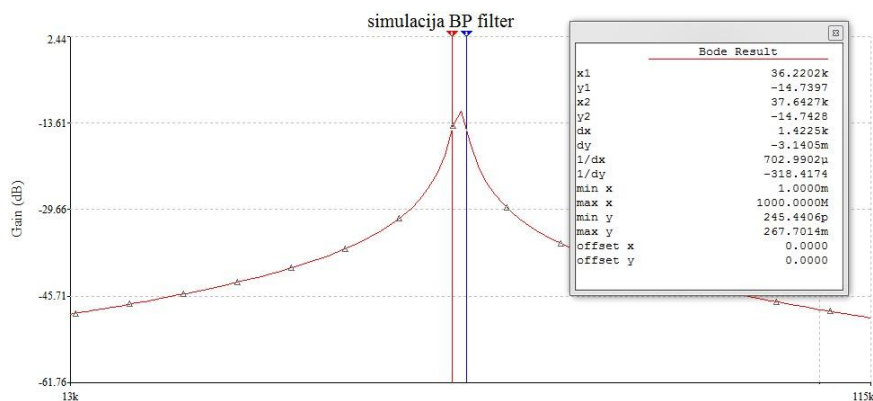
V primeru uporabe petih oddajnikov na isti frekvenci, vsak po svoji oddaji zapolni prostor za dobrih 100 ms. Tako je lahko frekvenca osveževanja največ 2 krat na sekundo, kar ne zadošča zahtevam. Od tod zamisel po uporabi ultrazvoka več frekvenc. Če vsak oddajnik odda ultrazvočni signal druge frekvence, lahko ti oddajajo sočasno in bo sprejemnik še vedno lahko razbral čas prihoda posamezne frekvence.

Ultrazvočni oddajnik najbolje deluje na njegovi resonančni frekvenci. Odstopanje oddajne frekvence od resonančne za nekaj 100 Hz se že odraža v slabljenju oddajanja za več dB. Razlike med frekvencami oddajnikov bodo torej morale biti kar se da majhne. Razpoznavanje frekvenc z majhnimi razlikami zna biti zapleteno. Pasivna sita so za ta namen že v osnovi premalo selektivna. Aktivna sita so lahko veliko bolj selektivna. V programu Multisim [1] so bile tako izvedene simulacije treh različnih vezav aktivnih ozko-prepusnih sit.

Prva simulacija je simulirala tip vezave iz spletne dokumentacije [2]. Slika 2.3 prikazuje to vezavo pripravljeno za simulacijo. Sodeč po rezultatih simulacije 2.4 je njena najvišja kvaliteta približno 29, kar je premalo selektivno. Zato je bil preverjen še tip vezave iz spletne strani [2], ki pa je, kot je tudi avtor navedel, podal najboljšo kvaliteto le 5.



Slika 2.3: Shema prvega pasovno prepustnega sita

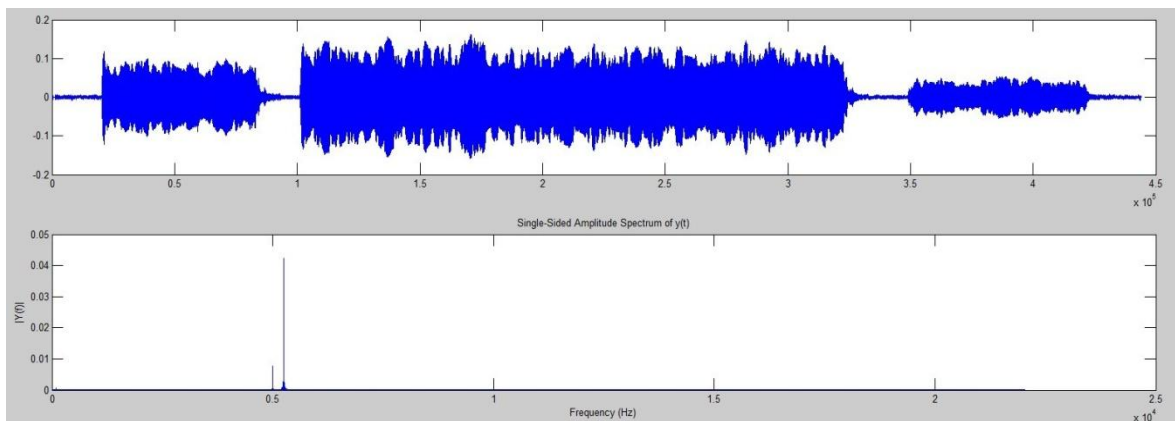


Slika 2.4: Ojačenje prvega pasovno prepustnega sita

Preverjeno je bilo tudi sito opisano v dokumentaciji [3]. S kvaliteto skoraj 1000, je selektivnost tega tipa sita sprejemljiva za dano aplikacijo. Še bolj primerna bi bila zaporedna vezava dveh takšnih sit. Tako bi pri odstopanju od srednje frekvence za +/- 500 Hz dobili že 40 dB slabljenja. Za ohranitev kvalitete in srednje frekvence, morajo biti vrednosti komponent pri tem tipu sita zelo natančne in stabilne. Rešitev bi lahko bila dodatna elektronika za avtomatsko kalibracijo sit. Teoretična rešitev problema torej obstaja, vendar obstaja tudi veliko tveganje za nestabilnost sita in zato v to rešitev do nadaljnjega ni bilo vloženega več truda.

Obstaja tudi rešitev z digitalnim vzorčenjem analognega signala in nato digitalnim signalnim procesiranjem le tega. Fourierjeva transformacija časovno domeno signala pretvori v frekvenčno. Tako lahko v posameznem časovnem odseku razberemo jakost posamezne frekvence v signalu.

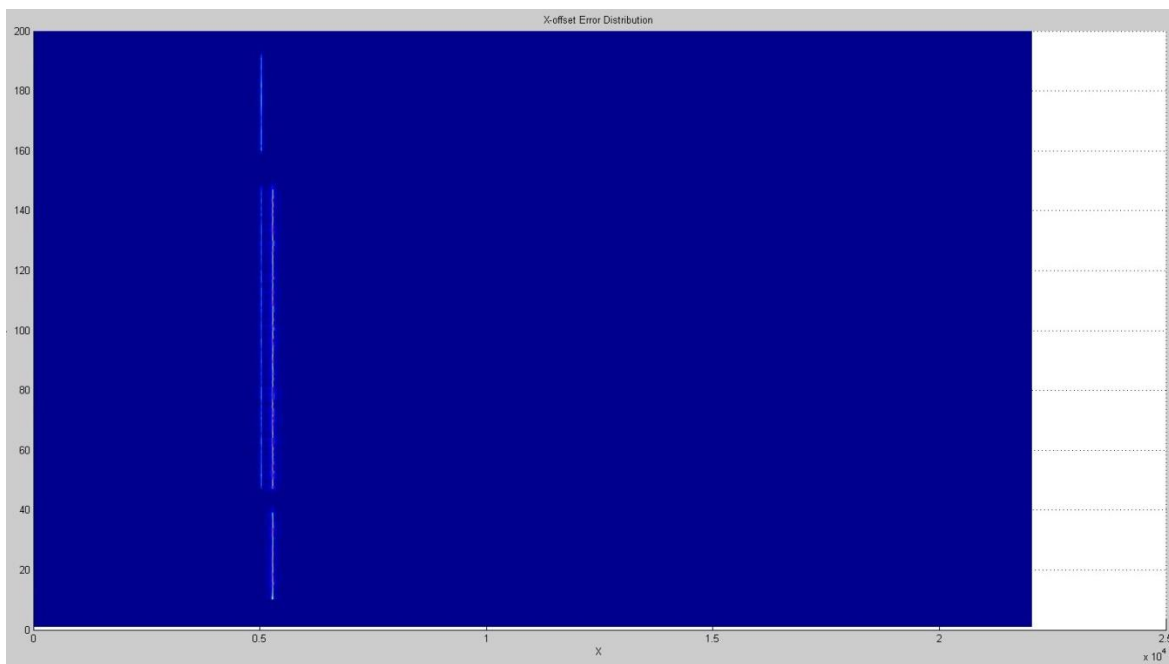
Ta teorija je bila preverjena s praktično simulacijo. Iz zvočne kartice je bil preko zvočnika predvajan sinusni signal s frekvenco 5 kHz in 5,25 kHz. Dobljen zvok je bil nato posnet nazaj na računalnik z mikrofonom in zvočno kartico. V programu Matlab [4] je bil sestavljen testni program, ki za dan posnetek grafično izriše potek amplitude signala skozi čas, ter z uporabo Fourierjeve transformacije izračuna povprečno amplitudo posameznih frekvenc v danem posnetku (slika 2.5).



Slika 2.5: Časovni potek simuliranega signala 5000 ter 5250 Hz in njegova Fourierjeva transformacija

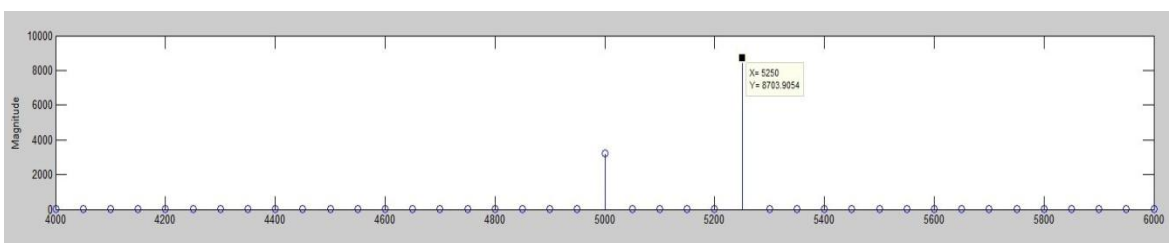
Program nato posnetek še razdelil na več časovnih odsekov, ki jih posamezno transformira s Fourierjevo analizo. Dobljeno množico Fourierjevih analiz je nato združil v 3D graf odvisnosti jakosti signala od frekvence in časa (slika 2.6). Iz 3D grafa se jasno razbere, kdaj je bila katera frekvenca prisotna, ter kdaj ne. Rezultat je zelo dober, žal pa je

Fourierjeva transformacija procesorsko precej zahteven algoritem, saj se posveti celotnemu spektru frekvenc, kar bi se znalo izraziti kot neodzivnost končnega sistema.



Slika 2.6: 3D graf Fourierjeve transformacije posameznih časovnih odsekov

Veliko učinkovitejši za ta namen je Goertzel-ov algoritem [5], ki je izpeljan iz Fourierjeve transformacije in je namenjen prav prepoznavi pojavitve določene frekvence v signalu. V Matlab implementiran Goertzel-ov algoritem pokaže identičen rezultat kot Fourierjeva transformacija, le da se omeji na izbrane frekvence (slika 2.7) in zato porabi veliko manj procesorskega časa. Ta algoritem bo torej primeren za prepoznavo ultrazvočnih pulzov različnih frekvenc v sprejemni modul.



Slika 2.7: Analiza signala z Goertzel-ovim algoritmom

3 ZASNOVA IN IZVEDBA SISTEMA ZA POZICIONIRANJE

Glede na zahteve je sistem razdeljen na:

- **centralni vgrajen sistem**, ki žično komunicira z računalnikom in oddajnimi enotami, ter brezžično s sprejemnimi enotami;
- **oddajne enote**, ki so stacionarne in porazdeljene po prostoru. Na zahtevo centralnega vgrajenega sistema v prostor oddajo določeno število ultrazvočnih impulzov določene frekvence;
- **sprejemne enote** sprejemajo ultrazvočni signal in iz prejetega signala merijo svojo oddaljenost od posameznih oddajnih enot ter to brezžično sporočajo centralnemu vgrajenemu sistemu;
- **računalniški program**, ki uporabniku grafično prikazuje stanje sistema, ter mu omogoča interakcijo. V ozadju preko centralnega vgrajenega sistema komunicira z oddajnimi in sprejemnimi enotami, ter izvaja TDOA algoritem za določanje pozicij sprejemnih enot.

3.1 Centralni vgrajen sistem

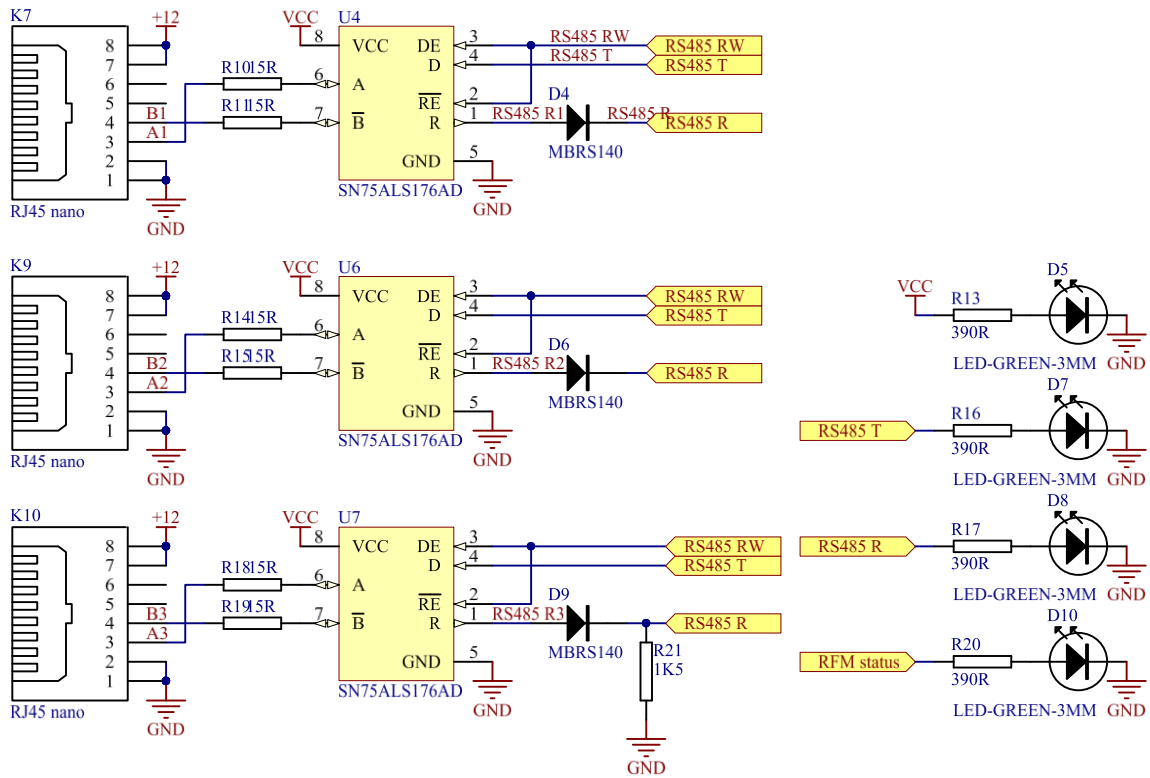
Centralni vgrajen sistem povezuje vse ostale enote v celoto. Skrbi za časovno uskladitev. Žično komunicira z računalnikom in oddajnimi enotami, ter brezžično s sprejemnimi enotami.

