

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Směrový anténní sledovač založený na síle přijatého  
signálu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš VRBKA**  
Osobní číslo: **E16B0174P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Směrový anténní sledovač založený na síle přijatého signálu**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Navrhněte zařízení pro sledování cíle, například dronu, prostřednictvím měření síly přijatého signálu několika směrovými anténami. Tento sledovač může využívat dostupné antény a dekodéry k měření síly signálu ve zvoleném pásmu a svoji orientaci řídit pomocí servomechanismů. Jádrem zařízení zvolte mikroprocesor schopný měřit analogové vstupy a generovat řídicí signály PWM. Důraz dejte především na softwarové vybavení mikroprocesoru, které je hlavním prvkem k dosažení úspěšnosti zařízení.

1. Popište možnosti měření síly signálu ve zvoleném pásmu, antény k tomu použité a obecný princip funkce anténních sledovačů.
2. Navrhněte koncept zařízení. Dále prostudujte nabídku dobře dostupných součástek a konkretizujte zapojení. Při volbě procesorové platformy se zaměřte na nabídku firmy NXP.
3. Realizujte funkční vzorek po hardwarové stránce.
4. Naprogramujte firmware procesoru pro plnění požadovaných funkcí zařízení.
5. Otestujte činnost zařízení a práci doplňte o výsledky měření.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Josef Dobeš, Václav Žalud. Moderní radiotechnika. Praha, BEN - technická literatura, 2006, 1. vyd. 767 s. ISBN 80-7300-132-2
2. Václav Žalud. Moderní radioelektronika. Praha, BEN - technická literatura, 2000, 1. vyd. 653 s. ISBN 80-86056-47-3
3. Jiří Hammerbauer. Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. Plzeň, ZČU, 1998, 2. vyd. 181 s. ISBN 80-7082-411-5
4. Jiří Pinker. Mikroprocesory a mikropočítače. Praha, BEN - technická literatura, 2004, 1. vyd. 159 s. ISBN 80-7300-110-1

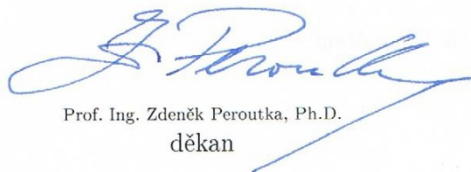
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ondřej Lufinka

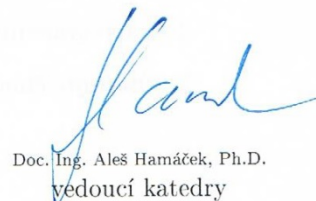
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
děkan



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem, sestavením a naprogramováním elektronického zařízení, které se pomocí servomechanismů natáčí směrem ke zdroji video signálu. Řídícím prvkem je mikrokontrolér, který za pomoci tří přijímacích modulů a směrových antén vyhodnocuje směr zdroje signálu.

## **Klíčová slova**

Anténní sledovač, mikrokontrolér, otočná anténa, RX5808, směrová anténa



## **Abstract**

This bachelor thesis deals with designing, assembling and programming of an electronical device, which is turning towards the source of video signal with the assistance of servomotors. Main control element is a microcontroller, which is calculating the direction of the signal source with assistance of three receiving modules and three directional antennas.

## **Key words**

Antenna tracker, microcontroller, rotating antenna, RX5808, directional antenna

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 10.6.2019

Tomáš Vrbka

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Lufinkovi za velmi vstřícný a ochotný přístup při vedení, předané zkušenosti a profesionální rady.

## Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1. PRINCIP ANTENNA TRACKERU</b> .....	<b>11</b>
1.1. RADIOKOMUNIKACE .....	11
1.2. ANTÉNA .....	12
1.3. MIKROKONTROLÉR .....	15
1.4. PŘIJÍMACÍ MODUL RX5808.....	18
1.5. SERVOPOHON.....	19
<b>2. NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ</b> .....	<b>20</b>
2.1. OBECNÉ POŽADAVKY NA DESKU PLOŠNÝCH SPOJŮ .....	20
2.2. VOLBA KLÍČOVÝCH SOUČÁSTEK .....	21
2.3. SCHÉMA ZAPOJENÍ .....	23
2.4. ROZMÍSTĚNÍ A PROPOJENÍ SOUČÁSTEK.....	28
2.5. VÝROBA DPS .....	31
<b>3. PROGRAM MIKROKONTROLÉRU</b> .....	<b>32</b>
3.1. INICIALIZACE HARDWARU.....	32
3.2. HLAVNÍ SMYČKA PROGRAMU.....	36
3.3. PŘERUŠOVACÍ RUTINY .....	37
3.4. PROCESY BĚŽÍCÍ NEPŘETRŽITĚ NA POZADÍ .....	38
3.5. UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ .....	40
3.6. SLEDOVACÍ ALGORITMUS .....	46
<b>4. TESTOVÁNÍ A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY</b> .....	<b>47</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>51</b>
<b>CITOVANÁ LITERATURA</b> .....	<b>53</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>55</b>

## Úvod

Antenna tracker (anténní sledovač) je označení pro elektronické zařízení, které sleduje a zaznamenává směr zdroje signálu. Zdrojem signálu může být například družice, letadlo nebo bezpilotní letoun (dron nebo model letadla). Sledovač bývá obvykle vybaven směrovými anténami, které pro kvalitní příjem signálu vyžadují přímé natočení ke zdroji signálu. Sledovače fungují na různých principech, nejčastěji se otáčí na základě GPS souřadnic nebo pomocí jiných výpočetních metod vedoucích k určení pozice zdroje signálu.

Práce je rozdělena do čtyř částí; v první části je shrnuta teorie a principy fungování anténního sledovače, druhá část popisuje výběr součástek, návrh a výrobu desky plošných spojů. Třetí část se zabývá programováním mikrokontroléru a v poslední části jsou popsány dosažené výsledky při testování.

## Seznam symbolů a zkratk

$\lambda$	-	Lambda – vlnová délka [m]
B	-	Magnetická indukce [T]
C	-	Elektrická kapacita [F]
E	-	Intenzita elektrického pole [V/m]
f	-	Frekvence [Hz]
I	-	Elektrický proud [A]
L	-	Indukčnost [H]
R	-	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]
U	-	Elektrické napětí [V]
$v_m$	-	Modulační rychlost [Bd]
ADC	-	Analog to Digital Converter
ALU	-	Arithmetic logic unit
ASCII	-	American Standard Code for Information Interchange
CISC	-	Complex Instruction Set Computing
CS	-	Chip Select
CSV	-	Comma-separated values
DPS	-	Deska plošných spojů
FM	-	Frekvenční modulace
FTM	-	Flex Time Module
GPS	-	Global Positioning System
HASL	-	Hot Air Soldering
KBI	-	Keyboard Interrupt
LED	-	Light-Emitting Diode
Li-Pol	-	Lithium Polymer
MCU	-	Microcontroller unit
MISO	-	Master In Slave Out
MOSI	-	Master Out Slave In
PE	-	Processor Expert
PC	-	Personal Computer
PWM	-	Pulse Width Modulation
RSSI	-	Received Signal Strength Indication
SCI	-	Serial Communications Interface
SMD	-	Surface Mount Device
SPI	-	Serial Peripheral Interface
SS	-	Slave Select
THT	-	Through-hole technology
USB	-	Universal Serial Bus

## 1. Princip antenna trackeru

Antenna tracker (dále jen sledovač) je zařízení složené z mikrokontroléru, třech směrových antén s přijímacími moduly, dvou servopohonů pro otáčení a dalších podpůrných prvků (např. LED displej, tlačítka uživatelského rozhraní, USB převodník atd.). Klíčovým prvkem sledovače je mikrokontrolér, který představuje programovatelný „mozek“ celého zařízení. Mikrokontrolér vyhodnocuje napěťové úrovně ze tří přijímacích modulů (RX5808), které se starají o příjem audio/video signálů. Tyto úrovně představují sílu přijatého signálu na každé ze tří antén. Tyto antény jsou šroubovicového typu a jsou velice směrové. Každá z nich je natočená jiným směrem a proto může mikrokontrolér na základě napěťových hladin snadno vyhodnotit směr zdroje signálu. Pomocí servopohonů potom natočí antény směrem ke zdroji tohoto signálu a tím umožní jeho nejlepší možný příjem.

### 1.1. Radiokomunikace

Radiokomunikace je označení pro druh komunikace využívající k přenosu informace rádiové (elektromagnetické vlny) šířící se prostorem [1]. Pro přenos signálu je nutné signál přizpůsobit médiu, ve kterém bude přenášén [2]. Tomuto procesu se říká modulace.

- **Modulace**

Modulace signálu je transformace signálu do podoby vhodné pro přenosové prostředí [3]. Protože se v různých prostředích šíří rádiové vlny různě, je třeba signál správnou modulací upravit. Modulace je v podstatě přesun signálového spektra do vyšších frekvenčních spekter vhodných pro přenos prostorem.

Šíření vln prostorem závisí z velké míry na vlnové délce vysílaného signálu. Dlouhé a střední vlny se šíří i za rozměrnými překážkami a v složitém terénu – díky ohybu vlnění [4]. U velmi krátkých vln k ohybu nedochází a je nutná přímá viditelnost vysílače a přijímače [4]. Video signál je u běžných hobby dronů (nebo modelů letadel) provozován na frekvenci 5,8 GHz ( $\lambda = 5,17$  cm) – patří tedy do super krátkých vln.

- **Zisk**

Zisk v systému určuje míru přenesené energie (napětí, proud nebo výkon) ze vstupu na výstup [5]. Pokud je energie na výstupu větší než na vstupu, jedná se o zisk. V opačném případě se jedná o útlum. V radiokomunikaci je obecně snaha dosáhnout co nejvyššího zisku.



## 1.2. Anténa

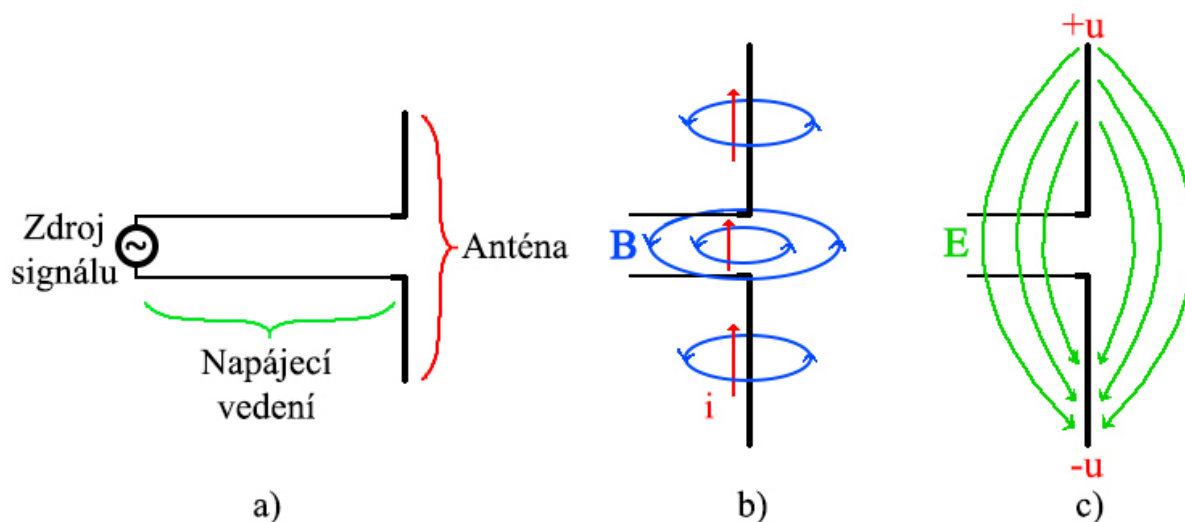
Anténa je nejdůležitějším prvkem bezdrátového přenosu signálu. Pomocí vhodného tvaru a provedení se podélné elektromagnetické vlnění vyzařuje do volného prostoru. Kvalita signálu silně závisí na provedení antény.

Anténa je vlastně rezonanční obvod s vlastní indukčností a kapacitou. Při přivedení napětí a protékání antény vysokofrekvenčním proudem se kolem antény vytváří elektromagnetické pole [6]. Kapacitní složka antény vytváří díky napětí elektrické pole (viz obrázek 1c) a indukční složka naopak díky proudu vytváří pole magnetické (viz obrázek 1b). Vlnění těchto polí se šíří prostorem v závislosti na médiu (pro vzduch jsou to rychlosti blízké rychlosti světla ve vakuu).

Antény se dají rozdělit do různých skupin [6]:

- **Podle způsobu použití:**
  - Stacionární antény (staticky natočené fixním směrem)
  - Mobilní antény (pohyblivé antény na vozidlech nebo **anténní sledovače**)
  - Přenosné antény
- **Podle konstrukce:**
  - Drátové (závěsné)
  - Trubkové (samonosné antény na stožárech)
  - Plošné nebo prostorové (parabolické)
- **Podle vyzařovací charakteristiky:**
  - Všesměrové (mají podobný zisk z téměř celého sférického prostoru okolo antény)
  - Směrové (mají výrazně vyšší zisk v jednom směru a nižší zisk ve zbylém prostoru okolo antény)

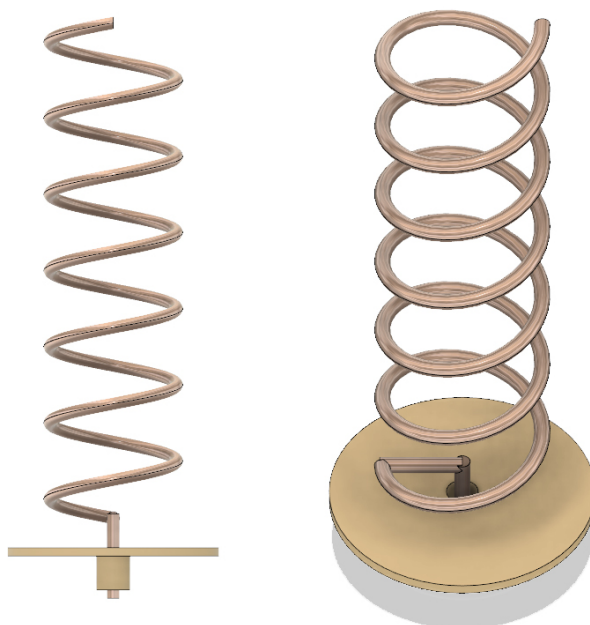
Nejjednodušší anténa je půlvlnný dipól, který se zároveň používá jako referenční anténa při měření vlastností antén [6]. Základní dipólová anténa má všesměrovou vyzařovací charakteristiku. Anténa je napájena symetrickým napětím a je tvořena rovnoběžným vedením, které se na konci rozbíhá do dvou různých směrů (vyzařovací vedení). Délka vedení závisí na vysílacím pásmu, v případě dipólu je to polovina vlnové délky. Zjednodušené schéma a pole okolo dipólové antény jsou na obrázku 1.



Obrázek 1: Elektrické a magnetické pole v okolí dipólu (překresleno z [6])

#### • Šroubovicová anténa

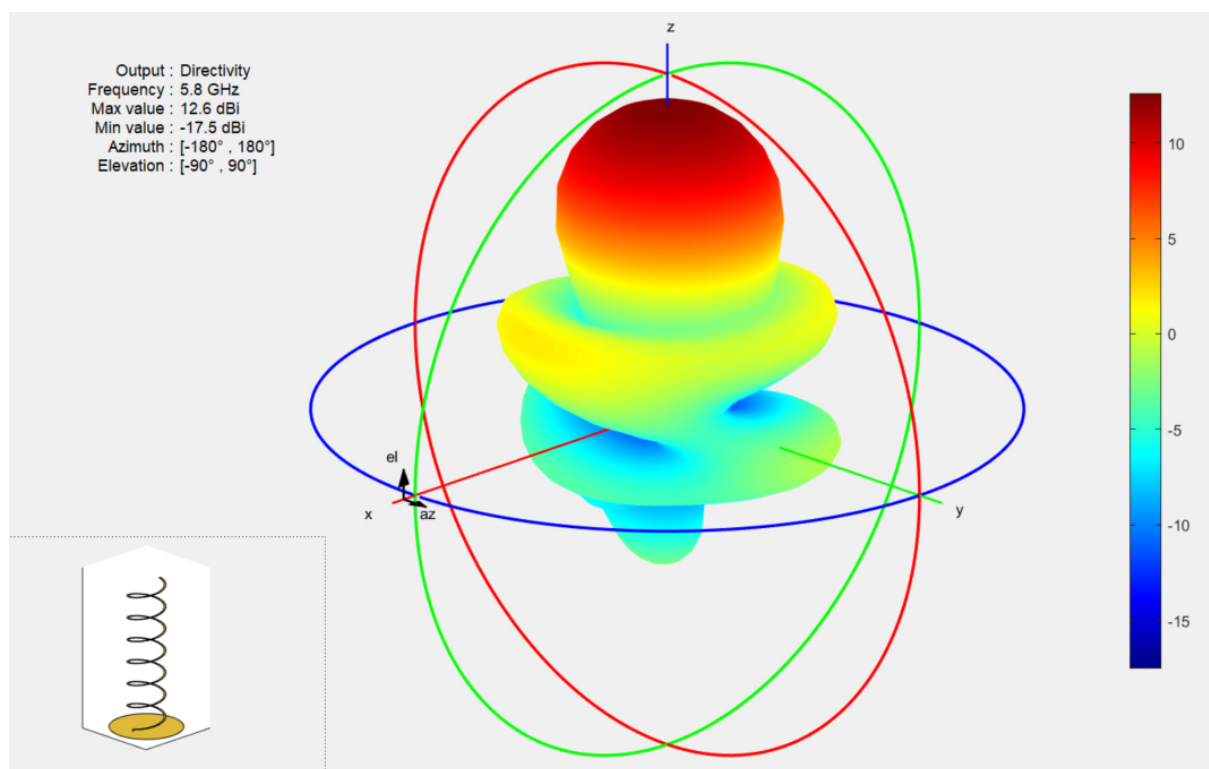
Šroubovicová anténa patří do směrových antén. Má velmi vysoký zisk v poměrně úzkém vyzařovacím úhlu. Díky tomu lze přijímat signál i z velkých vzdáleností (v porovnání s všesměrovými anténami). Tato vynikající vlastnost je kompenzována potřebou správného nasměrování antény.



Obrázek 2: Šroubovicová anténa

Anténa je tvořena vodičem svinutým do šroubovicového tvaru (viz obrázek 2). Podle provedení šroubovice může být anténa v tzv. osovém provedení (vyzařovací maximum je ve směru šroubovice), normálovém provedení (maximum je kolmé k šroubovici) a v kuželovém provedení (maximum je ve středu úhlu svírající směr šroubovice a kolmice k její ose) [6]. Provedení antény závisí na různých parametrech jako např. průměr šroubovice, obvod šroubovice, vzdálenost mezi závitů, úhel stoupání, počet závitů atd. Pro anténní sledovač je vybráno provedení osově, které má vyzařovací maximum ve směru šroubovice a má tak největší dosah.

Pro navrhování šroubovicových antén lze využít funkce výpočetního programu Matlab. Pomocí jednoduchého skriptu byly zadány parametry antény (poloměr šroubovice, průměr vodiče, počet závitů, vzdálenost mezi závitů a poloměr reflektoru) a Matlab provedl simulaci, jejímž výstupem je vyzařovací charakteristika pro zvolenou frekvenci (5,8 GHz) na obrázku 3. Tato simulace slouží hlavně k ověření, že jsou antény vybrané pro sledovač správně navrženy. Použitý skript je uveden včetně dalších charakteristik v příloze A.



