



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ČTYŘNÁSOBNÝ AKTIVNÍ ANTÉNNÍ PŘEPÍNAČ PRO PŘÍJEM DRUŽIC V UHF PÁSMU

FOUR CHANNEL ACTIVE ANTENNA SWITCH FOR UHF BAND SATELLITE RECEPTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Kubeš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Václav Kubeš

ID: 240644

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Čtyřnásobný aktivní anténní přepínač pro příjem družic v UHF pásmu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s konstrukcí předzesilovačů a přepínačů v pásmu UHF. Navrhněte zapojení předzesilovače a čtyřnásobného přepínače s filtrací, vzdáleným ovládáním a diagnostikou. Vytvořte kompletní schéma zapojení a desku plošných spojů.

Navržené zapojení realizujte a ověřte měřeními vysokofrekvenční parametry konstrukce. Vytvořte potřebný fw pro ovládání přepínače a jeho diagnostiku. Pro řídicí počítač vytvořte vhodný ovladač, který bude dle predikčního SW přepínat přijímací kanály.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] POZAR, David M. Microwave engineering. 4th ed. United States of America: John Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-63155-3.

[2] SÝKORA, Jan. Vnější část přijímacího systému družicových signálů v pásmu UHF. Brno, 2020, 65 s.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

Termín zadání: 16.2.2024

Termín odevzdání: 27.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a realizovat komplexní zařízení známé jako anténní přepínač, umožňující v danou chvíli přijímat z družic vysokofrekvenční signál v UHF pásmu jednou z pěti směrových antén. Při vhodném výběru antén má být toto zařízení alternativou k motorizovaným směrovým anténám, používaným k příjmu družicového signálu. Zařízení je schopno pomocí dat o poloze družice určit správné pořadí přepínání antén. Dále je schopno vybraný vysokofrekvenční signál filtrovat a zesílit pro další přenos po koaxiálním kabelu k přijímači. Přepínač je řízen mikrokontrolerem ATmega328PB, který zajišťuje samotné ovládání integrovaného přepínacího prvku, jednoduchou proudovou a teplotní diagnostiku a obousměrnou komunikaci s řídicím počítačem pomocí protokolu UART po fyzické vrstvě sběrnice LIN. Celé zařízení se skládá z vnější jednotky, jež má být umístěna v blízkosti antén a zajišťuje samotné přepínání a vnitřní jednotky umístěné uvnitř budovy, zajišťující přívod napájení a rozdělení duplexovaných signálů. Uživatel může zobrazovat diagnostická data a ovládat vnější jednotku pomocí programu s grafickým rozhraním.

KLÍČOVÁ SLOVA

anténní přepínač, vysokofrekvenční přepínač, UHF, vysokofrekvenční obvod, ATmega328PB, anténa, družice

ABSTRACT

The goal of this bachelor's thesis is to design and implement a complex device known as an antenna switch, which allows receiving a high-frequency signal in the UHF band from satellites via one of five directional antennas at a given time. With a suitable choice of antennas, this device is to be an alternative to motorized directional antennas used for satellite signal reception. The device is able to determine the correct antenna switching order using satellite position data. It is also able to filter and amplify the selected high-frequency signal for further transmission via coaxial cable to the receiver. The switch is controlled by an ATmega328PB microcontroller, which ensures the control of the integrated switching element itself, simple current and temperature diagnostics, and bidirectional communication with the control computer using the UART protocol over the LIN bus physical layer. The whole device consists of an external unit, which is to be placed near the antennas and ensures the switching itself, and an internal unit placed inside the building, which ensures the power supply and the distribution of duplexed signals. The user can display diagnostic data and control the external unit using a program with a graphical interface.

KEYWORDS

antenna switch, RF switch, UHF, RF circuit, ATmega328PB, antenna, satellite

KUBEŠ, Václav. *Čtyřnásobný aktivní anténní přepínač pro příjem družic v UHF pásmu*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2024. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Václav Kubeš
VUT ID autora: 240644
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Čtyřnásobný aktivní anténní přepínač pro příjem družic v UHF pásmu

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomáši Urbanci, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Ideový návrh přepínače	13
2 Přepínací prvek	15
2.1 Základní vlastnosti přepínačů	15
2.2 Dělení přepínačů	16
2.2.1 Mechanické přepínače	16
2.2.2 Polovodičové přepínače	18
2.3 Výběr vhodného přepínacího prvku	19
3 Použité komponenty a jejich funkce	22
3.1 Mikrokontroler	22
3.1.1 ATmega328PB	22
3.2 Teplotní senzor	24
3.2.1 MCP9808	24
3.3 Sběrnice LIN	24
3.3.1 LIN transceiver TJA1020	25
3.4 Elektronický kompas	26
3.4.1 Modul elektronického kompasu HMC5883L	26
3.5 Vysokofrekvenční předzesilovač	27
3.5.1 Vysokofrekvenční monolitický zesilovač PGA-103+	28
3.6 Měření napájecího proudu VF zesilovačů	29
3.6.1 Integrovaný obvod diferenčního zesilovače INA180A1	30
3.7 Napájení vnější jednotky přepínače a jednotlivých VF zesilovačů	30
3.7.1 Spínací unipolární tranzistor SSM3J355R	30
3.7.2 Napěťový regulátor	31
4 Návrh zapojení přepínače	33
4.1 Zapojení mikrokontroleru ATmega328PB	33
4.2 Řízení přepínání VF signálu	34
4.3 Zapojení ostatních IO a spínání napájení VF zesilovačů	35
4.4 Chlazení napěťového regulátoru LM2940	36
4.5 Vysokofrekvenční část zapojení	37
4.6 Rozdíly mezi dvěma variantami osazení vnější jednotky	41
4.7 Zapojení vnitřní jednotky	42

5	Řídicí program pro uživatelův počítač	43
5.1	Požadované funkce programu	43
5.2	Popis grafického rozhraní	43
5.3	Předávání informací o poloze družice z aplikace Orbitron	46
5.4	Sériová komunikace s vnější jednotkou	46
5.5	Funkce automatického přepínání antén	48
6	Firmware pro mikrokontroler vnější jednotky	49
6.1	Hlavní smyčka programu	49
6.2	Měření proudu do LNA a fantomového napájecího napětí	51
6.3	Měření teploty a azimutu	51
6.4	Sériová komunikace a periferie UART	52
7	Změřené vysokofrekvenční parametry	53
7.1	Vstupní rezonanční obvod s LNA	53
7.2	Změřené S parametry vnější jednotky	54
7.3	Změřené S parametry vnitřní jednotky	55
	Závěr	58
	Literatura	60
	Seznam symbolů a zkratk	68
	Seznam příloh	70
A	Blokové schéma vnější jednotky přepínače	71
B	Schéma zapojení a deska plošných vnější jednotky	72
B.1	Schémata zapojení	72
B.2	Deska plošných spojů	75
C	Schéma a deska plošných spojů vnitřní jednotky	77
C.1	Schémata zapojení	77
C.2	Deska plošných spojů	78
D	Fotodokumentace	80
E	Obsah elektronické přílohy	82

Seznam obrázků

1.1	Zjednodušené blokové schéma vnější jednotky pětinasobného aktivního anténního přepínače s diagnostikou	14
2.1	Vysokofrekvenční relé od společnosti Omron [64]	17
2.2	Pohled na miniaturní mechanismus MEMS spínače s rozměry ve stovkách mikrometrů [34]	17
2.3	Základní zapojení PIN diody ve funkci VF spínače [30]	18
2.4	Blokové schéma a rozložení pinů AS195-306LF [29]	21
3.1	Využití pinů ATmega328PB pro řízení vnější jednotky	23
3.2	Typické zapojení integrovaného obvodu TJA1020 [26]	26
3.3	Modul elektronického kompasu HMC5883L [42]	27
4.1	Vstupní část vnější jednotky	38
4.2	Výsledné šumové číslo kaskády s jedním LNA	39
4.3	Výsledné šumové číslo kaskády s dvěma LNA	39
4.4	Výsledky simulace diplexeru v OrCad PSpice	40
4.5	Dvě varianty zapojení diplexeru	41
5.1	Hlavní okno řídicího programu	44
5.2	Určení azimutu antény	45
5.3	Určení antény podle polohy satelitu	48
6.1	Vývojový diagram firmwaru	50
7.1	Změřené S parametry vstupního rezonančního obvodu s LNA	54
7.2	Změřené S parametry vstupního rezonančního obvodu s LNA	55
7.3	Změřené S parametry GPS větve UHF/GPS diplexeru vnitřní jednotky, port 1 - společný vstup, port 2 - GPS výstup, UHF větev zakončena 50Ω	56
7.4	Změřené S parametry UHF (435 MHz) větve UHF/GPS diplexeru vnitřní jednotky, port 1 - společný vstup, port 2 - UHF výstup, GPS větev zakončena 50Ω	56
7.5	Změřené S parametry UHF (435 MHz) větve UHF/LIN diplexeru vnitřní jednotky, port 1 - společný vstup, port 2 - UHF výstup, LIN větev nepřizpůsobena	57
A.1	Blokové schéma zapojení vnější jednotky navrženého anténního přepínače (červeně je vyznačena vysokofrekvenční část, zelenou barvou je vyznačeno napájení, černě je vyznačeno řízení a nízkofrekvenční část zapojení	71
B.1	Zapojení diplexeru vnější jednotky pro variantu osazení A a B	72
B.2	Vysokofrekvenční část se zesilovači s řízeným napájením, přepínacím prvkem a stabilizátorem napětí	73

B.3	Zapojení mikrokontroleru s ostatními integrovanými obvody	74
B.4	Navržená deska plošného spoje pro vnější jednotku - horní vrstva ("top"), rozměry 160x114 mm	75
B.5	Navržená deska plošného spoje pro vnější jednotku - spodní vrstva ("bottom"), rozměry 160x114 mm	75
B.6	Navržená deska plošného spoje pro vnější jednotku přepínače	76
C.1	Diplexer UHF/GPS s výhybkou pro fantomové napájení a UHF/LIN	77
C.2	Převodník USB/UART s LIN transceiverem	77
C.3	Návrh desky plošných spojů pro vnitřní jednotku - horní strana ("top"), rozměry 146x46 mm	78
C.4	Návrh desky plošných spojů pro vnitřní jednotku - spodní strana ("bottom"), rozměry 146x46 mm	78
C.5	Návrh desky plošných spojů vnitřní jednotky	79
D.1	Vnější jednotka osazená jako varianta A	80
D.2	Vnější jednotka osazená jako varianta A	80
D.3	Vnější jednotka osazená jako varianta B (pro účely testování byla osazena pouze stabilizátorem napětí, signalizačními LED u každého řídicího signálu pro jednotlivé anténní vstupy a diferenčním zesilovačem INA180A1 a teplotním senzorem MCP9808)	81
D.4	Vnitřní jednotka	81

Seznam tabulek

2.1	Seznam VF přepínačů vyhovujících požadavkům	20
3.1	Tabulka základních parametrů ATmega328PB [40]	23
3.2	Tabulka základních parametrů MCP9808 [41]	24
3.3	Parametry vybraných monolitických VF zesilovačů	28
3.4	Tabulka základních parametrů vybraného P-MOSFETu [63]	31
5.1	Tabulka sériových příkazů a odpovědí na ně	47
7.1	Tabulka změřených a použitých kapacit ve vstupním rezonančním obvodu	53

Úvod

V posledních desetiletích docházelo a stále dochází k překotnému vývoji bezdrátové komunikace. Její možnosti využití jsou totiž obrovské. Kaskáda elektronických zařízení, které bezdrátovou komunikaci umožňují je velmi dlouhá, ale mezi její nejzákladnější stavební bloky můžeme zařadit anténu, bez které by nebylo možné signál vysílat a přijímat a anténní přepínač. Ten umožňuje vybírat, ze které antény bude signál přijímán, anebo z jaké antény bude signál vysílán. To je zvláště v dnešní době velmi žádaná funkce, které je využíváno například v mobilních telefonech s WiFi a Bluetooth konektivitou, kdy je pro tyto dvě služby použita pouze jedna anténa s anténním přepínačem, což výrazným způsobem zjednodušuje miniaturizaci rozměrů výsledného zařízení.

V případě této bakalářské práce má být navrhnout anténní přepínač, který bude umožňovat příjem signálu z družice, která se pohybuje na oběžné dráze. Pro kvalitní příjem signálu z družice je nutné, aby byly použity směrové antény. Navrhovaný anténní přepínač má sloužit k tomu, aby dle polohy družice na orbitě, automaticky přepínal příjem ze čtyř směrových antén tak, aby byl signál z družice přijímán nejvhodněji směrovanou anténou a bylo tak docíleno největšího zisku. Přijímaný signál je velmi slabý, a proto výsledné zařízení obsahuje vysokofrekvenční předzesilovače. Zároveň umožňuje uživateli jednoduchou diagnostiku správné funkčnosti.

První část práce se zabývá vytvořením ideového návrhu přepínače na základě požadavků. Druhá část se zabývá druhy a výběrem samotného přepínacího prvku, který je základem navrhovaného zařízení. Na ni navazuje další část, která se věnuje výběru vhodných komponent na základě ideového návrhu vytvořeného v první části. Čtvrtá část se pak zabývá návrhem schématu zapojení výsledného zařízení a návrhem desky plošných spojů pro následnou výrobu.

Pátá kapitola popisuje vytvořený uživatelský program s grafickým rozhraním pro řízení přepínače a šestá část shrnuje funkce naprogramovaného firmwaru pro mikrokontroler. Poslední sedmá kapitola uvádí změřené vysokofrekvenční charakteristiky výsledného zařízení.

1 Ideový návrh přepínače

Tato část se zabývá obecným návrhem zařízení přepínače na základě požadavků zadání. Je zde také uvedeno blokové schéma navrhovaného přepínače pro lepší přehlednost.

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem čtyřnásobného aktivního anténního přepínače pro příjem družic v UHF pásmu. Výsledné zařízení tedy nebude sloužit pouze k přepínání přijímaných vysokofrekvenčních družicových signálů, bude také zajišťovat jejich předzesílení. S tím je také spjat požadavek na odfiltrování nežádoucích frekvenčních pásem. Přepínání má být možno ovládat vzdáleně z uživatelova počítače. Také je požadována možnost jednoduché diagnostiky výsledného zařízení. To má umožnit kontrolovat správnost fungování a odhalit případnou poruchu, aniž by bylo nutné zařízení odmontovat a ručně proměřovat. Pro přenos diagnostických a řídicích dat musí být mezi výsledným zařízením a přepínačem zajištěna komunikace. I přes všechny tyto rozšiřující funkce je dále v textu výsledné zařízení nazýváno přepínačem a jeho část, která fyzicky zajišťuje přepínání signálu je nazývána přepínacím prvkem. Výsledné zařízení se skládá z vnější jednotky, jež má být umístěna v blízkosti antén a zajišťuje samotné přepínání a vnitřní jednotky umístěné uvnitř budovy, zajišťující přívod napájení a rozdělení duplexovaných signálů.

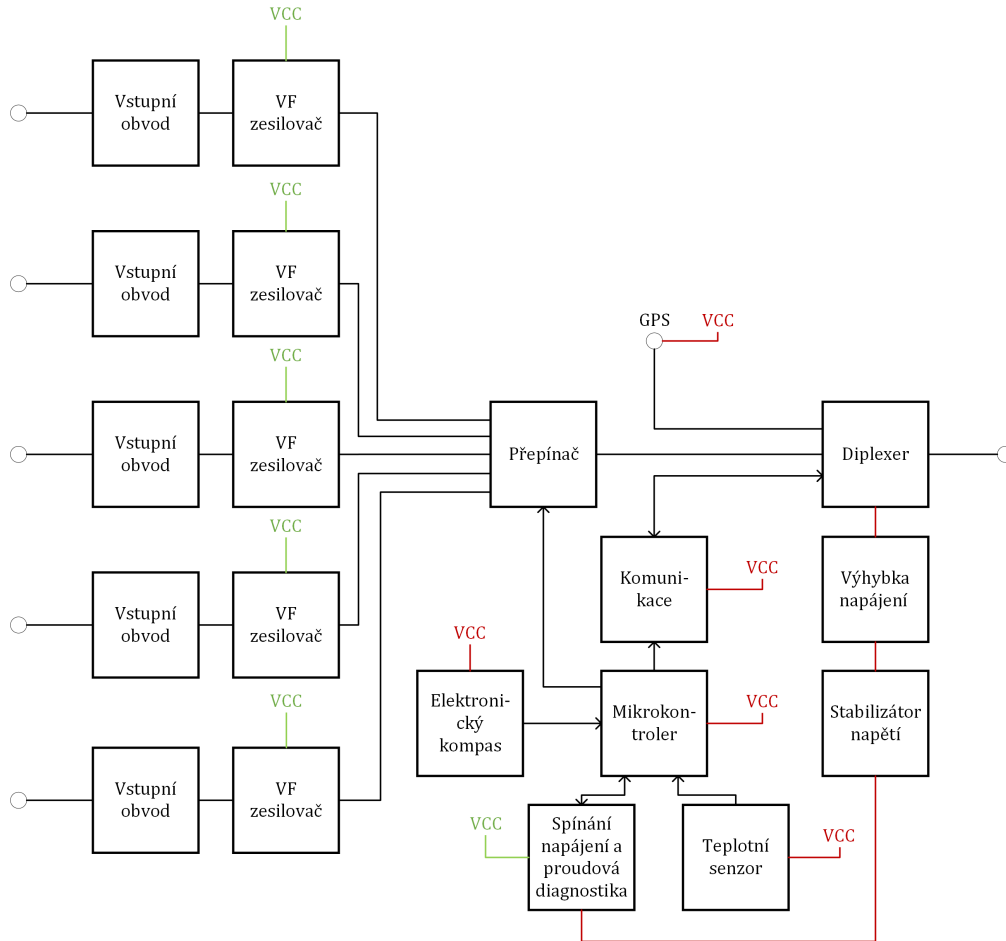
Předpokládaná frekvence příjmu se pohybuje okolo 435 MHz. Tato frekvence se nachází v pásmu, které je, mimo jiné, vyhrazeno pro komunikaci s malými družicemi [56]. Všechny části přepínače tedy musí být přizpůsobeny pro tuto frekvenci. Vstupní obvod a předzesilovače již byly použity v bakalářské práci *Vnější část přijímacího systému družicových signálů v pásmu UHF* [21] a odtud byly také převzaty. Filtrování signálu je zajištěno SAW filtrem.

Diagnostika je prováděna měřením proudu, tekoucího do zesilovačů, přiváděného fantomového napětí a měřením teploty. Na přepínači je také umístěn modul elektronického kompasu, pro případné automatické určení pořadí spínání antén na základě jejich prostorové orientace nebo určení, zda vlivem povětrnostních podmínek nedošlo k její změně. Pro komunikaci mezi přepínačem a počítačem uživatele byla zvolena asynchronní sériová komunikace, která je zprostředkována fyzickou vrstvou sběrnice LIN. Pro snížení velikosti přepínačem odebíraného proudu, dochází ke spínání napájení jednotlivých VF zesilovačů.

Přepínač byl oproti zadání rozšířen o možnost připojit pátou anténu, což má zvýšit flexibilitu směrů, ze kterých bude možno signály přijímat. Z převzaté části zapojení je také zachována možnost připojit k vnější jednotce aktivní anténu GPS. I když se jedná o pětínásobný anténní přepínač, jedna anténa bude přijímat vertikální i horizontální polarizaci a je tedy nutné přepínat signály obou polarizací. To znamená zdvojnásobení počtu přepínaných signálů. Proto je přepínač navržen

tak, aby spojením vnější jednotky přepínající vertikální polarizaci a vnější jednotky přepínající horizontální polarizaci vznikl funkční celek s jedním řízením.

Ideový návrh vnější jednotky je zakreslen na blokovém schématu 1.1 znázorňujícím požadované funkce navrhovaného zařízení.



Obr. 1.1: Zjednodušené blokové schéma vnější jednotky pětinasobného aktivního anténního přepínače s diagnostikou

2 Přepínací prvek

Klíčovým prvkem navrhovaného zařízení je samotný přepínací prvek, jež má zajišťovat správné směřování vstupního vysokofrekvenčního signálu z jednoho nebo více vstupů na jeden nebo více výstupů. To je ve vysokofrekvenční technice častý požadavek, a tak je vysokofrekvenční přepínač jedním ze základních stavebních bloků moderních vysokofrekvenčních systémů. Například může být v rámci miniaturizace potřeba použít stejnou anténu k příjmu i vysílání [22] anebo jako v případě této práce, využívat k příjmu více antén.

2.1 Základní vlastnosti přepínačů

Základní vlastnosti přepínačů popisují jejich chování kritické pro spínání VF signálů. Umožňují nám vybrat vhodný přepínač, který bude nejvíce vyhovovat naší aplikaci. Nejzásadnějším parametrem je počet portů (vstupů/výstupů). Používá se obecného označování jako u jiných typů přepínačů, tedy $xPyT$, kde x značí počet vstupů a y počet výstupů (pokud x nebo $y = 1$ potom se využívá označení S z anglického slova *single* a pokud x nebo $y = 2$ potom je použito označení D z anglického *double*).

Důležitým parametrem, který musíme při výběru přepínače sledovat, je maximální vstupní vysokofrekvenční výkon. Ten určuje, jaký VF výkon signálu může přes spínač procházet, aniž by došlo k jeho poškození nebo ovlivnění jeho funkce vlivem přeměny energie, kterou signál nese, na teplo. Většinou se uvádí v decibelech nad miliwattem (dBm) nebo přímo ve wattech (W). Maximální VF výkon přepínače může záviset na frekvenci. Je tedy nutné zvážit i frekvenční rozsah signálu, který bude přepínán. Co se týče vztahu maximálního VF výkonu a rozměrů, i zde platí obecné pravidlo, že pokud je zapotřebí spínat velké výkony, bude přepínač prostoro- vě náročnější. Často je rozlišováno mezi tzv. *hot switching* a *cold switching*, kdy *hot switching* znamená, že spínáme již přivedený VF signál, zatímco *cold switching* znamená, že až po přepnutí je přiveden VF signál [4]. Může být také rozlišováno mezi středním výkonem a maximálním špičkovým výkonem.

Dalším důležitým parametrem je izolace. Říká, jak kvalitně jsou od sebe odděleny jednotlivé porty přepínače. Je žádoucí, aby byl při přepínání signál směřován tam, kam je potřeba a nebyl propuštěn i na ostatní porty. Podobně to platí při jednoduchém spínání, kdy chceme, aby byl signál na výstupu pouze pokud bude spínač sepnut. Uvádí se v decibelech a je určen tímto vztahem

$$I = -10 \log \left(\frac{P_{\text{out,off}}}{P_{\text{in}}} \right) \quad [\text{dB}]. \quad (2.1)$$

Kde $P_{\text{out,off}}$ je změřený výkon signálu při stavu spínače rozepnuto a P_{in} je vstupní výkon. Z definice vyplývá, že izolaci požadujeme co největší možnou.

Při průchodu signálu přepínačem vzniká z důvodů ztrát uvnitř přepínací struktury a odrazů útlum [11]. Vložný útlum je proto dalším parametrem, který musíme při výběru přepínače zohlednit. Uvádí se v decibelech (dB). Je vhodné vybrat přepínač s co nejmenším útlumem, aby byl všechen výkon signálu dopraven do cílové destinace ať už se jedná o přijímač nebo anténu. Malý útlum bude mít také pozitivní vliv na výsledné šumové číslo F kaskády, a to zvláště pokud se přepínač nachází v kaskádě v blízkosti vstupu signálu do kaskády [15].

Parametr S_{11} (uváděn v decibelech) nám u přepínače udává míru jeho impedančního přizpůsobení [43]. S_{11} má vliv na výkon přenesený ze zdroje do zátěže. Míru impedančního přizpůsobení lze také vyjádřit poměrem stojatých vln PSV (bezrozměrná jednotka). Parametr S_{11} je frekvenčně závislý. Naším cílem je vybrat přepínač jehož hodnota parametru S_{11} je co nejmenší. Pro PSV to znamená, aby se jeho hodnota co nejvíce blížila 1.

Při přepínání nedojde k přesměrování signálu okamžitě, ale samotný proces spínání trvá určitou dobu. Tato doba nejvíce závisí na samotném přepínacím mechanismu a většinou se pohybuje od jednotek mikrosekund až po jednotky milisekund. Proto je doba přepnutí důležitým faktorem při výběru vhodného přepínače. Další parametr, který velmi jasně rozlišuje druhy přepínačů a určuje tak směr dalšího výběru je životnost přepínače udávaná v počtech sepnutí.

Existuje celá řada dalších parametrů VF přepínačů, které mají vliv na jejich chování, nejsou ale pro tuto konkrétní aplikaci tak důležité a je na ně dáván důraz ve specifických případech a při použití v sofistikovanějších systémech. Proto jsou zde uvedeny bez detailnějšího popisu. Jedná se zejména o opakovatelnost informující o schopnosti opakovaně dosáhnout stejných vlastností při sepnutí [4], $IP3$ a bod jednodecibelové komprese, které informují o linearitě přepínacího prvku [1] a také spotřeba přepínače.

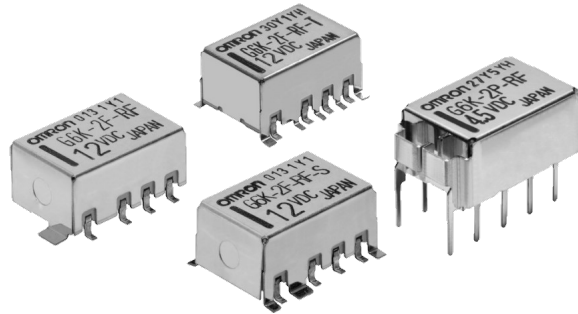
2.2 Dělení přepínačů

Přepínací prvky můžeme rozdělit dle principu fungování přepínacího mechanismu do dvou skupin z nichž má každá své výhody a nevýhody a je tudíž vhodná pro různé aplikace.