3.1.1 Komunikacijski del centralnega vgrajenega sistema

Komunikacije so osnovna funkcija centralnega vgrajenega sistema. Sistem z ostalimi komponentami komunicira preko RS-485 vodila, USB komunikacije ter brezžične komunikacije.

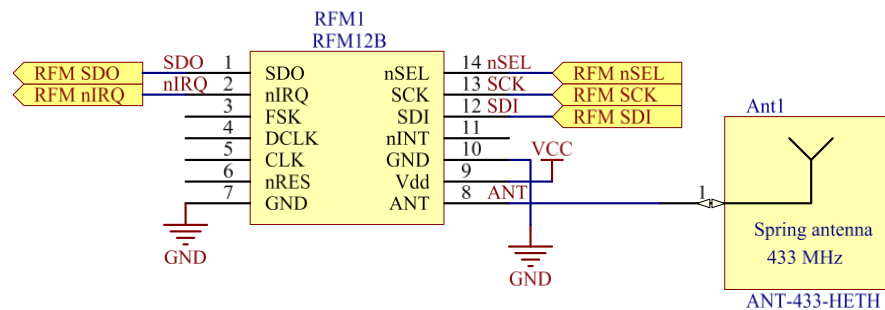
Za komuniciranje z oddajnimi enotami, ki so razporejene po prostoru je uporabljeno RS-485 vodilo. Za lažjo povezljivost se lahko oddajne enote povezuje zaporedno, sicer pa ima centralni vgrajen sistem tri ločena master² RS-485 vodila. Gonilniki posameznih vodil so namenska integrirana vezja SN75ALS176 [7], na shemi 3.1 označena z U4, U6 in U7. Vsa tri vodila so sicer združena v eno UART vodilo. To omogočajo diode D4, D6 in D9 ter upor R21, ki skupaj tvorijo logična *ali vrata*. Za signalizacijo stanja so dodane še LED⁴ diode D5, D7, D8 in D10.

² master - v komunikacijskih sistemih predstavlja enoto, ki daje pobudo za komunikacijo



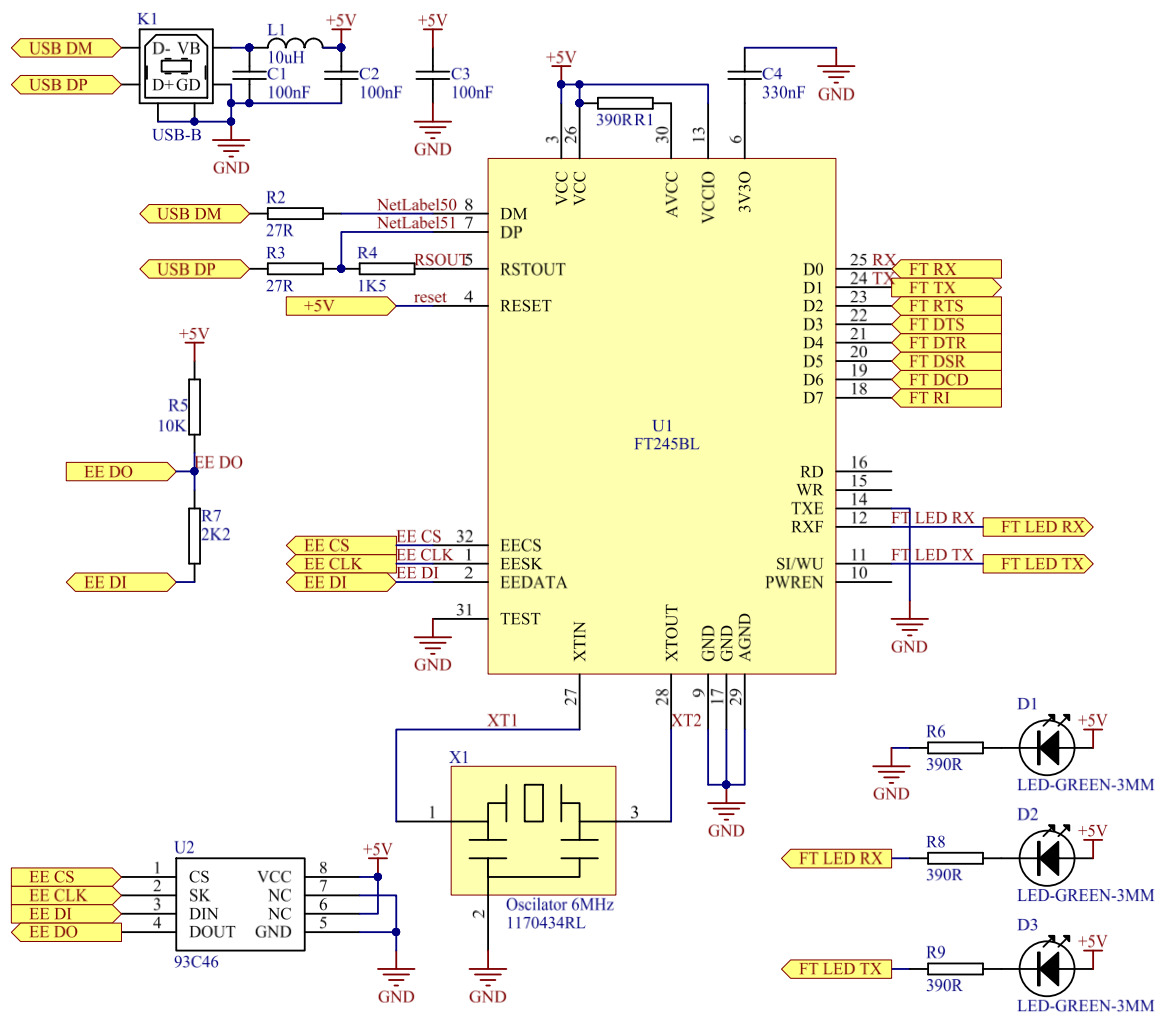
Slika 3.1: Shema periferije primerne za več vzporednih RS-485 vodil

Centralni vgrajen sistem brezžično komunicira s pozicioniranimi sprejemnimi enotami. To mu omogoča brezžični komunikacijski modul RFM12B [8]. Ta po SPI vodilu komunicira z mikrokrmilnikom na centralnem vgrajenem sistemu, preko antene pa brezžično z RFM12B moduli na sprejemnih modulih. Brezžična komunikacija poteka na frekvenci 433 MHz z močjo 7 dBm pri bremenu 50 Ω. RFM12B modul je priključen tako, kot prikazuje shema na sliki 3.2.



Slika 3.2: Shema periferije za brezžično komunikacijo

Komunikacija z računalnikom poteka preko USB vodila. Strojna oprema uporabljenega mikrokrmilnika ne podpira USB vodila, zato se na vezju nahaja še FTDI integrirano vezje FT232, ki se na USB vodilu predstavi kot virtualni COM³ priključek in tako generira UART vodilo s katerim se lahko poveže z mikrokrmilnikom. FT232 čip potrebuje še zunanji precizen 6 MHz oscilator, EEPROM 93C46, ter nekaj uporov in kondenzatorjev. Z računalnikom se poveže preko ženskega USB priključka tipa B. Preko USB priključka FTDI pretvornik dobi lastno napajanje 5 V, ki je dodatno zglajeno z dušilko L1 in kondenzatorjema C1 ter C2. LED⁴ dioda D1 signalizira stanje napajanja iz USB priključka, LED diodi D2 in D3 pa stanje povezave.



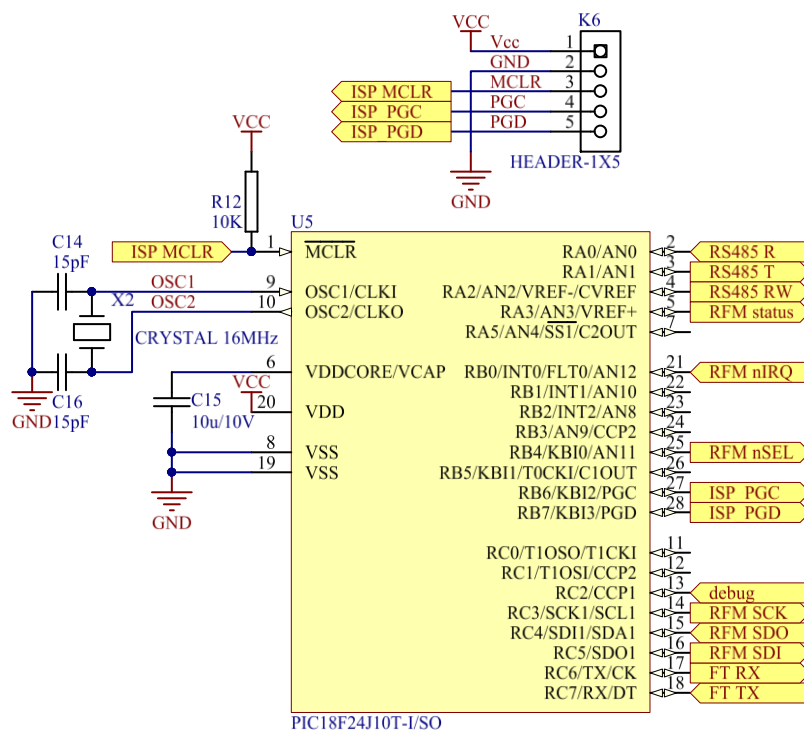
Slika 3.3: Shema periferije FTDI pretvornika

³ COM - Communication port - komunikacijski priključek na računalniku, lahko tudi virtualen

⁴ LED - Light Emitting Diode - dioda, ki oddaja svetlobo

3.1.2 Mikrokrmilnik na centralnem vgrajenem sistemu

Mikrokrmilnik na tem sistemu ima predvsem nalogo upravljanja z več vodili, uveljavljanja računalnikovih ukazov, ter skrbi, da vsi podatki pridejo na pravo mesto ob pravem času. Uporabljen je Microchipov mikrokrmilnik PIC18F24J10 [9], ki popolnoma zadostuje za dano aplikacijo. Deluje na napetosti 3,3 V. Jedro deluje na nižji napetosti od napajalne, ki jo generira z notranjim napetostnim regulatorjem, ki za stabilno delovanje potrebuje še zunanji tantalov kondenzator, na shemi na sliki 3.4 označen s C15. Za točen takt hitrejših komunikacij ima dodan zunanji 10 MHz kristal, katerega s PLL⁵ množilnikom množi na takt 40 MHz. Program se nanj nalaga preko ISP⁶ priključka K6 in zunanjega programatorja.



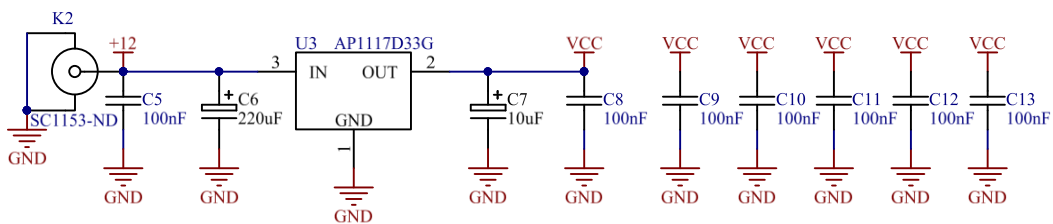
Slika 3.4: Shema periferije za procesiranje podatkov

⁵ PLL - Phase-Locked Loop - množilnik frekvence, ki deluje s pomočjo ohranjanja izhodnega signala v fazi s vhodnim signalom

⁶ ISP - In System Programming - zmožnost programiranja mikrokrmilnika, ko je ta že vgrajen

3.1.3 Napajalni del centralnega vgrajenega sistema

Centralni vgrajen sistem se napaja iz zunanje napajalnika z napetostjo 12 V in vsaj 500 mA toka. Napajalna napetost mora biti stabilna, saj je uporabljena direktno za napajanje ultrazvočnih oddajnikov. Shema napajalnega dela je prikazuje sliki 3.5. Periferija centralnega vgrajenega sistema potrebuje napajanje 3,3 V, ki jih regulira napetostni regulator U3. Ob vsakem izvoru visokofrekvenčnih motenj se v njegovi bližini nahaja gladilni kondenzator vrednosti 100 nF (C5, C8, C9, C10, C11, C12 in C13). Ob napetostnem regulatorju U3 se nahajata še kondenzatorja C6 in C7 namenjena pokrivanju večjih tokovnih špic.