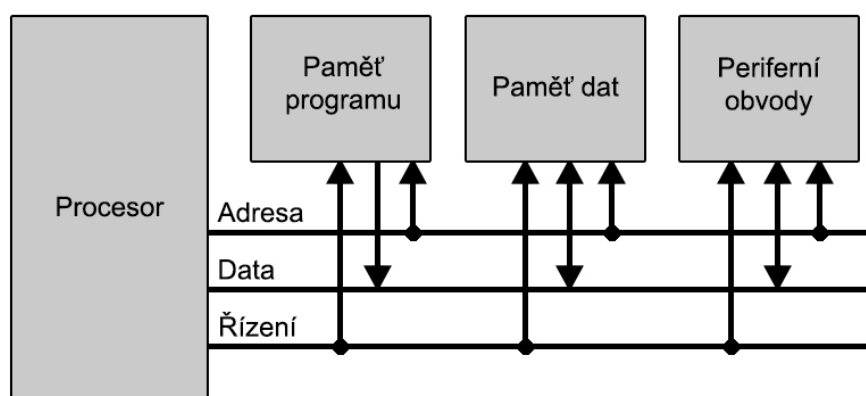
Obrázek 3: Vyzařovací charakteristika šroubovicové antény

### 1.3. Mikrokontrolér

Díky rychlému rozvoji a vývoji elektronických součástek se podařilo vměstnat dříve velice rozměrné počítače do miniaturních velikostí [7]. Mikrokontroléry (dále jen MCU) se tím rozšířily do všech oblastí našeho každodenního života. Jsou ukryty v mobilních telefonech, chytrých hodinkách a dalších. MCU jsou velice univerzální a dokáží pokrýt širokou škálu aplikací bez pomoci dalších podpůrných obvodů.

Mikrokontrolér je miniaturní integrovaný obvod, který je kromě procesoru (řadič a ALU – Aritmeticko-logická jednotka) složený také z paměti (operační paměť dat a paměť programu) a různých podpůrných periferních obvodů [7]. S okolním prostředím komunikuje pomocí vstupně výstupního rozhraní. Toto periferní rozhraní je tvořeno integrovanými podpůrnými obvody, které jsou různě specializované (jsou určeny pro různé aplikace) jako např. čítače/časovače, komparátory, AD nebo DA převodníky, vstupně/výstupní porty nebo komunikační rozhraní (sériové, paralelní, SPI,...).

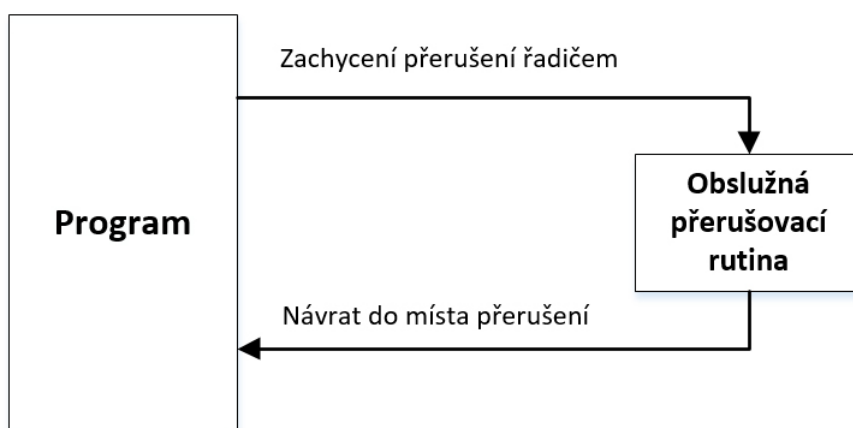
Procesor je výpočetní a řídicí jednotka, která je k ostatním jednotkám připojena pomocí sběrnice (sběrnici tvoří skupina signálových vodičů - viz obrázek 4). Pomocí sběrnice by se dalo k procesoru připojit velké množství dalších jednotek. Jediná nevýhoda spočívá v tom, že pomocí sdílených vodičů nemůžou komunikovat více než dvě zařízení najednou. Datové vodiče slouží k posílání dat mezi jednotkami. Adresační vodiče slouží k rozlišení jednotek na datové sběrnici a k adresaci paměti. Vodiče řídicí sběrnice řídí aktivity jako čtení, zápis a další řídicí signály [7].



Obrázek 4: Zjednodušené schéma mikropočítače (překresleno z [7])

Procesor je řízen **instrukcemi** – v binární soustavě zakódovaný instrukční kód (délka instrukce je uváděna v bitech a je dána velikostí sběrnice procesoru – mocniny čísla 2).

Instrukce určuje, jakou operaci bude procesor provádět (sčítání, odčítání,...) a s čím bude danou operaci provádět (číslo, odkaz na proměnnou, odkaz na registr,...) [8]. Takovýto instrukční cyklus tvoří program. V průběhu programu může dojít k tzv. **přerušení**. Přerušení je asynchronní událost, která může být vyvolána např. doběhnutím čítače/časovače, změnou vnějšího signálu (detekce náběžné hrany), doběhnutím AD převodníku nebo příchodem dat po sériovém komunikačním rozhraní (UART rozhraní) [7]. Tato událost je procesoru signalizována speciálním signálem – řadič procesoru na konci každého instrukčního cyklu ověřuje, zdali nedošlo k přerušení. Pokud k přerušení došlo, procesor zastaví aktuálně vykonávaný program a provede tzv. obslužnou přerušovací rutinu. Po provedení přerušovací rutiny se vrátí k vykonávání programu do místa, kde byl pozastaven a program pokračuje dál (viz obrázek 5).



Obrázek 5: Schéma vykonání obslužné rutiny přerušení

Stav procesoru, konfiguraci a speciální informace jsou uchovávány v **registrech**. Jsou to speciální paměťové buňky v procesoru, k jejichž obsahu má procesor rychlý přístup [9]. Do registrů se také ukládají výsledky a mezivýsledky aritmetických operací. Pomocí registrů jsou také řízeny periferní vstupně výstupní obvody.

- **Paralelní porty**

Jedná se o nejběžnější vstupně výstupní rozhraní. Podle nastavení může paralelní port přivést na určitý výstupní pin nulovou napětíovou úroveň (logická nula) nebo kladnou napětíovou úroveň (obvykle +5V – logická jednička). Naopak u vstupního pinu mikrokontrolér může číst přivedenou logickou napětíovou úroveň (může tedy nabývat pouze dvou hodnot – logická nula nebo jednička). Toto rozhraní se používá k ovládání nejjednodušších periférií jako např. LED diody, relé, vstupní tlačítka apod.

- **AD převodník**

AD převodník (Analog to Digital converter) je elektronická součástka (v případě MCU bývá integrovaná uvnitř), která převádí analogovou napěťovou úroveň do digitální podoby. Tato digitální podoba je číslicovými obvody snadněji zpracovatelná. Podle nastavení registrů MCU může být převod různě přesný – čím více bitů má převodník, tím více napěťových hladin dokáže rozlišit. Např. 8bitový převodník dokáže rozlišit  $2^8=256$  napěťových hladin, zatímco 12bitový převodník jich dokáže rozlišit až  $2^{12}=4096$ .

- **Časovače**

Velmi důležitým prvkem jsou časovací jednotky. Časovač funguje v podstatě jako čítač, který počítá pulsy signálu – obvykle hodinový signál MCU [7]. Podle nastavení registrů pokaždé, kdy dojde k přetečení časovače (čítače), dojde k přerušení a spustí se přerušovací rutina. Toho se dá využít ke spouštění různých výpočetních nebo jiných operací v pravidelném časovém intervalu. Výstup časovače lze přivést i na výstupní piny, toho se nejčastěji využívá k realizaci PWM signálu (Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace - používá se například k řízení servopohonů).

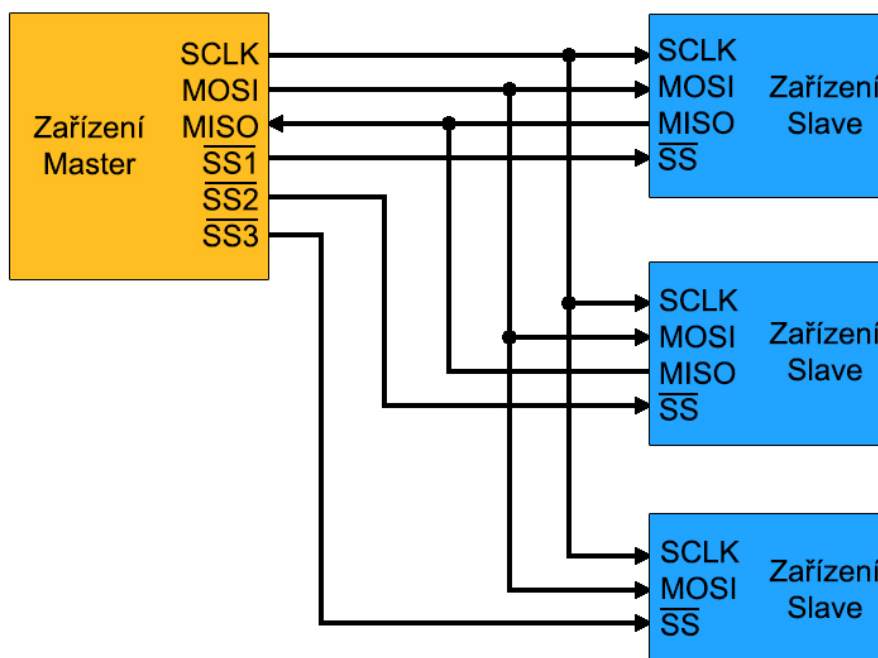
- **Detekce náběžných hran**

Při běhu programu může vyvstat potřeba rychle zasáhnout do průběhu programu a rychle změnit jeho činnost (např. nouzové zastavení). U výkonových zařízení se k tomu používají většinou mechanická tlačítka a jiné ochrany - ne vždy je to ale nutné. Obvykle stačí detekovat změnu vstupního signálu (např. náběžná hrana – stisk tlačítka přivede na vstup kladné napětí), které v MCU vyvolá přerušení a spustí se přednostně přerušovací rutina, která okamžitě zareaguje.

- **SPI komunikace**

SPI (Serial Peripheral Interface) je sériové periferní rozhraní, sloužící pro komunikaci s ostatními integrovanými i externími zařízeními nebo moduly. Mikrokontrolér pracuje obvykle jako řídicí zařízení (Master) a všechna připojená zařízení a moduly pracují jako podřízená zařízení (Slave) a jsou připojená na společnou sběrnici [7]. Na společné sběrnici je hodinový vodič (SCLK – hodinový signál generovaný mikrokontrolérem), datový vodič pro přenos dat od řídicího zařízení pro zařízení podřízená (MOSI – Master Out Slave In) a datový vodič pro přenos dat v opačném směru (MISO – Master In Slave Out). Ke každému z podřízených zařízení je přiveden ještě jeden unikátní vodič sloužící k adresaci (SS – Slave Select nebo CS – Chip Select). Aktivace požadovaného zařízení modulu se provádí

přivedením logické 0 na adresací vodič daného zařízení (adresací vstupy jsou negované), které se tím aktivuje a zařízení začne přijímat nebo odesílat data. Ukázkové zapojení je na obrázku 6, ze kterého je zároveň zřejmé, že podřízená zařízení nemusí vždy využívat oba datové vodiče (ne vždy je nutná obousměrná komunikace).



Obrázek 6: Ukázka možného zapojení SPI rozhraní

#### 1.4. Příjímací modul RX5808

RX5808 je audio/video bezdrátový přijímač. Jedná se pouze o „hobby“ produkt, který nemá řádnou technickou dokumentaci. Běžně je dodáván samotný modul bez antény.

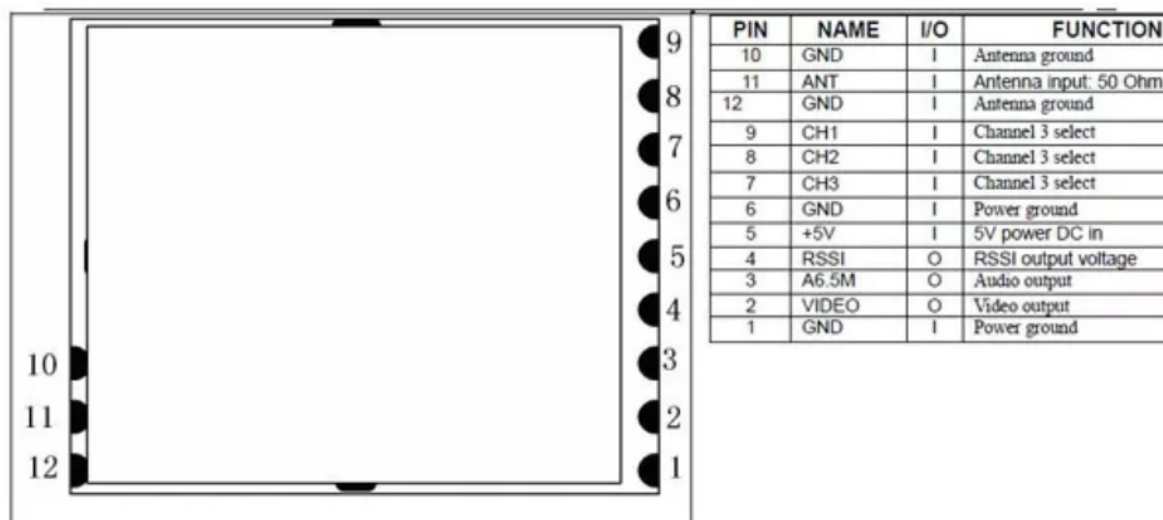
Tento modul je vybaven mikrokontrolérem RTC6715, což je FM přijímač a demodulátor. Je vybaven nízkoshumovým zesilovačem, směšovačem, mezifrekvenčním zesilovačem, FM demodulátorem a dalšími podpůrnými obvody [10]. Modul je vybaven výstupním pinem, na kterém v podobě napětí signalizuje sílu přijatého signálu (RSSI – Received Signal Strength Indication). Modul dokáže rozlišit až 48 kanálů (48 různých frekvencí v kmitočtovém pásmu 5,645 GHz – 5,945 GHz), které se nastavují pomocí SPI rozhraní.

Při použití těchto modulů spolu se směrovými anténami může MCU jednoznačně určit, jaká anténa přijímá nejlepší signál. Při porovnání signálu se zbylými anténami lze určit předpokládanou polohu zdroje signálu. Správná funkce tohoto modulu je zásadním



předpokladem pro fungování anténního sledovače. Pro hobby účely je možné spoléhat na produkty, které nemají řádnou dokumentaci ani uvedeného výrobce. V profesionální výrobě by toto ovšem bylo nepřijatelné a bylo by třeba najít nebo vyrobit vlastní spolehlivý produkt.

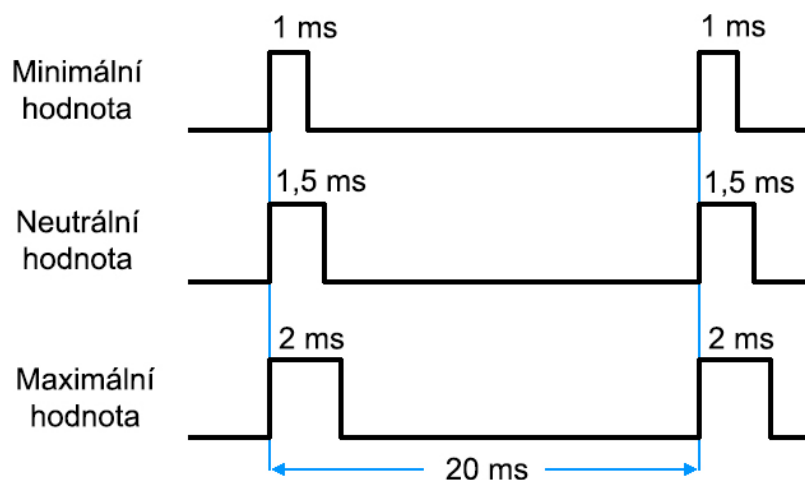
Pin descriptions:



Obrázek 7: Schéma modulu RX5808 (převzato z [11])

## 1.5. Servopohon

Elektrický servopohon je mechanické zařízení, které na základě řídicích signálů mění elektrickou energii na mechanickou práci. Servopohon je tvořen regulačním obvodem, řídicím obvodem a elektromotorem. Regulační smyčka servopohonu je vždy uzavřená s rychlostní zpětnou vazbou nebo i polohovou zpětnou vazbou [12]. Tento uzavřený systém funguje zcela samostatně, řízen je pouze vstupním signálem – nejčastěji pulzně šířkovou modulací (PWM), jejíž průběh je vyobrazen na obrázku 8. Podle způsobu provedení serva udává šířka pulzů rychlost otáčení (rychlostní servo) nebo úhel natočení (polohové servo).



Obrázek 8: Průběh PWM signálu pro servopohony

## 2. Návrh desky plošných spojů

Pro návrh schématu a DPS byl vybrán program Altium Designer. Jedná se o velmi komplexní program, který je určený k navrhování desek plošných spojů a je vyvíjen australskou firmou Altium Limited [13]. Licence pro komerční použití tohoto profesionálního programu je velmi drahá, pro studentské účely ale firma nabízí školní (nekomerční) licenci. Pro Českou republiku tyto licence obstarává firma RETRY s.r.o. (EDA tools and systems) sídlící v Brně.

Altium designer je uživatelsky velmi přívětivý a intuitivní program, velmi dobře se s jeho pomocí navrhují vícevrstvé plošné spoje a složité obvody. Obsahuje velké množství nástrojů usnadňujících návrh a je vhodný i pro navrhování flexibilních DPS. Zároveň umožňuje snadné tvoření schémat a tisků součástek bez nutnosti použití dalšího softwaru.

### 2.1. Obecné požadavky na desku plošných spojů

Před samotným fyzickým návrhem desky bylo třeba vzít v úvahu funkční požadavky desky. Mezi ně patří například vhodně zvolený regulátor napětí, napájecí konektor, USB rozhraní pro komunikaci s PC, dostatečně dobře čitelný LED displej a přehledné signalizační rozhraní (LED diody).

Z hlediska fyzického uspořádání jsou důležité úsporné rozměry desky, dobře přístupné a viditelné ovládací rozhraní (tlačítka, signalizační LED diody a displej) a v neposlední řadě vhodně umístěné součástky tak, aby navzájem neovlivňovaly svoji funkčnost. Je třeba neopomenout, že deska má být osazena digitálními obvody a proto je důležité tyto obvody

doplnit o správně umístěné blokovací kondenzátory [14]. Nic nebránilo tomu, aby byla deska navržena jako oboustranná a tím se zjednodušilo fyzické rozmíst'ování součástek.

## 2.2. Volba klíčových součástek

Správný výběr součástek je klíčový pro správné fungování desky. Nejprve bylo třeba si sumarizovat všechny potřebné funkce desky a vybrat jim odpovídající součástky. Jako poslední byl vybrán vhodný mikrokontrolér.

Pro jednodušší pájení a montáž byla upřednostňována pouzdra SMD (Surface Mount Device). Díky tomu bylo možné připájet všechny součástky vlastnoručně. Zároveň se dají snadno přepájet v případě nefunkčnosti. Kompletní seznam součástek je součástí přílohy B.

- **Regulátor napětí**

Při výběru regulátor napětí bylo třeba vzít v úvahu místo používání sledovače. Obvykle se bude používat ve venkovních prostorách, kde není připojení k síti. Téměř vždy bude ale po ruce akumulátor, který pohání hobby drony (Li-Pol baterie). Proto se nabízí použít spínaný regulátor napětí, který je velmi účinný (oproti lineárním regulátorům) a poradí si na vstupu s širokou škálou vstupních napětí [15]. Proto byl vybrán spínaný zdroj **MC33167TG**, který umožňuje odběr až 5 A při výstupním napětí 5 V – to se hodí pro větší proudový odběr servopohonů.

Pro snadnější zapojení akumulátoru k desce byl vybrán napájecí konektor běžně používaný na dronech – XT60 (k dispozici byl konektor určený přímo pro montáž na DPS – pouzdro THT – Through-hole technology).

- **LCD displej a uživatelské rozhraní**

Pro zobrazení základního uživatelského rozhraní byl vybrán nejjednodušší 2řádkový LCD displej s 32 znaky. Po testování prototypu byl však nahrazen větším, 4řádkovým LED displejem s celkovou plochou pro 64 znaků. Orientace v uživatelském rozhraní je tedy snadnější. Displej komunikuje s mikrokontrolérem paralelní komunikací pomocí šesti vodičů. Po výrobě prototypu (před doladěním finální desky) byly využity neobsazené piny MCU a deska byla doplněna o jednoduché signalizační LED diody. Jedna z diod signalizuje aktivní sledování a další dvě signalizují sílu a stabilitu signálu.