2.2.1 Mechanické přepínače

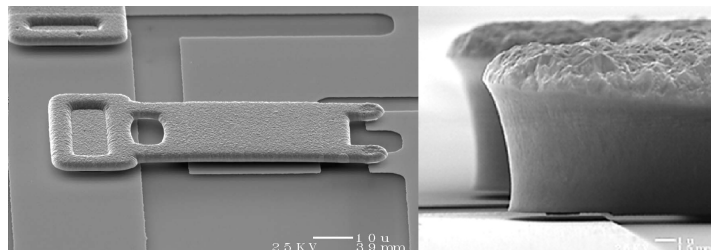
Při přepínání dochází k fyzickému pohybu přepínacích kontaktů. Zde můžeme zařadit ruční anténní přepínače, vysokofrekvenční přepínací relé nebo MEMS přepínače.

- **Vysokofrekvenční relé** má nezanedbatelné rozměry, které se u SMD provedení pohybují okolo 10x10x10 mm, ale běžnější jsou větší rozměry a případné použití v THT provedení. Mohou být schopny spínat i vyšší výkony a mají velkou hodnotu izolace často přes 100 dB a malý vložný útlum, který se pohybuje kolem nižších desetin decibelu. Jejich nevýhodou je pomalý přepínací čas v jednotkách až desítkách milisekund. Důležité je také zvážit konečnou životnost přepínacího mechanismu VF relé. Příklad vysokofrekvenčního relé, které vyrábí společnost Omron je na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Vysokofrekvenční relé od společnosti Omron [64]

- **MEMS spínače** jsou mnohem menší než VF relé. Jsou založeny na spínání miniaturním fyzickým mechanismem, který má sám rozměry v řádech mikrometrů. Vložný útlum i izolaci mají podobnou jako VF relé. Jejich maximální pracovní frekvence se pohybuje většinou kolem desítek gigahertzů, a i na takto vysokých frekvencích si udržují velmi malý útlum, izolaci a linearitu [3]. Mají velmi malou spotřebu a stejně jako VF relé jsou schopné spínat i stejnosměrná napětí. Jejich nevýhodou je v současné době vysoká pořizovací cena. Také je to konečná životnost spínacího mechanismu a pomalejší spínací časy delší než 30 μ s [15]. Příklad miniaturního spínacího mechanismu MEMS spínače je na obrázku 2.2.

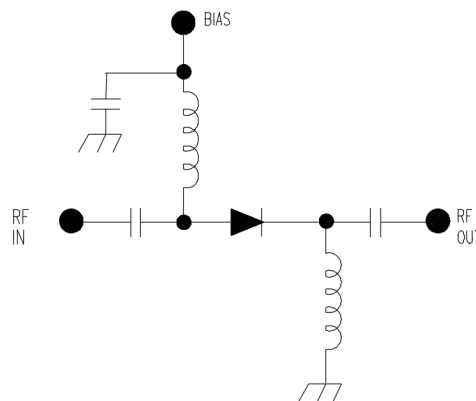


Obr. 2.2: Pohled na miniaturní mechanismus MEMS spínače s rozměry ve stovkách mikrometrů [34]

2.2.2 Polovodičové přepínače

Pro přepínání je zde využito vlastností polovodičů. Zejména jsou používány PIN diody a integrované obvody využívající unipolární tranzistory vyráběné technologií upravenou pro vysokofrekvenční aplikace.

- **PIN dioda** má podobnou strukturu jako klasická polovodičová dioda. Skládá se z polovodiče typu P a N. Mezi nimi je vložena oblast intrinzického polovodiče [15]. To způsobí zpomalení procesu rekombinace nosičů náboje a zároveň rozšíří depletiční oblast, což dodává PIN diodě speciální vlastnosti, které lze využít právě při spínání vysokofrekvenčních signálů. Po připojení stejnosměrného napětí v propustném směru se zaplní intrinzická část diody nosiči náboje a dioda začne propouštět vysokofrekvenční signál, zatímco při aplikaci záporného napětí se depletiční oblast rozšíří a vysokofrekvenční signál neprochází, protože kapacita přechodu je malá, což znamená velkou reaktanci. V sepnutém stavu PIN diodou protéká diodou proud většinou v rozmezí 10 – 30 mA a řídicí stejnosměrné napětí a vysokofrekvenční signál od sebe musí být odděleny tlumivkou a kondenzátorem [1]. Nevýhodou tedy je relativně vysoká spotřeba v sepnutém stavu a také požadavek na minimální frekvenci spínání signálu, která se typicky pohybuje kolem 100 MHz [6]. Rychlost spínání se typicky pohybuje okolo 1 až 10 μs , ale vhodným návrhem lze dosáhnout i vyšších rychlostí [1]. Izolace je z principu funkce PIN diody závislá na frekvenci signálu a je nižší na vyšších frekvencích [3]. Vložný útlum v sepnutém stavu se většinou pohybuje v rozmezí kolem 0,1 – 0,8 dB [15]. Existuje více možností zapojení přepínačů s PIN diodami (nejzákladnější je na obrázku 2.3) zahrnující zapojení PIN diod v sérii, paralelně se zátěží nebo zapojení s čtvrtvlnným vedením, které využívá jeho schopnosti transformovat impedanci [30].



Obr. 2.3: Základní zapojení PIN diody ve funkci VF spínače [30]

- **Integrované přepínací obvody** využívají k přepínání unipolárních tranzistorů. Ty jsou pro dosažení co nejlepších VF vlastností vyráběny z různých materiálů a různými technologiemi, kterými se liší od klasických unipolárních tranzistorů určených pro nízké frekvence. Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu integrovaných vysokofrekvenčních obvodů, a tedy i přepínačů, je arsenid galia (GsAs). Velkou výhodou integrovaných přepínačů je jednoduchost ovládání, velmi malá spotřeba a také zjednodušení návrhu obvodu, protože nevyžadují ke správné funkci velké množství součástek na rozdíl od přepínačů s PIN diodami. Jednoduše jde s mini dosáhnout velké variability co se týče počtu přepínaných vstupů a výstupů. Většinou zvládají spínat i nízké frekvence, často i stejnosměrné napětí. Izolace je sice závislá na frekvenci, ale ne tolik jako u PIN diod. U nižších frekvencí se pohybuje okolo 80 dB a na vyšších frekvencích je nižší asi kolem 40 dB [14]. Mají krátké spínací časy v řádech mikrosekund až nanosekund a vložný útlum většinou kolem 0,5 až 2 dB [18], ale vzhledem k jejich malým rozměrům nejsou schopny spínat větší výkony. Vyrábí se ve dvou architekturách jako reflektivní a absorpční. U absorpčních přepínačů jsou neseprnuté porty zakončeny zakončovací impedancí (většinou 50 Ω) a nedochází tak k případným odrazům signálu. U reflektivních spínačů je neseprnutý port zakončen vysokou impedancí (tedy „na prázdkno“) a představuje tak impedanční nepřizpůsobení, což vede při přítomnosti signálu k odrazům [14].

2.3 Výběr vhodného přepínacího prvku

Přepínač je potřeba v konfiguraci ST5P, jak vyplývá z požadavků zadání. Za předpokladu, že družice vzdálená 300 km vysílá půlvlnným dipólem (zisk G_T je 2,15 dB) signál o frekvenci f 435 MHz a výkonu P_T 30 dBm a je přijímán půlvlnným dipólem (zisk G_R je 2,15 dB). Zesílení zesilovače G_{amp} se bude pohybovat okolo 20 dB. Pak můžeme vypočítat po určení útlumu volného prostoru výsledný přijatý výkon užitečného signálu (rychlost světla c předpokládáme $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$). Útlum volného prostoru je tedy [13]

$$\begin{aligned}
 L_{f_{dB}} &= 10 \log \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2 = \\
 &= 10 \log \left(\frac{4\pi \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 435 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \right)^2 = \\
 &= 134,8 \text{ dB},
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

potom výsledný přijatý výkon po zesílení je [13]

$$\begin{aligned}
 P_{R_{dBm}} &= P_T + G_T - L_f + G_R + G_{amp} = \\
 &= 30 + 2,15 - 134,8 + 2,15 + 20 \\
 &= -80,5 \text{ dBm}.
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Tato výkonová úroveň je velmi malá a s jejím spínáním nebude mít problém žádný typ přepínače. Je ale potřeba dát pozor na jiné frekvenčně blízké signály, které mohou být silnější a po jejich zesílení může být překročen bod P_{1dB} .

Řídicí napětí přepínače musí být alespoň 5 V, protože i ostatní části vnější jednotky anténního přepínače budou pracovat s napětím 5 V potažmo logikou TTL. Zároveň je požadován co nejmenší vložený útlum, aby bylo dosaženo co nejmenšího šumového čísla a co největší možná izolace jednotlivých kanálů. Vzhledem k výše uvedeným výhodám a nevýhodám různých druhů přepínačů a požadavkům, které jsou dány navrhovaným anténním přepínačem bylo vybráno integrované provedení jako vhodné řešení. Hlavně z důvodu variability množství vstupů a výstupů, které integrované přepínače nabízí. Jejich zapojení do obvodu vyžaduje minimální množství součástek, což má dopad na celkovou jednoduchost a také snižuje výslednou cenu. Integrovaných vysokofrekvenčních přepínačů je velké množství a vyrábějí je různí výrobci jako například Skyworks Solutions, Analog Devices nebo Infineon Technologies. Po uplatnění výše zmíněných kritérií se jeví přepínače uvedené v tabulce 2.1 jako nejvhodnější.

Tab. 2.1: Seznam VF přepínačů vyhovujících požadavkům

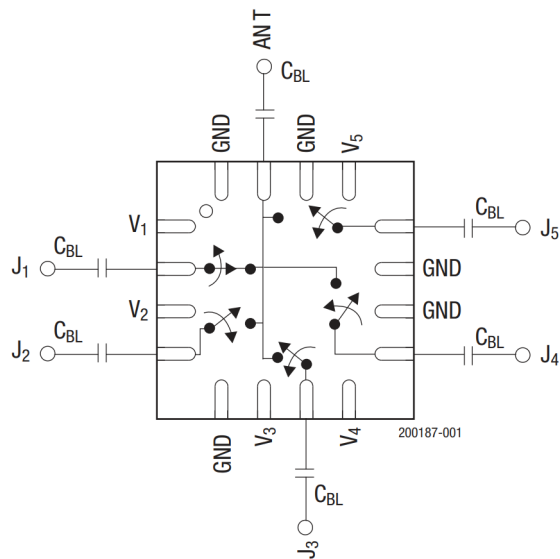
Označení	Max. napájecí napětí [V]	Max. řídicí napětí [V]	Proudový odběr [mA]	Vložený útlum [dB]	Max. spínaný VF výkon [dBm]	Frekvenční rozsah [GHz]	Velikost [mm]	Pouzdro
AS195-306LF[29]	–	8	–	0,5	27,0	0,1 – 2,0	4x4	QFN-16
ADRF5250[28]	5,5	5	0,36	1,3	33,0	0,1 – 6,0	4x4	QFN-24
HMC252AQS24E[33]	5	5	3,5	0,8	29,8	DC – 3,0	8x3	SOP-24
SKY13415-485LF[32]	5	3	0,04	0,4	37,5	0,1 – 3,8	2x2	QFN-14
F2915[31]	5,5	3,6	0,29	0,93	37,0	0,05 – 5,0	4x4	QFN-24

Pozn.: Hodnoty vložených útlumů a max. spínaných výkonů jsou z dokumentace vybrány pro odpovídající frekvenci 435 MHz nebo tak, aby se jí co nejvíce blížily.

Z nich byl vybrán přepínač **AS195-306LF**, protože nejlépe splňuje kladené požadavky a jeho rozměry ještě umožňují ruční pájení. Jedná se o reflektivní provedení [29], což by ale neměl být problém, pokud před přepnutím vypneme předřazený zesilovač (viz obr. 1.1) a tím odizolujeme anténu od přepínače.

Alternativou by mohl být přepínač v absorpčním provedení SKY13415-485LF, který má menší útlum, menší spotřebu, ale spínání je řízeno maximálně 3 V, takže by bylo zapotřebí použít obvod, který by přizpůsobil řídicí napětí z mikrokontroleru. Nevýhodou jsou také velmi malé rozměry, které jsou nevhodné pro ruční pájení. Další alternativou by mohl být F2915, který také potřebuje přizpůsobit řídicí napětí a má větší útlum než **AS195-306LF** a SKY13415-485LF, ale oproti SKY13415-485LF je vhodnější pro ruční pájení (rozměry stejné jako u vybraného **AS195-306LF**).

Schématické znázornění fungování **AS195-306LF** a rozložení jeho pinů je zobrazeno na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Blokové schéma a rozložení pinů AS195-306LF [29]

3 Použité komponenty a jejich funkce

Tato kapitola se zabývá popisem vybraných komponent, které jsou důležité pro funkci vnější jednotky přepínače. Jsou zde uvedeny důvody výběru použitých komponent, jejich specifikace a jejich funkce, které v zapojení zajišťují. Vybrané komponenty mají odpovídat funkcím hlavních bloků v blokovém schématu (obr. 1.1).

3.1 Mikrokontroler

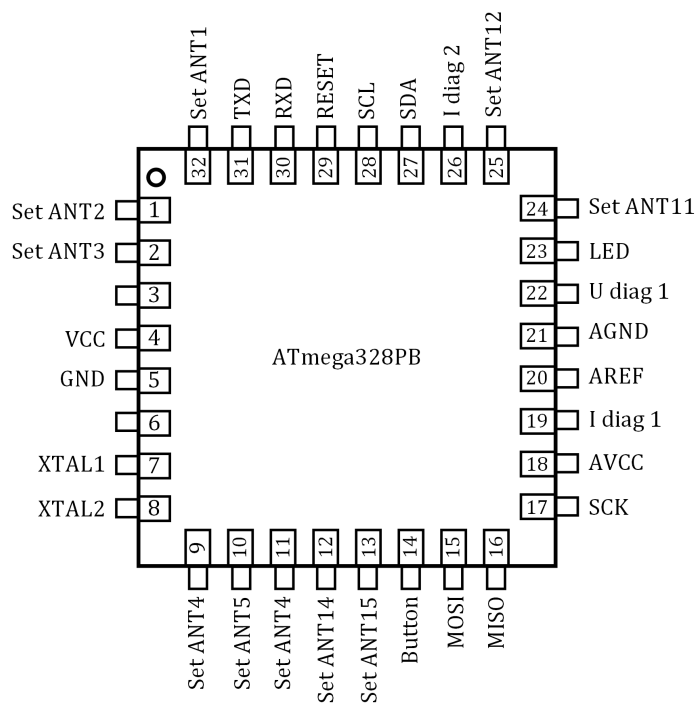
Mikrokontroler má v zapojení vnější jednotky sloužit k řízení přepínacího prvku, sbírání a vyhodnocování diagnostických dat a také k obsluze komunikace se vzdáleným počítačem, jehož prostřednictvím jsou dodávány pokyny k přepínání a je umožněn přístup k diagnostickým datům informujícím o správném fungování vnější jednotky přepínače. Ke komunikaci je použit protokol UART, který je následně poslán po sběrnici LIN (Local Interconnect Network) (viz 3.3). Jak je patrné z blokového schématu (obr. 1.1) mikrokontroler čte data z teplotního senzoru (viz 3.2) a elektronického kompasu (viz 3.4), a to pomocí I2C sběrnice. Dále pomocí integrovaného A/D převodníku čte napětí na měřicím odporu. Tak je možné určit proud odebíraný VF zesilovačem. Pomocí integrovaného A/D převodníku s vnitřním referenčním napětovým zdrojem je čteno i napětí fantomového napájení, které je následně vyhodnoceno. Mikrokontroler dále spíná napájení jednotlivých VF zesilovačů a řídí přepínání vysokofrekvenčního signálu.

3.1.1 ATmega328PB

Mikrokontroler **ATmega328PB** vyrábí firma Microchip Technology (dříve vyráběla firma Atmel) [5]. Patří do rodiny 8-bitových mikrokontrolerů AVR. Má modifikovanou harvardskou architekturu s redukovanou sadou instrukcí (RISC) [5]. Je nástupcem notoricky známého mikrokontroleru ATmega328 a pinout pouzdra TQFP32 je v podstatě stejný kromě pinu 3 a 6, které jsou využity pro port E GPIO [44]. Pro tuto aplikaci byl vybrán hlavně z důvodu velkého rozšíření v embedded systémech, dobré dostupnosti a množství zdrojových materiálů a podkladů, například firmwarových knihoven. Alternativou k **ATmega328PB** by mohl být některý z mikrokontrolerů řady STM8 od společnosti ST Microelectronics. V tabulce 3.1 jsou uvedeny některé důležité parametry **ATmega328PB**.

Tab. 3.1: Tabulka základních parametrů ATmega328PB [40]

Parametr	Hodnota
Provozní napětí	1,8 – 5,5 V
Typická spotřeba při 16 MHz a 5 V	9,9 mA
Maximální prac. frekvence	20 MHz
Flash paměť	32 kB
RAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Počet I/O portů	4
Počet ADC kanálů	8
Max. rozlišení ADC	10 b
Časovače	2x 8-bit, 3x 16-bit
Komunikační periferie	2x I2C, 2x SPI, 2x UART
Nabízená provedení pouzder	TQFP-32, VQFN-32



Obr. 3.1: Využití pinů ATmega328PB pro řízení vnější jednotky

3.2 Teplotní senzor

Teplotní senzor snímá teplotu v okolí vnější jednotky a má umožnit odhalit její případný chybový stav (např. zkrat nebo selhání některé ze součástí) případně uživatele upozornit na mezní hodnoty teploty, které také mají vliv na stárnutí součástí a kvalitu přijímaného signálu. Při vyšší teplotě je totiž i šumový výkon větší [15].

3.2.1 MCP9808

Měření teploty lze realizovat mnoha způsoby. Například může být použit termistor, na kterém je pomocí A/D převodníku určováno napětí a z něj vyhodnocena odpovídající teplota. Tato metoda bývá nepřesná a mívá vyšší nároky na spotřebu. Nebo lze použít digitální senzor, který obsahuje integrovaný A/D převodník a informace o teplotě předává pomocí některé z datových sběrnic. Tento typ teplotního senzoru byl použit i zde. Jedná se o digitální teplotní senzor **MCP9808** od výrobce Microchip Technology.

Byl vybrán hlavně z důvodu dostupných knihoven v jazyce C pro AVR mikrokontrolery usnadňujících ovládání a komunikaci s mikrokontrolerem ATmega328PB, výhodou je také jeho malá spotřeba a velká přesnost měření. Díky programovatelným registrům umožňuje flexibilitu při měření teploty, jako například nastavení hraničních limitů po jejichž překročení je upozorněn mikrokontroler [41].

V tabulce 3.2 jsou uvedeny některé důležité parametry digitálního teplotního senzoru **MCP9808**:

Tab. 3.2: Tabulka základních parametrů MCP9808 [41]

Parametr	Hodnota
Měřitelný teplotní rozsah	-40 °C až 125 °C
Typická přesnost měření	+0,25 °C
Pracovní napětí	2,7 – 5,5 V
Proudový odběr	400 µA
Datová sběrnice	I2C

3.3 Sběrnice LIN

Aby nebylo nutné k přepínači zavádět větší množství kabeláže, požadujeme, aby komunikace mezi vnější jednotkou a uživatelovým počítačem probíhala po jednom vodiči. Často používaný komunikační protokol, který je určen přímo pro komunikaci

po koaxiálním kabelu, je DiSEqC [24]. Je využíván například pro řízení LNB (*low noise block*), anténních přepínačů nebo pozicionérů při příjmu satelitní televize. Pro jeho realizaci je nevýhodou nedostupnost integrovaných obvodů realizujících DiSEqC komunikaci.

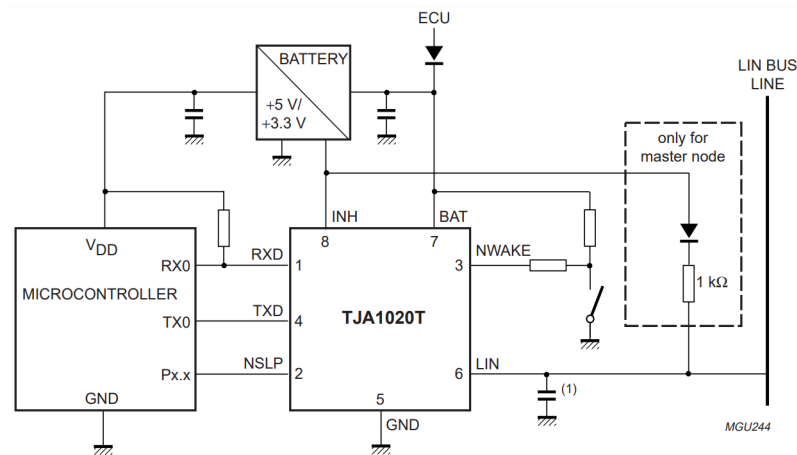
Další možnost, jak zajistit komunikaci je použití One Wire sběrnice, která také umožňuje komunikaci po jednom vodiči. Je ale spíše koncipována pro řízení komunikace z pozice *master* a většinou počítá s komunikací se senzorem, který má již obvody pro One Wire komunikaci zabudovanou. Další možností je sběrnice LIN (*Local Interconnect Network*), která je v realizaci výsledného zařízení použita. Jedná se o jednovodičovou sériovou asynchronní sběrnici, která je navržena pro použití v automobilové technice. Maximální přenosová rychlost je 20 kbit/s a umožňuje k jednomu řídicímu prvku připojit až 16 prvků podřízených [20]. Zde je využita pouze fyzická vrstva LIN sběrnice, kterou zprostředkovává integrovaný obvod **TJA1020**, jinak komunikace probíhá pomocí UART protokolu. Komunikační a vysokofrekvenční signál tedy může být sdružen do jednoho koaxiálního kabelu.

3.3.1 LIN transceiver TJA1020

Integrovaný obvod **TJA1020** je prostředníkem mezi zařízením a samotnou fyzickou vrstvou sběrnice [26]. Na trhu je velké množství podobných integrovaných obvodů. Tento byl vybrán hlavně z důvodu možnosti napájet jej 5 V. Alternativou může být integrovaný obvod TLIN1021-Q1 od Texas Instruments, který má stejné rozložení pinů [68] jako **TJA1020** a je vybaven v podstatě stejnou funkcionalitou.

TJA1020 má malou spotřebu, která se typicky pohybuje kolem 400 μA , pokud zrovna nedochází k vysílání informací do sběrnice a 3,5 mA, pokud je do sběrnice vysíláno. V katalogovém listu je uvedeno, že pokud je tento integrovaný obvod používán jako transceiver v roli master, měl by být mezi sběrnicí a zdrojem napětí připojen rezistor o velikosti 1 k Ω a dioda (obr. 3.2) [68].

Jak vyplývá z katalogového listu [68] a z aplikační poznámky výrobce [27] je k pinu RXD potřeba připojit pull-up rezistor, protože se jedná o výstup s otevřeným kolektorem (obr. 3.2). V této aplikaci byl použit rezistor s hodnotou 10 k Ω .



Obr. 3.2: Typické zapojení integrovaného obvodu TJA1020 [26]

3.4 Elektronický kompas

Pro to, abychom mohli postupně přepínat jednotlivé antény tak, aby sledovaly pohyb družice po její orbitě, je nutné znát jejich absolutní natočení, tzn. vědět kam která anténa směřuje. S určením orientace antén má právě pomoci elektronický kompas, který je ve vnější jednotce přepínače instalován.

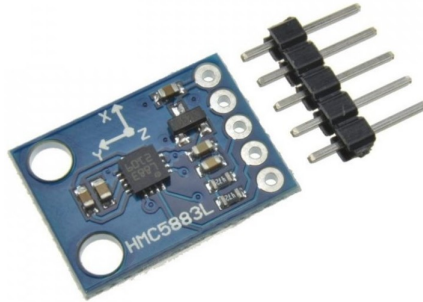
Myšlenka je taková, že po instalaci antén a vnější jednotky, nebude muset uživatel určovat polohu antén pomocí kompasu nebo buzoly, ale přepínač to udělá sám. Díky elektronickému kompasu bude také moci mikrokontroler upozornit uživatele na případnou změnu orientace například v důsledku špatných povětrnostních podmínek.

3.4.1 Modul elektronického kompasu HMC5883L

Modul elektronického kompasu **HMC5883L** byl zvolen z důvodu dostupnosti a jednoduchosti použití. Jedná se o modul, takže na desce plošných spojů o rozměrech 18x17x2 mm [42] jsou umístěny všechny součástky potřebné k fungování samotného integrovaného obvodu elektronického kompasu **HMC5883L** od výrobce Honeywell. Samotný integrovaný obvod vyžaduje napětí maximální pracovní napětí 3,6 V [45], a proto modul obsahuje i napěťový stabilizátor.

Na trhu jsou dostupné sice i jiné alternativy integrovaných obvodů elektronických kompasů jako například LIS2MDL od STMicroelectronics, ale vzhledem k tomu, že se jedná o miniaturní 2x2 mm LGA [25] pouzdro bylo by velmi náročné jeho ruční pájení stejně jako u integrovaného obvodu **HMC5883L**. Právě z toho důvodu byl vybrán modul, nikoli samotný integrovaný obvod.

Komunikace s mikrokontrolerem probíhá přes I2C sběrnici. K ovládání **HMC5883L** existují knihovny v jazyce C pro mikrokontrolery AVR, které ulehčují řízení a získávání dat. Řešení s modulem **HMC5883L** bohužel není ideální, ale tento modul je na trhu nejdostupnější. Ideálním řešením by bylo přímo použití integrovaného obvodu kompasu a navržení zapojení přímo na desce plošných spojů vnější jednotky.



Obr. 3.3: Modul elektronického kompasu HMC5883L [42]

3.5 Vysokofrekvenční předzesilovač

Aby bylo dosaženo co nejmenšího výsledného šumového čísla F vysokofrekvenční kaskády (viz kapitola 4.5) a byl zajištěn dostatečně velký signál i po průchodu kaskádou, která obsahuje různé útlumy, je nutné slabý signál z antény co nejdříve zesílit. K tomu slouží předzesilovač. Požadujeme po něm co největší zisk G a zároveň, aby vlastním šumovým číslem F_{amp} přispíval do výsledného šumového čísla kaskády co nejméně, protože jak vyplývá z Friisova vztahu (viz vzorec 4.5), šumové číslo prvního bloku v kaskádě má největší vliv. Zesilovače s malým šumovým číslem se označují jako LNA (*low noise amplifier*).