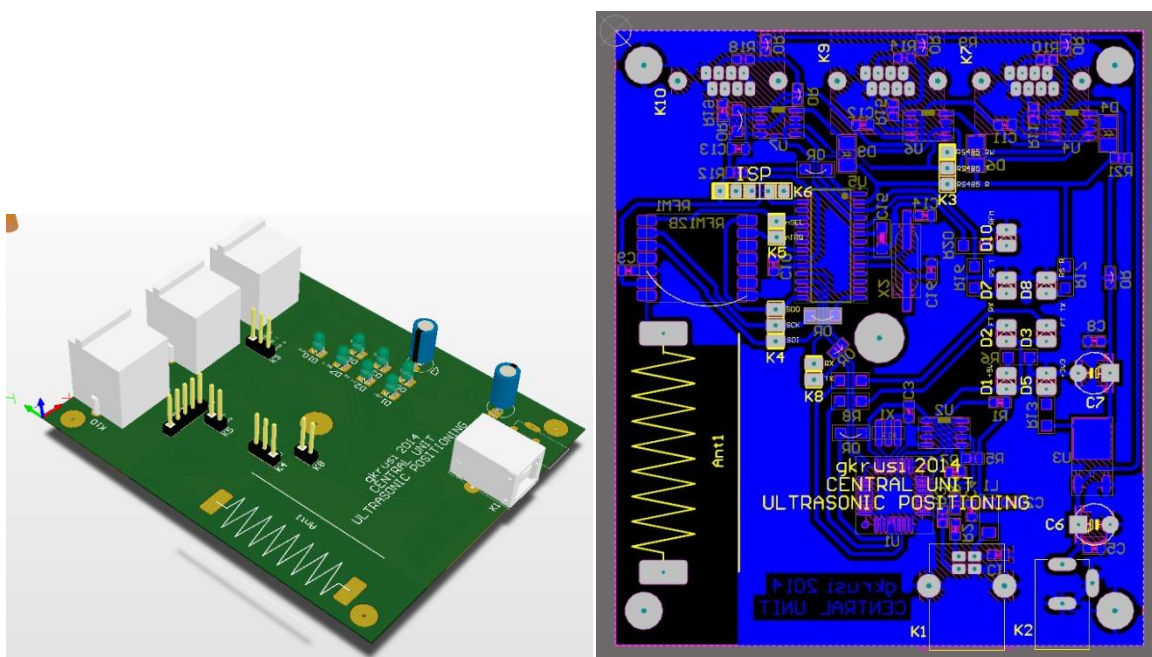


Slika 3.5: Shema napajalnega dela centralnega vgrajenega sistema

3.1.4 Tiskano vezje centralnega vgrajenega sistema

Tiskano vezje sistema je bilo konstruirano v programu Altium Designer [10]. Knjižnice za nekatere komponente so bile ročno izdelane. Velikost vezja je bila določena glede na ohišje, ki je bilo primerne velikosti. Postavitev priključkov je prav tako prilagojena ohišju, postavitev preostalih komponent pa je prilagojena glede na lokacijo priključkov. Vezje je enostransko. Večina uporabljenih komponent je v SMD⁷ izvedbi. Na vezju je za namene testiranja puščenih precej testnih točk, za katere so uporabljene kar priključne letvice. Neizkoriščen prostor je zapolnjen s površino mase, kar služi za odstranjevanje elektromagnetnih motenj. Vezje je bilo izdelano ročno, po postopku s prenosom tonerja [11]. Ohišje je plastično, saj mora prepuščati radijski signal, ki ga oddaja antena Ant1, pritrjena direktno na vezje. Za signalne LED diode so na zgornji stranici ohišja na pripadajočih mestih izvrtane luknje premera 3 mm. LED diode so prispajkane tako visoko, da se prilegajo višini ohišja. Slika 3.6 prikazuje konstruirano tiskano vezje, slika 3.7 pa izdelano vezje v ohišju.

⁷ SMD - Surface-Mount Device - komponenta, ki se pritrdi direktno na površino tiskanega vezja



Slika 3.6: Načrtovano tiskano vezje v 2D in 3D pogledu



Slika 3.7: Sestavljen centralni vgrajen sistem vgrajen v plastično ohišje

3.2 Oddajna enota

Oddajna enota mora na zahtevo oddati določeno število ultrazvočnih pulzov določene frekvence. Za ta namen uporablja ultrazvočni oddajnik⁸. Na tržišču je precej različnih ultrazvočnih oddajnikov z različnimi lastnostmi. Zahteve za dano aplikacijo so:

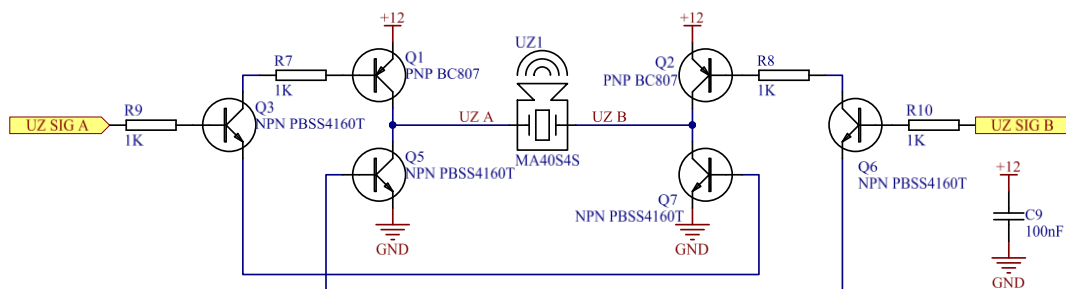
- čim širši kot oddajanja;
- čim višji SPL v območju vsaj 38-42 kHz;
- čim nižja cena;
- napajalna napetost do 40 Vpp.

Izbran je bil oddajnik MA40S4S proizvajalca Murata (slika 3.8). Najvišji SPL lahko odda v frekvenčnem območju od 39 do 41 kHz. Njegova najvišja trajna dovoljena napajalna napetost je izmeničnih 20 Vpp.



Slika 3.8: Ultrazvočni oddajnik MA40S4S

Ker bo modul napajan z nizko napetostjo, je za krmiljenje oddajnika uporabljen H most⁹ in enosmerno napajanje 12 V. H most je zgrajen iz šestih tranzistorjev krmiljenih z dvema logičnima signalnima linijama.



Slika 3.9: Shema oddajnega dela ultrazvočnega oddajnika

Na shemi 3.9 tranzistorja Q3 in Q6 služita za sočasno odpiranje NPN in PNP tranzistorjev. Visoko logično stanje na liniji UZ SIG A v H mostu odpre tranzistorja Q1 in Q7, kar dovede na ultrazvočni oddajnik 12 V. Visoko logično stanje na liniji UZ SIG B

⁸ ultrazvočni oddajnik - je zvočnik, ki deluje na frekvenci višji od slišne.

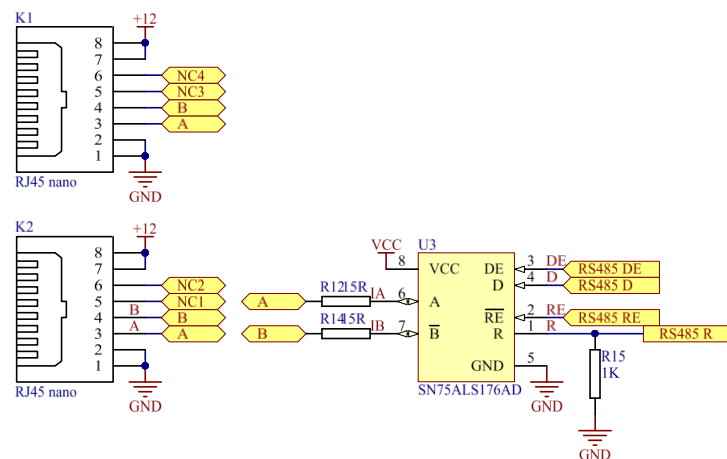
⁹ H most - je elektronsko vezje, ki omogoča dovajanje napetosti na breme v obeh smereh.

odpre tranzistorja Q5 in Q2 ter tako na oddajnik dovede -12 V. V primeru nizkega stanja na obeh signalnih linijah je ultrazvočni oddajnik v lebdečem stanju. Paziti je potrebno, da se hkrati ne pojavi visoko stanje na obeh signalnih linijah, saj bi se s tem odprla oba tranzistorja zaporedno vezana na napajanje in se s tem uničila. Z izmenjavanjem visokega stanja na linijah oddajnik zaniha z želeno frekvenco in amplitudo 24 Vpp z odbitkom izgub na kablil in tranzistorjih, torej približno 21 Vpp.

3.2.1 Povezava oddajne enote s centralnim vgrajenim sistemom

Oddajna enota dobi vse potrebne informacije za delovanje iz centralnega vgrajenega sistema in sicer preko RS-485 in UART protokola. Povezava je izvedena z uporabo UTP kabla ter RJ-45 priključkov. Ker oddajnik za delovanje ne potrebuje velike moči, se napaja kar preko dveh paric¹⁰ istega kabla. Oddajna enota ima na sebi dve RJ-45 vtičnici, na shemi 3.9 označeni s K1 in K2, ki sta med seboj povezani. Tako lahko vsaka vtičnica služi kot vhodna ali izhodna vtičnica, kar omogoča zaporedno vezavo oddajnikov. Izhodna vtičnica zadnjega oddajnika v seriji mora praviloma biti zaključena s terminatorjem¹¹. V RS-485 protokolu je njegova vrednost 120 Ω in je vezan med podatkovni liniji A in B.

Integrirano vezje U3 na shemi 3.9, tipa SP3485CN, prejet RS-485 signal pretvarja v TTL nivoje. SP3485CN ima sposobnost oddajanja in sprejemanja RS-485 komunikacije, kar oddajni enoti omogoča dvosmerno komunikacijo s centralnim vgrajenim sistemom.



Slika 3.10: Shema komunikacijskega dela oddajne enote

¹⁰ parica - dva prepletena izolirana vodnika.

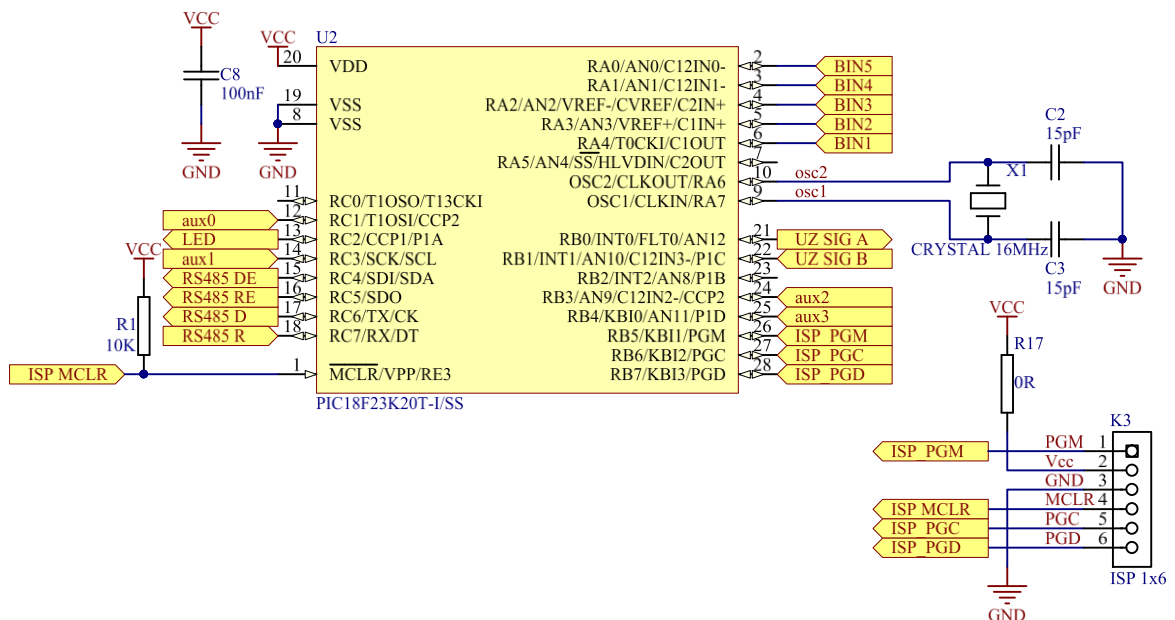
¹¹ terminator - upor namenjen zaključitvi podatkovnih linij, preprečuje odboj visokofrekvenčnega signala.

3.2.2 Mikrokrmilnik na oddajni enoti

Oddajna enota procesorsko ni posebej zahtevna, zaželen je le čim višji urin takt, da bo lahko resolucija generiranja različnih frekvenc čim višja. Izbran je bil cenovno ugoden Microchip-ov mikrokrmilnik PIC18F23K20 v SSOP ohišju (slika 3.11). Preko PLL množilnika lahko deluje na frekvenci do 64 MHz. Ob zunanjem kristalu X1 omogoča še 23 vhodno/izhodnih priključkov, ki so uporabljeni za krmiljenje ostale periferije. Glede na njegovo delovno območje je napajen s 3,3 VDC. Programira se ga lahko preko 6 polnega ISP priključka K3, ter primerne programatorja. Shema 3.12 prikazuje razporeditev signalnih linij na priključke mikokrmilnika.



Slika 3.11: Mikrokrmilnik PIC18F23K20 v SSOP ohišju

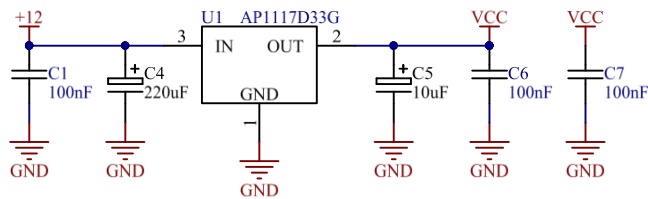


Slika 3.12: Shema priključitve mikrokrmilnika v oddajni enoti

3.2.3 Napajanje oddajne enote

Shema napajalnega dela oddajne enote prikazuje shema 3.13. Dovedno napajanje je dovedeno iz centralnega vgrajenega sistema preko že omenjenega RJ-45 priključka K1 in K2. Napetost je tako enosmernih 12 V, zmanjšanih za padec napetosti na vodnikih ter s

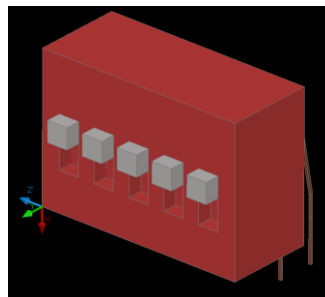
toleranco regulatorja te napetosti na centralnem vgrajenem sistemu. Za oddajno enoto je zaželeno odstopanje manjše od ± 300 mV. Oddajni del oddajne enote se napaja direktno iz tega napajanja, zglajenega s kondenzatorjema C1 in C4. Ostala periferija na enoti je dimenzionirana za 3,3 V napajanje, ki ga iz dovedenih 12 V regulira linearni napetostni regulator U1. Kot je specificirano s strani proizvajalcev se na napajalnih linijah v bližini generatorjev visokofrekvenčnih motenj (napetostni regulator, mikrokrmilnik, SP485 in H most) nahajajo folijski gladilni kondenzatorji.