Vstupními prvky uživatelského rozhraní jsou čtyři jednoduchá tlačítka. Díky velikému displeji lze zobrazit přehledné uživatelské menu a pomocí čtyř tlačítek se v něm pohybovat.

Dvě tlačítka jsou určena pro pohyb v menu nahoru a dolů, jedno tlačítko je potvrzovací (OK) a poslední je naopak stornovací (ESC).

- **USB převodník**

Mikrokontroléry používají pro sériovou komunikaci s jinými periferiemi integrovanou součástku UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Aby mohl mikrokontrolér komunikovat s počítačem, je potřeba použít převodník z rozhraní UART na USB rozhraní. K tomu byl zvolen standardní a často používaný převodník **FT232R**. Tento převodník je velice univerzální a celý komunikační protokol je obsažen na jednom jediném čipu. Mezi jeho výhody patří již integrovaný hodinový generátor, veliký rozsah modulačních rychlostí, podpora různých napájecích konfigurací nebo LED signalizace přijímání a odesílání dat [16].

- **Mikrokontrolér**

Jako mozek anténního sledovače byl vybrán 8bitový mikrokontrolér MC9S08MP16VLC od výrobce NXP z produktové řady S08MP. Je určen pro všeobecné použití a jeho procesor spadá pod architekturu CISC (obsahuje rozšířený instrukční balíček). Mikrokontrolér pracuje na frekvenci až 50 MHz. Velikost programové paměti je 16 kB, velikost RAM paměti je 1 kB a podporuje až 48 zdrojů přerušení.

Mikrokontrolér má 32 pinů, z nichž 25 je určeno pro vstupně výstupní rozhraní. Pro účely sledovače jsou důležité zejména AD převodníky (až 12 vstupních pinů), časovače (až 8 pinů), detektory náběžných/sestupných hran (až 15 vstupních pinů), sériové rozhraní (pro jedno zařízení), SPI rozhraní a v neposlední řadě také paralelní vstupně/výstupní piny (těch může být až 25).

- **Servopohony**

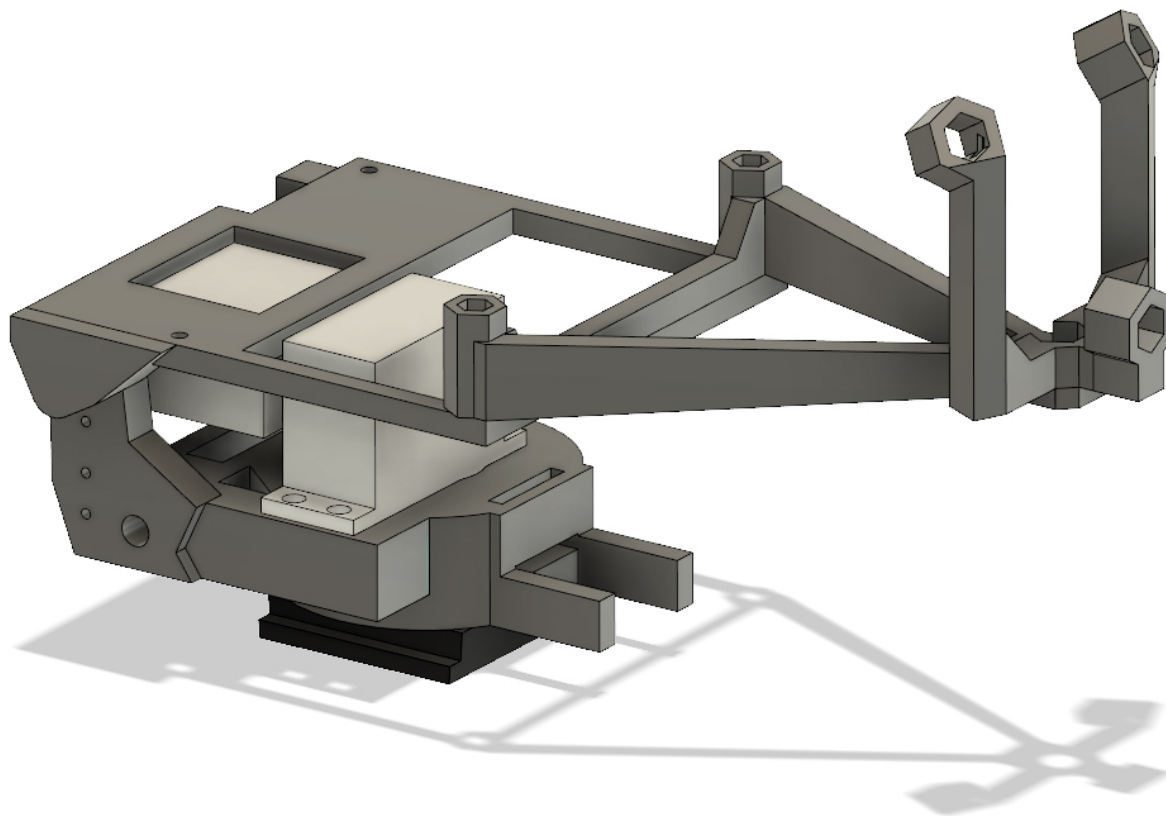
K natáčení sledovače slouží nejlépe digitální servopohony. Jejich výhoda spočívá ve snadném ovládání a v přesnosti pohybů.

Pro vertikální pohyb sledovače bylo vybráno úhlové servo RD-5622MG 300°. Toto servo se otáčí pouze v rádiusu 300° a pomocí PWM modulace je přesně řízen úhel natočení. To je při vertikálním natáčení důležité hlavně kvůli tomu, aby se servo nepřetáčelo nežádoucím směrem (směrem k zemi nebo „vzhůru nohama“).

Pro horizontální pohyb bylo vybráno kontinuální rychlostní servo, které se otáčí bez úhlového omezení. Pomocí PWM modulace se ovládá pouze rychlost otáčení, což je ideální pro volný horizontální pohyb sledovače.

- **3D rám**

Aby všechny komponenty držely pohromadě a antény byly namířeny požadovaným směrem, bylo třeba vytvořit pevný rám, který by umožňoval uchycení desky a plynulý otáčivý pohyb sledovače pomocí servopohonů. Pro tento účel byla vybrána technologie 3D tisku, která umožňuje vytvořit rám kompletně na míru s přesností desetin milimetru. Zároveň se dají případně rozbité díly snadno znovu vytisknout a vyměnit.

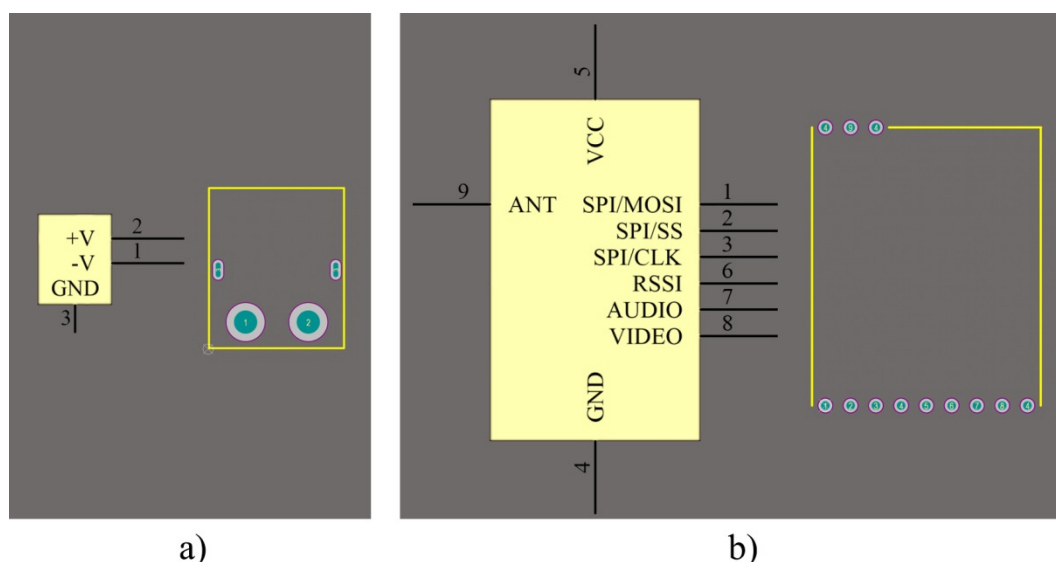


Obrázek 9: 3D model rámu sledovače

### 2.3. Schéma zapojení

Velká část schémata zapojení a volba dodatečných doplňujících součástek byla vytvořena a vybrána podle doporučení výrobců klíčových součástek. Kromě těchto doporučených zapojení bylo schéma doplněno o 4tlačítkové rozhraní, tři signalizační LED diody a dodatečné blokovací/skupinové kondenzátory (jelikož deska obsahuje digitální obvody). Kompletní schéma zapojení je v příloze C.

Některé použité součástky nebyly obsaženy v základních knihovnách návrhového programu, proto bylo potřeba vytvořit jejich schémata a otisky. Nástroj pro kreslení schémat i otisků je přímo součástí návrhového programu. Vytvořeny nebyly pouze chybějící součástky, ale navíc i součástky s nepřesnými otisky nebo nevyhovujícím zapojením.



Obrázek 10: Ukázka vytvořených schémat a otisků součástek

- **Zapojení regulátoru napětí**

Napájecí část desky byla kompletně zapojena podle doporučení výrobce. Katalog od výrobce obsahuje několik různých variant zapojení regulátoru. Vybráno bylo schéma zapojení pro co největší proudový odběr a to zejména kvůli servopohonům, které mohou impulzně odebírat větší proudy. Zvolené zapojení umožňuje odebírat stálý proud až 5 A při napětí 5 V s 80% efektivitou.

Pro návrh musely být vytvořeny otisky a schémata napájecího konektoru (viz obrázek 10a), Schottkyho diody, tlumivky a velkého elektrolytického kondenzátoru. Tyto součástky v základních knihovnách chyběly. Navíc byl dodatečně vytvořen otisk a schéma samotného regulátoru napětí, který sice v základních knihovnách je, jeho otisk ale nemá propojen odvod tepla (heatsink) se zemí, což bylo potřeba (nejen kvůli lepšímu uzemnění, ale také aby se teplo lépe odvedlo do rozlité mědi).

- **Zapojení sledovače**

Hlavním komponentem sledovače jsou přijímací moduly RX5808, jejichž schémata a otisky musely být vytvořeny (viz obrázek 10b). Piny těchto modulů jsou od výrobce popsány jen velmi omezeně, jejich zapojení je však jednoznačné. Moduly obsahují jeden pin se signalizací RSSI, napájecí piny, pin pro anténu a nepotřebné piny pro video a audio. Další tři piny jsou určeny pro SPI komunikaci (adresační piny Slave Select byly připojeny na stejný pin k MCU – data se vždy posílají všem modulům najednou). Každý z těchto modulů byl doplněn o lokální blokovací kondenzátor (keramický s kapacitou 100 nF).

- **Zapojení USB převodníku**

Pro převodník bylo vybráno doporučené zapojení s vlastním napájením převodníku. Toto zapojení je specifické přivedením pinu +5V z USB na invertovaný pin RESET na převodníku. Pokud není k USB převodníku připojen počítač (nebo jiné zařízení), je na pin RESET přivedena log. 0. Protože je tento vstup invertovaný, převodník ho bude považovat za log. 1 a převodník tedy nebude spuštěn. Teprve po připojení počítače k USB převodníku dojde k překlopení pinu na hodnotu log. 0 a převodník se spustí.

Doporučené schéma již obsahuje i blokovací kondenzátory. Pro vizuální signalizaci funkčnosti USB komunikace bylo do schématu dodatečně přidáno zapojení s LED diodami, které signalizují odesílaná a přijímaná data.

- **Zapojení zbylých komponent**

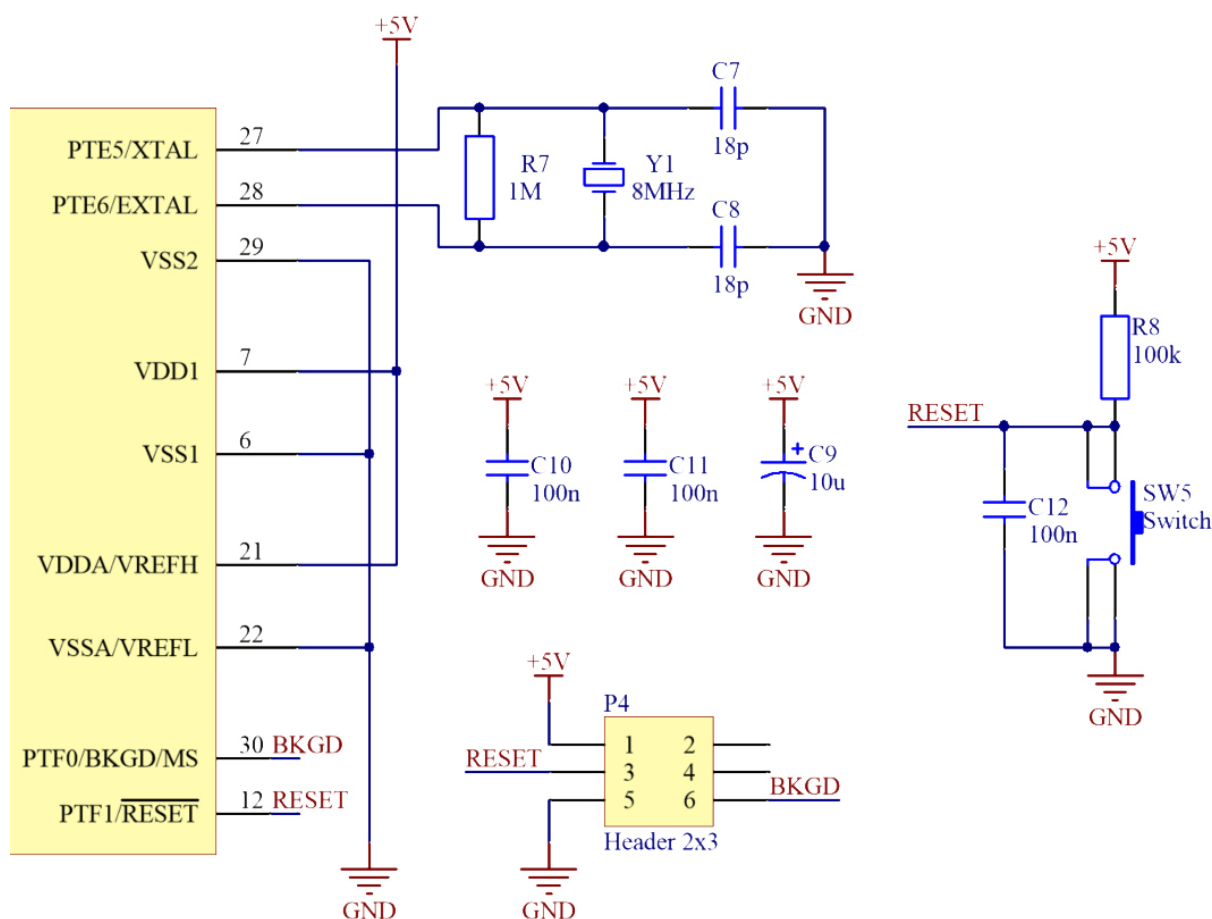
Za zmínku stojí zapojení displeje. Ten má kromě napájecích pinů ještě celkem 7 pinů pro paralelní komunikaci, pin určující způsob komunikace (sériová nebo paralelní) a pin pro regulaci jasu displeje. Pin určující způsob komunikace byl připojen k napětí +5V (log. 1), čímž byla nastavena paralelní komunikace. Ze sedmi paralelních pinů jsou čtyři čistě datové, zbylé tři slouží k řízení komunikace. Jeden z nich byl permanentně uzemněn (tím je nastavena jednosměrná komunikace dat z MCU do displeje) a zbylé dva byly připojeny k MCU. Vstup určený pro regulaci jasu displeje byl přes odpory připojen ke kladnému napětí (přivedená velikost napětí určuje jas displeje). Výsledný odpor rezistorů 3,4 k $\Omega$  byl zvolen jako optimální na základě předchozího zkoušení s proměnným lineárním odporem. Dodatečně byly k napájecím konektorům displeje doplněny blokovací kondenzátory.

Do uživatelského rozhraní patří kromě displeje i jednoduchá čtyři ovládací tlačítka a tři signalizační LED diody. Diody byly zapojeny do série s příslušným odporem omezujícím maximální proud diodou (hodnota maximálního proudu je k nalezení v katalogu výrobce a příslušná velikost odporu byla dopočítána). Tlačítka po stisknutí přivedou na příslušný vodič napětí +5V. Pro potlačení šumu bylo každé tlačítko doplněno kondenzátorem.



## • Zapojení mikrokontroléru

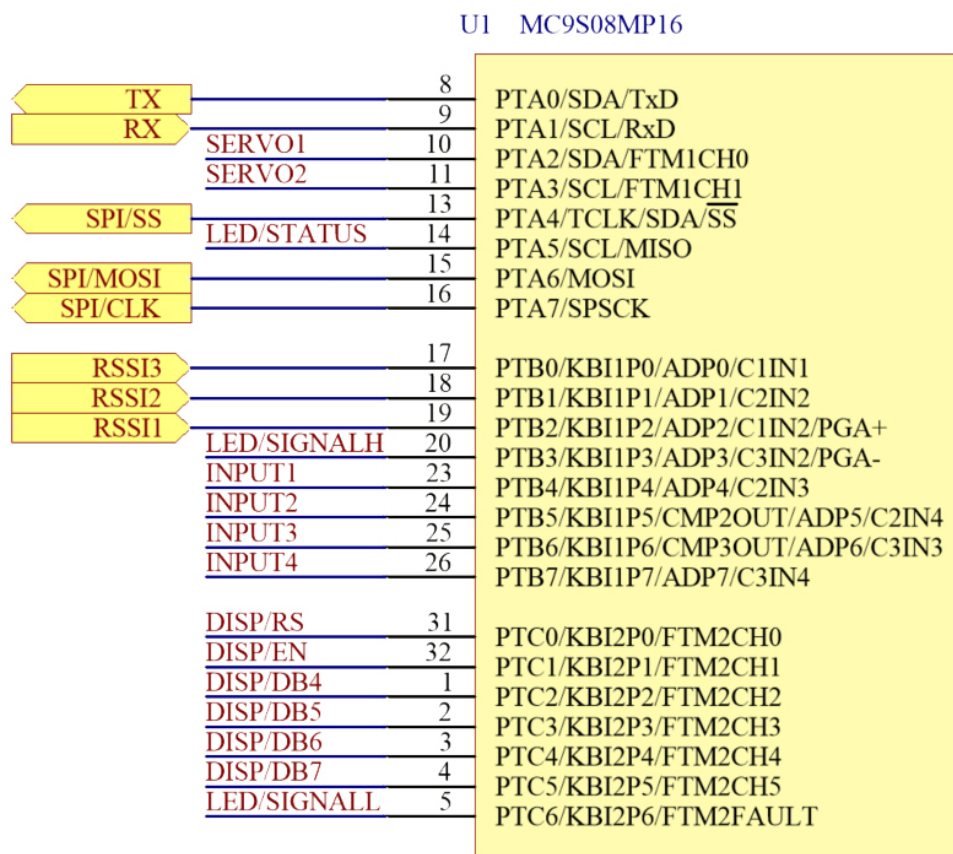
Správné zapojení MCU je nezbytný předpoklad pro požadovanou činnost sledovače. Nejdříve bylo sestaveno základní zapojení pro činnost MCU. Jako první byly připojeny napájecí piny a referenční piny (pro AD převodník nebo jiné analogové obvody). Podle katalogu od výrobce byl připojen na piny PTE5 a PTE6 externí krystal (oscilátor) pro generování hodinového signálu. Parametry součástek externího oscilátoru nejsou od výrobce pevně předepsané, katalog obsahuje stručný popis jak je správně zvolit. Vybrán byl proto krystal s rezonanční frekvencí 8 MHz, k němu dva kondenzátory o kapacitě 18 pF a rezistor o hodnotě 1 M $\Omega$ . Podle katalogu byly rovněž zapojeny dva blokovací keramické kondenzátory s kapacitou 100 nF a jeden kondenzátor skupinový – elektrolytický s kapacitou 10  $\mu$ F. Nakonec byly k MCU zapojeny programovací konektor (BKGD) a resetovací tlačítko. Celé schéma základního zapojení je na obrázku 11.