Dále požadujeme možnost napájení 5 V. Bod jednodéciblové komprese $P_{1\text{dB}}$ není tak důležitý, protože na vstupu zesilovače předpokládáme signály s velmi malým výkonem. Vysokofrekvenční předzesilovač může být realizován buď diskretně pomocí vysokofrekvenčního tranzistoru a jeho obvodů pro nastavení pracovního bodu a impedančního přizpůsobení anebo pomocí monolitického integrovaného obvodu, který obsahuje i integrované obvody pro nastavení pracovního bodu a impedančního přizpůsobení.

3.5.1 Vysokofrekvenční monolitický zesilovač PGA-103+

Výběr tohoto zesilovače a jeho zapojení bylo převzato z [21]. Vysokofrekvenční zesilovač **PGA-103+**, který vyrábí společnost Minicircuits, má při napájení 5 V typický zisk na frekvenci 400 MHz 22,1 dB a šumové číslo 0,5 dB [67]. K jednodecibelové kompresi dochází při výstupním výkonu 21,5 dBm a bod zahrazení IP3 je na výstupním výkonu 39 dBm. To vše je odečteno pro frekvenci 400 MHz, která je nejbližší frekvenci 435 MHz, na které bude přepínač pracovat. Typický odběr proudu **PGA-103+** je 97 mA při napájecím napětí 5 V. Jedná se o širokopásmový zesilovač. Dle výrobce je jeho frekvenční rozsah od 50 MHz do 4 GHz [67].

Alternativou k tomuto vysokofrekvenčnímu monolitickému zesilovači by mohl být zesilovač PHA-13LN+ od stejného výrobce. Jedná se o stejné pouzdro jako **PGA-103+**, nabízí ale menší frekvenční rozsah od 100 MHz do 1 GHz. Jeho typický zisk je na frekvenci 500 MHz 22,4 dB a šumové číslo 1 dB. Při napájecím napětí 5 V typicky odebírá proud 138,9 mA [47].

Minicircuits také nabízí monolitický zesilovač PGA-105+. Jeho typický zisk na 500 MHz je 15,2 dB a šumové číslo je 2 dB. Při napájecím napětí 5 V odebírá typicky 63 mA [39]. Z převzatého zapojení vysokofrekvenčního zesilovače vyplývá možnost nahradit **PGA-103+** právě zesilovačem PGA-105+ a to i díky stejnému pouzdru.

Další alternativou by mohl být zesilovač BGU6104 od společnosti NXP Semiconductors. Ten nabízí nastavitelný zisk. Při frekvenci 450 MHz typicky až 28,5 dB. Šumové číslo je na frekvenci 450 MHz typicky 0,8 dB. Napájecí napětí se může pohybovat od 3 V do 5 V a maximální odebíraný proud je 50 mA [38]. Také má pin *enable* pro zapnutí nebo vypnutí zesilování. Nevýhodou je malé pouzdro, které ztěžuje ruční osazování desky plošných spojů.

Tab. 3.3: Parametry vybraných monolitických VF zesilovačů

LNA	Typ. zisk [dB]	Frekvenční rozsah [GHz]	Typ. šumové číslo [dB]	Typ. bod 1dB komprese [dBm]	Typ. vyst. výkon v IP3 [dBm]	Typ. útlum odrazu na vstupu [dB]	Typ. útlum odrazu na výstupu [dB]	Typ. napájecí napětí [V]	Typ. odebí- raný proud [mA]
PGA-103+ [67]	22,1 (@0,4 GHz)	0,05-4,0	0,5 (@0,4 GHz)	21,5 (@0,4 GHz)	39 (@0,4 GHz)	11,3 (@0,4 GHz)	23,8 (@0,4 GHz)	5	97
PGA-105+ [39]	15,2 (@0,5 GHz)	0,04-2,6	2 (@0,5 GHz)	20,7 (@0,5 GHz)	39,3 (@0,5 GHz)	20,4 (@0,5 GHz)	23,3 (@0,5 GHz)	5	63
PHA-13LN+ [47]	22,4 (@0,5 GHz)	0,001-1	1 (@0,5 GHz)	24,5 (@0,5 GHz)	39 (@0,5 GHz)	17,4 (@0,5 GHz)	23,9 (@0,5 GHz)	5	138,9
BGU6104 [38]	28,5 (@0,45 GHz)	0,04-4	1,2 (@0,45 GHz)	15,5 (@0,45 GHz)	26 (@0,45 GHz)	–	–	3	40

3.6 Měření napájecího proudu VF zesilovačů

Měření napájecího proudu tekoucího do vysokofrekvenčních zesilovačů poskytuje základní informaci o jejich správné funkci. Do série s vysokofrekvenčním zesilovačem je zapojen rezistor o malém odporu, který slouží jako převodník proudu na napětí. Výsledný odpor musí být dostatečně malý, aby na něm nebyl velký úbytek napětí a nebyla tím negativně ovlivněna funkce vysokofrekvenčního zesilovače PGA103+, jehož napájecí napětí by nemělo klesnout pod 4,8 V [67]. Díky malému odporu také nedochází k velkým výkonovým ztrátám, takže není potřeba používat rezistorů konstruovaných na větší výkony. Nechtě je při proudu do VF zesilovače, který je typicky 97 mA [67] úbytek napětí na měřicím rezistoru kolem 50 mV.

Pro měření je tak malé napětí nevhodné, protože bude v mikrokontroleru převáděno pomocí A/D převodníku, jehož referenční napětí je buď napájecí napětí mikrokontroleru, tedy 5 V, nebo vnitřní reference, která je u ATmega328PB 1,1 V [40]. Tak malé vstupní napětí by ani zdaleka nevyužilo celý rozsah A/D převodníku, který je u ATmega328PB 10 bitů [40]. Proto je nutno použít diferenční zesilovač, který dostatečně zesílí úbytek napětí na snímacím rezistoru tak, aby byl využit celý rozsah A/D převodníku a byla tím zvětšena citlivost na změnu velikosti protékajícího proudu. Můžeme vypočítat potřebnou hodnotu měřicího rezistoru

$$R_{\text{sens}} = \frac{U_{\text{Rsens}}}{I_{\text{LNA}}} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{97 \cdot 10^{-3}} = 0,515 \Omega. \quad (3.1)$$

Této hodnoty nejlépe dosáhneme paralelním zapojením 1Ω rezistorů z rezistorové řady E24. Tím vznikne výsledný odpor 0,5 Ω. V takovém případě bude úbytek napětí

$$U_{\text{R}} = R \cdot I = 0,5 \cdot 97 \cdot 10^{-3} = 48,5 \text{ mV}, \quad (3.2)$$

což je velmi blízko požadovanému úbytku napětí 50 mV. Ztrátový výkon na tomto zapojení bude

$$P_{\text{Rsens}} = U \cdot I = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 97 \cdot 10^{-3} = 4,85 \text{ mW}, \quad (3.3)$$

tato hodnota je velmi malá a proto nebude potřeba brát zvláštní ohledy na použité rezistory, co se požadavků na ztrátový výkon týče. Maximální změřitelný proud při padesátinásobném zesílení odpovídá dvěma zároveň zapnutým zesilovačům PGA103+, tedy proudu 200 mA. Pro detekování chybových stavů je vhodné umožnit měření i vyššího proudu, což může být dosaženo snížením zesílení diferenciálního zesilovače. Vhodné zesílení může být například 20. Při tomto zesílení se napětí dostane do jedné pětiny rozsahu A/D převodníku s referenčním napětím 5 V.

3.6.1 Integrovaný obvod diferenčního zesilovače INA180A1

Integrovaný obvod **INA180A1**, který v sobě obsahuje operační zesilovač v diferenčním zapojení je pro měření proudu pomocí snímacího rezistoru ideální řešení. Vnitřní rezistory nastavují zesílení na 20, což vyhovuje této aplikaci.

Při úbytku napětí na snímacím rezistoru 48,5 mV, což odpovídá typicky odebranému proudu zesilovačem PGA-130+, je při dvacetinásobném zesílení na výstupu diferenčního zesilovače **INA180A1** napětí 0,97 V. To je zhruba pětina rozsahu A/D převodníku, takže je možné v dostatečném rozmezí sledovat zvýšenou velikost protékajícího proudu v případě sepnutí více VF zesilovačů současně. Výrobce **INA180A1**, Texas Instruments, uvádí, že spotřeba tohoto integrovaného obvodu je maximálně 260 μA [65]. Potlačení součtového signálu je typicky 100 dB a ofsetové napětí je $\pm 100 \mu\text{V}$. Výstup je typu rail to rail, takže maximální výstupní napětí je jen o 30 mV menší než napájecí napětí a o 5 mV větší než záporný potenciál napájení. Typické napájecí napětí **INA180A1** je 5 V.

Alternativou by mohl být integrovaný obvod AD626 od Analog Devices, který ale potřebuje k nastavení zesílení vnější rezistory [66], což může mít vzhledem k tolerancím rezistorů vliv na přesnost nastavení zesílení.

3.7 Napájení vnější jednotky prepínače a jednotlivých VF zesilovačů

Dalšími důležitými komponenty, kterým bylo potřeba věnovat při výběru pozornost jsou napěťový stabilizátor, který reguluje fantomové napájecí napětí z koaxiálního kabelu na 5 V a spínací tranzistor, který je využit pro spínání jednotlivých nízkofrekvenčních vysokofrekvenčních zesilovačů.

3.7.1 Spínací unipolární tranzistor SSM3J355R

V zapojení slouží k spínání napájení vysokofrekvenčních zesilovačů, které jsou umístěny ke každému anténnímu vstupu ještě před spínacím prvkem. Protože jich vnější jednotka obsahuje pět a spotřeba každého z nich se pohybuje okolo 97 mA [67] blížil by se odebíraný proud, pokud bychom nechali všechny zesilovače neustále aktivní, i když zrovna danou anténu nepotřebujeme, 0,5 A. To je jenom proud pro zesilovače. Mikrokontroler, zesilovač mezi prepínačem a SAW filtrem a další komponenty budou mít také určitý proudový odběr, takže je možné, že by celkový proud přesáhl 0,6 A. To pro fantomové napájení po koaxiálním kabelu nevhodné a také zbytečné. Vhodnější je zapnout vždy jen ten zesilovač, který koresponduje s anténou, z které je požadován příjem signálu.

Vysokofrekvenční zesilovače nemůžeme odpojit od nulového potenciálu, aby nedocházelo k odrazům signálu nebo jiným nechtěným jevům. Proto musí být zapojen se spínacím unipolárním tranzistorem tak, abychom spínali kladný potenciál napájení. Z toho vyplývá nutnost použití unipolárního tranzistoru typu P. Byl vybrán P-MOSFET s indukovaným kanálem **SSM3J355R** od Toshiba. Odpor kanálu $R_{DS_{on}}$ při napětí na gatu $-4,5\text{ V}$ je $23\text{ m}\Omega$ [63], což zaručí dostatečně malý úbytek napětí (při proudu $I_D = 97\text{ mA}$ je U_{DS} asi $2,2\text{ mV}$) na tranzistoru, který neovlivní správnou funkci zesilovače. Důležité parametry **SSM3J355R** jsou shrnuty v tabulce 3.4.

Tab. 3.4: Tabulka základních parametrů vybraného P-MOSFETu [63]

Charakteristika	Symbol	Hodnota	Jednotka
Max. proudu drainem	$I_{D_{max}}$	-6	A
Max. napětí drain-source	$U_{DS_{max}}$	-20	V
Max. napětí gate-source	$U_{GD_{max}}$	-10	V
Odpor kanálu při $U_{GS} = -4,5\text{ V}$, $I_D = -4\text{ A}$	$R_{DS_{on}}$	23	$\text{m}\Omega$
Max. prahové napětí gatu	U_{th}	-1	V

3.7.2 Napěťový regulátor

Napěťový regulátor snižuje a stabilizuje napájecí napětí přivedené po koaxiálním kabelu. Celé zapojení vnější jednotky je napájeno napětím 5 V a je očekáván maximální odběr proudu asi kolem 700 mA . Pro regulaci byl proto vybrán integrovaný obvod **LM2940** od společnosti Texas Instruments.

Jeho výstupní napětí je 5 V a maximální výstupní proud, který je schopen dodat je 1 A [37]. Rozmezí vstupního napětí, které je **LM2940** schopen stabilizovat, je $6,25\text{ V}$ až 26 V . Z toho vyplývá minimální velikost přiváděného fantomového napětí, která musí být větší s ohledem na úbytek napětí na samotném koaxiálním kabelu, který sice není velký, ale je vhodné mít rezervu. Výrobce doporučuje, aby byl rozdíl vstupního a výstupního napětí alespoň 2 V [37] přičemž maximální úbytek napětí na regulátoru je 1 V . Proto je minimální napájecí napětí stanoveno na 7 V . Maximální hodnota napájecího napětí je omezena tepelnými vlastnostmi regulátoru a byla stanovena na 12 V . Napětí přiváděného fantomového napájení je měřeno mikrokontrolerem a v případě poklesu pod tuto hodnotu je upozorněn uživatel.

LM2940 se vyrábí v pouzdrech TO-220, TO-263 (DDPAK) a SOT-223. Z nich bylo vybráno pouzdro TO-263, protože jeho umístění na desku plošných spojů je praktičtější a zároveň má oproti SOT-223 menší tepelný odpor.

Alternativou by mohl být například napěťový regulátor TL750M od stejného výrobce, s maximálním výstupním proudem 750 mA a rozpětím vstupních napětí 6 V až 26 V a úbytkem napětí maximálně 0,6 V [46]. Také se vyrábí v pouzdře TO-263.

4 Návrh zapojení přepínače

Tato kapitola se zabývá rozborem schématu zapojení výsledného přepínače. Jsou zde popsány důležité části schématu a postup při jejich návrhu. Celé zapojení i následný návrh desky plošných spojů pro vnější jednotku je koncipován tak, aby osazením nebo neosazením některých komponent vznikly dvě varianty (dále označovány jako A nebo B) desky buď pro vertikální nebo pro horizontální polarizaci antén. Schémata a desky plošných spojů jsou přiloženy v příloze B a C. Zjednodušené blokové schéma shrnující podstatné funkce zapojení přepínače je v příloze A. Fotodokumentace osazených plošných spojů se nachází v příloze D.

4.1 Zapojení mikrokontroleru ATmega328PB

Návrh zapojení řídicího mikrokontroleru ATmega328PB vychází z katalogového listu [40] a dokumentu *AVR Microcontroller Hardware Design Considerations* [36], který vydal výrobce. Na každý pin **VCC** je přivedeno napájení mikrokontroleru. Mezi každý pin **VCC** a zem je připojen blokovací kondenzátor o velikosti 100 nF (jako u všech ostatních integrovaných obvodů). Napájení je také přivedeno na napájecí pin A/D převodníku **AVCC** a pin **AREF**, který slouží ke stanovení napěťové reference A/D převodníku. Oba dva piny jsou odděleny od země pomocí 100nF blokovacích kondenzátorů. Pin pro resetování mikrokontroleru (aktivní v nule) je pomocí pull-up rezistoru připojen k napájecímu napětí a oddělen od země 4,7nF kondenzátorem. K resetu může dojít buď pomocí připojeného tlačítka nebo externě při nahrávání firmwaru, které je možné provádět přes SPI. SPI piny jsou vyvedeny na pinovou lištu.

K taktování ATmega328PB je na piny **PB6** a **PB7** připojen 16MHz krystal. Na pin **PB2** je připojeno tlačítka (aktivní v nule) a na pin **PC0** je připojena LED (aktivní v nule) pro případnou jednoduchou interakci s uživatelem. Na vstup A/D převodníku **ADC6** je připojeno napětí z diferenčního zesilovače INA180, které je úměrné proudu tekoucímu do VF zesilovačů a na **ADC7** je připojeno napětí z odporového děliče, který je umístěn před napěťovým regulátorem. Napěťový dělič upravuje vstupní napětí, u kterého je dovoleno, aby nabývalo hodnoty až 12 V, tak, aby maximální napětí na vstupu A/D převodníku **ADC7** byl 1 V, protože je pro A/D převod použita vnitřní reference 1,1 V, kterou ATmega328PB nabízí. Toto referenční napětí je stabilní a umožňuje tak přesně měřit vstupní napětí nezávisle na fluktuaci napájecího napětí mikrokontroleru, které je současně referenčním napětím A/D převodníku. Hodnota přiváděného fantomového napájení je měřena z toho důvodu, že je na ní závislé správné fungování napěťového regulátoru a tím i fungování celé vnější jednotky.

Piny **PC1** a **PC2** a dále **PD2** až **PB1** jsou nastaveny jako výstupy a řídí spínací MOSFETy (negativní logikou). Piny **PC4** (SDA) a **PC5** (SCL) jsou využity pro I2C sběrnici. SDA i SCL jsou připojeny přes 10 k Ω pull-up rezistory na napájecí napětí, jak to I2C vyžaduje (výchozí stav SDA i SCL linky je vysoká úroveň [35]).

Dále je z pinů **PDO** (RXD) a **PD1** (TXD) vyvedena UART komunikace, která pokračuje do integrovaného obvodu TJA1020, který převádí UART na fyzickou vrstvu sběrnice LIN. Tak je umožněna komunikace mezi vnější jednotkou přepínače a uživatelem. RXD linka je připojena pomocí 10 k Ω pull-up rezistoru na napájecí napětí. Hodnota 10 k Ω u pull-up rezistorů je v zapojeních s ATmega328PB a UART nebo I2C často používána, protože umožňuje dostatečnou rychlost komunikace a zajišťují průtok jen malému množství proudu, pokud je v rámci komunikace linka připojena k zemi.

4.2 Řízení přepínání VF signálu

Řídící mikrokontroler ATmega328PB má pouze omezený počet vstupně výstupních GPIO pinů (27) [40]. Některé z nich jsou sdíleny se vstupy a výstupy integrovaných periférií jako například I2C driverem nebo A/D převodníkem. Pro řízení spínání napájení VF zesilovačů pro obě polarizace a volbu přepnutí přepínacího integrovaného obvodu AS195-306LF je dohromady potřeba dvacet vstupně výstupních pinů. Takovýto počet není v zapojení dostupný, právě proto, že jsou piny využity pro jiné účely. Nedostatek vstupně výstupních pinů lze řešit několika způsoby.

Prvním z nich je možnost použití expandéru GPIO, což je integrovaný obvod, který komunikuje s mikrokontrolerem, jehož GPIO piny rozšiřujeme, nejčastěji přes sběrnici I2C a obsahuje určitý počet digitálních vstupně výstupních pinů řízených mikrokontrolerem přes danou komunikační linku. Výhodou je jednoduchost zapojení, nevýhodou pak nutnost zahrnout řízení expandéru do obslužného kódu.

Dalším možným řešením, v tomto konkrétním případě, je použití logického invertoru. Řídící signály pro spínání napájení VF zesilovačů (aktivní v nule) jsou totiž, ve smyslu dvoustavové logiky, oproti řídicím signálům přepínacího prvku (aktivní v jedničce), opačné. Stačí tedy řídicí signály přepínacího prvku invertovat logickým invertorem a počet potřebných GPIO mikrokontroleru se sníží na polovinu.

Třetím možným řešením, použitým v navrhované vnější jednotce přepínače, je využití skutečnosti, že spínací PMOSFET tranzistory, které spínají napájení VF zesilovačů, se samy chovají jako logické invertory. Můžeme tedy sepnout napájení VF zesilovačů, přivedením logické nuly na *Gate* tranzistoru, čímž se tranzistor sepne a na *Drain* je přivedeno napájecí napětí a může protékat proud, který napájí VF zesilovače. Zároveň využijeme sepnuté napájecí napětí na *Drainu* k přepnutí přepínacího integrovaného obvodu. Tímto způsobem je snížen potřebný počet řídicích pinů na

polovinu jako u varianty s logickým invertorem. Nevýhodou řešení s tímto tandemovým řízením je ztráta možnosti řídit spínání VF zesilovačů a přepínání přepínacího prvku zvláště, což by umožnilo větší flexibilitu.

Čtvrtým řešením nedostatku vstupně výstupních pinů je výběr jiného podobného mikrokontroleru, který nabízí větší počet GPIO pinů.

Aby při rozepnutí tranzistoru nebyl řídicí vstup přepínače AS195-306LF ve stavu vysoké impedance a nedocházelo k náhodnému přepínání, jsou k řídicím signálům, které vychází z *Drainů* tranzistorů, připojeny pull-down rezistory. Také jsou do série mezi řídicí signály a vstupy přepínače připojeny ochranné rezistory.

4.3 Zapojení ostatních IO a spínání napájení VF zesilovačů

Teplotní senzor MCP9808 je připojen k I2C sběrnici, aby mohl komunikovat s mikrokontrolerem. Předpokládá se použití na deskách pro obě polarizace, proto je zapotřebí rozlišit I2C adresu senzorů, aby nedocházelo ke kolizím při komunikaci. To je provedeno propojkou **R23B** nebo **R23A**, která nastaví poslední bit I2C adresy buď na 0 nebo na 1. Výsledná adresa je tedy buď 0011000₂ nebo 0011001₂. Po I2C sběrnici komunikuje také modul elektronického kompasu, který má I2C adresu pevně nastavenou na 0011110₂.

Diferenciální zesilovač INA180 zesiluje úbytek napětí na malém měřicím odporu, který slouží jako převodník proudu na napětí. Musí být umístěn co nejbližší měřicímu odporu, aby měl odpor vodivé cesty co nejmenší vliv na měření. Zesílené napětí je následně přivedeno na A/D převodník mikrokontroleru. Jako snímací rezistor byly použity dva paralelně zapojené 1Ω rezistory, jejichž výsledný odpor je 0,5 Ω (viz kapitola 3.6).

Dalším použitým integrovaným obvodem je TJA1020. Tento obvod zajišťuje převod UART komunikace na fyzickou vrstvu sběrnice LIN. Pin **RXD** je s otevřeným kolektorem, takže je nutné jej přes pull-up rezistor o velikost 10 kΩ připojit na napájecí napětí. Tím je také docíleno vysoké úrovně na RX lince UARTu v klidovém stavu. Spánkové režimy TJA1020 nejsou využity, a proto je pin **NWAKE**, který slouží k lokálnímu „probuzení“, připojen na napájecí napětí. Stejně tak je připojen na napájecí napětí pin **NSLP**, sloužící k uvedení TJA1020 do spánkového režimu, protože se v podstatě jedná o pin řízený negativní logikou. Výrobce toto řešení nedoporučuje kvůli nedefinovanému času náběhu mezi pinem **TXD** a napájecím napětím při zapínání, což může vést k nedefinovanému módu fungování [27]. Vzhledem k nedostatku pinů mikrokontroleru je to ale jediné možné řešení. Mezi piny **LIN**, což je vývod do sběrnice LIN a pin **BAT**, který slouží k napájení, je připojen zakončovací

rezistor sběrnice LIN. TJA1020 má zakončovací rezistor v sobě integrovaný, jeho hodnota je ale 30 k Ω , je proto potřeba přiblížit zakončovací odpor 50 Ω , na kterých je přizpůsoben diplexer (viz kapitola 4.5).

Aby byl zajištěn menší proudový odběr, jsou jednotlivé VF zesilovače zapínány jen pokud je to právě vyžadováno. Toho je docíleno pomocí MOSFET tranzistorů typu P. Typ P je zvolen proto, aby bylo možno umístit zátěž (VF zesilovač) k *Drainu* a nebyla tak při odpojení napájení odpojena zem VF zesilovače, která je pro napájení a VF část společná. Z toho plyne nutnost řídit tranzistor negativní logikou. Mezi *Gate* každého spínacího tranzistoru a řídicí pin mikrokontroleru ATmega328PB je umístěn ochranný rezistor s odporem 1 k Ω , aby při změně napěťových úrovní, kdy se nabíjí nebo vybíjí parazitní vstupní kapacity tranzistoru, nebyl překročen maximální proud, který je schopen mikrokontroler ATmega328PB dodat nebo pojmout. Dále je na vstup *Gatu* připojen pull-up rezistor, aby nedocházelo k náhodnému spínání v době, kdy není řídicí pin mikrokontroleru v definovaném logickém stavu (nachází se ve stavu vysoké impedance – například při zapínání mikrokontroleru).

Fantomové napájecí napětí je regulováno na 5 V pomocí napěťového stabilizátoru LM2940-N. Na vstup i výstup jsou připojeny blokovací kondenzátory, jak tento stabilizátor vyžaduje (na výstupu stabilizátoru kondenzátor s kapacitou alespoň 22 μF a ekvivalentním sériovým odporem v rozsahu 1 m Ω až 1 Ω) [37]. Vstupní rozsah napětí byl určen na 7 až 12 V. Na výstupu je indikační LED, která signalizuje, že je přítomno napětí.

4.4 Chlazení napěťového regulátoru LM2940

Napěťový regulátor napájí celé zapojení vnější jednotky přepínače, které může mít velký požadavek na odebíraný proud I_L (při zapojení přepínačů pro obě polarizace asi kolem 500 mA, experimentálně asi až 700 mA). Maximální vstupní napětí U_{in} bylo stanoveno na 12 V. Proud potřebný pro napájení samotného regulátoru I_G je asi 21 mA [37]. Celkový proud vtékající do regulátoru je

$$I_{in} = I_L + I_G = 700 + 21 = 721 \text{ mA.} \quad (4.1)$$

To znamená ztrátový výkon na regulátoru

$$P_D = (U_{in} - U_{out}) I_L + U_{in} I_G = (12 - 5) \cdot 0,7 + 12 \cdot 0,021 = 5,125 \text{ W} \quad (4.2)$$

Maximální povolená teplota přechodu $T_{J(\max)}$ je pro LM2940 125 $^{\circ}\text{C}$ [37] a předpokládaná maximální teplota okolí $T_{A(\max)}$ je 75 $^{\circ}\text{C}$. Z těchto hodnot je vypočítán maximální vzrůst teploty regulátoru

$$T_{R(\max)} = T_{J(\max)} - T_{A(\max)} = 125 - 75 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C.} \quad (4.3)$$

Potom tepelný odpor přechod-okolí je

$$R_{\Theta JA} = \frac{T_{R(\max)}}{P_D} = \frac{50}{5,125} = 9,76 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}. \quad (4.4)$$

Výrobce v datasheetu [37] uvádí, že pokud je tato hodnota menší, než $40,9 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$, je nutné použít nějakého druhu odvádění tepla z regulátoru.