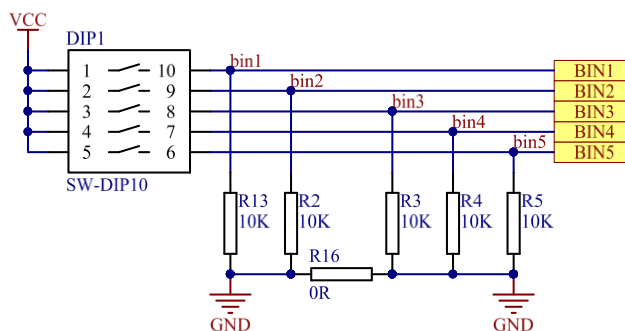
Slika 3.13: Shema napajalnega dela

3.2.4 Konfiguracija

Za nastavitve naslova oddajnika in morebitne dodatne funkcije je uporabljeno pokončno 5 polno DIP stikalo, ki se nahaja na sprednjem robu vezja, tako da je kadarkoli dostopno uporabniku. Ostala konfiguracija se izvaja preko RS-485 komunikacije.



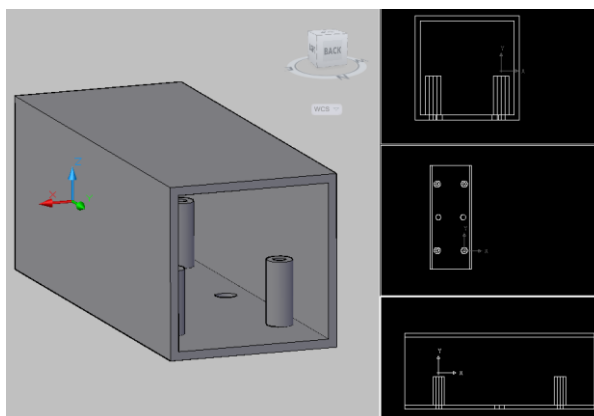
Slika 3.14: DIP stikalo



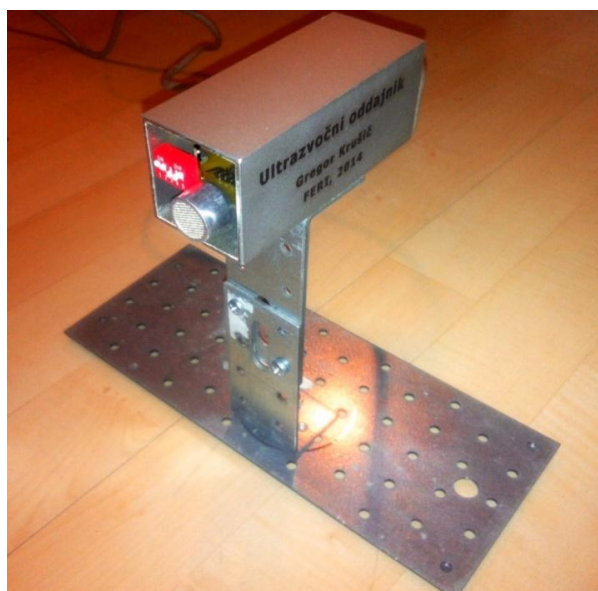
Slika 3.15: Shema DIP stikala

3.2.5 Ohišje oddajne enote

Kot ohišje je uporabljen kockast aluminijast profil dimenzij 40x40x100 mm s steno 2 mm. Aluminijasto ohišje je prevodno in povezano na maso. Tako v veliki meri služi kot zaščita pred sprejemanjem ter oddajanjem elektromagnetnih motenj, hkrati pa je dobra mehanska zaščita. Vežje je v profil pritrjeno z M3 vijaki in kovinskimi 15 mm distančniki. Sprednjih in zadnjih stranic ni, saj nimajo ključne vloge, so pa v načrtu za nadaljnje delo. Ker je zaželeno, da je oddajnik vzporeden s tlemi pa vendar dvignjen na določeno višino, sta na spodnjo stran ohišja vrezana dva M5 navoja, ki omogočata pritrditev oddajnika na podnožje. Načrt za ohišje je izrisan v programu AutoCAD in ga prikazuje slika 3.16. Na eno stranico oddajnika je po postopku s prenosom tonerja [7] nanesen napis z osnovnimi podatki o oddajniku, kar daje končani oddajni estetski dodatek.



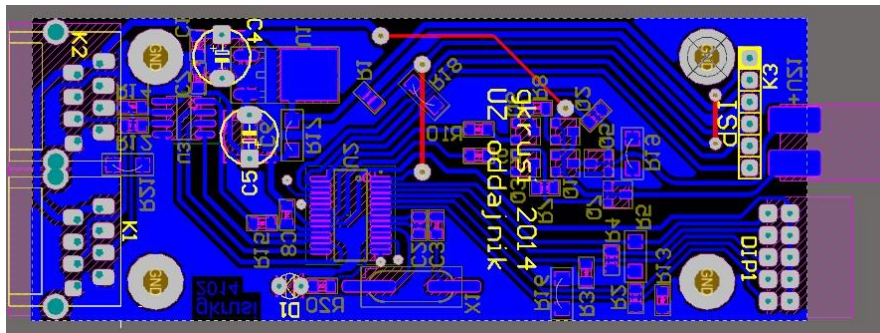
Slika 3.16: 3D načrt ohišja oddajne enote



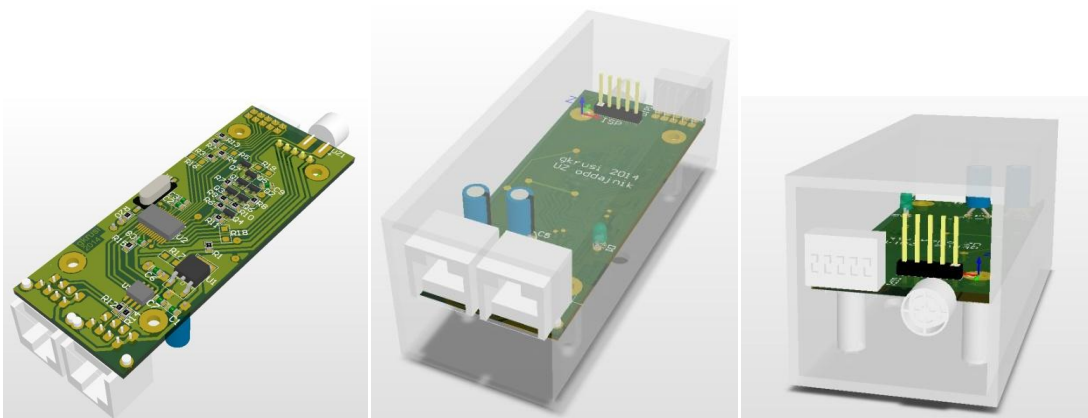
Slika 3.17: Izdelano ohišje in podnožje oddajne enote

3.2.6 Tiskano vezje oddajne enote

Shema in tiskano vezje oddajne enote sta bila načrtovana v programskem okolju Altium Designer [6]. Velikost tiskanega vezja in postavitev lukenj je prilagojena ohišju. Postavitev priključkov, DIP stikal in ultrazvočnega oddajnika je prilagojena enostavni uporabi in ohišju. Ostale komponente na tiskanem vezju (integrirana vezja, upori, kondenzatorji,...) so razvrščene in orientirane glede na oddaljenost ter povezljivost z ostalimi, že postavljenimi, komponentami na vezju. Celotno vezje je obdano s površino mase, kar zmanjša oddajanje motenj, ki se generirajo ob hitrih spremembah napetosti na vezju oddajnika. Vseh komponent v knjižnicah programa Altium Designer ni bilo mogoče najti, zato so bile knjižnice za RJ-45 priključek K1 ter K2, DIP stikalo DIP1 in ultrazvočni oddajnik UZ1 ročno ustvarjene. V programu AutoCAD [7] je bil izrisan tudi 3D model omenjenih komponent in ohišja, ki je prav tako vstavljen v končno simulacijo tiskanega vezja (slika 3.19).



Slika 3.18: Načrtovano tiskano vezje



Slika 3.19: Načrtovano tiskano vezje v 3D pogledu

3.2.7 Program za mikrokrmilnik na oddajni enoti

Program za uporabljen mikrokrmilnik je bil razvit v CCS C prevajalniku [8]. Nalaganje programa v mikrokrmilnik poteka preko ISP priključka in v danem primeru programatorja SmartProg2 [9]. Ker ISP priključek na vezju ni standardiziran, temveč je prilagojen najnižjemu možnemu številu pinov, je za povezavo potrebno uporabiti namensko izdelan kabel.

Program je sestavljen iz šestih osnovnih funkcij:

```
void RS485_read(); // nastavi RS-485 komunikacijo na branje
void RS485_write(); // nastavi RS-485 komunikacijo na pisanje
void timer0_prekinitev(); // časovna prekinitev, ki generira izhodni signal
void DMX_data_recieved(); // prekinitev, ki se proži ob prejemu
int DIP(); // prebere vrednost DIP stikala
int main(); // glavna zanka programa
```

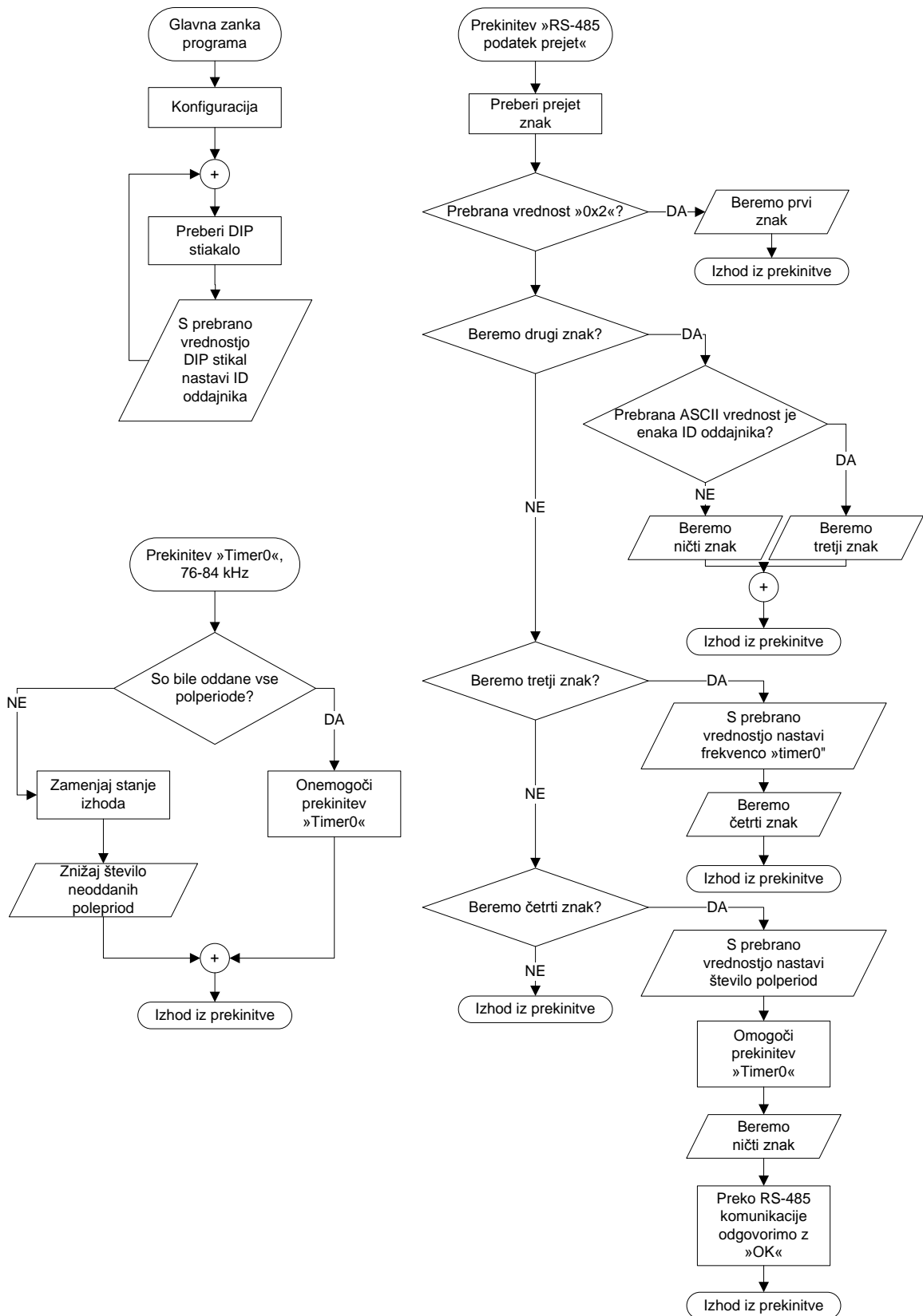
UART komunikacijski del je konfiguriran na hitrost prenosa 57600 baud¹², 1 stop bit in brez preverjanja paritete. Ukazi so tekstovni in se morajo ujemati s slednjim slogom:

- 'f' [ID] [frekvenca] [število impulzov] - vnos nastavitve;
- 't' - pričetek oddaje.

Pri tem je:

- [ID] - ASCII številka 0-9, ki določa ID oddajnika, ki se bo odzval na dan ukaz;
- [frekvenca] - ASCII številka, ki predstavlja frekvenco oddajnika:
'0' - 39029 Hz, '1' - 39220 Hz, '2' - 39413 Hz, '3' - 39608 Hz, '4' - 39806 Hz, '5' - 40005 Hz, '6' - 40206 Hz, '7' - 40409 Hz, '8' - 40614 Hz, '9' - 40821 Hz;
- [število impulzov] - ASCII številka, ki predstavlja število pol-period, ki jih oddajni modul odda ob proženju:
'0' - 2 pol-periodi, '1' - 3 pol-period, '2' - 4 pol-period, '3' - 5 pol-period,
'4' - 6 pol-period, '5' - 7 pol-period, '6' - 8 pol-period, '7' - 9 pol-period, '8' - 10 pol-period, '9' - 11 pol-period.