Obrázek 11: Schéma základního zapojení MCU

Propojení dalších pinů MCU už bylo potřeba zvážit a správně zvolit s ohledem na funkce jednotlivých pinů a požadavky připojených obvodů. Zjednodušené schéma zapojení

zbylých komponent k MCU je na obrázku 12. Jako první byly připojeny vodiče pro sériovou komunikaci s USB převodníkem, která může být uskutečněna pouze na pinech TxD a RxD. Tyto piny byly připojeny na stejně pojmenované piny (Tx, Rx) na USB převodníku.



Obrázek 12: Zjednodušené schéma zapojení funkčních komponent

Dalším jednoznačným zapojením byly servopohony. Ty musely být připojeny na piny, které disponují časovací jednotkou (FTM – Flextimer Module) kvůli řízení servopohonů PWM signálem – tedy piny FTM1CH0 a FTM1CH1.

Pro zapojení a realizaci SPI komunikace běžně stačí obyčejné vstupně/výstupní rozhraní, použitý mikrokontrolér však obsahuje integrované pro realizaci SPI komunikace. Pin SS (PTA4) je adresační vodič (Slave Select), pin MOSI (PTA6) je datový vodič (Master In Slave Out) a pin SPSCK (PTA7) slouží jako vodič pro řídicí hodinový signál (Clock). Později při vývoji se však ukázalo, že integrované SPI rozhraní nelze využít, a bylo nutné realizovat SPI komunikaci „ručně“ s použitím výše zmíněných pinů jako vstupně/výstupní.

Posledními komponenty, které musely být zapojeny na specifické piny, byly vodiče tlačítek uživatelského rozhraní. Vodiče musí být z tlačítek přivedeny na piny, které umožňují detekci náběžných a sestupných hran (což umožňuje rozhraní označené jako KBI - Keyboard Interrupt). 4tlačítkové uživatelské rozhraní (INPUT1 – INPUT4) bylo zapojeno na piny KBI1P4 – KBI1P7.

Zbylé komponenty si vystačí s obyčejnými vstupně/výstupními piny. Na piny PTC0-PTC5 byly připojeny vodiče pro paralelní komunikaci s displejem (DISP/xx) a na zbylé vodiče (PTA5, PTB3 a PTC6) byly připojeny vodiče signalizačních LED diod (LED/xx).

## 2.4. Rozmístění a propojení součástek

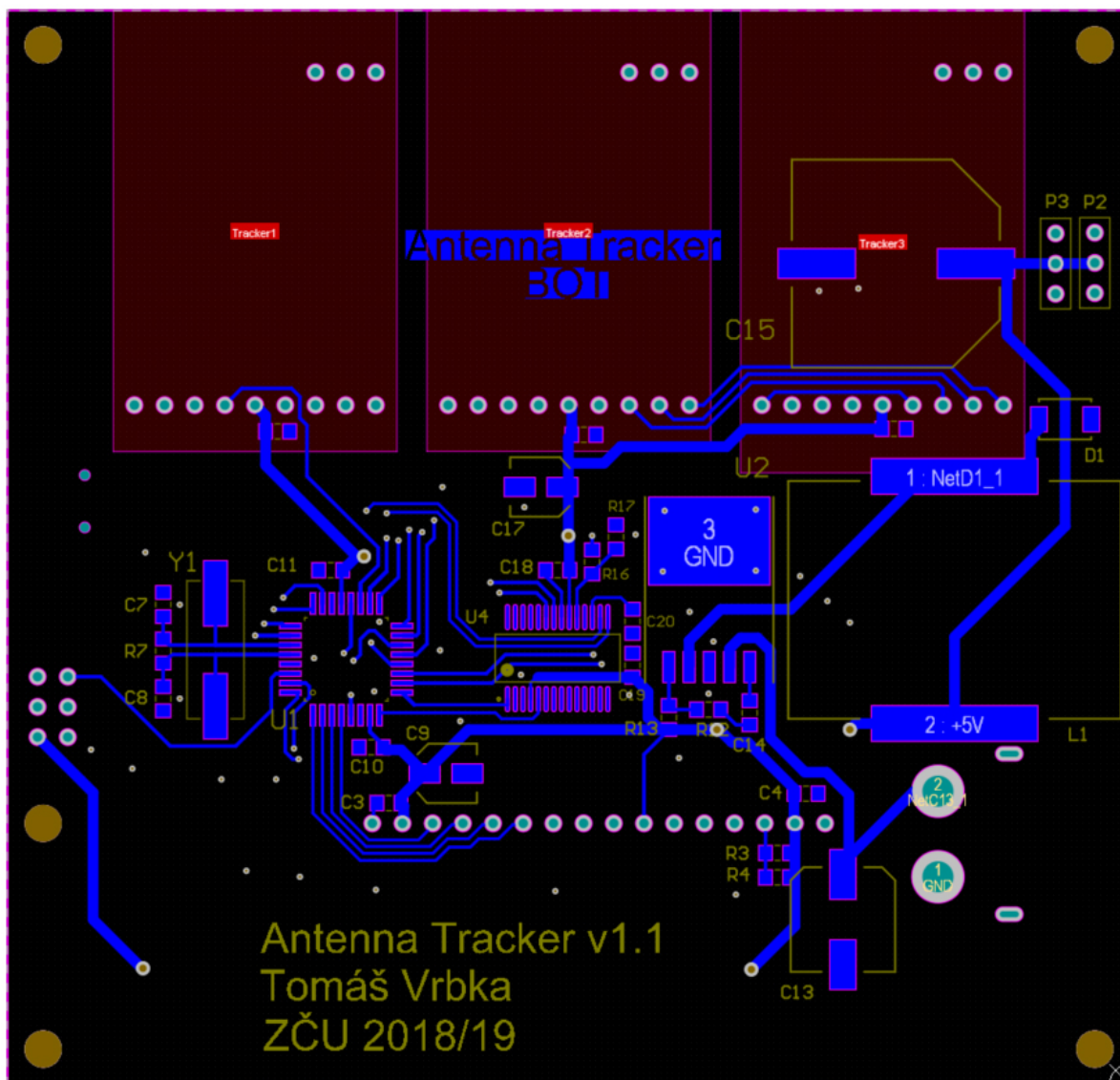
Deska byla pomyslně rozdělena na horní (estetickou) stranu obsahující zejména ovládací a signalizační prvky (tlačítkové rozhraní, LED displej, signalizační LED, napájecí konektor, USB konektor, programovací konektor) a spodní (funkční) stranu, obsahující zbylé funkční komponenty (mikrokontrolér s krystalem, USB převodník, regulátor napětí atd.).

Specificky umístěn byl např. filtrační kondenzátor umístěný v blízkosti hlavního napájecího konektoru desky nebo lokální kondenzátor umístěný blízko napájecích konektorů servopohonů (kvůli velkému impulznímu odběru proudu). Zvláštní pozornost si ještě zaslouží velmi rozměrné součástky jako např. tlumivka, sloužící k omezení proudových rázů spínaného regulátoru (maximální proud 5 A vyžaduje tlumivku, která je na takový proud dimenzovaná – dá se očekávat, že bude rozměrná), velký elektrolytický kondenzátor (4,7 mF) nebo samotné moduly RX5808 (ty jsou ploché a byly umístěny na horní stranu desky pod displej).

Regulátor napětí byl umístěn co nejbližší napájecímu konektoru, aby se zamezilo parazitní indukčnosti. Všechny součástky regulátoru byly umístěny co nejbližší. Největší přednost při rozmístování měla velmi rozměrná tlumivka. Všechny cesty pro napájení byly zvoleny minimálně 1 mm široké, jelikož je deska složená především z digitálních prvků.

Přímo vedle regulátoru byl umístěn USB převodník spolu se všemi potřebnými součástkami.

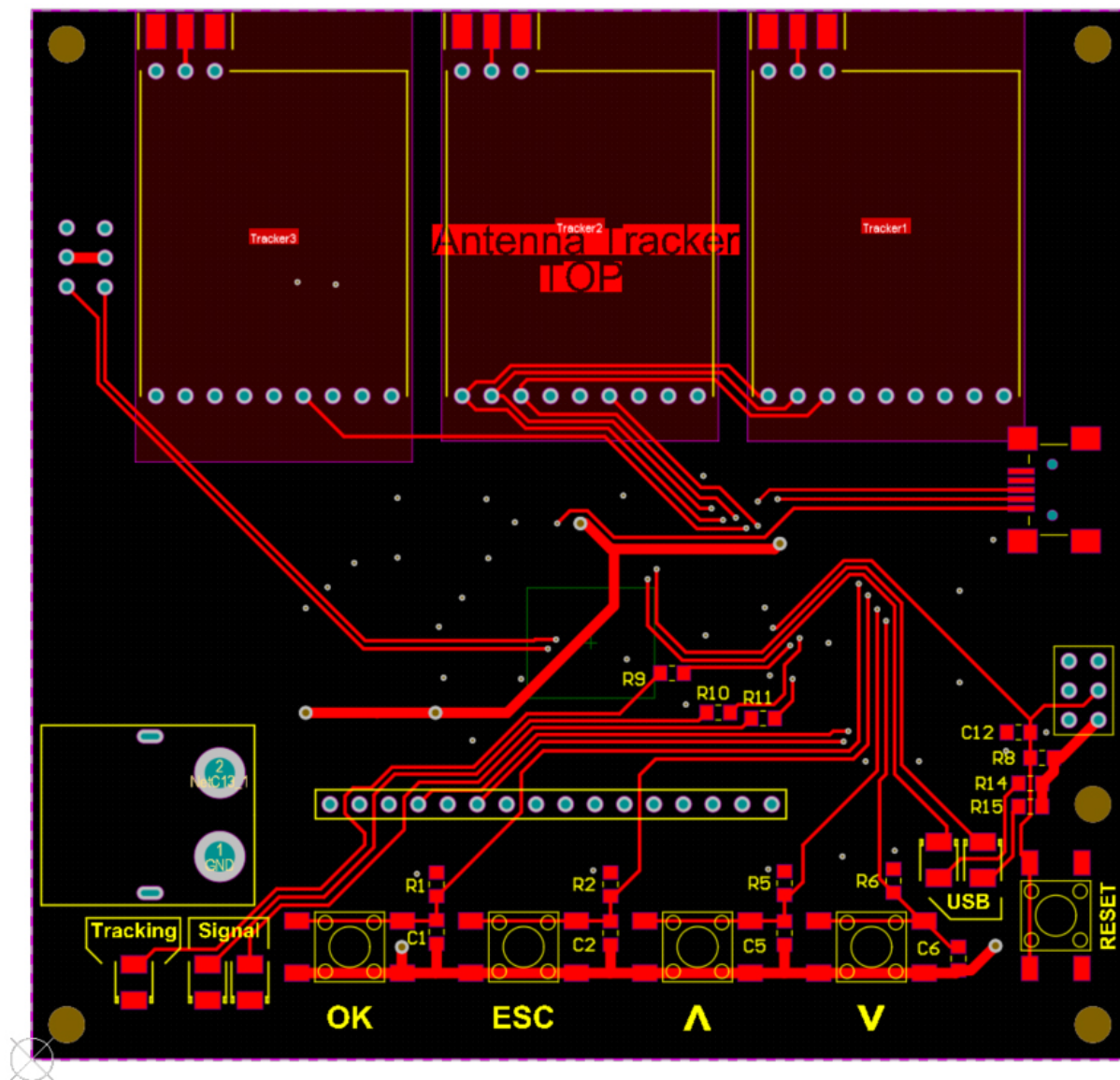
Místo téměř veprostřed patří mikrokontroléru. Střed se jeví jako nejlepší místo, jelikož cesty povedou od MCU téměř ke všem součástkám všemi směry. Velmi pečlivě – v blízkosti napájecích pinů MCU – byly umístěny lokální blokovací kondenzátory.



Obrázek 13: Spodní strana DPS

Pozici modulů RX5808 si nebylo možné moc dobře vybrat. Musely být na kraji desky a musely být orientovány správným směrem. Proto byly umístěny na horní stranu desky pod displej. Blokovací kondenzátory byly rovněž postaveny do cesty mezi zdrojem napětí a modulem.

Uživatelské rozhraní (displej, tlačítka a signalizační LED diody) na horní straně desky bylo postaveno tak, aby bylo snadno dostupné a viditelné. Celou desku ještě ve finále překrývá poměrně velký displej. Deska tak působí velmi esteticky a většina součástek je schovaná.



Obrázek 14: Horní strana DPS

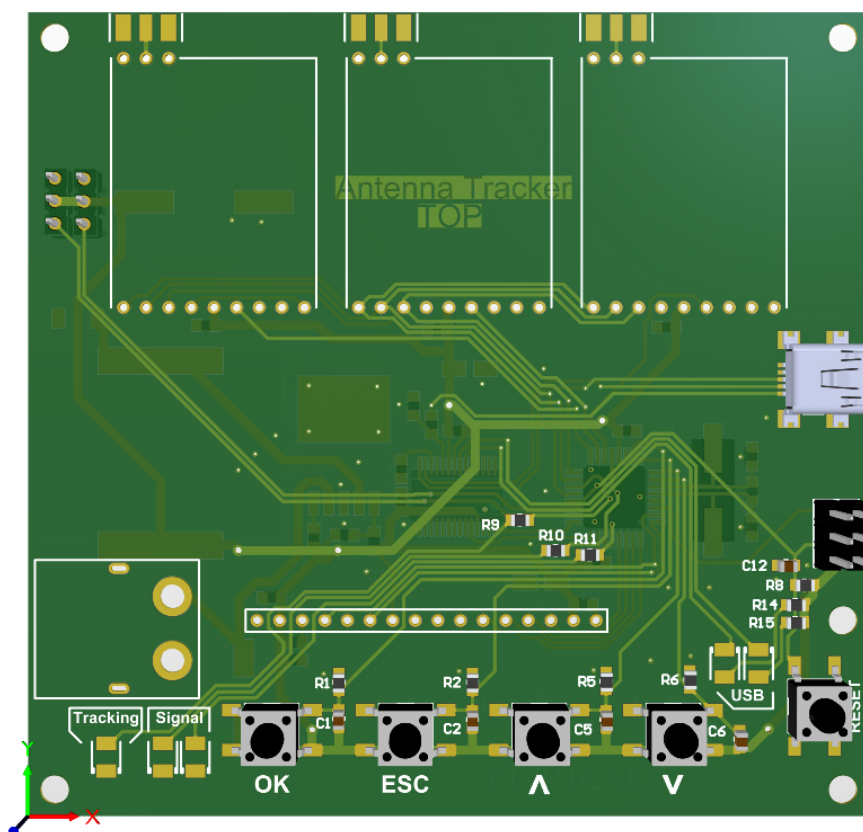
Při vytváření spojů byl kladen důraz na dodržení všech požadavků na vedení spojů. Byla snaha mít všechny cesty co nejkratší z důvodu omezení parazitních vlastností (odpor, impedance, indukčnost, kapacita), nejmenší plochy proudových smyček a správné rozvedení napájení a zemnění. Na závěr byla použita rozlitá měď propojená se zemí a do desky byly přidány dodatečné průchody k součástkám k minimalizaci proudových smyček.



## 2.5. Výroba DPS

Výroba desky byla rozdělena na dvě etapy. V první etapě byl na školní fréze vyroben prototyp desky, který sloužil k otestování funkčnosti všech zapojení a ověření, že hardwarové vybavení pracuje správně. V druhé etapě byly v návrhu opraveny a doplněny všechny nedostatky prototypové desky a zároveň byla přidána další doplňková vylepšení. Druhá upravená deska je považována za finální a byla zhotovena profesionální firmou (pouze samotná deska bez osazování součástkami).

V druhé etapě byla deska zbavena zejména špatně propojených cest a pinů a bylo znovu rozmístěno poměrně dost součástek – zejména součástky uživatelského rozhraní. Zároveň byly přidány tři signalizační LED diody, které v původním prototypovém návrhu vůbec nebyly. Ukázka nového rozmístění uživatelského rozhraní je na obrázku 15 (pouze horní strana DPS) – v přední části desky se nachází všechna tlačítka a LED diody. Všechny tyto prvky byly zvýrazněny a popsány pomocí bílého potisku. Horní část desky potom zakrývá velký LED displej.



Obrázek 15: Ukázka 3D zobrazení horní strany desky

Finální podoba desky byla zhotovena profesionální firmou se všemi standardními vrstvami (signální vrstvy, nepájivá maska a potiskové vrstvy). Deska byla vyrobena ze standardního dielektrika FR-4 o tloušťce 1,6 mm. Vrstva mědi byla zvolena 18  $\mu\text{m}$  silná, s povrchovou úpravou HASL (Hot Air Soldering), která je ideální pro ruční pájení. Nepájivá maska byla vybrána standardní zelená s bílým potiskem. Detailní fotografie hotové desky z výroby jsou v příloze D.

Tak jako u prototypu byla deska po osazení prvotně připojena k laboratornímu zdroji. Na zdroji byl nastaven omezovač proudu a napětí bylo nastaveno na minimální pracovní napětí regulátoru. Po přeměření napětí na desce byl omezovač proudu postupně vypnut a bylo tak ověřeno, že je napájení desky správně zapojené. Takto opatrné první připojení bylo důležité hlavně proto, že jako napájecí zdroj jsou používány Li-Pol baterie, které mají veliký zkratový proud. Při zkratu by tedy mohlo velmi rychle dojít k poškození desky.

### **3. Program mikrokontroléru**

Pro vývoj softwaru byl vybrán vývojový program CodeWarrior, který patří přímo výrobci mikrokontrolérů NXP. Toto vývojové prostředí je velmi výhodné pro programování MCU, protože obsahuje nástroj pro snadnou konfiguraci hardwaru – Processor Expert. Tento nástroj umožňuje jednoduché nastavení registrů MCU bez detailní znalosti hardwaru, což velmi usnadňuje práci a šetří čas. Programuje se v jazyce C.

#### **3.1. Inicializace hardwaru**

Vývojový nástroj Processor Expert má grafické rozhraní, pomocí kterého lze snadno konfigurovat hardware MCU. V tomto rozhraní byly nastaveny nezbytně nutné komponenty pro funkčnost sledovače - viz obrázek 16.





převádět hodnota napětí. Zároveň byla v PE nastavena přerušovací rutina, která se spustí po doběhnutí AD převodníku. Tato rutina zajišťuje zápis přečtených hodnot do příslušných proměnných.

- **Časovač pro ovládání servopohonů - FTM1**

Správným nastavením časovače lze přivést na výstupní piny PWM signál, kterým je ovládána rychlost nebo úhel natočení servopohonů. Nejprve byla nastavena perioda signálu na hodnotu 20 ms (což je frekvence 50 Hz), kterou jsou ovládána standardní serva. Poté byly nastaveny dva výstupní piny, kde bylo teprve upřesněno, že je časovač určen ke generování PWM signálu (Channel mode – Edge PWM). Poté bylo nastavením upřesněno, jakou polaritu bude mít hrana PWM signálu – „high true“ (logická 1). Poslední a nejdůležitější je nastavení hodnoty kanálu, které určuje, jak dlouho bude aktivní horní hrana pulsu. Tato hodnota se bude v průběhu programu měnit, a proto byla zaznamenána adresa tohoto registru. K číslu, které reprezentuje požadovaný čas, se dostaneme pomocí přepočtení dělicích hodnot periody. Ukázka nastavení časovače je na obrázku 17.