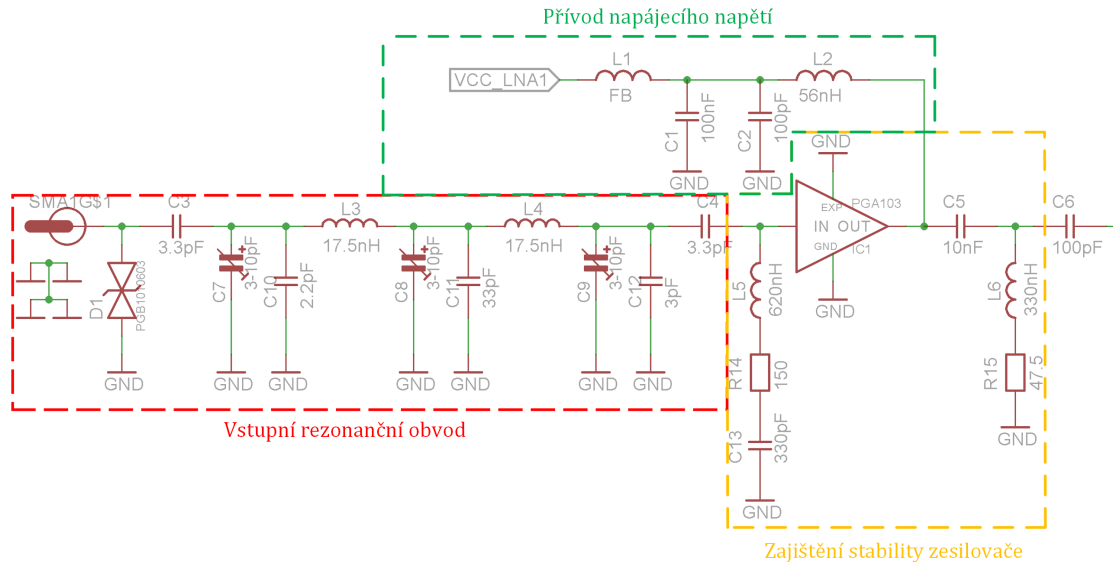
Odvod tepla je zajištěn velkou plochou mědi, která se nachází kolem regulátoru, a to i na spodní vrstvě desky plošných spojů. Pro snížení tepelného odporu kladeného materiálem mezi těmito dvěma měděnými plochami je pod regulátorem a v jeho blízkosti umístěna síť prokovů. Dále je použit malý chladič s tepelným odporem $23 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ [59]. Předpokládá se, že velká plocha mědi pod stabilizátorem napětí a chladič, jej budou schopny v normálních podmínkách udržet v bezpečném teplotním rozsahu.

4.5 Vysokofrekvenční část zapojení

Vstupní část obvodu a část výstupního diplexeru byla převzata z [21] a byla mírně modifikována. Protože se jedná o vysokofrekvenční obvod, je nutné zajistit správnou impedanci mikropásku, který bude použit pro vedení signálu. Jeho impedance záleží hlavně na tloušťce základního materiálu a jeho relativní permitivitě ϵ_r . Také záleží na tloušťce měděné vrstvy a na šířce mikropásku. Byla zvolena tloušťka desky 0,8 mm a základový materiál FR4 s relativní permitivitou ϵ_r 4,5. Tloušťka mědi byla zvolena 1 oz (35 μm). Po zadání těchto hodnot do webové aplikace [60] pro výpočet šířky mikropásku získáme hodnotu asi 1,47 mm. Tato hodnota je použita při návrhu desky plošných spojů. Pro správnou funkci mikropásku je pod celou částí desky plošných spojů, kde se nachází vysokofrekvenční obvody s mikropásky, zanechána ve spodní vrstvě neporušená plocha mědi.

Anténa je připojena na SMA konektor a pomocí vstupního rezonančního obvodu jsou odfiltrovány nežádoucí frekvenční pásma. Následuje oddělovací kondenzátor a obvod s nízkošumovým vysokofrekvenčním zesilovačem PGA-103+. Zapojení vychází ze zapojení doporučeného výrobcem [67][39] a výše uvedené bakalářské práce [21]. Toto zapojení zajišťuje stabilitu zesilovače. Napájení, které je zapínáno řízenými unipolárními tranzistory, je přivedeno přes tlumivku, feritovou perličku a kondenzátory na výstup zesilovače. Cílem je co nejlépe oddělit stejnosměrné napájecí napětí od vysokofrekvenčního signálu. Tato část obvodu je zakončena oddělovacím kondenzátorem, protože to vyžaduje zapojení následného prepínacího prvku AS195-306LF. Každý anténní vstup obsluhuje vždy jedno toto zapojení. Jedna z pěti vstupních částí obvodu je na obrázku 4.1.

Elektrická délka od anténního konektoru ke vstupu do AS195-306LF je zachována stejná pro všech pět částí, čímž je dosaženo stejné fáze signálu na vstupu AS195-306LF. To teoreticky umožní v AS195-306LF sloučit dva signály. Tato funkce není v katalogovém listu [29] popsána a bude experimentálně ověřena.

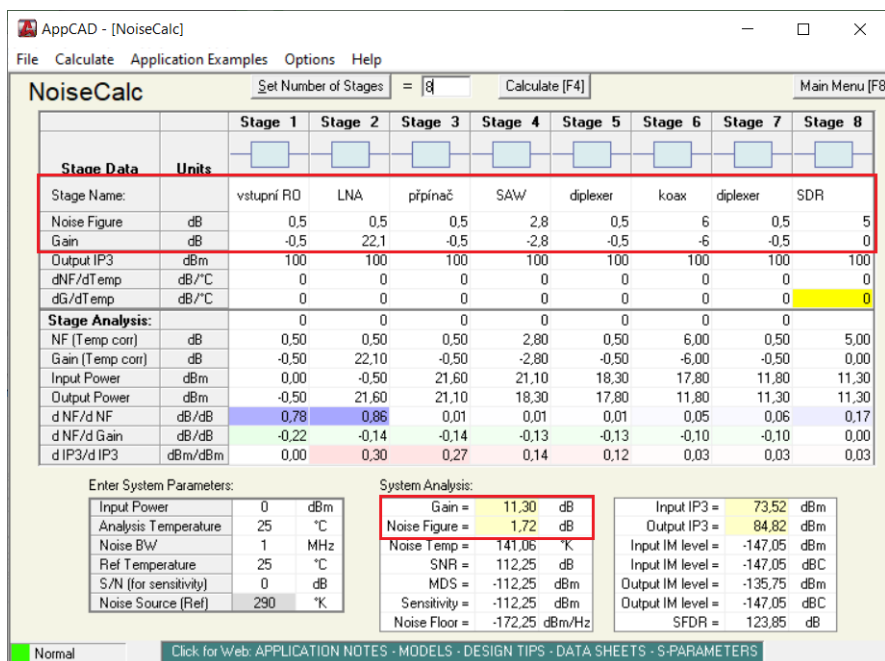


Obr. 4.1: Vstupní část vnější jednotky

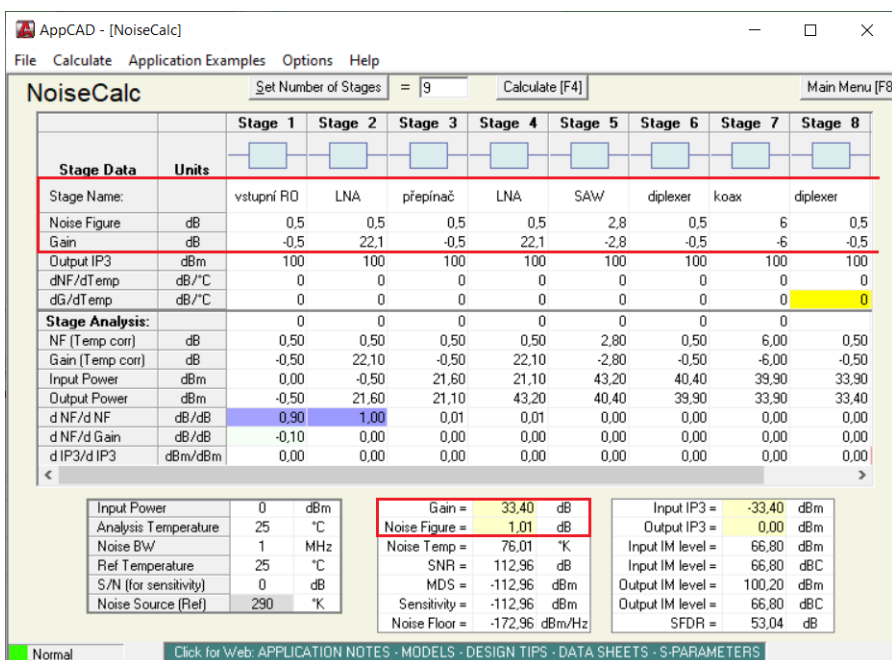
Předzesílené signály jsou přivedeny na vstup přepínacího integrovaného obvodu AS195-306LF, který je řízen mikrokontrolerem. Dále je v kaskádě zapojen VF zesilovač PGA-103+. Cílem je snížení výsledného šumového čísla. Výsledné šumové číslo bez vloženého a s vloženým zesilovačem bylo vypočítáno pomocí programu AppCAD [58] (viz obrázek 4.2 a 4.3). Obecně jej lze vypočítat pomocí Friisova vztahu:

$$F_{\text{total}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (4.5)$$

Výsledné šumové číslo se zmenší o 0,71 dB, pokud bude zapojen i druhý zesilovač. Po zesilovači následuje SAW filtr B3580 se středovou frekvencí 433,92 MHz [61], oddělený kondenzátory, které zabraňují průchodu stejnosměrného napětí. UHF signál následně vstupuje do diplexeru, který ho slučuje buď se signálem z GPS, což umožňuje varianta B, nebo ho slučuje s LIN sběrníci, to umožňuje varianta A. Diplexer pro GPS signál a UHF (435 MHz) signál byl přebrán z [21] a není primárním cílem této práce jej navrhovat. Na přání vedoucího práce byla zachována možnost ho osadit a rozšířit tak funkčnost přepínače.



Obr. 4.2: Výsledné šumové číslo kaskády s jedním LNA



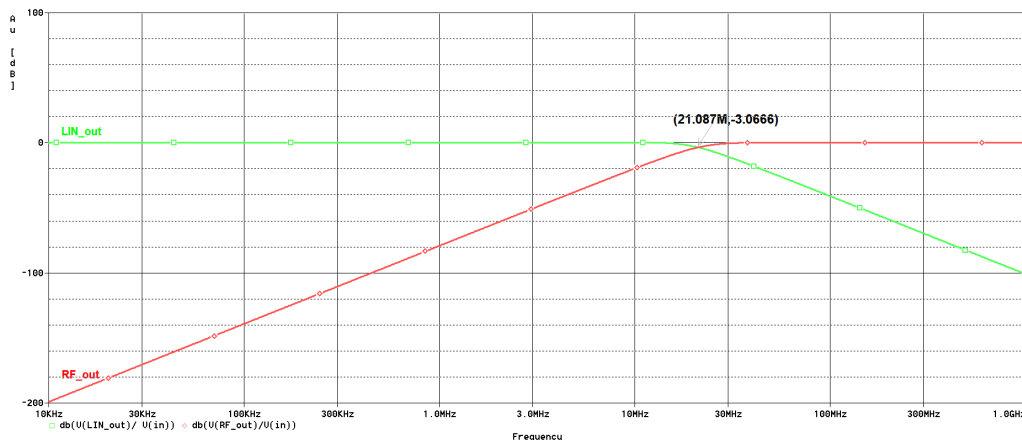
Obr. 4.3: Výsledné šumové číslo kaskády s dvěma LNA

Diplexer pro LIN a signál v pásmu UHF (435 MHz) byl navržen pomocí internetového online nástroje [23]. Maximální přenosová rychlost, kterou LIN vysílač TJA1020 umožňuje, je 20 kBd [26], což odpovídá frekvenci 20 kHz, toto je základní

frekvence, kterou je nutno přenést. Aby byla zachována dostatečná strmost nástupných a sestupných hran, byla vybrána mezní frekvence 1 MHz. Středová frekvence diplexeru je tedy:

$$f_c = \sqrt{f_L \cdot f_H} = \sqrt{435 \cdot 10^6 \cdot 10^6} = 20,86 \text{ MHz} \quad (4.6)$$

Hodnoty prvků navržené online nástrojem [23] byly následně upraveny na běžně vyráběné hodnoty a funkčnost byla ověřena pomocí simulačního programu OrCAD PSpice (viz obr. 4.4). Ze simulace vyplývá, že centrální frekvence se posune na $f_c = 21,087 \text{ MHz}$, což je zanedbatelná odchylka od původní a neměla by mít zásadní vliv na funkci diplexeru.



Obr. 4.4: Výsledky simulace diplexeru v OrCad PSpice

Fantomové napájení je vedeno po koaxiálním kabelu, jímž je přenášen diplexovaný signál GPS a UHF. Následně je odděleno výhybkou (také přebráno z [21]). Na jejím výstupu je připojena ochranná dioda proti přepólování. Fantomové napájení je následně dovedeno k napětovému stabilizátoru TS2937, který stabilizuje a upravuje napětí na 5 V, kterými je napájena celá vnější jednotka přepínače.

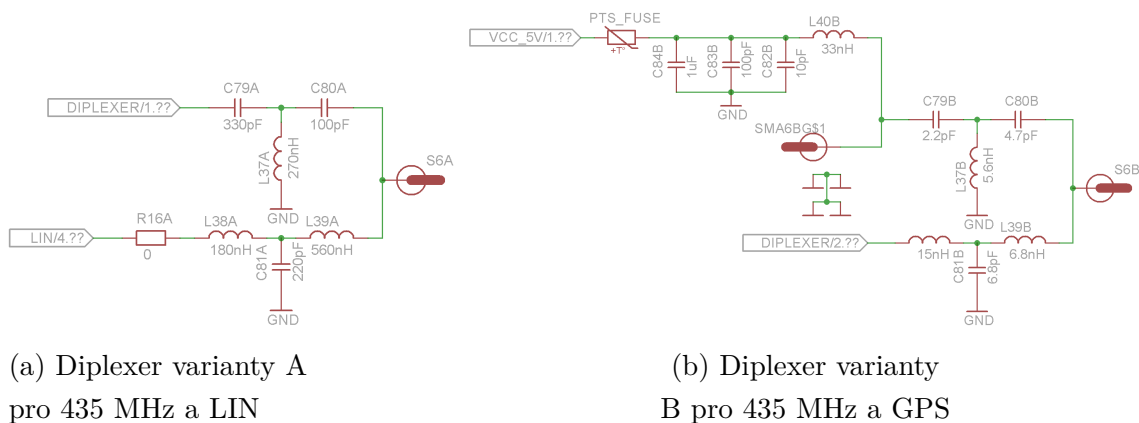
K měření napětí fantomového napájení je použit odporový dělič napětí s dělicím poměrem 11:1. Na něm je měřeno napětí pomocí A/D převodníku v mikrokontroleru (viz kapitola 4.1).

Vstup a výstup vysokofrekvenční části zapojení je chráněn proti přepětí a statickým výbojům obousměrnými TVS diodami.

4.6 Rozdíly mezi dvěma variantami osazení vnější jednotky

Jak bylo uvedeno výše, schéma zapojení a deska plošných spojů vnější jednotky jsou navrženy tak, aby osazením nebo neosazením některých komponent došlo k vytvoření dvou variant výrobku a jejich spojením přes pinové lišty potom došlo k vytvoření řízeného anténního přepínače pro vertikální a horizontální polarizaci antén.

Varianta označená jako **A** na sobě obsahuje osazený mikrokontroler ATmega328PB a všechny potřebné řídicí komponenty. Je na ní osazen elektronický kompas, teplotní senzor MCP9808 a LIN transceiver TJA1020. Dochází na ní k měření proudu do VF zesilovačů stejně jako na variantě **B**. Vysokofrekvenční část obvodu je osazena stejně jako u varianty **B** až po diplexer, ten je pro variantu **A** navržen tak, že slučuje signál v UHF pásmu a signál z LIN. Aby bylo propojení funkční, musí být osazena propojka **R16A**. Pady kondenzátorů a cívek mají shodnou velikost, a proto jsou ve variantě **A** osazeny dle schématu na obrázku 4.5a. Zároveň mohou být osazeny i součástkami varianty **B** (schéma na obr. 4.5b).



Obr. 4.5: Dvě varianty zapojení diplexeru

Součástky označené písmenem **B** nejsou ve variantě **A** osazeny. Osazením součástek s označením **A** vznikne tedy požadovaný VF obvod pro sloučení UHF a LIN.

Fantomové napájení je přiváděno přes pinovou lištu z druhé desky osazené variantou **B**. Toto napětí je stabilizováno stabilizátorem, který je osazen na desce varianty **B** a měřeno na desce varianty **A**. Není možné vést napájení po jednom koaxiálním kabelu společně s komunikací LIN. Pokud by to bylo možné, varianta **A** by mohla být úplně samostatnou jednotkou. Takto je pro správné fungování potřeba i varianta **B** nebo externí zdroj napájení. Stabilizované napětí napájí nejenom desku varianty **B**, ale je dovedeno zpět na pinovou lištu a po spojení s deskou varianty **A** napájí i

ji. Obvod stabilizátoru napětí je možné osadit na jednu z variant, zde byl osazen na variantě **B**. Jeho osazení na desku **A** by nijak neovlivnilo výslednou funkci zařízení.

Řídící signály přepínání VF signálu na desce varianty **B** jsou vyvedeny na pinovou lištu a po spojení desek **A** a **B** jsou přes propojky (**R40B** – **R45B**) dovedeny k daným částem vnější jednotky. Na desku **A** je z desky **B** přes pinovou lištu také přivedeno diagnostické napětí ze snímače proudu INA180 do VF zesilovačů.

Varianta **B** nemá osazený mikrokontroler ATmega328PB, LIN transceiver TJA1020 ani modul elektronického kompasu. Z integrovaných obvodů je na ní osazen jen teplotní senzor MCP9808 a diferenciální zesilovač INA180 a napěťový stabilizátor LM2940. Propojkou **R23B** je nastavena I2C adresa teplotního senzoru. Diferenciální zesilovač INA180 je osazen z toho důvodu, že není možné vést malé napětí ze snímacích rezistorů tak dlouhou cestou, protože by mohlo dojít k jeho zarušení vlivem naindukování cizích napětí. Malé napětí je tedy co nejbližší snímacím rezistorům zesíleno a již dostatečně zesílené vedeno přes propojku **R45B** na pinovou lištu a přes ni na desku **A**, kde je měřeno mikrokontrolerem. Z pinové lišty na desce varianty **B** jsou vyvedeny řídicí signály pro spínání VF signálu. Přes propojky **R40B** až **R44B** jsou vedeny přímo na tranzistory pro spínání VF zesilovačů. Z pinové lišty (potažmo z varianty **B**) je také přivedeno stabilizované napájecí napětí 5 V. Vysokofrekvenční část je stejná jako u varianty **A**. Liší se pouze diplexer, který slučuje signály pásma UHF a GPS. Varianta **B** také obsahuje výhybku, kterou je odděleno fantomové napájení od VF signálů. Fantomové napájení je vyvedeno na pinovou lištu a přes ni dovedeno k měření na variantě **A**.

4.7 Zapojení vnitřní jednotky

Toto zařízení slouží pro zprostředkování řídicí komunikace mezi uživatelským osobním počítačem a vnější jednotkou. Také zajišťuje přivedení fantomového napájení a rozdělení sloučených signálů z vnější jednotky. K tomu slouží diplexery. Jeden z nich, který je spojen i s výhybkou pro připojení napájení byl převzat z [21] a rozděluje UHF signál a GPS signál. Druhý byl navrhnut a jeho návrh byl popsán v kapitole 4.5. Ten rozděluje sloučené signály UHF a LIN. Pro komunikaci s uživatelským osobním počítačem je použit převodník z USB na UART, integrovaný obvod MCP2200. USB je připojeno pomocí USB MINI konektoru. USB komunikace převedená na UART je pomocí LIN transceiveru TJA1020 vyslána přes diplexer po koaxiálním kabelu k vnější jednotce. MCP2200 i TJA1020 jsou napájeny přes USB z uživatelského osobního počítače. Pro signalizaci probíhající komunikace jsou připojeny na piny MCP2200 **TXLED** a **RXLED** LED diody. TJA1020 je zapojen v roli master, to znamená, že mezi pin **BAT** a **LIN** připojen zakončovací rezistor s diodou. Aktivní fantomové napájení signalizuje LED.

5 Řídicí program pro uživatelův počítač

Tato kapitola je věnována popisu vytvořeného programu a jeho funkcí, jejichž úkolem je prostřednictvím grafického rozhraní uživateli umožnit řízení přepínání antén a informovat o stavu vnější jednotky na základě diagnostických dat. Pro vytvoření programu byl zvolen programovací jazyk Python (verze 3.12.1), protože jeho použití je velmi intuitivní a nabízí velké množství modulů včetně těch pro vytvoření grafického uživatelského rozhraní. Pro vytvoření programu byly použity knihovny [48], [2], [49], [52], [51], [53], [54], [55], a další jsou uvedeny níže v příslušných kapitolách.

5.1 Požadované funkce programu

Hlavním požadavkem na funkce řídicího programu je umožnit řízení přepínání antén, které zajišťuje vnější jednotka a také umožnit příjem a vyhodnocení diagnostických dat.

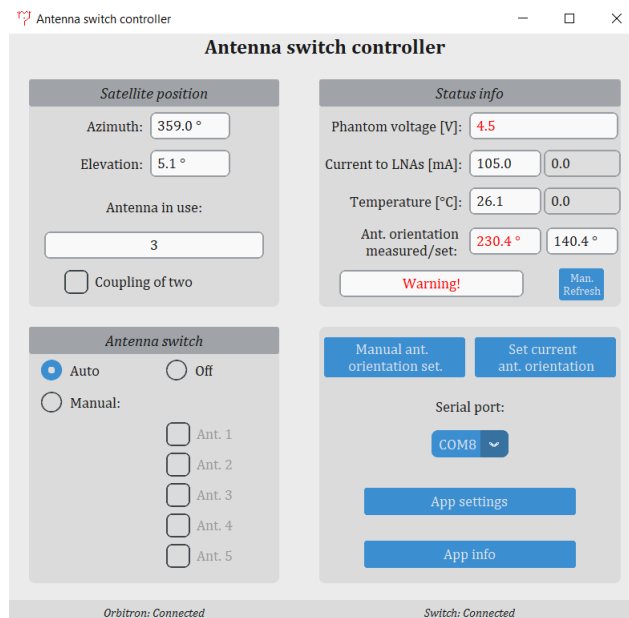
Vyhodnocování přepínání by mělo být prováděno automaticky na základě predikčního softwaru, který bude programu předávat informace o poloze družice. Jako predikční software byl zvolen program Orbitron, který umožňuje sledovat pohyb družic v reálném čase a také předávat informace o jejich poloze pomocí DDE serveru ostatním aplikacím [19]. Program bude určovat, která anténa aktuální poloze nejlépe odpovídá. Následně by měl být tento údaj předán mikrokontroleru vnější jednotky, který provede samotné přepnutí antén. Dále by bylo vhodné, například pro účely testování, aby měl uživatel možnost prostřednictvím programu antény přepínat manuálně dle vlastního výběru.

Další hlavní funkcí má být zobrazování a vyhodnocování diagnostických dat z vnější jednotky. Diagnostická data by měla být přehledně zobrazena, aby měl uživatel přehled o jejich aktuálních hodnotách. Uživatel by měl být také upozorněn, pokud hodnoty přesáhnou meze stanovené pro správné fungování. Při vyhodnocení chybového stavu vnější jednotky by měla být diagnostická data ukládána pro případnou analýzu chybových stavů.

5.2 Popis grafického rozhraní

Pro vytvoření grafického rozhraní byl použit Python modul Custom TKinter, který je založen na modulu TKinter, ale upravuje vzhled jednotlivých widgetů do modernějšího hávu. Custom TKinter je kompatibilní s modulem TKinter, takže může být použit v kombinaci s klasickými TKinter widgety [17].

Hlavní okno bylo pro přehlednost rozvrženo do čtyř funkčních částí, kterými jsou *Satellite position*, *Antenna switch*, *Status info* a *nastavení* (viz obrázek 5.1). Ve spodní části hlavního okna je umístěna informační lišta indikující stav připojení k vnější jednotce a k DDE serveru vytvořenému Orbitronem.



Obr. 5.1: Hlavní okno řídicího programu

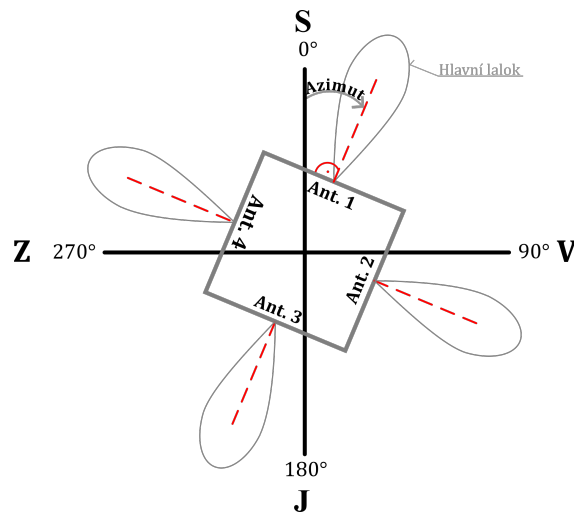
Část *Satellite position* informuje o poloze družice, která je přebírána z Orbitronu, a to ve formě azimutu a elevace. Tato část hlavního okna také zobrazuje, která anténa je právě sepnuta, a to jak na základě automatického, tak ručního přepínání. V části *Satellite position* je možné pro testovací účely zapnout spřažení dvou sousedních antén.