¹² baud - število bitov oziroma simbolov poslanih po komunikacijskem protokolu v času 1 sekunde



Slika 3.20: Blokovni diagram programa za mikrokrmilnik na oddajni enoti

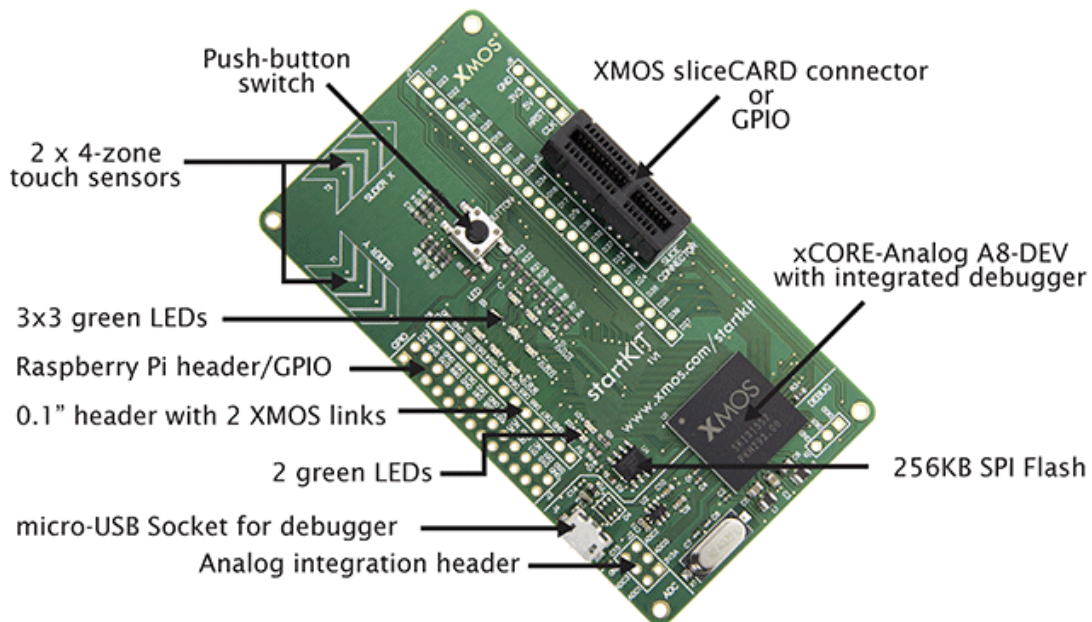
3.3 Sprejemna enota

Sprejemna enota predstavlja točko, ki jo dan sistem pozicionira v prostoru. Kot je bilo predhodno določeno, mora sprejemna enota sprejemati ultrazvočni signal ter iz dobljenega poteka razbrati razliko časov prihoda posameznih frekvenc ultrazvoka.

Uporabljena je razvojna plošča z dodanim vezjem, na katerem se nahaja preostala potrebna periferija.

3.3.1 Digitalno signalno procesiranje na sprejemni enoti

Digitalno signalno procesiranje podatkov je procesorsko zelo zahtevno in ima v dani aplikaciji na voljo le zelo majhen čas, sicer bi se čas osveževanja pozicije sorazmerno povečal. Za dano nalogo je torej potreben zmogljiv procesor. Podjetje XMOS je razvilo procesorje s t. i. xCORE jedrom. Procesor XS1-A6A-64-FB96 ima tako osmem 32 bitnih jeder, ki delujejo s taktom 100 MHz, ter lahko procesirajo s 500 MIPS¹³. Njegovih osem jeder omogoča porazdelitev opravil na jedra. Ker je omenjen procesor dobavljiv le v BGA izvedbi, je za razvoj in maloserijsko proizvodnjo ceneje uporabiti kar proizvajalčevo razvojno ploščo imenovano startKIT [11] prikazan na sliki 3.21.

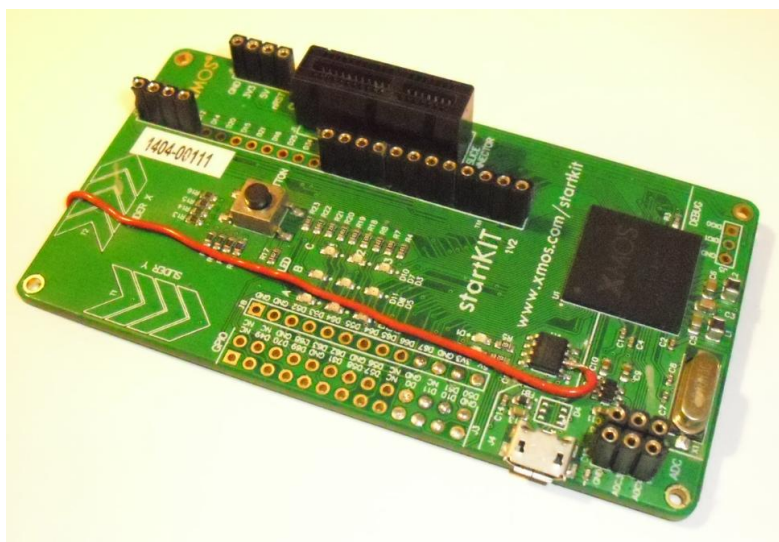


Slika 3.21: Razvojna plošča startKIT z xCORE jedrom

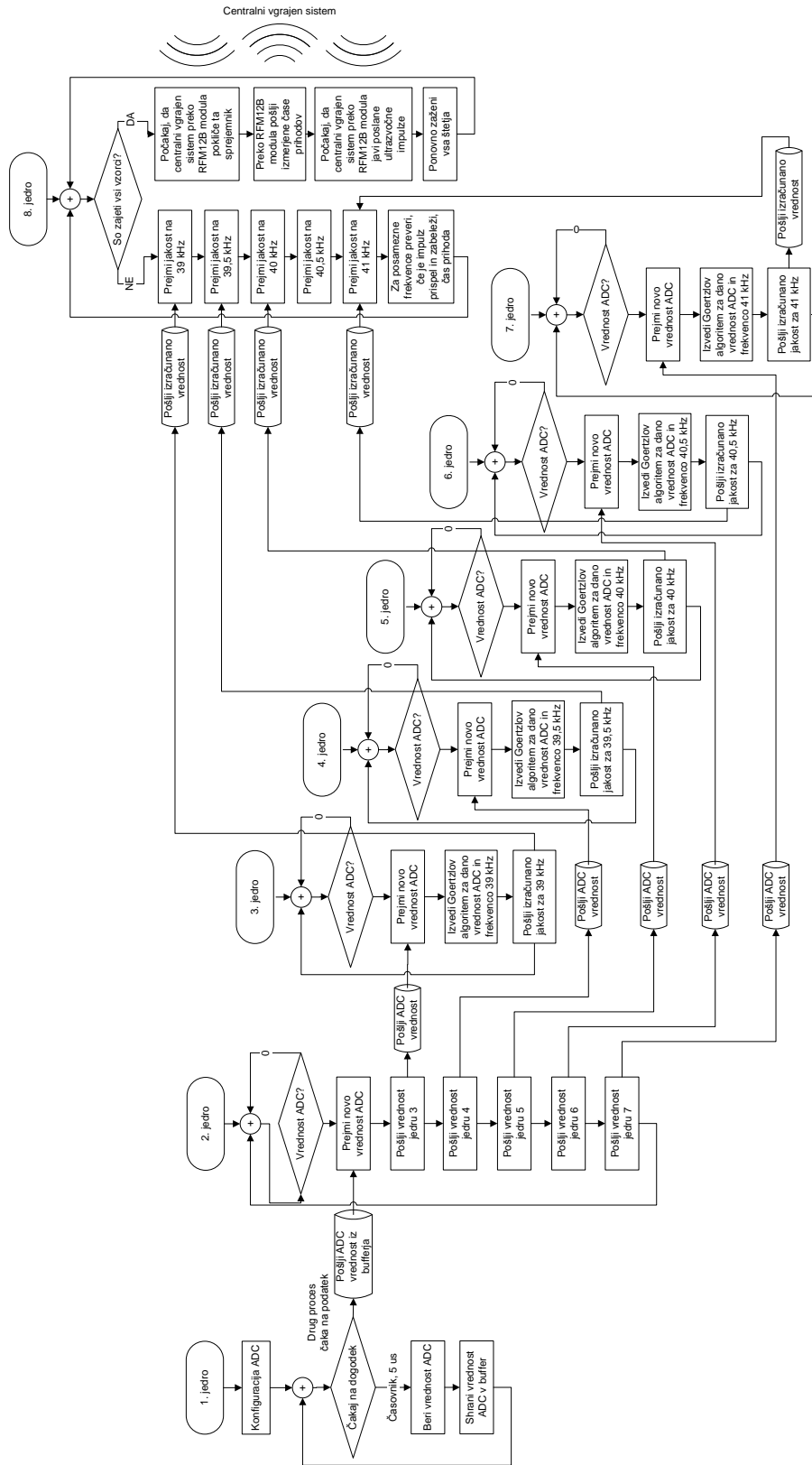
¹³ MIPS - **M**ilion **I**nstructions **P**er **S**econd - število milijonov inštrukcij, ki jih lahko procesor opravi v eni sekundi

Razvojna plošča startKIT je bila deležna zamenjave zunanjega FLASH pomnilnika v sRAM pomnilnik tipa 23LCV1024, saj je notranjega pomnilnika v procesorju premalo za hranjenje večje količine vzorcev. Zamenjan je bil tudi procesorjev krmilni izhod FLASH-ovega MISO pina, saj je bil ta tovarniško hkrati uporabljen za proženje analogno digitalne pretvorbe, ki se v dani aplikaciji potrebuje sočasno. Tako je sedaj FLASH-ov pin MISO povezan namesto na procesorjev izhod 1A na izhod 1P. Izhod 1A je pri tem še vedno prožilni pin analogno digitalne pretvorbe.

Program za omenjen krmilnik je bil pisan v namenskem programskem okolju xTime Composer Studio. Gre za C programski jezik z mnogimi namenskimi operatorji in funkcijami, ki jih je pred pisanjem programa potrebno dobro spoznati iz proizvajalčevih navodil. Glede na osem jedro procesiranje je bil program razdeljen na jedra. Tako eno jedro vzorči signal ter ga shranjuje v medpomnilnik, eno vzorčen signal razdeljuje med ostalih 5 jeder, ki izvajajo Goertzel-ov algoritem na posameznih frekvencah, zadnje jedro pa dobljene rezultate ovrednoti in skrbi za komunikacijo s centralnim vgrajenim sistemom. Podrobnejše delovanje programa prikazuje blokovni diagram 3.23.



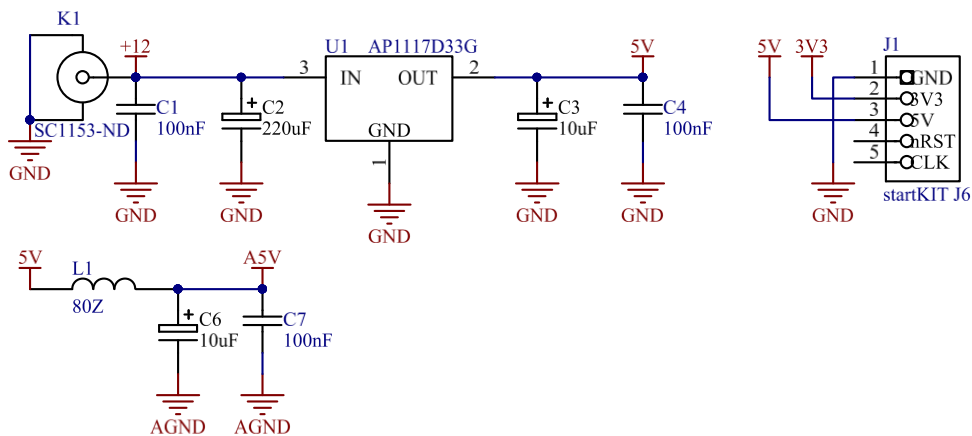
Slika 3.22: Razvojna plošča startKIT z izvedeno predelavo



Slika 3.23: Blokveni diagram programa v XMOS procesorju

3.3.2 Napajanje sprejemne enote

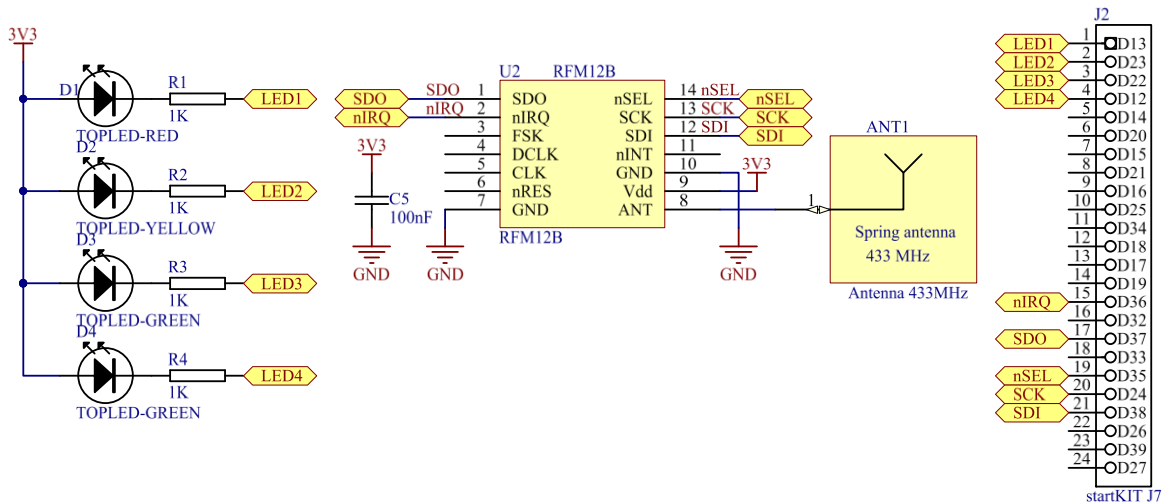
Sprejemna enota ne bo žično povezana s preostalim sistemom. Za testiranje bo vendarle z mikro USB priključkom povezana na računalnik in na njegovo napajanje. Sicer bo napajana iz 12 V akumulatorja, katerega napetost napetostni regulator U1 na sliki 3.24 zniža na 5 V. Teh 5 V se preko priključka J1 prenese na startKIT-ov napajalni priključek J6 in se tako uporabi za napajanje razvojnega kompleta, ki se pri tem obnaša enako, kot če bi bil napajen iz USB priključka. Regulator na razvojnem kompletu naredi še dvojno napajanje 3,3 V, ki ga uporablja tudi preostala dodana periferija. 5 V analogne komponente se napajajo preko dodatnega LC filtra, 3,3 V pa iz ločenega izhoda na razvojnem kompletu.