▼ Clock settings		
Clock source	System clock	
Prescaler	divide by 32	
Modulo counter	14999	D
Period	20.000 ms	
▼ Channels		
▼ Channel 0	Enabled	
▼ Channel mode	Edge PWM	
PWM polarity	High-true	
Channel value register	1125	D
Input capture filter	Disabled	
▼ Pin	Enabled	
Pin	PTA2_SDA_FTM1CH0	PTA2_SDA_FTM1CH0

Obrázek 17: Ukázka nastavení časovače FTM1 v prostředí Processor Expert

- **Časovač pro časování v programu – FTM2**

Tento časovač nemá přiveden výstup na žádný pin. Slouží čistě k měření časových intervalů a načasování událostí, které je potřeba vykonat při běhu programu. Perioda byla pomocí děličů nastavena na 1ms. Pro zachycení doběhnutí časovače bylo potřeba vytvořit přerušovací rutinu, která uloží časový údaj do příslušných proměnných, se kterými pracuje program.

- **Tlačítková přerušení – KBI**

V podstatě se jedná o detekci náběžných hran, u které se již předem počítá, že spustí přerušení. V nastavení stačilo vybrat, co bude detekováno – hrana – a poté už jen nastavit jednotlivé vstupní piny. U každého ze čtyř pinů bylo třeba vybrat, při jaké polaritě signálu se bude přerušení spouštět – horní náběžná hrana (tlačítka po stisknutí přivedou na vstupní piny +5V). Aby bylo nastavení kompletní, byla ještě přidána funkce přerušovací rutiny.

- **Sériová komunikace – SCI**

Pro komunikaci s převodníkem slouží sériové rozhraní. Modulační rychlost byla nastavena na 125 000 baudů. Zbylé nastavení bylo ponecháno výchozí, jen datový formát byl nastaven na 8 bitů. Na závěr bylo ještě potřeba povolit odesílání dat do USB převodníku. Příjem dat zůstal prozatím zakázán.

- **Sériová periferní komunikace – SPI**

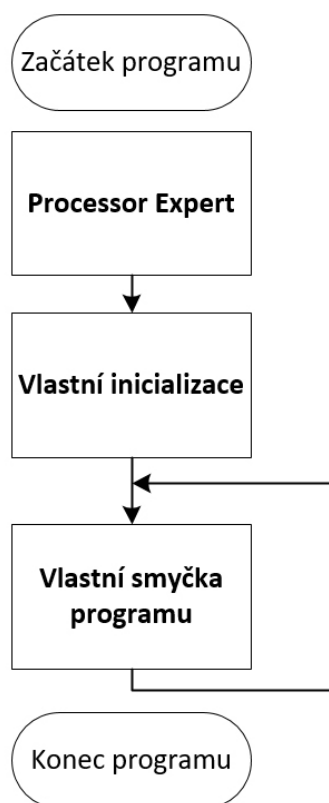
Původně bylo zamýšleno použít pro komunikaci s modulem RX5808 integrované SPI rozhraní. V průběhu vývoje se ale ukázalo, že to nebude fungovat. Změna kanálu se provádí posláním 25 bitů dat do MCU modulu. Integrované SPI rozhraní umí ale posílat data pouze po 8 bitech. Poslání správných dat by se dalo docílit vysláním celkem 32 bitů, z nichž prvních 7 bitů by byly „zahozené“ bity, které by přijetím dalších dat „přetekly“ přes zásobník. Ovšem ani takto modul na instrukce nereagoval. Proto byla při testování programu vytvořena funkce pro „ruční“ SPI rozhraní, která posílá pouze 25 bitů dat a ovládání modulu tímto způsobem funguje.

- **Obecné stupně výstupní piny – GPIO**

Velmi jednoduché nastavení rozhraní pro vstupně výstupní piny. Celkem bylo nastaveno 12 výstupních pinů a žádný vstupní. V nastavení bylo potřeba vybrat možnost nastavování samostatných pinů (druhá možnost byla nastavovat celý port) a dané piny bylo potřeba povolit, nastavit je jako výstupní a nastavit jejich výchozí hodnotu (adresa registru s výchozí hodnotou byla zaznamenána pro účely programování).

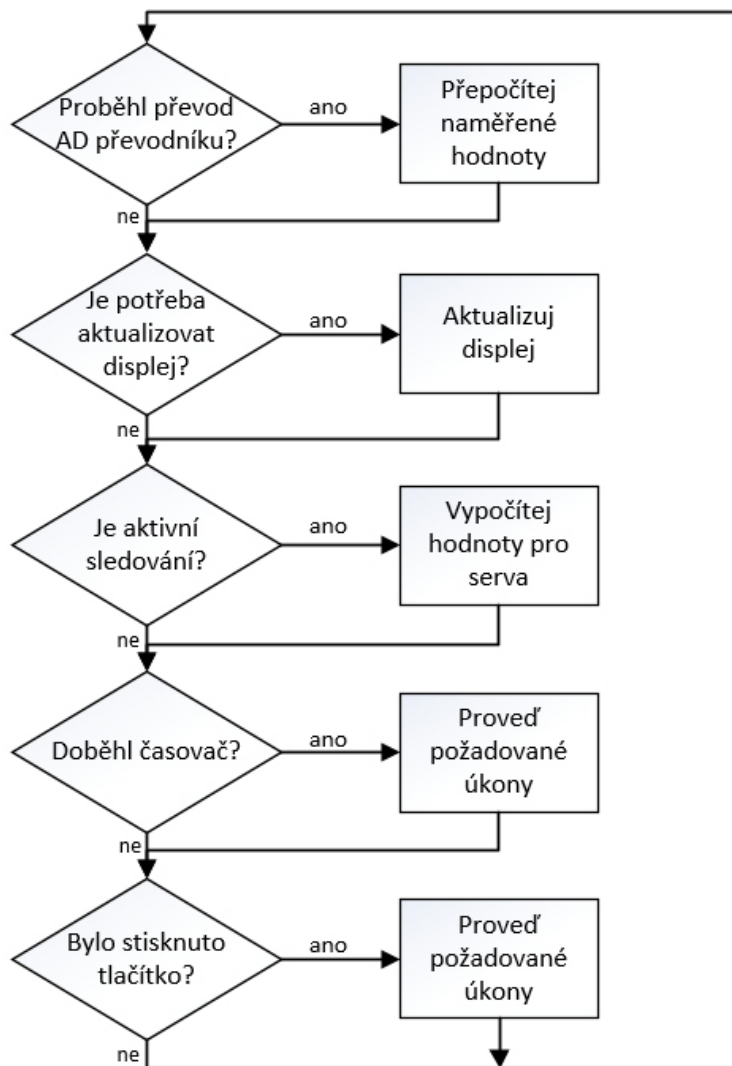
### 3.2. Hlavní smyčka programu

Při spuštění MCU dojde nejprve k inicializaci hardwaru, o který se stará Processor Expert, poté dojde k vlastní inicializaci hlavních komponent (nastavení LED displeje a některá výchozí nastavení) a poté se teprve program dostane do hlavní nekonečné smyčky.



Obrázek 18: Diagram programu MCU

Uvnitř vlastní (hlavní) smyčky programu dochází k neustálému kontrolování příznakových bitů a k vykonání požadovaných akcí. Příznakové bity mohou být změněny některým z přerušení nebo programově - jako reakce na uživatelskou interakci. Na obrázku 19 je vidět zjednodušené schéma hlavní smyčky programu a zachytávání příznakových bitů. Ve skutečnosti má každé z tlačítek svojí testovací podmínku.



Obrázek 19: Diagram vlastní (hlavní) smyčky programu

### 3.3. Přerušovací rutiny

Ještě před popsáním samotného kódu je třeba upřesnit provádění přerušovacích rutin. Přerušovací rutinu můžou vyvolat celkem tři události. První z nich je doběhnutí AD převodníku, druhou je detekce náběžné hrany na jednom z tlačítek a třetí je doběhnutí časovače FTM2. Výstup časovače FTM2 není přiveden na žádný výstup, je primárně určen pro programové časování (a pravidelného spouštění určitých procedur).

Provedení přerušovací rutiny by nemělo zabrat moc času, aby zbytečně nezahlcovalo procesor a nezpomalovalo průběh hlavní smyčky. Proto všechny přerušovací rutiny provedou pouze změnu příznakového bitu v proměnné příslušné události (*adc\_flag*, *timer\_flag*, *btn\_1\_flag*, *btn\_2\_flag*, *btn\_3\_flag*, *btn\_4\_flag*) a příslušné „obsloužení rutiny“ se provede

v hlavní smyčce programu. Těchto příznakových proměnných je v kódu více (*display\_update\_flag*, *scanning\_active\_flag*, *tracking\_active\_flag*) a umožňují velmi snadnou implementaci kódu do hlavní smyčky pomocí jednoduché podmínky.

### 3.4. Procesy běžící nepřetržitě na pozadí

Aby byl vyvinutý program popsán co nejjasněji a nejpřehledněji, bude jeho popis rozdělen do několika celků. Nejdříve budou popsány procesy běžící nepřetržitě na pozadí a poté budou rozebrány jednotlivé stránky a funkce uživatelského menu, včetně všech doplňkových a podpůrných funkcí. Nakonec bude popsán samotný sledovací algoritmus.

- **Ukládání hodnot AD převodníku**

Nejdůležitějším procesem, který probíhá nepřetržitě na pozadí, je bezpochyby čtení pomocí AD převodníku a ukládání hodnot do příslušných proměnných. Čtení analogových hodnot je spouštěno druhým časovačem FTM2 s periodou 1 ms (a tedy s frekvencí 1 kHz). Každý cyklus čtení začíná spuštěním převodu z prvního kanálu (z prvního vstupního pinu). Jakmile je čtení dokončeno, spustí se přerušovací rutina, která uloží naměřenou hodnotu do dočasné proměnné *rssi\_1* a spustí se převod pro druhý kanál. Ten provede stejný proces, naměřenou hodnotu uloží do proměnné *rssi\_2* a spustí převod pro třetí kanál. Jakmile se uloží naměřená hodnota ze třetího vstupního pinu, uloží se příznakový bit (logická 1) do proměnné *adc\_flag*.

- **Zpracování naměřených hodnot**

V hlavní smyčce je pak příznakový bit proměnné *adc\_flag* zachytáván podmínkou, která provede uložení dočasné proměnné do podoby, ve které ji budou využívat všechny další funkce programu. Protože hodnoty získané pomocí AD převodníku jsou naprosto zásadní pro funkčnost celého sledovače, je potřeba tyto hodnoty vhodně zpracovat a „vyhladit“. Vyhlazení naměřených hodnot se provádí tak, že se z posledních pěti naměřených údajů vypočítá aritmetický průměr, což částečně potlačí drobné skokové změny způsobené nepřesností modulu nebo rušivým šumem. Hodnoty z dočasných proměnných se pravidelně zapisují do 5prvkového pole *array\_rssi\_1[]*, které uchovává 5 posledních naměřených údajů a počítá se z něj průměr naměřených hodnot. Tento průměr se počítá pro každý kanál zvlášť a na konci dojde ještě k výpočtu celkového průměru všech tří kanálů. Tento průměr je určen pro vyhodnocení celkové síly signálu a k jeho signalizaci pomocí LED diod.

- **Časování programu**

Dalším velmi důležitým prvkem je časování uvnitř programu. Pomocí PE byla nastavena perioda časovače FTM2 na 1 ms. Pro účely programu bylo potřeba načasovat nejmenší časové intervaly s periodou 100 ms. Po každém doběhnutí časovače se spustí přerušovací rutina, ve které dojde k inkrementaci proměnné *timer\_100ms*. Jakmile přesáhne tato proměnná hodnotu 100, dojde k jejímu vynulování a k zapsání příznakového bitu log. 1 do proměnné *timer\_flag*. Tato proměnná je opět v hlavní smyčce programu zachytávána podmínkou a vyhodnocena. Zároveň časovač spouští AD převodník.

- **Signalizace RSSI pomocí LED diod**

Prakticky ihned po spuštění MCU začnou dvě LED diody signalizovat RSSI. Pro vyhodnocení síly signálu je potřeba průměrná hodnota síly signálu ze všech kanálů, která je vždy vypočtena funkcí pro zpracování hodnot z AD převodníku. Tato hodnota je potom porovnávána s hodnotami, které odpovídají různým úrovním signálů. Celkem LED diody signalizují čtyři úrovně síly signálu. Při nejsilnějším signálu svítí trvale zelená dioda, při slabší (ale pořád dobré) úrovni začne zelená dioda blikat. Pokud signál ještě klesne, zelená dioda přestane svítit a začne blikat červená. Při žádném nebo kritickém signálu svítí trvale červená dioda. Pro načasování blikání byl nezbytně nutný programový časovač.

- **Posílání dat do USB rozhraní**

Všechna důležitá data jsou posílána pravidelně do USB rozhraní k záznamu a možné analýze. Posílání dat přes SCI rozhraní je v zásadě velmi jednoduché, stačí do příslušného registru SCI zapsat požadovaný znak a MCU ho odešle do převodníku. Poté je potřeba přečíst registr, který signalizuje, že byl přenos dokončen a lze hned posílat další znaky. Znaky se posílají v ASCII formátu, tím pádem není potřeba je složitě kódovat.

Pro snadnější používání byla pro přenos dat vytvořena funkce *SerialPrint(const char\* text)*, jejímž vstupním parametrem je pole znaků (textový řetězec). Funkce se postará o přeposlání řetězce do USB převodníku. Zároveň byla vytvořena druhá, podobná funkce *SerialPrintln(const char\* text)*, která se liší v tom, že po odeslání textového řetězce odešle ještě znaky reprezentující odřádkování a přesun kurzoru na začátek řádku. To je nutné pro správné formátování výstupních dat.

Tyto pomocné funkce slouží hlavní logovací funkci *SendSerialData()*, která je volána periodicky (každých 100 ms) při aktivní sledovací obrazovce a odesílá data do USB rozhraní.

Tato data jsou posílána ve formátu CSV (Comma-separated values), který je ideální pro uložení dat do tabulek a k jejich analýze.

### 3.5. Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní je bezpochyby velmi důležitým prvkem. Musí být přehledné, snadno pochopitelné a intuitivně ovladatelné.

- **Tlačítková přerušení**

Pro pohyb v uživatelském menu jsou určena čtyři tlačítka, která po detekování náběžné hrany spustí přerušovací rutinu. V této rutině se testuje, které z tlačítek bylo stisknuto. Příslušné proměnné (*btn\_1\_flag*, *btn\_2\_flag*, ...) je potom přiřazen příznakový bit (log. 1), který je zachycen v hlavní smyčce programu a tam je požadavek zpracován. Zároveň přerušovací rutina po stisknutí tlačítka změní v registru jeho nastavení na detekci při hraně sestupné. Přerušovací rutina tak proběhne pouze jednou a až po uvolnění tlačítka dojde ke zpětné změně registru na detekci hrany náběžné (při uvolnění se opět spustí přerušovací rutina, která změní nastavení zpět). Tato změna v registrech by se mohla jevit jako zbytečná složitost, díky ní lze ale zachytit stisknutí dvou tlačítek zároveň. Toho je později využito na „utajené“ spuštění ukázkového kódu (ten nelze spustit klasickou volbou z menu, nýbrž stisknutím dvou tlačítek zároveň – tato možnost je pro uživatele skrytá a dala by se označit za „zadní vrátka“).

- **Inicializace displeje**

LED displej je ovládán pomocí šesti paralelních pinů. Dva z nich jsou řídicí a slouží k aktivaci příjmu dat (EN - Enable) a k určení registru (RS - Register select), do kterého se data zapíší. Zbýlé čtyři piny jsou datové. Komunikace probíhá tak, že na paralelní datové piny je přivedena požadovaná logická kombinace, která se do displeje odešle aktivací EN pinu (změna z log. 0 na log. 1). Pokud je při aktivaci RS pin v log. 0, jde o posílání dat do instrukčního registru – ten slouží ke konfiguraci displeje, pohybu kurzoru nebo smazání obsahu displeje. Pokud je při aktivaci RS pin v log. 1, budou se data zapisovat do datového registru – registr znaků zobrazených na displeji.

Inicializace displeje spočívá v jeho počáteční konfiguraci a teprve po nakonfigurování je displej připraven k zobrazování obsahu. Displej po spuštění očekává odesílání dat přes osm paralelních pinů, zvládne ovšem pracovat i se čtyřmi. To je potřeba hned na začátku inicializačního procesu nastavit. Celý inicializační proces je obsažen ve funkci *LCDinit()*. Ta využívá pomocné funkce, které mají usnadnit zadávání – jako třeba funkce

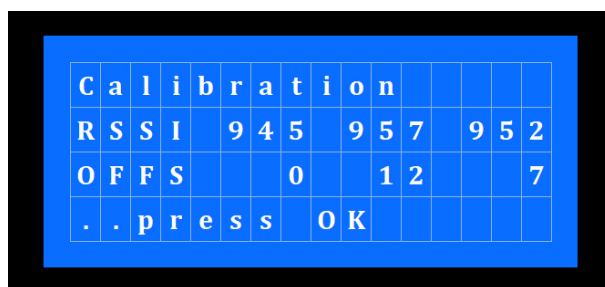
*LCDctrl(unsigned char b, uint8\_t rs)*, která se stará o odeslání zadané binární kombinace na datové piny a může přitom zapisovat jak do instrukčního registru, tak do datového registru (takže je univerzální jak pro konfiguraci displeje, tak pro zápis znaků na displej). Konfigurace displeje začíná nastavením 4bitové komunikace (namísto výchozí 8bitové), poté se opět pošle kombinace pro 4bitovou komunikaci spolu s nastavením počtu řádků a velikostí písmen. Dalším krokem je zapnutí zobrazování displeje a skrytí kurzoru. Posledním krokem je vyčištění displeje (smazání všech zobrazených znaků) a posunutí kurzoru na výchozí pozici. Po této proceduře je již displej plně připraven k zapisování znaků.

- **Zobrazení uživatelského rozhraní**

O výpis textového uživatelského rozhraní se stará funkce *LCDupdate()*. Rozhraní umí zobrazit celkem až 8 různých stránek. Číslo stránky, kterou je potřeba zobrazit, je uchováváno v proměnné *menu\_page*, která je ve funkci podmínkou testována a pokaždé je vypsána příslušná stránka. Změnu zobrazené stránky lze vyvolat jediné pomocí tlačítek uživatelského rozhraní. Tato funkce není spouštěna periodicky, ale pouze pokud je v hlavní smyčce zachycena proměnná *display\_update\_flag* s příznakovým bitem log. 1. Displej by mohl být aktualizován periodicky, ale je to zbytečné zpomalení MCU a zároveň by text rozhraní „blikal“ kvůli časovým prodlevám mezi vypsáním jednotlivých znaků.

- **Úvodní kalibrační obrazovka**

Úplně první stránkou, která se po spuštění zobrazí, je tzv. kalibrační stránka (viz obrázek 20). Kvůli tomu, že přijímací moduly nejsou zcela přesné a každý indikuje RSSI různě veliké, je třeba moduly zkalibrovat a nastavit jednotný „offset“ pro každý kanál. Offset se vypočítá tak, že se od všech třech hodnot RSSI odečte hodnota nejnižšího RSSI a tím se jejich úrovně srovnají. Během testování vyšlo najevo, že kalibrovat je potřeba po každé změně kanálu. Po stisknutí tlačítka OK se zobrazí hlavní stránka menu.

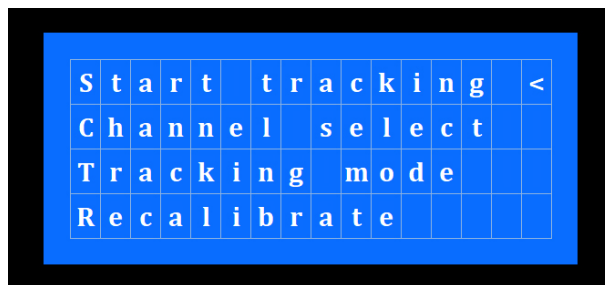


Obrázek 20: Úvodní kalibrační stránka



- **Hlavní nabídka menu**

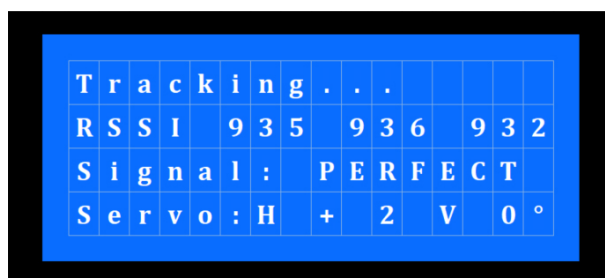
Po zkalibrování se vždy zobrazí hlavní nabídka menu (viz obrázek 21). Skrze hlavní menu se sledovač nastavuje a spouští. Aktuální volba je označena symbolem „<“ vpravo od položky menu (na obrázku 21 je volba aktuálně na prvním řádku). Při stisku tlačítka pro pohyb v menu dojde k inkrementaci nebo dekrementaci proměnné *menu\_focus*, která uchovává pozici kurzoru. Stisk potvrzovacího tlačítka změní obsah proměnné *menu\_page* na zvolenou stránku.