Část *Antenna switch* uživateli umožňuje nastavit různé módy přepínání antény. Při výběru *Auto*, program vyhodnocuje pozici družice a vybírá odpovídající anténu automaticky. Při výběru *Manual* může uživatel zakliknutím antény ze seznamu řídit její vypnutí nebo zapnutí. Maximální počet současně zapnutých antén je tři. Počet je omezen z důvodů limitace proudu odebíraného vysokofrekvenčními zesilovači. Pokud je vybrán stav *Off*, jsou vypnuty všechny antény.

Část *Status info* slouží k zobrazení diagnostických dat z vnější jednotky. Zobrazuje aktuální hodnotu fantomového napájecího napětí, proud odebíraný vysokofrekvenčními zesilovači pro obě desky A i B, teplotu měřenou na obou deskách A i B a azimut měřený modulem elektronického kompasu v porovnání s nastavenou hodnotou. Pokud je přesažen rozptyl hodnot odpovídajících normálnímu fungování vnější jednotky, je ve spodní části indikována chyba hláškou *Warning!*. Hodnoty,

kteřé přesáhly meze, jsou zvýrazněny červenou barvou. Kdykoliv dojde k chybovému stavu, jsou všechny hodnoty diagnostických dat zaznamenány do CSV souboru *error_log.csv*. Mezní hodnoty jednotlivých diagnostických dat je možno nastavit kliknutím na tlačítko *App settings* ve čtvrté části hlavního okna. Diagnostická data jsou zobrazována se zpožděním tří sekund od jejich vyžádání, aby je měla vnější jednotka čas změřit a poslat po sériové lince.

Ve čtvrté části hlavního okna je možno provádět různá nastavení. Je zde možno nastavit azimut antény, a to jak manuálně zadáním hodnoty v úhlových stupních, tak použitím hodnoty aktuálně měřené modulem elektronického kompasu. Určení azimutu antén je graficky znázorněno na obrázku 5.2. Azimut je určován od antény 1.



Obr. 5.2: Určení azimutu antény

Dále se zde nastavuje COM port sériové komunikace, na který je připojena vnitřní jednotka, která sériovou komunikaci mezi počítačem a vnější jednotkou zprostředkovává. Také je zde možnost nastavit limitní hodnoty, po jejichž překročení dojde k indikaci chybového stavu. To je možno provést kliknutím na tlačítko *App settings*, kdy se otevře nové okno s kolonkami, kam je možno zapsat hraniční hodnoty. Pokud je zadána neplatná hodnota, je zvýrazněna červenou barvou a vyskakovací informační okno upozorní uživatele.

Pro zobrazení jednoduchého návodu k použití programu slouží tlačítko *App info*, které uživateli v prohlížeči otevře webovou stránku s návodem. Veškerá konfigurace programu je ukládána do souboru *config.txt*, nastavené hodnoty jsou tak permanentně uloženy, takže při dalším spuštění programu je není nutno znovu nastavovat.

5.3 Předávání informací o poloze družice z aplikace Orbitron

Orbitron umožňuje předávání informací o pohybu sledované družice pomocí DDE (Dynamic Data Exchange), což je komunikační protokol navržený firmou Microsoft, který umožňuje aplikacím v operačním systému Windows si vzájemně posílat a přijímat data a instrukce. Mezi dvěma komunikujícími aplikacemi využívá vztahu klient-server [16]. Pro připojení k DDE serveru a čtení dat je v řídicím programu použit Python modul DDE z rozšiřujícího balíčku PyWin32 [9].

Aby Orbitron spustil předávání dat o poloze družice přes DDE server, ke kterému by se řídicí program připojil, je nutné spustit některý z driverů v menu *Rotor/Radio* v dolní liště hlavního okna aplikace Orbitron. Případně je možné přidat řídicí program do seznamu driverů, a tak může být spuštěn přímo z aplikace Orbitron. Pokud se programu podaří připojit, coby DDE klientovi, k DDE serveru Orbitronu a jsou odebírána data o poloze družice v textovém formátu, je tento stav indikován v dolní informační liště programu zprávou *Orbitron: Connected*.

Pokud nejsou předávána žádná data, je uživatel informován zprávou *Orbitron: No data*. Pokud není aplikace Orbitron spuštěna, je tento stav indikován zprávou *Orbitron: Disconnected* a každých 2,5 sekund řídicí program kontroluje, zda nedošlo k jejímu spuštění. Data o poloze družice jsou programem z DDE serveru čtena každých pět set milisekund.

5.4 Sériová komunikace s vnější jednotkou

Sériová komunikace mezi počítačem a vnější jednotkou, která je zprostředkována vnitřní jednotkou pomocí fyzické vrstvy LIN, je v programu spravována pomocí Python modulu pySerial [12]. Po spuštění se program pokusí připojit k sériovému COM portu, který byl naposledy úspěšně používán, a který je uložen v konfiguračním souboru *config.txt*. Po úspěšném připojení k danému COM portu vyšle program po sériové lince zjišťovací (startovací) sekvenci a sleduje, zda dostane od vnější jednotky očekávanou odpověď. Stane-li se tak, je navázání sériové komunikace mezi programem a vnější jednotkou považováno za úspěšné a jsou od vnější jednotky vyžádána všechna diagnostická data.

Pokud nedojde k úspěšnému připojení na COM port nebo není přijata správná odpověď, může uživatel iniciovat nové spojení vybráním COM portu z rolovací nabídky v hlavním okně programu. Nenavázání sériové komunikace je programem považováno za chybový stav. I přes to se program pokouší v pravidelných intervalech posílat dotazy na hodnoty jednotlivých měřených diagnostických veličin.

Dotazování na diagnostická data a jejich příjem probíhá v pravidelných pevně stanovených intervalech. Velikost fantomového napájecího napětí a měřený proud do vysokofrekvenčních zesilovačů na obou jednotkách A i B je dotazován každou minutu. Teplota měřená na obou jednotkách je dotazována každých pět minut a hodnota azimutu měřená modulem elektronického kompasu je získávána každých patnáct minut.

Protože čtení a zápis na sériovou linku, prováděné pomocí modulu pySerial, jsou blokující operace, bylo nutné pro zachování responzivity grafického rozhraní využít multithreadingu. Nejedná se při tom o paralelní vykonávání programu na více jádrech procesoru, ale v podstatě o rychlé střídání vykonávaných vláken. K tomu účelu byl použit modul Threading [50]. Každá operace, která obsahuje práci se sériovou komunikací, je vykonána ve vlastním vlákně. Všechny řídicí příkazy, pomocí kterých je možno po sériové lince řídit vnější jednotku, jsou uvedeny v tabulce 5.1. Všechny příkazy a odpovědi jsou zakončeny speciálním znakem konce řádku "\n".

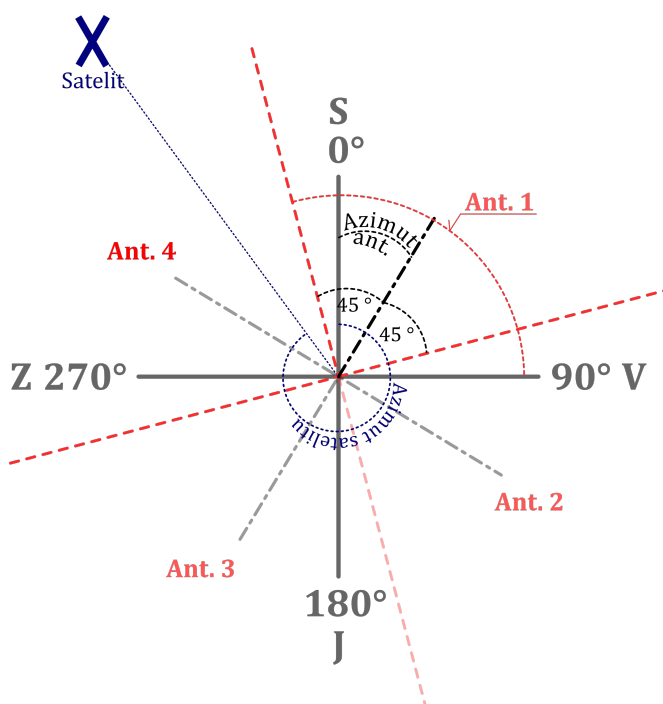
Tab. 5.1: Tabulka sériových příkazů a odpovědí na ně

Příkaz	Očekávaný formát odpovědi v max. možné délce	Popis
!!	YE	Test připojení vnější jednotky.
AL	xxx.x,xxx.x,(-)xx.x,(-)xx.x,xx.x,xxx.x,xxx,x	Vyžádání všech diag. dat v pořadí: [IA,IB,TA,TB,FU,EC,AN,CB]
AN	ANxxx	Vyžádání výpisu sepnutých antén. x = 1, 2, ..., 5; 0 - vše vypnuto
ANxxx	ANxxx	Příkaz pro přepnutí daných antén. x = 1, 2, ..., 5; 0 - vše vypnuto
CB	CBx	Dotaz na přítomnost jednotky B. x = 1 → B připojena, x = 0 → B nepřipojena
EC	ECxxx.x	Vyžádání měřeného azimutu el. kompasem.
FU	FUxx.x	Vyžádání měřeného fantomového napájecího napětí.
IA	IAxxx.x	Vyžádání měřeného proudu jednotky A.
IB	IBxxx.x	Vyžádání měřeného proudu jednotky B.
TA	TA(-)xx.x	Vyžádání měřené teploty jednotky A.
TB	TB(-)xx.x	Vyžádání měřené teploty jednotky B.

5.5 Funkce automatického přepínání antén

Samotné rozhodování o tom, která anténa odpovídá dané poloze družice nejlépe, provádí funkce *auto_select_ant()*, která je volána vždy po aktualizaci polohy družice pokud je uživatelem nastaveno automatické přepínání antén.

Azimut družice může nabývat hodnot z intervalu 0° až 360° . Tento interval musí být obslužen čtyřmi anténami, což znamená, že na každou anténu vychází čtvrtina rozsahu, tedy 90° . Při rozhodování, do kterého z kvadrantů náleží aktuální pozice družice, je také nutno zahrnout pootočení antén, jinými slovy, vlastní azimut antén. Funkce *auto_select_ant()* vyhodnotí dle vlastního azimutu antén a azimutu družice odpovídající anténu. Schématické znázornění výše popsaného je na obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Určení antény podle polohy satelitu

Uživateli je umožněno nastavovat mezní hodnotu elevace, kdy přepínač přepne na anténu 5, která by měla směřovat kolmo vzhůru, tedy do zenitu. Pokud je elevace družice menší než 0° , znamená to, že je za obzorem a v daném místě není možno přijímat její signál. V takovém případě jsou vypnuty všechny antény.

Uživateli je také umožněno zapnout spřažení dvou sousedních antén. Tato funkce je experimentální a teoreticky by měla zlepšit sledování pohybu družice a docílit tak příjmu kvalitního signálu i pro okrajová místa sektorů jednotlivých antén. Při zapnutí spřažení dvou sousedních antén je celkový rozptyl azimutu rozdělen do osmi sektorů po 45° .

6 Firmware pro mikrokontroler vnější jednotky

Tato kapitola se zabývá popisem firmwaru pro mikrokontroler ATmega328PB, naprogramovaného v jazyce C, který slouží k řízení vnější jednotky, sbírání diagnostických dat a zajištění komunikace po sériové lince s řídicím programem na uživatelské počítači.

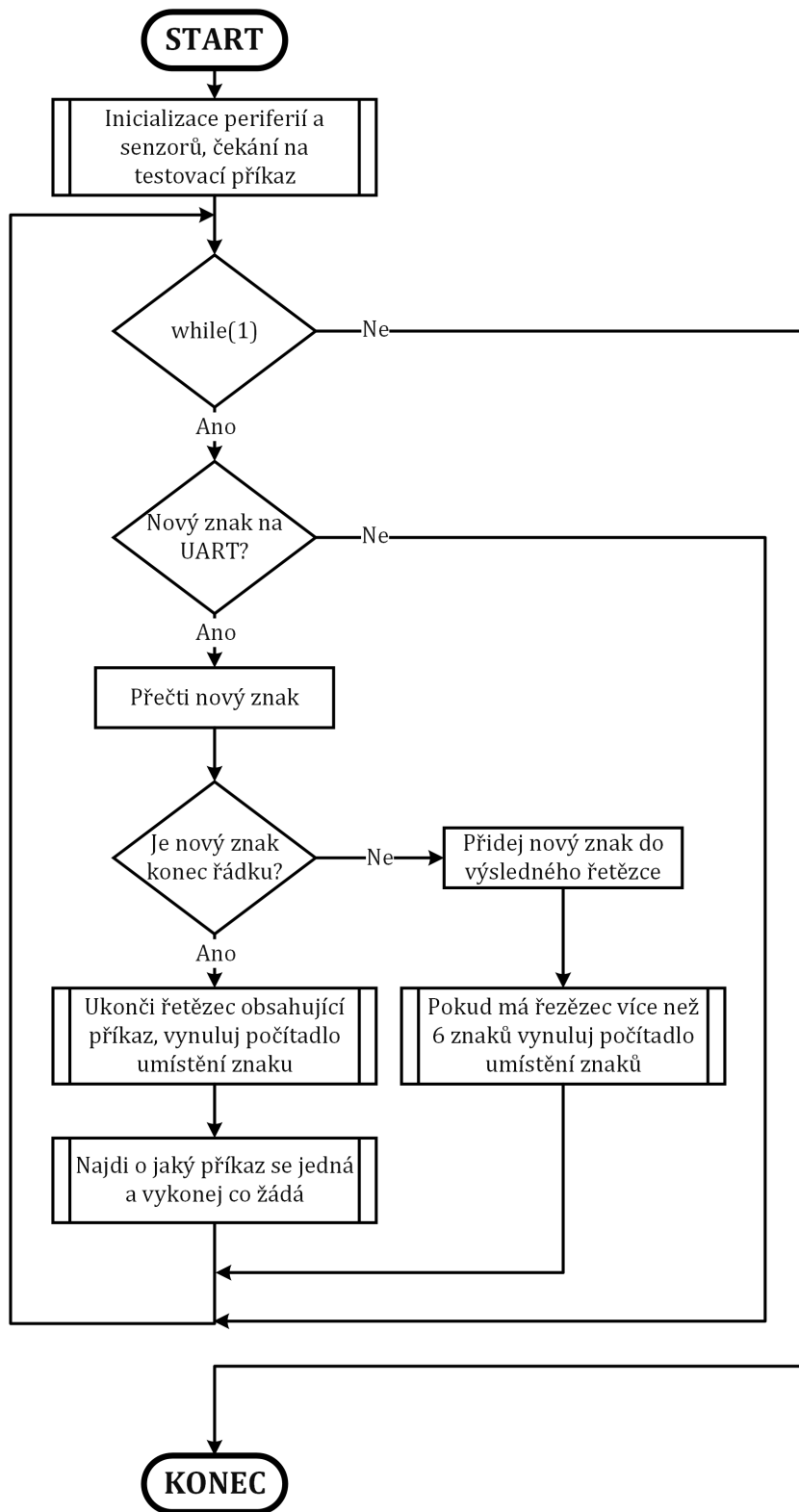
6.1 Hlavní smyčka programu

Po spuštění firmwaru se nastaví a spustí použité komunikační periférie mikrokontroleru (I2C a UART), dále se inicializují všechny připojené senzory (teplotní senzor MCP9808 a modul elektronického kompasu HMC5883L), připraví se A/D převodník mikrokontroleru a jsou vypnuty všechny antény. Dále je testováno, zda je připojena deska B, a to tím způsobem, že je zjištěno, zda její teplotní senzor odpovídá na volání na I2C sběrnici. Také jsou globálně povoleny přerušení.

Spuštění je indikováno zablikáním LED a výpisem "START" na sériovou linku. Následně přejde mikrokontroler do čekacího stavu, kdy vyčkává přijetí startovací (testovací) sekvence "!!". V tomto stavu indikační LED rychle bliká. Po přijetí testovacího příkazu odpovídá mikrokontroler předdefinovanou odpovědí "YE", LED bliká pomalu a firmware přechází do hlavní nekonečné smyčky.

V hlavní smyčce je testováno, zda byl po sériové lince přijat znak a pokud ano, je přidán do výsledného pole znaků. Pokud byl přijat znak konce řádku, znamená to, že bylo ukončeno vysílání příkazu po sériové lince a je přistoupeno k jeho obslužení.

Obslužení zajišťuje funkce *serve_request()*, jejímiž argumenty jsou přijatý příkaz a počet znaků, které obsahuje. V této funkci je porovnáván přijatý příkaz se seznamem všech možných příkazů a pokud jednomu z nich odpovídá, je na jeho základě vykonána příslušná akce (změření dotazované hodnoty diagnostických dat, přepnutí antény. . .). Mikrokontroler odpovídá po sériové lince dle předdefinovaného schématu uvedeného v tabulce 5.1. Pokud není příkaz rozpoznán, je vypsán zpět na sériovou linku. Funkce celého firmwaru je ve zjednodušené podobě zachycena na vývojovém diagramu (viz obrázek 6.1).



Obr. 6.1: Vývojový diagram firmwaru

6.2 Měření proudu do LNA a fantomového napájecího napětí

Proud tekoucí do vysokofrekvenčních zesilovačů je převeden na napětí, jak je popsáno v kapitole 3.6. Toto napětí je přivedeno na pin **PE2** (proud na desce A) a pin **PC3** (proud na desce B) ATmega328PB, kam jsou připojeny kanály A/D převodníku. Jako referenční hodnota napětí je při převodu použito napájecí napětí A/D převodníku, což odpovídá 5 V.

Měření fantomového napájecího napětí je provedeno podobně. Napětí je před přivedením na pin **PE3** zmenšeno v poměru 11:1, aby bylo možno je převádět s referenčním napětím A/D převodníku 1,1 V (viz 4).

Pro čtení převedené digitální hodnoty z A/D převodníku, a její přepočítání na odpovídající měřený proud nebo napájecí napětí byla napsána malá knihovna v jazyce C. Ta obsahuje tři základní funkce: *ADC_init()*, *ADC_I()* a *ADC_U()*. *ADC_init()* je použita při spuštění firmwaru a zajišťuje mimo jiné nastavení děličky hodinového signálu A/D převodníku, samotné spuštění periferie A/D převodníku a vypnutí digitálních vstupů na pinech, na kterých se bude provádět převod analogových hodnot na digitální.

ADC_I() a *ADC_U()* slouží k převodu a výpočtu měřené veličiny. V těchto funkcích se přepne multiplexer A/D převodníkové periferie a na A/D převodník je přivedeno napětí z požadovaného pinu. Také je nastavena referenční úroveň napětí A/D převodníku. Tyto dvě operace vyžadují určitý čas, než se analogové obvody ADC periferie ustálí, a proto je po těchto nastaveních vloženo zpoždění 10 ms. Následně se dvakrát spustí A/D převod. První hodnota převodu je ignorována a druhá je brána za validní a je z ní vypočítána skutečná hodnota měřené veličiny. Tuto hodnotu v datovém typu *float* pak funkce *ADC_I()* a *ADC_U()* vrací.

6.3 Měření teploty a azimutu

Samotné měření teploty a azimutu provádí teplotní senzor a modul elektronického kompasu. Hodnoty jsou pak čteny mikrokontrolerem pomocí I2C sběrnice. Pro využití I2C periferie mikrokontroleru byla použita knihovna [8] s malou úpravou pro ATmega328PB. Na jejím základě byly napsány obslužné knihovny pro teplotní senzor MCP9808 a elektronický kompas HMC5883L.

Obě knihovny obsahují inicializační funkce, které zajistí nastavení daného senzoru a také funkce pro získání naměřených hodnot. Knihovna pro elektronický kompas HMC5883L také obsahuje funkci pro výpočet azimutu ze změřených hodnot síly magnetického pole. Výpočet azimutu je prováděn z hodnot naměřených

v osách X a Y. Pro správný výsledek je tedy nutné, aby byl senzor HMC5883L, potažmo celá vnější jednotka, ve vodorovné poloze.

6.4 Sériová komunikace a periferie UART

Pro zajištění sériové komunikace pomocí UART byla použita knihovna [7], která byla mírně upravena pro použití na ATmega328PB. Protože použitý LIN transceiver TJA1020, který převádí sériovou komunikaci na fyzickou vrstvu LIN sběrnice, zrcadlí zpět vše, co má vysílat, bylo zapotřebí vypnout příjem UART periferie mikrokontroleru vždy, když z mikrokontroleru dochází k vysílání dat po sériové lince.

To bylo zajištěno tak, že při vysílání je na daném pinu (*PDO*) vypnuta funkce UART přijímače vynulováním pátého bitu (pozice *RXEN0*) v registru *UCSR0B* [40]. Po odvysílání celé zprávy je spuštěno přerušení, jehož obslužná rutina UART přijímač znovu zapne nastavením dané pozice v registru *UCSR0B* na hodnotu 1. Tím je zajištěno, že se mikrokontroler nedostane do nekonečné smyčky způsobené zrcadlením vysílaných zpráv zpět na UART přijímač mikrokontroleru.

7 Změřené vysokofrekvenční parametry

V této kapitole jsou uvedeny naměřené charakteristiky S parametrů různých vysokofrekvenčních částí vnitřní a vnější jednotky přepínače.

7.1 Vstupní rezonanční obvod s LNA

Pro docílení správné rezonanční křivky (nastavení rezonančního kmitočtu, co největšího přenosu na rezonančním kmitočtu a co nejúžší šířky pásma rezonanční křivky) vstupního rezonančního obvodu jej bylo nutné naladit výběrem vhodných příčných kondenzátorů. K tomu účelu byly do prvního rezonančního obvodu přidány kondenzátorové trimry, pomocí kterých byla vyladěna rezonanční křivka.

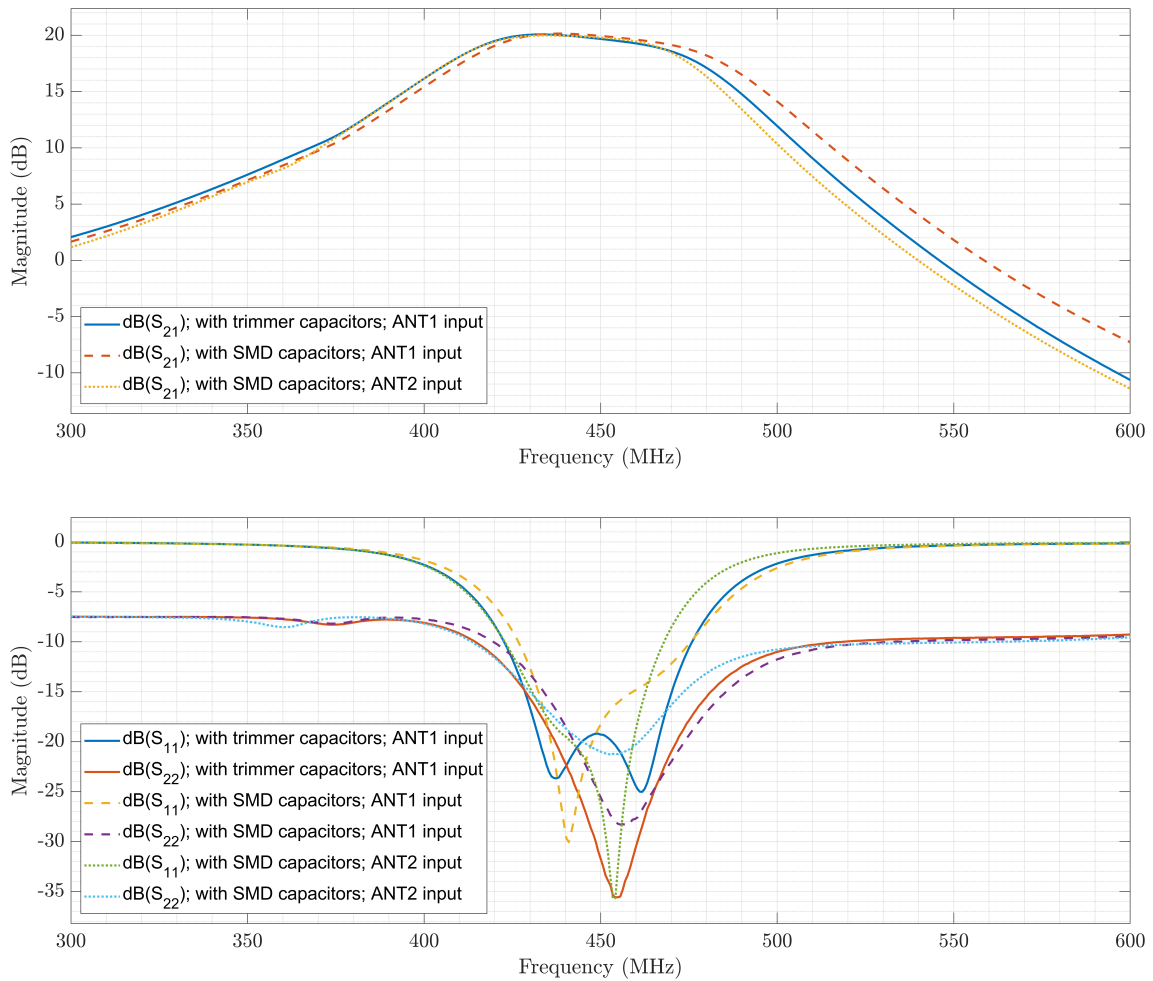
Trimry byly následně odpájeny a pomocí RLC měřicího můstku byla přibližně změřena nastavená kapacita. Ta byla složena pomocí SMD kondenzátorů ze standardních řad. Tabulka 7.1 shrnuje změřené hodnoty kapacit kondenzátorových trimrů a výsledně použitých kondenzátorů, jež je nahradily.