Slika 3.24: Shema napajalnega dela sprejemne enote

3.3.3 Povezava sprejemne enote s centralnim vgrajenim sistemom

Sprejemna enota je s centralnim vgrajenim sistemom povezana preko brezžične komunikacije, ki jo omogoča U2 na shemi 3.25, oziroma RFM12B modul [12]. RFM12B je modul je sprejemno oddajni modul na 433 MHz. S procesorjem komunicira preko SPI vodila. Signalne linije so preko priključka J2 povezane na priključek J7 na startKIT-u. Na priključek J2 so povezane še 4 LED diode, ki omogočajo osnovno signalizacijo stanja modula. Za anteno je uporabljena SMD spiralna antena prilagojena na dano frekvenco.



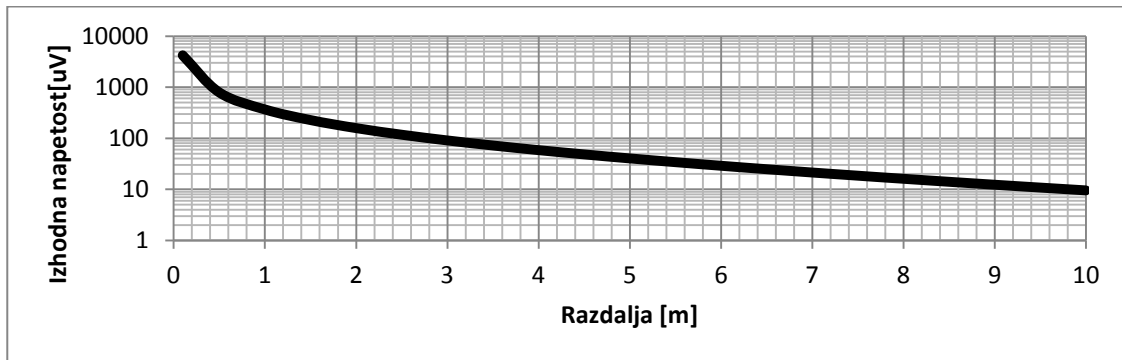
Slika 3.25: Shema komunikacijskega dela sprejemne enote

3.3.4 Sprejemni del za ultrazvok

Glede na izbran oddajnik in njegov komplementarni sprejemnik MAS40S4R prikazan na sliki 3.26, z občutljivostjo -63 dB, je bil po enačbah iz vira [13] izračunan napetostni izhod iz ultrazvočnega sprejemnika v odvisnosti od oddaljenosti. Opazimo, da je izhod zelo dinamičen, saj je v območju od nekaj deset mV do nekaj uV. Za dobre rezultate nadaljnega signalnega procesiranja mora biti ta napetost vzorčena s čim višjo resolucijo. Z linearno vzorčevalno skalo bi za ta namen potrebovali analogno digitalni pretvornik s vsaj 18 aktivnimi biti. Zagotovitev take resolucije v praksi je zahtevna. Rešitev se ponuja v logaritemski vzorčevalni skali. Glede na to, da bo uporabljen analogno digitalni pretvornik, ki je že implementiran v procesorju, mu skale ni mogoče spreminjati, lahko pa se mu dovaja že logaritemiran signal. Med ultrazvočni sprejemnik in analogno digitalni pretvornik bo torej potrebno vezati še logaritemski ojačevalnik.



Slika 3.26: Ultrazvočni sprejemnik MA40S4R



Slika 3.27: Graf pričakovane napetost na izhodu ultrazvočnega sprejemnika v odvisnosti od oddaljenosti od oddajnika

Kot logaritemski ojačevalnik je bilo prvo preizkušeno integrirano vezje AD8310 [14], ki daje na izhod logaritem absolutne vrednosti vhodne napetosti v dinamičnem območju 95 dB. Logaritem negativnih vrednosti namreč ni definiran v množici realnih števil. Ustvarjen izhod je pri tem torej absoluten, kar za dano aplikacijo ni zaželeno.

Zato je bila razvita namenska logaritemska ojačevalna stopnja. Ta signal transformira po nepopolni logaritemski funkciji, saj signalu ne dodeli absolutne vrednosti. Sestavljena je iz več stopenj. Celotno shemo prikazuje slika 3.31.

Prva stopnja je namenski operacijski ojačevalnik U3 z oznako INA121 [15], ki izhod iz ultrazvočnega sprejemnika ojači za faktor nastavljen s trimmerjem Pot3. Ta faktor je lahko med 100 in 10000. U3 in ostala analogna periferija je napajana z nesimetričnim 5 V napajanjem glajenim z LC sitom. Z uporoma R5 in R6 je ustvarjena virtualna masa s potencialom 2,5 V. Upora R12 in R13 potencial ultrazvočnega oddajnika omejujeta na to virtualno maso.

Zaradi morebitnih odstopanj izhodnega potenciala prve stopnje je med to in naslednjo stopnjo dodano visokoprepustno RC sito z mejno frekvenco 23 kHz, ki odstrani vse nizkofrekvenčne motnje ter potencial signala postavi na virtualno maso 2,5 V. Vrednosti elementov sita (R9 in C15), so bile izračunane z uporabo enačbe (3.1).

$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (3.1)$$

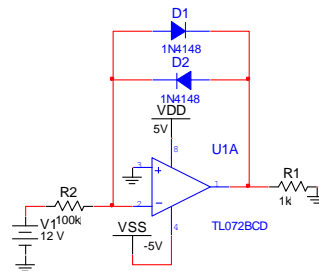
Tu je:

f_m - mejna frekvenca [Hz]

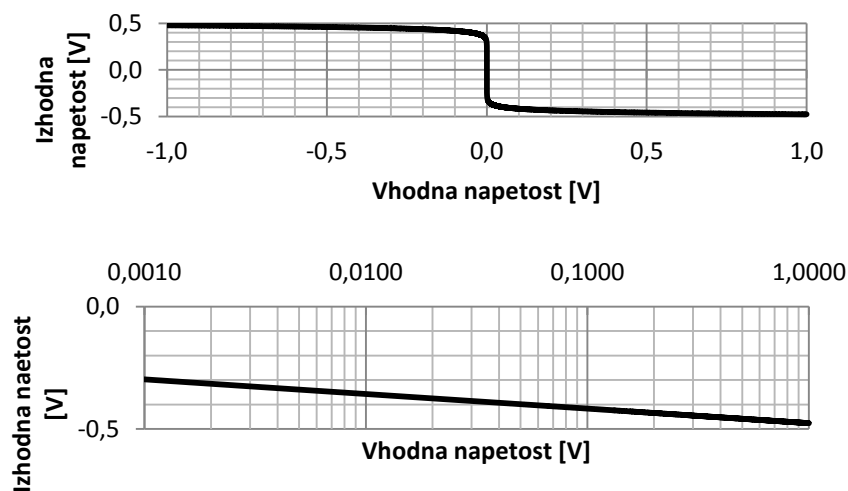
R - upornost upora [Ω]

C - kapacitivnost kondenzatorja [F]

Sledi prva logaritemska ojačevalna stopnja. Ta uporablja prvi operacijski ojačevalnik znotraj integriranega vezja U5, z oznako LMV358. Operacijski ojačevalnik dobi logaritemsko prenosno funkcijo, če upor v negativni povratni vezavi zamenjamo z diodo. Z eno diodo dobimo logaritemsko funkcijo v eni izmed polarizacij, če vežemo vzporedno dve obratno polarizirani diodi, pa dobimo logaritemsko prenosno funkcijo v pozitivni in negativni smeri, kot to prikazuje zgornji graf na sliki 3.29. Spodnji graf na sliki 3.28 prikazuje odsek zgornjega grafa v logaritemski skali. V tem primeru je graf ravna premica, torej gre res za logaritemsko prenosno funkcijo. Na shemi vezja 3.31 sta omenjeni diodi označeni z D5 in D6. Trimmer Pot2 je del vezave negativne zanke in določa ojačenje te stopnje.



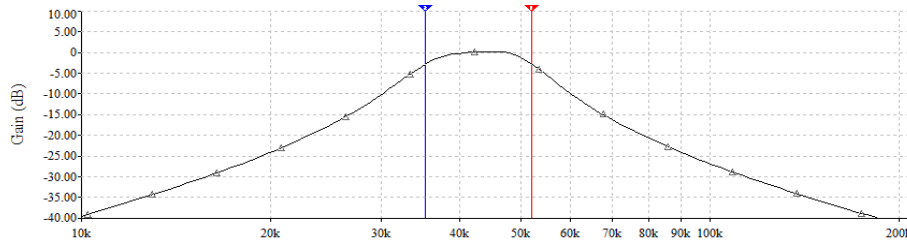
Slika 3.28: Shema logaritemskega ojačevalnika pripravljena na simulacijo v programu Multisim



Slika 3.29: Prenosna funkcija logaritemskega ojačevalnika

Naslednja stopnja je aktivno pasovno prepustno sito, ki v veliki meri odstrani preostale motnje v signalu, ki izvirajo iz elektromagnetnih motenj in vibracij, ki jih ultrazvočni sprejemnik prav tako zaznava. Sito je izdelano po predlogi iz spletne strani [16]. Vezava je bila preverjena s simulacijo v programu Multisim, ki je sicer pokazala nekaj sprejemljivih odstopanj frekvenčnih mej od izračunanih vrednosti. Uporabljeno je torej pasovno

prepustno sito s spodnjo frekvenčno mejo 35 kHz ter zgornjo 53 kHz. Na shemi 3.31 je to sito implementirano z drugim operacijskim ojačevalnikom v integriranem vezju U5 ter prvim v integriranem vezju U6 in s pripadajočimi pasivnimi komponentami.

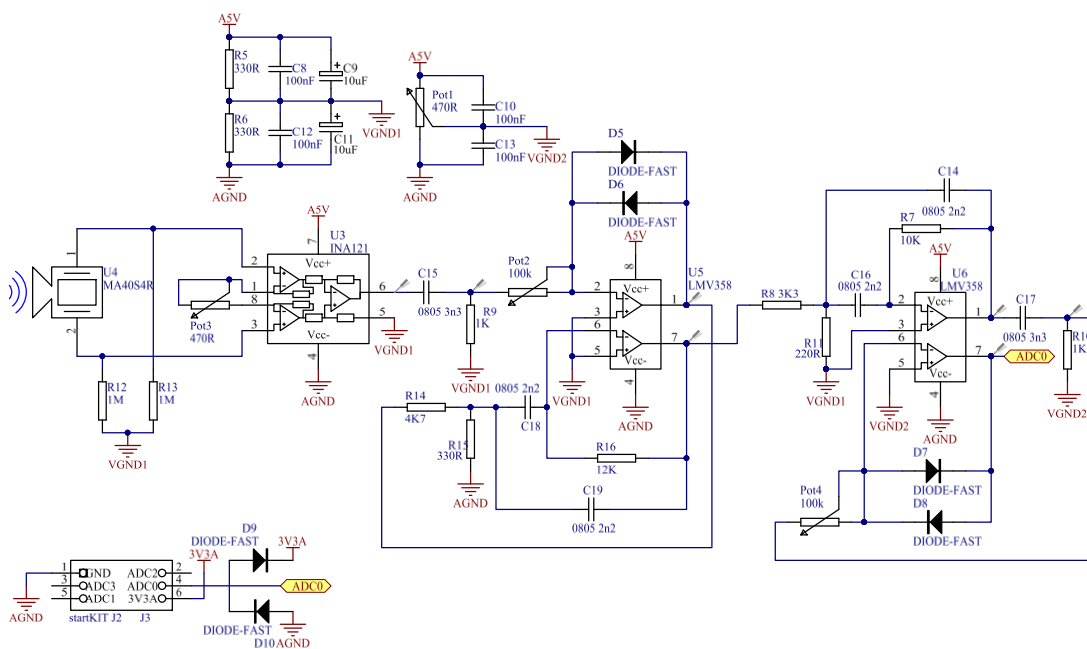


Slika 3.30: Frekvenčna karakteristika simuliranega pasovno prepustnega sita

Sledi še eno visokoprepustno sito sestavljeno iz upora R10 in kondenzatorja C17, ki s svojo virtualno maso določeno s trimmerjem Pot1, omogoča določitev izhodnega potenciala signala. Ker analogno digitalni pretvornik v procesorju za referenčno napetost uporablja 3,3 V, je priporočen izhodni potencial signala 1,65 V.

Tej stopnji sledi še zadnja stopnja. Ta predstavlja logaritemski ojačevalnik, identičen kot na drugi stopnji. Implementiran je z drugim operacijskim ojačevalnikom v integriranem vezju U6, diodama D7 ter D8 in trimmerjem Pot4.

Izhod iz zadnje stopnje je za primer prenapetosti omejen oziroma zaščitен z dvema hitrima diodama D9 in D10, ter povezan preko priključka J3 na priključek J2 na startKIT-u in sicer na procesorjev analogni priključek ADC0.