Obrázek 21: Hlavní nabídka menu

- **Sledovací obrazovka**

Tato obrazovka je pouze informativní, nelze v ní měnit žádné nastavení. Lze pouze sledovat měnící se hodnoty, pozastavit sledování a poté ho znovu spustit. Na prvním řádku je zobrazen status sledovače, na druhém jsou naměřené hodnoty signálů z modulů, třetí řádek zobrazuje slovní indikaci signálu a na posledním řádku jsou aktuální hodnoty servopohonů. U horizontálního serva je hodnota rychlostní a u vertikálního serva je hodnota úhlová (ve stupních).

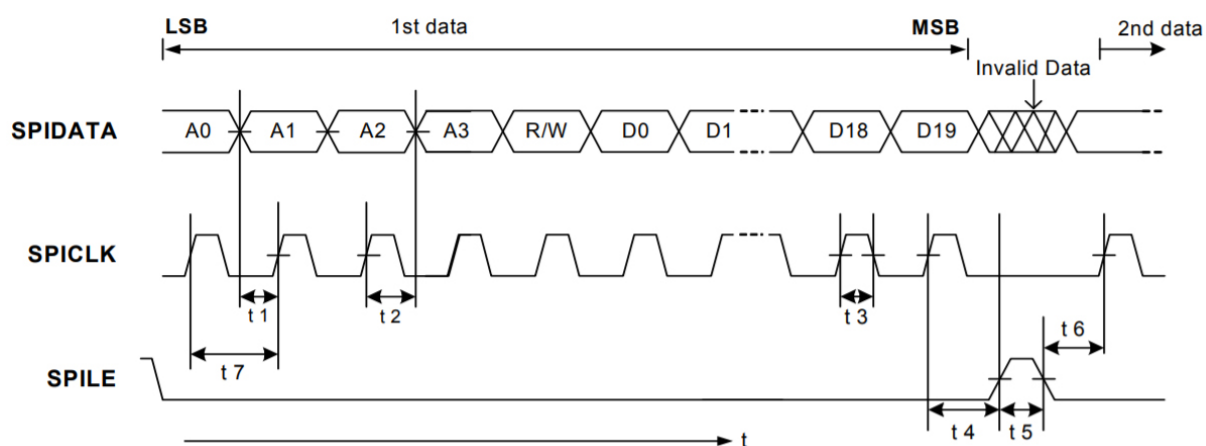


Obrázek 22: Sledovací obrazovka

Pomocí tlačítka ESC lze sledování pozastavit, při druhém stisku tlačítka ESC se opustí sledovací obrazovka a zobrazí se obrazovka hlavního menu. V pozastaveném sledování lze pokračovat stisknutím potvrzovacího tlačítka OK. Pokud je sledování aktivní, bliká zároveň signalizační zelená LED dioda.

## • Volba kanálu

Výběr a změna kanálu (frekvence) jsou bezpochyby nezbytným předpokladem pro univerzálnost a použitelnost sledovače. Při programování vyšlo najevo, že ke změně kanálu nelze použít integrované rozhraní SPI. Namísto toho bylo potřeba vytvořit „ruční“ komunikační protokol. Ten je celý obsažen v jediné funkci *SPItransfer(uint8\_t address, uint8\_t rw, uint8\_t channel)*. Tato funkce vytvoří správný formát dat, která mají být odeslána do modulů a taky se postará o jejich odeslání. Princip odesílání dat je patrný z obrázku 23 a uvedené časové údaje jsou obsaženy v tabulce 1.



Obrázek 23: Princip posílání datové sekvence pomocí „ruční“ SPI funkce [10]

Tabulka 1: Časové údaje pro realizaci SPI komunikace [10]

Parametr	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
t1	20	-	-	ns
t2	20	-	-	ns
t3	30	-	-	ns
t4	30	-	-	ns
t5	100	-	-	ns
t6	20	-	-	ns
t7	100	-	-	ns

Volba kanálu se neprovádí prostým odesláním čísla kanálu, nýbrž odesláním dat pro nastavení syntezátoru v modulech. Pomocí tohoto nastavení lze teoreticky nastavit libovolnou frekvenci v okolí 5,8 GHz. V případě sledovače jsou však důležité pouze frekvence, ve kterých pracují komerčně používaná zařízení. Na obrázku 24 je vidět způsob, jakým se pro určitou frekvenci vypočítají data potřebná k odeslání do modulů pomocí SPI.

**Address 0x01: Synthesizer Register B**

Bits	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	SYN_RF_N_REG [12:0]												SYN_RF_A_REG [6:0]							
5G Default	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1

**Default****5.8GHz: 02A05H**

Synthesizer counter default setting ( 5.8Ghz band:5865MHz)

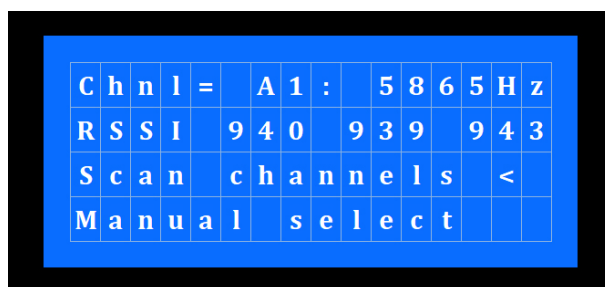
For 5.8Ghz band,  $F_{LO} = 2*(N*32+A)*(F_{osc}/R)$ Example: default  $F_{RF}=5865\text{MHz}$ ,  $F_{LO}=5865-479=5386\text{MHz}$ ,  $F_{osc}=8\text{MHz}$ ,  $R=8$  $5385/2=(N*32+A)*8\text{MHz}/8=2*(N*32+A)*1\text{MHz}$  $N=84(=1010100)$ ,  $A5(=0101)$ For 5.8GHz default: **02A05H**

SYN\_RF\_N\_REG [12:0]: N counter divider ratio control for RF Synthesizer.

SYN\_RF\_A\_REG [6:0]: A counter divider ratio control for RF Synthesizer.

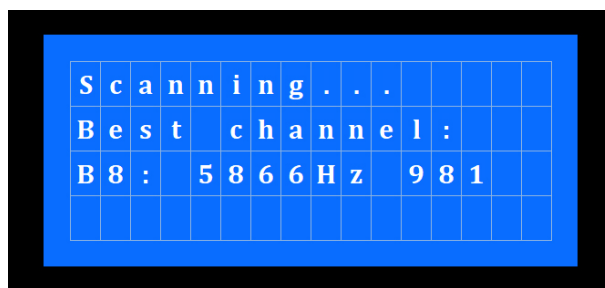
Obrázek 24: Postup výpočtu a formát dat pro přijímací modul [10]

Obrazovka výběru kanálu nabízí dvě možnosti. Vybrat kanál automatickým skenováním nebo vybrat kanál manuálně (viz obrázek 25). V praxi je lepší vybrat kanál manuálně, protože skenování může považovat za kanál s nejlepším signálem ten, který je vysílán velmi blízko skutečné frekvence a jeho špatná volba se projeví až za letu zhoršeným příjmem. Ne vždy je ale jednoduché přesně zjistit, jaký kanál mají vysílací zařízení nastavena, proto funguje velmi dobře i automatické skenování.



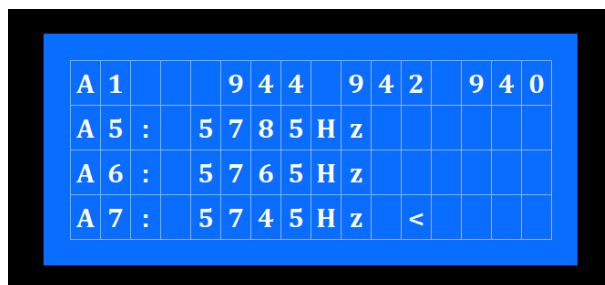
Obrázek 25: Nabídka volby kanálu

Automatické skenování funguje velmi jednoduše. MCU postupně testuje prvních 24 kanálů (to jsou nejčastěji používané) a zaznamenává nejvyšší naměřenou hodnotu signálu (viz obrázek 26). Po otestování všech 24 kanálů zůstane na obrazovce vypsán kanál s nejsilnějším signálem a zároveň se tento kanál nastaví do modulů.



Obrázek 26: Automatické skenování

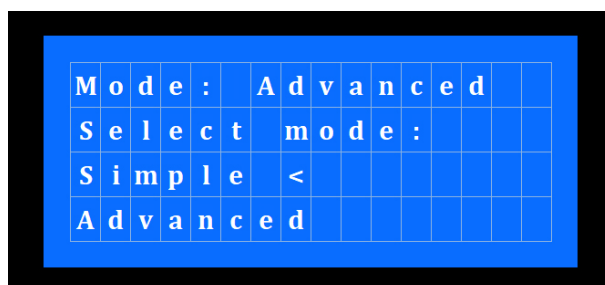
Manuální volba nabízí jednoznačný výběr kanálu (viz obrázek 27). Po potvrzovacím stisku se ihned nastaví požadovaný kanál a je možno sledovat RSSI jednotlivých antén.



Obrázek 27: Manuální volba kanálu

- **Změna sledovacího módu**

Sledovač je vybaven dvěma různými algoritmy pro sledování. Změnu používaného algoritmu (sledovacího módu) lze nastavit pouze na obrazovce pro změnu módu (viz obrázek 28). Do budoucna by se dal přidat další sledovací mód, který by se velmi jednoduše implementoval do této obrazovky.



Obrázek 28: Volba sledovacího módu

### 3.6. Sledovací algoritmus

Podpůrným a nezbytným prvkem sledovacího algoritmu jsou funkce pro ovládání servopohonů. Ty mají za úkol usnadnit zadávání hodnot (a vyhnout se tak složitým přepočtům správného čísla pro registr časovače) a hlavně zamezit případným chybným signálům (v případě chybného výpočtu).

Funkce pro horizontální ovládání serva *HorizontalServoSpeed(uint8\_t speed)* podle vstupního parametru nastaví rychlost otáčení pro levotočivý i pravotočivý pohyb. Směr otáčení určuje nejvyšší bit (*0b0xxxxxxx* - levotočivý pohyb, *0b1xxxxxxx* - pravotočivý pohyb). Rychlost je potom jednoduše zadávána v intervalu od 0 do 10 (128 – 138 pro pravotočivý pohyb). Tato hodnota rychlosti je relativní a není vztažena k žádné absolutní hodnotě.

Pro vertikální pohyb byla vytvořena funkce, která nastaví úhel natočení *VerticalServoSetAngle(uint8\_t angle)*. Hlavním úkolem této funkce je chránit servo proti přetočení do nežádoucí polohy. Úhel otáčení serva je 300 °, zatímco rám sledovače je stavěn na úhel natočení maximálně 90 °. Vstupním parametrem jsou celočíselné hodnoty v rozmezí 0 až 90. Při nechtěném zadání větší hodnoty se nastaví maximální úhel 90°. Pokud by došlo k nastavení většího úhlu než 90 °, dojde k poškození rámu sledovače.

Samotná funkce pro nastavení úhlu není pro ovládání nejvhodnější. Pro regulaci bude snadnější ovládat servo pro vertikální pohyb zadáním rychlosti otáčení. K tomu slouží funkce *VerticalServoSpeed(uint8\_t speed)*. Princip rozeznání směru otáčení je stejný jako u horizontálního serva, akorát směry jsou rozdílné (*0b0xxxxxxx* - pohyb směrem dolů, *0b1xxxxxxx* - pohyb směrem nahoru). Funkce obsahuje také ochranu proti nastavení nežádoucího úhlu natočení. Tato funkce používá k realizaci rychlostního posuvu serva programový časovač a funkci *VerticalServoSetAngle(uint8\_t angle)*.

- **Sledovací algoritmus**

Funkce sledovacího algoritmu jsou zachyceny v hlavní smyčce programu, pokud je příznakový bit *log. 1* v proměnné *tracking\_active\_flag*. Sledovací funkce je spouštěna při každém průběhu programu hlavní smyčkou.

Sledovací algoritmus „**simple**“ je koncipován na jednoúčelové použití. Jelikož se předpokládá používání sledovače k letům na velkou vzdálenost, nepočítá se s tím, že by letěl dron natolik vysoko, aby bylo potřeba natáčet sledovač vertikálně (maximální letová výška je

stanovena zákonem na 300 m [17]). Proto tento sledovací mód otáčí sledovačem pouze horizontálně. Směr horizontálního otáčení se určí porovnáním signálů z levé a pravé horní antény a rychlost otáčení serva se vypočítá podle rozdílu síly signálů. Čím větší je odchylka, tím větší je horizontální rychlost. Pokud jsou naměřené signály téměř stejné, neotáčí se sledovač vůbec a čeká na větší odchylku.

Druhý sledovací algoritmus „**advanced**“ je univerzálnější, ale méně efektivní. Je použitelný na dlouhé i krátké vzdálenosti. U krátkých vzdáleností je potřeba natáčet sledovač i vertikálně, na druhou stranu při letu na takto krátké vzdálenosti není potřeba směrových antén a sledovač se tak stává zbytečně složitým prvkem, který nemusí být plně spolehlivý. Algoritmus nejdříve zjistí, která ze tří antén má nejlepší signál. Poté porovná signál zbylých dvou antén a provede výpočty rychlostí pro serva. Pokud má nejsilnější signál spodní anténa, bude se vždy sledovač pohybovat vertikálně směrem dolů a podle signálů zbylých dvou antén se určí i případný horizontální směr a rychlost otáčení. Pokud má nejsilnější signál jedna ze dvou horních antén, tak může být pohyb sledovače různý. V případě, kdy má druhý nejsilnější signál anténa spodní, bude se sledovač pohybovat pouze horizontálně. Jestliže druhý nejsilnější signál bude mít i druhá horní anténa, bude se sledovač otáčet pouze vertikálně nahoru.

Algoritmus nemá žádné omezení aktivity při slabém signálu. RSSI může být na velké vzdálenosti stejně nízké, jako kdyby nebyl aktivní žádný zdroj signálu a anténa přijímala pouze šum. Proto se při spuštění „naprázdno“ bez zdroje signálu může sledovač otáčet zcela nepředvídatelně.

#### 4. Testování a dosažené výsledky

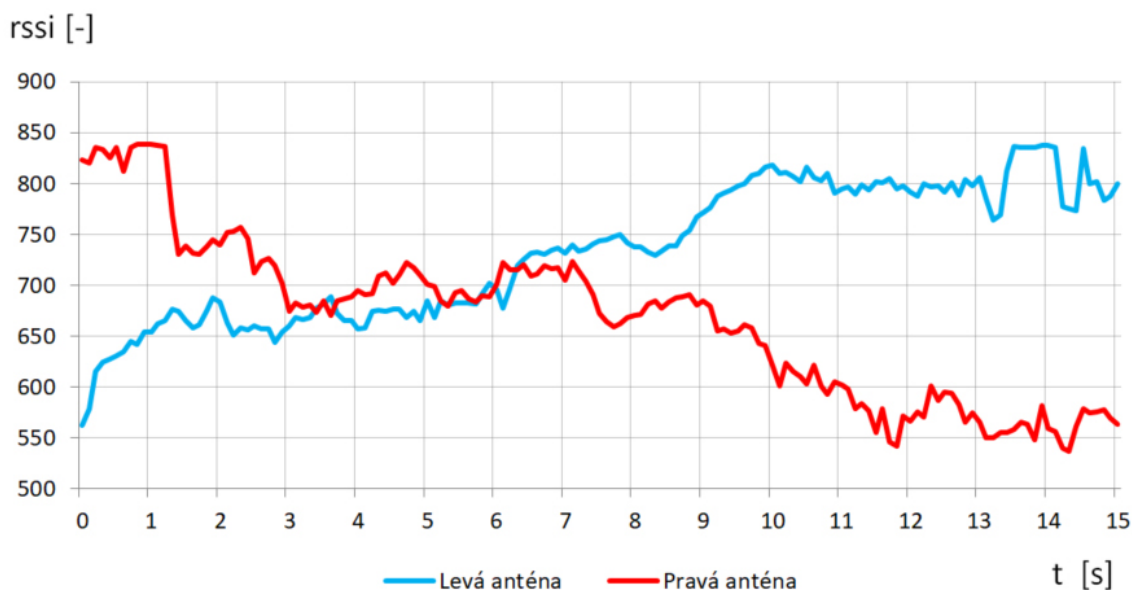
Testování bylo velmi podstatné při vývoji správného sledovacího algoritmu. Pomohlo odhalit spoustu slabin sledovače a také korigovat směr, jakým by měl být vyvíjen a vylepšován. Zásadním nástrojem pro sběr a pozdější analýzu dat bylo připojení sledovače přes USB rozhraní k počítači a záznam dat ve formátu CSV (viz obrázek 29).

```
===== PuTTY log 2019.05.25 14:02:30 =====  
tracking,mode,rssi_1,rssi_2,rssi_3,horizontal_speed,vertical_angle  
1,advanced,518,473,482,0,0  
1,advanced,515,452,485,0,1  
1,advanced,537,463,491,0,1  
1,advanced,517,450,478,0,1  
1,advanced,537,457,483,0,1  
1,advanced,552,495,504,0,1  
1,advanced,540,477,487,0,1  
1,advanced,547,490,489,0,1  
1,advanced,534,478,484,0,1  
1,advanced,529,483,493,0,1
```

Obrázek 29: Ukázka formátu dat uložených z USB rozhraní

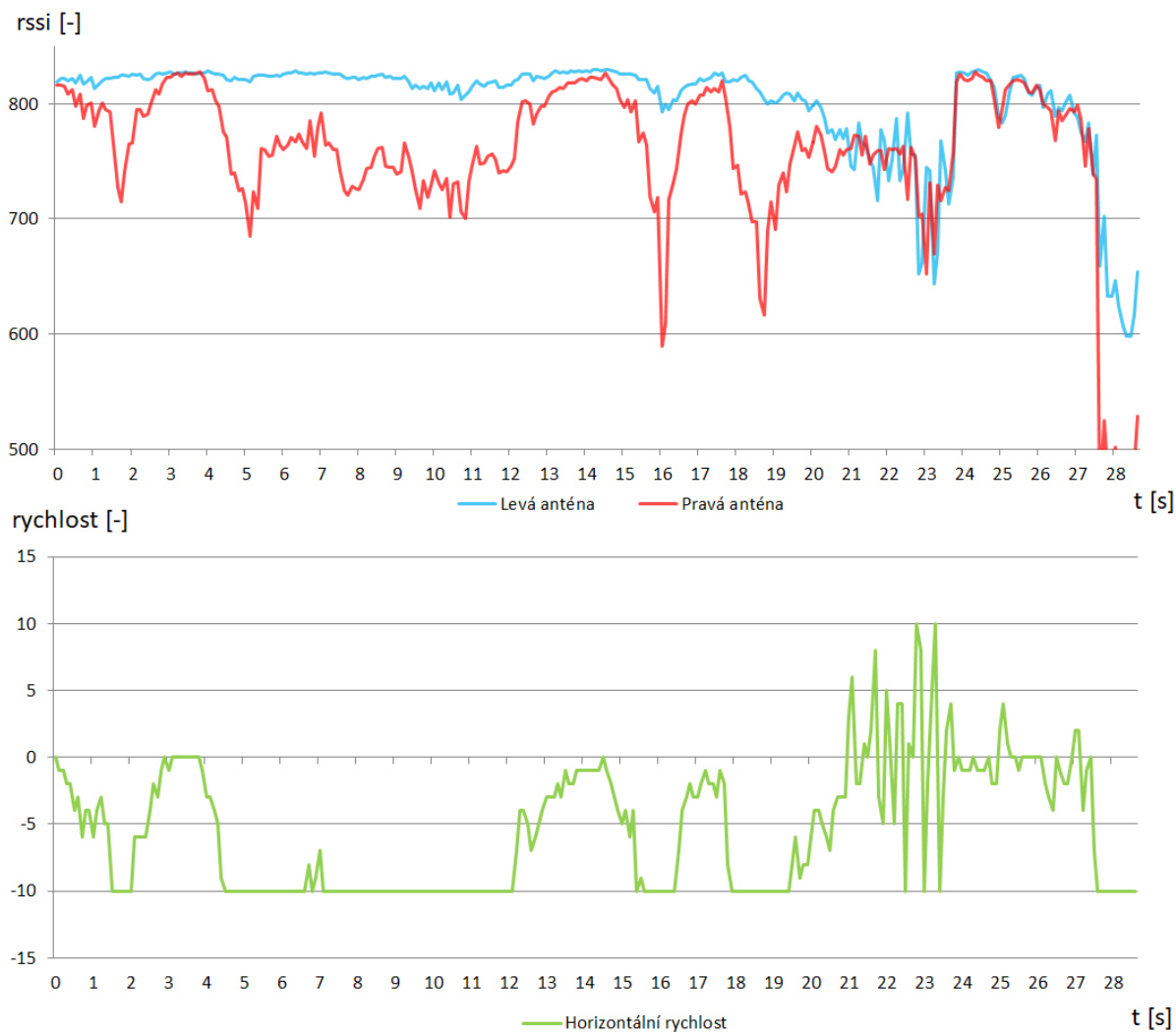
Prvním poučením, které vyplynulo z testování, byl fakt, že měření RSSI není na krátké vzdálenosti (do 50 m) moc přesné. Naměřené hodnoty jsou vysoké i přesto, že není zdroj signálu ve směru vyzařování antén a navíc se hodnoty různě nepředvídatelně mění (jakoby do signálu zasahoval šum a způsoboval neočekávané odchylky). S rostoucí vzdáleností se vliv šumu zmenšuje a antény vykazují stabilnější příjem z hlediska šumu.