Tab. 7.1: Tabulka změřených a použitých kapacit ve vstupním rezonančním obvodu

Kondenzátory od vstupu:	C_1	C_2	C_3
Změřená kapacita kond. trimru [pF]:	3,47	20,21	3,01
Výsledná hodnota pro vstup ANT1 [pF]:	2,2	33	3 (1,5 + 1,5)
Výsledná hodnota pro vstupy ANT2 - 5 [pF]:	3,2 (2,2 + 1)	37,7 (33 + 4,7)	3,3

U dalších čtyř rezonančních obvodů nebyla přidána možnost osadit DPS kondenzátorovými trimry, což vedlo k posunu výsledných použitých hodnot kondenzátorů, z důvodů zmenšení parazitní kapacity, kterou do obvodu vnáší plošky pro připájení.

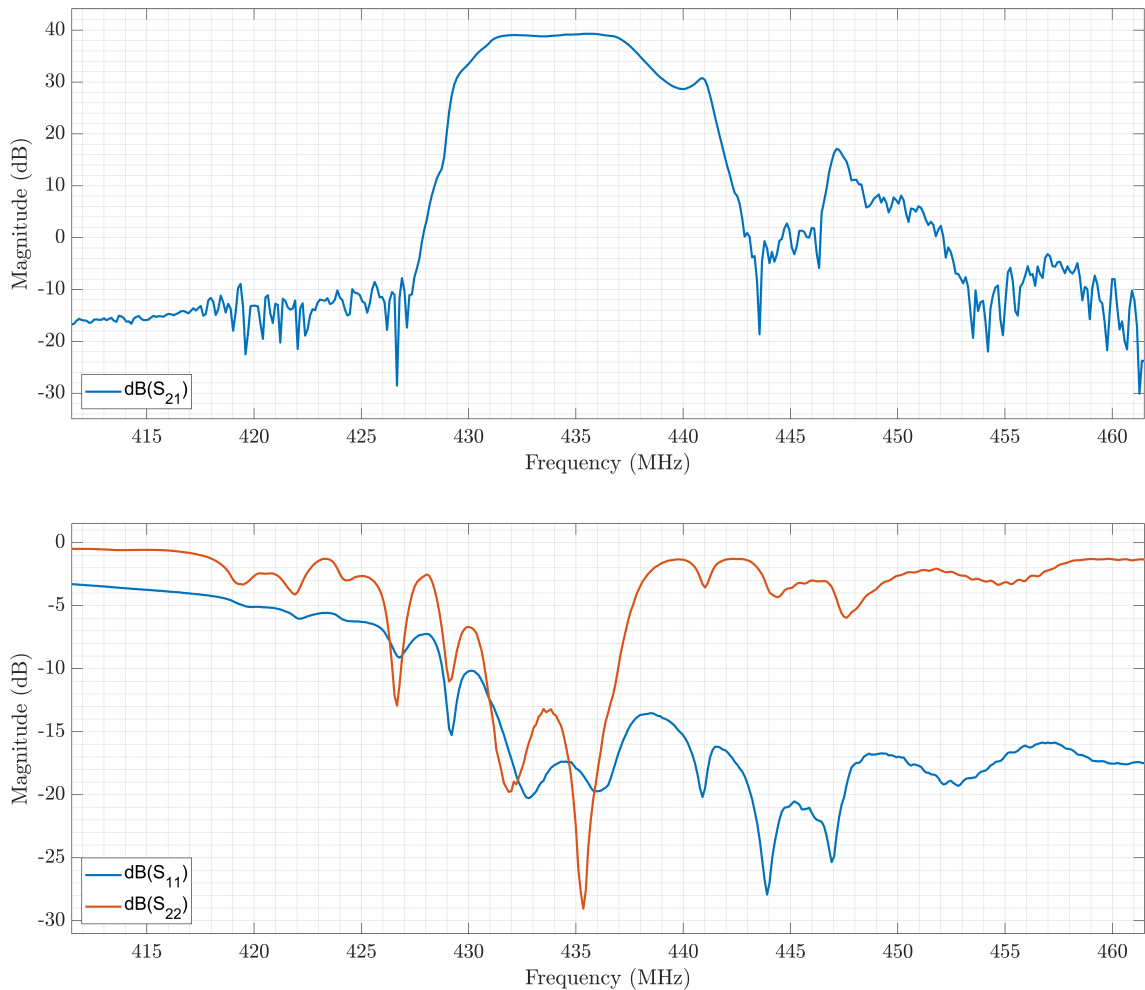
Změřené výsledné S parametry S_{21} , S_{11} a S_{22} jsou vykresleny na obrázku 7.1. Z měření vyplývá, že při porovnání s ideálně naladěným paralelním rezonančním obvodem pomocí kondenzátorových trimrů, vybrané SMD kondenzátory nemají zásadní vliv na zisk v kmitočtech kolem 435 MHz. Rozdíly odrazů na vstupu a výstupu jsou oproti „ideálu“ více patrné, ale přijatelné.



Obr. 7.1: Změřené S parametry vstupního rezonančního obvodu s LNA

7.2 Změřené S parametry vnější jednotky

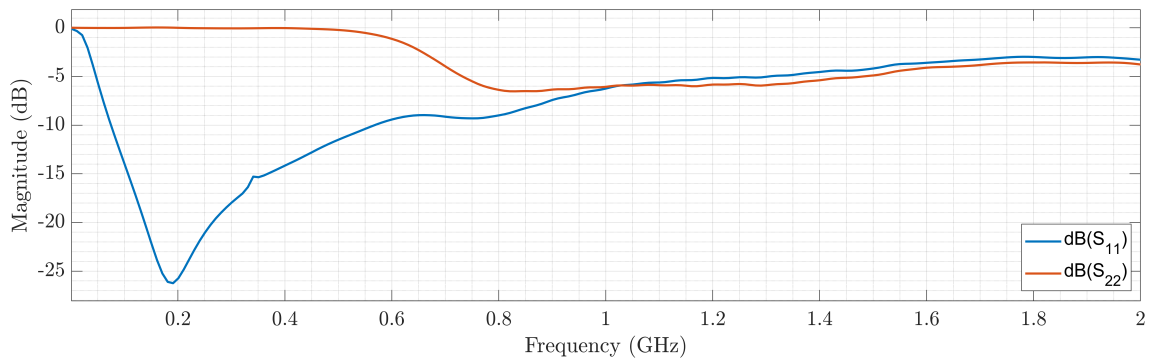
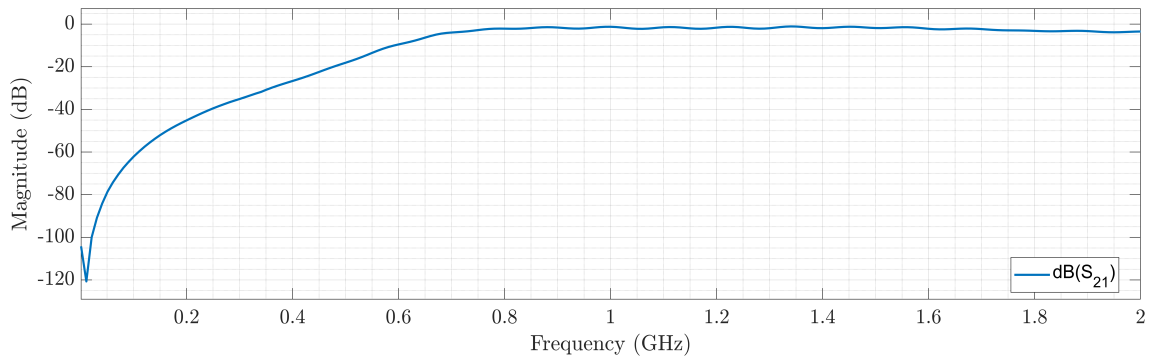
Vysokofrekvenční část se od anténního vstupu skládá ze vstupního rezonančního obvodu, vysokofrekvenčního zesilovače, přepínacího prvku, vysokofrekvenčního zesilovače, SAW filtru a diplexeru. Všechny tyto části mají vliv na výslednou charakteristiku změřeného parametru S_{21} (přenos). Na parametry S_{11} a S_{22} mají zejména vliv obvody na vstupu a výstupu. Změřené S parametry jsou vyneseny na obrázku 7.2. Celkový dosažený zisk se na frekvenci 435 MHz pohybuje okolo 39,2 dB. Charakteristika S_{21} kopíruje přenosovou charakteristika použitého SAW filtru [61]. Činitele odrazu na vstupu S_{11} a výstupu S_{22} vnější jednotky se pohybují okolo -18 dB a -23 dB. Změřené charakteristiky pro všech pět vstupů jsou v podstatě identické, proto jsou zde uvedeny jen pro vstup *ANT1*.



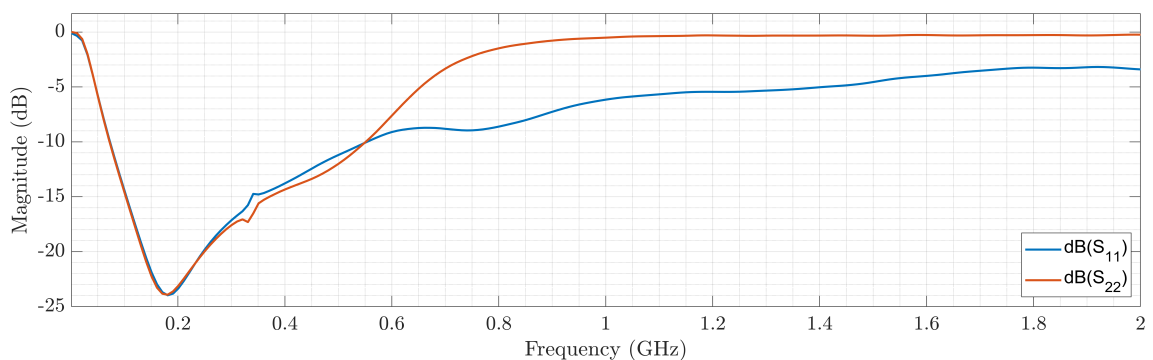
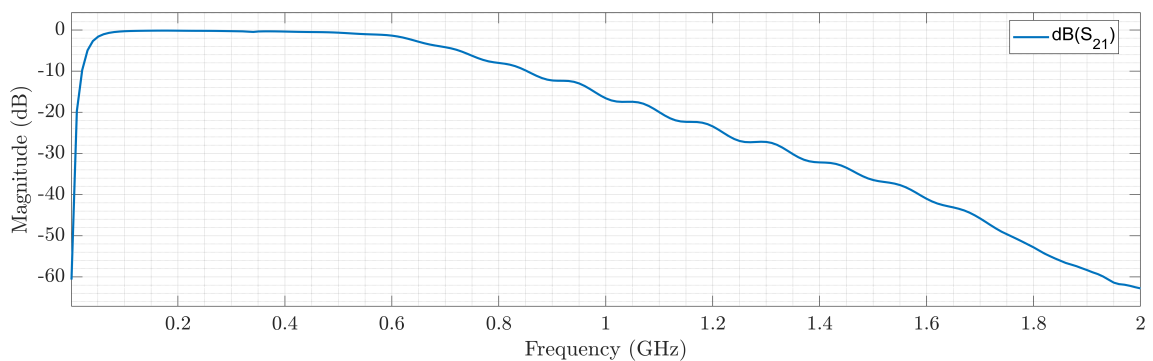
Obr. 7.2: Změřené S parametry vstupního rezonančního obvodu s LNA

7.3 Změřené S parametry vnitřní jednotky

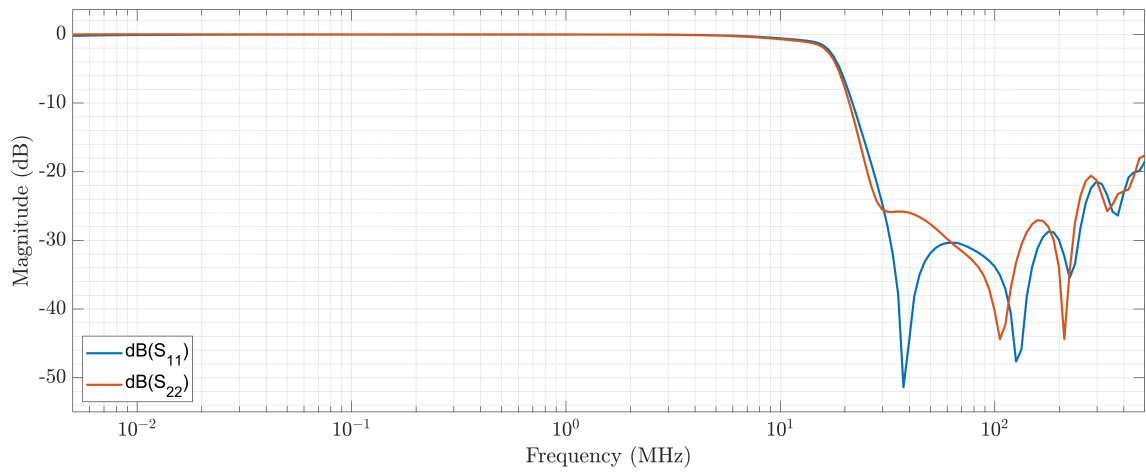
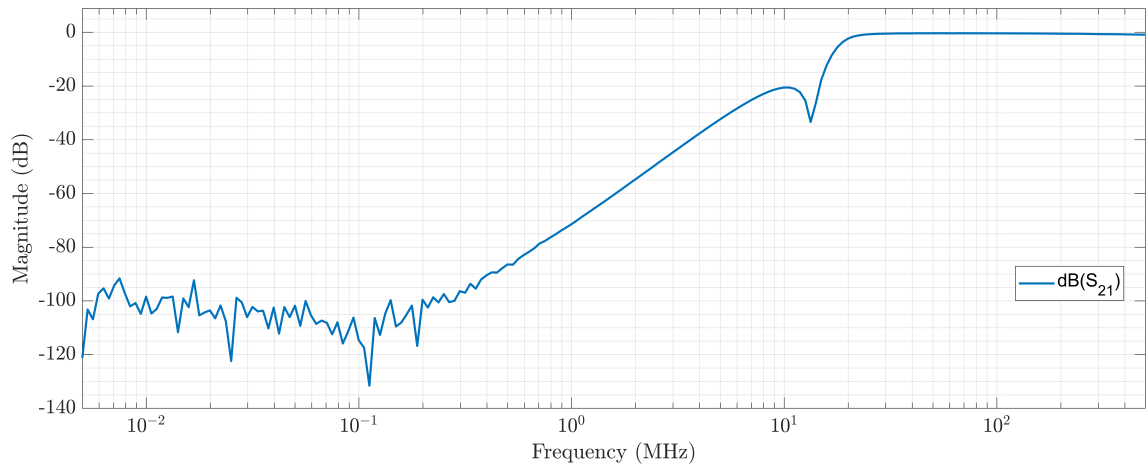
Hlavním úkolem vnitřní jednotky je separovat pomocí diplexerů sloučené signály přivedené z vnější jednotky. Změřené charakteristiky S parametrů jsou uvedeny na obrázcích 7.3, 7.4 a 7.5. Z měření vyplývá, že útlum signálu v propustných větvích diplexerů se pohybuje okolo desetin decibelů. Při měření byl port 1 připojen ke společnému vstupu diplexeru a port 2 k měřené větvi diplexeru. Druhá větev byla zakončena 50Ω impedancí. Největší odrazy na vstupu a výstupu se vyskytují u GPS větve diplexeru UHF/GPS. S_{11} a S_{22} se tam pohybují na frekvenci 1,575 GHz okolo -4 dB. U diplexeru UHF/LIN není LIN větev zakončena 50Ω impedancí, což vyplývá z návrhu zapojení.



Obr. 7.3: Změřené S parametry GPS větve UHF/GPS diplexeru vnitřní jednotky, port 1 - společný vstup, port 2 - GPS výstup, UHF větev zakončena 50Ω



Obr. 7.4: Změřené S parametry UHF (435 MHz) větve UHF/GPS diplexeru vnitřní jednotky, port 1 - společný vstup, port 2 - UHF výstup, GPS větev zakončena 50Ω



Obr. 7.5: Změřené S parametry UHF (435 MHz) větve UHF/LIN diplexeru vnitřní jednotky, port 1 - společný vstup, port 2 - UHF výstup, LIN větev nepřizpůsobena

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem zařízení, které umožní přepínání vysokofrekvenčního signálu z družic, přijímaného pěti anténami a zajistí jeho předzesílení. Výsledný návrh sestává ze dvou jednotek, vnitřní a vnější.

Vnější jednotka zajišťuje samotné přepínání signálu z antén a umožňuje jednoduchou diagnostiku správného fungování pomocí měření proudu, jež je odebírán předzesilovači, měření fantomového napájecího napětí a okolní teploty. Přenos dat a řídicích povelů mezi uživatelským počítačem a vnější jednotkou je zajištěn pomocí UART rozhraní. Komunikace probíhá po fyzické vrstvě sběrnice LIN.

Dále byla navržena vnitřní jednotka obsahující duplexer, který rozděluje privádný vysokofrekvenční signál z vnější jednotky. Také slouží k přivedení napájecího fantomového napětí k vnější jednotce přepínače a umožňuje komunikaci mezi přepínačem a uživatelským počítačem pomocí USB/UART převodníku MCP2200.

Pro zařízení byly s ohledem na požadavky vybrány vhodné komponenty (mikrokontroler ATmega328PB, teplotní senzor MCP9808...) a případně byly uvedeny jejich možné alternativy. Velká pozornost byla věnována výběru samotného přepínacího prvku. Po důkladném nastudování problematiky vysokofrekvenčních přepínačů byl vybrán integrovaný obvod AS195-306LF od výrobce Skyworks.

Dále byly v programu Autodesk Eagle navrženy schémata zapojení vnitřní a vnější jednotky přepínače a byly navrženy desky plošných spojů. U vnější jednotky se jedná o dvě zkombinovaná zapojení pro přepínání vertikální a horizontální polarizace přijímaného signálu. Touto kombinací bylo docíleno možnosti navrhnout jednu desku plošných spojů pro obě varianty a zvolit ji pouze osazením nebo neosazením určitých součástek. To mimo jiné snižuje náklady na výrobu. Obě desky plošných spojů byly navrženy jako dvouvrstvé, což u vnější jednotky vedlo k nutnosti vést některé vodivé cesty pomocí propojovacích drátů. Tento problém by bylo možné vyřešit použitím čtyřvrstvé desky plošných spojů.

Navržené desky plošných spojů byly osazeny součástkami a byla otestována funkčnost návrhu. Byl vyladěn vstupní rezonanční obvod vnější jednotky. Také byly změřeny vysokofrekvenční parametry. Dosažený výkonový zisk signálu, který zajišťují dva vysokofrekvenční zesilovače PGA-103+ na vnější jednotce se pohybuje okolo 39 dB (na frekvenci 435 MHz). Činitele odrazu na vstupu S_{11} a výstupu S_{22} vnější jednotky se pohybují okolo -18 dB a -23 dB.

Pro mikrokontroler umístěný na vnější jednotce byl napsán firmware v jazyce C, který zajišťuje řízení přepínacího prvku a také zjišťování diagnostických dat. Zároveň umožňuje reagovat na požadavky z řídicího programu na uživatelském počítači. Ten byl napsán v jazyce Python a umožňuje uživateli prostřednictvím grafického rozhraní, mimo jiné, zobrazovat diagnostická data z vnější jednotky a volit mezi

automatickým nebo manuálním přepínání antén.

Celé zařízení je společně s ovládacím programem pro uživatelský počítač plně funkční. Při osazování a testování funkčnosti byly odhaleny některé chyby, které byly opraveny v druhé verzi návrhu desek plošných spojů, která je součástí přílohy. Vnější jednotka varianty B nebyla osazena všemi komponenty (zvláště pak vysokofrekvenční část), ale jen těmi, které byly nezbytně nutné pro otestování její funkčnosti a kooperace s variantou A.

Literatura

- [1] ANALOG DEVICES. *IP3 and Intermodulation Guide*. Online. In: ANALOG DEVICES. Analog Devices. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/ip3-and-intermodulation-guide.html>. [cit. 2023-10-08].
- [2] BORA, Akash. *CTkMessagebox*. Python modul. Aug 22, 2023. Dostupné z: <https://github.com/Akascape/CTkMessagebox>. [cit. 2024-04-06].
- [3] CADENCE, System Analysis. *RF MEMS Switches Provide Superior Performance Over Solid-State Switches*. Online. In: Cadence. Dostupné z: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-rf-mems-switches-provide-superior-performance-over-solid-state-switches>. [cit. 2023-10-22].
- [4] CONTRIBUTORS, Wikipedia. *RF switch*. Online. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2021. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/RF_switch. [cit. 2023-10-10].
- [5] CONTRIBUTORS, Wikipedia. *AVR microcontrollers*. Online. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia. 23 December 2023. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/AVR_microcontrollers. [cit. 2023-12-26].
- [6] DIGIKEY'S NORTH AMERICAN EDITORS. *How and Why to Use PIN Diodes for RF Switching*. Online. In: DIGIKEY. DigiKey. 2016. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/articles/how-and-why-to-use-pin-diodes-for-rf-switching>. [cit. 2023-10-09].
- [7] FLEURY, Peter. *UART library: AVR Software*. Knihovna v C. Peter Fleury Online: AVR Software. ©2019. Dostupné z: <http://www.peterfleury.epizy.com/uartlibrary.zip>. [cit. 2024-04-06].
- [8] FRÝZA, Tomáš. *Twi library*. Knihovna v C. Twi library. Oct 31, 2023. Dostupné z: <https://github.com/tomas-fryza/avr-course/tree/master/solutions/lab6-i2c-oled/lib/twi>. [cit. 2024-04-06].
- [9] HAMMOND, Mark. *Pywin32*. Python modul. Dostupné z: <https://pypi.org/project/pywin32/>. [cit. 2024-04-06].
- [10] HINDLE, Pat (ed.). *The State of RF and Microwave Switches*. Online. In: Microwave Journal. 2010. Dostupné z: <https://www.microwavejournal.com/articles/10269-the-state-of-rf-and-microwave-switches>. [cit. 2023-10-22].

- [11] KEYSIGHT. *Understanding Solid State Switches and Their Applications*. Online. In: KEYSIGHT. *Understanding RF/Microwave Solid State Switches and their Applications*. 2017. Dostupné z: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-01705/application-notes/5989-7618.pdf>. [cit. 2023-10-08].
- [12] LIECHTI, Chris. *PySerial*. Python modul. PySerial. ©2001-2015. Dostupné z: <https://pythonhosted.org/pyserial/>. [cit. 2024-04-06].
- [13] ORFANIDIS, Sophocles J. *Electromagnetic Waves and Antennas*. Online PDF. In: Ece.rutgers.edu. 2016, August 1, 2016. Dostupné z: <https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ewa-2up.pdf>. [cit. 2024-04-11].
- [14] PETER BACON, Peregrine Semiconductor; DREW FISCHER AND RUAN LOURENS, National Instruments a ABDULRAHIM, Samir. *Overview of RF Switch Technology and Applications*. Online. In: *Microwave Journal*. 2014. ISSN 0192-6225. Dostupné z: <https://www.microwavejournal.com/articles/22557-overview-of-rf-switch-technology-and-applications>. [cit. 2023-10-22].
- [15] POZAR, David M. *Microwave engineering*. 4th ed. John Wiley & Sons, 2012. ISBN 978-0-470-63155-3.
- [16] ŘEPKA, Michal. *DDE protokol*. Online. Dokumentační portál Centra informačních technologií VŠB-TUO. Last modified 2009-10-26. Dostupné z: https://home1.vsb.cz/~rep75/Predmety/Distrib_sys/Vytah/05.htm. [cit. 2024-04-06].
- [17] SCHIMANSKY, Tom. *CustomTkinter*. Python modul. CustomTkinter. ©2024. Dostupné z: <https://customtkinter.tomschimansky.com/>. [cit. 2024-04-06].
- [18] SCHWEBER, Bill. *Semiconductor RF Switches: Small but High-Performing Circuit Components*. Online. In: DIGIKEY. DigiKey. 2015. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/articles/semiconductor-rf-switches-small-but-high-performing-circuit-components>. [cit. 2023-10-22].
- [19] STOFF, Sebastian. Orbitron 3.71: Satellite Tracking System. Software. In: . ©2001-2005. Dostupné z: <https://www.stoff.pl/downloads.php>. [cit. 2024-04-06].
- [20] SUTORÝ, Tomáš. LIN (Local Interconnect Network). Online. *Elektrorevue*. 2004, roč. 2004, č. 12. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04012/index.html>. [cit. 2023-10-23].

- [21] SÝKORA, Jan. *Vnější část přijímacího systému družicových signálů v pásmu UHF*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Tomáš Urbanec. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2020. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=209643. [cit. 2023-12-26].
- [22] VÁGNER, Petr. *Vysokofrekvenční technika: Skripta*. Online. FEKT VUT v Brně, 2013.
- [23] VK1SV. *VK1SV duplexer calculator*. Online. The VK1SV duplexer calculator. Dostupné z: <https://people.physics.anu.edu.au/~dxt103/calculators/duplexer.php>. [cit. 2023-11-19].
- [24] WIKIPEDIE, Příspěvatelé. *DiSEqC*. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Aktualizováno 10. 8. 2021. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/DiSEqC>. [cit. 2024-05-03].
- [25] STMICROELECTRONICS N.V. *LIS2MDL: Data sheet*. Online katalogový list. In: STMICROELECTRONICS N.V. ST. Rev 5. 2018. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis2mdl.pdf>. [cit. 2023-10-25].
- [26] NXP SEMICONDUCTORS. *TJA1020 LIN transceiver: Data sheet*. Online katalogový list. In: NXP SEMICONDUCTORS. NXP. ©2004. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/TJA1020.pdf>. [cit. 2023-10-25].
- [27] PHILIPS SEMICONDUCTORS. *TJA1020 LIN transceiver: Application note*. Online PDF. In: NXP. Rev. 02. 2005. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN00093.pdf>. [cit. 2023-10-25].
- [28] ANALOG DEVICES, INC. *ADRF5250: Data sheet*. Online katalogový list. In: ANALOG DEVICES. Analog Devices. C2017. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADRF5250.pdf>. [cit. 2023-10-22].
- [29] SKYWORKS SOLUTIONS, INC. *AS195-306LF: PHEMT GaAs IC High-Power SP5T Switch 0.1 to 2 GHz: Data sheet*. Online katalogový list. In: SKYWORKS SOLUTIONS. Skyworks Solutions. © 2002-2007, 2016. Dostupné z: https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/1-100/AS195_306LF_200187D.pdf. [cit. 2023-10-22].
- [30] MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. *PIN diode RF switches*. Online. In: MICROCHIP TECHNOLOGY. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: <https://www.microchip.com>.