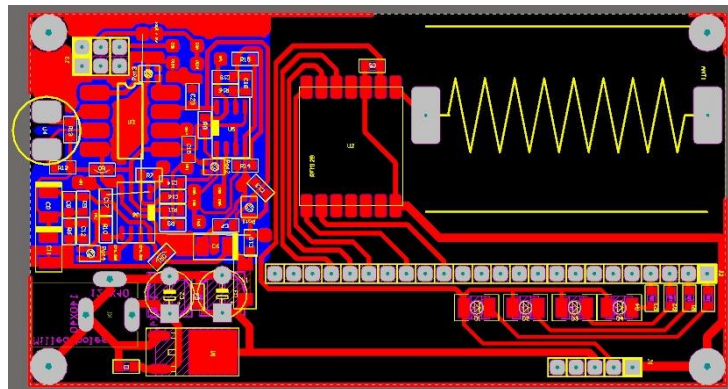


Slika 3.31: Shema ultrazvočnega sprejemnega dela sprejemne enote

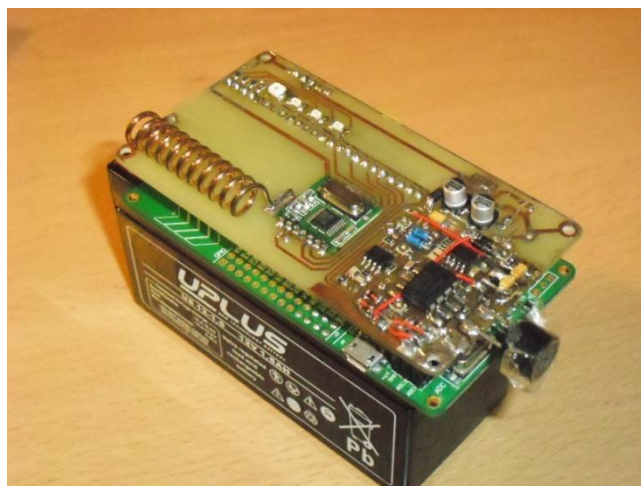
3.3.5 Tiskano vezje sprejemne enote

Tudi tiskano vezje sprejemne enote je bilo načrtovano v programu Altium designer [7]. Ker gre za nadgradnjo startKIT-a, ima to vezje identične dimenzije in postavitev priključkov. Tako se lahko z letvicami preprosto natakne na startKIT. Posebna pozornost pri konstruiranju vezja je bila namenjena motnjam ultrazvočnega sprejemnega dela. Komponente na tem delu so zato čim manjše ter čim bližje skupaj. Večina jih je tipa SMD, razen U3, ki je bil v danem primeru na zalogi le v DIL podnožju. Za vzročno vezje je bil tudi ta čip prispajkan kot SMD. Komponente na tem predelu so obdane s površino analogne mase. Vezje je sicer enostransko, ima pa tudi na spodnjem sloju pod analognim delom analogno maso, ki preprečuje dostop motenj s te strani. V neposredni bližini tega občutljivega dela se nahaja modul RFM12B s svojo anteno, ki po specifikaciji proizvajalca zahteva oddaljenost od ostalih povezav vsaj 13 mm.

Vezje je bilo izdelano v domači delavnici s postopkom prenosa tonerja [17].



Slika 3.32: Načrtovano tiskano vezje ultrazvočne sprejemne enote



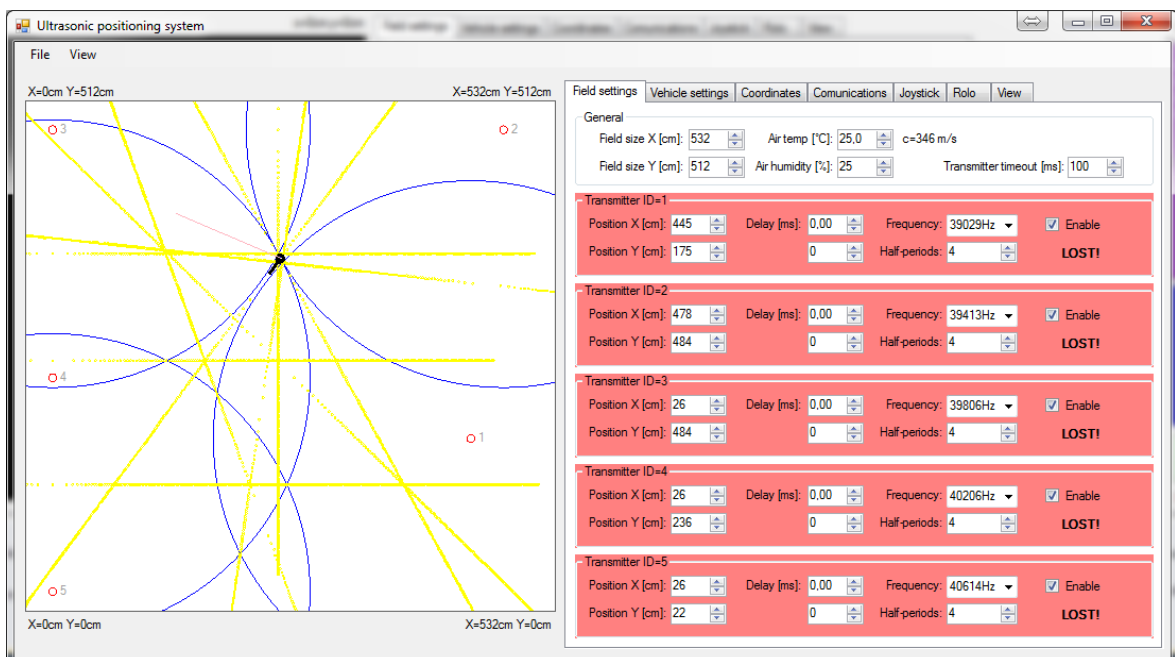
Slika 3.33: Končana sprejemna enota

3.4 Računalniški program

Program, ki se izvaja na računalniku preko USB vodila in virtualnega COM priključka komunicira s centralnim vgrajenim sistemom. Izmenjava informacij poteka preko dogovorjene tabele podatkov, ki se pošilja v celoti, kot en paket. Program uporabniku omogoča nastavljanje nastavitev oddajnih ter sprejemnih enot in mu poda vpogled v delovanje sistema. V ozadju programa se izvaja TDOA algoritem, ki računa pozicije sprejemnih enot. Dobljene pozicije grafično prikaže, hkrati pa omogoča uporabo dobljenih pozicij za nadaljnje namene uporabe pozicije (na primer računalniško vodenje robotskih platform po prostoru).

Program je pisan v programskem okolju Microsoft Visual Studio in jeziku C#, ki podpira objektno programiranje. Koda programa je zaradi morebitne mednarodne uporabe pisana in komentirana v angleškem jeziku.

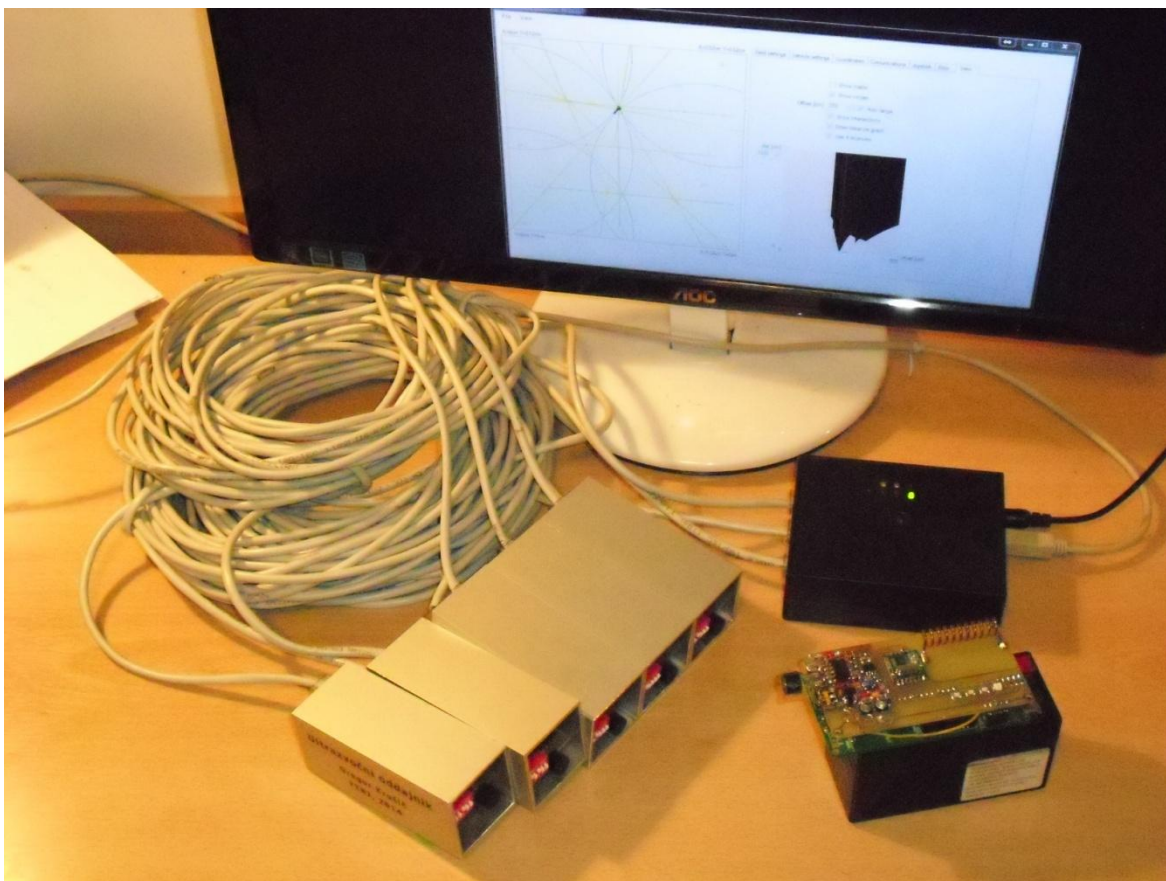
Slika 3.34 prikazuje uporabniški vmesnik, ko ta simulira delovanje sistema. V levem delu okna vidimo grafično stanje sistema. Rumene točke predstavljajo vsa presečišča med krožnicami s preletom vrednosti spremenljivke n (glej sliko 2.2). Modre krožnice so razdalje od oddajnikov, označenih z rdečimi krogi, pri izbrani vrednosti n . Črna točka predstavlja uspešno pozicionirano sprejemno enoto. Opazimo, da se ena izmed modrih krožnic ne ujema s preostalimi. Ta predstavlja napačno meritev, ki je bila zaradi redundance uspešno izločena.



Slika 3.34: Uporabniški vmesnik računalniškega programa

4 REZULTATI IN MERITVE

Končan sistem je bil za namene testiranja sestavljen iz enega centralnega vgrajenega sistema povezanega z računalniki in iz petih po prostoru postavljenih oddajnih enot. Sistem lahko sicer sprejme do 10 oddajnih enot, pri čemer gre predvsem za programsko omejitev. Oddajne enote morajo biti po prostoru postavljene na točno določena mesta. Te pozicije je potrebno vnesti v koordinatni sistem na računalniku, saj bo ta le tako lahko izračunal pozicije sprejemnih enot. Program je pisan za do 255 sprejemnih enot, čeprav to število ni bilo preverjeno in se v praksi lahko izkaže za manjše. Glede na to, da je strošek ene sprejemne enote približno 35 €, je bila ta izdelana le ena.

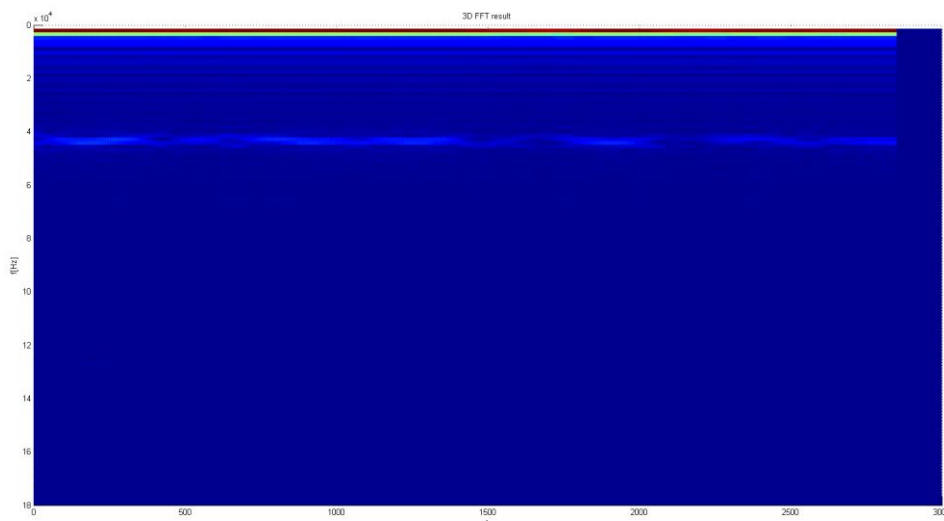


Slika 4.1: Izdelan sistem za pozicioniranje

4.1 Merjenje razdalj z uporabo ultrazvoka več frekvenc

Razvit je bil celoten sistem, ki bi v teoriji naj podpiral to možnost. Tudi opravljene simulacije so omenjeno teorijo potrdile kot izvedljivo. Žal pa se je v praksi pojavila težava, saj ultrazvočni sprejemniki delujejo na principu osciliranja na določeni frekvenci.

Posledično sprejemnik potrebuje nek čas, da zaniha. Ta čas sam po sebi ni zelo kritičen je pa osnova problema, da tak sprejemnik ni sposoben sočasno nihat z več frekvencami. Posledično zaniha s prevladujočo frekvenco in ne z več frekvencami, kot bi bilo potrebno za izvedbo sistema. Pojavlja se zamisel o rešitvi tega problema z uporabo kondenzatorskega mikrofona, ki še deluje na področju ultrazvoka. Pri tem je pričakovati tudi problem z zajemanjem nizkih frekvenc velikih amplitud, ki bi jih bilo potrebno zelo filtrirati. Ultrazvočni sprejemnik jih sicer sam po sebi izloča prav zaradi resonančne frekvence. Potrebno bi bilo tudi uporabiti analogno digitalni pretvornik z višjo resolucijo ter se izogniti logaritmiranju signala. Obstaja tudi možnost uporabe nižje frekvence, na primer 20 kHz. Te frekvence lahko zajemamo s standardnimi mikrofoni, vendar pa je potrebno upoštevati, da je to frekvenčno območje precej zapolnjeno z zvoki iz okolice. in je delovanje sistema v praksi vprašljivo. Tudi sočasno izvajanje Goertzel-ovega algoritma za 5 frekvenc je kljub uporabi zmogljivega procesorja na sprejemni enoti za približno desetkrat prezahtevno za delovanje v realnem času pri vzorčenju s hitrostjo 340 kHz. Izkazuje se potreba po uporabi FPGA¹⁴ procesiranja. Ker bi bila potrebna rekonstrukcija večinskega dela sistema, je bila uporaba več frekvenc zavržena. Z le programskimi spremembami na sprejemni enoti in v centralnem vgrajenem sistemu, sistem sedaj deluje na le eni frekvenci. S tem je hitrost vzorčenja padla za približno 5 krat.