Pro ukázkou měření RSSI byl sledovač staticky namířen jedním směrem s vypnutým otáčením. Poté byl proveden přelet dronem ve vzdálenosti 50 m s počátkem u pravé antény a koncem u antény levé. Na obrázku 30 lze pozorovat vývoj síly signálu. Z obrázku je patrné, že je měření mírně nepřesné. Zvolená vzdálenost se při testování ukázala jako nejpřesnější a přesto nevychází naměřená data úplně podle očekávání.



Obrázek 30: Graf naměřených hodnot při přeletu dronem před anténami

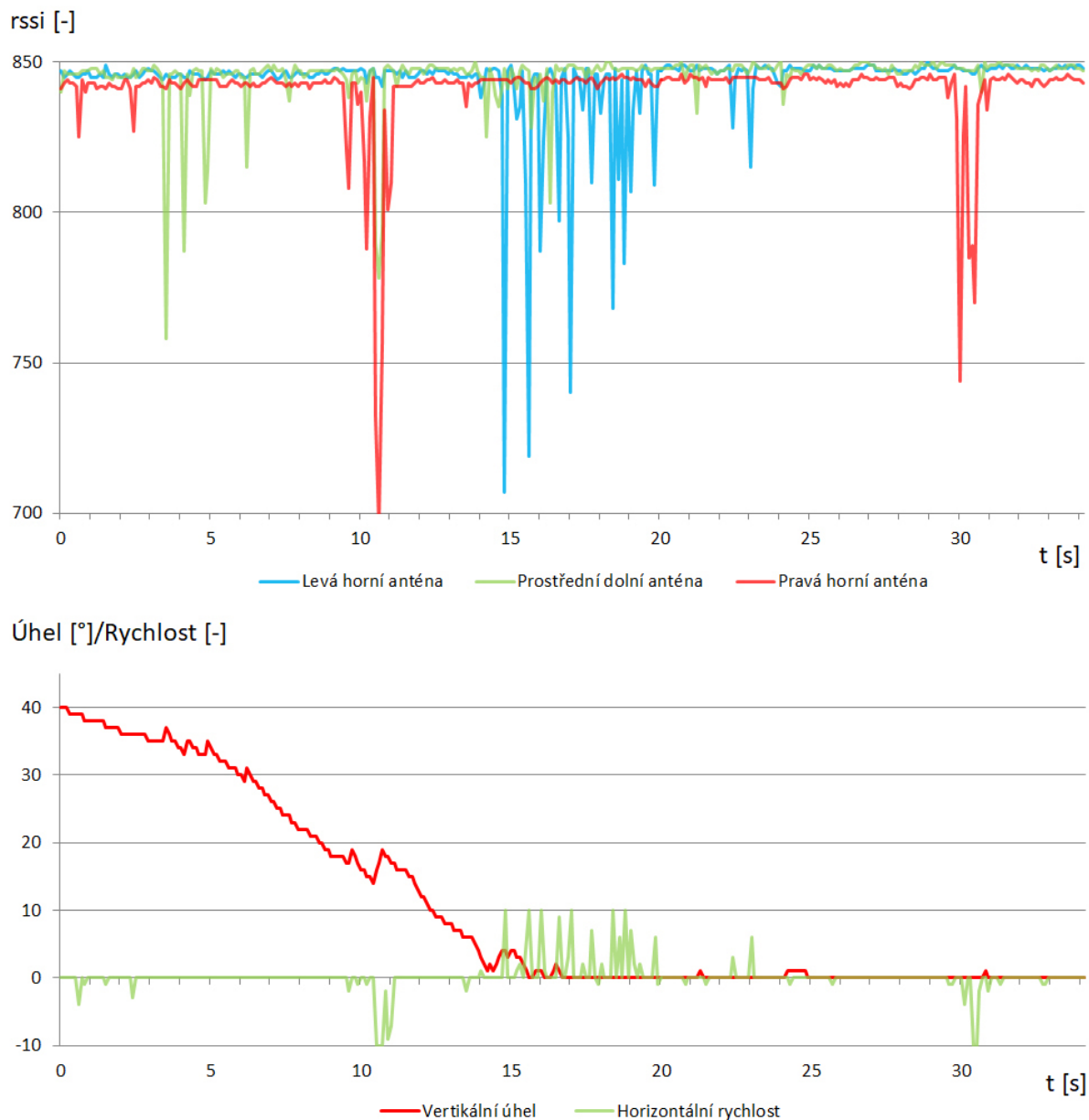
Na obrázku 31 je vyobrazen graf záznam dat ze sledování v jednodušším „simple“ módu. Sledovač se v tomto případě otáčí pouze horizontálně na základě naměřených RSSI hodnot ze dvou horních antén. Prostřední spodní anténa zde nehraje žádnou roli. Na spodním grafu lze pozorovat, jak se mění rychlost horizontálního serva. Většina hodnot rychlostí je záporných, což značí levotočivý pohyb v důsledku slabšího signálu na pravé anténě.



Obrázek 31: Graf dat ze sledování v "simple" módu



Na dalším obsáhlejší obrázku 32 je vyobrazen vybraný úsek ze sledování v „advanced“ módu. V tomto módu se sledovač natáčí i vertikálně a mění tak svůj úhel natočení vůči zemi, jak je z grafu patrné. Rovněž lze pozorovat i otáčení horizontální na spodním grafu. Je-li rychlost kladná, jedná se o pravotočivý pohyb - proto je rychlost v kladných hodnotách, pokud klesne signál levé horní antény a naopak.



Obrázek 32: Graf dat ze sledování v "advanced" módu

## Závěr

Při návrhu a výrobě DPS se velmi osvědčilo vyrobit nejdříve testovací (prototypovou) desku. Při prvotním návrhu totiž došlo k zásadním návrhovým chybám. Například byly prohozeny některé napájecí piny (což mělo v důsledku zničující efekt na první připojený LED displej), některé součástky měly špatné otisky (chybný rozměr nebo propojení) a hlavně bylo spousta součástek rozmístěno v rozporu s návrhovými pravidly (zejména blokovací kondenzátory nebo špatně navržené cesty napájení).

Samotné pájení součástek probíhalo velmi hladce. Po první zkušenosti s pájením drobných součástek na prototypové desce už byla druhá deska osazena velmi rychle a to hlavně díky nepáživé masce a povrchové úpravě HASL. Pro pájení byla použita mikropájka s menším výkonem (oproti standardním stolním mikropájkám) a tak trvalo déle prohřátí některých spojů, to ale nemělo žádný vliv na kvalitu spojů.

Co se týče programování desky, byl velmi přínosný konfigurační nástroj Processor Expert. Pro uživatele, který nemá zkušenosti s programováním mikrokontrolérů, byl tento grafický nástroj velmi užitečný a intuitivní. V průběhu programování (zejména při programování prototypu – bylo třeba ověřit, že všechny komponenty jsou dobře zapojeny a fungují podle očekávání) byla trochu potíž s ověřováním výsledků. U prototypové desky nebyly přímo k MCU připojeny žádné LED diody pro snadnou signalizaci a ověření funkčnosti kódu. K zobrazení výstupů se nabízel i displej, jeho inicializace a zprovoznění bylo ale samo o sobě velmi náročné a zdlouhavé. Proto se ze začátku k ověřování funkčnosti kódu používaly výstupy pro servopohony. Časovač PWM byl zprovozněn jako první a změnami rychlosti serva byl ověřován a signalizován výstup kódu.

Samotné testování probíhalo ze začátku mírně složitě. Původní sledovací algoritmy vůbec nefungovaly a bylo třeba ladit i funkce pro ovládání rychlostí servopohonů. Testování bylo náročné hlavně kvůli tomu, že bylo třeba sledovač zkoušet venku na polích, v bezpečné vzdálenosti od lidí a obydlí. Následná oprava kódu a analýza dat nemohla být prováděna na poli, takže testování bylo kvůli přesunům časově velmi náročné. Velikým pomocníkem při vývoji byl záznam dat přes USB rozhraní, které podle prvotních plánů nemělo být do sledovače implementováno. Nakonec se to však velmi vyplatilo.

Sledovač jako celek funguje a jeho výroba a vývoj se dají považovat za úspěšné. Není však bezchybný a určitě je pořád co vylepšovat. Hlavním prvkem, který by si zasloužil vylepšení, jsou přijímací moduly RX5808. Tyto přijímače jsou velice levné a vyrábějí se

v Číně. Z testování a vývoje vyplynulo, že pro takto citlivou analogovou technologii není rozumné používat výrobky této kvality. Nepřesnost těchto modulů demonstruje samotná potřeba jejich kalibrace v programu. Při plném signálu bez kalibrace je napěťová úroveň (indikace RSSI) u každého modulu jiná. Odchyłky mohou být až 10%. Kvůli tomu se může při aktivním sledování stát, že modul zkreslí některý ze signálů a sledovač se potom může chovat nepředvídatelně.

Pokud by měl být sledovač bezchybný a dokonalý, určitě by stálo za to zaměřit se na přijímací moduly – buďto pořídit kvalitnější nebo zvážit vývoj vlastních. Kromě přijímacího modulu by stálo za to vybavit sledovač kvalitnějšími anténami a zvážit, jestli to mají být šroubovicové antény (lze je nahradit jinými směrovými anténami s širším vyzařovacím úhlem). Nebylo by od věci také antény vybavit nějakým servopohonem, který by měnil úhel, který mezi sebou navzájem svírají. Tím by se dalo docílit větší přesnosti.

Pokud bychom chtěli anténní sledovač posunout na úplně jinou úroveň, bylo by třeba do sledovače implementovat vyhodnocování GPS souřadnic. Toto vylepšení by však vyžadovalo vývoj komunikačního protokolu pro posílání GPS souřadnic mezi zdrojem signálu (dronem) a sledovačem. Rozhodně by tak byl sledovač nejpřesnější a nejspolehlivější.

## Citovaná literatura

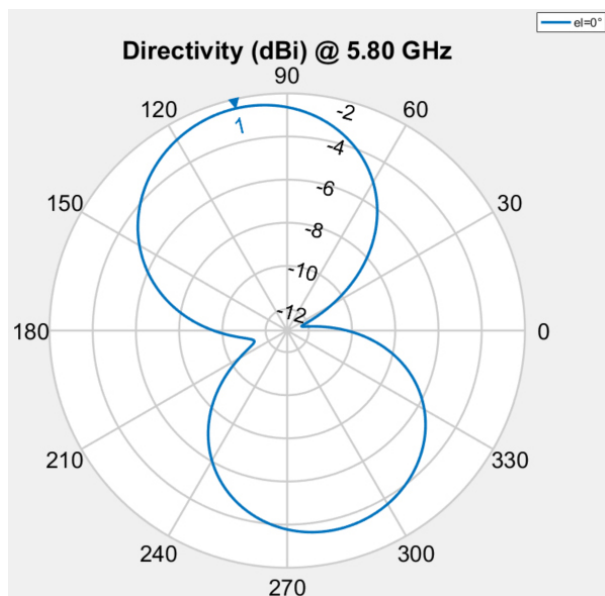
- [1] PROCHÁZKA, Miroslav. Antény: encyklopedická příručka. 3., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-166-7.
- [2] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. Moderní radiotechnika. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- [3] ŽALUD, Václav. Moderní radioelektronika. Praha: BEN - technická literatura, 2000. ISBN 80-86056-47-3.
- [4] STARR, Arthur Tisso. Radiotechnika velmi krátkých vln: určeno inž. z oboru velmi krátkých vln a stud. vys. škol. Praha: SNTL, 1962. ISBN 04-516-62
- [5] NOVÁČEK, Zdeněk. Antény a šíření rádiových vln: cvičení a projekty. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2195-9.
- [6] MATUSZCZYK, Jacek. Antény prakticky. 3. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-178-0.
- [7] PINKER, Jiří. Mikroprocesory a mikropočítače. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-110-1.
- [8] LIČEV, Lačezar a David MORKEŠ. Procesory. Brno: Computer Press, 1999. Hardware (Computer Press). ISBN 80-7226-172-X.
- [9] BRTNÍK, Bohumil a David MATOUŠEK. Mikroprocesorová technika: [práce s mikrokontroléry řady ATMEL AVR ATXmega A4]. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-406-4.
- [10] RichWave, „RTC6715 CMOS 5.8G Band FM Receiver,“ 2. 5. 2019. [Online]. Dostupné z: <https://opendevices.ru/wp-content/uploads/2015/02/7058r.pdf>.
- [11] Boscam, „Banggood Online Shopping,“ Boscam company, 2. 5. 2019. [Online]. Dostupné z: <https://www.banggood.com/FPV-Wireless-Audio-Video-Receiving-Module-RX5808-Receiver-p-84775.html>.

- [12] SKALICKÝ, Jiří. Elektrické servopohony. Brno: PC-DIR Real, 1999. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1484-7.
- [13] Altium Limited, „Altium Designer,“ Altium Limited, 26 5 2019. [Online]. Dostupné z: <https://www.altium.com/altium-designer/>.
- [14] ZÁHLAVA, Vít. Metodika návrhu plošných spojů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02193-9.
- [15] HAMMERBAUER, Jiří. Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-411-5.
- [16] FTDI Chip, „FT232R,“ FTDI Chip, 28 5 2019. [Online]. Dostupné z: <https://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232R.htm>.
- [17] ÚCL, „Informace související s provozem bezpilotních letadel a modelů letadel,“ Úřad pro civilní letectví, 5 6 2019. [Online]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/informace-souvisejici-s-provozem-bezpilotnich-letadel-a-1>.

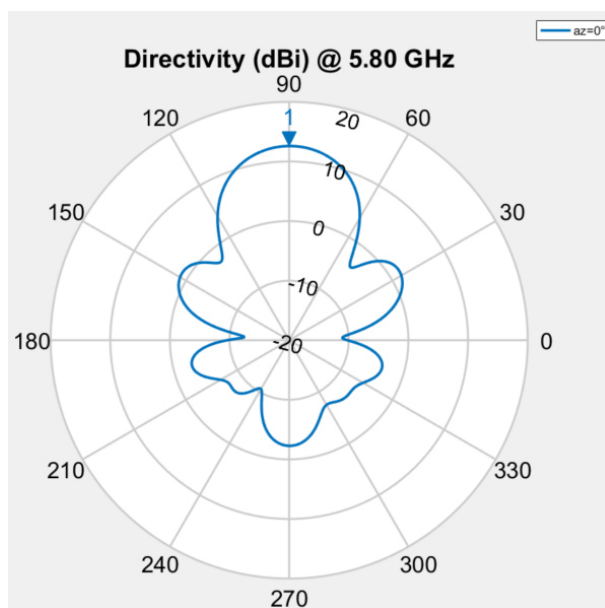
## Přílohy

### Příloha A – Výpočet a zobrazení vyzářovací charakteristiky použitých šroubovicových antén v programu Matlab

```
hx=helix('Radius', 9.5e-3, 'Width', 1e-3, 'Turns', 6.5, 'Spacing', 12.5e-3,  
'GroundPlaneRadius', 0.02);  
%show(hx);  
pattern(hx, 5.8e9);  
%patternAzimuth(hx, 5.8e9);  
%patternElevation(hx, 5.8e9);
```



Obrázek 33: Horizontální vyzářovací charakteristika použité šroubovicové antény



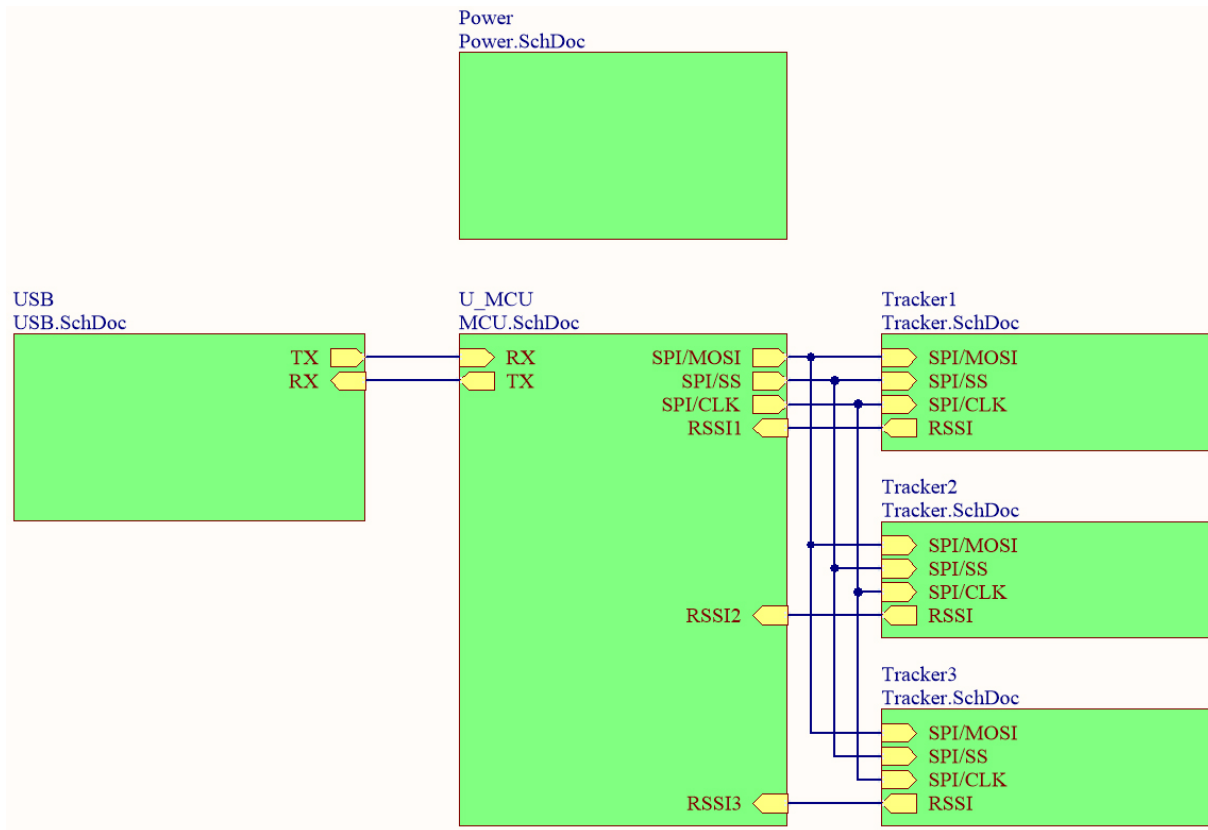
Obrázek 34: Vertikální vyzářovací charakteristika použité šroubovicové antény