- [//www.microsemi.com/sites/default/files/datasheets/Products/rf/CAPTER%202.pdf](https://www.microsemi.com/sites/default/files/datasheets/Products/rf/CAPTER%202.pdf). [cit. 2023-10-22].
- [31] RENESAS ELECTRONICS CORPORATION. *F2915 Datasheet: Data sheet*. Online katalogový list. In: Renesas. Rev.1.0. ©2021. Dostupné z: <https://www.renesas.com/us/en/document/dst/f2915-datasheet>. [cit. 2023-10-22].
- [32] SKYWORKS SOLUTIONS, INC. *SKY13415-485LF: 0.1 to 3.8 GHz SP5T Antenna Switch: Data sheet*. Online katalogový list. In: SKYWORKS SOLUTIONS. Skyworks Solutions. ©2011-2016. Dostupné z: https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/701-800/SKY13415_485LF_201704I.pdf. [cit. 2023-10-22].
- [33] ANALOG DEVICES, INC. *HMC252AQS24E: Data sheet*. Online katalogový list. In: Analog Devices. V01.0316. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc252a.pdf>. [cit. 2023-10-22].
- [34] *Northeastern University Microswitch contacts*. Online. In: Northeastern University. Dostupné z: <https://web.northeastern.edu/memswitch/>. [cit. 2023-10-23].
- [35] TEXAS INSTRUMENTS, INC. *Understanding the I2C Bus: Application Report*. Online PDF. In: TEXAS INSTRUMENTS, INC. Ti.com. 2015. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf?ts=1699244609946>. [cit. 2023-11-19].
- [36] MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. *AVR® Microcontroller Hardware Design Considerations: Application note*. Online PDF. In: MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. Microchip.com. ©2018. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ApplicationNotes/ApplicationNotes/AN2519-AVR-Microcontroller-Hardware-Design-Considerations-00002519B.pdf>. [cit. 2023-11-19].
- [37] TEXAS INSTRUMENTS, INC. *LM2940x 1-A Low Dropout Regulator: Data sheet*. Online katalogový list. In: TEXAS INSTRUMENTS, INC. Ti.com. 2000, REVISED DECEMBER 2014. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2940-n.pdf?ts=1700399384615>. [cit. 2023-11-19].
- [38] NXP SEMICONDUCTORS. *BGU6104: Data sheet*. Online katalogový list. In: NXP SEMICONDUCTORS. Nxp.com. ©2012, 3 February 2012. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BGU6104.pdf>. [cit. 2023-12-26].

- [39] MINI CIRCUITS TECHNOLOGIES. *PGA-105+: Data sheet*. Online katalogový list. In: MINI CIRCUITS TECHNOLOGIES. Minicircuits.com. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/pdfs/PGA-105+.pdf>. [cit. 2023-12-26].
- [40] MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. *ATmega328PB: Data sheet*. Online katalogový list. In: MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. Microchip.com. ©2018. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ProductDocuments/DataSheets/40001906C.pdf>. [cit. 2023-12-26].
- [41] MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. *MCP9808: Data sheet*. Online katalogový list. In: MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. Microchip.com. Revision A. ©2011. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/25095A.pdf>. [cit. 2023-12-26].
- [42] LASKAKIT. *3-osý magnetometr a kompas HMC5883L*. Online. In: Laskakit.cz. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/3-osy-magnetometr-a-kompas-hmc5883l/?gclid=Cj0KCQjwmvSoBhD0ARIsAK6aV7hGcETBH1c4WRcwR_PqNbA_3o9J4XdzoGnZQoKA_iZiQq2aMNTGcn0aAoWmEALw_wcB. [cit. 2023-10-25].
- [43] MINI CIRCUITS TECHNOLOGIES. *Mini-Circuits Switches*. Online. In: Minicircuits.com. 1999. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/app/SW13-2.pdf>. [cit. 2023-10-22].
- [44] MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. *Differences between ATmega328/P and ATmega328PB: Application note*. Online katalogový list. In: MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. Microchip.com. ©2016, 11/2016. Dostupné z: https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/Atmel-42559-Differences-between-ATmega328P-and-ATmega328PB_ApplicationNote_AT15007.pdf. [cit. 2023-12-27].
- [45] HONEYWELL. *3-Axis Digital Compass IC HMC5883L: Data sheet*. Online katalogový list. In: Honeywell. ©2010. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/user/related_files/hmc5883l.pdf. [cit. 2023-12-27].
- [46] TEXAS INSTRUMENTS, INC. *TL750M SERIES: Data sheet*. Online katalogový list. In: TEXAS INSTRUMENTS, INC. Ti.com. ©1988—2010, August 2010. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/slvs021n/slvs021n.pdf>. [cit. 2023-12-27].
- [47] MINI CIRCUITS TECHNOLOGIES. *PHA-13LN+: Data sheet*. Online katalogový list. In: MINI CIRCUITS TECHNOLOGIES. Minicircuits.com. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/pdfs/PHA-13LN+.pdf>. [cit. 2023-12-26].

- [48] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Tkinter - Python interface to Tcl/Tk*. Python modul. PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python documentation. ©2001-2024. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html#module-tkinter>. [cit. 2024-04-06].
- [49] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Time - Time access and conversions*. Python modul. Python documentation. ©2001-2024. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/time.html>. [cit. 2024-04-06].
- [50] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Threading - Thread-based parallelism*. Python modul. Python documentation. ©2001-2024. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/threading.html>. [cit. 2024-04-06].
- [51] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Queue - A synchronized queue class*. Python modul. Python documentation. ©2001-2024. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/queue.html>. [cit. 2024-04-06].
- [52] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Datetime - Basic date and time types*. Python modul. Python documentation. ©2001-2024. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/datetime.html>. [cit. 2024-04-06].
- [53] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Webbrowser - Convenient web-browser controller*. Python modul. Python documentation. ©2001-2024. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/webbrowser.html>. [cit. 2024-04-06].
- [54] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Sys - System-specific parameters and functions*. Python modul. Python documentation. ©2001-2024. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/sys.html>. [cit. 2024-04-06].
- [55] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Os - Miscellaneous operating system interfaces*. Python modul. Python documentation. ©2001-2024. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/os.html>. [cit. 2024-04-06].
- [56] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Detail kmitočtového pásma*. Online. ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD [ČTÚ]. Detail kmitočtového pásma. 11.4.2023. Dostupné z: <https://spektrum.ctu.cz/kmitocty/432-438-mhz>. [cit. 2023-12-26].
- [57] MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. *AVR® Microcontroller Hardware Design Considerations*. Online PDF. MICROCHIP TECHNOLOGY. Microchip. ©2018. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ApplicationNotes/ApplicationNotes/AN2519-AVR-M>

- icrocontroller-Hardware-Design-Considerations-00002519B.pdf. [cit. 2023-11-05].
- [58] BROADCOM INC. *AppCAD Design Assistant*. Online. BROADCOM INC. AppCAD Design Assistant. ©2005-2023. Dostupné z: <https://www.broadcom.com/info/wireless/appcad>. [cit. 2023-11-19].
- [59] ASSMANN WSW COMPONENTS GMBH. *SMD And Copper Heat Sinks V-1100-SMD/A-L*. Online. ASSMANN WSW COMPONENTS GMBH. ASSMANN WSW. Dostupné z: <https://www.assmann-wsw.com/en/product/v-1100-smda-1/>. [cit. 2023-12-26].
- [60] EVERYTHING RF. *Microstrip Width Calculator*. Online. Dostupné z: <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/microstrip-width-calculator>. [cit. 2023-12-29].
- [61] EPCOS AG. *SAW Components Data Sheet B3580: Data sheet*. Online PDF. In: Mouser.cz. 2001. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/842/B39431B3580Z810-1217855.pdf>. [cit. 2024-04-10].
- [62] MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. *MCP2200 Breakout Module Users Guide*. Online PDF. In: MICROCHIP TECHNOLOGY. Microchip. ©2012. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/52064a.pdf>. [cit. 2023-11-04].
- [63] TOSHIBA ELECTRONIC DEVICES & STORAGE CORPORATION. *SSM3J355R: Data sheet*. Online katalogový list. In: TOSHIBA ELECTRONIC DEVICES & STORAGE CORPORATION. Toshiba.semicon-storage.com. Rev.1.0. ©2016. Dostupné z: https://toshiba.semicon-storage.com/info/SSM3J355R_datasheet_en_20161130.pdf?did=55743&prodName=SSM3J355R. [cit. 2023-10-28].
- [64] OMRON CORPORATION. *G6K(U)-2F(P)-RF(-S, -T) Surface-mounting High-frequency Relay*. Online. In: Components.omron.com. ©2007-2022. Dostupné z: https://components.omron.com/us-en/sites/components.omron.com.us/files/datasheet_pdf/K242-E1.pdf. [cit. 2023-10-28].
- [65] TEXAS INSTRUMENTS, INC. *INAx180 Low- and High-Side Voltage Output, Current-Sense Amplifiers: Data sheet*. Online katalogový list. In: TEXAS INSTRUMENTS, INC. Ti.com. 2017, REVISED JULY 2022. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina180.pdf?ts=1698465700154&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA180. [cit. 2023-10-28].

- [66] ANALOG DEVICES, INC. *AD626: Data sheet*. Online katalogový list. In: ANALOG DEVICES, INC. Analog.com. Rev. D. ©2003. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad626.pdf>. [cit. 2023-10-28].
- [67] MINI CIRCUITS TECHNOLOGIES. *PGA-103+: Data sheet*. Online katalogový list. In: MINI CIRCUITS TECHNOLOGIES. Minicircuits.com. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/pdfs/PGA-103+.pdf>. [cit. 2023-10-27].
- [68] TEXAS INSTRUMENTS, INC. *TLIN1021-Q1: Data sheet*. Online katalogový list. In: TEXAS INSTRUMENTS, INC. Ti.com. Rev. June 2022. 2019. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlin1021-q1.pdf?ts=1698417303697&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTLIN1021-Q1. [cit. 2023-10-27].

Seznam symbolů a zkratk

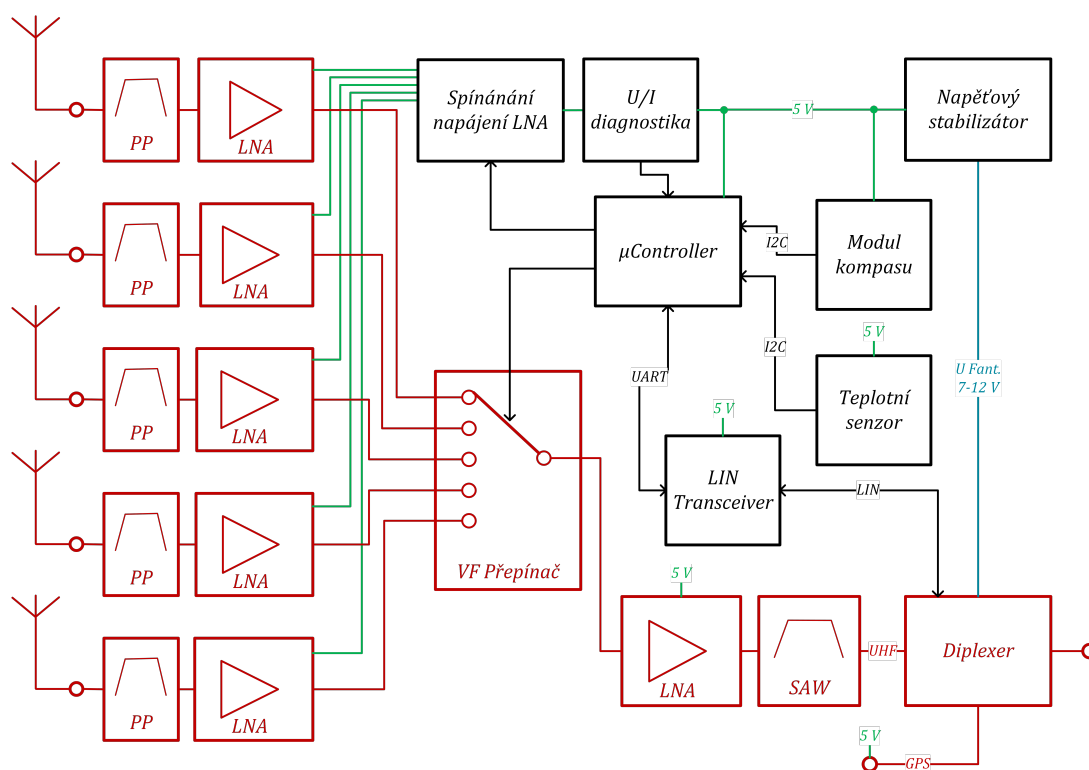
COM	Sériový komunikační port
CSV	Comma-separated values, přípona souboru
DDE	Dynamic Data Exchange
DiSEqC	Digital Satellite Equipment Control
ϵ_r	Relativní permitivita
<i>F</i>	Šumové číslo
FR4	Sklolaminátový epoxidový laminát, podklad pro výrobu desek plošných spojů
<i>G</i>	Zisk
GPIO	General-purpose input/output, univerzální vstupní/výstupní pin
GPS	Global Positioning System, globální družicový polohový systém
I2C	Inter-integrated circuit
IP_3	Bod zahrazení VF zesilovače, kdy třetí intermodulační složka dosáhla úrovně vstupních signálů
LED	Light Emiting Diode, svítivá dioda
LIN	Local Interconnect Network
LNA	Low Noise Amplifier
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
P_{1dB}	Bod jednodéciblové komprese
PSV	Poměr stojatých vln
RISC	Reduced Instruction Set Computer, procesory s redukovanou instrukční sadou
RX	Receiver, přijímač, přijímací část
S_{11}	S-parametr mající význam činitele odrazu na vstupu dvojbranu
S_{21}	S-parametr mající význam přenosu ze vstupu na výstup dvojbranu

S₂₂	S-parametr mající význam činitele odrazu na výstupu dvojbranu
SAW	Surface Acoustic Wave, druh vysokofrekvenčního filtru
SMA	SubMiniature version A, druh vysokofrekvenčního konektoru
SMD	Surface Mount Device
ISP	In System Programming
THT	Through-hole technology
TTL	Transistor-transistor logic
TVS	Transient Voltage Suppressor, druh ochranné diody
TX	Transmitter, vysílač, vysílací část
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
UHF	Ultra-high frequency, UKV, od 300 MHz do 3 GHz
USB	Universal Serial Bus
VF	Vysokofrekvenční

Seznam příloh

A	Blokové schéma vnější jednotky přepínače	71
B	Schéma zapojení a deska plošných vnější jednotky	72
B.1	Schémata zapojení	72
B.2	Deska plošných spojů	75
C	Schéma a deska plošných spojů vnitřní jednotky	77
C.1	Schémata zapojení	77
C.2	Deska plošných spojů	78
D	Fotodokumentace	80
E	Obsah elektronické přílohy	82

A Blokové schéma vnější jednotky přepínače

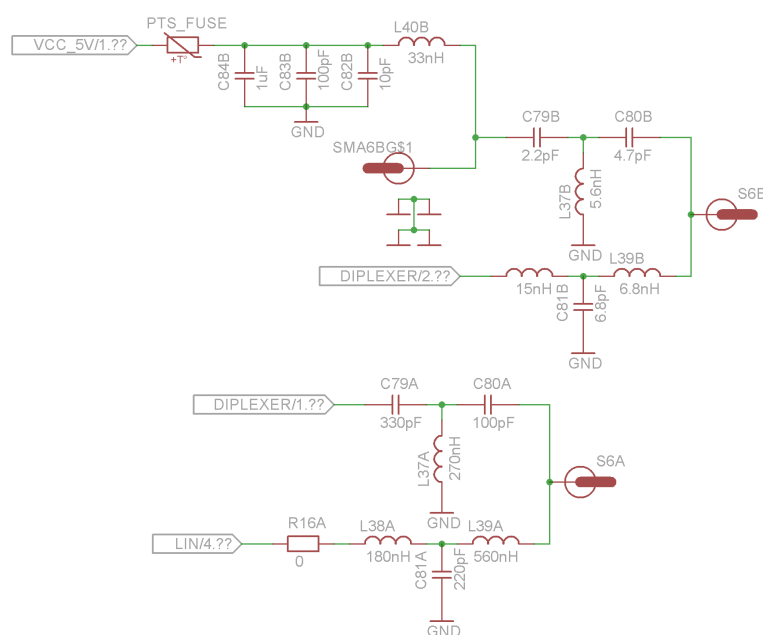


Obr. A.1: Blokové schéma zapojení vnější jednotky navrženého anténního přepínače (červeně je vyznačena vysokofrekvenční část, zelenou barvou je vyznačeno napájení, černě je vyznačeno řízení a nízkofrekvenční část zapojení)

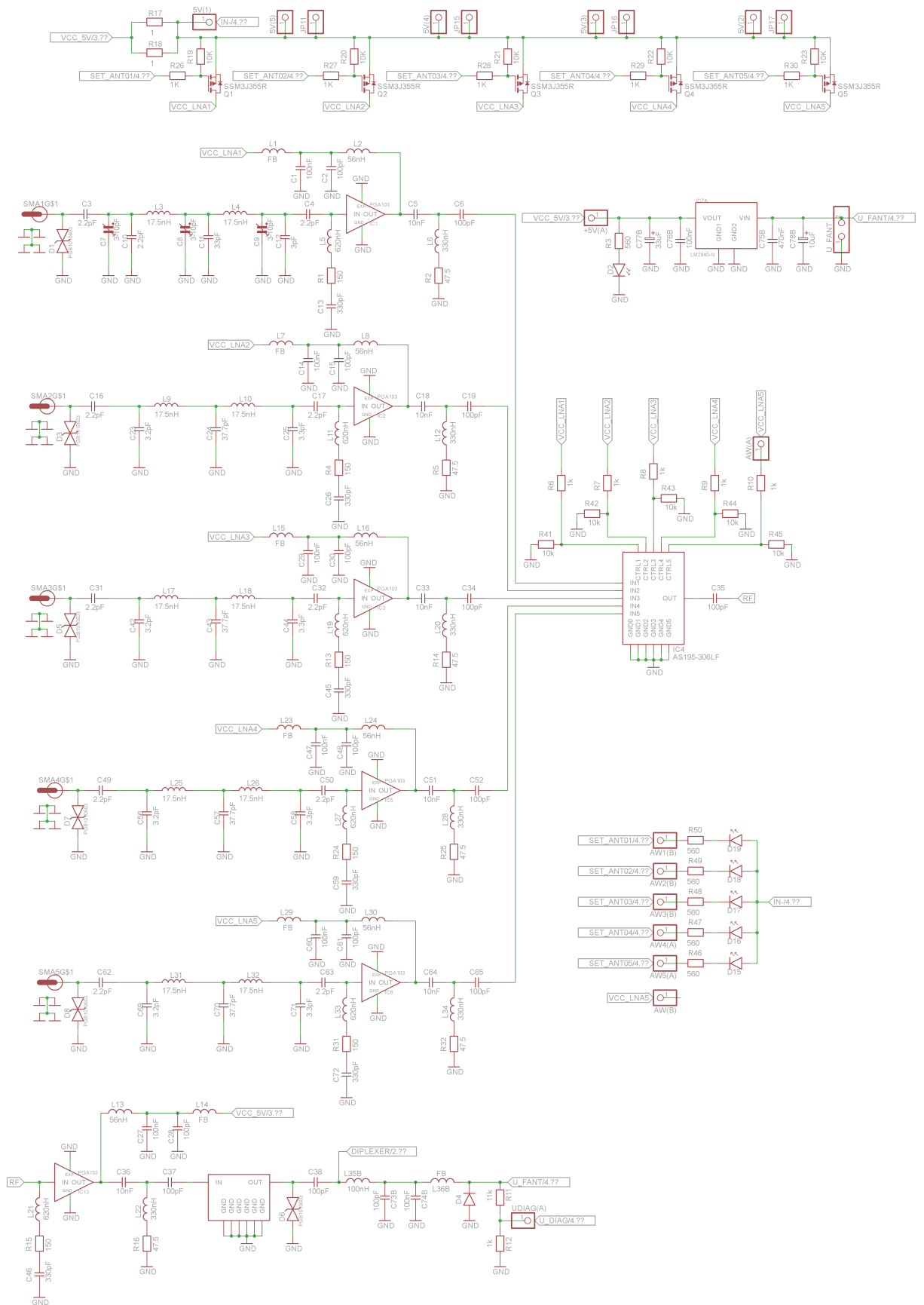
B Schéma zapojení a deska plošných vnější jednotky

Tato příloha obsahuje schémata zapojení vnější jednotky a navrženou desku plošných spojů. Návrh schématu i desky plošného spoje byl proveden v programu Autodesk Eagle verze 5.11.0. Editovatelné soubory .sch a .brd jsou přiloženy v elektronické příloze.

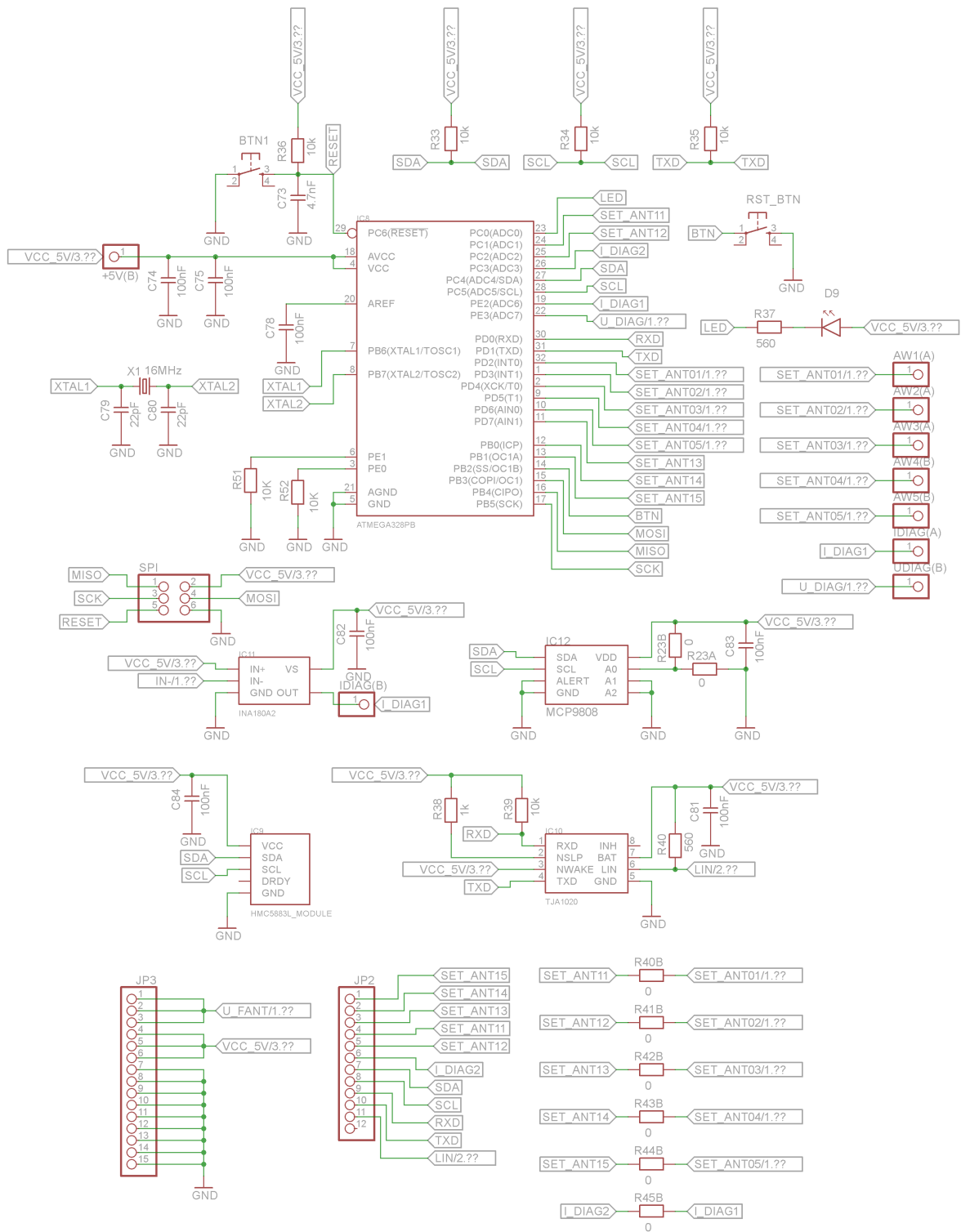
B.1 Schémata zapojení



Obr. B.1: Zapojení diplexeru vnější jednotky pro variantu osazení A a B

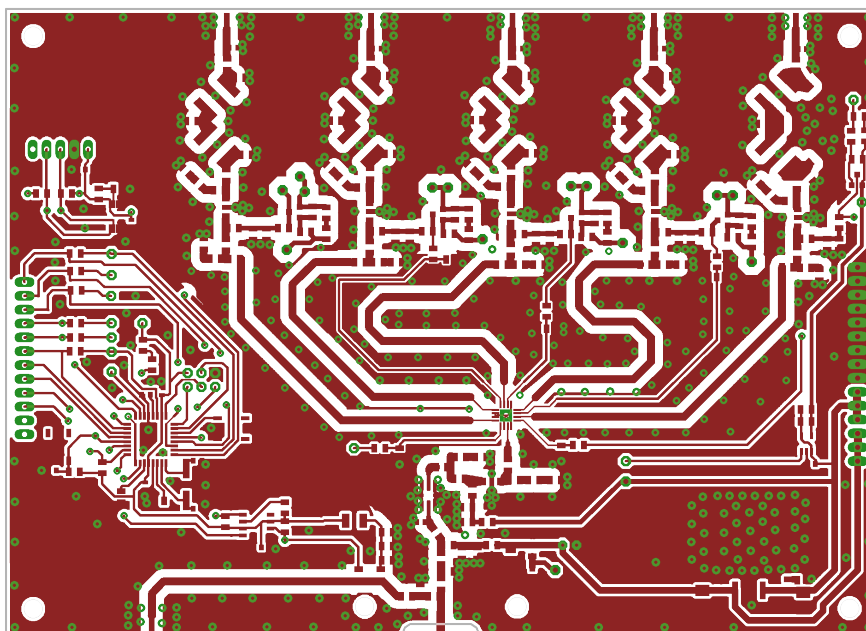


Obr. B.2: Vysokofrekvenční část se zesilovači s řízeným napájením, přepínacím prv-
kem a stabilizátorem napětí