Slika 4.2: Matematična FFT transformacija prejetega, ojačenega in vzorčenega ultrazvočnega signala na sprejemni enoti, ki sta ga sočasno generirala dva enako oddaljena oddajnika, prvi na 39 kHz in drugi na 41 kHz

¹⁴ FPGA - Field-programmable gate array - čip s programirljivo logiko

4.2 Odstopanje meritev

Odstopanje meritev je sicer z amatersko opremo težko točno izmeriti. Tudi sicer je odstopanje odvisno od veliko medsebojno odvisnih dejavnikov. Na primer slabo postavljene oddajne enote lahko imajo velik vpliv na sprejemni signal in s tem točnost posameznih meritev. Hkrati lahko netočno določena pozicija oddajnih enot privede do neujemanja meritev v triangulacijskem določanju pozicije. Razne ovire v prostoru lahko podaljšajo pot ultrazvočnega signala in s tem prav tako povzročijo odstopanje. V določenih območjih v prostoru lahko ob uporabi triangulacije pride do velikih napak, če je kvalitetno sprejet signal od le treh nerodno postavljenih oddajnikov. Numerično izvajanje TDOA algoritma v sistem prinese napako, saj se izvaja z določeno resolucijo. To napako je sicer možno znižati z nadaljnjim razvojem. Tudi sprejem in oddaja ultrazvočnega signala se izvaja z določeno resolucijo, sicer majhno, pa vendar lahko prinese napako +/- 2,5 cm na posamezno izmerjeno razdaljo. V testnem primeru je bila natančnost pozicije na večinskem delu prostora približno +/-1,5 cm. Z navadnim tračnim metrom izmerjena točnost je bila po večini prostora približno +/-3 cm.

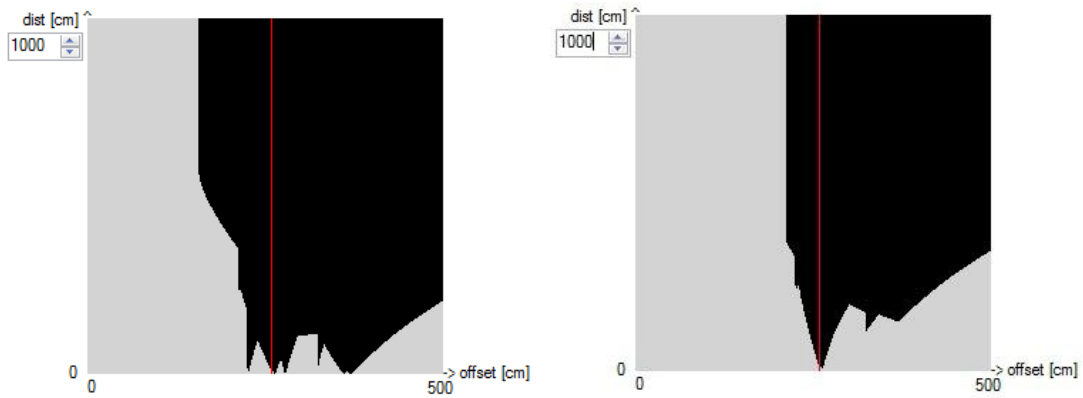
4.3 Čas osveževanja

Glede na neuporabo merjenja razdalj z več frekvencami je sedaj čas osveževanja pozicije le 0,85 Hz. Čas osveževanja, kot zahtevano, naj ne bi bil odvisen od števila pozicioniranih enot. To le delno drži, saj je potrebno upoštevati, da je ta čas vendarle odvisen tudi od časa potrebnega za TDOA procesiranje in komunikacije. Je pa ta čas relativno majhen v primerjavi s časom potrebnim za ultrazvočne meritve. Frekvenco osveževanja je možno enostavno dvigniti s spremembo algoritma na računalniku in sicer, če bi se procesiranje TDOA algoritma za pretekle meritve izvajalo med časom izvajanja nove meritve.

4.4 Redundantnost oddajnikov v primeru TDOA algoritma

Teoretično za TDOA algoritem zadošča že znana razlika razdalj do treh oddajnikov, v praksi pa se izkaže, da je zanesljivost pozicioniranja bistveno višja, če so znane vsaj 4 razlike razdalj. Na grafu na sliki 4.3 je prikazana najnižja razdalja med presečišči krožnic s slike 2.2 v odvisnosti od koeficienta n . Najnižja črna točka na grafu predstavlja iskano vrednost koeficienta n . V primeru upoštevanja le treh znanih razlik razdalj, je črnih konic, ki bi lahko bile pravilne vrednosti več in se lahko pojavi napaka. V primeru upoštevanja

vsaj štirih razlik razdalj, se pojavi le ena konica, ki jasno nakazuje vrednost n (*offset*). Izračunana presečišča pri tej vrednosti n predstavljajo dejansko pozicijo sprejemne enote.



Slika 4.3: Graf razdalj med presečišči treh krožnic (levo) in štirih krožnic (desno) v odvisnosti od koeficienta n

5 SKLEP

V danem diplomskem delu je bil uspešno razvit sistem za pozicioniranje v dveh dimenzijah znotraj prostorov. Sistem za ta namen uporablja več (v testnem primeru 5) stacionarnih, po prostoru porazdeljenih, ultrazvočnih oddajnih enot in poljubno število sprejemnih enot. Pri tem sistem določa pozicijo sprejemnih enot v prostoru. Oddajne enote so žično povezane s centralnim vgrajenim sistemom, ki skrbi za časovno usklajitev celotnega sistema. V sistem je priključen tudi računalnik, ki izvaja algoritem za določanje pozicij in uporabniku omogoča interakcijo. Dobljene pozicije lahko računalnik na poljuben način preda v nadaljnjo uporabo. Primer aplikacije, za katero je bil dan sistem tudi razvit je avtonomno premikanje robotske platforme po vnaprej določeni poti v prostoru.

Uporaba ultrazvoka več frekvenc je bila zaradi kompleksnosti zavržena, čeprav je bilo vloženega precej truda. To je znižalo čas osveževanja pozicije na le 0,8 Hz. Pri tem ostaja možnost pozicioniranja bolj ali manj poljubnega števila brezžično povezanih enot. Sistem za pozicioniranje uspešno uporablja TDOA algoritem, kar kompenzira vse nepredvidljive zakasnitve v sistemu.

Resolucija pozicioniranja je nastavljiva ob izvajanju TDOA algoritma. Natančnost je v uporabljenem primeru približno $\pm 1,5$ cm. Točnost je kot predvideno slabša, pa vendar približno ± 5 cm. Obe napaki sta odvisni od postavitve sistema v prostoru, od prostora in od pozicije pozicionirane enote v prostoru. V testnem primeru je bil uporabljen prostor velik 5x5 metrov, pričakovati pa gre, da sistem ne bo imel težav z delovanjem v prostorih velikih do 8x8 metrov..

6 VIRI

- [1] National Instruments Corporation. NI Multisim. [Obiskano: september 2015].
<http://www.ni.com/multisim/>
- [2] Texas Instruments. (december 2001) More Filter Design on a Budget. [Obiskano: september 2015]. <http://www.ti.com/lit/an/sloa096/sloa096.pdf>
- [3] Adrio Communications Ltd. Op Amp Active BandPass Filter. [Obiskano: september 2015]. http://www.radio-electronics.com/info/circuits/opamp_band_pass_filter/op_amp_bandpassfilter.php
- [4] Kapil Dev Sharma, Kirat Pal Seema Rana. A High Q Band Pass Filter Using Two Operational Amplifiers. [Obiskano: september 2015].
<http://www.vidyasagar.ac.in/journal/maths/Vol11/JPS11-16.pdf>
- [5] The MathWorks Inc. Matlab. [Obiskano: september 2015].
<http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [6] Texas_Instruments. (maj 2000) DTMF Tone Generation and Detection: An Implementation Using the TMS320C54x. [Obiskano: september 2015].
<http://www.ti.com/lit/an/spra096a/spra096a.pdf>
- [7] Texas Instruments. SN75ALS176D Differential Bus Transciever. [Obiskano: september 2015]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65als176.pdf>
- [8] HOPERF electronic. RFM12B Universal ISM Band FSK Transciever. [Obiskano: september 2015]. <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFm12b.pdf>
- [9] Microchip Technology Inc. PIC18F45J10 Family Data Sheet. [Obiskano: september 2015]. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39682E.pdf>
- [10] Altium. Altium Designer. [Obiskano: september 2015]. <http://www.altium.com>
- [11] elektronik.si. Postopki pri izdelavi TIV s prenosom tonerja. [Obiskano: 2014
<http://213.250.2.95/elektronik.si/phpBB2/viewtopic.php?t=6612&postdays=0&postorder=asc&start=0>
- [12] Autodesk Inc. AutoCAD. [Obiskano: september 2015].
<http://www.autodesk.com/products/autocad/>
- [13] CCS Inc. CCS Compiler. [Obiskano: september 2015].
<http://www.ccsinfo.com/content.php?page=compilers>

- [14] Elnec s.r.o. ELNEC SmartProg2. [Obiskano: september 2015].
<http://www.elnec.com/products/universal-programmers/smartprog2/>
- [15] XMOS Ltd. xCORE StartKIT. [Obiskano: september 2015]. <http://www.xmos.com/startkit>
- [16] Pro-Wave Electronics Corp. (avgust 2005) Application note AP050830. [Obiskano: september 2015]. <http://www.prowave.com.tw/pdf/an0508309.pdf>
- [17] Analog Devices. AD8310. [Obiskano: september 2015].
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8310.pdf
- [18] Texas Instruments BURR-BROWN. INA121. [Obiskano: september 2015].
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina121.pdf>
- [19] changpuak.ch. Active Chebyshev Bandpass Filter Calculator. [Obiskano: september 2015]. http://www.changpuak.ch/electronics/Chebyshev_Bandpass_active.php
- [20] Steve Mackay, Edwin Wright Deon Reynders, *Practical industrial data communications: best practice techniques*. Oxford: Newnes, 2009, 2005.
- [21] Rudolf F. Graf., *Encyclopedia of electronics circuits Volume 3*. ZDA: : TAB Books, 1991.
- [22] Peter Kraniuskas, *Transforms in Signals and systems*. Wokingham : Addison-Wesley, 1992.
- [23] Fredrik Gustafsson and Fredrik Gunnarsson. POSITIONING USING TIME-DIFFERENCE OF ARRIVAL MEASUREMENTS. [Obiskano: september 2015].
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.64.3068&rep=rep1&type=pdf>
- [24] Dr K A Radhakrishna Rao. Goertzel's Algorithm. Mandya. Goertzel's Algorithm. Mandya: PES college of Engineering. [Obiskano: september 2015].
<http://elearning.vtu.ac.in/13/ENotes/DSP1/RK/Lesson%203.pdf>
- [25] Wilfried Elmenreich. (avgust 2011) Efficiently detecting a frequency using a Goertzel filter. [Obiskano: september 2015]. <http://netwerkt.wordpress.com/2011/08/25/goertzel-filter/>

7 PRILOGE

- Izjava o avtorstvu
- Izjava o ustreznosti zaključnega dela
- Izjava o istovetnosti tiskane in elektronske verzije zaključnega dela in objavi osebnih podatkov diplomantov



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija



IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani

Gregor Krušič

z vpisno številko

E1040731

sem avtor diplomskega dela z naslovom:

Pozicioniranje z uporabo ultrazvoka več

frekvenc in algoritma razlike časov prihoda

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal/-a samostojno pod mentorstvom (naziv, ime in priimek)

doc. dr. Iztok Kramberger

- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela.
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v DKUM.

V Mariboru, dne 9.9.2015

Podpis avtorja:



Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija



IZJAVA O USTREZNOSTI ZAKLJUČNEGA DELA

Podpisani mentor :

doc dr. Iztok Kramberger

(ime in priimek mentorja)

in somentor (eden ali več, če obstajata):

(ime in priimek somentorja)

Izjavljam (-va), da je študent

Ime in priimek: Gregor Krušič

Št. indeksa: E1040731

Na programu: UNI Elektrotehnika, elektronika

izdelal zaključno delo z naslovom:

Pozicioniranje z uporabo ultrazvoka več frekvenc in algoritma razlike časov prihoda

(naslov zaključnega dela v slovenskem in angleškem jeziku)

Positioning using Multi-Frequency Ultrasound and Algorithm of Time Difference of Arrival

v skladu z odobreno temo zaključnega dela, Navodilih o pripravi zaključnih del in mojimi (najinimi oziroma našimi) navodili.

Preveril (-a, -i) in pregledal (-a, -i) sem (sva, smo) poročilo o plagiatorstvu.

Datum in kraj: 10.9.2015, Maribor

Podpis mentorja:

Datum in kraj:

Podpis somentorja (če obstaja):

UNIVERZA V MARIBORU

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE VERZIJE ZAKLJUČNEGA DELA IN OBJAVI
OSEBNIH PODATKOV DIPLOMANTOV

Ime in priimek diplomanta-tke: Gregor Krušič

Vpisna številka: _____

Študijski program: ELEKTROTEHNIKA

Naslov diplomskega dela: POZICIONIRANJE Z UPORABO ULTRAZVOKA VEČ FREKVENC IN
ALGORITMA RAZLIKE ČASOV PRIHODA

Mentor: Iztok Kramberger

Somentor: _____

Podpisani-a Gregor Krušič izjavljam, da sem za potrebe arhiviranja oddal elektronsko verzijo zaključnega dela v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru. Diplomsko delo sem izdelal-a sam-a ob pomoči mentorja. V skladu s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah dovoljujem, da se zgoraj navedeno zaključno delo objavi na portalu Digitalne knjižnice Univerze v Mariboru.

Tiskana verzija diplomskega dela je istovetna elektronski verziji, ki sem jo oddal za objavo v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru.

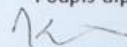
Zaključno delo zaradi zagotavljanja konkurenčne prednosti, varstva industrijske lastnine ali tajnosti podatkov naročnika: _____ ne sme biti javno dostopno do _____ (datum odloga javne objave ne sme biti daljši kot 3 leta od zagovora dela).

Podpisani izjavljam, da dovoljujem objavo osebnih podatkov vezanih na zaključek študija (ime, priimek, leto in kraj rojstva, datum diplomiranja, naslov diplomskega dela) na spletnih straneh in v publikacijah UM.

Datum in kraj:

Maribor, 09.09.2015

Podpis diplomanta-tke:



Podpis mentorja _____
(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno):

Podpis odgovorne osebe naročnika in žig: _____
(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno)