## Příloha B – seznam použitých součástek na výrobu DPS

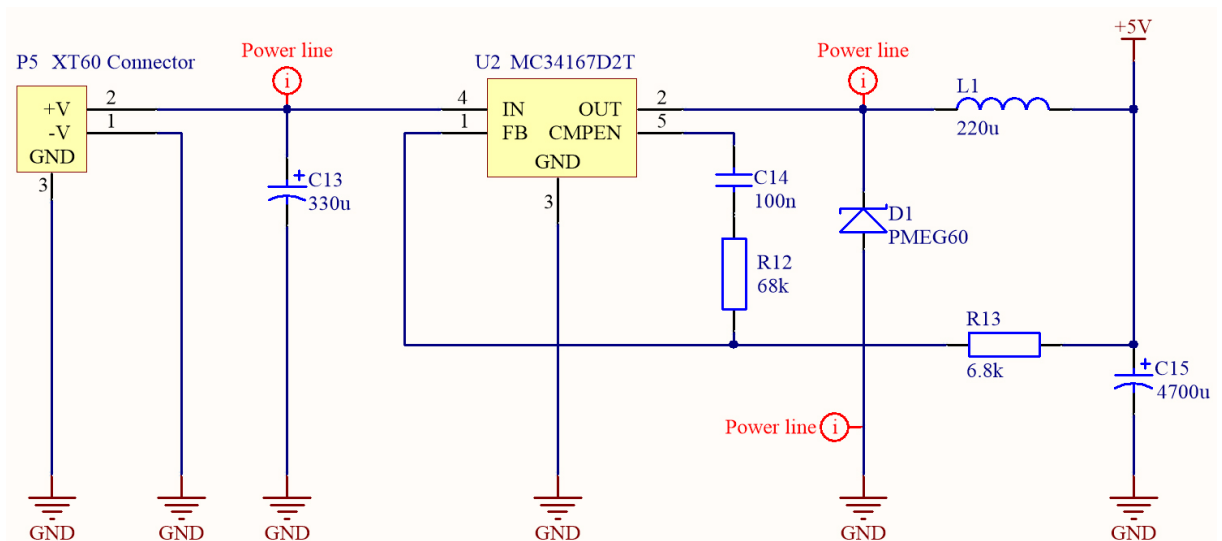
Tabulka 2: Seznam použitých součástek

Description	Quantity	Comment	Cena	Distributor	Obj.cislo
Resistor	3	6.8k	0,31 Kč	Farnell	2447715
Resistor	4	150	0,86 Kč	Farnell	1469877
Capacitor	2	18p	3,75 Kč	Farnell	2280674
Tactile Switch	5	Switch	4,83 Kč	Farnell	2320087
USB UART As. Serial Data Chip	1	FT232RL	90,14 Kč	Farnell	1146032RL
LED diode	5	Anode	7,9 Kč - 33,9 Kč	Farnell	1686099,...
Mini USB Type B	1	Mini USB B	22,93 Kč	Farnell	2313554
Resistor	1	1M	0,29 Kč	Farnell	9333746
Schottky diode	1	PMEG60	13,89 Kč	Farnell	2901050
NXP 8 Bit Microcontroller	1	MC9S08MP16	82,95 Kč	Farnell	1784750
Polarised capacitor	1	330u	18,00 Kč	Farnell	9695796
Polarised capacitor	1	4700u	62,40 Kč	Farnell	2326361
Resistor	1	75	1,32 Kč	Farnell	2057680
Crystal Oscillator	1	8MHz	16,10 Kč	Farnell	1842347
Polarised capacitor	2	10u	4,70 Kč	Farnell	2466348
Capacitor	16	100n	1,42 Kč	Farnell	2534051
Resistor	1	68k	1,00 Kč	Farnell	9237852
Resistor	5	100k	0,24 Kč	Farnell	2421937
Resistor	1	4.7k	0,82 Kč	Farnell	9234098
Resistor	1	10k	2,49 Kč	Farnell	1500664
Power inductor	1	220u	74,36 Kč	Mouser	580-60B224C
Switching Regulator	1	MC34167D2T	81,00 Kč	Mouser	863-MC34167D2T
RX5808 PCB layout with pins	3	RX5808	207,51 Kč	Banggood	
Header 1x3	2	Header 1x3	8,86 Kč	TME	825433-3
Header 2x3	1	Header 2x3	6,42 Kč	TME	20021111
1x16 PIN header for LED display	1	Header 1x16	3,00 Kč	TME	ZL201-16G
PCB pad s dutinkovou listou	3	Part of PCB layer	1,47 Kč	TME	ZL262-3SG
XT60 PCB connector	1	XT60 Connector	16,00 Kč	TME	XT60PW-M

## Příloha C – Kompletní schéma zapojení MCU



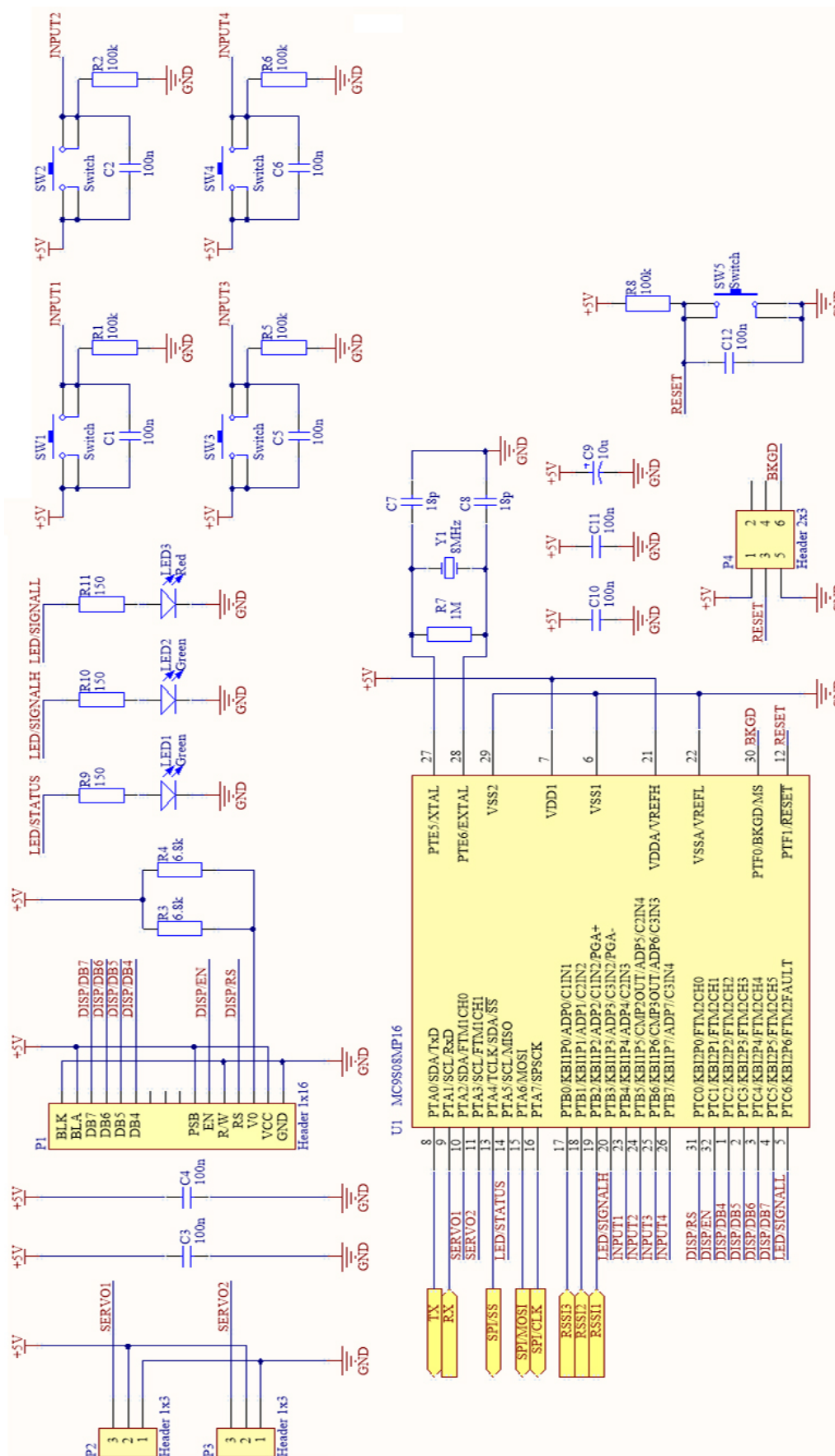
Obrázek 35: Hlavní schéma zapojení



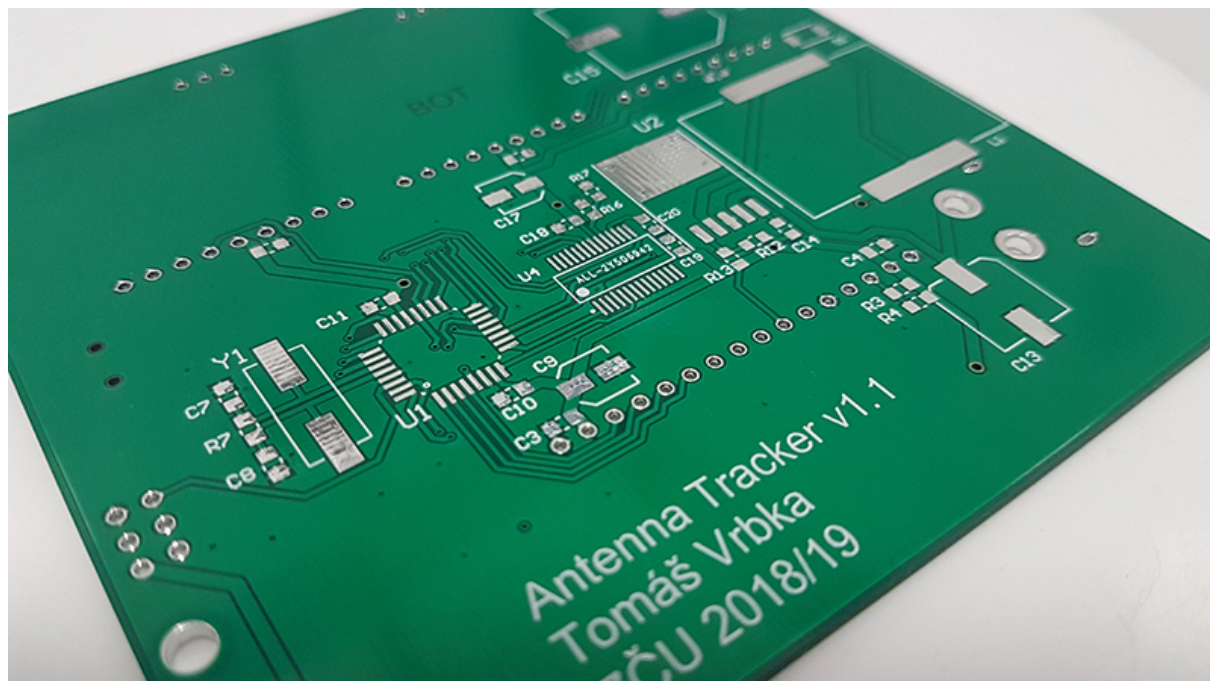
Obrázek 36: Schéma zapojení napájení - Power.SchDoc



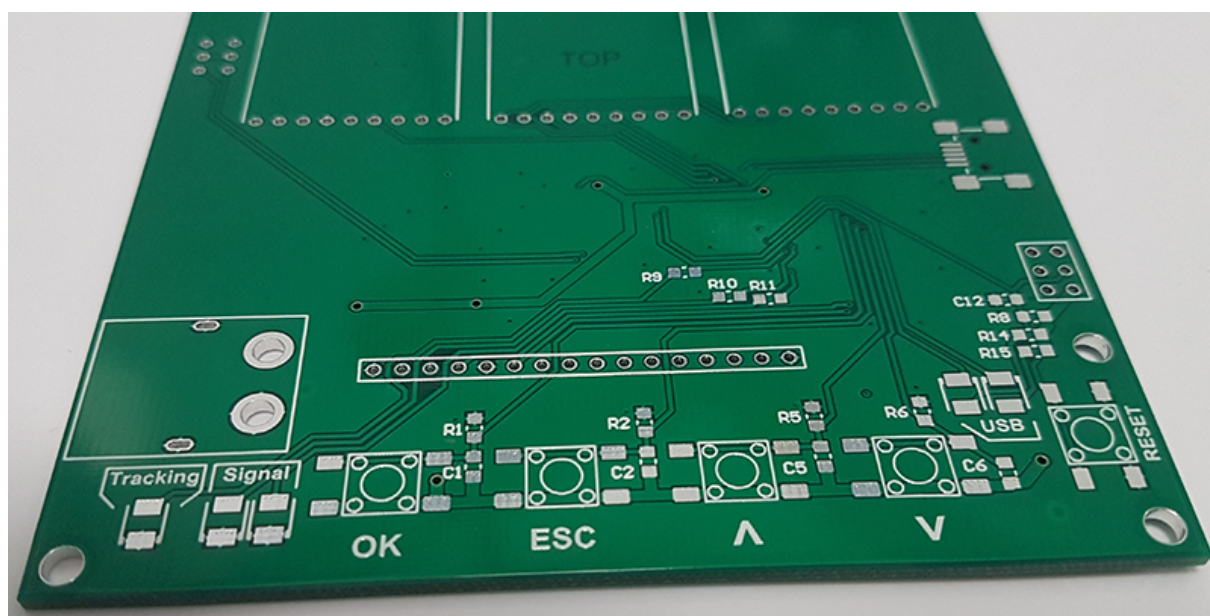




## Příloha D – Fotografie DPS z výroby



Obrázek 40: Fotografie spodní strany DPS



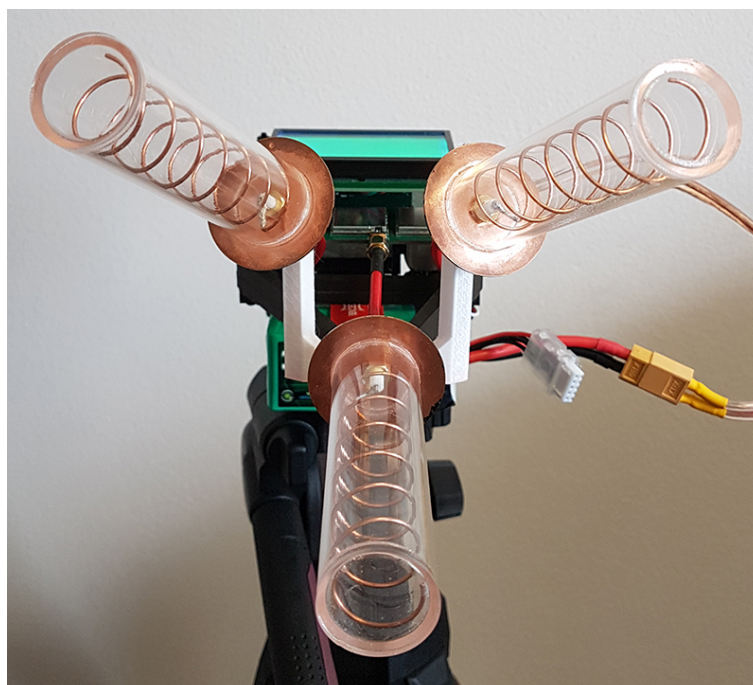
Obrázek 41: Fotografie horní strany DPS



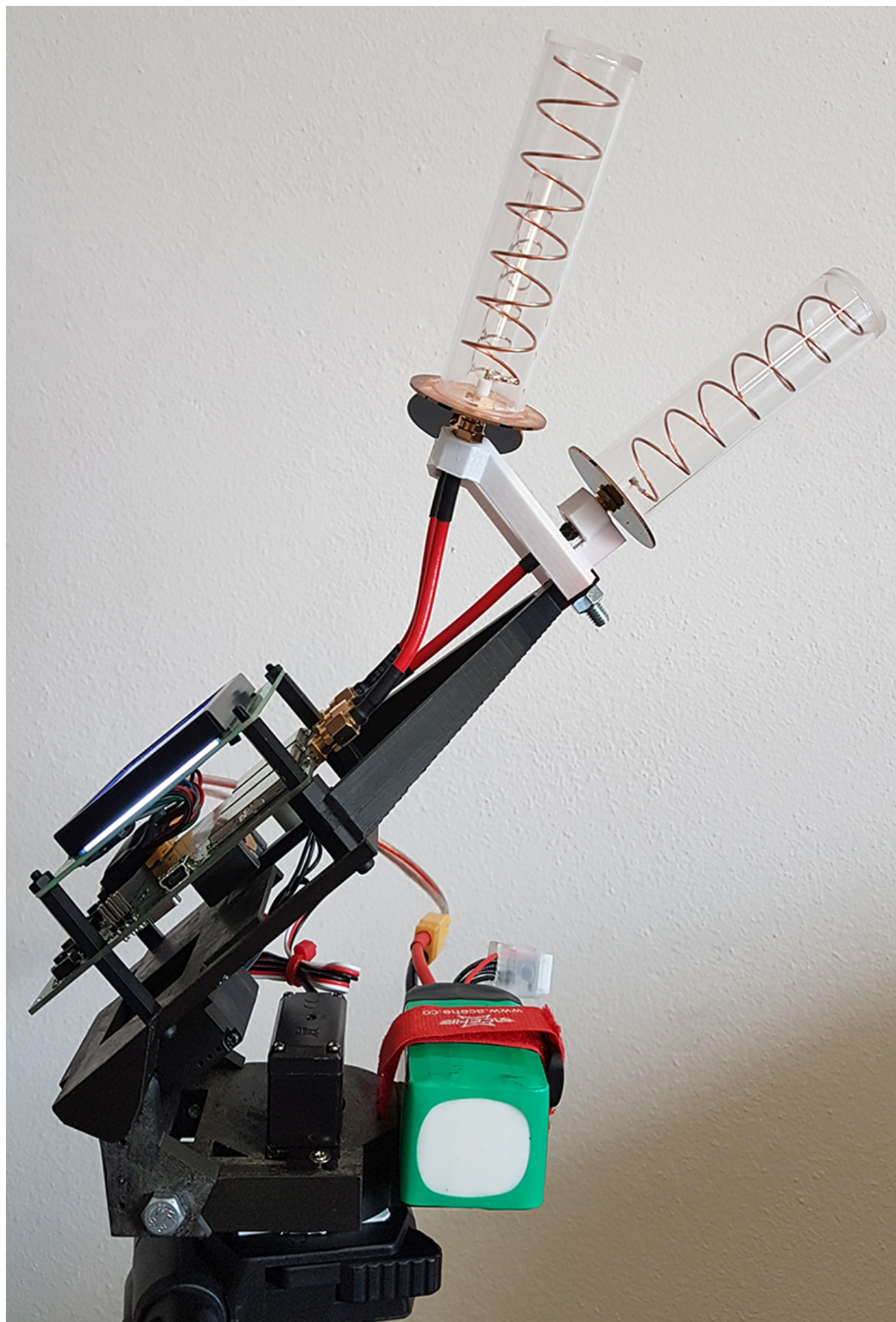
## Příloha E – Fotografie sestaveného anténního sledovače



Obrázek 42: Fotografie uživatelského rozhraní sledovače



Obrázek 43: Fotografie antén sledovače



Obrázek 44: Fotografie sledovače z boku

**Příloha F – CD obsahující projekt z návrhového programu Altium, projekt z vývojového prostředí CodeWarrior, celý text práce v elektronické podobě a vybrané katalogy k použitým součástkám**