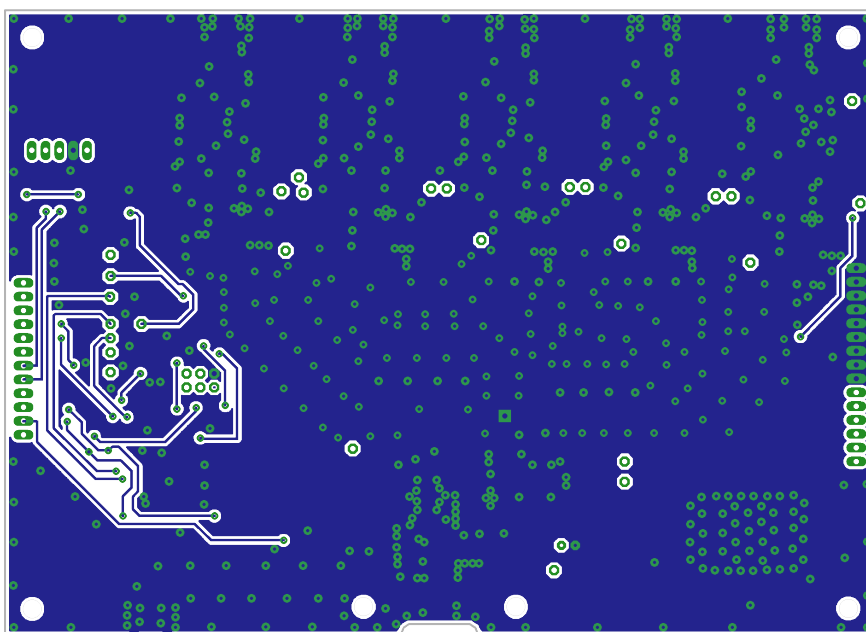


Obr. B.3: Zapojení mikrokontroleru s ostatními integrovanými obvody

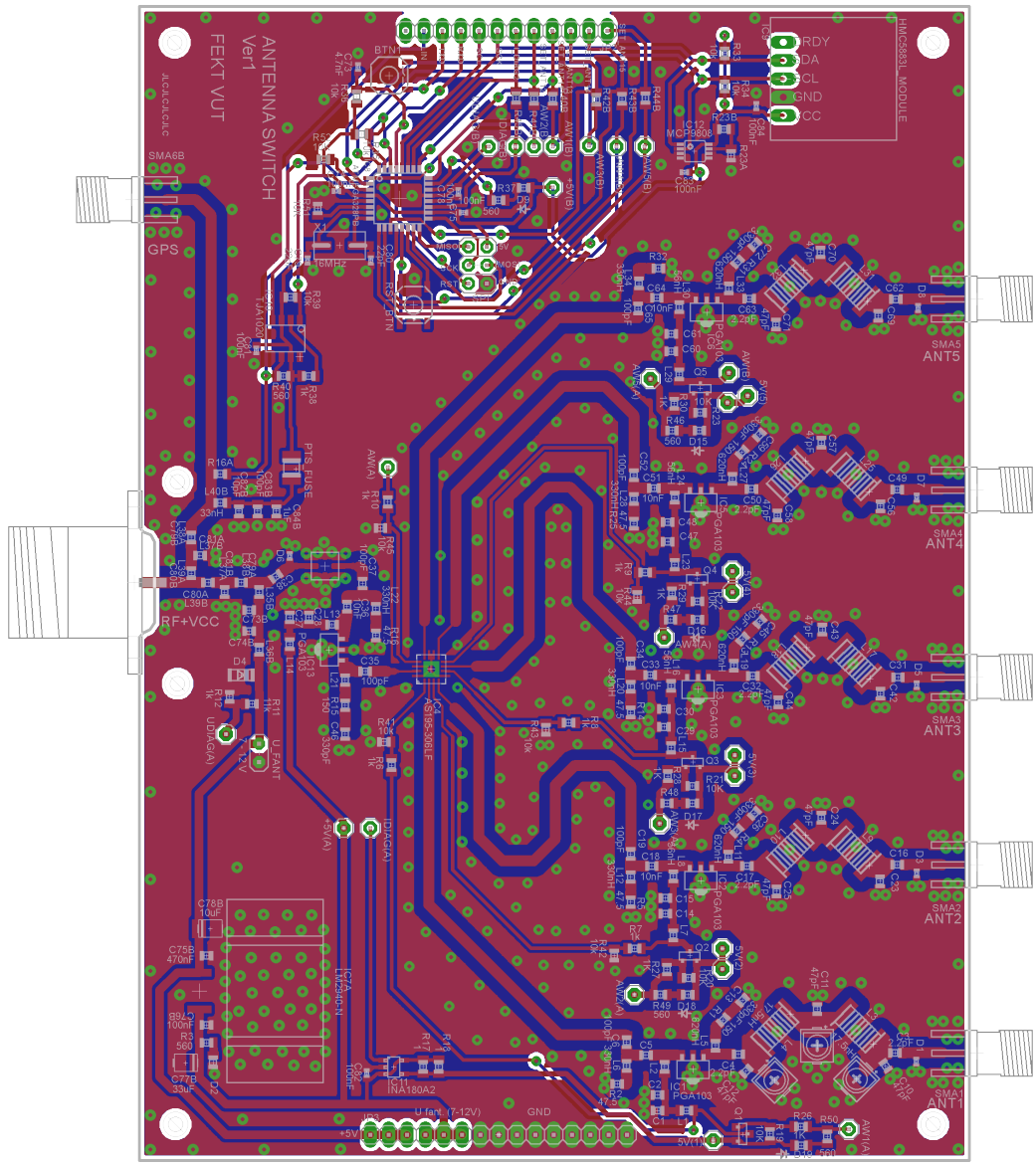
B.2 Deska plošných spojů



Obr. B.4: Navržená deska plošného spoje pro vnější jednotku - horní vrstva ("top"), rozměry 160x114 mm



Obr. B.5: Navržená deska plošného spoje pro vnější jednotku - spodní vrstva ("bottom"), rozměry 160x114 mm

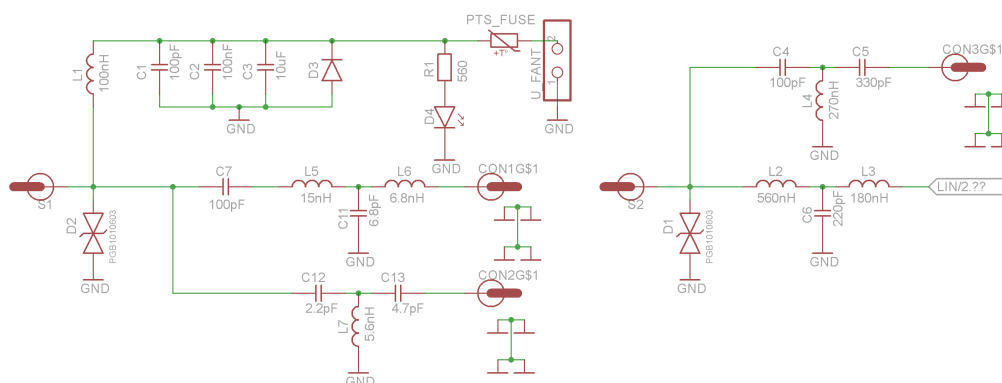


Obr. B.6: Navržená deska plošného spoje pro vnější jednotku přepínače

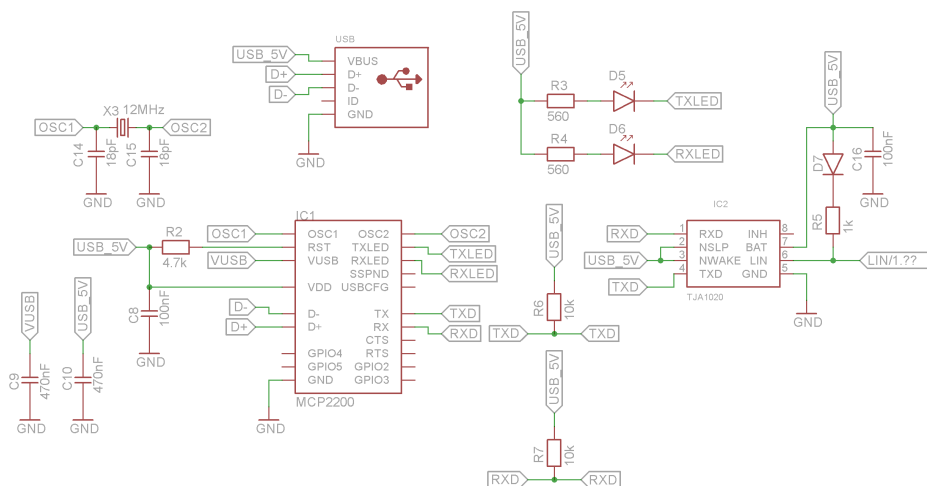
C Schéma a deska plošných spojů vnitřní jednotky

Tato příloha obsahuje schémata zapojení a navrženou desku plošných spojů vnitřní jednotky s převodníkem USB/UART a výhybkou pro přivedení fantomového napětí. Návrh schématu i desky plošného spoje byl proveden v programu Autodesk Eagle verze 5.11.0. Editovatelné soubory .sch a .brd jsou přiloženy v elektronické příloze.

C.1 Schémata zapojení

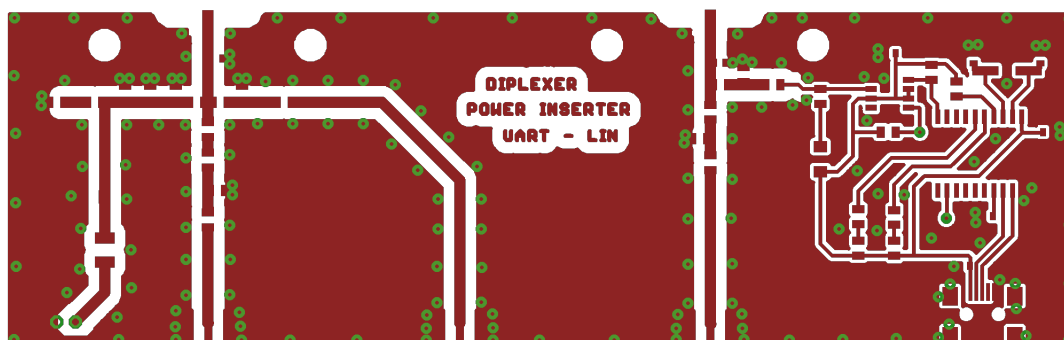


Obr. C.1: Diplexer UHF/GPS s výhybkou pro fantomové napájení a UHF/LIN

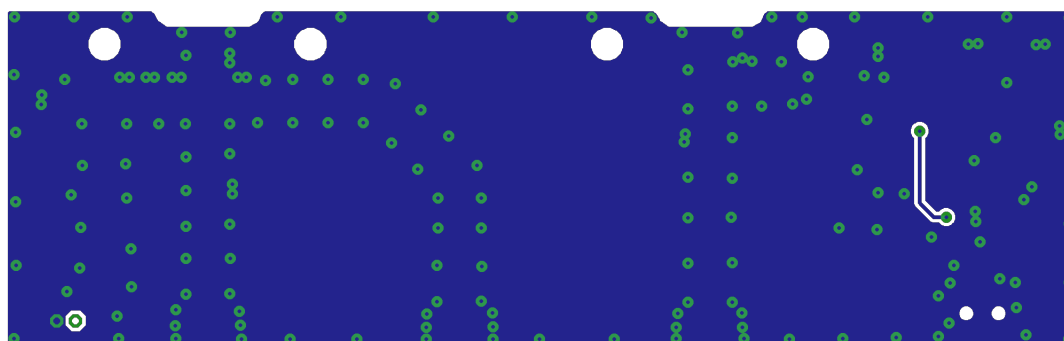


Obr. C.2: Převodník USB/UART s LIN transceiverem

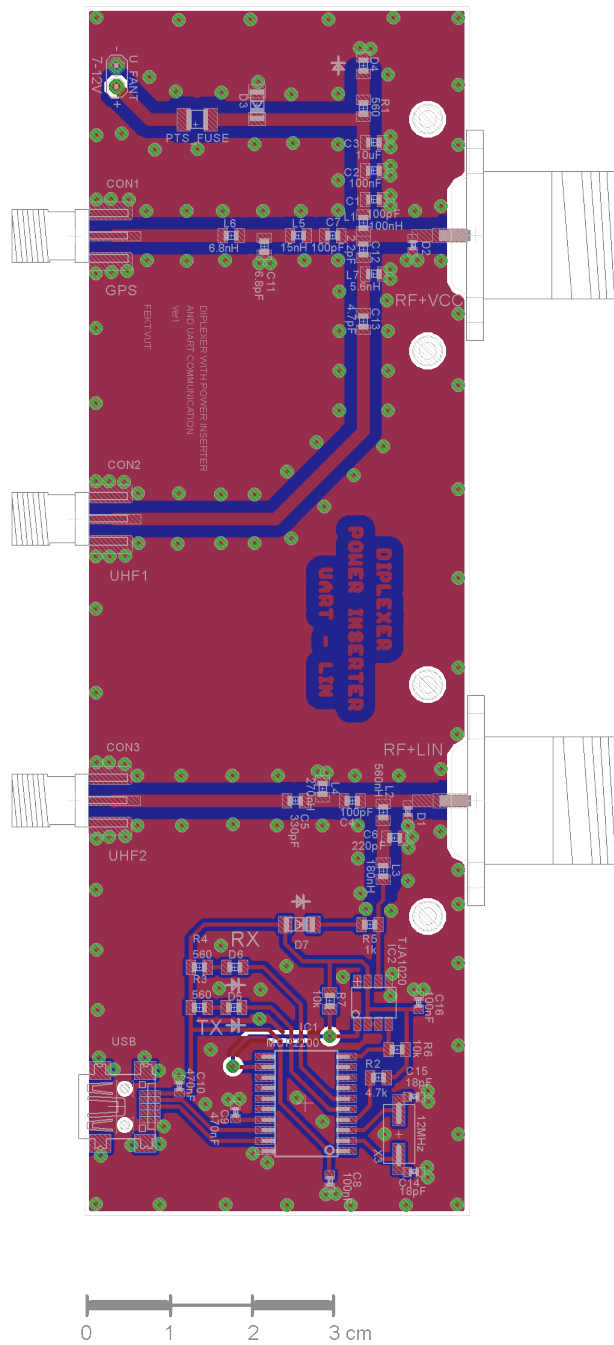
C.2 Deska plošných spojů



Obr. C.3: Návrh desky plošných spojů pro vnitřní jednotku - horní strana ("top"), rozměry 146x46 mm

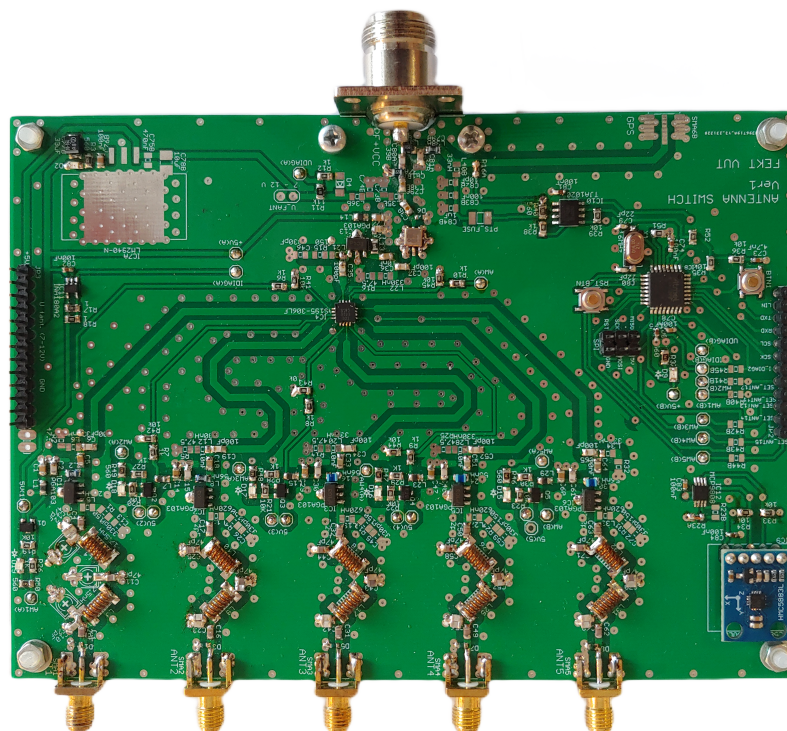


Obr. C.4: Návrh desky plošných spojů pro vnitřní jednotku - spodní strana ("bottom"), rozměry 146x46 mm

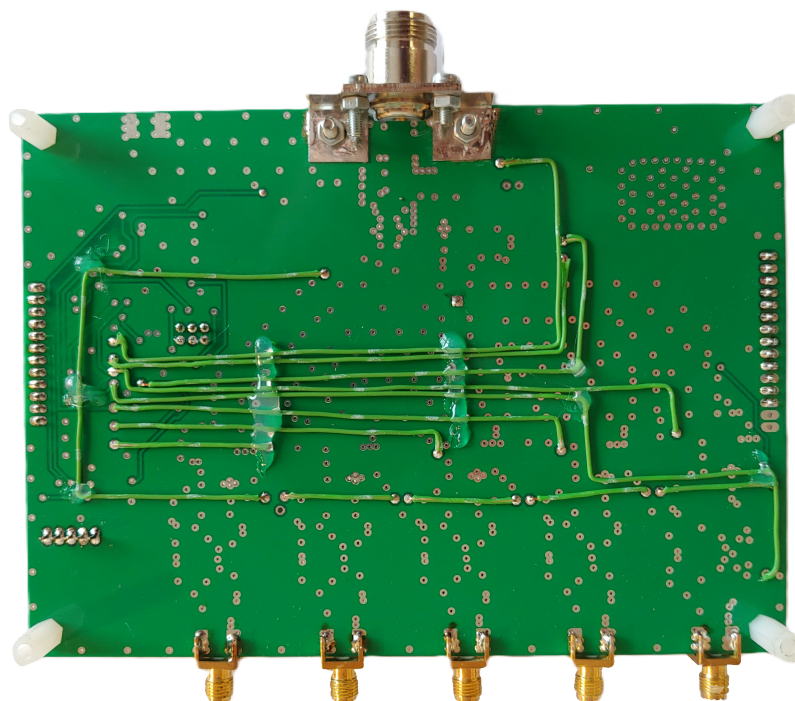


Obr. C.5: Návrh desky plošných spojů vnitřní jednotky

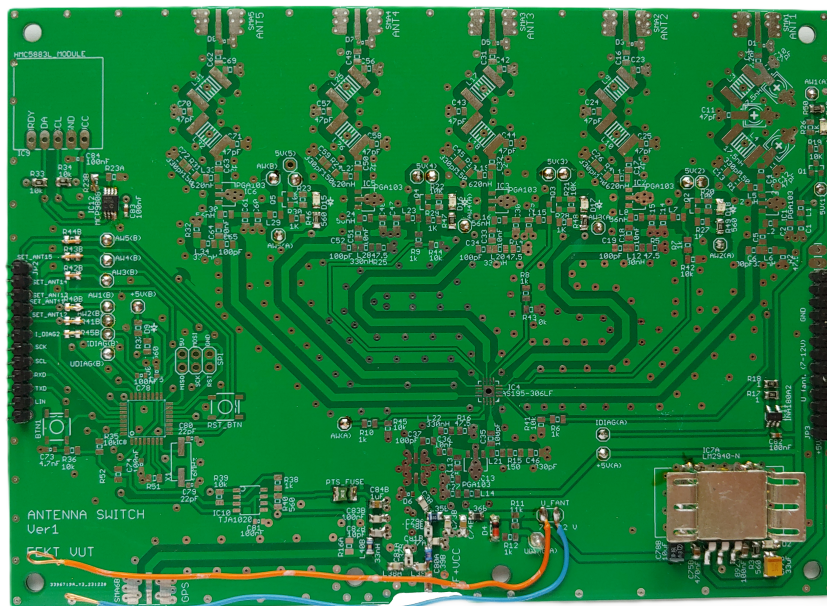
D Fotodokumentace



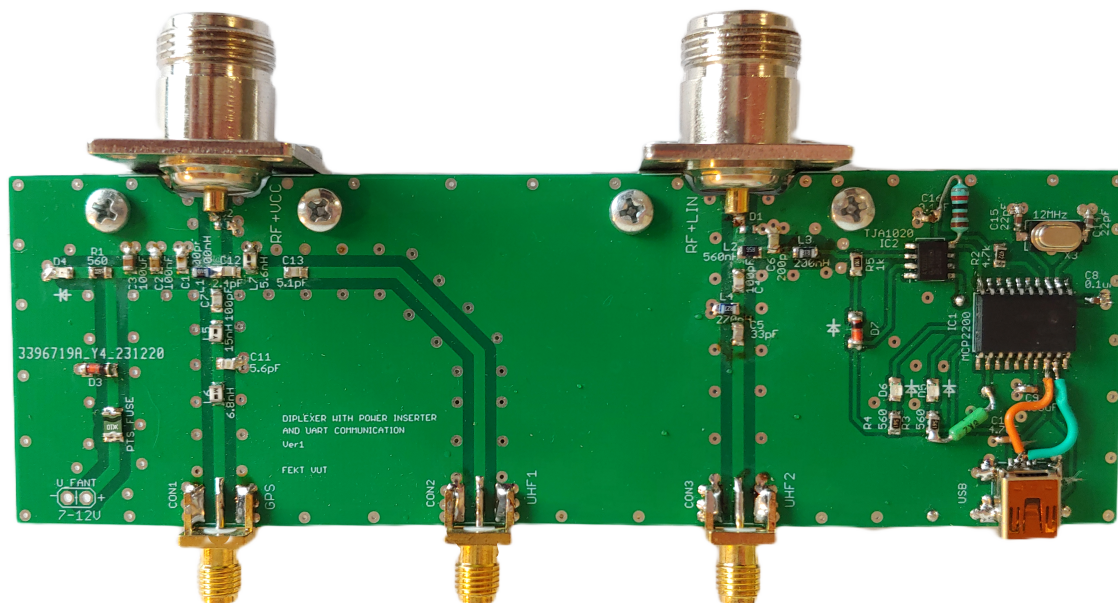
Obr. D.1: Vnější jednotka osazená jako varianta A



Obr. D.2: Vnější jednotka osazená jako varianta A



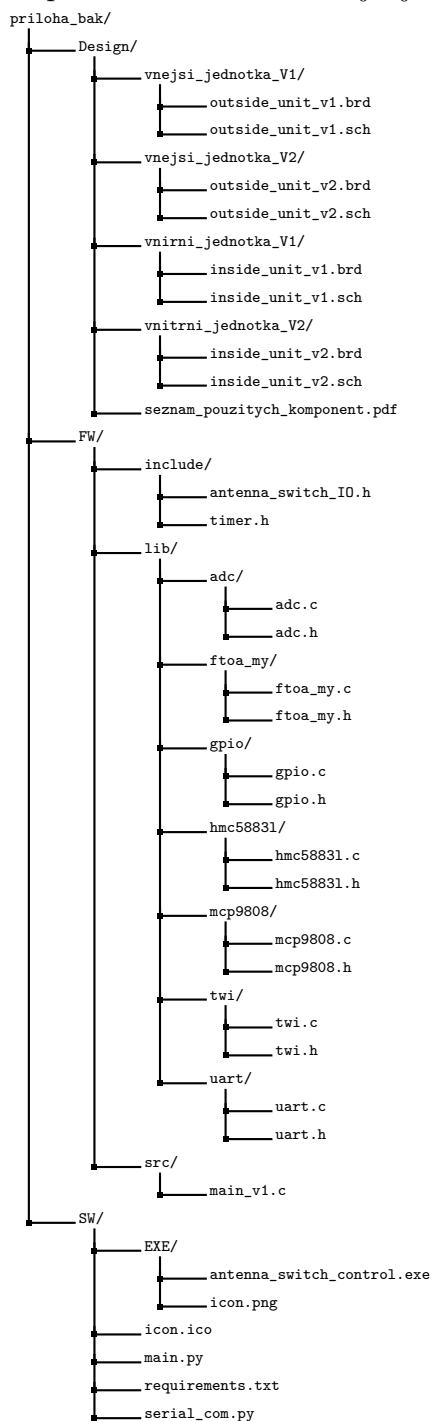
Obr. D.3: Vnější jednotka osazená jako varianta B (pro účely testování byla osazena pouze stabilizátorem napětí, signalizačními LED u každého řídicího signálu pro jednotlivé anténní vstupy a diferenčním zesilovačem INA180A1 a teplotním senzorem MCP9808)



Obr. D.4: Vnitřní jednotka

E Obsah elektronické přílohy

Elektronická příloha obsahuje soubory s příponami .sch a .brd s navrženými schématy a deskami plošných spojů v aplikaci Autodesk Eagle verze 5.11.0. Dále je přiložen software pro uživatelův počítač¹ (se seznamem potřebných modulů) a firmware pro mikrokontroler vnější jednotky². Jedná se o tyto soubory:



¹ SW dostupné na Githubu: https://github.com/vaclav-kubes/Antenna_switch_control_SW

² FW dostupné na Githubu: https://github.com/vaclav-kubes/Antenna_switch_control_FW